

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Excelencia que trasciende

DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE SISTEMAS DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA DE LADRILLO CONFINADOS, CON SOLERA INTERMEDIA
CONTRA REFUERZO HORIZONTAL, CARGADOS LATERALMENTE”**

Trabajo de investigación presentado por los siguientes estudiantes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil:

Luisa María Lago Cifuentes

Hiram Francisco Castillo Sierra

Bonnard Tobar Chávez

Leonnell Yon León

Héctor Rafael Díaz Alarcón

Guatemala

2011

**ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE SISTEMAS DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA DE LADRILLO CONFINADOS, CON SOLERA INTERMEDIA
CONTRA REFUERZO HORIZONTAL, CARGADOS LATERALMENTE**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE SISTEMAS DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA DE LADRILLO CONFINADOS, CON SOLERA INTERMEDIA
CONTRA REFUERZO HORIZONTAL, CARGADOS LATERALMENTE”**

Trabajo de investigación presentado por los siguientes estudiantes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil:

Luisa María Lago Cifuentes

Hiram Francisco Castillo Sierra

Bonnard Tobar Chávez

Leonel Yon León

Héctor Rafael Díaz Alarcón

Guatemala

2011

Vo. Bo. :

(f) _____

Ing. Luis Alberto Díaz Coto

Asesor

Tribunal examinador:

(f) _____

Ing. Roberto Gödo Levensen

(f) _____

Ing. Diego Castellanos Gutiérrez

(f) _____

Ing. Luis Alberto Díaz Coto

Fecha de aprobación: Guatemala, 28 de Enero de 2011

CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES	xi
LISTA DE TABLAS	xvii
RESUMEN	xx
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
A. Trabajo de Meli.....	4
B. Trabajo de Hernández y Meli.	6
C. El Centro Nacional de Prevención de Desastres –CENAPRED-.....	8
D. Luders e Hidalgo.....	9
E. Investigaciones nacionales.	9
F. Construcciones sismoresistentes.	9
1. Terremotos y sismoresistencia.	9
G. Generalidades del comportamiento sísmico en la mampostería.	13
1. Mampostería no reforzada.....	13
2. Mampostería confinada.	15
3. Mampostería reforzada interiormente (“integral”).....	16
H. Amenaza sísmica.....	17
I. Sismo resistencia.....	17
J. Criterios del diseño sísmico.	21
1. Objetivos del diseño sísmico.....	21
2. Aspectos principales del diseño sísmico.	23
3. Enfoques del diseño sísmico.	24
K. Comportamiento mecánico de los materiales en la mampostería.....	24
1. Unidades de mampostería.....	25
2. Morteros de pega.....	26
3. Esfuerzos de la mampostería ensamblada.	30
L. Comportamiento de elementos de mampostería a compresión.....	30
1. Métodos de prueba.....	30
2. El papel del mortero.	34

3. Selección del esfuerzo a compresión de la mampostería basado en el esfuerzo a compresión resistido por los tipos de unidades y morteros utilizados.	34
4. Módulo de elasticidad.	37
M. Comportamiento de elementos de mampostería a compresión diagonal (Cortante).	37
1. Métodos de prueba.....	37
2. Piezas y morteros.....	38
3. Módulo de rigidez a cortante.	39
4. Modos de falla y resistencia.	40
5. Modelado de la mampostería.....	40
N. Mampostería como sistema constructivo.....	40
1. Conceptos básicos de los muros de mampostería.	41
2. Aspectos reglamentarios relevantes en reglamentos de construcción.	46
a. Reglamento peruano.	46
b. Reglamento mexicano.....	49
b. Normas guatemaltecas.	52
O. Muros de mampostería no reforzada.....	54
1. Definición y materiales.	54
2. Propiedades mecánicas	56
a. Resistencia a la compresión.....	56
b. Resistencia a la tensión.	57
c. Comportamiento mecánico de la mampostería en compresión.	57
d. Comportamiento mecánico de la mampostería a cortante.....	58
e. Comportamiento mecánico de la mampostería a tensión.....	61
f. Comportamiento mecánico de la mampostería a flexo-compresión y cortante.	62

g. Comportamiento mecánico bajo cargas cíclicas y dinámicas en el plano.	65
3. Principales mecanismos de fallo globales.....	65
P. Mampostería reforzada internamente (“integral”)......	66
1. Definición.....	66
2. Comportamiento mecánico.....	67
3. Beneficios estructurales.....	67
4. Restricciones para la integración acero – mampostería.	68
5. Comportamientos y comentarios acerca de la mampostería armada interiormente.....	68
6. Estados de comportamiento de muros reforzados interiormente.....	70
a. Primer estado de comportamiento.....	70
b. Segundo estado de comportamiento.....	70
c. Tercer estado de comportamiento.	70
d. Cuarto estado de comportamiento.....	71
7. Influencia en el comportamiento cíclico de los muros.....	72
a. Reforzados interiormente.....	72
8. Puntos a favor de la mampostería	73
a. Reforzada interiormente.	73
9. Puntos en contra de la mampostería.....	74
a. Reforzada interiormente.	74
Q. Mampostería confinada	75
1. Definición.....	75
2. Comportamiento de la mampostería bajo cargas laterales.	75
3. Sistema resistente de mampostería confinada ante efectos sísmicos.	77
4. Falla por corte.....	78
5. Falla por flexión.....	79

6. Factores claves que influyen en la resistencia sísmica dentro las estructuras de mampostería confinada.	81
a. Densidad de los muros.....	81
b. Unidades de mampostería y mortero.....	81
c. Columnas de confinamiento.....	81
d. Refuerzo horizontal en muros.....	81
7. Aberturas.....	82
8. Comportamiento ante cargas laterales cíclicas	83
R. Aspectos a considerar en el diseño de estructuras de mampostería.....	83
1. Normatividad.....	83
2. Calidad de los materiales.....	84
3. Influencia de las aberturas en los muros de mampostería.	84
4. Importancia de la configuración estructural.....	85
S. Muros de corte de mampostería reforzada sujetos a cargas en el plano del muro.	85
1. Mecanismos de falla.	85
a. Falla por corte.	85
b. Falla de deslizamiento por corte.	86
c. Resistencia por corte diagonal de la mampostería.....	87
d. Muros de corte a flexión.....	87
e. Muros de corte robustos.	93
2. Resistencia a deslizamiento por corte.	94
T. Consideraciones sísmicas de diseño para muros de corte de mampostería reforzada.	95
1. Enfoque de diseño sísmico.	95
2. Respuesta sísmica dúctil.	98
U. Aspectos importantes a considerar en la inspección de la mampostería durante la construcción.....	98
1. Control e inspección en obra.	98
V. Teoría de cálculo.....	100

1. Método de rigidez.	100
a. Matriz de rigidez elemental.....	102
2. Muros de mampostería confinada.	103
3. Método de diagonal.....	104
a. Propiedades de la diagonal.....	104
III. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	106
A. Hipótesis alternativa	106
B. Hipótesis nula	106
IV. OBJETIVOS	107
A. Objetivos generales:	107
B. Objetivos específicos:.....	107
V. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN.....	109
VI. MÉTODO.....	113
A. Ensayos elaborados a los morteros.....	113
1. Ensayo a compresión para cubos de mortero.	113
a. Materiales a utilizar.	113
b. Instrumento de investigación.....	113
c. Máquina de pruebas.	113
d. Metodología.....	113
2. Ensayos de retención de agua del mortero.	114
a. Sujeto de investigación.	114
b. Materiales a utilizar.	114
c. Instrumentos de medición.	114
d. Metodología.....	115
3. Ensayos de adherencia del mortero.....	115
a. Sujeto de investigación.	115
b. Materiales a utilizar.	116
c. Instrumento de investigación.....	116

d. Metodología.....	117
4. Ensayo de fricción del mortero con la mampostería.....	117
a. Sujeto de investigación.	117
b. Materiales a utilizar.	117
c. Instrumento de investigación.....	117
d. Metodología.....	117
B. Ensayos a la unidad simple y prismas de mampostería.....	118
1. Ensayo de compresión a unidad de ladrillo.....	118
a. Sujeto de investigación.	118
b. Materiales a utilizar.	118
c. Instrumento de investigación.....	118
d. Metodología.....	119
2. Ensayo de absorción de unidad de ladrillo.	120
a. Sujeto de investigación.	120
b. Materiales a utilizar.	121
c. Instrumento de investigación.....	121
d. Metodología.....	121
3. Ensayo de medición del ladrillo.	122
a. Sujeto de investigación.	122
b. Materiales a utilizar.	122
c. Instrumento de investigación.....	122
d. Metodología.....	123
4. Ensayo de resistencia a la compresión de la mampostería por medio de prismas.	123
a. Sujeto de investigación.	123
b. Materiales a utilizar.	123
c. Instrumento de investigación.....	125

d. Metodología.....	126
5. Ensayo a compresión diagonal	127
a. Sujeto de investigación.	127
b. Materiales a utilizar.	127
c. Instrumento de Investigación.	128
d. Metodología.....	130
C. Ensayos de muros confinados con solera intermedia según norma FHA y AGIES.	132
1. Modelo teórico.	132
2. Modelo experimental.	133
a. Sujeto de investigación.....	134
b. Equipo.	134
c. Dimensiones.	135
d. Metodología.....	136
D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).	139
1. Modelo teórico.	139
2. Diseño experimental.	139
a. Materiales.....	140
b. Disposición de los muros.	140
c. Dimensiones de los muros.....	141
d. Tipos de muros.....	142
e. Equipo utilizado.....	143
f. Metodología.....	144
g. Análisis y presentación de resultados.....	144
VI. RESULTADOS.....	145
A. Ensayos elaborados a los morteros.	145
1. Ensayo a compresión para cubos de mortero	145

2. Ensayo de retención del agua del mortero	146
3. Ensayo de adherencia del mortero.....	149
4. Ensayo de fricción del mortero con la mampostería	149
B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.....	150
1. Ensayo de compresión unidad de ladrillo	150
2. Ensayo de porcentaje de absorción de la unidad de ladrillo	152
3. Ensayo de medición del ladrillo.....	153
4. Ensayo de resistencia a la compresión de mampostería en prismas	154
5. Ensayo a compresión diagonal	156
C. Ensayos de muros confinados con solera intermedia según norma FHA y AGIES.....	160
1. Muro 1.....	160
2. Muro 2.....	162
3. Muro 3.....	164
4. Muro 4.....	166
D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).....	169
1. Muro 5.....	169
2. Muro 6.....	171
3. Muro 7.....	173
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	176
A. Ensayos elaborados a los morteros.....	176
1. Ensayos a compresión para cubos de morteros.....	176
2. Ensayo de retención de agua del mortero.	176
3. Ensayo de adherencia del mortero.	177
4. Ensayo de fricción del mortero con la mampostería.	177
B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.....	177
1. Ensayo a compresión de unidad de ladrillo.	177
2. Ensayo de porcentaje de absorción de la unidad de ladrillo	178
3. Ensayo de medición del ladrillo.....	179

4. Ensayo a la resistencia a la compresión de mampostería por medio de prismas.....	179
5. Ensayo a compresión diagonal.	180
C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.....	187
1. Análisis matemático.....	187
2. Análisis experimental.....	188
a. Muro 1.....	188
b. Muro 2	190
c. Muro 3..	192
d. Muro 4..	193
D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).....	197
VIII. CONCLUSIONES	205
A. Ensayos elaborados a los morteros.....	205
B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.....	205
C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.....	207
D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).....	209
IX. RECOMENDACIONES	211
A. Ensayos elaborados a los morteros.....	211
B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.....	211
C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.....	212
D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).....	212
X. LITERATURA CITADA.....	213
XI. OTRAS REFERENCIAS	216
XII. ANEXO.....	217
A. Ensayos elaborados a los morteros.....	217
B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.....	219
C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.....	225

D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).....	229
E. Cálculo de deformaciones en Mathcad.....	233
F. Esquemas del muro.	237
1. Muros con solera.	237
2. Muros con refuerzo horizontal distribuido.	240

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Simplicidad de la estructura.....	19
Ilustración 2. Simetría de la estructura.....	19
Ilustración 3. Forma regular deseable.	20
Ilustración 4. Forma irregular no deseable.....	20
Ilustración 5. Disposición de los muros.	21
Ilustración 6. Relaciones cemento - cal vs. Esfuerzos a compresión – retención de agua.....	28
Ilustración 7. Ensayos de compresión muretes de mampostería.....	31
Ilustración 8. Arreglo de murete para la determinación de propiedades de compresión.....	33
Ilustración 9. Arreglo de murete para determinación	38
Ilustración 10. Curva de envolvente de acuerdo a la teoría de fallo propuesta por Mann y Muller.....	41
Ilustración 11. Vista isométrica de un piso de mampostería en un edificio sujeto a carga lateral.....	42
Ilustración 12. Deformación del muro a consecuencia de cargas horizontales fuera del plano.	43
Ilustración 13. Deformación del muro a consecuencia de cargas horizontales en el plano.....	44
Ilustración 14. Refuerzo vertical en un muro de mampostería.....	45
Ilustración 15. Refuerzo horizontal tipo a (embebido en las juntas horizontales).....	45
Ilustración 16. Refuerzo horizontal tipo b (ubicado en vigas de concreto).	46
Ilustración 17. Detalle del refuerzo horizontal continuo en muros confinados de mampostería.....	49
Ilustración 18. Muretes para prueba en compresión.	50
Ilustración 19. Muretes para prueba en compresión diagonal.....	51

Ilustración 20. Relación esfuerzo - deformación para el mortero, las unidades aisladas y los muretes de mampostería.....	57
Ilustración 21. Agrietamiento escalonado diagonalmente producido por un fallo de fricción cortante.....	58
Ilustración 22. Agrietamiento de las unidades de mampostería producido por un fallo de tensión diagonal.....	59
Ilustración 23. Fallo por agrietamiento vertical excesivo producido por esfuerzos de compresión.....	60
Ilustración 24. Modos de fallo sujetos a tensión directa.....	62
Ilustración 25. Agrietamiento por fallo a cortante en muros de mampostería no reforzada.....	64
Ilustración 26. Agrietamiento por fallo a flexión de mampostería no reforzado	65
Ilustración 27. Comportamiento de un muro dúctil sometido a carga lateral coplanar.....	71
Ilustración 28. Ensayo en voladizo de un muro de mampostería confinada.	75
Ilustración 29. Modelado de entramado vertical en mampostería confinada....	77
Ilustración 30. Modo de fallo por corte en mampostería confinada.....	78
Ilustración 31. Nudo plástico desarrollado en los muros de mampostería confinada.....	79
Ilustración 32. Falla por flexión en mampostería confinada.....	80
Ilustración 33. Refuerzo horizontal en mampostería confinada.....	82
Ilustración 34. Modos de fallas en mampostería confinada con aberturas.	83
Ilustración 35. Influencias de la abertura en el modo de falla de la mampostería.....	85
Ilustración 36. Mecanismos de falla por corte.....	87
Ilustración 37. Dimensionamiento utilizado para el diseño por corte en el plano del muro.....	88

Ilustración 38. Carga axial en muros de mampostería (a. Sólidos; b. Perforados).....	89
Ilustración 39. Efecto combinado de la carga axial y fuerza cortante.....	90
Ilustración 40. Relación entre los esfuerzos cortantes y los esfuerzos a compresión.....	90
Ilustración 41. Efectos de la proporción de distribución del corte en el esfuerzo cortante de la mampostería.	91
Ilustración 42. Resistencia del acero en muros de corte sujetos a flexión.....	92
Ilustración 43. Mecanismo de falla en los muros robustos con solera de corona.....	93
Ilustración 44. Mecanismos de falla en los muros robustos sin solera de corona.....	94
Ilustración 45. Curvas fuerza cortante - deflexión para los mecanismos de flexión y corte.....	96
Ilustración 46. Mecanismos de falla donde flexión gobierna.....	97
Ilustración 47. Mecanismo de falla donde corte gobierna.....	97
Ilustración 48. Colocación del prisma para resistencia a la adherencia entre el mortero y la mampostería.....	116
Ilustración 49. Máquina de pruebas de compresión Forney.....	119
Ilustración 50. Bosquejo de dimensiones del prisma de ladrillo.....	124
Ilustración 51. Ubicación de mediciones del prisma de mampostería.....	125
Ilustración 52. Marco de pruebas a compresión.....	129
Ilustración 53. Zapatas de carga de acero.....	129
Ilustración 54. Dimensionamiento de los muretes.....	130
Ilustración 55. Dimensionamiento de los muretes.....	131
Ilustración 56. Herramientas utilizadas para construcción de muro.....	135
Ilustración 57. Manómetro de gato hidráulico.....	135
Ilustración 58. Proceso de construcción de muro.....	137

Ilustración 59. Modulaci3n muro con refuerzo horizontal distribuido.....	141
Ilustraci3n 60. Secci3n de muro con refuerzo horizontal interior.....	142
Ilustraci3n 61. Equipo utilizado para los ensayos.....	143
Ilustraci3n 62. Carga de confinamiento vs carga lateral.....	150
Ilustraci3n 63. Valores de resistencia a compresi3n diagonal muretes tipo S.....	157
Ilustraci3n 64. Valores de resistencia a compresi3n diagonal muretes tipo M.....	159
Ilustraci3n 65. Resultados promedio de ensayos a compresi3n diagonal prismas M y S.....	159
Ilustraci3n 66. Carga vs. Deformaci3n muro 1.....	162
Ilustraci3n 67. Carga vs. Deformaci3n muro 2.....	164
Ilustraci3n 68. Carga vs. Deformaci3n muro 3.....	166
Ilustraci3n 69. Carga vs. Deformaci3n muro 4.....	168
Ilustraci3n 70. Carga vs. Deformaci3n promedio.....	169
Ilustraci3n 71. Carga vs. Deformaci3n muro 5.....	171
Ilustraci3n 72. Carga vs. Deformaci3n muro 6.....	173
Ilustraci3n 73. Carga vs. Deformaci3n muro 7.....	175
Ilustraci3n 74. Bases met3licas para la realizaci3n de cubos de mortero para ensayos de 5cm X 5cm.....	217
Ilustraci3n 75. Herramientas utilizadas para la realizaci3n de las mezclas de mortero.....	217
Ilustraci3n 76. Muestra para observar antes de desencofrar las muestras de cubos de mortero.	218
Ilustraci3n 77. Colocaci3n correcta del sistema completo para el ensayo de adherencia.	218
Ilustraci3n 78. Compresi3n de unidad de ladrillo.	219
Ilustraci3n 79. Prismas de ladrillo ensayados a compresi3n.....	219

Ilustración 80. Gato hidráulica de prueba a compresión.	220
Ilustración 81. Prismas a someterse a ensayo a compresión diagonal.	220
Ilustración 82. Prisma ensayado S1 (falla por adherencia).	221
Ilustración 83. Prisma ensayado S2 (Falla combinada).	221
Ilustración 84. Prisma ensayado S3 (Falla por adherencia).....	222
Ilustración 85. Prisma ensayado S4 (Falla combinada).	222
Ilustración 86. Prisma ensayado M1 (Falla por adherencia).....	223
Ilustración 87. Prisma ensayado M2 (Falla semi-diagonal).....	223
Ilustración 88. Prisma ensayado M3 (Falla combinada).	224
Ilustración 89. Prisma ensayado M4 (Falla por adherencia).....	224
Ilustración 90. Falla a corte de muro 1 con solera intermedia.	225
Ilustración 91. Gráfica carga vs. Deformación superior comparativa entre muro 1 y 4	225
Ilustración 92. Gráfica carga vs. Deformación superior comparativa entre muro 2 y 4.	226
Ilustración 93. Gráfica carga vs. Deformación superior comparativa entre muro 3 y 4.	226
Ilustración 94. Comparación de fallas diagonales entre muro con solera intermedia y sin solera intermedia.	227
Ilustración 95. Gráfica comparativa ente deformación superior teórica vs práctica.....	227
Ilustración 96. Gráfica comparativa ente deformación a media altura teórica vs práctica.....	228
Ilustración 97. Falla de adherencia entre mortero y ladrillo.	228
Ilustración 98. Grietas en el extremo de aplicación de carga.	229
Ilustración 99. Grietas en el extremo inferior opuesto del lado de aplicación de carga.....	229
Ilustración 100. Grietas en la parte central de la mampostería.	230

Ilustración 101. Poca adherencia entre ladrillo y mortero.	230
Ilustración 102. Superficie lisa en mortero de pega.	230
Ilustración 103. Carga vs. Deformación muro 4 (sin refuerzo horizontal).	231
Ilustración 104. Carga vs. Deformación muro 5 (refuerzo horizontal distribuido).	231
Ilustración 105. Carga vs. Deformación muro 6 (refuerzo horizontal).	232
Ilustración 106. Carga vs. Deformación muro 8 (refuerzo horizontal).	232
Ilustración 107. Elevación del muro con solera intermedia.	237
Ilustración 108. Detalle del armado del cimientto.	237
Ilustración 109. Detalle del armado de las soleras y cimientos.	238
Ilustración 110. Detalle 1 de armado de columnas de muro con solera.	239
Ilustración 111. Detalle 2 de armado de columnas de muro con solera.	240
Ilustración 112. Detalle de cimientto corrido.	240
Ilustración 113. Elevación del muro con refuerzo horizontal distribuido.	241
Ilustración 114. Detalle de armado de soleras y cimientos.	242
Ilustración 115. Detalle de armado de columnas de muro con solera.	243
Ilustración 116. Detalle 2 de armado de columnas con solera.	243
Ilustración 117. Detalle de refuerzo horizontal interior.	244

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estados límite para diseño sísmico	23
Tabla 2. Dosificación de los diferentes tipos de mortero.	29
Tabla 3. Propiedades de los diferentes tipos de mortero.....	29
Tabla 4. Factores de corrección para esfuerzos para mampostería con concreto.....	32
Tabla 5. Factores de corrección para esfuerzos para mampostería en arcilla.	33
Tabla 6. Esfuerzos a compresión especificado f'_{m} (psi),.....	35
Tabla 7. Esfuerzo a compresión de la mampostería basado en los esfuerzos a compresión de las unidades de mampostería y al tipo de mortero utilizado, mostrados en las tablas 4 y 5.....	36
Tabla 8. Esfuerzo a compresión de la mampostería basado en los esfuerzos a compresión de las unidades de mampostería de concreto y en el tipo de mortero utilizado en construcción.....	36
Tabla 9. Influencias en el comportamiento de muros de mampostería sometidos a cargas laterales cíclicas por el aumento de los factores indicados.....	72
Tabla 10. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo M.....	145
Tabla 11. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo S.....	145
Tabla 12. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo N.	145
Tabla 13. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo S.....	146
Tabla 14. Datos teóricos de resistencia a compresión de morteros según ASTM C-270	146
Tabla 15. Resultado de muestras de mortero para retención de agua (peso inicial).....	146
Tabla 16. Resultados de muestras de mortero para retención de agua (peso final).....	147
Tabla 17. Resultados de retención de agua mortero tipo M.....	148

Tabla 18. Resultados de retención de agua mortero tipo S.....	148
Tabla 19. Resultados de retención de agua mortero tipo N.....	148
Tabla 20. Resultados de retención de agua mortero tipo S.....	148
Tabla 21. Resultado de esfuerzo de adherencia entre la mampostería y el mortero.	149
Tabla 22. Resultados de coeficiente de fricción.	149
Tabla 23. Esfuerzo de compresión de ladrillo colocado de zoga.	151
Tabla 24. Esfuerzo a compresión de ladrillo colocado horizontalmente.	151
Tabla 25. Esfuerzo a compresión de ladrillo colocado verticalmente.	152
Tabla 26. Porcentaje de absorción en unidad de ladrillo.	153
Tabla 27. Determinación de ancho de unidad de ladrillo.....	153
Tabla 28. Determinación de largo de unidad de ladrillo.....	153
Tabla 29. Determinación de alto de la unidad de ladrillo.....	154
Tabla 30. Datos generales prismas de mampostería de ladrillo.....	154
Tabla 31. Medición de aplicación de carga prisma 1.	154
Tabla 32. Medición de aplicación de la carga prisma 2.	155
Tabla 33. Medición de aplicación de carga prisma 3.	155
Tabla 34. Cálculos de resistencia a compresión prismas.	155
Tabla 35. Resumen de datos obtenidos.	156
Tabla 36. Resultados a compresión diagonal de prismas tipo S.	156
Tabla 37. Valores de promedio y desviación estándar para prismas tipo S.	157
Tabla 38. Resultados a compresión diagonal prismas tipo M.	158
Tabla 39. Valores de promedio y desviación estándar para prismas tipo M.	158
Tabla 40. Prueba t de Student para muestras aparejadas.	160
Tabla 41. Deformaciones en muro 1.....	161
Tabla 42. Deformaciones en muro 2.....	163
Tabla 43. Deformación en muro 3.....	165
Tabla 44. Deformación en muro 4.....	167

Tabla 45. Deformación en muro 5.....	170
Tabla 46. Deformación en muro 6.....	172
Tabla 47. Deformación en muro 7.....	174
Tabla 48. Resumen cuantificación de material.....	203
Tabla 49. Cuantificación de materiales de muros realizados con costos a diciembre 2010.	204

RESUMEN

El trabajo presentado como Mega - Proyecto titulado “ESTUDIO EXPERIMENTAL COMPARATIVO DE SISTEMAS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE LADRILLO CONFINADOS, CON SOLERA INTERMEDIA CONTRA REFUERZO HORIZONTAL, CARGADOS LATERALMENTE” tiene como objetivo principal comparar el comportamiento de un sistema constructivo existente, utilizado en Guatemala y en gran parte de Centroamérica contra otro tipo de sistema constructivo utilizado en gran medida por México y Sudamérica; dichos sistema poseen características similares en cuanto al riesgo sísmico y modulación estructural a las que se presentan en Guatemala. Se cree posible que el sistema de mampostería confinada con refuerzo horizontal de acuerdo a normas extranjeras, podría ser una nueva propuesta de sistema de levantado de mampostería estructural en Guatemala que trabaje o se desempeñe estructuralmente de forma similar que la actual, dando a conocer así diferencias, similitudes, ventajas y desventajas tanto constructivas, de resistencia y módulos de falla, y económicas que dicho sistema pueda llegar a presentar.

Este trabajo es el resultado del proceso de investigación, revisión en manuales y normas utilizadas tanto en Guatemala (Fomento de Hipoteca Asegurada -FHA- Y Normas recomendadas para el diseño estructural dela Asociación Guatemalteca de Ingeniero Estructurales y Sísmicos -AGIES-), como en otros países tales como México (Normas Técnicas Complementarias -NTC-) y Colombia (NSR-10). Además, es el resultado de pruebas diseñadas de acuerdo a las normas investigadas, y al mecanismo de falla esperado, para la obtención de datos que ayudaran a definir las ventajas y desventajas de ambos sistemas constructivos a comparar.

Para lograr hacer una comparación apropiada se presenta un laboratorio con pruebas que logran mostrar ventajas y desventajas de un sistema constructivo con otro. Además para tener un marco teórico de referencia se presentan teoría y cálculos teóricos sobre estos ensayos, así como la comparación de la teoría con la práctica en los resultados.

Finalmente se dan a conocer conclusiones y recomendaciones, que pueden ser fundamentos o base para futuras investigaciones o normativas guatemaltecas.

I. INTRODUCCIÓN

La mampostería es considerada el tipo de construcción utilizado por excelencia a lo largo de la historia. Posee una gran variedad de tipos y formas, ésta se ha desarrollado desde tiempos muy remotos en la construcción de estructuras, en general en aquellas que son destinadas para uso habitacional.

El uso de las viejas filosofías de diseño, el de tomar en cuenta únicamente la resistencia vertical, ha traído como consecuencia la pérdida de muchas vidas humanas. En particular, en países como Guatemala que su territorio se encuentra dividido entre tres placas tectónicas: la placa de Norteamérica; la placa del Caribe; y la Placa de Cocos, generan planos de falla que se traducen en un riesgo sísmico importante a tomar en cuenta, por consiguiente de consideraciones de diseño distintas a tomar en cuenta.

Un movimiento sísmico involucra una sollicitación extra en nuestra estructura, como lo mencionamos anteriormente, esta sollicitación se traduce en esfuerzos internos y fuerzas horizontales, que en conjunto con el peso de la estructura produce deformaciones que pueden conllevar a la misma al colapso. Una falla característica de los movimientos horizontales es la falla por cortante, la cual es uno de los temas centrales tocados en el presente trabajo de investigación.

Al ser la mampostería uno de los sistemas constructivos más utilizados en Guatemala, crece la importancia de la realización de ensayos, esto con el fin de conocer con las propiedades físicas y mecánicas de los materiales con los que se está trabajando. Esta estandarización nos lleva a conocer tanto las calidades de los materiales con los que se cuenta y se va trabajar, como la estandarización de los ensayos que se realizarán para conocer dichas características y calidades.

En este trabajo de investigación se encuentran generalidades acerca de la mampostería, así como de la mampostería como sistema constructivo, y de los

distintos sistemas constructivos que se pueden generar con la mampostería (dígase sin refuerzo, confinado, refuerzo interior).

Además se presentan los resultados y observaciones relevantes de los ensayos a compresión diagonal elaborados, para lo cual se comparará los valores de cortante último y de diseño para los grupos de muretes tipo M y tipo S, además de las tipologías o mecanismos de falla respectivos para cada uno de estos.

Esto con el fin de establecer conclusiones y recomendaciones respecto a la aplicabilidad de estos tipos de mortero para la unidad de mampostería analizada, así como resistencias a cortante y tipos de falla, para finalmente obtener observaciones y parámetros útiles para el análisis y el diseño.

II. ANTECEDENTES

La mampostería posee una gran variedad de tipos y formas, se ha desarrollado y empleado desde tiempos muy remotos en la construcción de estructuras, en general en aquellas que son destinadas a habitación. Este tipo de construcción se trata de un material de fabricación doméstica ya que generalmente se colocaban muros de mampostería únicamente para soportar las cargas verticales, y no para resistir las sollicitaciones sísmicas simultáneamente (Aguilar y Alcocer 2001).

El uso de la vieja filosofía de diseño, el de revisar la resistencia del muro de mampostería únicamente ante sollicitaciones verticales ha tenido como consecuencia la pérdida de muchas vidas por el colapso o el daño severo de construcciones de mampostería durante sismos intensos. Debido a esto, hace algunas décadas, la mampostería era usualmente considerada como un material inadecuado para la construcción de edificios en zonas de alto riesgo sísmico. Sin embargo, características como la facilidad de construcción y otras buenas propiedades físicas y mecánicas, el uso de la mampostería ha sido una práctica muy popular en la construcción de edificios de mediana y baja altura para vivienda, ubicados estos en zonas sísmicas (Aguilar y Alcocer 2001).

El sistema constructivo de la mampostería, consta básicamente de muros estructurales que son capaces de resistir simultáneamente las sollicitaciones de cargas verticales y de cortante lateral. En este tipo de sistema también son necesarios elementos estructurales (losas) los cuales son utilizados para transmitir las cargas a la estructura (Aguilar y Alcocer 2001).

Cuando se desarrolla un evento sísmico, fuerzas inerciales se presentan en la estructura. Para estos casos la losa actúa como un diafragma horizontal rígido y los muros deben absorber las fuerzas de cortante y flexión que el movimiento del terreno les impone. Es por ello que cuando se estudió la resistencia de estructuras de mampostería ante cargas sísmicas, se hace necesario comparar la resistencia

desarrollada ante cargas laterales con las inducias por el sismo de diseño. Esto último no depende únicamente de la intensidad y características del movimiento del terreno, sino es también de vital importancia las características dinámicas de la estructura, que a su vez se ven alteradas al momento de incurrir en el rango inelástico (Aguilar y Alcocer 2001).

Se han desarrollado durante las últimas tres décadas programas y trabajos experimentales importantes con relación al comportamiento de muros de mampostería con refuerzo horizontal. Son dos las principales investigaciones que el Instituto de Ingeniería Mexicano ha desarrollado en relación con la mampostería confinada con refuerzo horizontal en la década de los setentas. La primera investigación se tituló: *Comportamiento sísmico de muros de mampostería* (Meli 1975); y la segunda: *Modalidades del refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería* (Hernández y Meli 1976). Las anteriores investigaciones están relacionadas entre sí, y fueron tomadas como base de diseño para el actual reglamento mexicano NTCM (Aguilar y Alcocer 2001).

A. Trabajo de Meli.

En esta investigación se realizaron estudios de la variabilidad de los materiales constituidos en la mampostería, de las propiedades físicas – mecánicas de estos mediante el ensayo de pequeños especímenes y del comportamiento de la mampostería ante cargas reversible en una sola dirección. Se describieron los principales mecanismos de falla y se establecieron métodos para la predicción de resistencia de muros ante distintas sollicitaciones. Se identificaron también las variables que intervienen en el deterioro de las estructuras de mampostería cuando está sujeta a cargas sísmicas, proponiendo recomendaciones para el diseño sísmico de estas (Aguilar y Alcocer 2001).

Entrando en detalle, el trabajo contempló 58 modelos a escala natural de 3.0 X 3.0 m, los cuales fueron sometidos a cargas laterales cíclicas, para estudiar tanto la ductilidad como la disipación de energía. Una segunda serie de 50 muros de 2.0 X

2.0 m, se ensayó bajo carga lateral en una sola dirección, modificando en los muros el tipo de pieza, el refuerzo y las condiciones de carga (Aguilar y Alcocer 2001).

Los ensayos se realizaron con dos modalidades de carga: compresión diagonal y en voladizo; en la primera modalidad se limitan las deflexiones verticales en el extremo de la aplicación de la carga, eliminando los efectos de flexión, esto es para muros en las que las sollicitaciones de cortante son significativas, y las de flexión y carga axial son pocos relevantes; en la segunda modalidad de carga, consiste en someter al muro en una carga lateral en un extremo donde la deformaciones son permitidas, para este caso las combinaciones de carga sobre la estructura no pueden generalizarse totalmente ya que la relación entre el momento flexionante y la fuerza cortante permanece constante (Aguilar y Alcocer 2001).

Para el caso del comportamiento experimental de los muros, la presencia del refuerzo horizontal distribuido en zonas intermedias del muro aumento notablemente la resistencia, tanto si el refuerzo se colocaba horizontal como verticalmente, sin embargo se asocia más al incremento de la resistencia, con los huecos de mampostería rellenos con mortero que con las propias cuantías (Aguilar y Alcocer 2001).

Entre las principales conclusiones del trabajo de investigación se encuentran las siguientes:

- Los coeficientes de variación para las propiedades de los materiales involucrados en la mampostería son muy altas; sin embargo, se diseñaron ensayos en pequeños elementos (prismas) que permiten la correlación satisfactoria con el comportamiento y resistencia de estructuras reales.
- Se verificaron con claridad los mecanismos de falla correspondientes al corte, a la compresión simple y a la flexo – compresión.
- El comportamiento de los muros de mampostería fue lineal aproximadamente hasta el primer agrietamiento, que se presenta por flexión o tensión diagonal. En el primer caso la falla es dúctil, y en el segundo depende del tipo y

cantidad de refuerzo interior y de las características de los elementos confinantes.

- La reserva de resistencia después del primer agrietamiento depende del tamaño de las columnas de confinamiento y de la cuantía de refuerzo interior.
- La carga vertical provoca un incremento en la resistencia y en la rigidez, reduciendo la ductilidad del muro.
- El deterioro depende del tipo de falla. Si es por flexión la degradación es baja y solo se presenta por grandes deformaciones. Si la falla es por corte, la degradación es importante, en muros confinados, y muy fuertes en muros de mampostería integral.

Finalmente, se reconoció la importancia del estudio a detalle de conceptos como el mecanismo de falla a cortante, distribución del refuerzo en el muro, interacción entre el muro y marco de confinamiento, efecto de cargas verticales altas en la resistencia, efecto de la cantidad y distribución del refuerzo interior en la resistencia, efecto de grandes cuantías en el deterioro ante cargas repetidas (Aguilar y Alcocer 2001).

B. Trabajo de Hernández y Meli.

Hernández y Meli evaluaron distintas formas de reforzar muros de mampostería con el fin de aumentar la resistencia y ductilidad ante cargas laterales alternadas. Se desarrolló una expresión que permite el diseño de la cuantía interior para las sollicitaciones de carga lateral, manteniendo un comportamiento dúctil. También se desarrollaron los factores de comportamiento sísmico para muros de mampostería para distintos tipos y distribuciones de refuerzo (Aguilar y Alcocer 2001).

Entrando en detalle, se ensayaron muros formados con piezas de tabique hueco y de bloques de concreto. El mortero empleado fue el de menor calidad permitida para muros de carga en zonas sísmicas. El desarrollo experimental tenía como principal objetivo observar el funcionamiento estructural en los muros y su comportamiento ante cargas alternadas como las producidas por un sismo. Se

realizaron ensayos para determinar los efectos de la cantidad de refuerzo, las uniones vigas – columnas, y el efecto del confinamiento (por medio de estribos) (Aguilar y Alcocer 2001).

El esfuerzo de agrietamiento resultó aproximadamente igual en todos los ensayos, no importando el tipo ni cantidad de refuerzo. La influencia del refuerzo en el incremento de la resistencia de agrietamiento fue poco significativa, sin embargo, los muros presentaron una disminución en la deformación del agrietamiento al colocar el refuerzo horizontal. Un excelente comportamiento fue presentado cuando se dio la colocación de acero horizontal en adición al refuerzo transversal de las columnas. La ductilidad de desplazamiento en este tipo de muros alcanzó valores muy buenos (Aguilar y Alcocer 2001).

Entre las principales conclusiones del trabajo de investigación se encuentran las siguientes:

- Un mejor comportamiento en términos de capacidad de absorción de energía, nivel de deterioro y reserva de resistencia después del agrietamiento se observa con el incremento de la resistencia de las columnas y con la colocación del refuerzo horizontal adicional.
- El confinamiento mediante columnas provoca un mejor comportamiento que la colocación de refuerzo horizontal únicamente.
- El mejor sistema constructivo para muros de mampostería de tabique de barro y de bloque de refuerzo interior resultó aquel con una columna interior con estribos en las juntas de mortero.
- El refuerzo horizontal resultó efectivo si está completamente recto y anclado en los extremos del muro. La adherencia no representa una variable importante en el estudio.
- La cuantía mínima de refuerzo horizontal (0.0020) está conservadoramente extrapolada de muros de concreto para desarrollar la resistencia de muros de mampostería. Se deben realizar más estudios para determinar un valor más adecuado.

- El refuerzo transversal con ganchos de 135° , debe de colocarse en los extremos de las columnas, con un espaciamiento de la mitad del peralte efectivo, d.
- El refuerzo horizontal debe estar uniformemente distribuido en la altura del muro para evitar concentraciones de esfuerzos.
- La carga de agrietamiento diagonal, depende únicamente de la mampostería.
- Tanto la resistencia como la ductilidad de los muros después del agrietamiento dependen del refuerzo en las columnas y el refuerzo horizontal, y la colocación del refuerzo horizontal elimina sustancialmente el daño local en las piezas. Estos últimos son considerados los principales causantes del deterioro de los muros.

C. El Centro Nacional de Prevención de Desastres –CENAPRED-.

El CENAPRED ha orientado su investigación hacia el estudio del comportamiento de las estructuras de mampostería ante acciones sísmicas. Por el momento son dos los proyectos relacionados fundamentalmente con el efecto del refuerzo horizontal (Aguilar y Alcocer 2001).

El primer trabajo se desarrolló en 1992 por Alcocer, consistió en el ensayo a cargas laterales de dos muros a escala natural con distinto tipo de refuerzo horizontal. En esta investigación se contempló el uso del refuerzo horizontal para lograr un agrietamiento uniforme en las grietas, una mejor capacidad de deformación y de disipación de energía. Los principales objetivos del estudio de Alcocer fueron la determinación del refuerzo horizontal en el comportamiento histórico de los sistemas de muros, el estudio del mecanismo resistente a cargas laterales, la influencia de los elementos confinantes y la facilidad constructiva de este tipo de refuerzo para los muros (Aguilar y Alcocer 2001).

La segunda investigación desarrollada en 1994 por Álvarez y Alcocer fue de carácter bibliográfico, en el cual se resumió los principales trabajos de investigación desarrollados en Perú, México y China principalmente (Aguilar y Alcocer 2001).

D. Luders e Hidalgo.

Desarrollaron su investigación en 1986, en el Laboratorio de Ingeniería Estructural de la Pontificia Universidad Católica de Chile, se realizaron 17 muros a escala natural, con distintas cuantías de refuerzo horizontal. En el estudio se observó el comportamiento y la influencia del tipo de barra, cuantía de refuerzo, y la resistencia de los muros, además de las tipologías de falla que fueron inducidas por las acciones de las fuerzas ejercidas (Aguilar y Alcocer 2001).

Entre las principales conclusiones del trabajo de investigación se encuentran las siguientes:

- El inicio del agrietamiento por corte en muros de mampostería reforzada no depende del refuerzo horizontal; está da inicio cuando la resistencia a tensión diagonal del muro es alcanzada. Los valores para resistencia a tensión diagonal oscilaron entre 0.25 y $\bar{0}.45$ de $f'm$.
- Las cuantías mínimas de refuerzo horizontal hacen crecer la capacidad de deformación sin pérdida considerable de resistencia a cortante.
- La efectividad del refuerzo depende del tipo y calidad a utilizarse.

E. Investigaciones nacionales.

En Guatemala se han desarrollado una gran serie de investigaciones de estructuras de mampostería en general, principalmente cuando se ve la necesidad de probar una unidad de mampostería nueva y se necesitan conocer sus características resistentes. También se han desarrollado investigaciones tomando en cuenta el adobe como la unidad mampuesta. Actualmente no se cuenta con estudios y/o investigaciones que se relacionen con el objetivo de este estudio.

F. Construcciones sismoresistentes.

1. Terremotos y sismoresistencia. Se conoce como terremoto al movimiento o vibración ondulatoria desarrollada por el suelo que se presenta a consecuencia de la súbita liberación de energía sísmica, que es acumulada dentro de la tierra como

resultado de las fuertes tensiones y presiones en su interior. Estos fenómenos naturales se presentan por el movimiento de placas tectónicas o fallas geológicas que existen en la corteza terrestre, estos movimientos antes mencionados, pueden llegar a ser producidos también por actividad volcánica (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2001).

Los sismos o terremotos pueden causar grandes desastres, en particular en aquellos lugares donde no se han tomado en cuenta medidas de prevención, en relación con las características de sismo resistencia de las obras civiles o edificaciones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2001).

El territorio guatemalteco se encuentra dividido entre tres placas tectónicas: la placa de Norteamérica; la placa del Caribe; y la Placa de Cocos. Los movimientos relativos que se generan entre éstas, determinan los accidentes topográficos principales, los volcanes y la distribución de los sismos o terremotos (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH- 2006).

El contacto entre las placas del Caribe y Norteamérica es de tipo transcurrente, y se ve manifestada en la superficie como las fallas de Chixoy/Polochic/Motagua. El contacto que se desarrolla entre las placas de Cocos y del Caribe es de tipo convergente o subducción, la cual se caracteriza por el movimiento hacia debajo de la placa de Cocos con respecto a la del Caribe. Este contacto entre placas es de aproximadamente 50 kilómetros frente a las costas del Océano Pacífico el cual a su vez desarrolla una gran formación de volcanes (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH- 2006).

Ambos procesos tectónicos generan deformaciones significativas dentro del interior de la Placa del Caribe, que se ven reflejados en las fallas locales como las de Jalpatagua, Mixco, Santa Catarina Pinula (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH- 2006).

Generalidades de la respuesta de las estructuras hacia la amenaza sísmica. Son tres los componentes principales que se ven involucrados en la respuesta de las estructuras hacia la amenaza sísmica:

- **Respuesta elástica:** cuando un terremoto se hace presente, la base de la estructura está sujeta a movimiento lateral mientras que la parte superior está inicialmente en reposo. Las fuerzas creadas a consecuencia del desplazamiento relativo entre la base y la parte superior de la estructura, causa que la parte superior sea acelerada y desplazada. Como la estructura vibra, existe una cierta pérdida de energía que provoca una disminución en la amplitud del movimiento con el tiempo, este fenómeno es conocido como amortiguación. El grado de amortiguación de determinada estructura depende de los materiales que se utilizan en la construcción, del sistema estructural, el detallado del refuerzo, y la presencia de elementos arquitectónicos como tabiques, techos y paredes exteriores. En diseño sísmico de las estructuras, la amortiguación es expresada generalmente en términos del amortiguamiento β , el cual describe en términos de un porcentaje de la crítica amortiguación viscosa, siendo esta última definida como el nivel de amortiguación que posee un sistema desplazada para descansar en un tiempo mínimo sin oscilación. La amortiguación de una estructura aumenta con la amplitud de desplazamiento, tomando en cuenta que el excesivo aumento de la amplitud de desplazamiento, puede llegar a convertir la respuesta de la estructura en no lineal. La respuesta lineal de la estructura depende de la resistencia y capacidad de la estructura de absorber la energía proveniente de eventos sísmicos o otros tipos de combinaciones de carga, para deformarse y retomar su condición de reposo inicial (Anderson y Brzev 2009).
- **Respuesta inelástica:** cuando la estructura no posee la suficiente capacidad para resistir las cargas producidas por el movimiento sísmico dentro del rango elástico, este disipa energía a través de la deformación de la misma. La respuesta inelástica le quita rigidez a la estructura y esto

hace que el período aumente, haciendo también que los desplazamientos incrementen. Sin embargo en el mismo tiempo, los esfuerzos de cedencia en los materiales hacen que se aumente el amortiguamiento de la estructura. Este incremento del amortiguamiento hace que se disminuyan los desplazamientos. Por lo tanto, es posible que los dos efectos descritos anteriormente se compensen el uno al otro lo cual hace que desplazamientos elásticos e inelásticos no sean significativamente diferentes. Lo anteriormente expuesto es utilizado como parte de las bases de las provisiones sísmicas en muchos reglamentos de sismoresistencia alrededor del mundo. Sin embargo, esto no aplica para edificaciones con períodos muy cortos, en los que los desplazamientos en el rango inelástico son mucho mayores que en el rango elástico. Tampoco es aplicable para edificaciones con períodos muy largos, en el cual el desplazamiento máximo puede llegar a ser considerado igual al movimiento del suelo (Anderson y Brzev 2009).

- **Ductilidad:** se le conoce como la capacidad de la estructura de resistir desplazamientos inelásticos, y por lo tanto de poder disipar energía dentro de dicho rango (Anderson y Brzev 2009).

La ductilidad es una propiedad muy importante en una estructura, ya que es está la que la mayoría de las veces debe de resistir los efectos sísmicos, además de reducir la amenaza de una falla súbita del tipo frágil, poniendo en juego así una fuente adicional de amortiguamiento a la edificación (Anderson y Brzev 2009).

Una respuesta sísmica aproximada por parte de la estructura, puede llegarse a modelar a través de un sistema de un grado de libertad, constituido por una masa concentrada y un elemento resistente con cierta rigidez lateral y cierto amortiguamiento. Este modelo se caracteriza porque el período natural de su vibración es proporcional a la raíz cuadrada de la relación entre la masa y la rigidez (Anderson y Brzev 2009).

Como fue mencionado anteriormente, el grado de vibración de la estructura es dependiente del amortiguamiento de la misma, y de la relación entre el período de movimiento de la estructura y el suelo. De tal manera que para movimientos bruscos de suelo con predominio de ondas de periodo corto, las estructuras que resultan más afectadas son las de construcciones rígidas y pesadas. En contraparte, si el movimiento del suelo es lento, con períodos dominantes largos, son las estructuras flexibles (dúctiles) y altas las más afectadas, por las amplitudes de vibraciones y de las fuerzas de inercia (Anderson y Brzev 2009).

G. Generalidades del comportamiento sísmico en la mampostería.

1. Mampostería no reforzada. La mampostería reforzada se caracteriza por tener un buen desempeño ante los eventos sísmicos, es más en muchos casos puede llegar a presentar el colapso total de la estructura, principalmente cuando las mismas están edificadas sobre suelos blandos. Entre las fallas típicas que pueden llegar a presentar las estructuras que utilizan este tipo de mampostería se tiene:

- Deslizamiento de la losa de techo a través de la junta de construcción existente entre la solera de remate y la última hilada del muro; este tipo de falla se produce cuando el refuerzo horizontal necesario para la transferencia de fuerzas de inercia corte – fricción desde el techo hasta el muro es inexistente. Para la minimización de estos efectos, es recomendable crear una conexión detallada en la zona de unión solera – muro, o el adicionamiento de espolones de concreto armado que sean capaces de resistir el deslizamiento de la losa (Ruiz *et. al.* 2001).
- Vaciamiento de muros perimétricos producidos por acción sísmica perpendicular al plano del muro, generados por un débil encuentro de la pared transversal; la zona de unión entre los muros ortogonales es sometida a esfuerzos normales de tensión, lo que hace necesario distribuirlos a través de los muros, siendo esta distribución a través de elementos confinantes, como el caso de una columna, o mediante el refuerzo horizontal detallado (Ruiz *et. al.* 2001).

- Agrietamiento diagonal del muro; este agrietamiento se desarrolla, a consecuencia de que la capacidad a corte del muro no puede resistir, ya que no se posee la densidad de muros en una dirección determinada del edificio. Por ser ésta una falla del tipo frágil, la resistencia como la rigidez disminuyen violentamente al momento de la primera agrieta, esto debido a la no existencia de refuerzo que pueda llegar a controlar el tamaño de las grietas (Ruiz *et. al.* 2001).
- Cambio en la sección de muro debido al posicionamiento de ventanas, esto da lugar a la formación de muros de poca altura, originando efectos similares a los P – delta. Dichos muros se convierten en muros demasiado rígidos, lo que puede llegar a causar problemas torsionales (configuración en planta), de igual forma la mayor rigidez lateral que dichos muros poseen hacen que estos absorben mayores porcentajes de la fuerza cortante (Ruiz *et. al.* 2001).
- Caída de muros no estructurales (tabiques) y parapetos, esto debido a la acción ortogonal de la acción sísmica (Ruiz *et. al.* 2001).
- Empuje producido por las escaleras a los muros, que son utilizados para descansos, lo cual produce una falla por punzonamiento del muro. Es recomendable para estos casos, que los esfuerzos sean absorbidos por columnas ubicadas en los extremos del descanso (Ruiz *et. al.* 2001).
- Carga de impacto no contemplada a consecuencia del choque entre edificios adyacentes, esto debido a la falta de juntas de construcción. En ocasiones puede considerarse beneficioso el construir viviendas pegadas unas con otros, ya que estas crean un efecto de confinamiento, sin embargo cuando alguna de estas colapsa, puede conllevar al colapso simultáneo de las subsecuentes (Ruiz *et. al.* 2001).
- Distribución inadecuada de muros en planta (densidad de muros), lo cual puede llegar a conducir efectos negativos de torsión (Ruiz *et. al.* 2001).
- Asentamientos diferenciales, dado que la mampostería es un material muy frágil, con tan sólo poco desplazamiento relativo de la misma puede llegar a causar el agrietamiento de los muros (Ruiz *et. al.* 2001).

2. Mampostería confinada. Los efectos negativos que la mampostería sin reforzar, hicieron que la mampostería confinada con elementos de concreto reforzado tuvieran un campo de práctica en la construcción. Entre los principales defectos de este tipo de mampostería se encuentran:

- Creencia de que con utilizar únicamente dos columnas para confinar un muro se cuenta con el confinamiento suficiente para resistir un sismo de carácter cíclico. (Ruiz *et. al.* 2001).
- Distribución de columnas muy espaciadas entre sí, esto trae como consecuencia que se pierda el estado de confinamiento en la parte central de los muros, lo cual hace que el tamaño diagonal de las grietas se vuelvan incontrolables (Ruiz *et. al.* 2001).
- “Ratoneras” en las columnas, esto puede ocurrir por cuales quiera de las razones siguientes: 1. Que el concreto al momento de vaciarlo, no posea la suficiente fluidez o manejabilidad; 2. Excesivo tamaño del agregado grueso; 3. Estribos con ganchos de gran longitud que estorben el paso del concreto; 4. Zona interface entre la columna y el muro; 4. Mal chequeo de concreto defectuoso y no correcta vibración. Las “ratoneras” hacen que la resistencia a compresión, tensión y corte de la columna se vea reducida drásticamente (Ruiz *et. al.* 2001).
- Deterioro de los elementos de confinamiento (columna) a causa de la propagación de la falla por corte a lo largo del muro. Si las columnas no poseen el suficiente confinamiento (espaciamientos entre estribos) en sus extremos, esto producirá que las grietas se vuelvan incontrolables en dichos elementos (Ruiz *et. al.* 2001).
- Anclaje insuficiente de refuerzo vertical y horizontal. El que no se produzca un adecuado anclaje entre los elementos de confinamiento conduce a una decrecimiento a la resistencia corte – flexión entre la unión solera – columna (Ruiz *et. al.* 2001).

- Insuficiente o incorrecto traslape de refuerzo en la zona solera – columna e inadecuada distribución del esfuerzo a corte proveniente de la solera hacia el muro (Ruiz *et. al.* 2001).

Los muros con excesiva carga axial producen efectos negativos, si bien un aumento en las cargas axiales produce a su vez un aumento en la resistencia a corte del muro, también conduce a una disminución de la ductilidad del mismo, pudiendo llegar a causar esfuerzos de flexión de las columnas en el plano del muro deteriorando de tal manera la unión muro – columna, haciendo que al momento que se presente la diagonal por corte puede llegar a ser fallar las bases de las columnas por compresión al rotar el muro en torno a estas. Se recomienda distribuir la carga vertical en todos los muros a través de una losa aligerada o rígida, armada en dos sentidos, o el adicionar refuerzo horizontal en el muro cuando el esfuerzo vertical llegue a superar los $0.05 f'_{cm}$ (Ruiz *et. al.* 2001).

También son considerados los típicos problemas por: torsión por la inadecuada densidad y distribución de los muros en planta, falta de continuidad vertical en los muros, asentamientos diferenciales, y el que la losa rígida no trabaje como tal a consecuencia de grandes ductos en la losa de techo (Ruiz *et. al.* 2001).

3. Mampostería reforzada interiormente (“integral”). Entre los efectos negativos que suelen presentarse en este sistema constructiva pueden encontrarse:

- Poca o nula supervisión en la construcción de los elementos. Este tipo de sistemas precisa de una mano de obra bien entrenada y de la supervisión de especialistas (Ruiz *et. al.* 2001).
- Al ser generalmente mallas de acero el refuerzo utilizado en estos tipos de muros no poseen elementos de confinamiento. En los extremos la flexo-compresión hace que las caras tiendan a explotar a consecuencia de la expansión lateral del grout al comprimirse (efecto de Poission) (Ruiz *et. al.* 2001).

- Traslapes excesivos en el primer piso del refuerzo vertical, y la incorrecta inclusión del acero a la cimentación. Ya que esto produce que el refuerzo no aporte resistencia a flexión ni a corte – tensión (Ruiz *et. al.* 2001).
- El empleo de unidades de mampostería con perforaciones muy pequeñas, debido a que esto complica tanto la inclusión del refuerzo vertical, como el del grout. Siendo este último el que le proporciona mayor resistencia al corte del muro (Ruiz *et. al.* 2001).
- El uso de una única malla de refuerzo. El código del ACI, comenta con respecto a estos tipos de muros que cuando el esfuerzo a cortante del muro supera la resistencia del concreto, debe de emplearse una segunda malla de refuerzo, esto con el fin de que el concreto siga confinada y siga trabajando a fricción a consecuencia de esto (Ruiz *et. al.* 2001).

H. Amenaza sísmica.

Cuando la probabilidad de que existan eventos sísmicos de cierta severidad en un lugar y tiempo determinado, se le considera como una amenaza sísmica. El peligro de este tipo de amenazas varía de un lugar a otro de acuerdo a la vulnerabilidad del lugar (tanto del suelo, como del tipo de edificaciones) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2001).

I. Sismo resistencia.

La sismoresistencia es una propiedad o característica que es desarrollada en una edificación, por medio de la aplicación de técnicas de diseño de la configuración geométrica y la inclusión en la constitución física, componentes (materiales y sistemas estructurales) especiales estructurales que la capacitan para resistir fuerzas que se presentan tras el desarrollo de un evento sísmico, lo cual conlleva a la integridad de la edificación en sí y a la protección de la vida de los ocupantes del mismo (Aristizabal y González 2000).

Se considera que una estructura es sismo resistente cuando la misma se diseña y construye con una configuración estructural adecuada, con un correcto

dimensionamiento, y con materiales que poseen características de resistencia suficientes para que puedan soportar la acción de fuerzas causadas por sismos frecuentes. Aun cuando se considera los requisitos de resistencia que indican las normas de diseño y construcción sismo resistente, está siempre latente la posibilidad de que se presente un evento sísmico de grandes magnitudes que sobrepasen las consideraciones de diseño previstas, por lo que la construcción sismo resistente debe soportar las cargas sin que existan colapsos totales o parciales en la edificación (Aristizabal y González 2000).

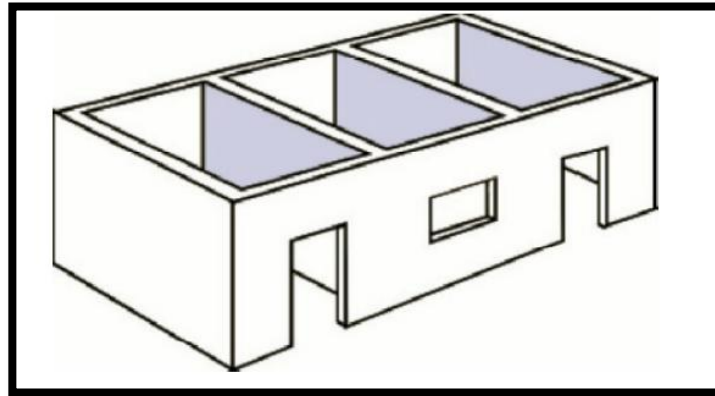
La sismoresistencia es la propiedad que se le provee a la edificación con el fin de proteger la vida y los bienes de los usuarios finales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica 2001).

La sismoresistencia es considerada una tecnología que diseña y lleva a cabo procesos constructivos con elementos estructurales. Dispuestos de acuerdo a la aplicación de principios básicos como la simplicidad, simetría rigidez y continuidad, que les permite soportar satisfactoriamente las cargas de uso y sísmicas a las cuales serán sometidas durante la vida útil de la estructura (Aristizabal y González 2000).

Al tomar en cuenta que la simplicidad de volúmenes y la simetría en formas sean las características generales del edificio, esto minimiza los daños de los posibles efectos del movimiento sísmico a los que puede ser sometido durante la vida útil de la estructura, esto debido al comportamiento homogéneo que la configuración estructural presenta. A continuación se presentan aspectos importantes dentro de las características de construcciones sismoresistentes:

- **Simplicidad:** facilita la distribución de los muros de carga, y evita formas irregulares en planta que puedan conducir a esfuerzos torsionales en la estructura (Aristizabal y González 2000).

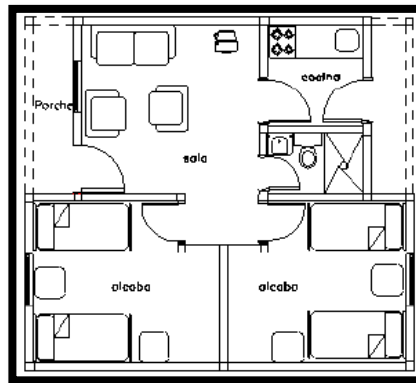
Ilustración 1. Simplicidad de la estructura.



(Aristizabal y González 2000)

- **Simetría:** los volúmenes se ubican de forma equilibrada, respecto a los ejes que cruzan en planta (Aristizabal y González 2000).

Ilustración 2. Simetría de la estructura.

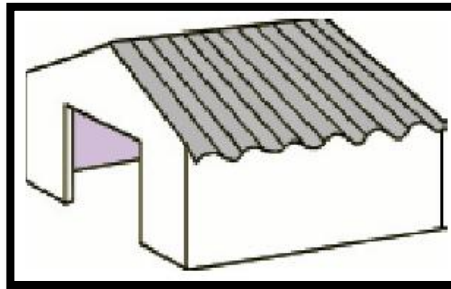


(Aristizabal y González 2000)

- **Regularidad:** el volumen general de la estructura se muestra compacto, y sin irregularidades en su configuración geométrica. En cambio la forma irregular no es recomendable, dado que al ser afectados por los efectos sísmicos, estos se deforman y reaccionan de forma independiente unos respecto a otros (esto si no cuentan con un ligamen estructural bien detallado) lo cual no contribuye con la respuesta homogénea que es la deseable y necesaria para que la estructura responde de forma efectiva ante las cargas irregulares

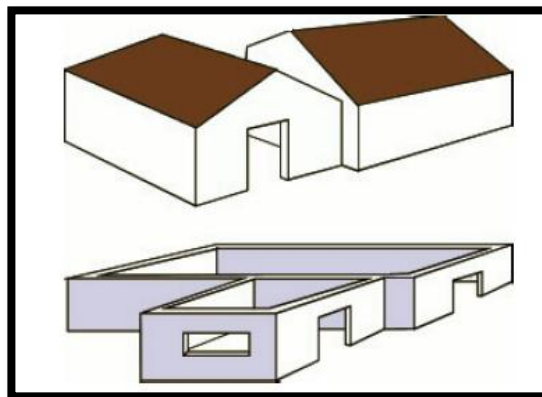
que se transmiten a consecuencia de los movimientos sísmicos (Aristizabal y González 2000).

Ilustración 3. Forma regular deseable.



(Aristizabal y González 2000)

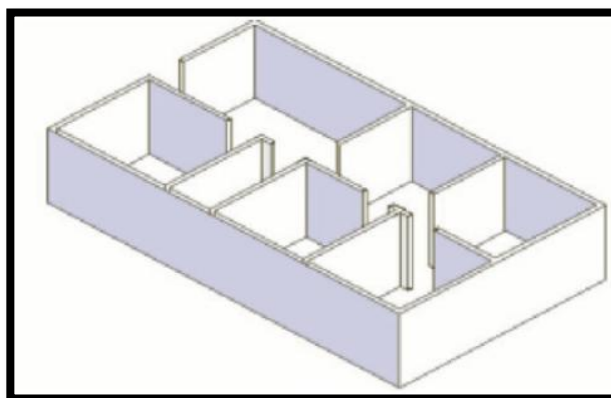
Ilustración 4. Forma irregular no deseable.



(Aristizabal y González 2000)

- **Disposición de los muros:** se debe evitar disponer los muros en una misma dirección, ya que si bien en la dirección donde serán proporcionados poseería una gran resistencia (en su plano) hacia las fuerzas sísmicas, en la dirección ortogonal no poseería la resistencia necesaria para soportar dichas fuerzas. Por lo que se deben disponer muros en ambos sentidos, tomando en cuenta las densidades de los muros en cada sentido para que los mismos sean capaces de soportar las fuerzas (Aristizabal y González 2000).

Ilustración 5. Disposición de los muros.



(Aristizabal y González 2000)

J. Criterios del diseño sísmico.

1. Objetivos del diseño sísmico. El análisis de las estructuras tomando en cuenta los efectos sísmicos en cuanto a resistencia difiere del que se realiza para el efecto de otras acciones (Meli 2009).

Lo interesante del diseño sísmico no comprende únicamente la complejidad de la respuesta estructural a los efectos dinámicos del sismo, sino más que todo, se deriva de lo poco predecible que es el fenómeno y de las intensidades extraordinarias que pueden alcanzar sus efectos, aunado a la probabilidad de que se susciten dichos efectos durante la vida útil de la estructura no es significativa (Meli 2009).

En cuanto el diseño en general, para otros efectos o combinaciones de carga, pretende que el comportamiento de la estructura permanezca dentro de su intervalo lineal y sin ningún tipo de daño para valores últimos de fuerzas actuantes. En contraste, en el diseño sísmico se toma en cuenta que la viabilidad económica que conlleva el mantener el diseño de la estructura dentro del rango lineal no es factible, lo que conlleva a plantearse la optimización económica y en resistencia, en cuanto al equilibrio de la inversión con la probabilidad del daño que pueda ocurrir al momento que se presente un evento sísmico (Meli 2009).

Los objetivos que pretenden los reglamentos modernos de diseño sísmico pueden llegar a plantearse en términos de los estados límites siguientes:

- **Estado límite de servicio:** Para el cual no se exceden deformaciones que puedan llegar a ocasionar pánico a los usuarios, interferencia con el funcionamiento de equipos e instalaciones, ni daños en elementos no estructurales (tabiques, fachadas, etc.) (Meli 2009).
- **Estado límite de integridad estructural:** Para el cual se pueden presentar daños en elementos no estructurales y daños en elementos estructurales menores (reparables), como el agrietamiento en estructuras de concreto, pero en el cual no se alcanza la capacidad de carga de los elementos estructurales (Meli 2009).
- **Estado límite de supervivencia:** Dentro del cual se presentan significativos daño estructural, y pueden llegar a producirse fallas económicamente no reparables, pero la estabilidad general de la estructura se mantiene, por lo que se evita el colapso de la estructura (Meli 2009).

En general, pueden establecerse como objetivos del diseño sísmico:

- **Para el estado límite de servicio:** Prevenir que se exceda el estado límite de servicio para sismos de intensidad moderada que pueden llegar a desarrollarse una cantidad considerada de veces durante la vida útil de la estructura (Meli 2009).
- **Para el estado límite de integridad estructural:** Prevenir que se exceda el estado límite de integridad estructural para sismos severos que poseen una gran posibilidad de presentarse durante la vida útil de la estructura (Meli 2009).
- **Para el estado límite de supervivencia:** Prevenir que se exceda el estado límite de supervivencia para sismos extraordinarios que posean una posibilidad de ocurrencia no significativa dentro de la vida útil de la estructura (Meli 2009).

Las probabilidades de ocurrencia de los eventos sísmicos en una estructura pueden desarrollarse a partir de períodos de retorno, a continuación se presenta un Cuadro que incluye los períodos de retorno considerados aceptables para cada uno de los tres casos descritos anteriormente (Meli 2009).

Tabla 1. Estados límite para diseño sísmico

Estados límite	Intensidad sísmica	Período de retorno, años
Servicio	Moderada	20 - 30
Integridad estructural	Severa	50 - 100
Supervivencia	Extraordinaria	500 - 1000

(Meli 2009)

2. Aspectos principales del diseño sísmico. En términos generales, los aspectos principales del diseño sísmico implican que la estructura posea una rigidez acorde para limitar sus desplazamientos laterales, proporcionándole así características dinámicas que eviten las amplificaciones de vibraciones en la estructura. Que posea la suficiente resistencia a carga lateral para poder absorber las fuerzas de inercia generada por la vibración de la estructura. Capacidad alta de disipación de energía en el rango inelástico, en otras palabras, la suficiente ductilidad (Meli 2009).

A grandes rasgos el diseño sísmico de una estructura implica las siguientes etapas:

- **La selección de un sistema estructural adecuado:** El sistema estructural deber poseer la capacidad de absorber y disipar la energía introducida por el sismo sin que se generan efectos desfavorables, como concentraciones o amplificaciones dinámicas (Meli 2009).
- **El análisis dinámico:** La mayoría de reglamentos o códigos sísmicos definen las acciones para las cuales debe tomarse en cuenta y calcularse la respuesta de la estructura y proporcionan métodos de análisis de

distintos grados de refinamiento. Es de vital importancia que el método de análisis propuesta sea el que más se adecue a las condiciones reales de la estructura (Meli 2009).

- **El dimensionamiento de las secciones:** Los métodos de dimensionamiento de los elementos estructurales no difieren drásticamente de los que se especifican en los códigos para otro tipo de acciones (Meli 2009).
- **Detallado de la estructura:** Para generar el comportamiento dúctil en las estructuras, es de gran importancia el detallar las uniones y conexiones para proporcionarles gran capacidad de deformación antes del colapso. Teniendo especial atención en los elementos estructurales de concreto reforzado, en los cuales se desarrollan modificaciones en cuanto cuantías de acero y distribuciones en zonas sísmicas (Meli 2009).

3. Enfoques del diseño sísmico. El procedimiento adoptado por la mayoría de los códigos de diseño sísmico actuales, consisten básicamente en un diseño elástico con fuerzas reducidas. Es decir, se acepta que parte de la energía que es introducida al sistema constructivo a consecuencia del sismo, se disipe en forma de deformaciones inelásticas y, por ello, las fuerzas que deber ser capaces de resistir son menores de las que si se quisiera obtener un comportamiento elástico lineal para dicha sollicitación de cargas.

K. Comportamiento mecánico de los materiales en la mampostería.

La construcción de mampostería, desde sus inicios en la antigüedad como en los días presentes, permanece vigente como uno de los sistemas constructivos más utilizados (Alcocer 1997).

En un principio la construcción de mampostería era desarrollado mediante el método de prueba y error, es decir con base a la experiencia de éxitos y fracasos, lo cual sentó las bases para las costumbres y reglas constructivas. Recientemente se ha adaptado el esquema de diseño elástico, en el cual se limitan los esfuerzos de trabajo dentro de valores menores que ciertos valores admisibles. No fue hasta hace

algunas décadas donde se empezó a utilizar el diseño por factores de seguridad conocidos para una gran variedad de estados límite (Alcocer 1997).

A lo largo de su vida útil, la mampostería sufre los embates del intemperismo y las acciones de fenómenos naturales, siendo los sismos, los que probablemente han sido los responsables de la mayor cantidad de fallas, entendidas como colapsos, derrumbes de estructuras de mampostería, especialmente en viviendas habitacionales. Como solución ante estos embates, muchos países han adoptado soluciones de refuerzo y confinamiento que han mejorado el desempeño sismo resistente de las edificaciones de mampostería, convirtiéndose de tal forma en un sistema constructivo apto para ser utilizado en zonas consideradas como sísmicas (Alcocer 1997).

En general, el desempeño de la mampostería como tal (piezas prismáticas unidas por aglutinante) debe resistir acciones horizontales y verticales trabajando simultáneamente, la capacidad de la mampostería a resistir lo anterior puede mejorarse con la inclusión de acero de refuerzo, y confinamiento de la misma (Alcocer 1997).

Han sido muchas las investigaciones desarrolladas en mampostería dedicada al estudio de las características y propiedades tanto físicas como mecánicas de los materiales que componen la mampostería como sistema constructivo (Alcocer 1997).

1. Unidades de mampostería. La compresión del bloque o tabique de mampostería es una de las características estructurales más importantes en tomar en cuenta. Se ha observado que los resultados de los ensayos a compresión pueden llegar a ser comparables, únicamente si las piezas son del mismo tipo, y tomando en cuenta también que la resistencia a la compresión de las unidades pueden llegar a ser afectadas por el confinamiento lateral que ejerce la máquina donde se realicen estos tipos de ensayos. El desarrollo de este confinamiento varía de acuerdo a la

relación de esbeltez de la pieza (altura – ancho) y del materia empleado para la fabricación de la unidad mampuesta (Alcocer 1997).

La materia prima empleada es una de las variables más significativas que afectan a la resistencia a compresión de la piezas de arcilla fabricadas industrialmente, no siendo así el proceso de fabricación en sí. Mientras que para el caso de las unidades de concreto dependen principalmente del proceso de control de calidad y del nivel de industrialización de la planta (Alcocer 1997).

La variabilidad de la resistencia en las unidades de mampostería es muy elevada, aun siendo así para piezas producidas industrialmente, en las cuales generalmente el control de calidad de los materiales, se centra principalmente en la apariencia y estabilidad dimensional, más que en las características de resistencia. Los coeficientes de variación pueden llegar a ser del orden de 15 al 25 por ciento (Alcocer 1997).

2. Morteros de pega. Las principales propiedades del mortero que influyen a los elementos de la mampostería son: el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, estas propiedades afectan principalmente la deformabilidad y la resistencia a carga vertical de la estructura, y la resistencia a la tensión, considerada como la resistencia a la adherencia entre pieza y mortero, es contemplada en la resistencia diagonal de la mampostería (Alcocer 1997).

El control de calidad de los morteros es realizado mediante el proceso de obtención de resultados a partir de los ensayos de cubos. A partir de estos ensayos, pueden desarrollarse al mismo tiempo ensayos de distintas proporciones de cemento, cal y arena, en volumen respectivamente, con el fin de obtener resultados y verificar cuál de estos pueden llegar a obtener el de mejor desempeño para el desarrollo de la mampostería a diseñar (Alcocer 1997).

La cal puede llegar a ser considerada como el cemento más antiguo que ha sido utilizado por la humanidad, el empleo de ésta data del año 4000 antes de nuestra era. Entre las principales características del uso de los morteros con cal podemos mencionar:

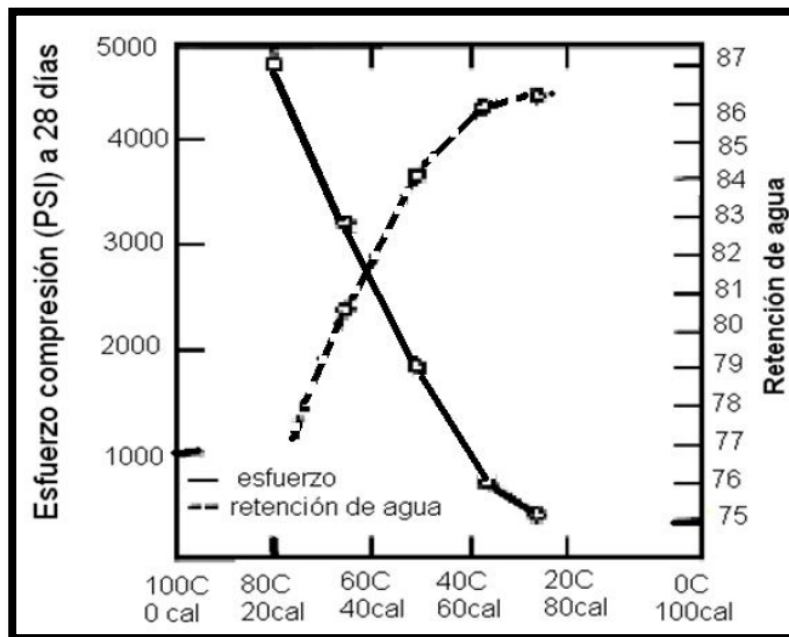
- **Mayor retentividad:** la mayor área superficial de partículas de cal con respecto a las de cemento, incrementa la retentividad del agua, lo que se traduce en morteros más trabajables, y con un mayor intervalo plástico para su colocación (Alcocer 1997).
- **Mayor cantidad de arena:** las partículas de cal cubren los gramos de arena, homogeneizando la mezcla, este efecto se ve reflejado en morteros trabajables, económicos, dado que la arena es más económica que el cemento (Alcocer 1997).
- **Menores grietas debido a la reacción autógena de la cal:** en el caso de que aparezca una fisura entre la pieza y el mortero, y por la acción del intemperismo absorbe agua de lluvia, el agua reaccionará con los hidróxidos de calcio y magnesio libres en el mortero, convirtiéndose así en piedra caliza. Este material llena la grieta y mejora las propiedades de durabilidad y de adherencia (Alcocer 1997).
- **Mejor adherencia mortero-pieza:** la adherencia mejora su desempeño con el uso de cal, esto debido a que las milimétricas partículas de cal poseen la capacidad de penetrar en los poros de las piezas (Alcocer 1997).
- **Mayor deformabilidad:** esto debido que al hacer trabajar conjuntamente tanto a la pieza como al mortero, mejoran su desempeño ya que desarrollan de mejor forma su resistencia (Alcocer 1997).

Ha sido motivo de controversia, el uso de los morteros con cal en regiones susceptibles a actividades sísmicas. Los muros con morteros de cal tienen una superior capacidad de disipar energía ante cargas laterales cíclicas. Estos muros son fallados por corte, es decir grietas que siguen las juntas del mortero, de tal modo que la energía que es disipada debido al color que es producto de la fricción a lo largo de la fisura. Este incremento en la capacidad de disipación de energía es

traducido en un aumento de amortiguamiento de la estructura. Sin embargo en muchos países las normas vigentes para el uso de mampostería favorecen los diseños de muros más resistentes, es decir, con mayor cantidad de cemento en los morteros. Esta consideración y la falta de promoción de los posibles beneficios que la cal puede llegar a contribuir en las proporciones de mortero, ha influido en el poco o no productivo uso en los morteros con cal (Alcocer 1997).

Considerando que el cemento contribuye con la resistencia a compresión, dada las características en la baja retención de agua de la relación cemento - arena este está sujeto a fisuras. La adición de cal reduce la fuerza de compresión, pero aumenta la remanencia del agua y reduce así el agrietamiento.

Ilustración 6. Relaciones cemento - cal vs. Esfuerzos a compresión - retención de agua.



(Corzo 2004)

Tabla 2. Dosificación de los diferentes tipos de mortero.

MORTERO	TIPO	DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN (materiales cementantes)							CAL HIDRATADA ^e O MÁSTIQUE DE CAL	AGREGADO MEDIDO EN ESTADO SUELTO Y HÚMEDO
		Cemento Portland ^a o cemento mezclado ^b	Cemento de mampostería ^c			Cemento de mortero ^d				
			M	S	N	M	S	N		
Cemento-cal	M	1	—	—	—	—	—	—	1/4	No menos de 2 1/4 y no más de 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes
	S	1	—	—	—	—	—	—	más de 1/4 a 1/2	
	N	1	—	—	—	—	—	—	más de 1/2 a 1 1/4	
	O	1	—	—	—	—	—	—	más de 1 1/4 a 2 1/2	
Cemento de mortero	M	1	—	—	—	—	—	1	—	
	M	—	—	—	—	1	—	—	—	
	S	1/2	—	—	—	—	—	—	1	
	S	—	—	—	—	—	1	—	—	
Cemento de mampostería	N	—	—	—	—	—	—	—	1	
	O	—	—	—	—	—	—	—	1	
	M	1	—	—	1	—	—	—	—	
	M	—	1	—	—	—	—	—	—	
	S	1/2	—	—	1	—	—	—	—	
	S	—	—	1	—	—	—	—	—	
	N	—	—	—	1	—	—	—	—	
	O	—	—	—	—	1	—	—	—	

a. Cemento Portland conforme a los requisitos de ASTM C 150.
b. Cemento mezclado conforme a los requisitos de ASTM C 595.
c. Cemento de mampostería conforme a los requisitos de ASTM C 91.
d. Cemento de mortero conforme a los requisitos de ASTM C 1329.
e. Cal hidratada conforme a los requisitos de ASTM C 207.

(Corzo 2004)

Tabla 3. Propiedades de los diferentes tipos de mortero.

MORTERO	TIPO	RESISTENCIA PROMEDIO DE COMPRESIÓN ^b A LOS 28 DÍAS mínimo (psi)	RETENCIÓN DE AGUA mínimo (%)	CONTENIDO DE AIRE máximo (%)
CEMENTO-CAL	M	2,500	75	12
	S	1,800	75	12
	N	750	75	14 ^c
	O	350	75	14 ^e
CEMENTO DE MORTERO	M	2,500	75	12
	S	1,800	75	12
	N	750	75	14 ^c
	O	350	75	14 ^c
CEMENTO DE MAMPOSTERÍA	M	2,500	75	18
	S	1,800	75	18
	N	750	75	20 ^d
	O	350	75	20 ^d

(Corzo 2004)

3. Esfuerzos de la mampostería ensamblada. La mampostería ensamblada está compuesta de las unidades de mampostería, el mortero de pega, el grout o lechada y el refuerzo. También conocido el ensamble de los anteriores elementos como mampostería.

L. Comportamiento de elementos de mampostería a compresión.

1. Métodos de prueba. En la mayoría de ocasiones la resistencia a compresión y el comportamiento esfuerzo – deformación de la mampostería se determina por medio de muretes elaborados con piezas sobrepuestas unidas por medio del mortero. Con el fin de reducir los efectos de confinamiento lateral que se pueden llegar a producir a consecuencia de la restricción de las platinas de aplicación de carga de las máquinas de ensayo, los muretes deben de poseer una relación de altura – espesor en el orden del 2 a 5, normalmente regulado por la normas (ASTM E 447 “*Standard Test Methodos for Compressive Strenght of Mansory Prisms*”, distintos códigos de construcción de mampostería) (Alcocer 1997).

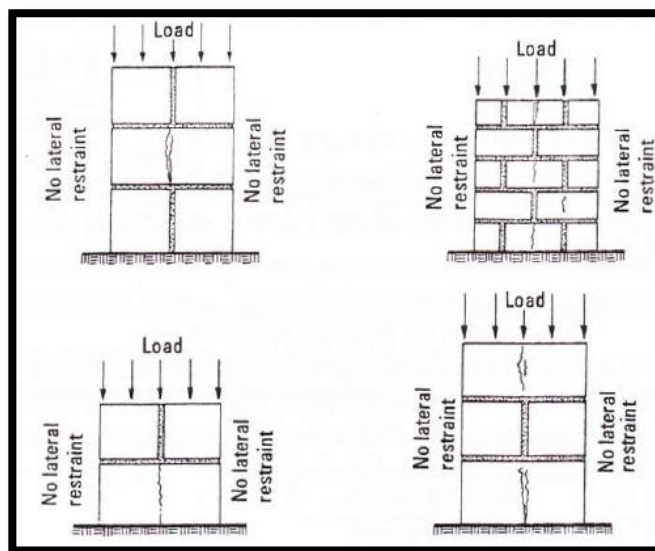
Este método es el más racional para la determinación de la resistencia a la compresión de las unidades de mampostería y morteros como un sistema compuesto.

La prueba de los muretes a compresión es utilizada principalmente cuando se especifica que los esfuerzos f_m^* son requeridos que sean mayores a 1500 psi para la mampostería con unidades de concreto, o 2600 psi para mampostería compuesta con unidades de arcilla o ladrillo. Es importante tomar en cuenta los tiempos del cronograma de construcción para la realización y verificación de la resistencia de la mampostería a utilizarse. Es importante resaltar también que el desempeño del esfuerzo depende de muchos factores, entre los cuales se incluyen la mano de obra y los materiales (Amrhein 1995).

Para los muretes de mampostería a ensayar se obtendrán valores menores que los que pueden ser tomados por la totalidad del muro de mampostería, esto se debe

a que los muretes a ensayar poseen un plano de debilidad. En los muros las unidades de mampostería están confinadas por los otros muros y los efectos del plano de debilidad generados son minimizados (Amrhein 1995).

Ilustración 7. Ensayos de compresión muretes de mampostería.



(Amrhein 1995)

Al momento de ensayar el murete es necesario, que toda el área esté en contacto con la carga a distribuir, esto se logra utilizando una placa sólida de metal como interfaz entre la máquina de pruebas y el murete, esto con el fin de que el murete en su totalidad reciba la carga aplicada y se distribuya uniformemente en el murete. Es recomendado que la placa sólida de metal posea como mínimo 3 ½ pulgadas de espesor para que garantiza la distribución de la carga aplicada (Amrhein 1995).

Los muretes deben utilizar los mismos materiales (piezas, cemento, arena, mortero) a los que serán utilizados en la construcción del muro. En el mortero se debe tomar en cuenta que el espesor de la junta debe ser el mismo al que se utilizará, y para el caso específico del grout sus condiciones (fluidez) deben ser las mismas a las que se tomarán en cuenta para la estructura final (Amrhein 1995).

La resistencia de diseño se determinará con base a información estadística existente sobre el material a utilizar, a partir de muestreos realizados en la planta de producción o en obra. Si se opta por realizar el muestreo, se debe determinar cuando menos tres especímenes. La resistencia de diseño se calculará como:

$$\text{Ecuación 1: } f'_m = \frac{f_m}{1+2.5C_p}$$

Donde:

f_m = resistencia a compresión de las piezas referidas al área bruta

C_p = Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas

El valor de C_p no se tomará menor que:

- 0.20 para piezas proveniente de plantas de producción con control de calidad.
- 0.30 para piezas de fabricación mecanizada, pero sin un control de calidad exigente.
- 0.35 para piezas de producción artesanal.

La fuerza del ensayo del murete se basa en la suposición de que la altura respecto a la menor dimensión del muro es de 2.00. Si otras dimensiones se utilizan en la prueba, entonces se deberá tomar en cuenta un factor de corrección y se aplicarán a los resultados de la prueba.

Tabla 4. Factores de corrección para esfuerzos para mampostería con concreto.

Relación h/t (esbeltez)	1.30	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
Factor de Corrección	0.75	0.86	1.00	1.04	1.07	1.15	1.22

(UBC Standard Tabla No. 21-17-A).

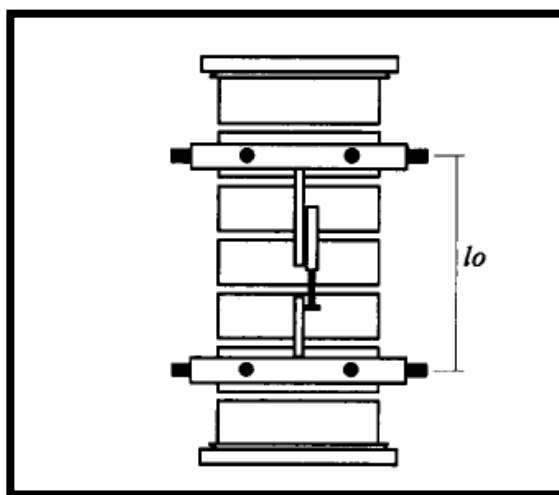
Tabla 5. Factores de corrección para esfuerzos para mampostería en arcilla.

Relación h/t (esbeltez)	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
Factor de Corrección	0.82	0.86	0.88	0.91	0.94	0.97	1.00

(ACI 530.1 Tabla 1.6.3.3 (b)).

El valor requerido o especificado de la resistencia a la compresión f_m es utilizado en muchas ocasiones como la base para el diseño de ingeniería estructural y debe ser obtenido o verificado a partir de los requerimientos de los códigos (Amrhein 1995).

Ilustración 8. Arreglo de murete para la determinación de propiedades de compresión.



(Alcocer 1997)

Cuando el esfuerzo a compresión de la mampostería ensamblada, f'_m es especificado, los componentes de los materiales, deben ser relativamente mayores al esfuerzo especificado (Amrhein 1995).

Las unidades de mampostería de arcilla poseen generalmente mayores esfuerzos que otras unidades de mampostería, debido esto a sus propiedades químicas - físicas y a su proceso de producción (quemado en hornos y el proceso de

fusión). El esfuerzo de la pieza depende de la calidad de arcilla seleccionada para la producción, la temperatura y duración de quemado de la pieza en hornos (Amrhein 1995).

2. El papel del mortero. La interacción pieza – mortero juega un papel muy importante en el comportamiento y modos de falla de la mampostería sujeta a cargas axiales. El modo de falla comúnmente obtenido es caracterizado por el agrietamiento vertical de las piezas como resultado de los esfuerzos de tensión. La resistencia a compresión de los muretes depende principalmente de la resistencia de las piezas, y en muy poco grado de la resistencia a la compresión del mortero (Alcocer 1997).

En cuanto a la resistencia, al comparar la obtenida en los ensayos y la desarrollada en la mampostería ya ensamblada en sitio se hace notar que debido al poco espesor de la junta, morteros del tipo S o M, pueden llegar a desarrollar resistencias mayores a las determinadas en laboratorio (del orden de $f'_m = 3000 \text{ psi}$) (Amrhein 1995).

3. Selección del esfuerzo a compresión de la mampostería basado en el esfuerzo a compresión resistido por los tipos de unidades y morteros utilizados. El esfuerzo a compresión específico de la mampostería, f'_m , puede ser seleccionado a partir de Cuadros basados en el esfuerzo a compresión de las unidades de mampostería y de morteros utilizados. Estos Cuadros presentan valores conservadores de resistencia, valores mayores pueden ser obtenidos a partir del desarrollo de pruebas de laboratorio (Amrhein 1995).

Tabla 6. Esfuerzos a compresión especificado f'_m (psi),
Basado en el esfuerzo específico de las unidades de mampostería.

Esfuerzos de compresión de las unidades de mampostería de arcilla (psi)	Esfuerzo a compresión especificado da la mampostería, f'_m	
	Mortero tipo M o S (psi)	Mortero tipo N (psi)
14,000 o más	5,300	4,400
12,000	4,700	3,800
10,000	4,000	3,300
8,000	3,350	2,700
6,000	2,700	2,200
4,000	2,000	1,600
Esfuerzos de compresión de las unidades de mampostería de concreto (psi)	Esfuerzo a compresión especificado da la mampostería, f'_m	
	Mortero tipo M o S (psi)	Mortero tipo N (psi)
4,800 o más	3,000	2,800
3,750	2,500	2,350
2,800	2,000	1,850
1,900	1,500	1,350

(Cuadro UBC 21 - D)

ACI 530.1-92/ASCE 6-92/TMS 602-92, provee también Cuadros para la selección del f'_m basados en el esfuerzo de las unidades de mampostería y al tipo de mortero utilizado, mostrados en los Cuadros 4 y 5.

Tabla 7. Esfuerzo a compresión de la mampostería basado en los esfuerzos a compresión de las unidades de mampostería y al tipo de mortero utilizado, mostrados en las tablas 4 y 5.

Esfuerzo a compresión de área neta en unidades de mampostería de arcilla (psi)		Esfuerzo a compresión de área neta para mampostería, f' m (psi)
Tipo de mortero M o S	Tipo de mortero N	
2,400	3,000	1,000
4,400	5,500	1,500
6,400	8,000	2,000
8,400	10,500	2,500
10,400	13,500	3000
12,400	-	3,500
14,400	-	4,000

(ACI/ASCE/TMS Tabla 1.6.2.1)

Tabla 8. Esfuerzo a compresión de la mampostería basado en los esfuerzos a compresión de las unidades de mampostería de concreto y en el tipo de mortero utilizado en construcción.

Esfuerzo a compresión de área neta en unidades de mampostería de concreto (psi)		Esfuerzo a compresión de área neta para mampostería, f' m (psi)
Tipo de mortero M o S	Tipo de mortero N	
1,250	1,300	1,000
1,900	2,150	1,500
2,800	3,050	2,000
3,750	4,050	2,500
4,800	5,250	3000

(ACI/ASCE/TMS/Tabla 1.6.2.2)

4. Módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad es calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 2: } E_m = 900f'_m$$

En Guatemala el valor comúnmente utilizado es de:

$$\text{Ecuación 3: } E_m = 750f'_m$$

M. Comportamiento de elementos de mampostería a compresión diagonal (Cortante).

1. Métodos de prueba. Para la determinación de la resistencia de la mampostería en ensayos de compresión diagonal se utiliza como un índice de la resistencia a tensión diagonal. Para determinar la resistencia, V_m y la rigidez a cortante, G_m . Se construyen y ensayan muretes cuadrados, de aproximadamente una pieza y media de largo y el número de hiladas verticales para igualarlo su altura a su ancho. Se debe tener especial cuidado en la metodología del ensayo, ya que una incorrecta ejecución de los mismos se traduce en una gran variación de resultados (Alcocer 1997).

Este método de prueba es desarrollado con el fin de medir con mayor precisión la resistencia a la compresión diagonal (corte), dentro de la mampostería (Alcocer 1997).

La resistencia a compresión diagonal se calculará a través de la siguiente ecuación:

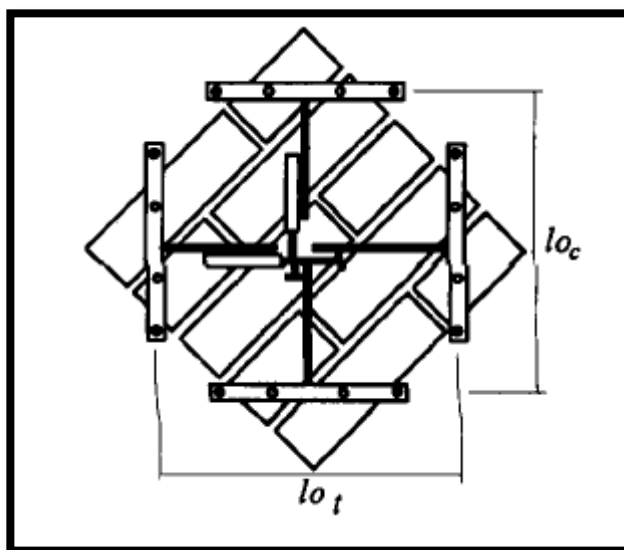
$$\text{Ecuación 4: } v'_m = \frac{V_m}{1+2.5C_v}$$

Donde:

v_m = media de la resistencia a compresión diagonal

C_v = coeficiente de variación de la resistencia a compresión diagonal de muretes no menor a 0.20 .

Ilustración 9. Arreglo de murete para determinación de propiedades a compresión diagonal.



(Alcocer 1997)

2. Piezas y morteros. Para los ensayos de compresión diagonal, corresponden las resistencias más bajas, a las piezas huecas con morteros con baja resistencia a la compresión (con contenidos bajos de cemento). Para este caso en especial, las curvas esfuerzo - deformación son no lineales desde niveles bajos de desplazamiento (Alcocer 1997).

En los ensayos de compresión diagonal, se observan en los muretes una degradación de rigidez muy aguda poco antes de la falla. Las deformaciones angulares son de 0.0006, independientemente del mortero y la pieza utilizados. Como ya se ha mencionado, los morteros con proporciones de cal dan mejoras en la resistencia a tensión de la mampostería debido al aumento en la adherencia pieza - mortero. En contraparte los morteros con cal exhiben menores resistencias a compresión en los ensayos de los muretes (Alcocer 1997).

Las unidades de mampostería con perforaciones o del tipo multiperforado, llegan a obtener mayores resistencias a compresión diagonal cuando el mortero

penetra en los alvéolos o perforaciones, esto llega a funcionar efectivamente si se garantiza el control de la fluidez del mortero en obra (Alcocer 1997).

3. Módulo de rigidez a cortante. El módulo a cortante de la mampostería, G_v , puede calcularse a través de las mediciones de deflexión realizadas sobre los prismas de mampostería. Se ha observado que el módulo a cortante depende de los siguientes factores:

- El tipo de la unidad.
- La clase del mortero.
- El contenido de humedad de las unidades cuando son colocadas.

El módulo a cortante puede ser calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 5: } E_v = G_v = 0.4E_m = 300f'_m$$

En Guatemala el valor comúnmente utilizado es:

$$\text{Ecuación 6: } G_v = 0.4E_m = 300f'_m$$

Si el valor del módulo a cortante se calcula en base a las deformaciones de los especímenes, suponiendo que la mampostería se comporta como un material isotrópico (en términos de deformación), por lo que:

$$\text{Ecuación 7: } G_v = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$$

Donde:

$\nu_m = \text{relación de Poisson}$

$E_m = \text{módulo de elasticidad}$

Al comparar el módulo de rigidez G_m obtenido en los ensayos de compresión diagonal, con los valores del módulo de elasticidad E_m medido mediante los

ensayos de muretes a compresión, el cociente $\frac{G_m}{E_m}$ varía entre 0.3 para piezas de baja resistencia y 0.1 para piezas con alta resistencia, esto para valores usuales de la relación de Poisson ($0.10 < \nu_m < 0.25$) (Alcocer 1997).

4. Modos de falla y resistencia. Los modos de falla que ocurren en la mampostería sometida a compresión diagonal son gobernados por las grietas a lo largo de las juntas o bien a través de las piezas. Las resistencias más altas se obtienen para muretes con la menor tasa de absorción inicial y el módulo de rotura más alto, unidos con morteros de alta retentividad (Alcocer 1997).

5. Modelado de la mampostería. Page (1978) ha propuesto modelos para análisis mediante elementos finitos. Magenes (1992) hace una revisión de resultados de distintos programas experimentales sobre materiales, micro – elementos y macro – elementos, de los criterios de rotura biaxial así como de leyes constitutivas y modelos para análisis de elementos finitos. Gallegos y Casabonne (1980) encontraron que, desde punto de vista de la resistencia la mampostería debe considerarse como un material anisótropico (Alcocer 1997).

N. Mampostería como sistema constructivo.

La construcción de mampostería es definida como todo aquel sistema donde se han utilizado elementos de mampostería (muros, vigas, pilastras, etc.). Estos elementos a su vez están compuestos por unidades de mampostería, los cuales a su vez pueden ser de arcilla, sílice – calcio, de concreto, adheridas con mortero de cemento y puede ser rellenado de concreto fluido (grout) (San Bartolomé 1994).

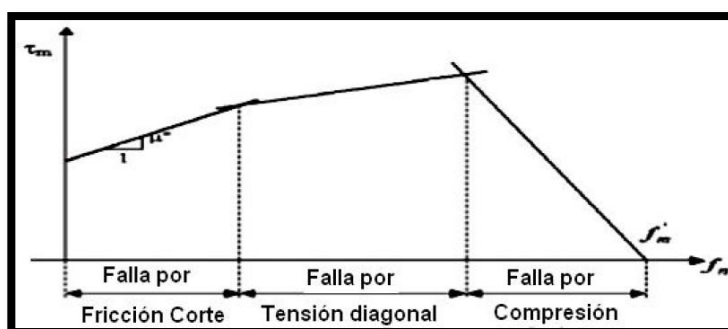
Las construcciones de mampostería estructural, han sido diseñadas racionalmente, de tal manera que las cargas actuantes durante la vida útil de la estructura, puedan llegar a ser distribuidas de la forma más efectiva a través de los elementos de mampostería, hasta la cimentación (San Bartolomé 1994).

Los sistemas de mampostería estructural pueden llegar a emplearse en el diseño de los edificios, siempre y cuando estos contengan una abundancia de muros, como es el caso de las viviendas multifamiliares y los hoteles. No siendo requisito que toda la estructura sea estrictamente de mampostería, sino que pueden existir otros elementos estructurales que colaboren con transmitir adecuadamente la carga vertical principalmente. Incluso pueden llegar a existir placas de concreto armado que en conjunto con la albañilería tomen parte de la fuerza sísmica, más sin embargo, el sistema estructural predominante será el conformado por los muros de mampostería (San Bartolomé 1994).

1. Conceptos básicos de los muros de mampostería. Los muros estructurales son la clave para el comportamiento estructural de los componentes de mampostería en las edificaciones, y estos son utilizados para resistir alguno o todos de los siguientes efectos:

- Compresión axial, como consecuencia de la aplicación de las cargas verticales de gravedad (Anderson y Brzev 2009).
- Flexión y corte fuera del plano muro como consecuencia de las cargas de viento, sismo, y/o cargas excéntricas verticales (Anderson y Brzev 2009).
- Flexión y corte en el plano del muro como consecuencia de las cargas de viento y sismo aplicadas al sistema de la edificación, en dirección paralela al plano del muro (Anderson y Brzev 2009).

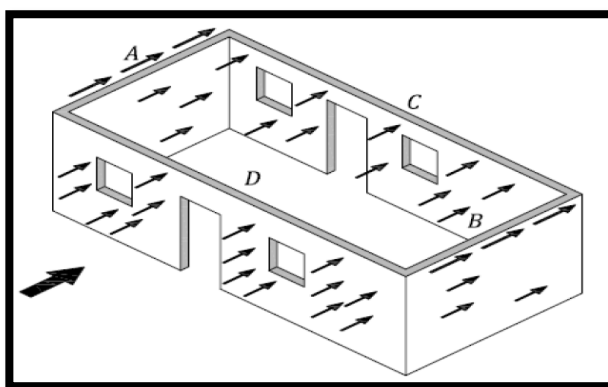
Ilustración 10. Curva de envolvente de acuerdo a la teoría de fallo propuesta por Mann y Muller.



(Corzo 2004)

En la mampostería sujeta a cargas de sismo, las fuerzas de inercia horizontal son desarrolladas en los muros, pisos y losas de techo. Las losas de piso y techo son llamados diafragmas, y estos son los encargados de transferir las cargas laterales a los sistemas resistentes. Estas fuerzas de inercia son proporcionales a la masa de los componentes estructurales y de la aceleración respectiva a cada uno de los niveles (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 11. Vista isométrica de un piso de mampostería en un edificio sujeto a carga lateral.



(Anderson y Brzev 2009)

Para el movimiento sísmico descrito en la dirección de la Figura 11, el diafragma de techo actúa como una viga horizontal que atraviesa los muros A y B. Las reacciones finales de la viga horizontal anteriormente mencionada son transferidas a los muros A y B. Estos muros están sujetos a carga lateral a lo largo de su longitud (en su plano), y son llamados muros de corte. Junto con los diafragmas de piso y techo, los muros de corte son los encargados de resistir los efectos de la carga lateral en las edificaciones, y del transferir esta carga lateral hacia los cimientos de la estructura (Anderson y Brzev 2009).

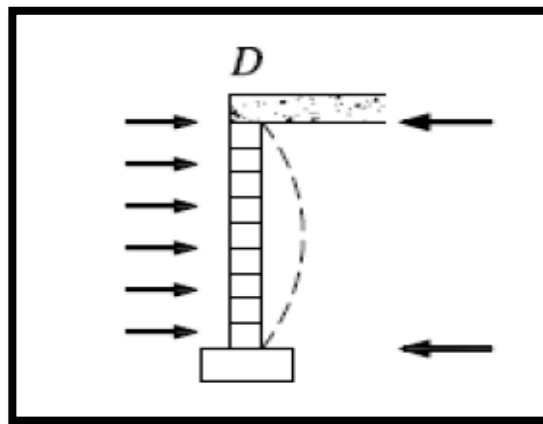
Un buen diseño y construcción de mampostería, posee una confiable y efectiva distribución de la carga, establecidos por el diseño, que transfiere las cargas sobre

los pisos más altos de la estructura, desde el techo hasta la cimentación (Anderson y Brzev 2009).

De acuerdo a la Ilustración 11 los movimientos sísmicos causan vibraciones en los muros transversales C y D. Estos muros están sujetos a fuerzas de inercia a causa de su peso propio y son cargadas transversalmente a su longitud (fuera de su plano) (Anderson y Brzev 2009).

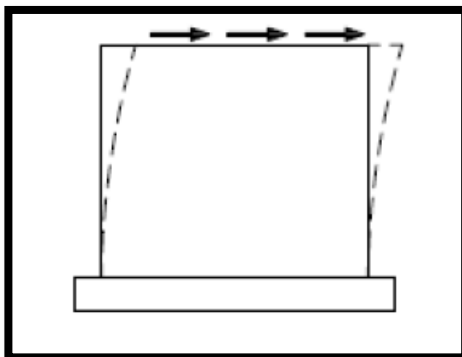
Es importante hacer notar, que los muros en una edificación están sujetos a fuerzas cortantes en sus dos planos (longitudinal y transversal), al momento de un evento sísmico. Sin embargo, la diferencia más importante entre los muros de corte y otros tipos de muros, es que los muros de corte son componentes verticales clave para el sistema de resistencia de la estructura hacia cargas laterales (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 12. Deformación del muro a consecuencia de cargas horizontales fuera del plano.



(Anderson y Brzev 2009)

Ilustración 13. Deformación del muro a consecuencia de cargas horizontales en el plano.



(Anderson y Brzev 2009)

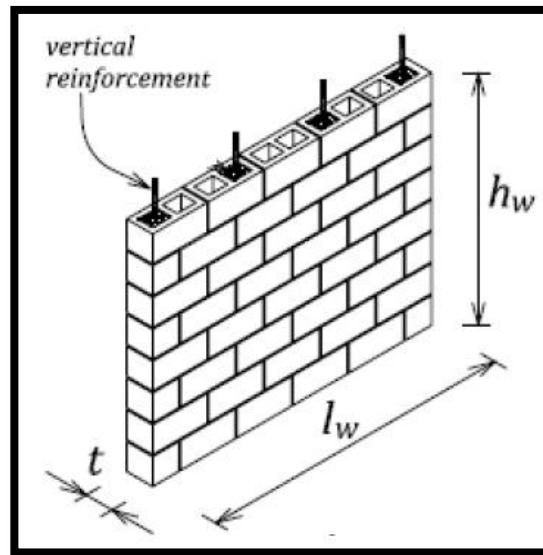
En cuanto a la mampostería estructural reforzada, el rol del refuerzo vertical se resumen en aumentar la habilidad o capacidad de resistir las fuerzas generadas por las cargas verticales, y las fuerzas resultantes por los momentos inducidos generados por las excentricidades de las cargas verticales. También es la encargada de resistir las cargas aplicadas fuera del plano del muro. El refuerzo horizontal usualmente es proveído a la estructura en dos formas:

- Refuerzo horizontal embebido en las juntas horizontales de las unidades de mampostería (dentro del mortero de pega) (Anderson y Brzev 2009).
- Refuerzo horizontal ubicado en vigas en localizaciones específicas a lo largo de la altura del muro (Anderson y Brzev 2009).

El refuerzo horizontal restringe en el plano del muro movimientos a causa de cambios en la temperatura y la humedad, fuerzas cortantes (en su plano) y/o momentos provocados por cargas fuera del plano (Anderson y Brzev 2009).

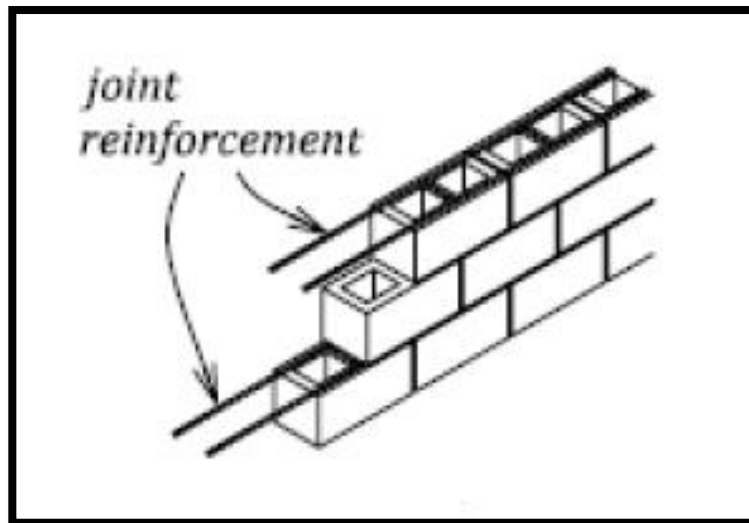
El grout incrementa la capacidad de carga de la estructura, al incrementar su área, y sirve como unión para que el refuerzo y las unidades de mampostería funcionen como una unidad compuesta (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 14. Refuerzo vertical en un muro de mampostería.



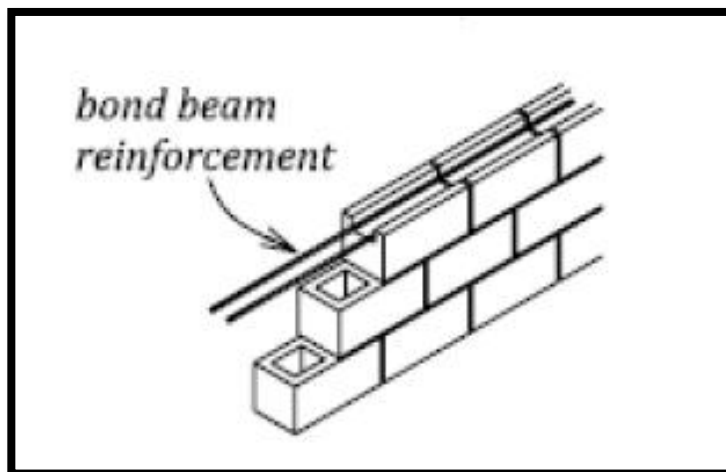
(Anderson y Brzev 2009)

Ilustración 15. Refuerzo horizontal tipo a (embebido en las juntas horizontales).



(Anderson y Brzev 2009)

Ilustración 16. Refuerzo horizontal tipo b (ubicado en vigas de concreto).



(Anderson y Brzev 2009)

2. Aspectos reglamentarios relevantes en reglamentos de construcción.

a. **Reglamento peruano.** La mampostería puede clasificarse en dos maneras:

- **Clasificación por la función estructural:** Los muros pueden clasificarse como portantes y no portantes; los muros no portantes son aquellos que no reciben carga vertical, como es el caso de los muros de delimitación, parapetos o tabiques. Estas estructuras deben ser diseñadas para resistir las acciones de los vientos sismos u otras cargas de empuje perpendiculares al plano del muro. Los muros portantes son aquellos los cuales son contemplados como elementos resistentes y estructurales en una estructura. Estos están sujetos a todo tipo de carga, ya sea en su plano o fuera de él, tanto carga vertical como lateral, y viva como muerta (San Bartolomé 1994).
- **Clasificación por la distribución del refuerzo:** Tomando en cuenta la distribución del refuerzo, los muros pueden clasificarse como muros no reforzados y muros reforzados (San Bartolomé 1994).

Los muros no reforzados son aquellos que carecen de refuerzo, o aun teniéndolo no cumple con las especificaciones mínimas recomendadas en los reglamentos para un muro considerado como reforzado (San Bartolomé 1994).

En cuanto al reglamento peruano, la norma E - 070, el uso de los muros no reforzados está limitado para un nivel, ubicados sobre suelos de buena calidad y con alta densidad de muros en las dos direcciones. En su contra parte el Instituto de Fomento de Hipotecas Aseguradas (FHA), por la vulnerabilidad y amenaza sísmica que se tiene en el territorio nacional no se toman en cuenta este tipo de mampostería como parte del sistema estructural (San Bartolomé 1994).

En cuanto a los muros reforzados, se hace distinción que en cuanto a la distribución del refuerzo pueden clasificarse en armados (usualmente llamado sistema integral), confinados y muros laminares (con el refuerzo entre los muros) (San Bartolomé 1994).

Los muros armados o de mampostería integral son aquellos que poseen el refuerzo en el interior de la mampostería, tanto a lo largo de la altura del muro (refuerzo vertical), como a lo largo de su longitud (refuerzo horizontal) (San Bartolomé 1994).

Entre los requisitos mínimos que la Norma Peruana E - 070, para que un muro pueda ser considerado como confinado se pueden mencionar: La mampostería debe estar enmarcada en sus cuatro lados por concreto armado especialmente diseñados (San Bartolomé 1994).

La distancia máxima entre confinamientos verticales, debe de ser dos veces la distancia que existe entre los elementos confinantes horizontales (soleras). Ya que a mayores distancias el efecto de confinamiento en la región central se pierde creando grietas de incontrolable tamaño (San Bartolomé 1994).

El área mínima para las columnas de confinamiento deben ser igual a:

$$\text{Ecuación 8: } A = 20 \times t$$

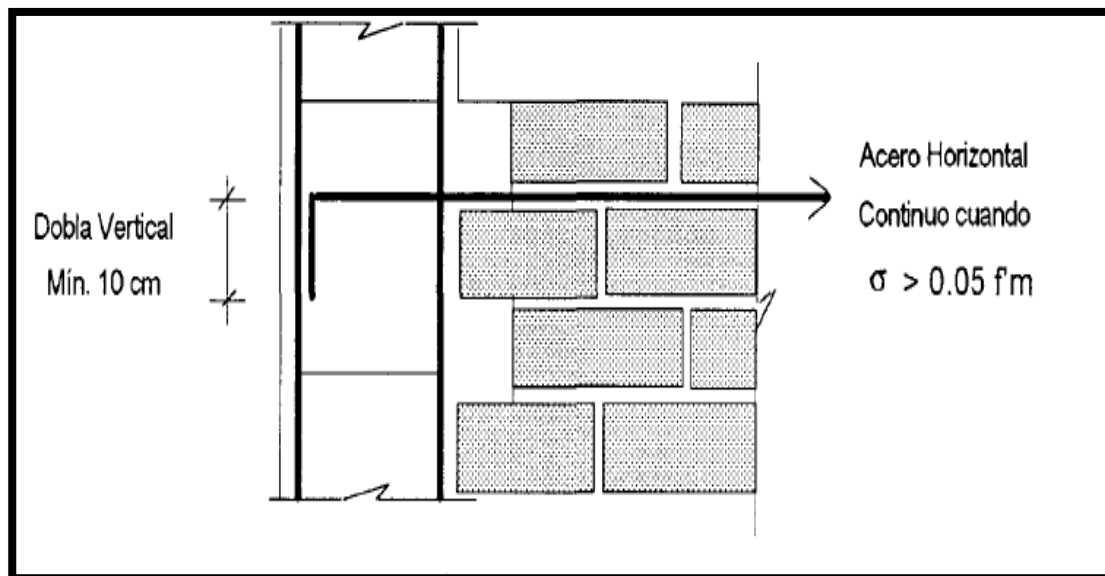
Donde:

t = espesor efectivo del muro en (cm.)

También hacen referencia en cuanto a las cuantías mínimas de refuerzo, los traslapes y longitudes de desarrollo y del detallado necesario de confinamiento para que las columnas resistan las concentraciones de esfuerzos en las esquinas de los muros (San Bartolomé 1994).

Estudios realizados han proporcionado observaciones acerca del comportamiento de los muros confinados, cuando estos están sujetos a una elevada carga axial, del orden del 5% de la resistencia a compresión de los muretes de mampostería, tienen un mal comportamiento sísmico, ya que provoca una drástica disminución en la ductilidad del muro. Para evitar este problema, es recomendable adicionar una cuantía de refuerzo de aproximadamente 0.001, el cual debe ser continuo y anclado en las columnas con ganchos verticales. El doblez proporcionado debe ser vertical, tomando en cuenta las fallas por anclaje que podría desarrollarse cuando se da la formación de fisuras horizontales a tensión o flexión en las columnas. Aun siendo proporcionado el refuerzo horizontal, el esfuerzo axial actuante no debe exceder el 15% de $f'm$ (San Bartolomé 1994).

Ilustración 17. Detalle del refuerzo horizontal continuo en muros confinados de mampostería.

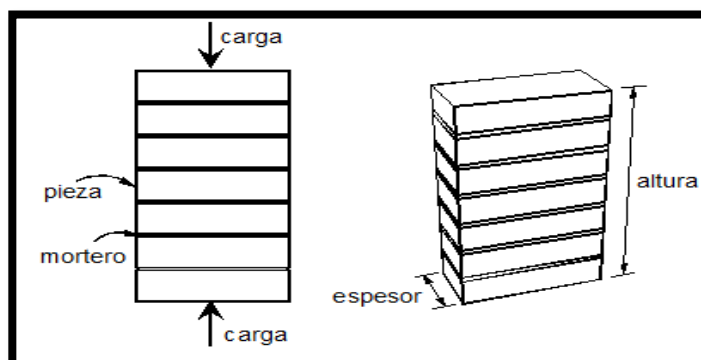


(San Bartolomé 1994)

b. Reglamento mexicano. En cuanto a la resistencia a la compresión y a corte diagonal menciona lo siguiente:

- **Resistencia a la compresión:** La resistencia de diseño a compresión f_m^* , será determinada sobre el área bruta, a partir de los 28 días posteriores a su realización. Los ensayos se llevarán a cabo a partir de muretes compuestos por unidades de mampostería y mortero que se utilizarán en obra, conformados de por lo menos tres piezas sobrepuestas, con una relación de esbeltez en los órdenes de dos a cinco (Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007).

Ilustración 18. Muretes para prueba en compresión.



(Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007)

Los valores de esfuerzo medido sobre el área bruta se corregirán multiplicándolos por factores correctivos, los cuales a su vez dependen de la relación de esbeltez.

La resistencia de diseño será calculada como:

$$\text{Ecuación 9: } f'_m = \frac{f_m}{1+2.5C_m}$$

Donde:

f_m = media de su resistencia a compresión corregida

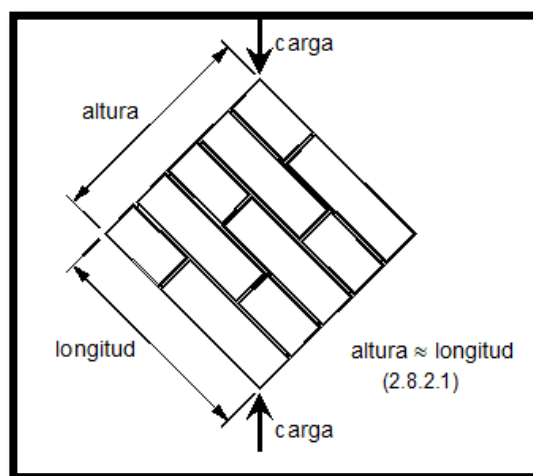
C_m = coeficiente de variación de la resistencia de mampostería, no inferior a 0.15

También es posible determinar la resistencia a compresión f_m^* a partir de la resistencia de diseño de las piezas y del mortero a utilizar (Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007).

- **Resistencia a compresión diagonal:** La resistencia de la mampostería a corte diagonal, v_m , será determinada a través del área bruta de la diagonal, a partir de 28 días posteriores a la realización del ensayo. Los muretes tendrán al menos una longitud igual a largo y medio de la pieza y un número de hiladas necesario

para que la altura sea aproximadamente igual a su longitud. Los muretes se ensayaran a través de una carga diagonal monótona aplicada alrededor de la diagonal, y su valor será igual a la carga máxima resistida dividida entre el área bruta del murete medida sobre la misma diagonal (Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, 2007).

Ilustración 19. Muretes para prueba en compresión diagonal.



(Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007)

La resistencia a compresión diagonal de diseño, $V'm$, será igual a:

$$\text{Ecuación 10: } V'm = \frac{vm}{1+2.5cv}$$

Donde:

vm = media de la resistencia a compresión diagonal, a lo largo de la diagonal
 cv = coeficiente de variación a compresión diagonal, no inferior a 0.20

Si los ensayos para la determinación de la resistencia a compresión diagonal, no son llevados a cabo, es posible determinar la resistencia a partir de valores indicativos de las resistencias de las piezas de mampostería y de los morteros, como

en el caso de la resistencia a la compresión (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).

En cuanto a las especificaciones generales de análisis y diseño la norma Mexicana establece tres criterios de diseño que el dimensionamiento y detallado de la mampostería debe de cumplir, estos referidos a los estados límite de servicio; estado límite de falla; y el diseño por durabilidad de la estructura de mampostería (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).

La norma Mexicana en relación con la resistencia de la mampostería a cargas laterales, determina que la fuerza cortante que toma la mampostería, se basa en el esfuerzo cortante resistente del diseño, que son tomadas por estas normas igual a la resistencia a compresión diagonal, v_m^* (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).

b. Normas guatemaltecas.

1) FHA. Las normas FHA en cuanto al espesor efectivo, menciona que para paredes verticales y horizontales, para viviendas de un nivel, el espesor mínimo será de 11 cm. Y su relación altura/espesor no será mayor de 23. Los muros que posean relaciones mayores al veintitrés deberán detallarse elementos adicionales de refuerzo para minimizar el pandeo del muro. Para viviendas de dos niveles será de 14 centímetros y su relación altura/espesor no será mayor a 20, y al igual que para las relaciones mayores a 20 deberán poseer el detallado necesario para imposibilitar el pandeo en el muro (Fomento de Hipotecas Aseguradas 2002).

El FHA al referirse a las dimensiones mínimas aceptables de elementos de concreto para refuerzo vertical menciona que: en el sentido normal de la pared no será menor al grueso del muro, y en el otro sentido para refuerzos armados con cuatro varillas o más, no menos que el grueso del muro y para refuerzos con armados de dos varillas de 10 cm (Fomento de Hipotecas Aseguradas 2002).

En cuanto al concreto de los elementos de confinamiento el FHA menciona que para el concreto de soleras, refuerzos verticales, sillares y dinteles, tendrá una resistencia a la compresión a los 28 días de por lo menos 176 Kg/cm (2,500 lbs/pulg) (Fomento de Hipotecas Aseguradas 2002).

En referencia con el refuerzo vertical para paredes de mampostería el FHA propone que el área mínima de acero de refuerzo vertical será de 0.0008 veces el área de la sección bruta de la pared cuando el refuerzo de fluencia del acero sea 2,325 Kg/cm (33,000 lb/pulg); 0.0007 para el acero con refuerzo a la fluencia de 2,820 Kg/cm (40,000 lb/pulg); 0.0006 si el esfuerzo de fluencia es de 3,535 Kg/cm (50,000 lb/pulg) y 0.0005 para aceros con esfuerzo de fluencia de 4,227 kg/cm (60,000 lb/pulg) o mayor (Fomento de Hipotecas Aseguradas 2002).

Para el caso del refuerzo horizontal el FHA menciona que las paredes de mampostería deben de reforzarse horizontalmente con un área de acero no menor de 0.0015 veces el área de la sección transversal de la pared si el refuerzo de fluencia del acero es de 2,325 Kg/cm (33,000 lb/pulg); 0.0013 veces si el esfuerzo de fluencia del acero es de 2,820 kg/cm (40,000 lb/pulg); 0.0012 para el esfuerzo de fluencia de 3,525 kg/cm (50,000 lb/pulg); y 0.0010 veces si el esfuerzo de fluencia del acero es de 4,227 kg/cm (60,000 lb/pulg) o mayor (Fomento de Hipotecas Aseguradas 2002).

En cuanto al recubrimiento mínimo para el acero de refuerzo el FHA propone que no debe de ser menor a 1.5 centímetros, tanto para el refuerzo vertical como para el horizontal (Fomento de Hipotecas Aseguradas 2002).

2) NR-4 Normas AGIES. La norma NR-4 del AGIES en su sección 4.9, al referirse a las características de resistencia de ladrillos de barro recocido establece que la resistencia mínima de los ladrillos, medidos sobre el área bruta no debe ser menor a 50Kg/cm², mientras que para los ladrillos elaborados a máquina y

a procesos de extrusión la resistencia mínima debe de ser del orden de 90kg/cm^2 (Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales y Sismicos 2004).

La norma NR-4 del AGIES en su sección 4.10, en relación con la importancia del uso de la cal en la elaboración y dosificación del mortero expone que el cemento le proporciona más trabajabilidad, mayor retención de agua y elasticidad a la pasta de mortero. Permitiéndole al albañil constructor mayor manejabilidad para poder distribuir correctamente el mortero y llenar los espacios de las uniones entre piezas. Por sus características químicas, la cal permite mantener la humedad por mayor tiempo, resistiendo la absorción de agua por parte de las unidades mampuestas (Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales y Sismicos 2004).

La norma NR-4 del AGIES en su sección 4.10, en relación a las características de resistencia del mortero, establece que es común sacrificar la resistencia del mortero, no únicamente por factores económicos, sino también para restringir las expansiones que pueden resultar en rajaduras en los muros (Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales y Sismicos 2004).

O. Muros de mampostería no reforzada.

1. Definición y materiales. Como se mencionó anteriormente la mampostería no reforzada es aquel tipo de mampostería que no posee ningún tipo de refuerzo vertical ni horizontal. La aplicación de los principios de ingeniería estructural, han significado un significativo avance en el conocimiento del comportamiento y propiedades mecánicas para este tipo de mampostería (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Los efectos de los eventos sísmicos han puesto en evidencia que las estructuras de mampostería no reforzada han sido las más afectadas y, han producido tanto pérdidas económicas como una considerable cantidad de vidas, al compararlas con otros tipos de sistemas estructurales (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Este tipo de mampostería se caracteriza por poseer un comportamiento no dúctil, provocando así un modo de fallo del tipo frágil haciendo que el colapso de la estructura sea súbito (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Ante sismos de menor intensidad y escala, este tipo de estructuras se han visto afectadas ligeramente sin presentar daños de consideración, esto podría reconsiderar el uso de estos tipos de sistemas estructurales en zonas donde los riesgos y amenazas sísmicas sean bajas, utilizando una técnicas refinadas para su correcto desempeño y reducir el riesgo al que se encuentran expuestas (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Son pocos los resultados experimentales obtenidos para la mampostería no reforzada, en especial, los realizados para cargas cíclicas (sismos), esto debido principalmente a que estas estructuras son consideradas la mayoría de las veces inadecuadas en zonas con amenazas sísmicas elevadas, además de un comportamiento variable en cuanto al ser expuesto a este tipo de cargas (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Considerando que no existe ningún tipo de refuerzo, la redistribución de los esfuerzos máximos no es posible y el fallo local puede llegar a convertirse rápidamente en un fallo del tipo global de la estructura. De esa forma el sistema constructivo pierde resistencia y puede llegar a colapsar. En contra parte, cuanto la respuesta de la estructura cae en el rango elástico, el desempeño de la misma es bastante bueno (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Cuando se diseña este tipo de estructuras para que respondan en el rango elástico, deben de ser de grandes proporciones para cualquier movimiento sísmico, además de tener en su configuración una gran cantidad de muros de gran espesor

en ambas direcciones en planta (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

La evaluación del desempeño sísmico de este tipo de estructuras está condicionado por ciertos aspectos como:

- El agrietamiento inicial no necesariamente corresponde al colapso de la estructura (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).
- La capacidad de disipación de energía después de la capacidad de resistencia en la mayoría de los casos es limitada (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

En cuanto a los materiales, este tipo de mampostería está compuesta por bloques en forma natural (piedra o roca) o de fábrica (como el caso de ladrillos y unidades de concreto), y una sucesión de juntas, embebidas con mortero dispuestas en forma regular o irregular (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

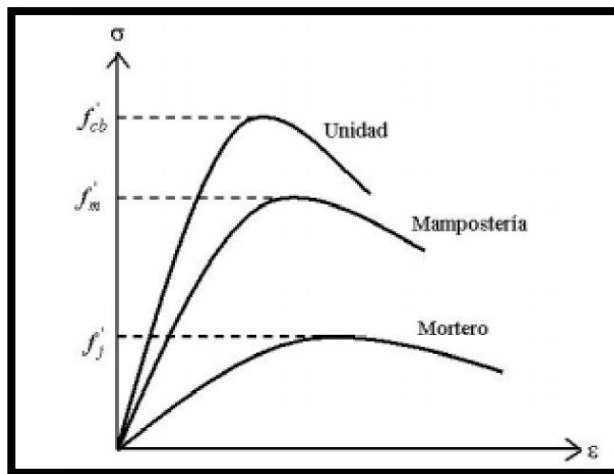
2. Propiedades mecánicas

a. Resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión, muestra un intervalo de variación amplio, esto debido al tipo de material y unidad utilizada (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

No hay un conocimiento muy amplio acerca de la relación esfuerzo - deformación de las unidades de mampostería bajo compresión. Resultados experimentales en ladrillos de arcilla, indican que esta relación es aproximadamente lineal hasta el momento del fallo, lo que posteriormente conlleva a un rápido decrecimiento de la resistencia (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

b. **Resistencia a la tensión.** Generalmente, el valor de la resistencia a la tracción uniaxial de las unidades de mampostería, se obtiene en función de la resistencia a la compresión. No obstante, estas expresiones son bastantes sensibles a la técnica de ensayo empleada (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002)

Ilustración 20. Relación esfuerzo - deformación para el mortero, las unidades aisladas y los muretes de mampostería.



(Paulay 1992)

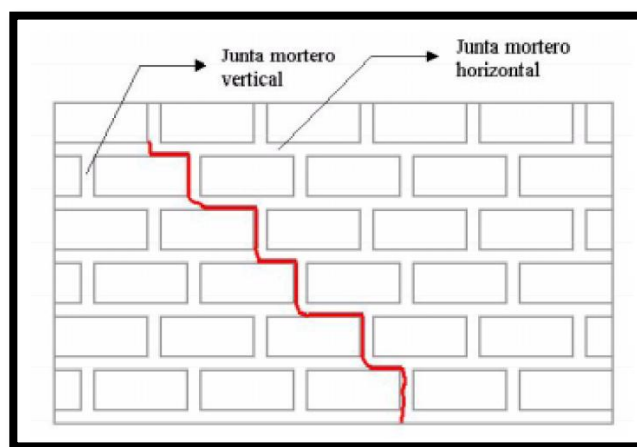
c. **Comportamiento mecánico de la mampostería en compresión.** La mampostería utilizando bloques de ladrillo presenta un comportamiento óptimo cuando está sujeta a esfuerzos de compresión. Su comportamiento y los modos de falla ante cargas axiales, dependen de la interacción de piezas y mortero; ésta puede interpretarse en la siguiente forma: las piezas y el mortero tienen características esfuerzo - deformación diferentes: por lo tanto, al ser sometidos a un mismo esfuerzo, se produce una interacción entre ambos, que consiste en que el material menos deformable, las piezas en general, restringe las deformaciones transversales del material más deformable (el mortero), introduciéndole esfuerzos de compresión de dirección transversal. Por el contrario, en el material menos deformable, se introducen esfuerzos transversales en tracción, que disminuyen su resistencia respecto a la que se obtiene en el ensayo de compresión simple del material aislado (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

d. **Comportamiento mecánico de la mampostería a cortante.** Los esfuerzos de cortante son combinados con los esfuerzos producidos por cargas verticales u otras acciones generalmente.

El comportamiento de la mampostería se caracteriza por dos efectos importantes: la frágil respuesta de las unidades de mampostería a tensión y la debilidad en las juntas de mortero. Resultados experimentales proponen tres tipos de fallas a consecuencia de este tipo de esfuerzos:

- **Fallo por fricción – cortante:** ocurre para esfuerzos normales de compresión bajos y es producido por la débil unión entre mortero y unidad. Lo cual es caracterizado por dar lugar a esfuerzos cortantes deslizantes en las juntas horizontales (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Ilustración 21. Agrietamiento escalonado diagonalmente producido por un fallo de fricción cortante.

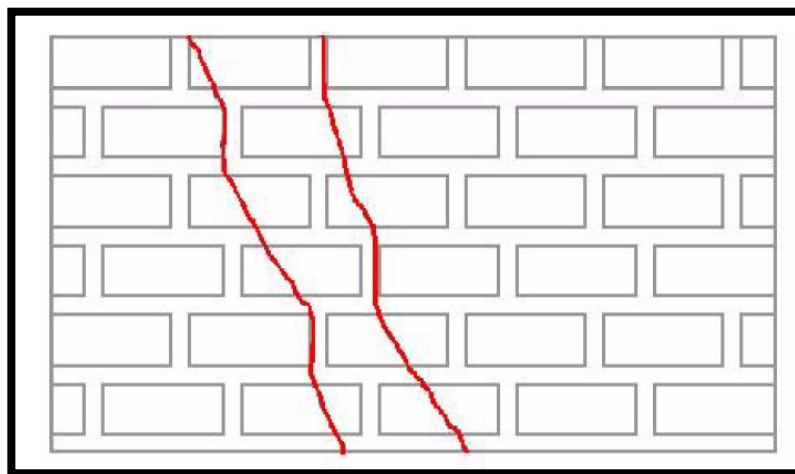


(Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002)

- **Fallo por tensión diagonal:** es producido directamente sobre los bloques de mampostería para valores de compresión normales moderados. La resistencia del mortero a compresión se incrementa debido a los esfuerzos de compresión normales en el

muro. Dando como resultado que se produzcan las grietas en las unidades de mampostería como resultado de la tensión generados por los esfuerzos combinados de compresión y cortante.

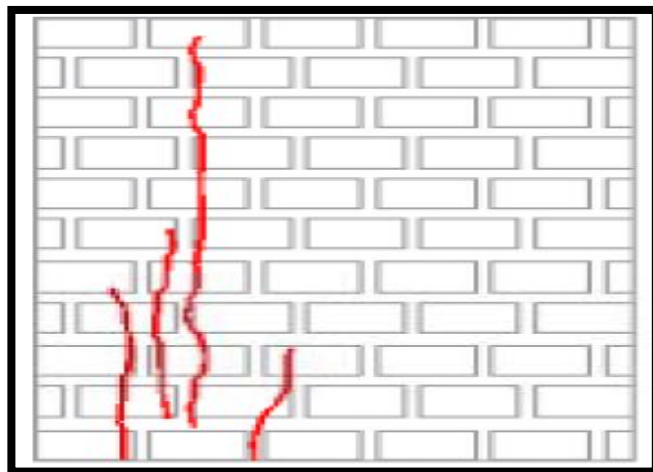
Ilustración 22. Agrietamiento de las unidades de mampostería producido por un fallo de tensión diagonal.



(Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002)

- **Fallo a compresión:** este fallo se presenta para valores muy altos de esfuerzos de compresión normal en el muro. Las grietas se forman por las deformaciones verticales y se ven incrementadas por las deformaciones que sufre el mortero en las juntas. Se desarrollan verticalmente y atraviesan las unidades de mampostería, llegando a comprometer en algunos casos la estabilidad del muro.

Ilustración 23. Fallo por agrietamiento vertical excesivo producido por esfuerzos de compresión.



(Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002)

Muchos experimentos han demostrado que la resistencia a cortante de la mampostería se ve incrementada con el incremento de esfuerzos de compresión aplicados a la mampostería. Esto considerando que la resistencia a cortante resulta de la combinación de dos distintos mecanismos: la resistencia a la adherencia y la resistencia a fricción entre las juntas de mortero y las unidades (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

La resistencia a la adherencia entre las unidades y el mortero pueden ser afectadas por numerosos parámetros, entre los factores más importantes, relacionados con las características de los materiales son:

- **Unidades:** porosidad, tasa inicial de absorción de agua, la rugosidad de la superficie, el contenido de humedad y la reactividad de aditivos (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).
- **Mortero:** características de arena (calidad y limpieza de la arena), la relación limo - cemento, la retentividad del agua, el contenido de agua, la presencia de cal y aditivos (Capítulo No. 6

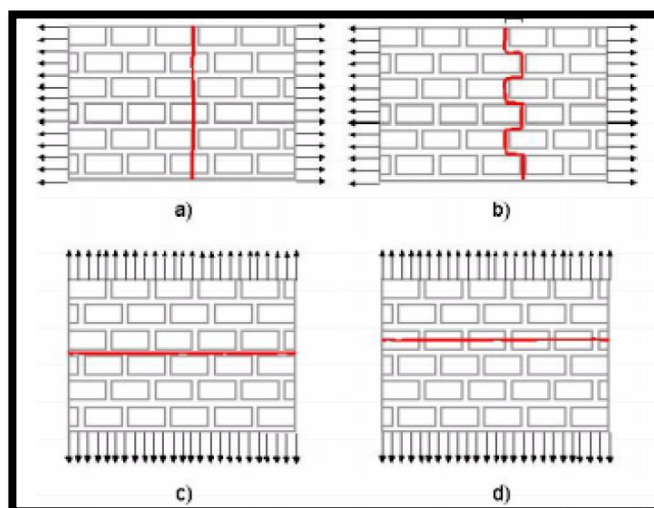
"Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

El incremento en el contenido de humedad de las unidades (sin llegar al grado de saturación), y la presencia de cal y limos en el mortero aumentan la resistencia de la adherencia entre el mortero y la unidad. (Hendry 1990).

e. Comportamiento mecánico de la mampostería a tensión. La resistencia a tensión en este tipo de mampostería está gobernada por la resistencia desarrollada en la adherencia mortero – unidad (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Distintos tipos de fallo pueden presentarse de acuerdo con: la dirección de la carga de tensión; la magnitud relativa de la resistencia de adherencia y la resistencia de tensión de las unidades. Cuando la dirección de los esfuerzos de tensión son paralelos a las juntas horizontales del mortero, pueden presentarse dos tipos de agrietamientos: grietas totalmente verticales que atraviesan las unidades, donde la resistencia está controlada por la resistencia a tensión de las unidades de mampostería (Figura a); grietas que no afectan las unidades de mampostería y que dónde únicamente se presentan en las juntas del mortero (Figura b). Si los esfuerzos de tensión actúan perpendicularmente a las juntas del mortero horizontal, los modos de fallo más comunes son los que se presentan como la separación en el interfaz mortero – unidad (Figura c). Aunque también puede presentarse el fallo por tensión en las unidades de mampostería (Figura d) (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Ilustración 24. Modos de fallo sujetos a tensión directa.



(Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002)

f. **Comportamiento mecánico de la mampostería a flexo-compresión y cortante.** Cuando los muros de carga, están sujetos a cargas verticales gravitatorias (esfuerzos de compresión) y cargas laterales, se generan a parte de los esfuerzos de compresión y cortante, esfuerzos de flexión, lo cual produce un cambio en el comportamiento mecánico de la mampostería. El análisis se vuelve más complejo a consecuencia de la incertidumbre de las resistencias a cortante y flexión de los muros, debido a estas incertidumbres y falta de información los elementos de mampostería son tomados en cuenta como frágiles, limitando su resistencia a esfuerzos admisibles y sin tomar en cuenta las características y consideraciones que implicarían un diseño inelástico. Aunque estudios recientes demuestran que los muros de mampostería no reforzada son capaces de disipar energía por deformación aún después de la aparición de las primeras fisuras (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

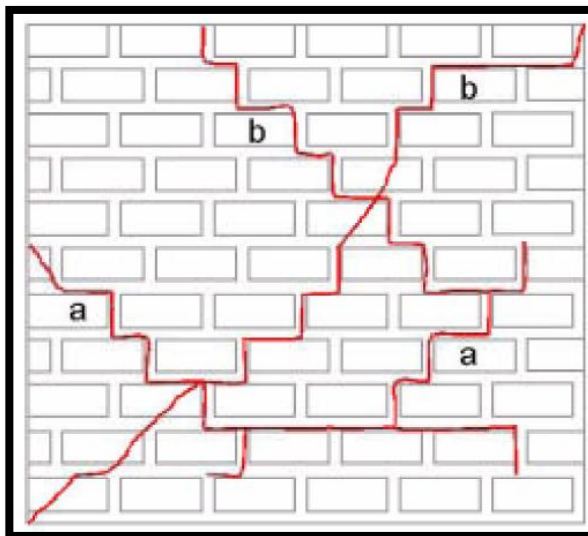
Se han observado que la mayoría de mecanismos de fallo a consecuencia de estos esfuerzos, han sido desarrollados por fallos a cortante, a continuación se presentan algunas de las razones por las que se presenta este comportamiento:

- La deformación por cortante predomina sobre la de flexión ya que generalmente los muros son de poca altura, por lo que poseen una relación de altura – largo considerable lo cual hace que el momento de inercia de su sección transversal se ha elevado (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).
- Al agregarle el efecto de los muros transversales, al flectarse el muro, éste debería levantar al muro perpendicular, lo cual disminuye aún más las deformaciones por flexión (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).
- La resistencia a cortante crece en menor forma que la resistencia a flexión, con el incremento de la carga axial en los muros esbeltos. Y la resistencia a cortante disminuye proporcionalmente a la relación altura – longitud (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Como anteriormente fue mencionado, los tipos más comunes de fallas para los esfuerzos de flexocompresión y corte, son los presentados a continuación:

- **Fallo por cortante:** se presentan en los muros de mampostería que presentan la mayor relación de aspecto (longitud – altura) y una mayor carga pre-compresiva. El fallo se presenta por medio de grietas diagonales y longitudinales, aproximadamente al 62% de alcanzar la carga máxima y posteriormente aparece una grieta diagonal (“b”), la cual es característica de este tipo de fallos por cortante. Al momento de que la orientación de la carga cambia de sentido (carga reversible), las fisuras se cierran imitando el comportamiento no agrietado, y se carga hasta obtener una grieta idéntica a la grieta diagonal (“b”) encontrada en el otro sentido (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

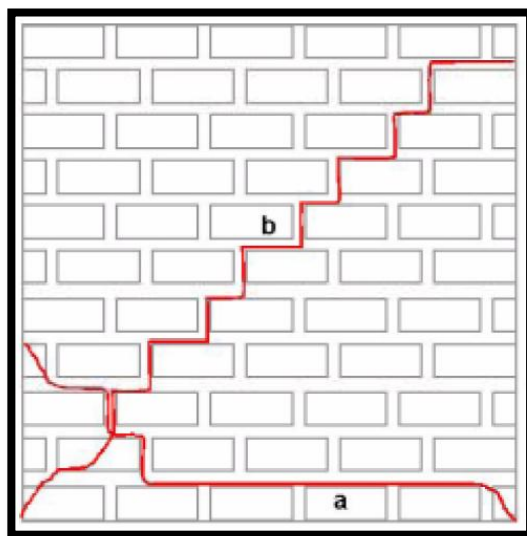
Ilustración 25. Agrietamiento por fallo a cortante en muros de mampostería no reforzada.



(Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002)

- **Fallo por flexión:** este tipo de fallo inicia con grietas horizontales localizadas en la parte inferior del muro, sobre muy cercano al apoyo interior (la base). La longitud de la grieta es aproximadamente dos tercios del largo total de la base del muro ("a"). Cuando la fuerza lateral cambia de sentido la grieta por flexión ocurre pero en el lado opuesto, esta vez continúa a lo largo del muro ("b"). En este tipo de mampostería, la capacidad de resistencia a flexión depende está regida por la carga vertical actuante sobre el muro. Creciendo así de forma proporcional la resistencia a flexión (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Ilustración 26. Agrietamiento por fallo a flexión de mampostería no reforzada



(Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002)

g. Comportamiento mecánico bajo cargas cíclicas y dinámicas en el plano. La respuesta de la mampostería depende de la resistencia, rigidez y la ductilidad de los muros, del tipo de diafragma al que está ligado, sus conexiones y finalmente de la magnitud de las cargas verticales de compresión del sistema. Ensayos de respuesta histórica para muros de mampostería no reforzada, muestran que el comportamiento sujeto a cargas cíclicas está relacionado a la resistencia de las piezas de mampostería ensambladas y de la magnitud de la carga vertical aplicada en el muro (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

3. Principales mecanismos de fallo globales. Podemos identificar entre los mecanismos de fallo, los ocurridos fuera del plano del muro y dentro del mismo.

Para las fallas fuera del plano del muro son producidos por la falta de anclaje entre los muros y los diafragmas de piso o techos, y en muchas ocasiones por la excesiva flexibilidad de los diafragmas. Este tipo de falla es explosiva y pone en

riesgo la capacidad del sistema resistente de cargas de gravedad (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

Para las fallas en el plano, se identifican como las principales y más comunes fallas las siguientes: fallas en el plano por cortante (agrietamiento de simple o doble diagonal); fallas en el plano por flexión (grietas horizontales y se forman en las partes superior e inferior de las columnas o pilares de la mampostería); fallos de anclaje o conexión (como consecuencia una incorrecta distribución de cargas verticales y horizontales a los elementos resistentes); flexibilidad de los diafragmas y resistencia; fallas en la cimentación; etc. (Capítulo No. 6 "Comportamiento Sísmico de Edificios de Mampostería No Reforzada" 2002).

P. Mampostería reforzada internamente (“integral”).

1. Definición. Este tipo de mampostería es desarrollada a partir de unidades de mampostería de perforación vertical, unidas a través de juntas de mortero y reforzadas interiormente con barras y/o mallas de acero. Este tipo de mampostería permite también la inyección de grout en todas sus perforaciones verticales o únicamente en las perforaciones que lleven consigo el refuerzo vertical, de acuerdo a la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico del diseño sismo resistente utilizado (Besada 1998).

Con la inclusión del refuerzo horizontal y el grout, este tipo de mampostería ha obtenido buenas respuestas ante las fuerzas laterales. Su alta resistencia a la compresión y a la tensión puede llegar a desarrollar formas estructurales únicas, agregando también ductilidad e intensificando el amortiguamiento que son requeridos como parte del diseño sísmico. Este aumento en resistencia a cortante se traduce en un mejor desempeño ante cargas laterales (Amrhein 1992).

En la mampostería armada se integra el comportamiento de la mampostería con el acero, de igual forma como trabaja el concreto con el acero, para el caso del concreto armado. Para que esta integración sea posible en la mampostería es muy

importante que la adherencia, empalmes y anclajes posibiliten el desarrollo total del acero a tensión (Amrhein 1992).

2. Comportamiento mecánico. La capacidad de resistencia a tensión es dictada exclusivamente por el acero, y los esfuerzos a compresión desarrollados son resistidos por la mampostería conjunto con el grout no tomando en cuenta al acero (Amrhein 1992).

La capacidad estructural en la mampostería armada depende principalmente de la cuantía de acero utilizada y la disposición de la misma dentro del muro, sin embargo es importante mencionar que los primeros esfuerzos de agrietamiento de la mampostería son independientes de la presencia y cantidad de acero suministrado al muro. El acero empieza a desarrollar su resistencia justamente después del agrietamiento de la mampostería (Amrhein 1992).

Con el fin de mantener la integridad del material y la ductilidad, es necesario colocar las cantidades mínimas de refuerzo que satisfagan sus requerimientos de esfuerzos (Amrhein 1992).

3. Beneficios estructurales. El agregar refuerzo a la mampostería permite que las paredes sean más delgadas (Amrhein 1992).

Los dinteles y vigas de la mampostería construida con refuerzo pueden desarrollar claros más largos y resistir las combinaciones de cargas verticales y horizontales (Amrhein 1992).

La mampostería reforzada al proveerle ductilidad y resistencia de tal manera que puedan llegar a soportar cargas laterales, tanto en su plano como fuera del mismo, lo que hace que los muros puedan ser más altos y resistentes (Amrhein 1992).

Mejores propiedades acústicas y térmicas, principalmente a consecuencia de la presencia del grout en las perforaciones verticales. (Amrhein 1992).

4. Restricciones para la integración acero – mampostería. De acuerdo a las características geométricas del material, es indispensable que el refuerzo se coloque únicamente vertical y horizontalmente, por lo que no es posible colocar barras inclinadas (San Bartolomé 1994).

Los muros deben armarse con diámetros compatibles con las dimensiones de las perforaciones verticales, comúnmente se exige que las barras de acero no excedan los 25 milímetros de diámetro (barras No. 8) (San Bartolomé 1994).

Al ser el grout y el mortero de resistencias relativamente pequeñas, es necesario armar con diámetros de acero pequeños para minimizar así los esfuerzos de adherencia que puedan afectar el funcionamiento estructural del muro (San Bartolomé 1994).

A consecuencia del método constructivo, es poco común evitar que los empales sucedan en la base del muro, la cual hace que el detallado de dichos empalmes y anclajes deban realizarse con especial cuidado (San Bartolomé 1994).

No es posible la colocación de estribos en la mampostería para impedir el efecto del pandeo, por lo cual es preferible la distribución del acero a lo largo del muro para obtener mejores resultados ante este tipo de fallas (San Bartolomé 1994).

5. Comportamientos y comentarios acerca de la mampostería armada interiormente. Los muros de mampostería armada poseen características importantes de ductilidad y por ende responden satisfactoriamente en cuanto a la disipación de la energía al ser sometidos a cargas laterales cíclicas. Como consecuencia se les considera adecuados para zonas sismo-resistentes, siempre y cuando poseen los detallados de refuerzo adecuados (San Bartolomé 1994).

La falla por flexión presenta una mayor ductilidad en los muros, que los que fallan por corte diagonal (San Bartolomé 1994).

La ductilidad por flexión puede verse reducida, cuando el muro es sometido a importantes cargas axiales (de compresión), esto debido al agrietamiento que se puede llegar a presentar en los talones del muro (esquinas inferiores). Por lo que es recomendable el uso de elementos de confinamiento en estas áreas para minimizar el agrietamiento (San Bartolomé 1994).

La falla por corte en los muros es indeseable (por ser de tipo frágil), y conlleva a un análisis más complicado (San Bartolomé 1994).

En cuanto a los desarrollos de las grietas por corte diagonal de los muros armados, se considera que la primera grieta depende únicamente de la capacidad e interacción entre las unidades de mampostería - mortero, y de la carga axial soportada o inducida en el mismo. Después del primer agrietamiento, la capacidad del muro a resistir está gobernada por la cantidad de acero vertical y horizontal (San Bartolomé 1994).

Se ha observado que para el caso de los muros armados interiormente, no existe proporcionalidad entre la resistencia al corte y la cantidad de las cuantías de acero. Sin embargo los muros que presentan mayores cuantías de acero poseen una mayor ductilidad y por lo tanto un aumento en la capacidad de disipación de energía (San Bartolomé 1994).

Para el caso de los muros armados interiormente se ha observado que un aumento en las cantidades de acero horizontal, puede llegar a modificar el comportamiento inelástico del muro, pasando de una falla frágil por corte a una falla dúctil por flexión (San Bartolomé 1994).

En contraste se ha observado también que para los muros armados interiormente el aumento de la carga vertical de compresión, puede llegar a alterar el comportamiento de una falla mixta “flexión - corte”, a una falla del tipo frágil en corte. Por lo que se considera que estos aumentos de carga pueden llegar a tener la misma importancia en la flexión como el corte (San Bartolomé 1994).

6. Estados de comportamiento de muros reforzados interiormente.

a. Primer estado de comportamiento. Este estado de comportamiento corresponde al muro no agrietado, es decir que los esfuerzos de tensión inducidos en el muro son menores al módulo de ruptura del mismo. Cuando el momento y los esfuerzos alcanzan los valores de ruptura del muro, el primer agrietamiento da inicio y se llega al límite de este comportamiento. Existen dos parámetros que relacionan la resistencia del muro en este estado de comportamiento: la adhesión de la unidad de mampostería con el mortero y el grout líquido; y la carga vertical aplicada (San Bartolomé 1994).

b. Segundo estado de comportamiento. Este estado comienza con el primer agrietamiento del muro donde los esfuerzos de flexión son resistidos ahora por el acero distribuido y las deformaciones y esfuerzos del mismo permanecen por debajo del límite de fluencia (San Bartolomé 1994).

Los estados de comportamiento primeros y segundos del muro son considerados los de servicio del muro, y en ellos se ven amortiguados los movimientos vibratorios generados por cargas esencialmente inerciales, como las generadas al momento de un evento sísmico (San Bartolomé 1994).

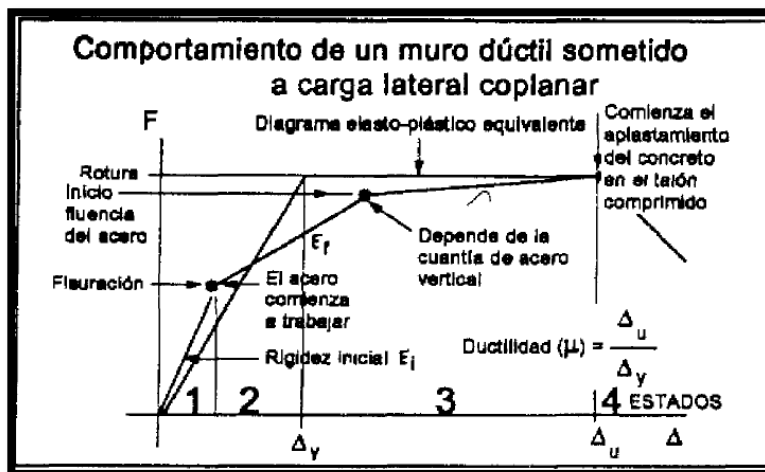
c. Tercer estado de comportamiento. El tercer estado de comportamiento, también conocido como el estado último, ocurre cuando las máximas deformaciones del acero exceden la deformación por fluencia del mismo, y la máxima deformación en compresión de la mampostería es igual a la máxima

deformación utilizable, en este límite se considera que el muro ha alcanzado su capacidad de resistencia máxima (San Bartolomé 1994).

d. **Cuarto estado de comportamiento.** Da inicio cuando se alcanza la resistencia máxima del muro, y finaliza cuando se tienen valores de pérdida de resistencia del muro del orden del 30%; el desarrollo de este estado depende principalmente del comportamiento del talón comprimido. Si el talón cede rápidamente por compresión, la pendiente de la línea carga - deformación será grande, mientras que si el talón mantiene sus características de resistencia, las pendientes pueden llegar a ser más suaves, y el muro puede llegar a alcanzar mayores deformaciones sin perder en forma considerable su resistencia (San Bartolomé 1994).

Tanto en el tercer estado de comportamiento como en el cuarto, la capacidad de amortiguamiento del muro se debe a la capacidad histórica de disipación de energía. Por otro lado tras alcanzado la resistencia máxima del muro, incrementos de carga provocarán que se presenten más y severas grietas, haciendo que la reparación sea cada vez más costosa y complicada (San Bartolomé 1994).

Ilustración 27. Comportamiento de un muro dúctil sometido a carga lateral coplanar.



(San Bartolomé 1994)

7. Influencia en el comportamiento cíclico de los muros.

a. **Reforzados interiormente.** Se ha observado que la resistencia al agrietamiento de la mampostería depende exclusivamente de la resistencia a la tensión y adhesión mortero – unidad de mampostería, y esta puede llegar a ser aumentada por la pre compresión que proveen las cargas verticales, considerando no significativa la influencia del acero. De igual forma la resistencia a cortante es controlada por la cuantía de refuerzo horizontal, de tal modo que si la cuantía de refuerzo horizontal es considerablemente elevada, este tipo de comportamiento puede llegar a evitarse. También se ha observado que la cuantía de acero de refuerzo vertical, es considerada la de mayor influencia en la resistencia máxima del muro, la cual puede llegar a aumentar (mayor ductilidad y disipación de energía) con el aumento de dicha cuantía (San Bartolomé 1994).

En el siguiente Cuadro se muestran las diferentes influencias de las variables que se ven involucradas en las características de resistentes de los muros de mampostería armada interiormente sometidos a cargas laterales (San Bartolomé 1994).

Tabla 9. Influencias en el comportamiento de muros de mampostería sometidos a cargas laterales cíclicas por el aumento de los factores indicados.

Factores	Resistencia a la compresión de la mampostería	Resistencia a la tensión de la mampostería	Cantidad de acero vertical	Cantidad de acero horizontal	Carga vertical	Esbeltez del muro
Resistencia al agrietamiento		Muy importante (+)			Importante (+)	
Resistencia última: corte			Importante (+)	Muy importante (+)	Importante (+)	
Resistencia última: flexión	Importante (+)		Muy importante (+)		Importante (+)	

Continuación Tabla 9.

Factores	Resistencia a la compresión de la mampostería	Resistencia a la tensión de la mampostería	Cantidad de acero vertical	Cantidad de acero horizontal	Carga vertical	Esbeltez del muro
Ductilidad	Muy importante (+)		Importante (-)	Importante (+)	Importante (-)	Importante (-)
Degradación de resistencia	Importante (-)		Importante (-)	Importante (-)	Importante (+)	
Degradación de rigidez	Importante (-)		Importante (-)	Importante (-)		Importante (+)

(San Bartolomé 1994)

8. Puntos a favor de la mampostería

a. **Reforzada interiormente.** La no presencia de las columnas en los muros armados, hace que el encofrado no sea requerido. Sin embargo se debe tener especial cuidado en el cizallamiento que puede ocurrir debido a los esfuerzos por cortante a la altura de la junta de construcción entre las jornadas de trabajo al levantar la mampostería. Esto resulta menos crítico para el caso de la mampostería confinada, debido a que el concreto de las columnas de confinamiento es vaciado en forma simultánea en toda la altura del entrepiso (San Bartolomé 1994).

Los conductos para las instalaciones eléctricas, pueden ser colocados en las perforaciones verticales de las unidades de mampostería (San Bartolomé 1994).

Presentan un mejor acabo, y de utilizarse unidades cara vistas, no se ve en la necesidad de repello o pinturas (San Bartolomé 1994).

Al emplearse el refuerzo vertical uniformemente distribuido se posee mejores características de transmisión de los esfuerzos de corte – fricción, entre las uniones: losa – muro; cimentación – muro (San Bartolomé 1994).

9. Puntos en contra de la mampostería.

a. **Reforzada interiormente.** El concreto fluido o grout, requiere de mayores cantidades de cemento para llegar a desarrollar la misma resistencia que un concreto normal. En lugares de riesgo sísmico, se considera importante rellenar todas las perforaciones verticales, lo cual implica complicaciones del proceso constructivo (San Bartolomé 1994).

Se requiere utilizar refuerzos mínimos vertical y horizontal en todos los entrepisos para evitar fisuras en los muros a consecuencia de la contracción del grout (San Bartolomé 1994).

Se requiere de mano de obra especializada y de buena precisión, para no terminar doblando el refuerzo vertical al momento de hacerla penetrar en las unidades de mampostería perforadas (San Bartolomé 1994).

Los ambientes modulares, deben estar acorde a las medidas de las unidades de mampostería de perforación (San Bartolomé 1994).

No se considera recomendable el uso de concreto ciclópeo en la cimentación, por lo que se debe utilizar un sistema de cimentación más caro, como el concreto simple corrido (San Bartolomé 1994).

Con el fin de evitar fallas por aplastamiento en los talones, pueden utilizarse planchas de acero con perforaciones verticales que son elementos más onerosos que los estribos convencionales utilizados (San Bartolomé 1994).

Al no existir columnas de confinamiento en los extremos de los muros, las fisuras por flexión, ocurren en una temprana etapa de solicitación sísmica. Su rigidez lateral de los muros es más baja que los muros confinados (San Bartolomé 1994).

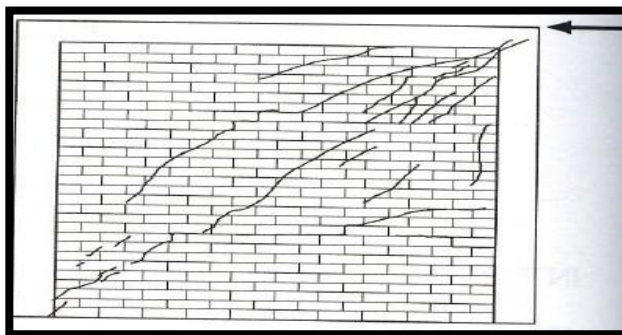
Q. Mampostería confinada

1. Definición. En este tipo de mampostería se colocan elementos de concreto reforzado, de sección transversal pequeña, en el perímetro de los muros. Es de importancia hacer notar que la mampostería confinada tiene un comportamiento mecánico resistente distinto a la mampostería sin reforzar, en cuanto a los elementos de confinamiento, si estos poseen un adecuado número, ubicación y detallado, este tipo de mampostería resulta en un excelente material para ser utilizado en construcciones de vivienda habitacional de poca altura, ubicadas en zonas de alta sismicidad (Miranda 2004).

2. Comportamiento de la mampostería bajo cargas laterales. En edificaciones sometidas a solicitaciones sísmicas, tanto los esfuerzos cortantes resistentes, como las deformaciones y esfuerzos por flexión son presentados (Miranda 2004).

La prueba de un muro ante cargas laterales consiste en ensayar al espécimen en voladizo por lo que en el mismo se introducen esfuerzos cortantes y por flexión, combinados. Para el caso de muros de mampostería confinada, el comportamiento ante cargas laterales es muy parecido al obtenido en las pruebas de compresión diagonal. Sin embargo por la presencia de flexiones que provocan que los esfuerzos verticales se disminuyan en un lado y aumenten en el otro, la fuerza cortante que produce el agrietamiento es menor que el obtenido cuando se realiza el ensayo en voladizo (muro final), que dentro de la prueba de compresión diagonal (Miranda 2004).

Ilustración 28. Ensayo en voladizo de un muro de mampostería confinada.



(Miranda 2004)

Se ha observado, de distintos ensayos experimentales que los esfuerzos de agrietamiento corresponden a un intervalo muy pequeño, entre 2 y 3 Kg/cm², asimismo los esfuerzos máximos resultan bastante mayores y varían en un intervalo más amplio. Las resistencias menores corresponden a muretes que presentaban una adherencia muy baja con el mortero (Miranda 2004).

Se considera que la deformación angular para la cual se produce el agrietamiento varía entre 0.0015 y 0.0025, para el caso que los ensayos son en voladizo, mientras que para las pruebas en compresión diagonal, el agrietamiento se presenta para valores con menores deformaciones (Miranda 2004).

El comportamiento de la mampostería confinada hasta el primer agrietamiento diagonal es básicamente el mismo a los muros de mampostería sin reforzar, lo cual implica que la presencia de los elementos confinante, vigas y columnas, no aportan significativamente en el comportamiento de la mampostería antes del momento que se presenten las primeras grietas (Miranda 2004).

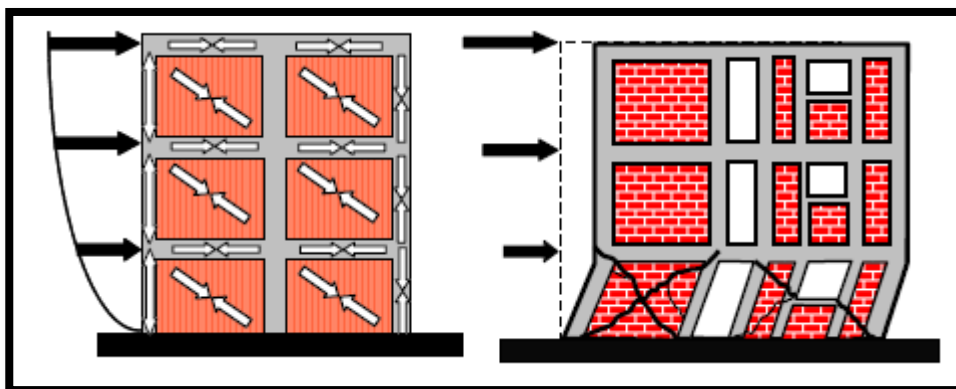
Posteriormente al agrietamiento diagonal se da una importante distribución de esfuerzos, y por compresión se da un importante aumento de las demandas en flexión, pero principalmente de cortante en los extremos de la columna. Este incremento de cortante puede llegar a generar la falla en una columna, dando lugar a una reducción significativa de la capacidad resistente del muro. Si el detallado de las columnas confinantes en sus partes inferior y superior es adecuado, el muro confinado puede llegar a soportar cargas laterales adicionales que generalmente provocan un mayor número de grietas en el muro con inclinaciones menores a la diagonal. Esto da lugar a un modo de falla en el cual el sistema puede idealizarse como dos bloques rígidos de muros que actúan sobre dos tramos cortos de las columnas (Miranda 2004).

En este sistema la fuerza es resistida tanto por la fricción y anclaje mecánico a lo largo de la grieta como por la resistencia a cortante de las columnas en los extremos de las grietas (Miranda 2004).

El papel principal de los elementos de confinamiento en la mampostería confinada, no es el de incrementar la capacidad máxima de resistencia del muro, sino el aumentar la capacidad de deformación – ductilidad del muro, junto con el postergar la degradación de resistencia (Miranda 2004).

3. Sistema resistente de mampostería confinada ante efectos sísmicos. La mampostería confinada sujeta a movimientos sísmicos puede ser modelada como un entramado vertical, los muros de mampostería actúan como riostras diagonales sujetas a compresión, mientras que los elementos confinantes de concreto armado actúan en tensión o compresión dependiendo de la dirección del movimiento sísmico. Este modelo es considerado adecuado antes de que se desarrolle la primera grieta en la mampostería (Brzev 2007).

Ilustración 29. Modelado de entramado vertical en mampostería confinada.



(Brzev 2007)

Estudios que se centran en la resistencia a cargas laterales de la mampostería confinada, identifican los siguientes mecanismos de falla característicos de la mampostería confinada:

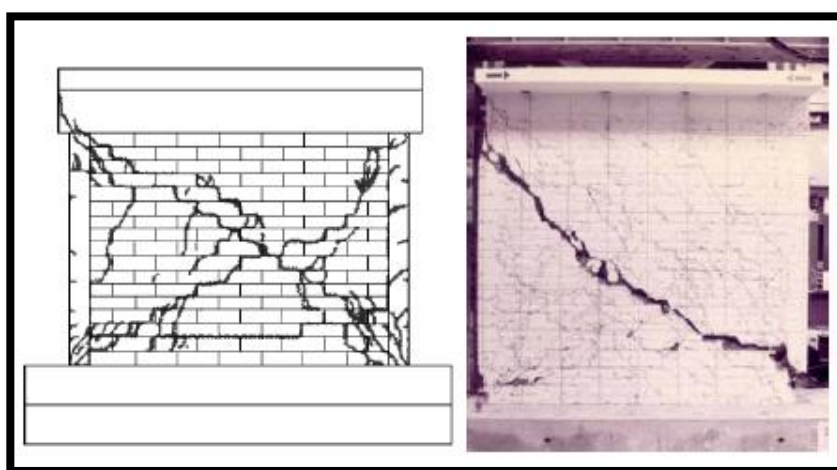
- Modo de falla por corte

- Modo de falla por flexión

Es importante hacer notar que para el caso de la mampostería confinada, las fuerzas cortantes se desarrollan en el plano de las fuerzas sísmicas, mientras que para el caso de la flexión pueden desarrollarse tanto dentro como fuera de la dirección de las fuerzas sísmicas (Brzev 2007).

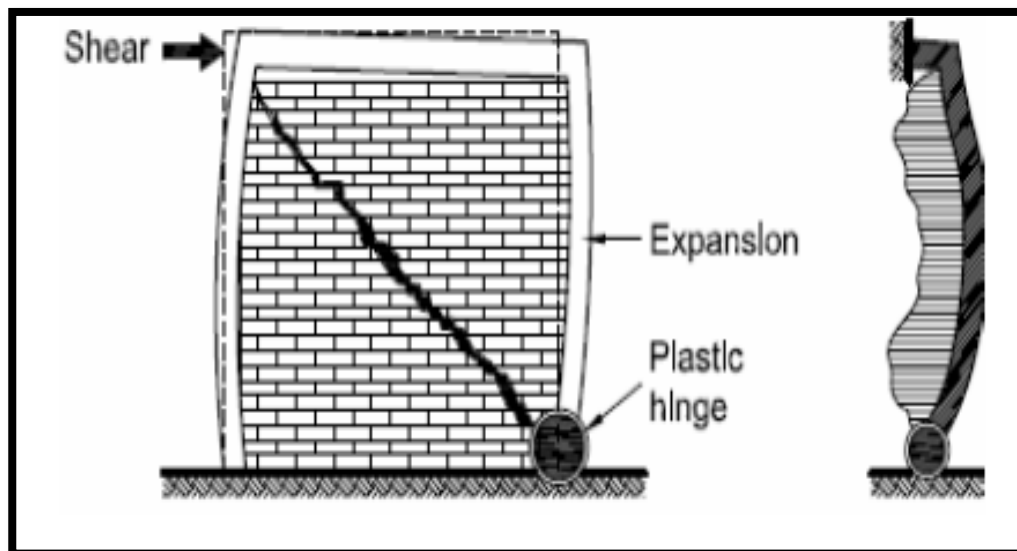
4. Falla por corte. La falla por corte es caracterizada por la distribución de un agrietamiento diagonal en el muro. Estos agrietamientos se propagan a las columnas de confinamiento para cargas con niveles más elevados. Inicialmente los paneles de mampostería son los que resisten las cargas laterales sísmicas. Una vez desarrollada la grieta en los paneles de mampostería, esta empuja a las columnas de confinamiento, haciendo así que estas últimas cumplan su función de confinamiento. En ese momento, el refuerzo longitudinal en las columnas de confinamiento se ve comprometido en resistir los esfuerzos de tensión y compresión. El daño en las columnas están concentrados en el tope e inicio del muro, en estas localizaciones es característico ver excesivos agrietamientos y fallas de cedencia del acero, y son conocidos también como “nudos plásticos” (Brzev 2007).

Ilustración 30. Modo de fallo por corte en mampostería confinada.



(Brzev 2007)

Ilustración 31. Nudo plástico desarrollado en los muros de mampostería confinada.

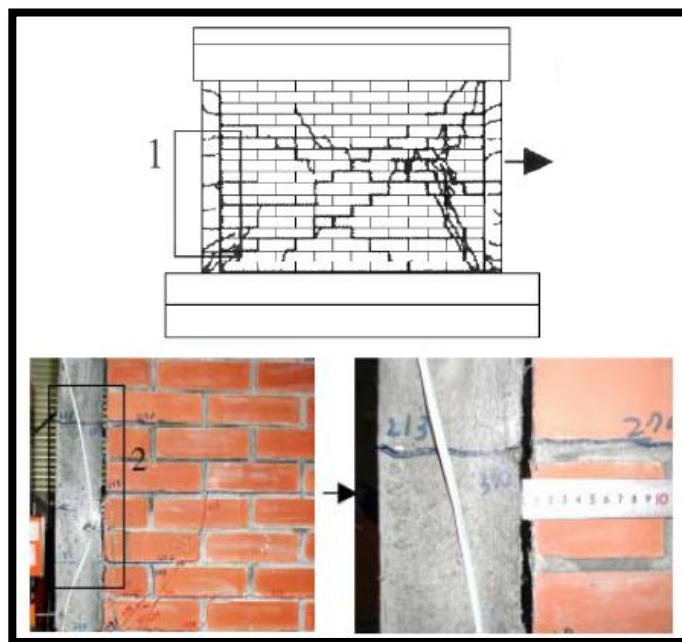


(Brzev 2007)

Estudios experimentales indican que en la mayoría de los casos, la falla por corte es precedida por un agrietamiento que se inicia en la porción central del muro. En otros casos han ocurrido fallas fuera del plano del muro, sin que se presente la falla por agrietamiento del mismo, lo cual confirma la importancia de los elementos confinantes para la estabilidad vertical del muro (Brzev 2007).

5. Falla por flexión. Este tipo de falla es causada por cargas laterales en el plano del muro, es caracterizada por la presencia de agrietamientos horizontales en las uniones de mortero, en el lado de tensión del muro. Se ha observado en algunos casos la separación de las columnas de confinamiento en relación al muro. También se ven presentes agrietamientos horizontales extensivos, que usualmente toman lugar en las columnas (Brzev 2007).

Ilustración 32. Falla por flexión en mampostería confinada.



(Brzev 2007)

Estudios experimentales han demostrado que no importando el tipo de falla que ocurra en el muro, las columnas de confinamiento resisten la mayoría de la porción de las cargas gravitatorias cuando la mampostería sufre un severo daño. La falla en las columnas de confinamiento ocurren cuando el agrietamiento se propaga de la mampostería hacia a estas cortándolas, por consiguiente la estabilidad vertical del muro se ve comprometida (Brzev 2007).

Se ha demostrado que los esfuerzos verticales en la mampostería confinada disminuyen cuando se da un incremento en el nivel de los daños, indicando por lo tanto que una gran porción de las cargas gravitatorias son tomadas en gran parte por las columnas. Esto hace notar el rol crítico que tienen las columnas de confinamiento en la resistencia de cargas verticales en el muro, en la mampostería confinada dañada, y en la estabilidad vertical (Brzev 2007).

6. Factores claves que influyen en la resistencia sísmica dentro las estructuras de mampostería confinada.

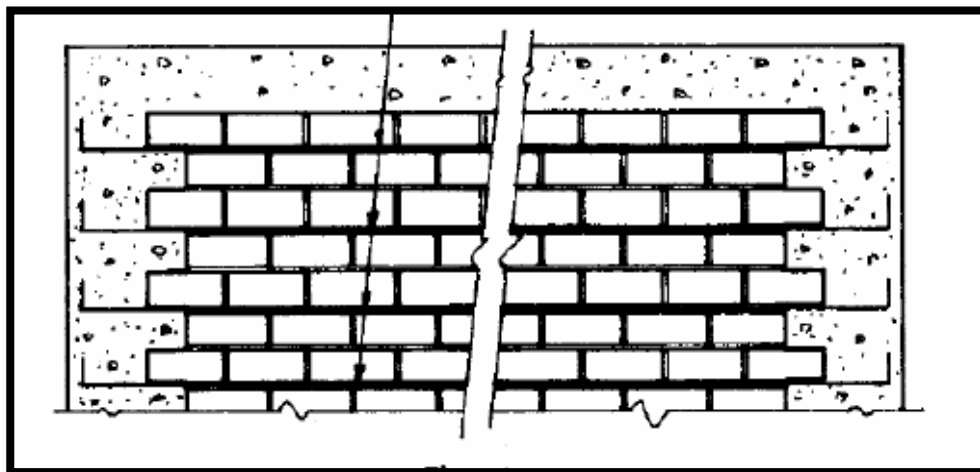
a. **Densidad de los muros.** Es determinado como el área transversal de los muros en cada una de las principales direcciones divididas por el área total de piso de la estructura. Éste es considerado uno de los parámetros claves que influyen en el comportamiento de la mampostería confinada (Brzev 2007).

b. **Unidades de mampostería y mortero.** Se ha observado que la resistencia a cargas laterales de la mampostería confinada, depende fuertemente de la resistencia de las unidades de mampostería y del mortero utilizado (Brzev 2007).

c. **Columnas de confinamiento.** Las columnas de confinamiento poseen significativa importancia en la ductilidad y estabilidad de los muros de mampostería confinada agrietada. El uso de un adecuado confinamiento en el inicio y tope de las columnas de confinamiento, resulta en un mejoramiento de la estabilidad y ductilidad del muro, post-agrietamiento (Brzev 2007).

d. **Refuerzo horizontal en muros.** En muchos países en donde la mampostería es practicada, el refuerzo horizontal no es una práctica usualmente utilizada. El Código Mexicano NTC-M 2004 que el refuerzo horizontal debe ser proveído continuamente a lo largo del muro. Las barras de refuerzo deben ser ancladas en las columnas de confinamiento, y estos deben ser embebidos en concreto junto con las columnas. El diámetro de la barra de refuerzo debe ser mayor de 3.5 milímetros y al menos $\frac{3}{4}$ del espesor de la junta (Brzev 2007).

Ilustración 33. Refuerzo horizontal en mampostería confinada.



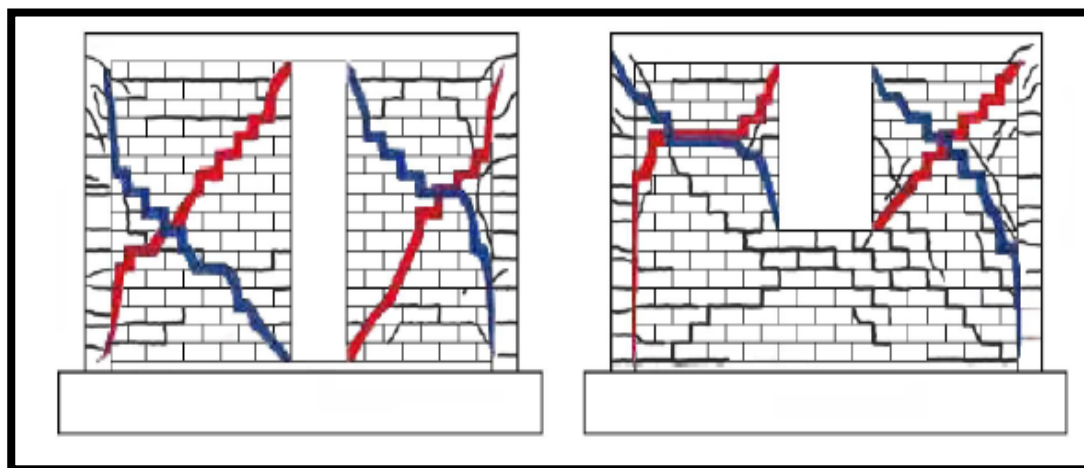
(Brzev 2007)

Diversos estudios han mostrado que el refuerzo horizontal da un efecto beneficioso en cuanto a la ductilidad del muro. El Código Mexicano NTC-M 2004 ha reconocido el aporte del refuerzo horizontal en los esfuerzos a cortante en los muros de mampostería confinada (Brzev 2007).

En algunos países de Centro América, en donde son utilizados vigas intermedias (soleras intermedias), que poseen dentro el refuerzo horizontal, no han demostrado un comportamiento satisfactorio, ya que el panel de muro por encima de la solera intermedia puede llegar a causar fallas en las columnas de confinamiento (Brzev 2007).

7. Aberturas. Estudios experimentales han demostrado que áreas de aberturas menores al 10% del área total del muro, la resistencia del muro a cargas laterales no se ve significativamente reducida. Muros con aberturas mayores a estas, pueden llegar a provocar fallas por corte diagonal. Se recomienda en estos casos tomar en cuenta las aberturas para el cálculo de la resistencia lateral del muro basándose en el área neta transversal. La mayoría de Códigos y Reglamentos establecen las aberturas máximas en los muros, dentro de los cuales no es necesario el uso de dinteles para reforzar las mismas (Brzev 2007).

Ilustración 34. Modos de fallas en mampostería confinada con aberturas.



(Brzev 2007)

8. Comportamiento ante cargas laterales cíclicas. Antes del agrietamiento, el comportamiento de la mampostería es esencialmente elástico y no es apreciable ninguna degradación. Posterior al primer agrietamiento la mampostería no reforzada es caracterizada por una rápida y significativa pérdida de resistencia y rigidez (Miranda 2004).

La rigidez lateral de la mampostería disminuye a la medida que aumentan los ciclos y la deformación lateral. El agrietamiento de la mampostería además de producir una reducción en la rigidez lateral del muro, produce un estrechamiento importante de los ciclos histeréticos, entendiéndose por el incremento del desplazamiento lateral en una dirección cuando se abren las grietas, y cuando es descargado, o inicia la carga en la otra dirección durante el proceso del cerrado de grietas el muro posee una baja rigidez. Una vez completado este proceso el muro incrementa su rigidez lateral (Miranda 2004).

R. Aspectos a considerar en el diseño de estructuras de mampostería.

1. Normatividad. La normatividad en términos de seguridad estructural es un aspecto muy importante, en la mayoría de los departamentos de nuestro país las

recomendaciones y normas de diseño no son aplicadas a cabalidad, lo cual provoca cierto grado de incertidumbre en cuanto a las características de resistencia, rigidez y ductilidad de las estructuras elaboradas (Ruiz *et. al.* 2001).

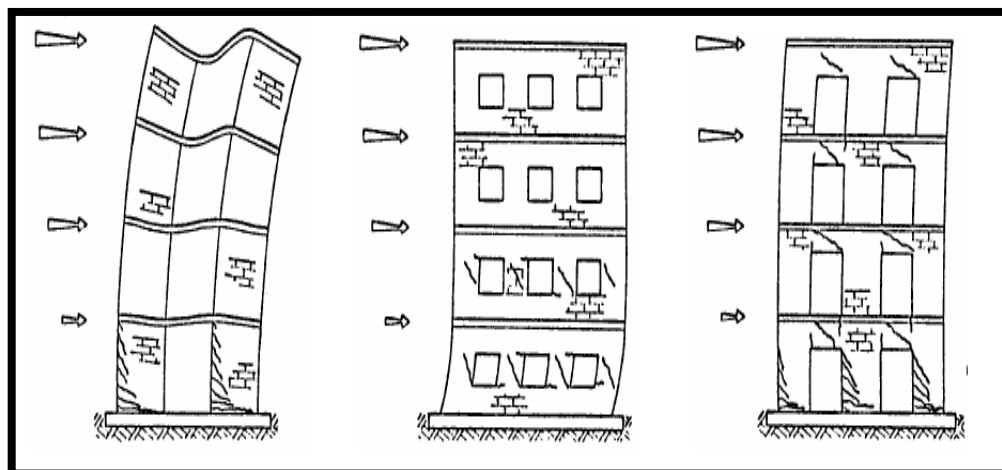
Entre los principales inconvenientes que conlleva el no uso de especificaciones o normativas para el diseño encontramos: el desconocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en particular los morteros y las unidades de mampostería (sólida o hueca), además del hecho de que el peligro sísmico es significativamente diferente en cada región (Ruiz *et. al.* 2001).

2. Calidad de los materiales. Debido a la gran variedad y dispersión en cuanto a las calidades y características de resistencia de las piezas y los morteros, en cada región. Es conveniente realizar ensayos para determinar los valores de diseño en lugar de emplear los valores indicativos o característicos especificados en las normas vigentes (Ruiz *et. al.* 2001).

3. Influencia de las aberturas en los muros de mampostería. Debido a requerimientos arquitectónicos las estructuras de mampostería usualmente poseen aberturas que son destinadas para las puertas y ventanas, las cuales tienen influencia en la rigidez lateral de la estructura. Por ello es importante que el Ingeniero responsable de la construcción y el diseño, cuantifique el efecto de las aberturas en el comportamiento de los muros y de la vivienda (Ruiz *et. al.* 2001).

Uno de los principales efectos de las aberturas en los muros, es la pérdida de rigidez lateral en los mismos, esto se traduce en que bajo una misma carga lateral, una vivienda con aberturas laterales tendrá mayores desplazamientos laterales respecto a una vivienda cuyos sus muros no presentan dichas aberturas (Ruiz *et. al.* 2001).

Ilustración 35. Influencias de la abertura en el modo de falla de la mampostería.



(Ruiz et. al. 2001)

4. Importancia de la configuración estructural. La configuración estructural posee una singular importancia en el desempeño estructural en la mampostería. Entre los aspectos más importantes que contribuyen con la mejora del desempeño de las estructuras de mampostería encontramos:

- Densidad de los muros.
- Configuración en planta.
- Continuidad de todos los muros en elevación
- Evitar las concentraciones de peso.

S. Muros de corte de mampostería reforzada sujetos a cargas en el plano del muro.

1. Mecanismos de falla.

a. Falla por corte. Es un modo de falla común en muros sujetos a fuerzas sísmicas, la cual ha sido observado en muchas estructuras post – eventos sísmicos. Se caracteriza por la presencia dominante de grietas diagonales, también conocido como falla por corte diagonal. Estas grietas usualmente se presentan en muros con relaciones de aspecto menores a 0.8 (h_w/l_w) (Anderson y Brzev 2009).

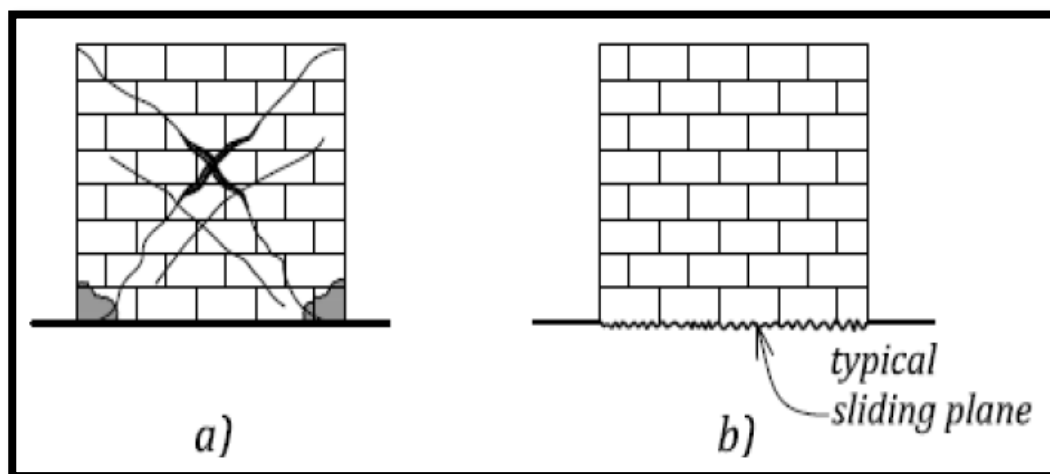
Este modo de falla da inicio, cuando los esfuerzos principales por tensión combinado con las cargas horizontales sísmicas y las cargas verticales exceden la capacidad de esfuerzo a tensión de la mampostería. Cuando la cantidad y distribución del acero de refuerzo horizontal no son los adecuados para transferir las fuerzas de tensión a lo largo de la primera diagonal, las grietas continuarán ampliándose formando una forma de “X” en el muro, lo cual se traduce en una menor rigidez y por tanto resistencia del muro. Las grietas pueden desarrollarse a través de las unidades de mampostería, como del mortero (Anderson y Brzev 2009).

La inclusión de refuerzo horizontal al muro, le proporciona efectividad a la resistencia para fuerzas de tensión y cortante, aumentando así la capacidad de carga del muro. “La falla dúctil por corte” ocurre después de que se ha desarrollado la primera grieta, muchas otras grietas se distribuyen gradual y uniformemente en el muro. La falla ocurra cuando gradualmente se ha deteriorado la capacidad para resistir esfuerzos del muro, a través de cargas cíclicas (Anderson y Brzev 2009).

b. Falla de deslizamiento por corte. Ocurre en muros de mampostería sujetas a cargas verticales pequeñas, y a un rango de fuerzas horizontales sísmicas altas. Esta condición puede encontrarse en los niveles bajos de edificios donde las aceleraciones inducidas por los sismos y el movimiento de la tierra son más altas, aunque también puede encontrarse en otros lugares. La falla de deslizamiento ocurre cuando las fuerzas en el plano horizontal del muro, excede la capacidad de fricción de la mampostería y grietas horizontales son formadas en la base del muro (Anderson y Brzev 2009).

Aunque este tipo de falla es considerada como un mecanismo de falla por corte, este también toma parte en el comportamiento por flexión del muro, esto debido a la flexión que puede llegar a provocar este tipo de esfuerzos en el refuerzo vertical (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 36. Mecanismos de falla por corte.



(Anderson y Brzev 2009)

c. **Resistencia por corte diagonal de la mampostería.** La resistencia al corte de los muros de mampostería reforzada depende de muchos parámetros, en los que se incluyen los esfuerzos de compresión en la mampostería, la calidad del mortero y el grout, la cantidad y distribución de refuerzo horizontal, la magnitud de los esfuerzos axiales y por las relaciones de aspecto. Investigaciones a lo largo de dos décadas realizadas en distintos países como Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, han confirmado la influencia de los parámetros descritos anteriormente para la resistencia a corte de la mampostería. Aparentemente se torna muy dificultoso cuantificar la influencia de cada uno de estos parámetros, esto debido a la complejidad de los mecanismos de resistencia a corte y por la falta de modelos teóricos efectivos (Anderson y Brzev 2009).

d. **Muros de corte a flexión.** Estos muros son caracterizados por que la relación de aspecto (altura/largo) es 1.0 o mayor. Considerando que los muros de mampostería son construidos en forma continua, estos trabajan en conjunto y son sujetos a efectos de fuerzas de corte y de momentos (Anderson y Brzev 2009).

El factor de resistencia del corte en el plano del muro, V_r , es la suma de las contribuciones por corte de la mampostería, V_m , y de la resistencia al corte del acero, V_s , que es:

$$\text{Ecuación 11: } V_r = V_m + V_s$$

La resistencia a corte de la mampostería es igual a:

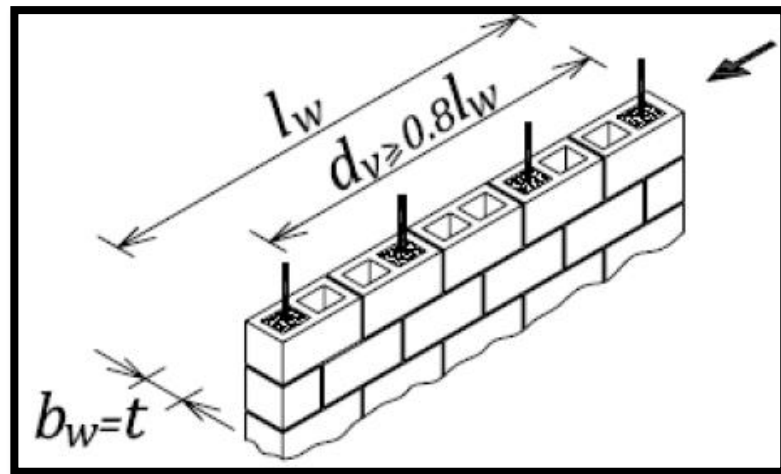
$$\text{Ecuación 12: } V_m = \theta_m \times (V_m \times b_w \times d_v + 0.25 \times P_d) \times \gamma_g$$

Donde:

b_w = ancho del muro (mm)

d_v = distancia efectiva de centra a centro del refuerzo primero y último mm

Ilustración 37. Dimensionamiento utilizado para el diseño por corte en el plano del muro.



(Anderson y Brzev 2009)

Efecto de la carga axial:

P_d = carga de compresión axial bajo el área de consideración

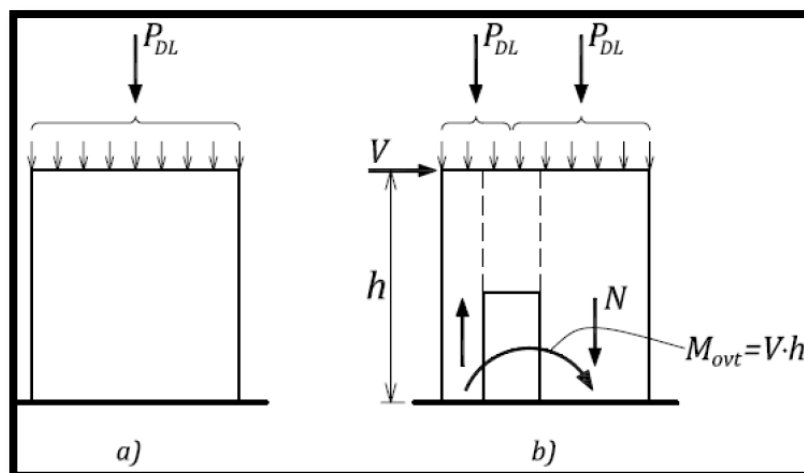
P_{dl} = carga muerta

La carga de compresión axial, P_d , depende de las características del muro:

$$P_d = 0.9 \times P_{dl}; \text{ para muros sólidos}$$

$$P_d = 0.9 \times P_{dl} \pm N$$

Ilustración 38. Carga axial en muros de mampostería (a. Sólidos; b. Perforados).

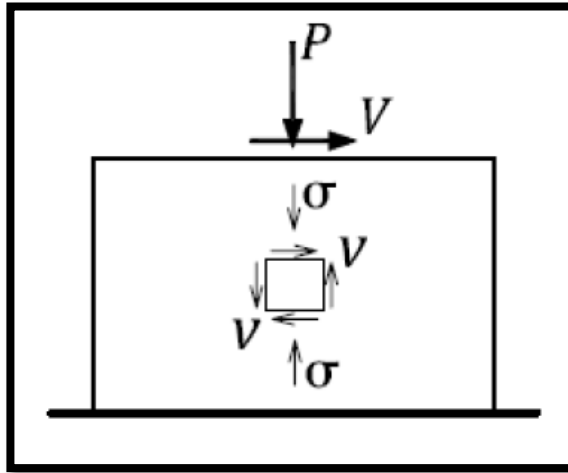


(Anderson y Brzev 2009)

La carga axial es tomada en cuenta para el cálculo de la fuerza cortante, V_m . El término $0.25P_d$ fue establecido basado en análisis estáticos experimentales por Anderson y Priestly en 1992 (Anderson y Brzev 2009).

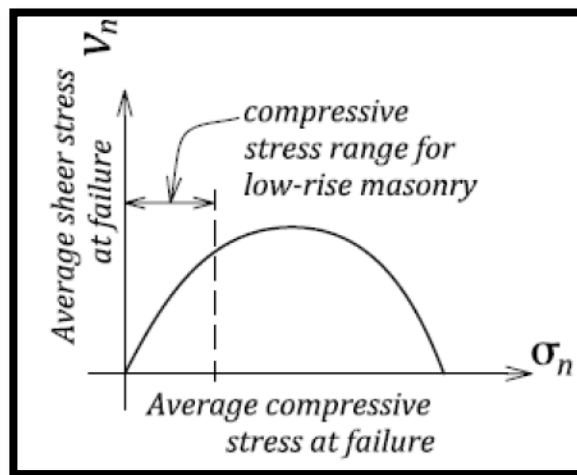
Dado que el muro de mampostería está sujeto a efectos combinados de carga axial y fuerzas de corte, dos estados de esfuerzos son desarrollados en el muro. La carga axial causa el esfuerzo a compresión σ , y las fuerzas cortantes causa el esfuerzo cortante, V . La presencia de la carga axial ayuda a que se retarde la falla del primer agrietamiento, dado que reduce los esfuerzos principales a tensión el cual actúa combinados con los esfuerzos de compresión y corte respectivamente. La falla por el primer agrietamiento surge a consecuencia de que la resistencia al esfuerzo a tensión de la mampostería es alcanzada. Es importante tomar en cuenta que la resistencia a corte de la mampostería decrece a medida que el muro está sujeto a cargas axiales extremadamente grandes, esto basado en estudios experimentales (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 39. Efecto combinado de la carga axial y fuerza cortante.



(Anderson y Brzev 2009)

Ilustración 40. Relación entre los esfuerzos cortantes y los esfuerzos a compresión.



(Anderson y Brzev 2009)

Se ha determinado mediante estudios experimentales que los muros reforzados con sus secciones completamente llenas de grout aumentan mayor ductilidad y resistencia a esfuerzos ante el efecto de cargas cíclicas laterales que otras con menores proporciones de grout (Anderson y Brzev 2009).

Esfuerzo cortante de la mampostería:

$$\text{Ecuación 13: } v_m = 0.16 \times 2 - \frac{M_f}{V_f \times d_v} \times \overline{f'_m} \quad \text{en Mpa}$$

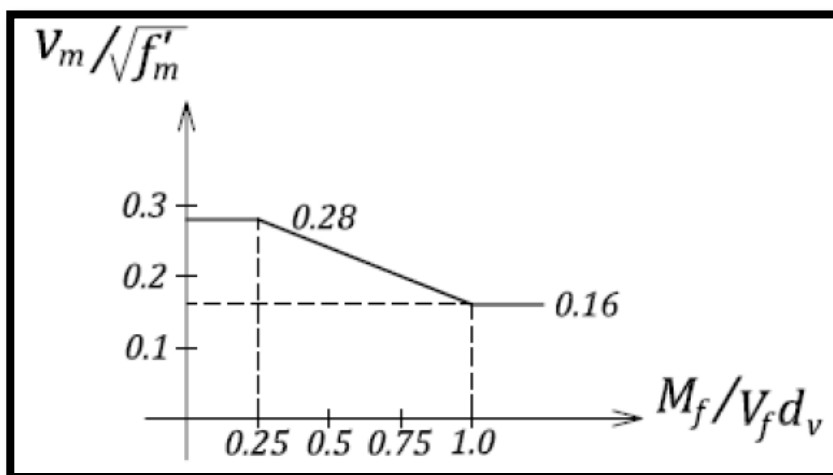
Donde:

$$\frac{M_f}{V_f \times d_v} = \text{proporción de distribución del corte}$$

$$0.25 \leq \frac{M_f}{V_f \times d_v} \leq 1.0$$

El esfuerzo cortante en la mampostería depende tanto del esfuerzo a tensión de la mampostería, $\overline{f'_m}$ y de la proporción de distribución del corte, $\frac{M_f}{V_f \times d_v}$. Para muros con proporciones de distribución del corte menores a 1 se comportan como muros robustos y se caracterizan por tener mayor resistencia a esfuerzos cortantes.

Ilustración 41. Efectos de la proporción de distribución del corte en el esfuerzo cortante de la mampostería.



(Anderson y Brzev 2009)

Resistencia a corte del refuerzo:

$$\text{Ecuación 14: } V_s = 0.6 \times \theta_s \times A_v \times f_y \times \frac{d_v}{s}$$

Donde:

$A_v = \text{área de acero del refuerzo horizontal (mm}^2\text{)}$

$s = \text{espaciamiento del refuerzo horizontal (mm)}$

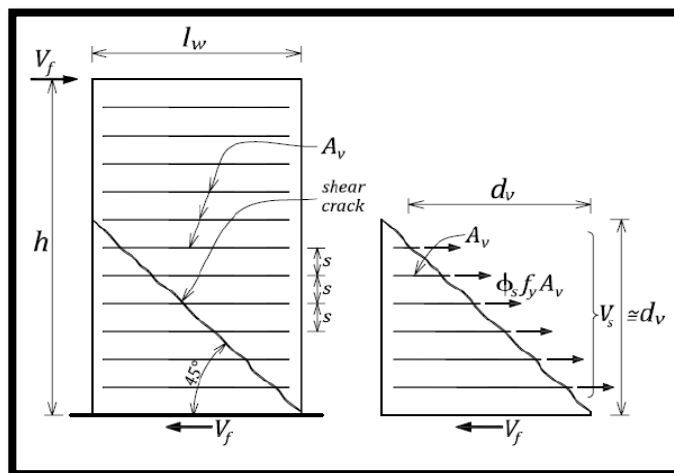
El límite superior para la resistencia a corte del en el plano del muro, V_r , para los muros de corte a flexión:

$$\text{Ecuación 15: } V_r \leq \max V_r = 0.4 \times \theta_m \times \overline{f'_m} \times b_w \times d_v \times \gamma_g$$

La resistencia a corte del refuerzo es tomado como la suma de todas las fuerzas a tensión desarrolladas en el refuerzo el cual cruza las grietas. Las grietas se presentan usualmente a 45 grado respecto al eje x. El número de acero de refuerzo que cruzan las grietas puede ser calculado aproximadamente como d_v/s (Anderson y Brzev 2009).

El acero de refuerzo vertical no contribuye significativamente en el diseño por corte, por lo que el mismo no es tomado en cuenta para determinar la resistencia de diseño por corte (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 42. Resistencia del acero en muros de corte sujetos a flexión.



(Anderson y Brzev 2009)

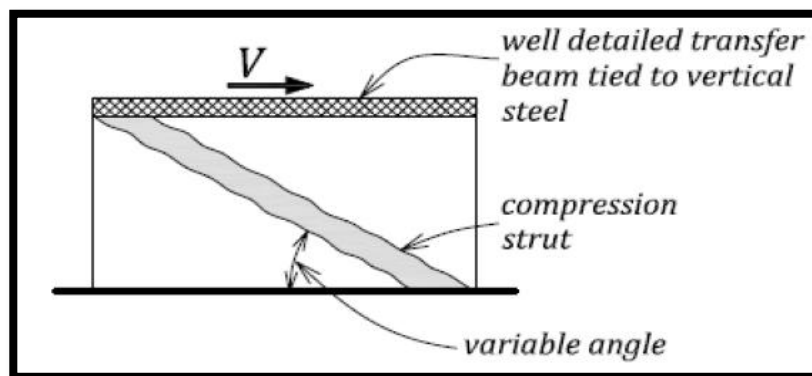
e. **Muros de corte robustos.** Los muros de corte robustos son caracterizados por tener una relación de aspecto, $\frac{h_w}{l_w}$, menor a la unidad. La resistencia al corte de los muros con estas características es determinada de igual forma que para los muros sujetos a flexión. Debido a que la resistencia a cortante del muro aumenta conforme se reduce su relación de aspecto, el límite superior de la resistencia a cortante aumenta (Anderson y Brzev 2009).

$$\text{Ecuación 16: } V_r \leq \max V_r = 0.4 \times \theta_m \times \overline{f'_m} \times b_w \times d_v \times \gamma_g \times 2 - \frac{h_w}{l_w}$$

Este incremento en el límite superior de la resistencia a cortante es aplicable únicamente si el diseñador puede asegurar que las fuerzas cortantes están distribuidas a lo largo de todo el muro (Anderson y Brzev 2009).

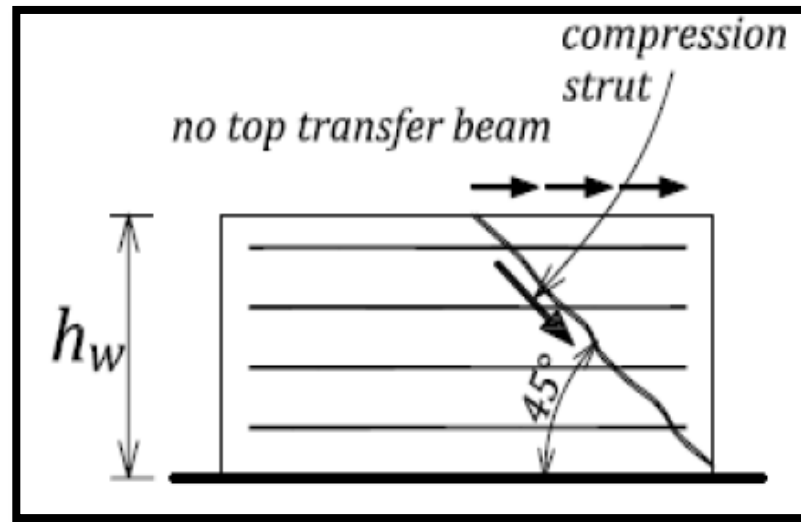
La solera utilizada al tope del muro, también conocida como “solera de corona”, actúa como una solera de transferencia que asegura que el corte en el tope del muro se distribuya uniformemente en el mismo. La no existencia de este tipo de solera de confinamiento hace que se induzca una falla anticipada por corte, por lo que el incremento del límite superior de la resistencia a cortante no sería aplicable (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 43. Mecanismo de falla en los muros robustos con solera de corona.



(Anderson y Brzev 2009)

Ilustración 44. Mecanismos de falla en los muros robustos sin solera de corona.



(Anderson y Brzev 2009)

2. Resistencia a deslizamiento por corte. La resistencia a deslizamiento por corte puede ocurrir en los dos tipos de muros mencionados con anterioridad (definidos por sus relaciones de aspecto), sin embargo es mucho más común observar este tipo de falla en muros robustos que poseen altas resistencias a cortante, V_r (Anderson y Brzev 2009).

La resistencia a deslizamiento por corte es definido generalmente como un coeficiente de fricción que multiplica la máxima fuerza a compresión en el plano de deslizamiento (Anderson y Brzev 2009).

$$\text{Ecuación 17: } V_r = \phi_m \times \mu \times P_2$$

Donde:

$\mu =$ *Coeficiente de fricción*

$P_2 =$ *Fuerza de compresión que actúa normal al plano de deslizamiento*

T. Consideraciones sísmicas de diseño para muros de corte de mampostería reforzada.

1. Enfoque de diseño sísmico. Los muros de corte dúctiles de mampostería reforzada deben ser diseñados para resistir una fuerza cortante no menor al corte que está presente cuando el muro desarrolla un mecanismo plástico o de deformación (Anderson y Brzev 2009).

Cada estructura o componente estructural puede tener diversos mecanismos de falla, los cuales, algunos son dúctiles y otros frágiles. Una respuesta sísmica satisfactoria en las estructuras requiera que los modos de falla por fragilidad sean eliminados (Anderson y Brzev 2009).

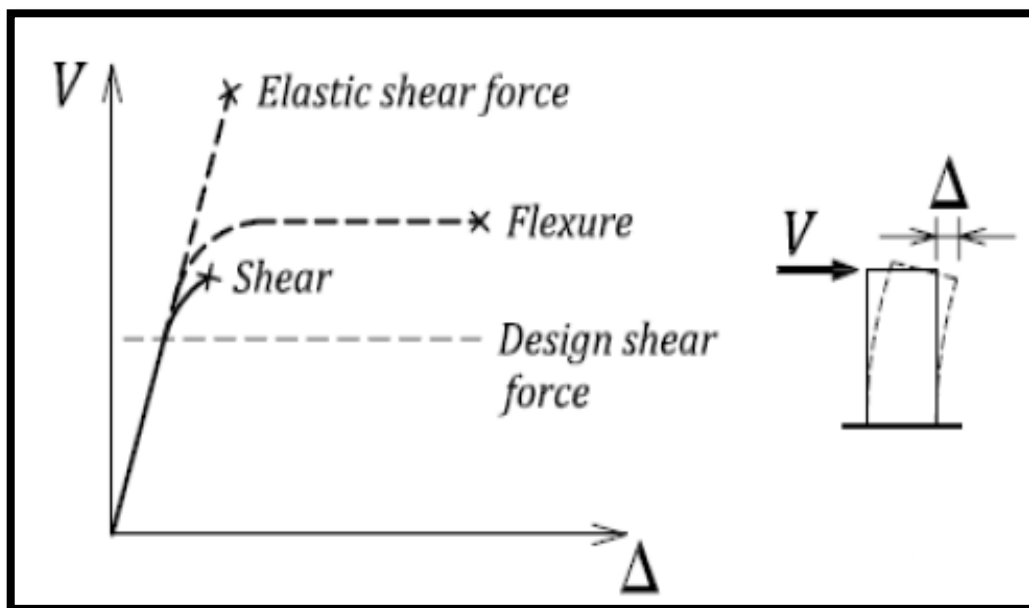
El objetivo del enfoque de diseño sísmico es forzar a la estructura que se comporte en forma dúctil sin fallar ante desplazamientos esperados. Al mismo tiempo que el resto de la estructura permanezca lo suficientemente capaz, tanto en corte como en flexión, para no ceder ante las cargas gravitacionales durante dichos desplazamientos (Anderson y Brzev 2009).

El ingeniero estructural es el responsable que la estructura responda en una forma dúctil adecuada, cuando la estructura está expuesta a un sismo de diseño, el cual es un sismo de determinada intensidad determinado de acuerdo a la localización específica de la edificación (Anderson y Brzev 2009).

Considerando un muro de corte de mampostería sujeto a incrementos de una fuerza sísmica lateral, V . El muro ha sido diseñado para una fuerza cortante de diseño, mostrado como una línea horizontal en la Figura 45. Sin embargo la capacidad típica del muro excede la fuerza de diseño, por lo que se espera que el muro se deforme por flexión o por corte ante mayores niveles de carga. Las curvas de fuerza - deformación para flexión y corte son presentadas en la Figura 45 respectivamente. El mecanismo de falla por corte es caracterizado por fallar frágilmente ante pequeñas deformaciones, mientras que el mecanismo de falla por

flexión acepta grandes deformaciones antes de llegar a fallar por lo que al comportarse de esta forma presenta mayor ductilidad (Anderson y Brzev 2009).

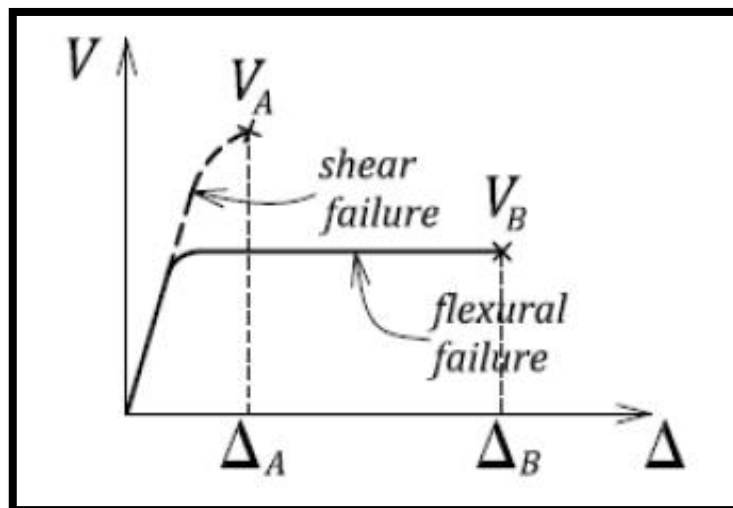
Ilustración 45. Curvas fuerza cortante - deflexión para los mecanismos de flexión y corte.



(Anderson y Brzev 2009)

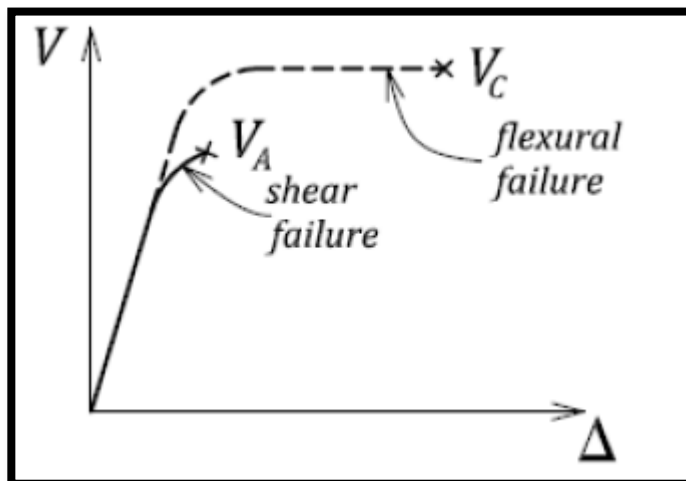
Considerando un muro que está diseñado para fallar por corte, cuando su resistencia, V_A , y su correspondiente desplazamiento, Δ_A , es alcanzado, y para fallar en flexión cuando la fuerza cortante, V_B , y el correspondiente desplazamiento Δ_B , son alcanzados. Si el muro posee menor resistencia en flexión que en corte, $V_B < V_A$, la falla por corte no tendrá lugar. En este caso la ductilidad desarrollada es la correspondiente a la flexión, por lo tanto el mecanismo de falla por flexión gobierna el comportamiento del muro, y el mismo experimentará deformaciones significantes antes de la falla (Notar que: $\Delta_B > \Delta_A$). Estructuras que se comportan de esta forma representan un desempeño sísmico deseable (Anderson y Brzev 2009).

Ilustración 46. Mecanismos de falla donde flexión gobierna.



(Anderson y Brzev 2009)

Ilustración 47. Mecanismo de falla donde corte gobierna.



(Anderson y Brzev 2009)

Lo anterior demuestra que hacer el muro más “fuerte” (demasiado rígido), puede conducir a tener efectos adversos en cuanto al comportamiento esperado, por lo que el muro puede cambiar de tener un comportamiento dúctil por flexión, a presentar una falla de fragilidad por corte (Anderson y Brzev 2009).

Existen dos factores claves para el enfoque de diseño sísmico que pueden ser resumidos de la siguiente manera:

- Para el diseño de muros de mampostería reforzada, el factor de resistencia al corte, V_r , debe de ser mayor que al cortante producido por el efecto de las cargas inducidas, y no debe ser menor al cortante producido por el efecto de la capacidad nominal del momento, M_n , del sistema de muro en su localización plástica.
- Es muy importante también que los otros elementos estructurales sean capaces de sobrellevar los mismos desplazamientos que los muros, sin sufrir fallas por fragilidad.

2. Respuesta sísmica dúctil. Una consideración importante en el diseño sísmico es la necesidad de tener estructuras capaces de deformarse de forma dúctil cuando estas son expuestas a ciclos laterales de cargas que hacen trabajar a la misma dentro del rango inelástico (Anderson y Brzev 2009).

La ductilidad es una medida de la capacidad que tiene la estructura o los elementos de sobrellevar esas deformaciones, manteniendo buena parte de la capacidad de carga de la estructura. Las deformaciones en el rango inelástica son usualmente relacionados con daños permanentes en la estructura (Anderson y Brzev 2009).

U. Aspectos importantes a considerar en la inspección de la mampostería durante la construcción.

1. Control e inspección en obra. La mampostería es construida en el sitio o lugar de trabajo, es imperativo que se deba de tener la seguridad de que las unidades de mampostería, mortero, el grout, el acero de refuerzo deben de estar conforme a las especificaciones de calidad y resistencias determinadas, además el espaciamiento del refuerzo y otras especificaciones técnicas deben estar especificadas en los planos (Amrhein 1995).

En especial se debe de revisar que:

- Las piezas sean del tipo y tengan la calidad especificada en los planos de construcción (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- Las piezas de ladrillo deben de estar sumergidas por lo menos dos horas antes de su colocación (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- Las piezas estén libres de polvo, grasa o aceite o cualquier otra sustancia que reduzca la adherencia o dificulte su colocación (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- Las barras de acero sean del diámetro, tipo y grado especificado en los planos (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- El refuerzo longitudinal de columnas o en el interior del muro esté libre de polvo, grasa o cualquier otra sustancia que afecte la adherencia y que su posición esté asegurada durante el colado del concreto (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- El refuerzo horizontal sea continuo en el muro, sin traslapes y anclado en los extremos con ganchos en el plano del muro (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- El mortero no se elabore en contacto con el suelo o sin control de dosificación (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- Las juntas verticales y horizontales estén totalmente llenas de mortero (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).

- El espesor de las juntas no exceda el valor indicado en los planos de construcción (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- El desplomo del muro no exceda los $0.004H$ ni 15 mm (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).
- Las aberturas en muros, sí así lo señalan los planos, estén reforzadas con dinteles o confinadas en sus bordes (*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2007*).

V. Teoría de cálculo.

Para poder calcular muros de mampostería se han desarrollado diferentes metodologías. Hasta ahora no hay una que se considere perfecta ya que existen debates acerca de cómo se debería de tomar el efecto de la mampostería dentro del sistema. No se ha logrado determinar el efecto exacto de tener confinado dentro de dos columnas, con y sin solera intermedia, es por esto que varios autores han encontrado métodos aproximados para lograr analizar este modelo.

1. Método de rigidez. El método de rigidez es el método base para la mayoría de programas de análisis estructural. Este método es exacto y puede utilizarse para resolver la mayoría de estructuras, tanto determinadas como indeterminadas. El método funciona mediante la creación de ecuaciones de equilibrio en los nudos en términos de los desplazamientos desconocidos y de los coeficientes de rigidez, que son fuerzas generadas por desplazamientos unitarios. Una vez se conozcan los desplazamientos en los nodos, se pueden conocer las fuerzas en los miembros de la estructura a partir de las relaciones fuerza-desplazamiento. Este método debe ser auxiliado por algún otro método que logre determinar las rigideces de las diferentes piezas componentes de la estructura.

El método consiste en asignar a la estructura de barras un objeto matemático. Este objeto matemático es una matriz de rigidez que esta relaciona los desplazamientos de un conjunto de puntos de la estructura a los cuales se les llama nodos. Estos nodos se relacionan con las fuerzas exteriores que es necesario aplicar para lograr esos desplazamientos. Es por esto que las componentes de esta matriz son fuerzas generalizadas asociadas a desplazamientos generalizados. La matriz de rigidez relaciona las fuerzas nodales equivalentes y desplazamientos sobre los nodos de la estructura.

Entonces, el método matricial requiere que se asigne a cada barra elástica de las estructura una matriz de rigidez llamada Matriz de rigidez elemental. Esta dependerá únicamente de tres variables:

- Primero, de las condiciones de borde que tenga dicho elemento representado por la barra, ya sea articulado, rígido o suelto.
- Segundo, de la forma o sección de la barra, ya sea recta curvada etc.
- Por último, las constantes elásticas del material de la barra, como son el módulo de elasticidad longitudinal y transversal.

Con estas tres variables se arman las matrices elementales. Con las matrices elementales se arman mediante algoritmos conocidos como acoplamiento la matriz de rigidez global de la estructura que relaciona los desplazamientos de los nudos con las fuerzas equivalentes sobre los mismos.

Después, con las fuerzas externas aplicadas sobre las barras y nodos de la estructura se construye un vector de fuerzas nodales equivalentes. Este vector incluye las reacciones en los apoyos de la estructura y los enlaces que esta tenga con elementos exteriores al análisis considerado. Estos valores obviamente resultan incógnitas por lo que se dejan como variables por descubrir resolver.

Finalmente se construye un sistema lineal de ecuaciones para los desplazamientos y las incógnitas. Es importante notar que el número total de incógnitas y desplazamientos incógnitos depende del número de nodos de la estructura. Este puede calcularse como:

$$\text{incognitas} = 3 * \text{cantidad de nodos (problemas bidimensionales)}$$

$$\text{incognitas} = 6 * \text{cantidad de nodos problemas tridimensionales}$$

Luego de tener el sistema lineal de ecuaciones armado se procede a resolver las incógnitas y se calculan las reacciones, fuerzas nodales equivalentes y desplazamientos. Con estos valores se pueden deducir los esfuerzos en las uniones de las barras (nodos) a partir de los cuales se puede calcular los esfuerzos en cualquier punto de la estructura y por lo tanto sus tensiones máximas que permiten diseñar los elementos de la estructura.

a. Matriz de rigidez elemental. A modo de ejemplificar una matriz de rigidez elemental, se presenta el caso de la barra bidimensional con los nudos rígidos. Para construir esta matriz es necesario asignar a cada elemento propiedades. Estas propiedades serán la base de la cual se arma la matriz de rigidez del elemento. Estos elementos son:

- Las condiciones de enlace en los dos extremos de la barra (empotrada para este caso)
- Las características de la sección transversal de la barra (área, momentos de área o momentos de inercia) y las características geométricas generales, como longitud, curvatura, etc.
- Y por último, el número de grados de libertad por nodo que se quieran analizar. Esto depende enteramente de la profundidad del análisis que se desea hacer.

El caso de la barra empotrada es el caso en el que el ángulo formado entre la barra y sus barras adyacentes no varía respecto a las mismas barras luego de haberse aplicado las cargas y deformaciones que sufrirá la estructura. Esta

restricción condiciona la deformación de la barra por lo que es muy importante que se cumpla para poder utilizar esta matriz. Aun estando imposibilitado el cambio de ángulo respecto a las otras barras, no se debe confundir este movimiento con el giro del nodo el cual si es permitido que se dé.

Esta es la matriz de rigidez con 6 grados de libertad de una barra empotrada en sus dos extremos.

Ecuación 18: Matriz de rigidez elemental

$$[K^{(e)}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

(Bazán / Meli, 2009)

2. Muros de mampostería confinada. Para el caso de muros confinados por marcos, Bazán y Meli expresan que en la mayoría de casos se ha observado que el sistema trabaja resistiendo el corte por la mampostería de relleno y los momentos por las columnas del marco. El sistema trabaja como una columna ancha, en la que cada parte soporta diferentes cargas. Basta con cargas laterales relativamente pequeñas para que el sistema cambie comportándose como la imagen no 18. En la imagen se puede apreciar cómo se separan la columna de la mampostería en unas esquinas y en otra crea esfuerzos de compresión y corte en la mampostería y columna respectivamente.

Aunque también se producen momentos estos son de poca importancia comparados con los efectos del corte y la compresión. Las columnas deben estar suficientemente bien confinadas cerca de las esquinas para evitar fallas por corte en las mismas. El muro por su lado debe lograr soportar cargas de compresión diagonal como lo ilustran las flechas en la imagen no. 18. En el otro sentido a la compresión

diagonal, en el sentido de esquina a esquina que se separan se crean esfuerzos de tensión en la mampostería. Estas fuerzas ocasionan grietas a 45 grados, que luego se buscarán en los ensayos de laboratorio como señales de fallas en el sistema.

3. Método de diagonal. Basado en el comportamiento marco-mampostería y los efectos de compresión se ha idealizado el modelo matemático a un marco con una diagonal de compresión. Esta diagonal viene a sustituir la mampostería de manera casi perfecta. Está claro que la mampostería y el concreto no soportan efectos de tensión, por lo que la diagonal de tensión que se crea entre las esquinas que se separan tiene una resistencia de cero a la tensión, siendo casi lo mismo que tener un elemento que no soporte nada de cargas. Por eso se elimina esa resistencia a la tensión, además que el sistema no posee detalles necesarios para transmitir la poca carga de tensión que pueda soportar el muro al mismo.

En el caso de la diagonal de compresión, podemos decir que la mampostería es un elemento que logra soportar grandes cargas de compresión. Tal y como se muestra en la imagen anterior la compresión es llevada de una esquina a la otra casi de manera directa a través de la mampostería. Es por ello que ésta se representará como una diagonal entre las esquinas del marco donde se transmitirá solamente esfuerzos de compresión.

a. Propiedades de la diagonal. La diagonal entonces se modela de manera que sea equivalente al efecto de la compresión. Por ello se diseña el muro con el espesor t y módulo de elasticidad E_m que tiene y un ancho de w .

Ecuación 19: Ancho de la diagonal

$$w = 0.35 + 0.022\lambda h$$

Donde:

- h es la altura entre ejes del muro (altura entre soleras) en metros
- λ es un parámetro adimensional basado en las rigideces relativas entre muro y marco

Ecuación 20: Parámetro adimensional de muros

$$\lambda = \frac{E_c A_c}{G_m A_m}$$

Donde:

- E_c es el módulo de elasticidad del concreto
- A_c es el área de concreto en planta
- $G_m = 0.4 E_m$ (Modulo cortante del muro)
- E_m es el módulo de elasticidad del muro
- A_m es el área del muro en planta

Esta fórmula es aplicable para valores de λ entre 0.9 y 11 para relaciones de aspecto ζ entre 0.75 y 2.5 (Bazán / Meli, 2009).

La relación de aspecto ζ se define como:

Ecuación 21: Relacion de aspecto de un muro de mampostería

$$\zeta = b/h$$

Donde:

- b es el largo del muro en metros
- h es la altura del muro en metros

Luego para poder utilizar el método de rigidez se utiliza el Área de la pieza como:

Ecuación 22: Área de la diagonal a compresión en muros de mampostería

$$A = wt$$

Donde:

- A es el área de la pieza
- w es el ancho de la diagonal equivalente del muro
- t es el ancho del muro (como se aprecia en la imagen anterior)

III. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

A. Hipótesis alternativa

Los muros de mampostería de ladrillo confinados con refuerzo horizontal distribuido, poseen un mejor comportamiento mecánico – resistente al ser sometidos a cargas laterales unidireccionales respecto a los muros de mampostería con ladrillo confinados con solera intermedia.

B. Hipótesis nula

Los muros de mampostería de ladrillo confinados con refuerzo horizontal distribuido, no poseen un mejor comportamiento mecánico – resistente al ser sometidos a cargas laterales unidireccionales respecto a los muros de mampostería con ladrillo confinados con solera intermedia.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivos generales:

- Establecer diferencias en cuanto a los mecanismos de fallas cortantes típicas por la aplicación de fuerza lateral, para las dos tendencias constructivas de mampostería con ladrillo analizados, mampostería confinada con refuerzo horizontal distribuido y mampostería confinada con solera intermedia.
- Determinar las variaciones en cuanto a resistencia para las dos tendencias constructivas de mampostería con ladrillo analizado, mampostería confinada con refuerzo horizontal distribuido y mampostería confinada con solera intermedia.
- Determinar diferencias en cuanto a las características post-elásticas (ductilidad) para las dos tendencias constructivas de levantado de muros estructurales en mampostería con ladrillo analizadas, mampostería confinada con refuerzo horizontal y mampostería confinada con solera intermedia.
- Determinar con relación a los resultados obtenidos en los ensayos de carga lateral, si es constructiva y económicamente viable la implementación del sistema constructivo de mampostería con refuerzo horizontal distribuido en relación con el sistema constructivo de mampostería confinada con solera intermedia.

B. Objetivos específicos:

- Identificar mediante un criterio técnico, experimental, y económico, diferencias en cuanto a economía y metodología de construcción para las dos tendencias constructivas analizadas de muros estructurales en

mampostería confinada de ladrillo con solera intermedia y con refuerzo horizontal distribuido.

- Determinar los mecanismos de fallas por cortantes debido a la aplicación de fuerza lateral para las dos tendencias constructivas analizadas de levantados de muros estructurales en mampostería con ladrillo con solera intermedia y con refuerzo horizontal distribuido.
- Determinar la resistencia a consecuencia de la aplicación de fuerza lateral en las dos tendencias constructivas de levantados de muros estructurales en mampostería con ladrillo, mampostería confinada con solera intermedia y con refuerzo horizontal distribuido.
- Realizar las pruebas de laboratorio necesarias para poder determinar la calidad, cualidades y propiedades de los materiales a utilizar en la construcción de los ensayos de levantados estructurales de muros de mampostería confinada con ladrillo para las dos tendencias constructivas analizadas, mampostería confinada con solera intermedia y con refuerzo horizontal distribuido.
- Realizar posibles recomendaciones y observaciones en base a los valores y características experimentales obtenidas en los ensayos de levantados estructurales de muros de mampostería con ladrillo, para las dos tendencias constructivas analizadas, mampostería confinada con solera intermedia y con refuerzo horizontal distribuido.
- Actualizar y recopilar bibliografía relacionada con el comportamiento de la mampostería estructural en general y tipología de falla que en la misma se producen al ser sometidos a carga horizontal principalmente.

V. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN

La actividad sísmica o terremotos pueden causar grandes desastres, en particular en aquellos lugares donde no se han tomado en cuenta medidas de prevención, en relación con las características de sismo - resistencia de las obras civiles o edificaciones. El territorio guatemalteco se encuentra dividido entre tres placas tectónicas: la placa de Norteamérica; la placa del Caribe; y la placa de Cocos. Los movimientos relativos que se generan entre éstas, determinan los accidentes topográficos principales, los volcanes y la distribución de los sismos o terremotos.

En Guatemala y en gran parte de Centro América, la mampostería es utilizada como el sistema - resistente principal para la edificación de vivienda habitacional. La mampostería es uno de los sistemas constructivos más antiguos que se han desarrollado, sin embargo en países como Guatemala, el tema de experimentación, resistencia del sistema estructural y la estandarización tanto de la calidad de los materiales como de los ensayos experimentales, son necesarios para la obtención de valores característicos de resistencia, los cuales son de mucha utilidad para el refinamiento del proceso de cálculo y diseño de la mampostería, estos últimos no se encuentran totalmente regulados por las normas nacionales y las pruebas experimentales son consideradas insuficientes.

El uso de la mampostería reforzada y en especial con la inclusión del refuerzo horizontal, ya sea en forma de solera (sistema constructivo que es adoptado en forma general en Guatemala), o con barras de refuerzo horizontal distribuidas a lo largo de la altura del muro (sistema de mucha aceptación y utilizado en Sudamérica y México) aporta resultados importantes en términos de resistencia y tipología de la falla, es decir la trayectoria de la misma en relación con la distribución del refuerzo y al esfuerzo cortante resistido para la mampostería.

El comportamiento de la mampostería frente a cargas impuestas está determinado por las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que se

emplean en su construcción y la capacidad de estos para la resistencia de las fuerzas internas generadas. Por lo que la importancia de realizar los ensayos experimentales a las unidades de construcción que se ven involucrados en la construcción con mampostería, como es el caso de la unidad de mampostería (block - ladrillo), el mortero, y el acero son de vital importancia para conocer las características de resistencia con las que se están trabajando. También es de vital importancia conocer cómo las mismas se desenvuelven ya estando ensambladas una con otra, conectadas mediante el mortero de pega, reforzadas mediante el refuerzo horizontal, y confinadas por medio de columnas y vigas de concreto armado, esto con el fin de obtener valores experimentales de diseño que nos puedan aproximar a los valores reales a obtener al momento de realizar los ensayos de los muros de mampostería finales. Y no dependiendo así de los valores teóricos comúnmente tomados en cuenta para el diseño estructural de los muros de mampostería reforzado, los cuales por ser materiales elaborados bajo estándares y normas de calidad diferentes a las cuales se realizan en Guatemala, puede inducir a obtener valores que no estén totalmente acorde a las características del material a utilizar, aunque en la mayoría de ocasiones estos pueden llegar a desarrollar resultados positivos.

Entre la tipología de falla comúnmente desarrollada durante un evento sísmico de significativa liberación de energía, es la conocida como falla por corte, y es considerada una falla del tipo frágil por lo que lo hace una falla indeseable en la mampostería ya que esta puede inducir al debilitamiento y reducir la capacidad de carga de la estructura hasta llevarla al colapso. Por lo que se hace importante e interesante estudiar el efecto de fuerzas horizontales al ser aplicadas e interactuar con el muro, en especial cuando se desarrolla este tipo de falla.

Existe un gran escepticismo por parte del gremio constructivo guatemalteco hacia la no utilización de la solera intermedia en los muros estructurales de mampostería confinada, esto principalmente argumentado inseguridad por la falta de rigidez, y de refuerzo que el muro podría sufrir sin la inclusión de dicha solera, por

lo que se aduce que la capacidad del muro a responder hacia las distintas combinaciones de cargas y esfuerzos ejercidos sobre el mismo disminuirían significativamente. No obstante existen otras propuestas constructivas, como es el caso de Colombia y de México, en los cuales ellos consideran que la inclusión de la solera en el muro no es necesaria y que el refuerzo horizontal suministrado al muro es más que suficiente para que el mismo satisfaga las cargas y esfuerzos para lo cual fue diseñado. Sin embargo en Guatemala no existe investigación ni documentación tal que enliste las ventajas y desventajas de dichos sistemas constructivos por lo que se ve en la necesidad de presentar ensayos de laboratorio tales que ayuden a desarrollar conclusiones y recomendaciones acerca de la comparación de las características mecánicas y post - elásticas de ambos sistemas estructurales de levantados de muros en mampostería con ladrillo.

El estudio proporcionará valores e ideas representativas del comportamiento, tipologías de falla y de la resistencia a esfuerzos cortantes de los muretes, para el tipo de ladrillo utilizado (tipo superblock liviano), y de las relaciones de estos con los dos distintos tipos de morteros utilizados.

Este estudio se limita al tipo y resistencia de la unidad de mampostería utilizada y del sistema constructivo propuesto y proporciona una aproximación confiable de la resistencia a cortante y de las características mecánicas, por lo que el valor de resistencia del mismo muros elaborados a base de distintas unidades de mampostería o implementando distintos métodos constructivos.

El estudio se llevará a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Y tomarán como las variables de investigación el tipo de refuerzo horizontal interior a utilizar, juntamente con la distribución del mismo, se establecieron tres tipos o grupos de muretes a construir: muros confinados con solera intermedia, para los cuales se desarrollarán tres ensayos; muros confinados con refuerzo horizontal distribuido, se llevarán a cabo tres ensayos; adicionalmente

se realizará un muro control el cual posee el confinamiento al igual que los otros dos tipos de muros con la diferencia que no posee ningún tipo de refuerzo horizontal.

VI. MÉTODO

A. Ensayos elaborados a los morteros.

1. Ensayo a compresión para cubos de mortero.

a. **Materiales a utilizar.** Se utilizarán tres cubos de cada tipo de mortero a probar, los cuales varían en proporciones únicamente de cal y agua, ya que las proporciones de cemento y arena son constantes para los cuatro tipos de mortero (ASTM_C109).

b. **Instrumento de investigación.** El instrumento de investigación será por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma C 109 “Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”, del ASTM.

c. **Máquina de pruebas.** Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleará la máquina de compresión del laboratorio de materiales del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala. Esta máquina tiene las siguientes especificaciones: Compresora Universal marca Versa Tester SOILTEST, hecha en USA, capacidades máximas de 12,000lbs y 60,000lbs.

d. **Metodología.** De acuerdo a las especificaciones C 109 “Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)” del ASTM, se considera como puntos a resaltar acerca del procedimiento los siguientes:

- **Preparación de la muestra:** Se miden en un recipiente con medidas indicadas para así asegurar que las proporciones serán las adecuadas según las especificaciones del ASTM C270, ya que se realiza este ensayo para los cuatro tipos de mortero que indica la norma. Un día después de realizada la muestra se puede desencofrar dejando las muestras marcadas y en recipientes

llenos de agua para que tengan un fraguado correcto de 28 días.
(ASTM_C109)

- **Distribución de la fuerza:** Se deberá utilizar una placa sólida para distribuir la fuerza en el caso de tener una muestra menor a la placa que ya tiene la compresora pero para estos casos que son cubos de 5 cm X 5 cm no se da este problema, por lo cual la fuerza será distribuida correctamente en toda la superficie del cubo.
(ASTM_C109)
- **Metodología:** La carga deberá aplicarse de manera constante en periodos no menores de un minuto ni mayores de dos minutos y cuidando no excederse de lo esperado a resistir. (ASTM_C109)

2. Ensayos de retención de agua del mortero.

a. **Sujeto de investigación.** Para el caso particular de esta prueba, el sujeto de investigación son cubos de mortero de los distintos tipos de morteros que describe la norma ASTM C270. Se realizaron tres muestras de cada tipo de mortero sujeta al estudio. Todo el proceso de su realización está descrito en la sección de anexos A 5 de la especificación C780 “Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry” del ASTM.(ASTM_C780).

b. **Materiales a utilizar.** Se utilizaron tres cubos de cada tipo de mortero a probar, los cuales varían en proporciones únicamente de cal y agua, ya que las proporciones de cemento y arena son constantes para los cuatro tipos de mortero (ASTM).

c. **Instrumentos de medición.** Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleó la pesa, marca OHAUS con soporte máximo de 20 Kg con una precisión de 1 gramo, del laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala.

d. **Metodología.** De acuerdo a las especificaciones en la sección de anexos A 5 de la ASTM C780 “Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry” del ASTM., se considera como puntos a resaltar acerca del procedimiento los siguientes:

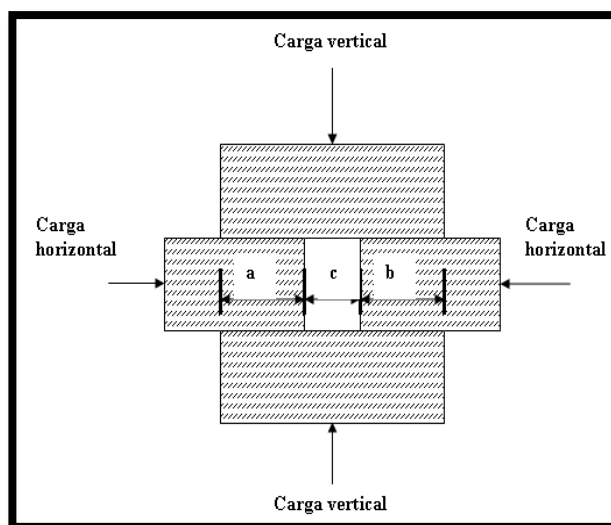
- **Preparación de la muestra:** Pesarlo antes de someterlo al proceso de secado, que consisten en colocar los especímenes en el horno, marca BLUE M con un rango de temperatura de 15grados Celsius por encima del ambiente a 300 grados Celsius, una homogeneidad de 1% de punto de ajuste y precisión de 1 grado Celsius, durante no menos de 24 horas a una temperatura constante de 110 a 115 grados centígrados. Luego debe pesarse cada 2 horas hasta obtener un peso repetido. Dejarlo enfriar por lo menos 4 horas, en un lugar a temperatura ambiente con humedad relativa del 30% al 70% (ASTM_C780).
- **Posicionamiento de los cubos de muestra:** Se colocaran los cubos de modo que sean totalmente sumergidos en recipientes con agua limpia, destilada o suave a temperatura entre 15 y 30 grados centígrados por un periodo de 24 horas (ASTM_C780).
- **Metodología:** Se registraran los pesos iniciales a las 24 horas de sumergido, luego de retirados del agua se dejan en un lugar a temperatura ambiente durante 28 días para así poder obtener el contenido de agua de las muestras (ASTM_C780).

3. Ensayos de adherencia del mortero.

a. **Sujeto de investigación.** Para el caso particular de esta prueba, el sujeto de investigación son prismas formados por tres ladrillos con una separación considerada al centro de las mitades que lo conforman en esa posición y es el lugar en el cual se basa la investigación ya que es el punto en el que se da el movimiento y se logra llegar a determinar la resistencia que este logra alcanzar. La ilustración 48 muestra la manera en que van colocados los ladrillos para formar estos prismas

para el cálculo de la resistencia de adherencia del mortero con la pieza de mampostería en este caso ladrillo llamado “súper-block liviano”.

Ilustración 48. Colocación del prisma para resistencia a la adherencia entre el mortero y la mampostería.



b. **Materiales a utilizar.** Se utilizarán tres prismas formados por dos ladrillos enteros y dos mitades y realizados con la mezcla tipo M, ya que es la sujeta al estudio general del proyecto, y es la que especifica la recomendación de la FHA en Guatemala.

c. **Instrumento de investigación.** El instrumento de investigación será por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma C 952 del ASTM, "TEST METHOD FOR BOND STRENGTH OF MORTAR TO MANSORY UNITS" (ASTM_C952).

Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleará la máquina de compresión y dos gatos hidráulicos del laboratorio de prefabricados del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad San Carlos de Guatemala. Esta máquina tiene las siguientes especificaciones: marca OWATONNA con un área de contacto de 2.24 in (14.45 cm), fabricada en USA, con una capacidad máxima de 10 Ton.

d. **Metodología.** De acuerdo a las especificaciones C 952," TEST METHOD FOR BOND STRENGTH OF MORTAR TO MANSORY UNITS", del ASTM (ASTM_C952).

4. Ensayo de fricción del mortero con la mampostería.

a. **Sujeto de investigación.** Para el caso particular de esta prueba, el sujeto de investigación son prismas formados por tres ladrillos con una separación considerada al centro de las mitades que lo conforman en esa posición y es el lugar en el cual se basa la investigación ya que es el punto en el que se da el movimiento y se logra llegar a determinar la resistencia que éste logra alcanzar y el coeficiente de fricción del mismo sistema (ASTM_C952).

b. **Materiales a utilizar.** Se utilizarán tres prismas formados por dos ladrillos enteros y dos mitades y realizados con la mezcla tipo M, ya que es la sujeta al estudio general del proyecto, y es la que especifica la recomendación de la FHA en Guatemala.

c. **Instrumento de investigación.** El instrumento de investigación será por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma C 952 del ASTM," TEST METHOD FOR BOND STRENGTH OF MORTAR TO MANSORY UNITS" (ASTM_C952).

Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleará la máquina de compresión y dos gatos hidráulicos del laboratorio de prefabricados del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad San Carlos de Guatemala. Esta máquina tiene las siguientes especificaciones: marca OWATONNA con un área de contacto de 2.24 in (14.45 cm), hecha en USA, con una capacidad máxima de 10 Ton.

d. **Metodología.** De acuerdo a las especificaciones C 952," TEST METHOD FOR BOND STRENGTH OF MORTAR TO MANSORY UNITS", del ASTM. Con la

diferencia que se incrementaran ambas cargas tanto verticales como horizontales después de haber alcanzado la resistencia a la adherencia.

B. Ensayos a la unidad simple y prismas de mampostería.

1. Ensayo de compresión a unidad de ladrillo.

a. Sujeto de investigación. Para el caso particular de esta prueba, el sujeto de investigación son los bloques individuales de mampostería de arcilla recocida (ladrillo), sometidos a la prueba de compresión simple. Entre las especificaciones del ladrillo a utilizar podemos listar las siguientes características: las medidas del ladrillo son 19 x 14 x 39 centímetros, su peso es de 16.5 lbs. y su resistencia teórica es de 70 kg/cm² colocado de soga. Se realizaron cinco ensayos individuales por cada forma de colocación (soga, horizontal y vertical), como es recomendado en las normas Internacionales del ASTM, en la sección C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” referida por la sección C 652 – 04 “Standard Specification for Hollow Brick (Hollow Masonry Units Made From Clay or Shale)” en el apartado 11 respecto a los ensayos de pruebas para el ladrillo. El fin de la prueba es determinar según su colocación, cómo resistirá más para las siguientes pruebas.

b. Materiales a utilizar. Se utilizaron quince unidades de mampostería de ladrillo con características mencionadas anteriormente, seleccionados aleatoriamente para dar representación a los materiales a utilizar. Se intentó evitando aquellos que puedan tener rajaduras, imperfecciones o caras disparejas.

c. Instrumento de investigación. El instrumento de investigación es por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile”, del ASTM.

Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleó la máquina de compresión del laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala. Esta máquina tiene las siguientes

especificaciones: Marca FORNEY modelo F-25EX con capacidad de 250,000 lbs. y anillo compresor de 6 pulgadas que trabaja como un sistema hidráulico. Es la compresora más vendida por la empresa, utiliza un voltaje de 110/220 V según sea el caso (FORNEY INC., 2010).

Ilustración 49. Máquina de pruebas de compresión Forney.



d. **Metodología.** De acuerdo a las especificaciones C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” del ASTM, se considera como puntos a resaltar acerca del procedimiento los siguientes:

- **Preparación de la muestra:** Pesarlo antes de someterlo al proceso de secado, que consisten en colocar los especímenes en el horno BLUE M con especificaciones: tiene un rango de temperatura de 15 ° C por encima de ambiente a 300 ° C (572 ° F), Homogeneidad: 1% de punto de ajuste, Precisión de control: 1.0 ° C, Potencia de disipación: a 125 ° C. La muestra deberá permanecer durante no menos de 24 horas a una temperatura constante de 110 a 115 grados centígrados. Luego debe pesarse cada 2 horas hasta obtener un peso repetido. Dejarlo enfriar por lo menos 4 horas, en un lugar a temperatura ambiente con humedad relativa del 30% al 70% (ASTM_C67, 2003 a) (Thermal Products Solutions, 2010).

- **Posicionamiento del ladrillo:** colocarlo de manera que tenga al menos $\frac{1}{4}$ de pulgada libre para que pueda moverse en cualquier sentido. Debe considerarse una superficie plana evitando desniveles que puedan producir una concentración de esfuerzos no controlada, y deben utilizarse materiales a discreción para la nivelación apropiada. Colocarlo de forma en que se utilizará y centrado de manera que la fuerza a aplicar se distribuya de manera homogénea en toda el área del ladrillo (ASTM_C67, 2003 a).
- **Distribución de la fuerza:** Se deberá utilizar una placa sólida para distribuir la fuerza en el caso de tener un ladrillo hueco, como es uno de los casos.
- **Instrumentación:** Aplicarse continuamente hasta obtener un aproximado del 50% de la carga última a resistir. Luego de ello la carga deberá aplicarse de manera constante en periodos no menores de un minuto ni mayores de dos minutos y cuidando no excederse de lo esperado a resistir (ASTM_C67, 2003 a).

2. Ensayo de absorción de unidad de ladrillo.

a. **Sujeto de investigación.** Para el caso particular de esta prueba, el sujeto de investigación son los bloques individuales de mampostería de arcilla recocida (ladrillo), sometidos a la prueba de compresión simple. Entre las especificaciones del ladrillo a utilizar podemos listar las siguientes características: las medidas del ladrillo son 19 x 14 x 39 centímetros, su peso es de 16.5 lbs. y su resistencia teórica es de 70 kg/cm². Se realizaron cinco ensayos individuales, como es recomendado en las normas Internacionales del ASTM, en la sección C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” referida por la sección C 652 – 04 “Standard Specification for Hollow Brick (Hollow Masonry Units Made From Clay or Shale)” en el apartado 11 respecto a los ensayos de pruebas para el ladrillo. El fin de la prueba es determinar el porcentaje de absorción que posee el tipo de ladrillo a utilizar.

b. Materiales a utilizar. Se utilizaron cinco unidades de mampostería de ladrillo con características mencionadas anteriormente, evitando aquellos que puedan tener rajaduras.

c. Instrumento de investigación. El instrumento de investigación es por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile”, del ASTM.

Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleó la pesa marca OHAUS con soporte para 20 kg y precisión de 1 gramo del laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala.

d. Metodología. De acuerdo a las especificaciones C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” del ASTM, se considera como puntos a resaltar acerca del procedimiento los siguientes:

- **Preparación de la muestra:** Pesarlo antes de someterlo al proceso de secado, que consisten en colocar los especímenes en el horno BLUE M con especificaciones: tiene un rango de temperatura de 15 ° C por encima de ambiente a 300 ° C (572 ° F), Homogeneidad: 1% de punto de ajuste, Precisión de control: 1.0 ° C, Potencia de disipación: a 125 ° C. La muestra debe permanecer durante no menos de 24 horas a una temperatura constante de 110 a 115 grados centígrados. Luego debe pesarse cada 2 horas hasta obtener un peso repetido. Dejarlo enfriar por lo menos 4 horas, en un lugar a temperatura ambiente con humedad relativa del 30% al 70% (ASTM_C67, 2003 a) (Thermal Products Solutions, 2010).
- **Posicionamiento del ladrillo:** Se colocaron los ladrillos de modo que fueran totalmente sumergidos en recipientes con agua limpia,

destilada o suave a temperatura entre 15 y 30 grados centígrados por un periodo de 24 horas (ASTM_C67, 2003 a).

- **Instrumentación:** Se registraron los pesos iniciales y a las 24 horas de sumergido, cuidando que pasen 5 minutos luego de retirados del agua y secados en la superficie con tela (ASTM_C67, 2003 a).

3. Ensayo de medición del ladrillo.

a. **Sujeto de investigación.** Para el caso particular de esta prueba, el sujeto de investigación son los bloques individuales de mampostería de arcilla recocida (ladrillo), sometidos a la prueba de compresión simple. Entre las especificaciones del ladrillo a utilizar podemos listar las siguientes características: las medidas teóricas del ladrillo son 19 x 14 x 39 centímetros, su peso es de 16.5 lbs. y su resistencia teórica es de 70 kg/cm². Se realizaran diez ensayos individuales, como es recomendado en las normas Internacionales del ASTM, en la sección C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” referida por la sección C 652 – 04 “Standard Specification for Hollow Brick (Hollow Masonry Units Made From Clay or Shale)” en el apartado 11 respecto a los ensayos de pruebas para el ladrillo. El fin de la prueba es determinar el porcentaje de absorción que posee el tipo de ladrillo a utilizar (ASTM_C652, 2004).

b. **Materiales a utilizar.** Se utilizaron diez unidades de mampostería de ladrillo con características mencionadas anteriormente, que ejemplifiquen el lote de ladrillos a utilizar.

c. **Instrumento de investigación.** El instrumento de investigación fue por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile”, del ASTM.

Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleó un metro marca STANLEY – POWERLOCK con capacidad de medición de 5 metro o 16 pies con un tamaño de 57 mm o 2 ¼ pulgadas y precisión de 1 milímetro.

d. **Metodología.** De acuerdo a las especificaciones C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” del ASTM, se considera como puntos a resaltar acerca del procedimiento los siguientes:

- **Preparación de la muestra:** Seleccionar 10 ladrillos aleatoriamente de modo que estos sean representativos al lote que se utilizara para el resto de pruebas (ASTM_C67, 2003 a).
- **Mediciones necesarias:** Se medirán los ladrillos en cada una de sus caras, tomando tres datos de cada una de ellas (en los dos extremos y en el centro) para luego promediar los datos obtenidos. Con la finalidad de poder dar las medidas de la altura, ancho y largo de los ladrillos utilizados. Se utilizó una precisión de 1 mm, es decir se aproximara al 1 mm superior o inferior según sea más cercano (ASTM_C67, 2003 a).

4. **Ensayo de resistencia a la compresión de la mampostería por medio de prismas.**

a. **Sujeto de investigación.** Para el caso particular de este estudio, el sujeto de investigación son prismas de mampostería de ladrillo (arcilla recocida), sometidos a la prueba de compresión simple. Se considera que los prismas deben mantener características como el mismo tipo de ladrillo y tiempo de fraguado. El tipo de ladrillo a emplear posee dimensiones 19 X 39 X 14 centímetros y el mortero a utilizar será tipo M, descrito a continuación basado en la normativa internacionales ASTM, en la sección C 1314 – 03 “Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms”.

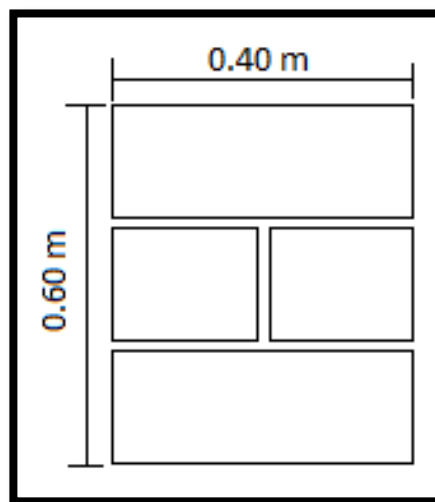
b. **Materiales a utilizar.** Se utilizaron las unidades de mampostería de ladrillo, antes mencionadas; para el mortero de pega a utilizar, de acuerdo a resultados experimentales anteriores tomando en cuenta tanto la resistencia a compresión del ladrillo como del mortero se determinó utilizar la relación tipo M, la cual posee una relación en volumen de 1:1/4:3 siendo de cemento, cal y agregado

fino (arena amarilla) respectivamente, se considera que la cantidad de agua a utilizar depende de la humedad del sitio donde se realice la mezcla por lo que no se determinó un volumen fijo. Entonces la resistencia del ladrillo a utilizar es de 53.14 kg/cm² y la resistencia para el mortero tipo M es de 176 Kg/cm².

Las propiedades de los prismas para el ensayo de compresión se determinaron según las recomendaciones de las normas internacionales ASTM, en la sección C 1314 - 03 "Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms". Se construyeron tres prismas para la determinación del esfuerzo de compresión de la mampostería, f'_m , los cuales se diseñaron, considerando parámetro principal la relación altura del prisma vs. dimensión lateral del prisma (h_p/t_p) delimitado entre los valores 1.3 a 5, mencionada en la sección C 1314 - 03 del ASTM.

Como se menciona en la norma ASTM se debe mantener una relación de h_p/t_p de al menos 1.3 entre la altura y el ancho del prisma, por lo que se determina que las dimensiones a utilizar serán un ladrillo de base y tres de altura. Se considera que para concebir un modelo realístico, la modulación del prisma será como la siguiente figura manteniendo la relación de h_p/t_p de 1.5: (ASTM_C1314, 2003).

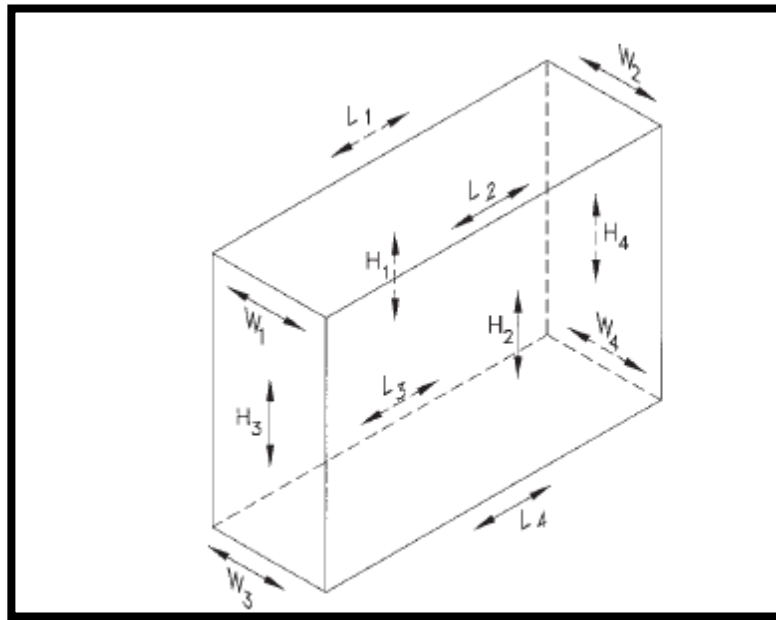
Ilustración 50. Bosquejo de dimensiones del prisma de ladrillo.



Recomendado por la norma ASTM C 1314 - 03, debería mantenerse una temperatura constante en el lugar donde se curaran los prismas, envueltos en bolsas plásticas para mantener la humedad de los mismos. Dos días previos a las pruebas deberán sacarse de las bolsas en las que están almacenadas, siempre manteniendo la temperatura constante. En la práctica se dejan curando los prismas a la intemperie para evitar variaciones de condición entre cada uno de los prismas y someterlos todos al proceso de curado sin intervención. Para este ensayo se dejaron los prismas en la intemperie para mantener las mismas condiciones.

Recomendado por la norma ASTM C 1314 - 03, se midieron los prismas en todas las dimensiones de los lados del prisma, como en la siguiente figura:

Ilustración 51. Ubicación de mediciones del prisma de mampostería.



(ASTM_C1314, 2003)

c. **Instrumento de investigación.** El instrumento de investigación será por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma C 1314 - 03 "Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms", del ASTM. Si se hiciera alguna

variación con respecto al método aquí planteado, deberá tomarse en cuenta puesto que los resultados no representaran lo buscado con la prueba especificada.

Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se empleó la máquina de compresión del laboratorio de materiales del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad San Carlos de Guatemala. Este Gato hidráulico es marca ENERPAC PC 102 con capacidad para 5000 lb/pulg², una sección efectiva de 2.24 pulg² (14.45 cm²).

d. Metodología. De acuerdo a las especificaciones C 1314 - 03 “Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms” del ASTM, se considera como puntos a resaltar acerca del procedimiento los siguientes:

- **Posicionamiento de la muestra:** asentar el modelo para que figure en una posición centrada y vertical, utilizando un material que sea conveniente, para la protección y nivelación, colocada en la parte inferior (ASTM_C1314, 2003).
- **Aplicación de la carga:** para el caso de las muestras sin instrumentación, aplicar la carga continuamente hasta el máximo. Cuando se llega a la mitad de la carga máxima esperada se puede aplicar a cualquier tipo de práctica en cuanto a la velocidad de carga, después de ello se debe ajustar la velocidad de la carga de tal manera que la carga máxima se alcance en no menos de 1 minuto y como máximo 2 minutos. Si la forma de falla no es identificable una vez se alcanza la carga máxima, continuar aplicando la carga hasta que sea identificable (ASTM_C1314, 2003).
- **Observaciones:** Describir el modo de falla de forma completa y detallada, en cuanto sea posible. Si pusiese, recurrir a una ilustración o fotografía. Determinar ubicación y trayectoria de las rajaduras que se presenten. Si se presentaran rajaduras o fallos en las esquinas previos a la falla del prisma, hacer

notarlos. Auxiliarse de la siguiente figura para determinar la forma de falla (ASTM_C1314, 2003).

5. Ensayo a compresión diagonal

a. Sujeto de investigación. Para cada uno de los distintos grupos de muretes se determinó el esfuerzo a resistencia última a cortante. Además se tomó como variable las diferencias entre los tipos de mortero utilizado.

Otras variables de la investigación son la tipología o mecanismos de falla que se presentaron al momento de realizar los respectivos ensayos.

El sujeto de investigación son los muretes de mampostería con ladrillo (arcilla recocida), sometidos a la prueba de compresión diagonal. El tipo de ladrillo a emplear posee características de modulación muy parecidas a las utilizadas para las unidades de mampostería de concreto, y puede ser considerada una unidad de mampostería relativamente nueva en el mercado de construcción guatemalteco. El ladrillo posee una modulación de aproximadamente 14X19X39 centímetros y un peso de 16.5 libras por unidad.

Se utilizaron las unidades de mampostería de ladrillo, antes mencionadas, en cuanto al mortero de pega se utilizaron los diferentes morteros específicamente M y S, con el fin de establecer diferencias en cuanto al comportamiento de estos.

b. Materiales a utilizar. Las propiedades de los muretes para el ensayo de compresión diagonal fueron consideradas de acuerdo con las recomendaciones de las normas internacionales ASTM, en la sección E 519 – 00 “Standard Test Method for Diagonal (Shear) in Masonry Assemblages”, además de utilizar recomendaciones de resultados de diversas investigaciones basadas en los ensayos de este tipo. Dentro del desarrollo de este estudio se elaboraron 8 muretes para ensayos de compresión diagonal, los cuales se diseñaron considerando como valores constantes el espesor vertical, horizontal del mortero de pega (de acuerdo a

recomendaciones del FHA y AGIES, como mínimo 1.5 centímetros) y las unidades mampuestas. Se consideraron como las únicas variables del estudio el tipo del mortero de pega a utilizar.

Se tomaron como las variables de investigación el tipo de mortero de pega a utilizar, se establecieron dos tipos o grupos de muretes a construir, para cada uno de los cuales se realizaron cuatro pruebas de acuerdo a las especificaciones E 519 – 00 del ASTM, siendo un total de 8 muretes a ensayar. Siendo los dos tipos de muretes a construir los siguientes:

- Tipo M: Este tipo de muros presenta mortero de pega tipo M.
- Tipo S: Este tipo de muros presenta mortero de pega tipo S.

La construcción de los muretes estará a cargo de un maestro de obra calificado, con experiencia en el sistema constructivo de mampostería, quien se encargará de la elaboración de la totalidad de los muretes.

c. Instrumento de Investigación. El instrumento de investigación será por medio de ensayos de laboratorio, basados en la norma E 519 – 00 “Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages”, del ASTM.

Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se emplearon:

- La máquina de compresión del laboratorio de materiales a disposición de las instalaciones en donde se realizarán los ensayos (Instalaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala).

Ilustración 52. Marco de pruebas a compresión.



- Las zapatas de carga de acero para ubicar la parte inferior del muro y la otra en la parte superior, fueron elaboradas por el autor acorde a las especificaciones realizadas por los laboratoristas, y de acuerdo a los ángulos estipulados por el dimensionamiento del murete.

Ilustración 53. Zapatas de carga de acero.



d. **Metodología.** Los muretes se realizaron de acuerdo a las especificaciones E 519 – 00 “Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages” del ASTM.

Los muretes a ensayar se construyeron con las unidades de mampostería y el tipo de mortero que se emplearon en obra. Para este caso en específico se tomaron en cuenta los dos tipos de mortero M y S.

Los muretes tienen una longitud de al menos una vez y media la longitud de la pieza, y el número de hiladas necesarias para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud.

Ilustración 54. Dimensionamiento de los muretes.



Los muretes se ensayaron sometiéndolos a una carga de compresión monótona a lo largo de su diagonal y el esfuerzo cortante medio se determinó dividiendo la carga máxima entre el área bruta del murete medida sobre su misma diagonal.

Los muretes se ensayaron a la edad de 28 días. En la elaboración, curado, transporte, almacenamiento y procedimiento de ensayo de los especímenes se realizaron acorde a la norma anteriormente citada.

Para poder visualizar los datos de manera que se puedan analizar e interpretar, es necesario determinar valores, para que estos puedan estructurar cuadros estadísticos. El análisis de datos consistirá en un estudio específico y preciso de los datos obtenidos en los ensayos.

$$\text{Ecuación 23: } v'_m = \frac{vm}{1+2.5Cv}$$

Donde:

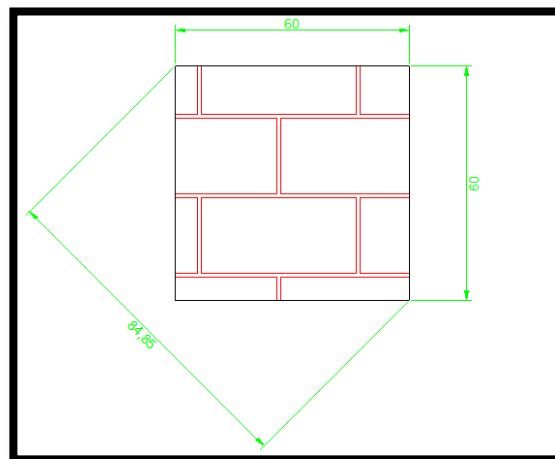
V_m = media de la resistencia a compresión diagonal

C_v =

coeficiente de variación de la resistencia a compresión diagonal de muretes no menor a 0.20 .

El esfuerzo soportado por el prisma sometido a corte por compresión diagonal se realizó utilizando un gato hidráulico ENERPAC RC 102 cuyo pistón tiene un área efectiva de 2.24 plg^2 (14.4516 cm^2). Por lo que los valores de esfuerzo medidos fueron determinados de la siguiente manera.

Ilustración 55. Dimensionamiento de los muretes.



Inicialmente se determinó la carga efectiva sobre el murete a la hora de aplicarle la presión con el gato hidráulico ENERPAC RC 102:

Ecuación 24:
$$F_{cortante} = \sigma_{aplicado} \times A_{pistón}$$

Posteriormente se determinó el área bruta de trabajo, para este caso el área de la diagonal:

Ecuación 25:
$$A_{diagonal} = l_{diagonal} \times \text{espesor} = 84.85 \times 14 = 1187.94 \text{ cm}^2$$

Seguido a obtener el área de la diagonal, se determina el esfuerzo cortante medio, V_m :

Ecuación 26:
$$V_m = \frac{F_{cortante}}{A_{diagonal}}$$

Ya obtenido este valor se procede a ingresarlo en la ecuación 18 mencionada con anterioridad para poder así obtener el valor a cortante de cada uno de los diferentes tipos de muretes elaborados.

C. Ensayos de muros confinados con solera intermedia según norma FHA y AGIES.

1. **Modelo teórico.** Debido a que los incrementos de carga fueron medidos en un manómetro es necesario calcular la fuerza equivalente ejercida por el gato hidráulico a partir de la presión leída del manómetro por lo que se utilizó la siguiente formula.

- **Carga lateral aplicada**

Ecuación 27: Carga lateral aplicada.

$$P = \frac{\varepsilon_o}{A_g * 2.2}$$

Donde:

ε_o = Esfuerzo aplicado en intervalos de 200 psi

A_g = Área del Gato hidráulico en plg^2 (5.16 plg^2)

P = Carga Lateral Aplicada en Kg.

- Pendiente del muro

Para calcular la pendiente con la cual se deforma el muro en el rango elástico se utilizara (M_m) se utilizará la siguiente fórmula a partir de las gráficas de carga contra deformación:

Ecuación 28: Pendiente de la gráfica carga vs. deformación.

$$M_m = \frac{P}{\varepsilon}$$

Donde:

ε_0 = Esfuerzo aplicado en intervalos de 200 psi

A_g = Área del Gato hidráulico en plg^2 (5.16 plg^2)

P = Carga Lateral Aplicada en Kg.

El análisis matemático se realizó mediante la utilización de un programa de cálculos matemáticas llamado Math Cad. En este programa se ingresaron las variables y ecuaciones correspondientes al análisis del método de rigidez de matrices con el cual se aproximó el muro a una barra equivalente.

2. Modelo experimental. Con el propósito de estudiar los muros de mampostería confinada mixta, descritas como un sistema de muros de mampostería confinados por soleras y columnas, se decidió diseñar un ensayo de laboratorio de escala real que nos permitiera estudiar el comportamiento del sistema constructivo para poder ser comparado con otros sistemas. Entre los sistemas que se busca comparar es contra un muro de mampostería de marcos sin solera para que servirá como punto de referencia y luego compararlo contra los resultados obtenidos por otro compañero en un sistema de mampostería de marcos sin solera intermedia con refuerzo distribuido entre las sisas de los ladrillos.

a. **Sujeto de investigación.** Los muros de mampostería a construirse se realizaron con mampostería de ladrillo (arcilla recocida) confinada con soleras de concreto 3000 psi a los 28 días. El acero de refuerzo en las soleras y columnas es un hierro grado 40 ($f_y=40\text{ksi}$) del número 3 para el refuerzo longitudinal y del número 2 para los estribos. Los ladrillos cuentan con dimensiones de $19\text{cm}\times 14\text{cm}\times 39\text{cm}$ muy similares a las dimensiones del block de cemento con un peso de 16.5 libras.

El mortero utilizado para la pega de la mampostería es un mortero tipo M de acuerdo a estudios y correlaciones que lo colocan como la mejor opción. El mortero tipo M se preparó con una relación de volumen de 1 de cemento por $\frac{1}{4}$ de cal y 3 partes de agregado fino. El agregado fino empleado fue arena amarilla cernida. El agua a agregar no se midió más que con la experiencia del constructor quien colocó agua hasta obtener una consistencia deseada para realizar el trabajo. La resistencia teórica a utilizar es de 176 Kg/cm^2 . Para la fundición se utilizó madera que sirvió de formaleta. Esta madera debió contar con caras rectas para evitar que la misma afecte las dimensiones del elemento a fundir.

b. **Equipo.** El equipo a utilizarse constó principalmente de dos partes importantes. La primera parte es el equipo de construcción y elaboración de los distintos tipos de muros. La segunda parte consta del equipo utilizado para la realización de los ensayos y mediciones respectivas propias del ensayo.

En la primera fase se utilizarán:

- Martillo.
- Alicata.
- SERRUCHO.
- Pala.
- Cubetas.
- Nivel.
- Plomo.
- Cuchara.

- Metro.
- Hilo de pescar.

Ilustración 56. Herramientas utilizadas para construcción de muro.



En la parte del ensayo se utilizará:

- Viga de soporte para los muros de 3 metros de largo.
- Gato hidráulica para aplicar la carga lateral de 50 toneladas máximo.
- Tensores.
- Deformímetros.
- Válvula de presión para medir la carga del gato
- Cámara de video y fotografía así como materiales para documentar los resultados.

Ilustración 57. Manómetro de gato hidráulico



c. **Dimensiones.** El dimensionamiento de los muros se hizo tomando en cuenta los reglamentos de las normas guatemaltecas comúnmente utilizadas. Se buscó que las dimensiones recomendadas por las normas del FHA y las normas

recomendadas del Agies no fuera excedidas. Además, todos los requisitos del laboratorio se realizaran de acuerdo a la norma ASTM sección E 540-00 "Static Load Test for Shear Resistance of Frame for Buildings". Todos los materiales utilizados cumplen con sus respectivos ensayos ASTM tal y como se presentaron en partes anteriores de este Megaproyecto.

Los muros a realizarse contaron con dimensiones de acuerdo a las modulaciones del ladrillo que limitaban ciertas dimensiones. Además, el equipo a utilizarse presentaba ciertas limitaciones por el tamaño de la estructura que sostendría los muros en su lugar. Es por esto que se decidió por las medidas de 2.40 metros de largo por 2.40 metros de alto con un espesor igual al del ladrillo de 15 cm.

Los muros de solera intermedia se numeraron del 1 al 3 y el muro parámetro se número con el 4. Para el propósito de este análisis los muros del 5 al 7 serán los muros referentes a los ensayos de muros sin solera con refuerzo horizontal entre sisas.

Ver anexos 3 para ver los planos correspondientes a los muros y sus dimensiones.

d. Metodología. Para evitar complicaciones con el procedimiento a realizarse en los ensayos es importante contar con mano de obra calificada para la realización del experimento en todo momento. Se comienza por el diseño de los muros para adecuarlos a las restricciones presentadas por el material y equipo disponible. Luego se procede a la construcción de los muros.

Para la construcción de los muros es importante contar con albañiles con experiencia y un supervisor. Los muros se construyen sobre las vigas de concreto del laboratorio. La construcción comienza con la fundición del cimiento. Esta fundición debe realizarse con los hierros de refuerzo previamente doblados y armados a cumplir con las especificaciones del plano. Junto con el armado de los cimientos se

anclan las columnas al cemento y se les colocan los estribos a las mismas. Luego de armado, la fundición se realizara mediante la colocación de la formaleta de acuerdo a las dimensiones especificadas en los planos. Luego de un día de fundidos los cimientos, se procede a colocar la primera hilada de ladrillos. El aparejo de los mismos debe ser cuidado y supervisado a modo que estén bien colocadas cada una de las piezas cuidando que el muro quede a plomo, las sisas sean del tamaño adecuado y que las mezclas del mortero sean correctas.

Después de la quinta hilada de ladrillos se coloca una solera intermedia. Esta solera busca confinar las primeras cinco hiladas por lo que es importante que el refuerzo se ancle bien a las columnas con los dobleces y longitudes de desarrollo de acuerdo a los planos. La solera se arma y funde para luego continuara con las siguientes cuatro hiladas de concreto. Estas últimas cuatro hiladas deben hacerse por lo menos luego de un día de fraguado de la solera y remover la formaleta de acuerdo a la teoría presentada con anterioridad.

Luego de colocadas las últimas cuatro hiladas se procede a colocar la formaleta necesaria para la fundición de las columnas y solera de remate. Esta formaleta puede ser de madera o materiales aceptados por las normas FHA o normas recomendadas de AGIES. Luego de colocada la formaleta se arman y funden las columnas y solera de remate cuidando que sea en una sola fundición para que ésta quede monolítica.

Ilustración 58. Proceso de construcción de muro.



Luego del tiempo deseado de fraguado para la fundición de los muros se procede a colocar un aparato que servirá para sostener el muro a la viga a la hora de colocar la carga. Este aparato consta de dos vigas de acero colocadas de manera diagonal afianzadas a la viga sobre la que se fundieron los muros y del otro lado a una columna que servirá para colocar el gato hidráulico. Una vez asegurado y colocado el aparato que sostiene los muros se procede a montar el gato hidráulico a una altura de 2.35 m sobre la base de los cimientos del muro. El gato utilizado fue un gato hidráulico tipo RC 256 con capacidad de 25 toneladas.

Además, se colocan tres deformímetros que medirán el desplazamiento lateral del muro:

- El primer deformímetro se coloca a una altura de 2.35m sobre la cara inferior del cimiento, a la misma altura y en el lado opuesto al que se colocó el gato hidráulico.
- El siguiente deformímetro se coloca a la altura de la solera intermedia lo más al centro posible, del lado opuesto al que se coloca el gato hidráulico.
- El último deformímetro se coloca sobre el cimiento del mismo lado que se colocó el gato hidráulico para medir cualquier desplazamiento vertical que pueda sufrir el muro producto del momento de volteo de la aplicación de la carga del gato.

Las lecturas del deformímetro se tomarán a incrementos de carga de 14.06Kg/cm² (200psi).

Para analizar los resultados es indispensable la realización de tablas y graficas de carga contra deformación y anotar eventos importantes durante la realización del ensayo, tales como aparición de fisuras y fallas estructurales en su respectiva carga que ocurrieron.

D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).

1. Modelo teórico. El propósito de realizar estos cálculos es poder tener un valor teórico con el cual comparar nuestros resultados experimentales obtenidos en los ensayos de los muros a carga lateral simulando un sismo.

Para empezar se procederá a calcular la resistencia a la fuerza cortante por parte de la mampostería, y luego se determinó la fuerza cortante que resiste la cuantía de acero que conforma el muro, la cuantía que se propuso para el muro fue de dos varillas No. 2 a cada tres hiladas (600 mm) dentro de la junta entre unidades de mampostería.

La resistencia total a la carga lateral (cortante) está dada por la suma de la resistencia a cortante de la mampostería más la resistencia a cortante del refuerzo horizontal interior, la cual está dada por la siguiente expresión:

Ecuación 29: Resistencia total lateral (cortante).

$$V_R = V_{mR} + V_{sR}$$

Donde:

V_{mR} = Resistencia de la mampostería a cortante

$$V_{mR} = F_R 0.5V_m A_T + 0.3P \leq 1.5F_R V_m A_T$$

V_{sR} = Resistencia del refuerzo interior al cortante

$$V_{sR} = F_R \eta P_R F_{yh} A_T$$

2. Diseño experimental. Para el caso particular de este estudio, el sujeto de investigación son los muros de mampostería de ladrillo (arcilla recocida) confinada con refuerzo horizontal interior entre las juntas, sometidos a cargas laterales. Con el

objetivo de determinar la carga última que este muro pueda resistir y compararlo con otros sistemas constructivos alternativos a la mampostería confinada con refuerzo horizontal interior entre las juntas. El tipo de ladrillo que se va a utilizar tienen especificaciones estándar el cual posee características constructivas muy parecidas a las unidades de mampostería de concreto (Block), y éstas son consideradas relativamente nuevas en el mercado constructivo en Guatemala, las unidades de ladrillo poseen las siguientes características:

- Modulación: 19x14x39.
- Peso: 16.5 libras.

a. Materiales. Se utilizaron las unidades de mampostería de ladrillo, antes mencionadas; para el caso del refuerzo horizontal se utilizaran varillas de acero No. 3 y No. 2 grado 40 ($f_y=40\text{ksi}$), en cuanto al mortero de pega a utilizar, de acuerdo a resultados experimentales anteriores tomando en cuenta tanto la resistencia a compresión del ladrillo como del mortero, y de correlaciones de estudios anteriores se determinó utilizar la relación tipo M, la cual posee una relación en volumen de 1 cemento por $\frac{1}{4}$ de cal y 3 de agregado fino (arena amarilla), el agua agregar al mortero es un tema variable ya que depende de la humedad relativa del clima y otros factores. Teniéndose para éste relación de mortero una resistencia teórica de 176 Kg/cm^2 .

b. Disposición de los muros. Para el dimensionamiento de los muros confinados con refuerzo horizontal interior a utilizar para someterlos a cargas laterales se consideraron las normas del reglamento colombiano de construcción sísmo resistente (NSR-10) y las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería (NTC Mexicanas). Ya para propiamente el diseño del experimento se siguieron las recomendaciones de las normas internacionales ASTM, en la sección E 564 – 00 “Static Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings”, además de tomar en cuenta investigaciones anteriores realizadas sobre el tema. Dentro del desarrollo de este estudio se realizaron tres muros confinados con refuerzo horizontal interior para ser

cargados lateralmente, los cuales se diseñaron, considerando las normas mencionadas anteriormente, la NSR-10 y las NTC Mexicanas. La única variable en el muro es el aporte a la resistencia a cargas laterales que le podría aportar al muro en si el refuerzo horizontal interior entre las juntas al muro.

c. Dimensiones de los muros. Las especificaciones dimensionales de los muros que fueron empleados en el ensayo se establecieron a partir de la condición de que el tamaño del espécimen fuera representativo de una modulación o ensamble de escala natural y representativo en la actualidad, más bien intentar simular los daños que podría sufrir un muro de una vivienda popular de Guatemala por las fuerzas ejercidas por los sismos. También otra limitante la cual influyó en el dimensionamiento del muro fueron las características del equipo para realizar el ensayo, ya que ésta nos limitó tener un muro que tuviera exactamente 2.35 metros de altura incluyendo cimiento corrido.

Tras las consideraciones antes expuestas y la modulación de la unidad de mampostería a utilizar, fueron establecidas como dimensiones de los muretes para el ensayo, un muro de 2.40 metros de largo, 2.40 metros de alto y un espesor de 15 centímetros.

Ilustración 59. Modulación muro con refuerzo horizontal distribuido.

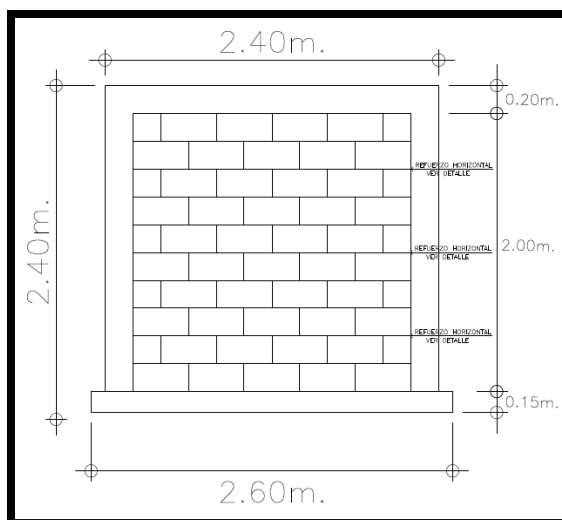
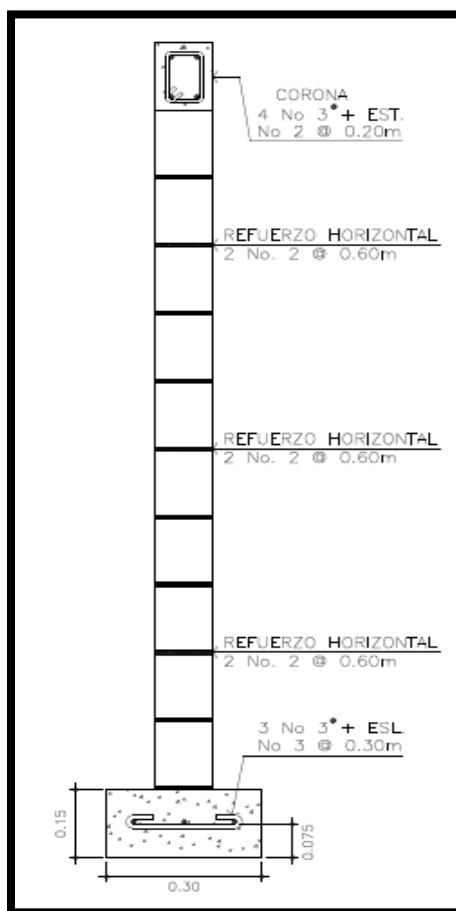


Ilustración 60. Sección de muro con refuerzo horizontal interior.



d. **Tipos de muros.** Tomando como punto de partida las variables establecidas anteriormente, las cuales son la cantidad de refuerzo horizontal (cuantía de acero), y la disposición de estos dentro de cada uno de los muros, se establecieron dos tipos de muro a construir, para cada uno de los cuales se realizaron una prueba para el Tipo 1 y 3 pruebas para el Tipo 2, de acuerdo a las especificaciones E 564 - 00 del ASTM, siendo un total de cuatro muretes a ensayar. Siendo los dos tipos de muros a construir los siguientes:

- Tipo 1: Este tipo de muros no presenta en las juntas horizontales ningún tipo o clase de refuerzo horizontal, el propósito de este muro es tenerlo como muro control para tener un dato de referencia para compararlo con el muro que si esta reforzado horizontalmente.

- Tipo 2: Este tipo de muros presenta en las juntas horizontales refuerzo horizontal, a cada tres hiladas de ladrillo de arcilla (60 centímetros).

La construcción de los muretes estuvo a cargo de un maestro de obra calificado, con experiencia en el sistema constructivo de mampostería, quien se encargará de la elaboración de la totalidad de los muros. Los muros fueron construidos in situ dentro de las instalaciones donde se llevó a cabo los ensayos (Instalaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala). Durante los tres posteriores días, los muretes fueron humedecidos por lo menos una vez al día, y en el período correspondiente a los 14 y 28 días posteriores de la elaboración de los mismos se procedió a ensayar los mismos.

e. Equipo utilizado. Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se emplearon entre otros:

- Gatos Hidráulicos para aplicar la carga lateral (50 Toneladas máximo).
- Vigas de apoyo para los muros (3 metros de longitud).
- Tensores para anclar cimiento a la viga de apoyo.
- Deformímetros para medir la deformación respectiva.

Ilustración 61. Equipo utilizado para los ensayos.



f. **Metodología.** Cada muro fue colocado de forma tal que se aplicó una carga horizontal simulando la acción de sismo. El esfuerzo de corte fue inducido por medio de un gato hidráulico tipo RC 256 con capacidad de 25 toneladas.

Se colocaron tres deformímetros:

- 1ro. Colocado en el extremo inferior del muro del lado de aplicación de carga, con el objetivo de medir el levantamiento o volteo que el muro pueda presentar.
- 2do. Colocado en el extremo superior del muro opuesto al lado de aplicación de carga, este deformímetros midió la deriva horizontal extrema superior.
- 3ro. Colocado en la parte media del muro al lado opuesto de aplicación de carga, para medir la deriva horizontal en esta posición. Se tomaron las lecturas de los deformímetros en cada incremento de carga de 14.06 kg/cm².

g. **Análisis y presentación de resultados.** Para poder visualizar los datos de manera que se puedan analizar e interpretar, será necesario determinar valores, para que estos puedan estructurar cuadros estadísticos. El análisis de datos consistirá en un estudio específico y preciso de los datos obtenidos en los ensayos.

Luego de tener todos los resultados de los ensayos se analizara el comportamiento físico y mecánico de los muretes de mampostería al ser sometidos al ensayo de carga lateral, agrupando los modelos por tipologías de falla propuestas de acuerdo con las características particulares de cada ensayo. Asimismo se analizaron los resultados obtenidos tanto de cada muro, como para cada tipo tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipología de falla.
- Resistencia a carga lateral.
- Cuantificación.
- Adherencia.
- Ductilidad.

VI. RESULTADOS

A. Ensayos elaborados a los morteros.

1. **Ensayo a compresión para cubos de mortero.** Los datos fueron tomados en tablas por cada tipo de mortero y con el promedio por cada uno de ellos. Luego serán analizados según los datos teóricos dados en la norma ASTM C270.

Tabla 10. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo M.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Resistencia a la compresión en (psi)
	Cemento	Cal	Arena	
M	1	1/4	2.5	2,921.28
M	1	1/4	2.5	2,224.51
M	1	1/4	2.5	2,338.06
Resistencia promedio en (psi)				2,494.62

Tabla 11. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo S.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Resistencia a la compresión en (psi)
	Cemento	Cal	Arena	
S	1	1/2	2.5	2,699.35
S	1	1/2	2.5	2,699.35
S	1	1/2	2.5	2,900.64
Resistencia promedio en (psi)				2,766.45

Tabla 12. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo N.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Resistencia a la compresión en (psi)
	Cemento	Cal	Arena	
N	1	1 1/4	2.5	787.11
N	1	1 1/4	2.5	723.44
N	1	1 1/4	2.5	1067.96
Resistencia promedio en (psi)				859.5

Tabla 13. Resultados de resistencia a la compresión mezcla tipo S.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Resistencia a la compresión en (psi)
	Cemento	Cal	Arena	
O	1	2 1/2	2.5	425.46
O	1	2 1/2	2.5	307.89
O	1	2 1/2	2.5	390.25
Resistencia promedio en (psi)				374.53

Tabla 14. Datos teóricos de resistencia a compresión de morteros según ASTM C-270

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Resistencia a la compresión en (psi)
	Cemento	Cal	Arena	
M	1	¼	2.5	2,500.00
S	1	½	2.5	1,800.00
N	1	1 ¼	2.5	750.00
O	1	2 ½	2.5	350.00

(ASTM C-270)

2. **Ensayo de retención del agua del mortero.** Aquí se presenta las tablas de datos, análisis y resultados individualmente para las prueba de contenido de agua de los distintos tipos de mortero presentados por la norma ASTM C270 (ASTM_C780).

Tabla 15. Resultado de muestras de mortero para retención de agua (peso inicial).

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Peso de muestra inicial
	Cemento	Cal	Arena	
M	1	1/4	2.5	259
M	1	1/4	2.5	261
M	1	1/4	2.5	259

Continuación Tabla 15.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Peso de muestra inicial
	Cemento	Cal	Arena	
S	1	1/2	2.5	274
S	1	1/2	2.5	277
S	1	1/2	2.5	276
N	1	1 1/4	2.5	270
N	1	1 1/4	2.5	268
N	1	1 1/4	2.5	268
O	1	2 1/2	2.5	275
O	1	2 1/2	2.5	277
O	1	2 1/2	2.5	277

Tabla 16. Resultados de muestras de mortero para retención de agua (peso final).

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Peso de muestra final
	Cemento	Cal	Arena	
M	1	1/4	2.5	246.00
M	1	1/4	2.5	249.00
M	1	1/4	2.5	247.00
S	1	1/2	2.5	262.00
S	1	1/2	2.5	264.00
S	1	1/2	2.5	264.00
N	1	1 1/4	2.5	251.00
N	1	1 1/4	2.5	250.00
N	1	1 1/4	2.5	250.00
O	1	2 1/2	2.5	261.00
O	1	2 1/2	2.5	266.00
O	1	2 1/2	2.5	266.00

Tabla 17. Resultados de retención de agua mortero tipo M.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Contenido de agua %
	Cemento	Cal	Arena	
M	1	$\frac{1}{4}$	2.5	94.00%
M	1	$\frac{1}{4}$	2.5	96.00%
M	1	$\frac{1}{4}$	2.5	94.00%
Contenido de agua promedio %				94.67%

Tabla 18. Resultados de retención de agua mortero tipo S.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Contenido de agua %
	Cemento	Cal	Arena	
S	1	$\frac{1}{2}$	2.5	97.00%
S	1	$\frac{1}{2}$	2.5	96.00%
S	1	$\frac{1}{2}$	2.5	97.00%
Contenido de agua promedio %				96.67%

Tabla 19. Resultados de retención de agua mortero tipo N.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Contenido de agua %
	Cemento	Cal	Arena	
N	1	$1 \frac{1}{4}$	2.5	94.00%
N	1	$1 \frac{1}{4}$	2.5	94.00%
N	1	$1 \frac{1}{4}$	2.5	90.00%
Contenido de agua promedio %				92.67%

Tabla 20. Resultados de retención de agua mortero tipo S.

Tipo de mezcla	Proporciones por volumen			Contenido de agua %
	Cemento	Cal	Arena	
O	1	$2 \frac{1}{2}$	2.5	95.00%
O	1	$2 \frac{1}{2}$	2.5	96.00%
O	1	$2 \frac{1}{2}$	2.5	96.00%
Contenido de agua promedio %				95.67%

3. Ensayo de adherencia del mortero. De acuerdo a las especificaciones C 952, "TEST METHOD FOR BOND STRENGTH OF MORTAR TO MANSORY UNITS", del ASTM (ASTM_C952).

Tabla 21. Resultado de esfuerzo de adherencia entre la mampostería y el mortero.

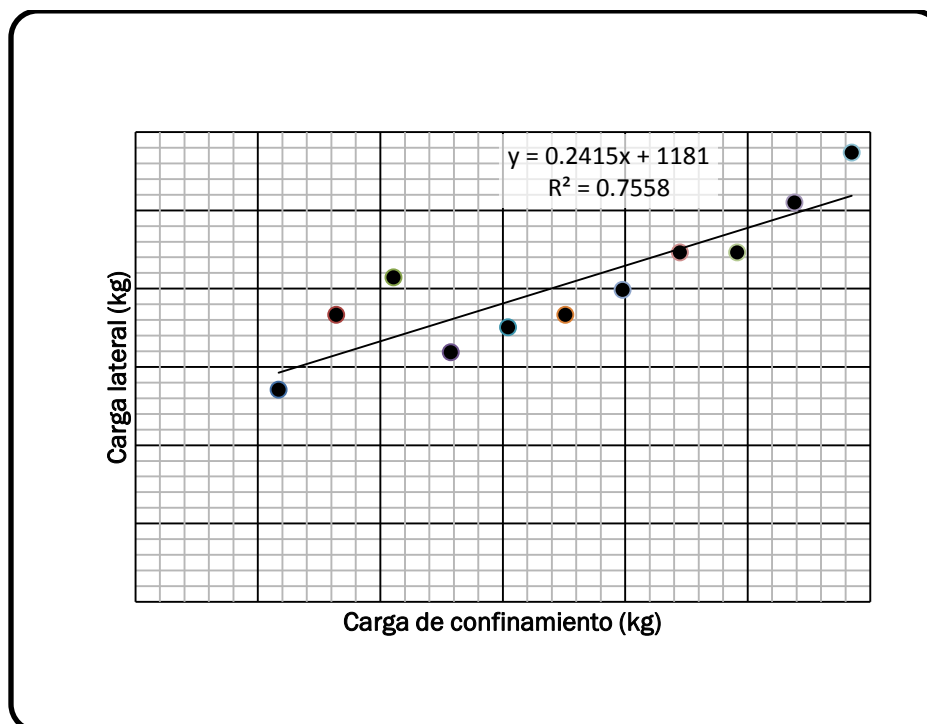
Carga horizontal (Kg)	Espaciamiento (cm)	Esfuerzo de adherencia (kg / cm ²)
85.00	5.00	15.94

4. Ensayo de fricción del mortero con la mampostería. Aquí se presenta las tablas de datos, análisis y resultados individualmente para las prueba de resistencia de la adherencia entre el mortero y la mampostería, según la especificación de la ASTM C 952, y con esta base se generan la tabla de los resultados de ambas cargas ejercidas para así obtener el coeficiente de fricción de este sistema.

Tabla 22. Resultados de coeficiente de fricción.

	Carga lateral (kg)	Carga de confinamiento (kg)
1	1354.9	1170.14
2	1833.1	1638.20
3	2072.2	2106.26
4	1594	2574.32
5	1753.4	3042.37
6	1833.1	3510.43
7	1992.5	3978.49
8	2231.6	4446.55
9	2231.6	4914.60
10	2550.4	5382.66
11	2869.2	5850.72
Coeficiente de fricción		0.24

Ilustración 62. Carga de confinamiento vs carga lateral.



B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.

1. **Ensayo de compresión unidad de ladrillo.** Aquí se presenta las tablas de datos, análisis y resultados individualmente para las prueba de compresión realizada al ladrillo llamado “Superblock liviano”, para luego obtener la resistencia a la compresión de dicho espécimen.

Para las pruebas compresión simple mencionadas se utilizó bloques individuales de mampostería de arcilla recocida (ladrillo) con las siguientes características: las medidas teóricas del ladrillo son 19 x 14 x 39 centímetros, su peso teórico es de 16.5 lbs. y su resistencia teórica es de 70 kg/cm². Se realizaron diferentes cinco pruebas por cada forma de posicionarse, de Soga, vertical y horizontal, como es recomendado en las normas Internacionales del ASTM, en la sección C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” referida por la sección C 652 – 04 “Standard Specification for Hollow Brick (Hollow Masonry Units Made From Clay or Shale)” en el apartado 11

respecto a los ensayos de pruebas para el ladrillo. El fin de la prueba es determinar el esfuerzo último de compresión del tipo de ladrillo a utilizar.

Tabla 23. Esfuerzo de compresión de ladrillo colocado de zoga.

Colocación: Soga	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Ag inferior (cm ²)	556.95	551.31	549.9	548.49	544.6
Ag superior (cm ²)	564.85	552.72	540.71	544.6	548.49
A promedio (cm ²)	560.9	552.02	545.31	546.55	546.55
Fuerza última (kg)	18,181.82	29,545.45	34,090.91	30,909.09	33,181.82
Esfuerzo compresión (kg/cm ²)	32.42	53.52	62.52	56.55	60.71
Esfuerzo promedio				53.14	kg/cm²

Tabla 24. Esfuerzo a compresión de ladrillo colocado horizontalmente.

Colocación: Horizontal	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Ag inferior (cm ²)	780.08	757.64	729.3	788.04	715.95
Ag superior (cm ²)	748.13	725.4	750.5	731.32	733.2
A promedio (cm ²)	764.1	741.52	739.9	759.68	724.58
Fuerza última (kg)	18,181.82	12,500.00	19,318.18	18,181.82	19,318.18
Esfuerzo compresión (kg/cm ²)	23.79	16.86	26.11	23.93	26.66
Esfuerzo promedio				23.47	kg/cm²

Tabla 25. Esfuerzo a compresión de ladrillo colocado verticalmente.

<i>Colocación: vertical</i>	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Ag inferior (cm²)	263.2	256.2	265.08	261.8	269.8
Ag superior (cm²)	260.4	265.08	268.38	266.96	277.77
A promedio (cm²)	261.8	260.64	266.73	264.38	273.79
Fuerza última (kg)	4,727.27	3,363.64	4,318.18	3,454.55	4,545.45
Esfuerzo compresión (kg/cm²)	18.06	12.91	16.19	13.07	16.6
Esfuerzo promedio				15.36	kg/cm²

2. Ensayo de porcentaje de absorción de la unidad de ladrillo. Aquí se presenta las tablas de datos, análisis y resultados individualmente para las prueba de porcentaje de absorción realizada al ladrillo llamado “Superblock liviano”.

Para las pruebas absorción se utilizó bloques individuales de mampostería de arcilla recocida (ladrillo) con las siguientes características: las medidas teóricas del ladrillo son 19 x 14 x 39 centímetros, su peso teórico es de 16.5 lbs. Se realizó el ensayo a cinco unidades de mampostería de ladrillo, como es recomendado en las normas Internacionales del ASTM, en la sección C 67 – 03a “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile” referida por la sección C 652 – 04 “Standard Specification for Hollow Brick (Hollow Masonry Units Made From Clay or Shale)” en el apartado 11 respecto a los ensayos de pruebas para el ladrillo. El fin de la prueba es determinar el porcentaje de absorción del tipo de ladrillo a utilizar.

Tabla 26. Porcentaje de absorción en unidad de ladrillo.

Tiempo/ lugar	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
0 horas / hornos	8.32	8.27	8.44	8.29	8.28
24 horas / horno	8.08	8.03	8.22	8.04	8.06
25 horas / horno	8.08	8.31	8.22	8.43	8.06
26 horas / horno	8.08	8.31	8.22	8.43	8.06
0 horas / agua	8.17	8.12	8.3	8.13	8.15
24 horas / agua	9.56	9.52	9.68	9.52	9.53
% Absorción	16.93	17.23	16.68	17.11	17.01
Promedio % absorción				16.99%	

3. **Ensayo de medición del ladrillo.** Aquí se presenta las tablas de datos, análisis y resultados individualmente para las prueba de Módulo de Ruptura (esfuerzo de flexión) realizada al ladrillo llamado “Superblock liviano”.

Tabla 27. Determinación de ancho de unidad de ladrillo.

Ancho		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado 1	A ₁	14.00	14.00	14.10	14.10	14.00	14.20	14.00	14.10	13.90	14.00
	A _c	13.90	14.00	14.10	14.10	14.10	14.10	14.10	14.00	14.00	14.00
	A ₂	14.00	13.90	14.20	14.10	14.10	14.00	14.10	14.00	14.10	14.00
Lado 2	A ₁	14.00	14.00	14.10	14.00	14.00	13.90	13.90	13.80	14.00	13.90
	A _c	14.10	14.00	14.00	14.00	14.10	13.90	14.00	13.70	14.10	13.70
	A ₂	14.10	14.00	14.10	14.00	14.10	14.00	14.00	13.80	14.10	13.70
Promedios		14.02	13.98	14.10	14.05	14.07	14.02	14.02	13.90	14.03	13.88

Tabla 28. Determinación de largo de unidad de ladrillo.

Largo		1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
Lado 1	L ₁	39.50	39.50	39.20	39.50	39.50	39.50	39.50	39.00	39.40	39.00
	L _c	39.40	39.50	39.30	39.50	39.40	39.50	39.20	39.20	39.20	38.90
	L ₂	39.30	39.50	39.40	39.70	39.10	39.30	39.30	39.40	39.00	39.00
Lado 2	L ₁	39.00	39.00	39.00	39.50	39.00	39.30	39.30	39.60	39.20	38.90
	L _c	39.20	39.00	39.00	39.50	39.10	39.40	39.40	39.50	39.50	39.00
	L ₂	39.40	39.00	39.00	39.20	39.30	39.40	39.40	39.30	39.50	38.90
Promedios		39.30	39.25	39.15	39.48	39.23	39.40	39.35	39.33	39.30	38.95

Tabla 29. Determinación de alto de la unidad de ladrillo.

Altura		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado 1	H ₁	18.60	18.60	18.80	18.80	18.90	19.00	18.90	18.90	19.10	18.80
	H _e	18.60	18.60	18.70	18.80	18.80	18.90	18.90	18.70	19.00	18.60
	H ₂	18.60	18.60	18.80	18.70	19.00	18.80	18.90	18.50	18.90	18.50
Lado 2	H ₁	18.70	18.90	19.00	18.70	18.80	18.80	18.80	19.10	18.70	18.60
	H _e	19.00	19.00	18.90	18.90	18.90	18.70	18.80	19.00	18.90	18.80
	H ₂	19.00	18.90	18.90	19.00	18.80	18.70	18.70	18.90	18.70	18.90
Promedios		18.75	18.77	18.85	18.82	18.87	18.82	18.83	18.85	18.88	18.70

4. **Ensayo de resistencia a la compresión de mampostería en prismas.** Aquí se presenta las tablas de datos, análisis y resultados individualmente para las prueba de compresión de prismas de mampostería de ladrillo realizada.

Tabla 30. Datos generales prismas de mampostería de ladrillo.

Prisma	Tipo de mampostería	Dimensiones del Prisma (Ancho x largo x alto)	Tipo de mortero	Área bruta (A _b) [cm ²]	Área de vacíos (A _v) [cm ²]	Área neta (A _n) [cm ²]
1	Bloque de barro cocido	14 x 39.2 x 58 cm.	M	548.8	295	253.8
2	Bloque de barro cocido	14 x 39 x 59 cm.	M	546	295	251
3	Bloque de barro cocido	14 x 39.2 x 58 cm.	M	548.8	295	253.8
Promedio	Bloque de barro cocido	14 x 39 x 58 cm	M	547.87	295	252.87

Tabla 31. Medición de aplicación de carga prisma 1.

Prisma 1	Carga		Grietas	Observaciones	
	Mediciones	P (lb.)			P (kg.)
1		19,000.00	8,618.26	1ra grieta	Grieta en cara lateral a un costado
2		29,000.00	13,154.18	2da. Grieta	En ambas caras laterales.
3		42,000.00	19,050.88		Grieta vertical en el centro. Colapso.

Tabla 32. Medición de aplicación de la carga prisma 2.

Prisma 2	Carga		Grietas	Observaciones
	Mediciones	P (lb.)		
1	15,500.00	7,030.68	1ra. Grieta	En cara lateral a un costado bloques superior e inferior
2	29,000.00	13,154.18	2da. Grieta	En 1ra. Unidad en el centro
3	33,000.00	14,968.56		Colapso

Tabla 33. Medición de aplicación de carga prisma 3.

Prisma 3	Carga		Grietas	Observaciones
	Mediciones	P (lb.)		
1	7,000.00	3,175.15	1ra. Grieta	Cara lateral parte inferior
2	11,500.00	5,216.31	2da. Grieta	
3	37,000.00	16,782.92		Colapso

Tabla 34. Cálculos de resistencia a compresión prismas.

	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Promedios
Relación hp/tp	4.14	4.21	4.14	4.16
Factor de corrección	1.16	1.17	1.16	1.16
Carga última resistida [kg]	19,050.88	14,968.55	16,782.92	16,934.12
Resistencia [kg]	22,099.02	17,438.36	19,468.19	19,668.52
Área neta [cm ²]	253.8	251	253.8	252.87
F'm [kg/cm ²]	87.07	69.48	76.71	77.75

Tabla 35. Resumen de datos obtenidos.

Espécimen	F'm [kg/cm ²]	Modo de falla
Prisma 1	87.07	Grieta en cara lateral a un costado
Prisma 2	69.48	En cara lateral a un costado bloques superior e inferior
Prisma 3	76.71	Cara lateral parte inferior
Datos finales	77.75	Fallo por grietas en cara lateral que llevan a separación de cara Lateral.

5. Ensayo a compresión diagonal. Aquí se presenta las tablas de datos, análisis y resultados individualmente para las prueba de compresión diagonal de prismas de mampostería de ladrillo realizada.

Tabla 36. Resultados a compresión diagonal de prismas tipo S.

Nombre	Descripción de la falla	Esfuerzo medido por la presa hidráulica (kg/cm ²)	V _m (kg/cm ²)	V´ _m (kg/cm ²)	Resistencia de diseño a compresión diagonal según el NTC - Mampostería, Mexicano V*m (kg/cm ²)	Observaciones
S1	Falla por adherencia	56.24	0.68	0.46	2.00	Deslizamiento completo de un bloque sobre otro.
S2	Falla combinada	52.72	0.64	0.43		La primera falla se dio en la mampostería en forma de pequeña diagonal, posteriormente se dio la falla por adherencia.
S3	Falla por adherencia	80.84	0.98	0.66		Deslizamiento de un bloque sobre otro; ruptura parcial de una esquina de mampostería.
S4	Falla combinada	147.62	1.80	1.20		Se visualizaron grietas en la mampostería y posteriormente fallo explosivamente.

Tabla 37. Valores de promedio y desviación estándar para prismas tipo S.

Promedio	0.68
Desviación estándar	0.36

Ilustración 63. Valores de resistencia a compresión diagonal muretes tipo S.

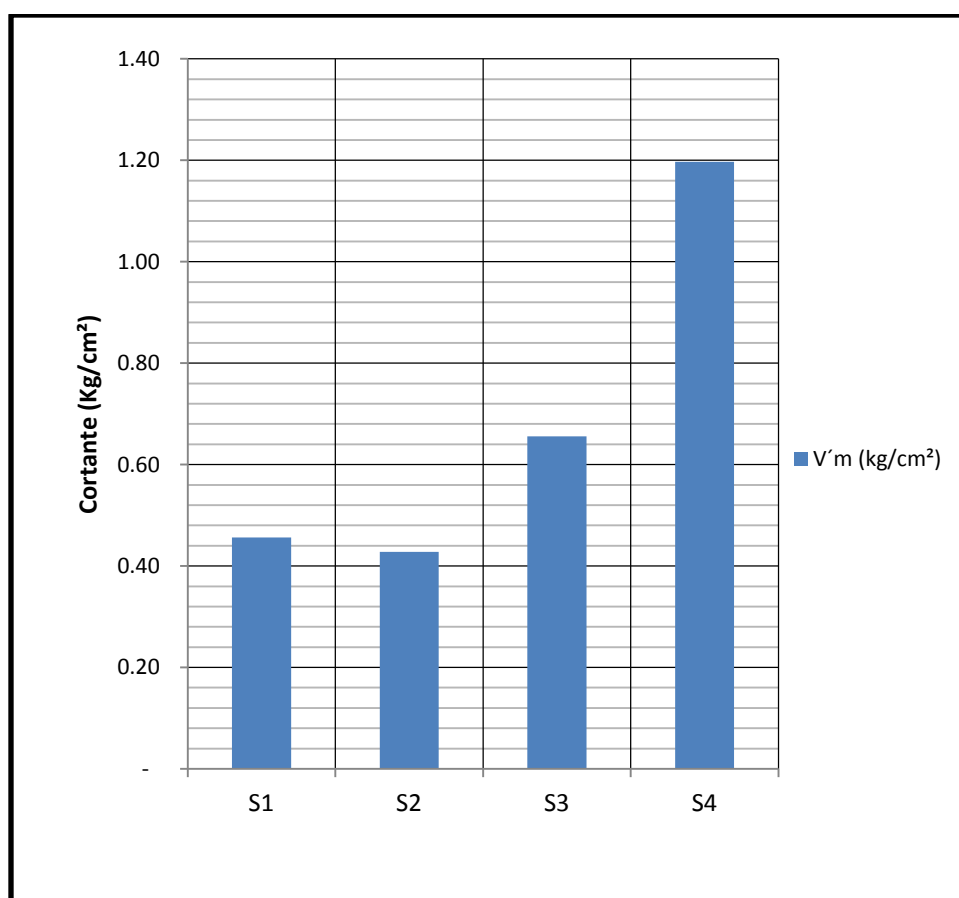


Tabla 38. Resultados a compresión diagonal prismas tipo M.

Nombre	Descripción de la falla	Esfuerzo medido por la presa hidráulica (kg/cm ²)	V _m (kg/cm ²)	V´ _m (kg/cm ²)	Resistencia de diseño a compresión diagonal según el NTC - Mampostería, Mexicano V*m (kg/cm ²)	Observaciones
M1	Falla por adherencia	158.16	1.92	1.28	3.00	Inicialmente se observó el desprendimiento del mortero con la pieza, posteriormente fallo de forma explosiva.
M2	Falla diagonal	91.38	1.11	0.74		Se observaron grietas diagonales a lo largo de toda la mampostería principalmente al centro de la misma. Posteriormente fallo por completo.
M3	Falla combinada	94.90	1.15	0.77		Se deslizó la porción superior de la mampostería debido a la adherencia, y se observaron agrietamientos en la porción central provocando el desprendimiento de parte de la mampostería.
M4	Falla por adherencia	80.84	0.98	0.66		Se observó el deslizamiento de un bloque de mampostería sobre otro a consecuencia de la adhesión mortero - pieza.

Tabla 39. Valores de promedio y desviación estándar para prismas tipo M.

Promedio	0.86
Desviación estándar	0.28

Ilustración 64. Valores de resistencia a compresión diagonal muretes tipo M.

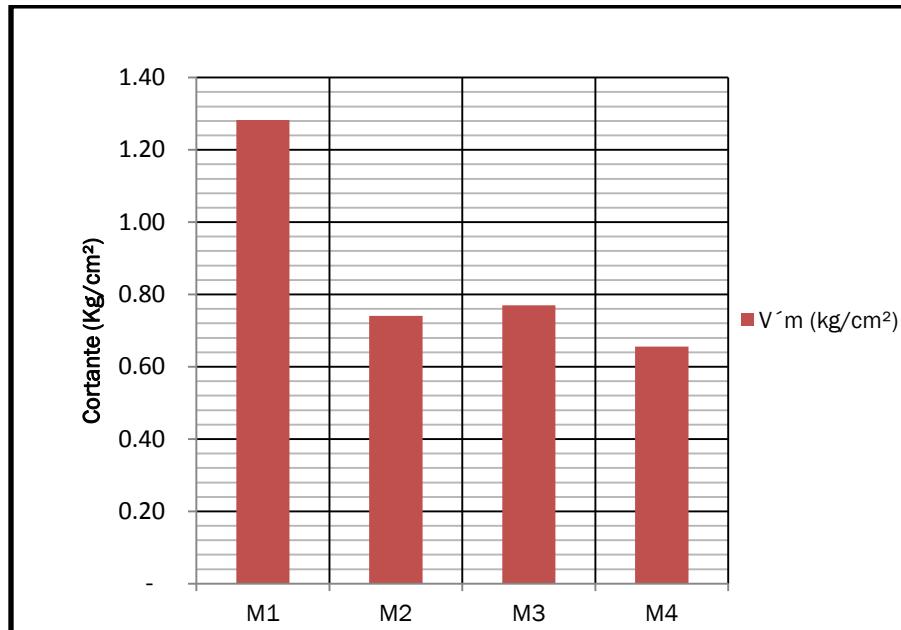


Ilustración 65. Resultados promedio de ensayos a compresión diagonal prismas M y S.

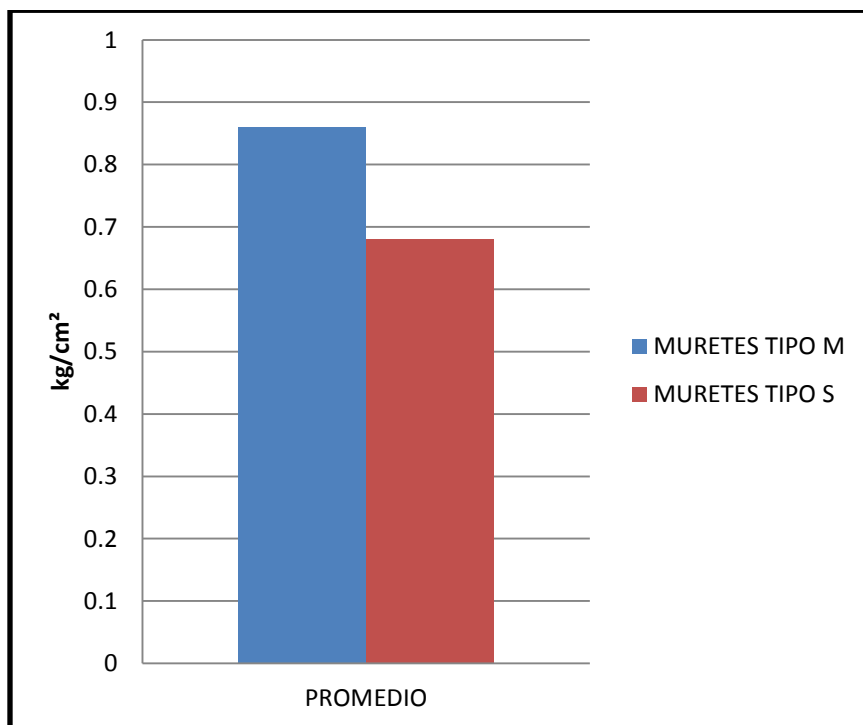


Tabla 40. Prueba t de Student para muestras aparejadas.

	Tipo S	Tipo M
Media	0.68412488	0.8622824
Varianza	0.12729897	0.0809161
Observaciones	4	4
Coefficiente de correlación de Pearson	-0.55241754	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-0.62954121	
P(T<=t) una cola	0.28683655	
Valor crítico de t (una cola)	2.35336343	
P(T<=t) dos colas	0.5736731	
Valor crítico de t (dos colas)	3.1824463	

C. Ensayos de muros confinados con solera intermedia según norma FHA y AGIES.

1. **Muro 1.** El ensayo entonces fue realizado a 14 días a partir de que se fundió la solera de remate. Las dimensiones de muro medidas el día del ensayo:

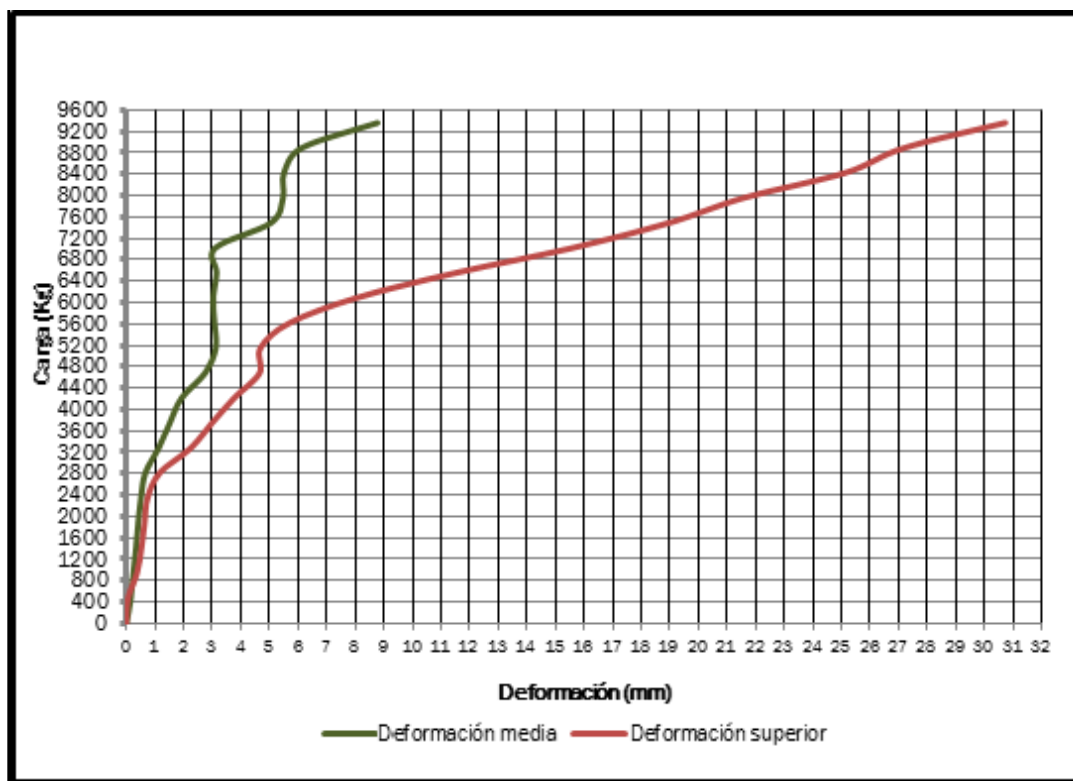
- 2.42m de longitud y 2.195m de altura,
- construido con mampostería de barro cocido con dimensiones de 0.14*0.20*0.39m,
- f'm de 77.75kg/cm²;
- confinado por medio de una solera inferior (cimiento) con sección de 0.147*0.30m, una solera superior de corona con sección de 0.14*0.20m y columnas en ambos extremos con sección 0.14*0.20m.

El refuerzo horizontal fue constituido por una solera intermedia con sección de 0.14*0.20m, con 4 No. 3 y estribos No. 2 a cada 0.20m.

Tabla 41. Deformaciones en muro 1.

Carga (Kg)	Deformación media (mm)	Deformación superior (mm)
0.00	0.00	0.00
468.1	0.15	0.05
936.21	0.24	0.36
1404.31	0.33	0.52
1872.41	0.41	0.63
2340.52	0.5	0.74
2808.62	0.66	1.16
3276.73	1.12	2.24
3744.83	1.51	2.99
4212.93	1.92	3.76
4681.04	2.75	4.65
5149.14	3.12	4.68
5617.24	3.08	5.7
6085.35	3.03	8.03
6553.45	3.15	11.5
7021.56	3.1	15.6
7489.66	5.05	18.97
7957.76	5.47	21.58
8425.87	5.51	25.13
8893.97	6.14	27.21

Ilustración 66. Carga vs. Deformación muro 1.



2. **Muro 2.** El ensayo entonces fue realizado a 28 días a partir de que se fundió la solera de remate. Las dimensiones de muro medidas el día del ensayo:

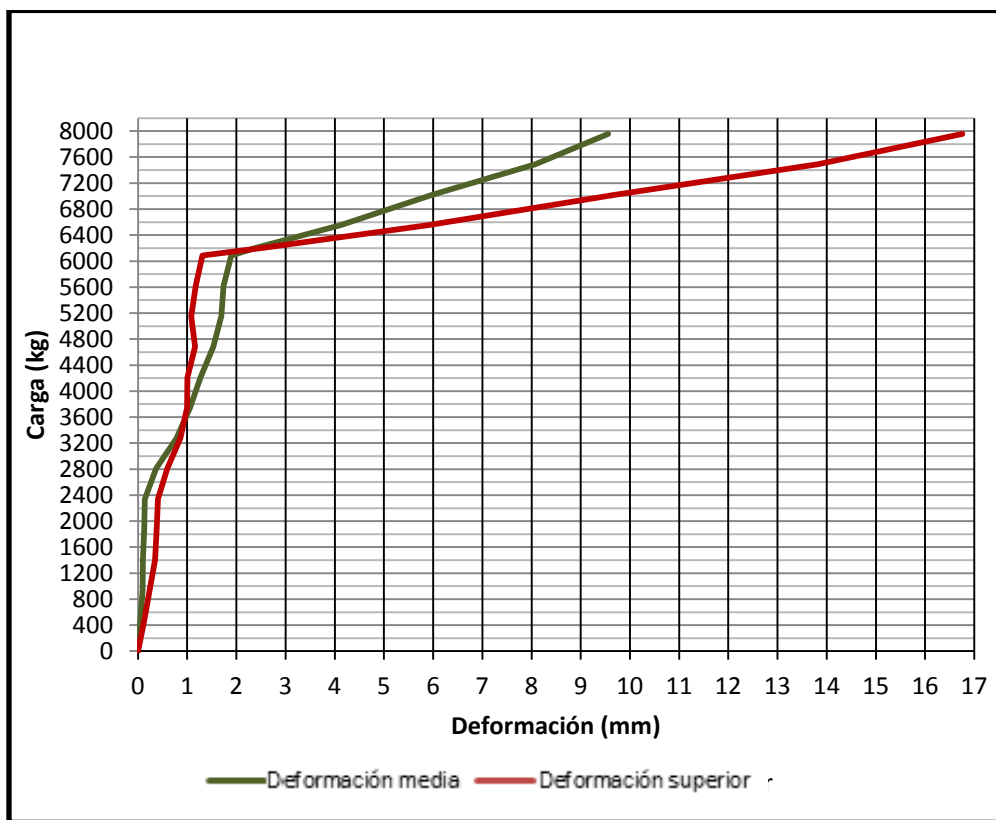
- 2.41m de longitud y 2.21m de altura,
- construido con mampostería de barro cocido con dimensiones de 0.14*0.20*0.39m,
- $f'm$ de 77.75kg/cm²;
- confinado por medio de una solera inferior (cimiento) con sección de 0.15*0.30m, una solera superior de corona con sección de 0.14*0.20m y columnas en ambos extremos con sección 0.14*0.20m.

El refuerzo horizontal fue constituido por una solera intermedia con sección de 0.14*0.20m, con 4 No. 3 y estribos No. 2 a cada 0.20m.

Tabla 42. Deformaciones en muro 2.

Carga (Kg)	Deformación media (mm)	Deformación superior (mm)
0.00	0.00	0.00
468.1	0.046	0.13
936.21	0.091	0.24
1404.31	0.102	0.349
1872.41	0.127	0.378
2340.52	0.142	0.406
2808.62	0.366	0.594
3276.73	0.782	0.86
3744.83	1.057	0.996
4212.93	1.27	1.002
4681.04	1.534	1.158
5149.14	1.692	1.084
5617.24	1.737	1.171
6085.35	1.895	1.308
6202.37	2.398	2.547
6553.45	4.12	5.902
7021.56	5.989	9.707
7489.66	8.077	13.811
7957.76	9.555	16.757

Ilustración 67. Carga vs. Deformación muro 2.



3. Muro 3. El ensayo entonces fue realizado a 17 días a partir de que se fundió la solera de remate. Las dimensiones de muro medidas el día del ensayo:

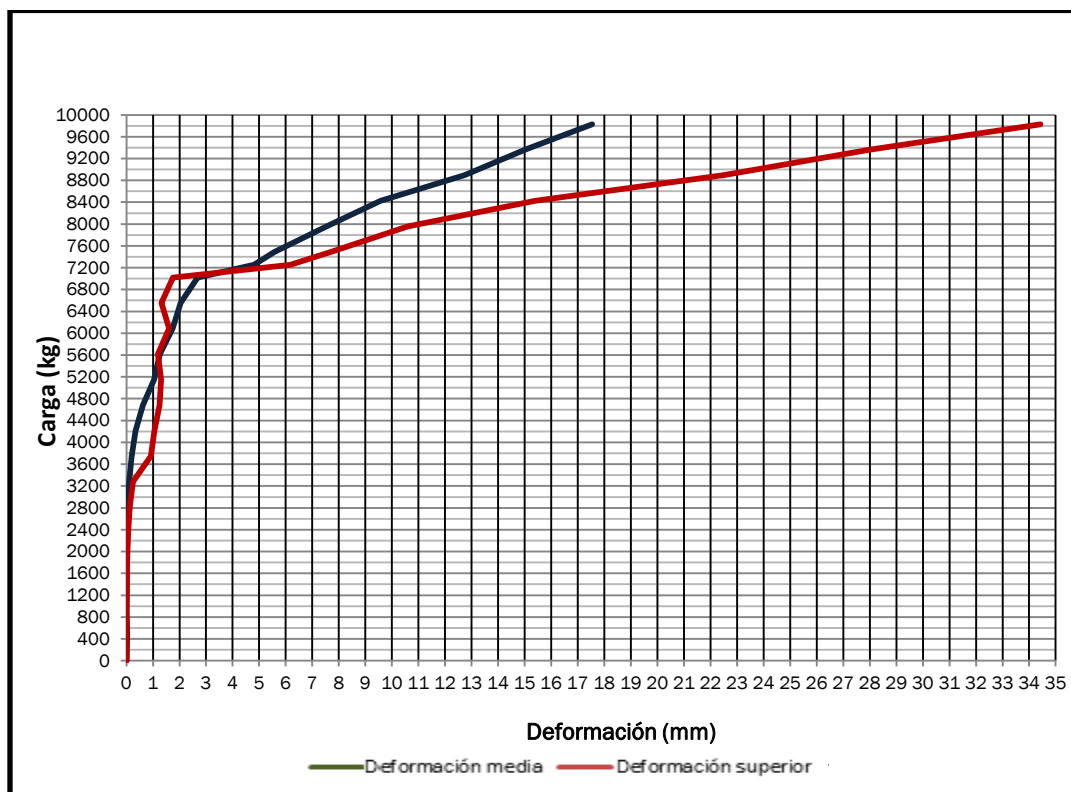
- 2.40m de longitud y 2.21m de altura,
- construido con mampostería de barro cocido con dimensiones de 0.14*0.20*0.39m,
- f'm de 77.75kg/cm²;
- confinado por medio de una solera inferior (cimiento) con sección de 0.15*0.30m, una solera superior de corona con sección de 0.14*0.20m y columnas en ambos extremos con sección 0.14*0.20m.

El refuerzo horizontal fue constituido por una solera intermedia con sección de 0.14*0.20m, con 4 No. 3 y estribos No. 2 a cada 0.20m.

Tabla 43. Deformación en muro 3.

Carga (Kg)	Def. media (mm)	Def. superior (mm)
0	0	0
468.1	0	0
936.21	0.01	0.01
1404.31	0.02	0.02
1872.41	0	0.03
2340.52	0.02	0.06
2808.62	0.05	0.12
3276.73	0.11	0.25
3744.83	0.2	0.92
4212.93	0.35	1.05
4681.04	0.62	1.25
5149.14	1.05	1.31
5617.24	1.25	1.19
6085.35	1.74	1.61
6553.45	2.04	1.32
7021.56	2.68	1.75
7255.61	4.81	6.17
7489.66	5.57	7.69
7957.76	7.54	10.6
8425.87	9.58	15.4
8893.97	12.74	22.48
9362.07	15.03	28.01
9830.18	17.55	34.43

Ilustración 68. Carga vs. Deformación muro 3.



4. Muro 4. El ensayo entonces fue realizado a 27 días a partir de que se fundió la solera de remate. Las dimensiones de muro medidas el día del ensayo:

- 2.40m de longitud y 2.19m de altura,
- construido con mampostería de barro cocido con dimensiones de 0.14*0.20*0.39m,
- f'm de 77.75kg/cm²;
- confinado por medio de una solera inferior (cimiento) con sección de 0.15*0.30m, una solera superior de corona con sección de 0.14*0.20m y columnas en ambos extremos con sección 0.14*0.20m.

Este muro no cuenta con el refuerzo horizontal.

Tabla 44. Deformación en muro 4.

Carga (Kg)	Def. media (mm)	Def. superior (mm)
0	0	0
468.1	0.08	0.17
936.21	0.09	0.23
1404.31	0.18	0.18
1872.41	0.24	0.28
2340.52	0.9	0.69
2808.62	1.24	1.03
3276.73	1.64	1.41
3744.83	1.95	1.65
4212.93	2.24	1.94
4446.99	2.4	2.13
4681.04	2.51	2.12
5149.14	2.66	2.32
5617.24	2.93	2.47
6085.35	3.14	2.62
6553.45	3.46	2.76
6787.5	5.55	4.61

Ilustración 69. Carga vs. Deformación muro 4.

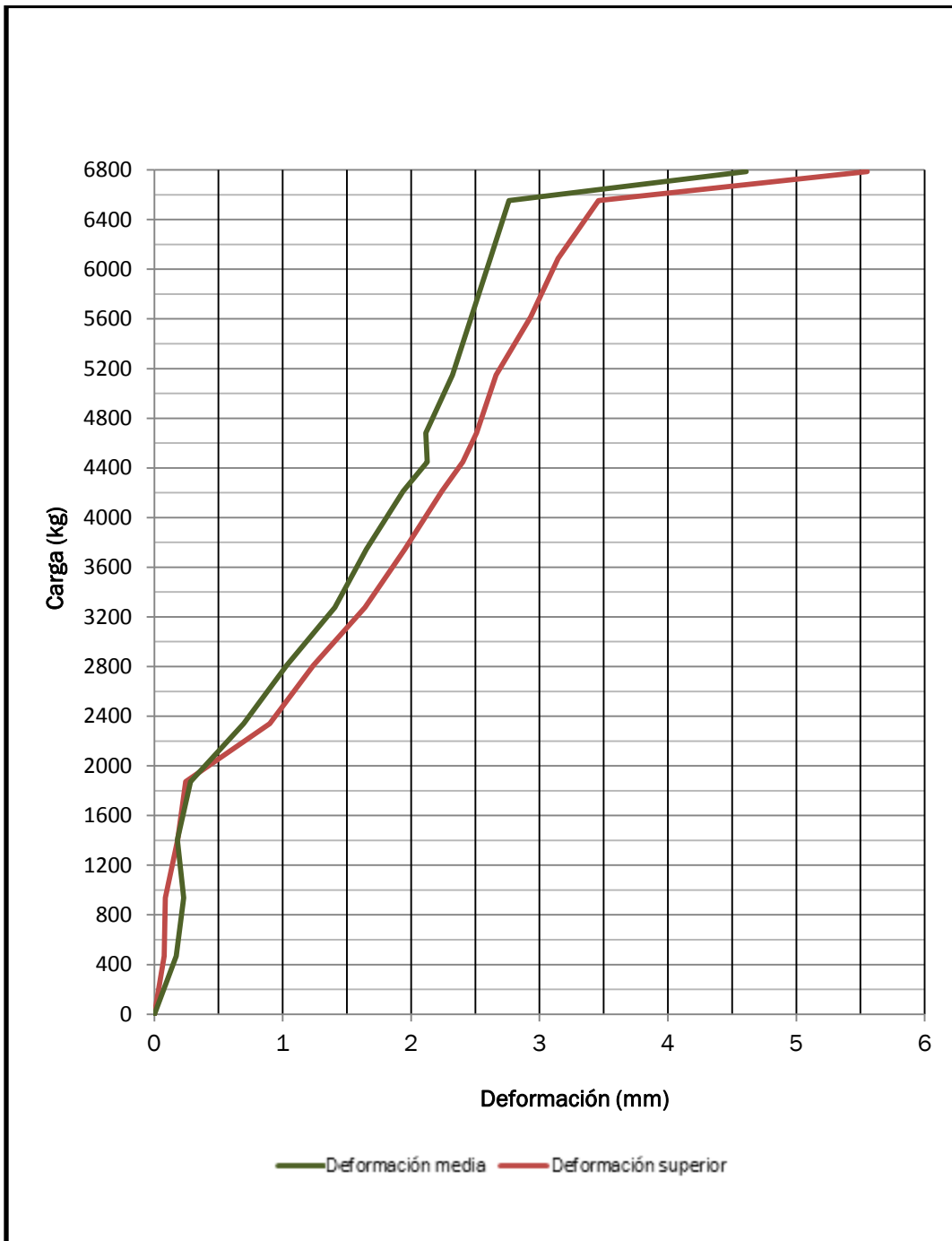
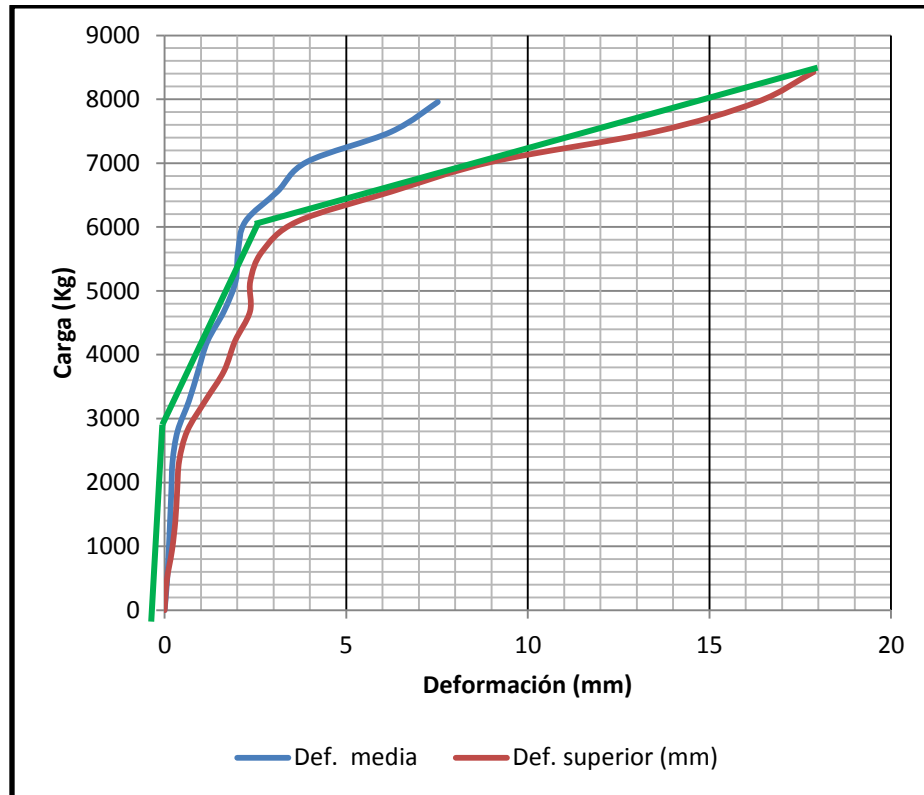


Ilustración 70. Carga vs. Deformación promedio.



D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).

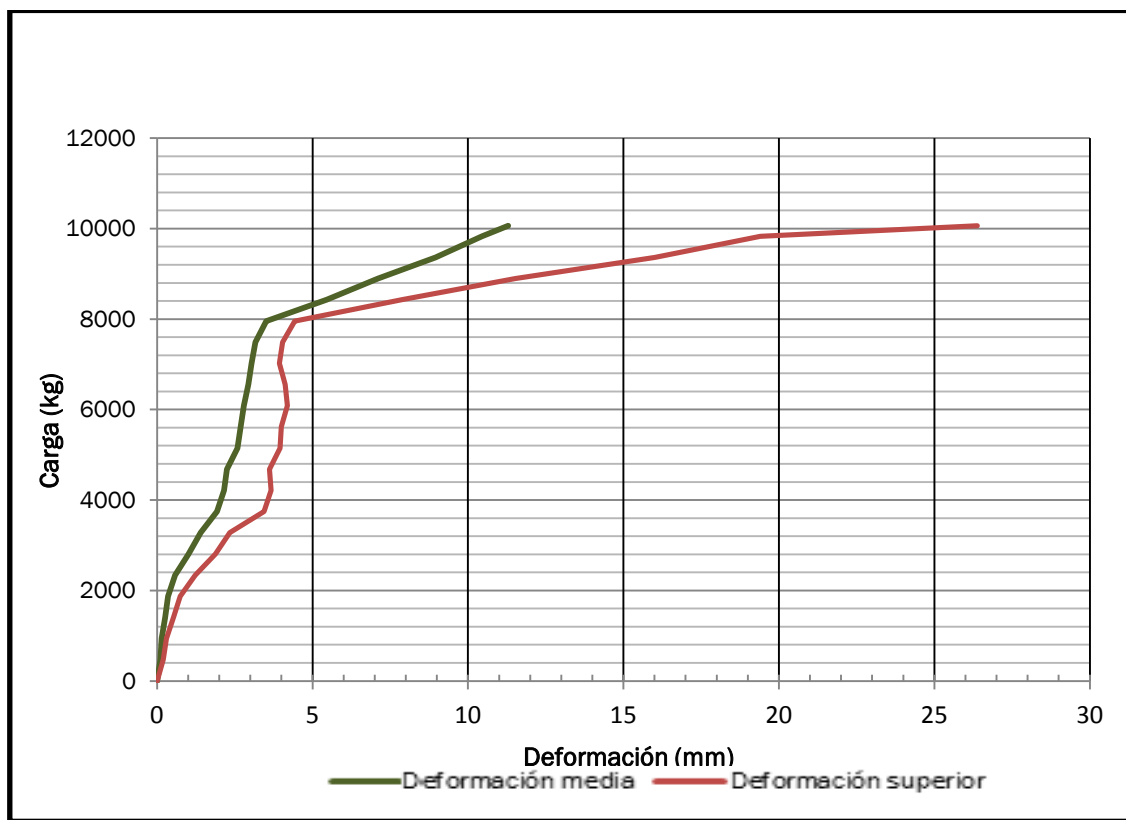
1. Muro 5. Ensayado a 14 días. Dimensiones de muro: 2.40m de longitud y 2.11m de altura, construido con mampostes de barro cocido con dimensiones de 0.14*0.20*0.39m, con un f'_m de 77.75kg/cm²; confinado por medio de una solera inferior con sección de 0.15*0.30m, una solera superior con sección de 0.14*0.20m y columnas en ambos extremos con sección 0.14*0.20m.

Refuerzo horizontal: Lo constituyen 6 varillas de alta resistencia, distribuidas en pares, colocadas entre hiladas de mamposte.

Tabla 45. Deformación en muro 5.

Carga (Kg)	Def. media (mm)	Def. superior (mm)
0	0	0
468.1	0.11	0.2
936.21	0.15	0.3
1404.31	0.26	0.53
1872.41	0.35	0.75
2340.52	0.58	1.23
2808.62	1.01	1.87
3276.73	1.4	2.34
3744.83	1.93	3.44
4212.93	2.16	3.67
4681.04	2.25	3.61
5149.14	2.58	3.96
5617.24	2.68	3.99
6085.35	2.79	4.19
6553.45	2.93	4.12
7021.56	3.04	3.94
7489.66	3.16	4.03
7957.76	3.51	4.43
8425.87	5.45	7.88
8893.97	7.1	11.52
9362.07	8.96	16.01
9830.18	10.45	19.4
10064.23	11.29	26.38

Ilustración 71. Carga vs. Deformación muro 5.



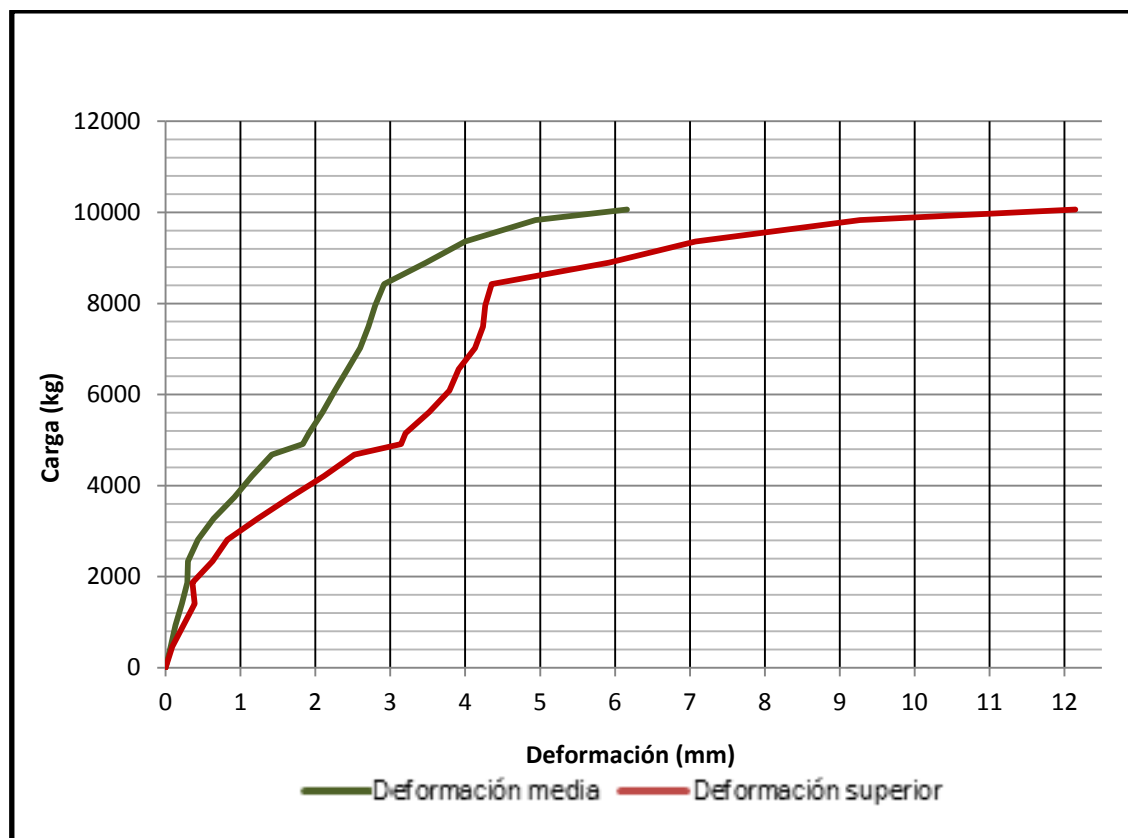
2. Muro 6. Ensayado a 27 días. Dimensiones de muro: 2.405m de longitud y 2.19m de altura, construido con mampostes de barro cocido con dimensiones de 0.14*0.20*0.39m, con un f'_m de 77.75kg/cm²; confinado por medio de una solera inferior con sección de 0.15*0.30m, una solera superior con sección de 0.14*0.20m y columnas en ambos extremos con sección 0.14*0.20m.

Refuerzo horizontal: Lo constituyen 6 varillas de alta resistencia, distribuidas en pares, colocadas entre hiladas de mamposte.

Tabla 46. Deformación en muro 6.

Carga (Kg)	Def. Media (mm)	Def. superior (mm)
0	0	0
468.1	0.07	0.09
936.21	0.13	0.24
1404.31	0.22	0.39
1872.41	0.29	0.36
2340.52	0.3	0.63
2808.62	0.43	0.82
3276.73	0.64	1.23
3744.83	0.92	1.67
4212.93	1.15	2.11
4681.04	1.42	2.52
4915.09	1.83	3.15
5149.14	1.92	3.2
5617.24	2.1	3.52
6085.35	2.26	3.79
6553.45	2.43	3.91
7021.56	2.6	4.13
7489.66	2.71	4.24
7957.76	2.8	4.27
8425.87	2.92	4.35
8893.97	3.47	5.92
9362.07	4	7.08
9830.18	4.94	9.27
10064.23	6.16	12.15

Ilustración 72. Carga vs. Deformación muro 6.



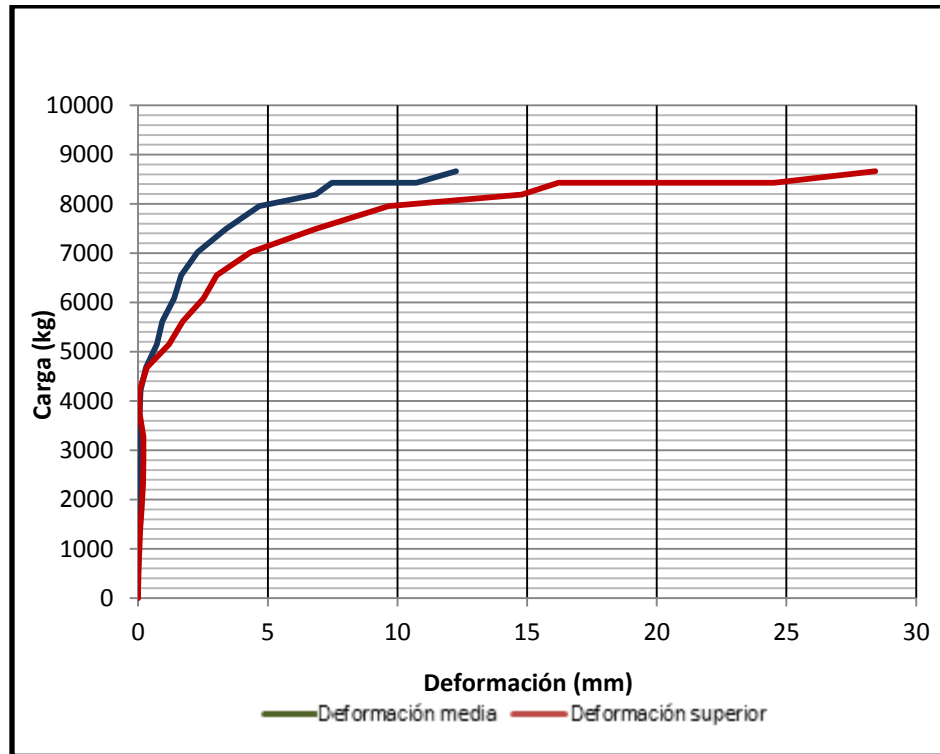
3. **Muro 7.** Ensayado a 16 días. Dimensiones de muro: 2.40m de longitud y 2.21m de altura, construido con mampostes de barro cocido con dimensiones de 0.14*0.20*0.39m, con un $f'm$ de 77.75kg/cm²; confinado por medio de una solera inferior con sección de 0.15*0.30m, una solera superior con sección de 0.14*0.20m y columnas en ambos extremos con sección 0.14*0.20m.

Refuerzo horizontal: Lo constituyen 6 varillas de alta resistencia, distribuidas en pares, colocadas entre hiladas de mamposte.

Tabla 47. Deformación en muro 7.

Carga	(Kg)	Def. media (mm)	Def. superior (mm)
0		0	0
468.1		0	0.01
936.21		0.01	0.04
1404.31		0.02	0.08
1872.41		0.05	0.14
2340.52		0.08	0.19
2808.62		0.07	0.2
3276.73		0.05	0.2
3744.83		0.05	0.06
4212.93		0.1	0.05
4681.04		0.3	0.34
5149.14		0.72	1.19
5617.24		0.93	1.73
6085.35		1.39	2.52
6553.45		1.66	3.02
7021.56		2.29	4.34
7489.66		3.38	6.82
7957.76		4.67	9.66
8191.82		6.84	14.79
8425.87		7.47	16.21
8425.87		10.15	23.04
8425.87		10.73	24.52
8659.92		12.26	28.42

Ilustración 73. Carga vs. Deformación muro 7.



VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Ensayos elaborados a los morteros.

1. **Ensayos a compresión para cubos de morteros.** Comparando los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio con los datos teóricos que brinda la norma ASTM C270 podemos determinar que los datos promedios están en un rango aceptable según la misma norma, las pruebas se realizaron a los 28 días esto permite que los resultados sean verídicos, y las diferencias que se dieron pueden derivarse a que las normas del ASTM están medidas con materiales de lugares de Estados Unidos lo cual permite que las diferencias no sean un problema en la toma de datos de este tipo de ensayos.

Por otra parte se observó que en el tipo S la diferencia si es considerable ya que pasa a la resistencia a la compresión del tipo M que según la ASTM C270 es la que más resistencia a la compresión debería de tener. Esto puede deberse a varios factores, el tipo de cal producido en Guatemala o a los materiales como conjunto total es lo que produzca esta diferencia. Siendo esta diferencia comprobada por los ensayos realizados, se determina que en la mampostería de ladrillo tiene una mayor absorción al agua por lo cual requiere de un mortero que para la adherencia correcta mantenga el agua necesaria para este proceso. Y de ser así este tipo de mortero S con las proporciones iguales de cemento y arena con la diferencia que la proporción es del doble de cal de la tipo M, se consideraría el indicado para este tipo de mampostería.

2. **Ensayo de retención de agua del mortero.** La norma ASTM C270 determina que el contenido de agua de las mezclas sin importar el tipo debe ser un mínimo de 75%, con los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio se determinó que esta condición la cumple ya que están en promedio en un 95% de contenido de agua. Estos resultados se deben a que los ensayos fueron realizados de la manera más ideal, esto no se da ya en el ámbito de la construcción dentro del campo ya que las condiciones no son tan ideales como las que presenta el laboratorio utilizado, en este caso el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala.

Por otra parte con este ensayo realizado se pudo obtener otro dato muy importante que considera la norma ASTM C270 como es el contenido máximo de aire el cual generaliza que para todo tipo de mortero debe de tener un máximo de 12%, y según los ensayos realizados no exceden de este porcentaje quedando en un promedio de 5% lo cual cumple con la especificación y es otro dato muy importante que refleja la realización correcta de las mezclas en el momento de realizarlas.

3. Ensayo de adherencia del mortero. Se determinan que la resistencia a la adherencia entre el mortero tipo M y la mampostería de ladrillo es de 15.95 Kg / cm². Para este dato no existen datos teóricos por lo que permite sea un dato verídico según la realización en base a la descripción del ensayo en la norma ASTM C 952 (ASTM_C952).

4. Ensayo de fricción del mortero con la mampostería. Se determinan que coeficiente de fricción para el sistema entre el mortero tipo M y la mampostería de ladrillo es de 0.241. Las pruebas se realizaron a los 28 días y se pudo observar algo muy curioso, en el sistema al momento en que fallaba todo, el mortero se separaba de la pieza de ladrillo y en ambas caras quedaba una parte lisa, lo que permitía que el sistema se moviera con mayor facilidad y la fricción en el sistema no fuera la ideal, ya que idealmente debiese estar entre 0.6 a 1.5.

B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.

1. Ensayo a compresión de unidad de ladrillo. Se determinan que la resistencia a la compresión colocado de soga es de: 53.14 kg/cm², colocado horizontalmente: 23.47 kg/cm² y colocado verticalmente: 15.36 kg/cm². Dado que el fin de la prueba era comparar los diferentes modos de colocación y su resistencia, se determina que la colocación con mayor resistencia es de: 53.14 kg/cm² al colocarlo de Soga. Además al compararlo con la resistencia teórica ofrecida de 70 kg/cm² colocado de la misma manera, se determina que existe una variación del 25% de la resistencia y estas variaciones depende de varios factores, como lo son el proceso de horneado,

secado y enfriado del ladrillo durante su fabricación. Como se indicó anteriormente, este proceso es determinante en el resultado final de las propiedades del material. Puede que las condiciones hayan variado en cuanto a temperatura y tiempo tanto de horneado como de secado.

Asimismo, dentro de la falla observada se determina que la esta cumple con la teoría de Poisson, respecto a los esfuerzos normales resultantes luego de la aplicación de una carga vertical. Y siendo esta una unidad de mampostería (Ladrillo hueco), éste colapsa con facilidad, puesto que fallan las uniones entre las paredes es decir la parte más débil de la unidad.

Otra posible variación es que la resistencia ofrecida se refiere a la unidad de mampostería cuando esta trabaja en un sistema, tal como el prisma o muro de mampostería, siendo combinado con Mortero. Si éste fuera el caso, se determina que al utilizar el valor obtenido en esta prueba, se obtendrá una resistencia mayor al ser utilizada la unidad ya como parte de un sistema puesto que se observa tiene un buen desempeño para la compresión.

2. Ensayo de porcentaje de absorción de la unidad de ladrillo. Se determinan que el porcentaje de absorción promedio es de: 16.99% y mientras que los datos teóricos presentan un porcentaje de: 25% para ladrillo con alma abierta según el libro de “Masonry design and detailing: for architects and contractors” de Christine Beall. Asimismo, se solicitó que el fabricante nos indicara el porcentaje de absorción para los ladrillos utilizados, el cual fue de 18%. Si se asume un $\pm 5\%$ de variación para el porcentaje de absorción se determina que el resultado es aceptable en cuanto al valor indicado por el fabricante.

Consideramos que comparado con el valor indicado por la siguiente tabla, existe una variación mucho mayor dado que el dato indicado en ella es presentado para cualquier tipo de ladrillo de alma abierta, no específicamente para el utilizado.

Si queremos determinar entonces cómo esta propiedad influye en un sistema a aplicar, podemos concluir que esta absorción es calidad media, puesto que comparándolo con la teoría no demuestra estar muy cercano al límite superior indicado. Ahora si incluyéramos una segunda variable, como lo es el mortero, se podría considerar la cantidad de cal como factor determinante para la adherencia a la unidad de mampostería.

Es importante tener en mente que para la construcción de muros de mampostería, el mamposte debe estar saturado para entonces asegurar que no absorberá el agua del mortero produciendo grietas y secando el mortero más rápido de lo que se adhiere. Entonces debemos asegurar que para la absorción del mamposte se debe mantener equilibrada la cantidad de cal dentro del mortero para asegurar retención de agua en el mortero y poder aun así el mamposte absorber las propiedades completas del adhesivo y lograr así una unión adecuada. Por lo que es importante contar con una absorción mejor para asegurar esta calidad adherencia.

3. Ensayo de medición del ladrillo. Se determinan que las medidas promedio de los ladrillos a utilizar son de 14.01 cms. de ancho, 18.81 cms. de altura y 39.28 cms. de largo. Se determina que estos valores pudieron variar a los especificados teóricamente puesto que el proceso de horneado, secado y enfriado del ladrillo pudieron ser de diferentes periodos de tiempo, o con diferentes temperaturas por lo cual la contracción o expansión de la arcilla cocida se dio con variaciones leves.

4. Ensayo a la resistencia a la compresión de mampostería por medio de prismas. Se determina que el esfuerzo de compresión resistido por la mampostería de Ladrillo de arcilla es de $f'm = 77.75 \text{ kg/cm}^2$, este esfuerzo de compresión fue medido hasta la carga última sostenida antes de colapso y considerando solamente aumento en deformación mas no aumento de carga. Pero debido a que cualquier material se comporta de manera lineal en su rango elástico y en este rango es en el que debe diseñar para cualquier tipo de estructura, ensayo u elemento, se le aplica este factor indicado en la fórmula.

El factor mencionado, como de “corrección”, hace la modificación del esfuerzo obtenido hasta el colapso regresándolo a lo que sería el esfuerzo a la primera grieta momento en el cual termina el comportamiento elástico del elemento. Por lo que se determina que el f'_m obtenido es el adecuado para el diseño de los muros de mampostería de ladrillo confinado con sus variaciones en el refuerzo horizontal.

A pesar que no se midieron deformaciones exactas, si se logró determinar el mecanismo de falla de los prismas. Como se esperaba el mecanismo de falla fue típico, mostrando siempre el mismo patrón mas no siempre la misma trayectoria específica de la falla.

Se determinó que en todos los casos, la falla se daba por la separación de las caras laterales en uno de los extremos, tal como se observa en la Ilustración 23, la cual haciendo referencia a la Ilustración 15 muestra un tipo de falla 7.b llamado “Face Shell Separation”, el cual en su traducción indica lo antes mencionado. Posiblemente esta falla se deba al tipo de ladrillo utilizado indicando que se expandirá en presencia de una carga vertical aplicada y cederán las paredes exteriores de la unidad cumpliendo el postulado de Poisson del esfuerzo normal en respuesta de una carga vertical aplicada. Debe considerarse que para el estudio que se realizó, Muros de Mampostería confinados cargados lateralmente, no se presentara este tipo de falla sino será una debido al corte. Este dato se considera importante para determinar la resistencia del muro a los diferentes efectos de fuerzas laterales.

5. Ensayo a compresión diagonal. Los muretes de mampostería fueron elaborados básicamente de dos elementos, de la unidad de mampostería que en este caso fue el ladrillo de modulación 14X19X39 centímetros. Y por otro lado, el mortero que fue utilizado para unir dichas piezas, en este caso en particular los morteros tipo S y tipo M, elaborados en obra.

Estos dos componentes anteriormente mencionados se unen con el fin de que los mismos actúen como monolíticamente como un solo elemento para resistir las cargas impuestas a éste. El comportamiento de los muros frente a las cargas impuestas está determinado en gran medida por las características físicas y mecánicas de los materiales que son empleados en la elaboración y de su capacidad de resistir y de actuar en conjunto para resistir las fuerzas internas generadas en los mismos. De tal forma que como parte de esta investigación se conocieron experimentalmente los valores representativos característicos de los materiales a emplear, mediante ensayos como resistencia nominal a la compresión de la unidad de mampostería y de pilas de mampostería, absorción de las unidades de mampostería, así como ensayos de compresión para el mortero, de absorción, y de adherencia estos últimos para los dos tipos de mortero propuestos en este trabajo (M y S).

El armado del sistema experimental fue realizado de tal forma que la carga aplicada al murete fuera paralela a la línea de la diagonal, apoyado sobre las platinas de acero elaboradas especialmente para este tipo de ensayos a 45 grados.

Como parte de la investigación se analizó el comportamiento tanto físico como mecánico de los muretes de mampostería la ser sometidos a compresión diagonal. Los muretes fueron agrupados de acuerdo al tipo de mortero de pega utilizado, por lo que se llevaron a cabo cuatro ensayos por cada mortero de pega siendo un total de ocho muretes ensayados.

El objetivo principal de esta investigación es el establecer diferencias cualitativas y cuantitativas en cuanto a las características de resistencia y adhesión de los muretes de mampostería sometidos a esfuerzo cortante V'_m , para los diferentes tipos de mortero. Por la parte cualitativa se entiende las diferentes tipologías y trayectorias de falla que se desarrollaron en los muretes, además de observaciones generales acerca del comportamiento y estado final de estos al

momento de ser ensayados. A su vez, por la parte cuantitativa se entiende los valores de resistencia a cortante último y de diseño que estos soportaron.

La falla de un muro por efecto de las fuerzas cortantes ocurre habitualmente a través de fisuras inclinadas ocasionadas principalmente por las tensiones diagonales, estas grietas a lo largo de las juntas de mortero generan un plano de debilidad pieza – mortero, donde la grieta puede hacerse paso. Además estas grietas pueden atravesar la unidad de mampostería, generalmente si esta posee baja resistencia y buena adherencia.

Para el fin de esta investigación se establecieron tres tipos de tipologías de falla que mostraron los muretes al ser sometidos a compresión diagonal, y sobre los cuales se agruparon. Estos tres tipos de tipologías de falla fueron determinados principalmente en relación a: el aspecto visual del muro al momento de la falla, y la trayectoria de falla. Estos tres tipos de falla son los siguientes:

- Falla por adherencia: Este tipo de falla se caracterizan porque la resistencia de la pieza es mayor en relación con la resistencia de adherencia del mortero con las piezas, por lo que la falla se induciría en el elemento débil, siendo en este caso la junta. Por lo que se produce un desprendimiento o deslizamiento de un bloque de mampostería sobre otro.
- Falla combinada: Este tipo de falla se observa generalmente cuando la resistencia a tensión de las piezas es menor en relación con la resistencia de adhesión mortero – pieza. En estos casos los muros presentan ruptura y agrietamiento en algunas de las piezas, al igual que en las uniones mortero – pieza. Este tipo de falla no involucra una trayectoria de agrietamiento completamente diagonal en el muro.
- Falla semi – diagonal: Se observa cuando el esfuerzo resistente a la tensión de las piezas de mampostería son de similar magnitud a la adherencia entre

mortero – pieza, con lo que se producen un fallo general, en donde se da el agrietamiento diagonal tanto en las piezas como en el mortero de pega. Teniéndose así una trayectoria de falla diagonal o casi diagonal.

Para el murete tipo S1 se determinó una resistencia al cortante último, de 0.46 kg/cm², observándose un deslizamiento completo de un bloque de mampostería respecto al otro, conduciendo esto a una falla por adherencia (Ilustración 82 Anexo B).

Para el murete tipo S2 se produjo una falla del tipo combinada, donde la falla se empezó a dar en formas de grietas en la mampostería, desarrollándose una pequeña diagonal, y seguidamente se dio la falla por adherencia la cual hizo que el murete colapsará completamente. Se obtuvo una valor de resistencia al cortante último de 0.43 Kg/cm² (Figura 83 Anexo B).

El murete tipo S3 presento una resistencia a cortante último de 0.63 kg/cm², desarrollándose inicialmente una falla por adherencia principalmente, lo cual hizo que el murete colapsara en su totalidad. Durante el desarrollo del ensayo también se observó ruptura parcial en una de las esquinas de la mampostería a consecuencia de los esfuerzos internos que en ésta se estaban generando (Ilustración 84 Anexo B).

En cuanto al murete tipo S4, al igual que para el murete tipo S2, se obtuvo una falla combinada visualizándose inicialmente grietas en la mampostería, que fueron seguidas de un deslizamiento parcial de un bloque de mampostería respecto a otro, a consecuencia de una falla por adherencia. Posteriormente se generó una falla explosiva del murete de mampostería. Se determinó una resistencia última a cortante de 1.20 kg/cm², siendo esta la mayor resistencia a cortante obtenida para los muretes ensayados con este tipo de mortero. Probablemente a consecuencia de que para este murete en particular se observó que la mampostería trabajo en mayor

medida, haciendo que el murete trabajará en forma monolítico y por lo tanto más eficiente (Ilustración 85 Anexo B).

El siguiente grupo de muretes ensayados fueron los muretes tipo M, denominados de esta forma por el tipo de relación de mortero utilizada. Al igual que para los muretes tipo S, los muretes tipo M presentaron mecanismos o tipologías de falla que pueden ser agrupadas en los tres grupos mencionados con anterioridad. Así mismo se determinaron las resistencia a cortante últimos para cada uno de los cuatro muretes.

Para el murete tipo M1 se obtuvo una resistencia al cortante último de 1.28 kg/cm², siendo ésta la mayor resistencia a cortante presentada por los ambos tipos de muretes (tipo S y tipo M). Se pudo observar que presento un mecanismo de falla por adherencia, deslizándose un bloque de mampostería sobre otro. Posteriormente fallo en forma explosiva (Ilustración 86 Anexo B).

En cuanto al murete tipos M2, se observaron grietas diagonales a lo largo de casi la totalidad de la mampostería, principalmente al medio de ésta, a consecuencia de los esfuerzos internos de compresión y tensión generados en la misma. Por lo que el murete presento una falla del tipo semi-diagonal, en donde las grietas se observaron tanto en la mampostería como en el mortero de pega, con lo que se pudo observar que ambos materiales trabajaron mecánicamente ante las cargas impuestas. Se obtuvo un valor de resistencia a cortante último de 0.74 Kg/cm² (Ilustración 87 Anexo B).

Para el murete tipo M3 se obtuvo una resistencia a cortante última de 0.77 Kg/cm². Se observó que el mecanismo de falla combinada en donde se inicialmente se desplazó la mampostería debido a la adherencia, adicionalmente se observaron grietas en la porción central provocando así el desprendimiento de parte de la mampostería (Ilustración 88 Anexo B).

Respecto al muro tipo M4 se determinó una resistencia última a cortante de 0.66 Kg/cm², la falla que predominó fue por adherencia, y esto se evidenció al ver el deslizamiento entre los bloques de mampostería (Ilustración 89 Anexo B).

Es importante hacer notar que los valores obtenidos para cortante último a través de la ecuación 18, son valores V'_m de diseño, es decir los valores de cortante aproximadamente a la primera grieta. Y es con dicho valor con los que posteriormente se deberá analizar la capacidad de resistencia de muros que utilicen los tipos de mortero y unidad de mampostería respectivamente.

Se realizó un análisis estadístico para los dos distintos grupos de muretes ensayados, se pudo observar que para el caso de los muros tipo S los valores de resistencia a cortante último se obtuvo una desviación estándar de 0.36 y un promedio de 0.68, con lo que se observa que los valores medidos se encuentran lejos del promedio de las muestras. En cuanto para los muretes tipo M se obtuvieron valores de desviación estándar menor, del orden de 0.28 y un promedio de 0.86 para los ensayos realizados. Es importante tomar en cuenta que únicamente se realizaron cuatro ensayos por tipo de muretes por lo que la cantidad de muestras era muy pequeña, por lo que esto pudo influir respecto a tener desviaciones estándares muy grandes.

Después de haberse aplicado el análisis estadístico t de Student para observar la correlación entre los resultados obtenidos para los dos tipos de mortero, trabajando bajo un nivel de confianza del 95% y obteniendo un valor de probabilidad estadístico "t", se pudo observar que no existe diferencia significativa entre las dos variables de medición (en cuanto resistencia últimas a cortante), ya que éste está comprendido dentro de la curva de distribución para los valores analizados.

La dosificación de cada tipo de mortero y las propiedades de absorción de la unidad de mampostería (ladrillo), fueron factores que influyeron en forma significativa a la resistencia última a cortante para cada uno de los muretes. El

ladrillo utilizado posee un porcentaje de absorción medio, del orden del 16.99%, por lo que la adherencia entre la pieza y el mortero se hizo una variable clave de analizar. Esto se evidencia también al observar que el tipo de falla dominante en los ensayos fue por adhesión mortero - pieza. Los morteros utilizados, tipo M y S respectivamente poseen distintas dosificaciones de cemento, cal y arena, los cuales suponen distintas características mecánicas. Se considera que la adición de cal aumenta la remanencia de agua y reduciendo así el agrietamiento, aunque también reduce la fuerza a compresión del mortero a analizar. Al considerar que el ladrillo posee características de absorción mediana, es necesario que el mortero posea características tales de retención de agua que permitan la correcta adhesión para que la mampostería trabaje como un elemento monolítico, y genere las fuerzas internas (generalmente por fricción y fuerzas a tensión de la unidad de mampostería) tales que proporcionen las características de resistencia necesarios. Otro factor que puede llegar a influir al momento de analizar la adherencia es la superficie del ladrillo, esto debido a que el tipo de ladrillo a analizar poseía una superficie lisa si es comparado con otro tipo de unidades de mampostería (en especial con el block tradicional).

En cuanto a la resistencias a compresión, es importante tomar en cuenta que para que el mortero y la unidad de mampostería trabajen conjuntamente de forma efectiva, es necesario que la resistencia del mortero sea aproximadamente de 1.25 a 1.50 veces la resistencia a compresión de la unidad de mampostería. Esto con el fin que al momento de que sean sometidos a esfuerzos la unidad de mampostería trabaje junto con el mortero. Ya que si se cuenta con un mortero pobre y de baja resistencia, ocurre que la falla primero se origina en el mortero y por consiguiente la mampostería ya no trabajaría en su totalidad. Considerando que la unidad de mampostería analizada (ladrillo) posee una alta resistencia a la compresión, lo cual lo hace un sistema rígido, es decir que resiste grandes cantidades de carga sin deformarse pero su módulo de resiliencia es bajo (capacidad de soportar carga y absorberla a través de deformación), por consiguiente es necesario que el mortero

posea tal rigidez que haga que el ensamble pieza mortero trabaje en forma correcta, y a la vez la trabajabilidad necesaria para que sea manejable en obra.

Los morteros tipo M y S poseen características a compresión comparables, por la dosificación de cemento utilizada se considera que el mortero tipo M es de alta contracción, y esta alta contracción aumenta a su vez la fuerza en las uniones entre las unidades, esta alta contracción también puede provocar una contracción mayor de mortero que pueda producir una pérdida de agua significativa haciendo que este se agriete inmediatamente posterior a su aplicación y no se adhiera en forma correcta con la mampostería.

C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.

1. Análisis matemático. El análisis matemático se realizó mediante la utilización de un programa de cálculos matemáticas llamado Math Cad. En este programa se ingresaron las variables y ecuaciones correspondientes al análisis del método de rigidez de matrices con el cual se aproximó el muro a una barra equivalente. Para ver el desarrollo matemático se puede ver los anexos. De estos cálculos matemáticos se lograron los siguientes resultados:

Ecuación 29: factor λ a dimensional del muro.

$$\lambda := \frac{E \cdot A_c}{G_m \cdot A_m} = 9.25$$

Ecuación 30: Relación de aspecto.

$$\zeta := \frac{240}{240} = 1$$

Ambos resultados fueron satisfactorios ya que están dentro del rango permitido.

El ancho para la diagonal de compresión es de:

Ecuación 31: Ancho teórico de la diagonal.

$$w_{\text{diagonal}} := (0.35 + 0.022\lambda) \cdot h = 1.328\text{m}$$

Además se sacaron los valores de deformación.

Se puede ver los desplazamientos en cada una de los grados de libertad del modelo. Los cuales corresponden a 3 por cada uno de los 4 nodos no restringidos por los apoyos (Ver Anexo E para imagen con los grados de libertad numerados). Los desplazamientos medidos en el laboratorio corresponden al 6 y 9 para los desplazamientos a media altura y en la parte superior respectivamente.

2. Análisis experimental.

a. **Muro 1.** Es importante notar que se escucharon crujidos comenzando en los 3,200 kg cuando sufre la primera falla por adherencia. Luego se presenta la primera falla por corte a los 6,500 kg. A los 8,900 kg aparece una falla en la solera de corona e intermedia para finalmente fallar en 9362.07kg. cuando ya no soportó que se le agregara más carga.

De la gráfica se puede notar como las deformaciones se fueron dando en un rango elástico hasta llegar a aproximadamente los 2,800 kg de carga donde la pendiente de la gráfica en la parte de deformaciones superior (roja) cambia a un estado que se puede asumir estar en el rango semi plástico, para luego hacer otro cambio en aproximadamente los 5,600Kg donde comienza a actuar en el rango plástico y a ceder hasta que finalmente no soporta más carga a los 9,300kg.

Ecuación 32: Deformaciones según grados de libertad

$$\begin{pmatrix} D4 \\ D5 \\ D6 \\ D7 \\ D8 \\ D9 \\ D13 \\ D14 \\ D15 \\ D16 \\ D17 \\ D18 \end{pmatrix} := K^{-1} \cdot (AE) = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 9.669 \cdot 10^{-3} \\ \hline 1 & 8.115 \cdot 10^{-4} \\ \hline 2 & -9.117 \cdot 10^{-5} \\ \hline 3 & 0.023 \\ \hline 4 & 1.232 \cdot 10^{-3} \\ \hline 5 & -7.229 \cdot 10^{-5} \\ \hline 6 & 0.011 \\ \hline 7 & -4.925 \cdot 10^{-4} \\ \hline 8 & -9.391 \cdot 10^{-5} \\ \hline 9 & 0.023 \\ \hline 10 & -5.401 \cdot 10^{-4} \\ \hline 11 & -5.649 \cdot 10^{-5} \\ \hline \end{array}$$

Utilizando la fórmula la pendiente de la gráfica, se calcula en el rango elástico en 2.8×10^3 kg/mm. Luego cambia a 700kg/mm para el estado semiplástico. Este cambio en la rigidez del material se debe a que la mampostería comenzó a rajarse y fallar haciendo que los marcos trabajaran con mayor carga, también haciendo que las deformaciones crezca con mucha mayor velocidad, necesitando menos carga para deformarse más. Luego el último cambio de pendiente se debe a las fallas de corte que aparecen en la mampostería. Con estas últimas fallas las deformaciones crecen más rápido que antes hasta llegar a la carga ultima y fallar por completo el sistema y no poder soportar más cargas.

En el muro 1 se puede apreciar en negro las ubicaciones de las fallas. Se puede ver que las diagonales fueron de esquina a esquina de la mampostería entre soleras. También se puede observar como la tendencia a que la falla se diera desde el punto de aplicación de carga en la esquina superior derecha hasta la esquina inferior izquierda. La solera evito un poco que la diagonal se formara completamente a 45° pero se mantuvo un poco la tendencia a hacerse. La solera ayudo a minimizar el ángulo haciendo que las fallas se extendieran un poco más a los costados para

fallar la solera intermedia en dos partes diferente a ambos extremos de donde las rajaduras y fallas por corte buscaron el camino más rápido hacia la esquina inferior en forma de una diagonal con diferentes ángulos (Ilustración 90 Anexo C).

Las esquinas opuestas a las de la diagonal casi no sufrieron daños más que el despegue de las uniones entre mampuestos y las columnas cuando la carga fue excesiva.

b. Muro 2. Es importante notar que se escucharon crujidos hasta que se presentó la primera grieta a los 6,200kg y una separación del mortero en algunas áreas a los 6,500 kg cuando el sistema cede. La primera falla de corte se presentó en la solera intermedia y en el cimiento a los 7,950 kg. La mayor carga aplicada fue de 8,700kg donde se decidió regresar el gato en decrementos de carga del doble de los incrementos para determinar si existían deformaciones permanentes, las cuales fueron de 3mm.

De la gráfica 67 se puede notar como las deformaciones se fueron dando en un rango elástico hasta llegar a aproximadamente los 2,800 kg de carga donde la pendiente de la gráfica en la parte de deformaciones superior (roja) cambia a un estado que se puede asumir estar en el rango semi plástico. Es importante notar que el cambio en pendiente a los 2,800 kg coincide con el muro 1. El cambio de pendiente en este caso casi es imperceptible y se alcanzó la misma carga con la mitad de la deformación. En el rango semi plástico, entre los 2,800kg y los 6,200, que casi coincide con el muro anterior, se lograron deformaciones menores alcanzando los 2 milímetros de deformación con más del doble de carga. Esto quiere decir que se extendió el rango elástico a casi el doble manteniendo casi la misma pendiente de deformación vs. carga.

A esto es importante hacer notar que el muro 2 fue fallado a los 28 días demostrando un incremento en el doble en el rango elástico alcanzando una carga

de aproximadamente 6,000kg con solo 1.5 mm de deformación. Al igual que en el muro anterior aparenta que el punto en el que las deformaciones comenzaron a hacerse extremadamente grandes para el incremento en carga en el mismo punto cerca de los 1.5 mm de deformación.

Cuando el muro comenzó a ceder, en este caso mantuvo una pendiente constante hasta que finalmente no soporta más carga a los 8,000kg. Como se puede observar el muro soportó más carga en el rango elástico, pero curiosamente la carga final presentaba mucha mayor deformación fallando antes de los 8,200 kg de carga. Esto puede deberse a que por contar con menor deformación al principio el proceso de carga durante la fase semi plástica no dejó que se acomodaran las piezas dentro de la mampostería llevando el sistema a romperse de manera repentina con una carga menor.

Utilizando la fórmula la pendiente de la gráfica, se calcula en el rango elástico en 3.6×10^3 kg/mm. Luego cambia a 150kg/mm para el estado plástico. Este cambio en la rigidez del material se debe a que la mampostería comenzó a rajarse y fallar haciendo que los marcos trabajarán con mayor carga, también haciendo que las deformaciones crezca con mucha mayor velocidad, necesitando menos carga para deformarse más.

Al igual que el ensayo anterior el punto en el que las cargas comenzaron a crecer con mayor rapidez se presenta cuando aparecen las primeras grietas en la mampostería. Tal y como se muestra en la siguiente imagen, el sistema empieza a fallar y a perder su capacidad para absorber cargas cuando la mampostería falla. Este fallo se dio entre los 6,000kg y los 6,200 kg y está claramente mostrado en las gráficas de deformación contra carga.

El fallo en la solera no presenta cambios en la pendiente de este ensayo. Sin embargo también al igual que en el ensayo anterior las fallas se dieron en ángulos

de esquina a esquina entre las soleras, queriendo seguir un ángulo de 90 grados, mostrando la misma tipología de falla.

c. Muro 3. Es importante notar que se escucharon crujidos comenzando en los 2,800 kg de carga hasta que se presentó la primera grieta a los 4,600kg y una separación del mortero en algunas áreas a los 7,000 kg. La primera falla de corte se presentó en las solera intermedia y cimiento a los 7,500 kg para finalmente fallar en 9830.18 kg. cuando ya no soportó que se le agregara más carga.

De la gráfica 68 se puede notar como las deformaciones se fueron dando en un rango elástico hasta llegar a aproximadamente los 2,800 kg de carga donde la pendiente de la gráfica en la parte de deformaciones superior (roja) cambia debido a la presencia de grietas. De este punto en adelante las deformaciones comienzan a crecer sin patrón alguno presentando cambios y saltos repentinos precedidos por ruidos. Hasta este punto las deformaciones son casi imperceptibles y pequeñas hasta llegar a 1mm de deformación de donde en tan solo 400 kg de carga la deformación crece casi todo el primer milímetro. Se asume que este salto puede deberse a que el material rígido estaba absorbiendo toda la carga y no se deformaba. Luego cuando éste, falla el sistema comienza a soportar toda la carga explotando el material rígido y mostrando una deformación similar a la del muro anterior (muro 2). En este caso la deformación de 1 mm se alcanza alrededor de los 3,600 kg.

En este ensayo pueden verse dos cambios de pendiente con tres pendientes diferentes. El segundo cambio, al igual que en el muro anterior, pasa entre los 6,000 y 7,000 kg. Luego de este periodo y 2 mm de deformación el muro comienza a deformarse con mayor velocidad. Se puede notar la similitud en los dos últimos ensayos (2 y 3), donde las cargas y deformaciones son muy similares entre sí. La carga última soportada por el muro fue de alrededor a los 9,800kg pero en el momento de los 8,500 kg., se puede notar que llevan casi la misma deformación de 17mm.en la parte superior.

Con estos dos ensayos se puede asumir que el primer ensayo tuvo fallos que pudieron influir en altas deformaciones al principio. La velocidad con la que se cargó el muro fue decisiva ya que el primer ensayo por ser el primero, se realizó con mayor lentitud cuidando detalles y tomando medidas, lo que daba tiempo a la carga a afectar más al sistema, logrando vencerlo con menor carga y causando mayores deformaciones. Los siguientes ensayos, ya teniendo la práctica de los anteriores ensayos se lograron hacer a la misma velocidad obteniendo casi los mismos resultados en deformaciones y cargas.

Utilizando la fórmula la pendiente de la gráfica, se calcula en el rango elástico en 3.2×10^3 kg/mm. Similar a los datos antes calculados se llega a una carga de un milímetro alrededor de los 3,200 kg.

d. Muro 4. Es importante notar que se escucharon crujidos comenzando en los 2,800 kg de carga hasta que se presentó la primera grieta a los 2,900kg y una separación del mortero en algunas áreas a los 4,440 kg. Finalmente falló en 9830.18 kg. cuando ya no soportó que se le agregara más carga.

De la gráfica 69 se puede notar como las deformaciones se fueron dando en un rango elástico hasta llegar a aproximadamente los 2,000 kg de carga donde la pendiente de la gráfica en la parte de deformaciones superior (roja) cambia a un estado que se puede asumir estar en el rango semi plástico, para luego hacer otro cambio en aproximadamente los 6,500Kg donde comienza a actuar en el rango plástico y a ceder hasta que finalmente no soporta más carga a los 6,800kg.

Utilizando la fórmula la pendiente de la gráfica, se calcula en el rango elástico en 1.00×10^4 kg/mm. Luego cambia a 1250kg/mm para el estado semi plástico. A diferencia de los otros ensayos con solera el cambio en la inclinación de la gráfica se dio antes de que se comenzaran a mostrar las rajaduras. Las rajaduras salieron un poco después del cambio en la pendiente de la gráfica. Probablemente los ruidos

que se escuchaban antes de encontrar las rajaduras eran fracturas dentro de la mampostería que no se hicieron externas hasta luego del cambio de pendiente. Esto quiere decir que el cambio de pendiente se debe a las fisuras que se dieron en la mampostería internamente.

No hubo señas que mostraran el último cambio de pendiente, las separaciones en las juntas de la mampostería se dieron a los 4,400kg, lo cual queda bien marcado en la gráfica como un brinco en las deformaciones del deformímetro de media altura. En tema de deformaciones, es importante notar que las deformaciones para el muro sin refuerzo horizontal fueron mayores a media altura que en el tope. Demostrando que la solera evita la separación de la mampostería ayudando al confinamiento de la misma.

En la gráfica 70 se muestra el comportamiento que tuvieron la mayoría de graficas presentadas. Una primera parte lineal hasta aproximadamente el milímetro de deformación a los 2500kg. Luego una segunda parte, donde las deformaciones fueron mayores con menor carga. Por último, hay una parte de la gráfica que muestra grandes deformaciones y comportamiento plástico hasta la falla total del sistema.

Cuando se comparan los muros con solera con los muros con solera se pueden notar que solo en el muro número 1 las deformaciones son mayores con forme a las deformaciones del muro sin solera. Como se expresó con anterioridad, esto puede deberse a la cantidad de tiempo de mas que se tomó para tomar las lecturas del muro dándole tiempo a la carga a actuar por más tiempo en el muro deformándolo más dejándolo que se acomodara. En las gráficas para los muros 2 y 3 se puede notar como la solera proporciona mayor resistencia a la deformación hasta casi el final de la gráfica donde la diferencia es muy poca. A grandes cargas pareciera que la solera intermedia proporciona poca resistencia a los desplazamientos, pero proporciona mayor resistencia a las deformaciones logrando aumentar la ductilidad del material haciéndolo resistir cargas mayores y mayor deformación.

La comparación entre el muro sin solera y el muro con solera la carga máxima soportada por los muros con solera fue mayor en todos los casos. El incremento de resistencia en la carga de 38%, 17% y 45% para los muros 1, 2 y 3 respectivamente con respecto a la carga soportada por un muro sin solera (Ilustraciones 91, 92, 93 Anexo C).

En todos los ensayos para los muros con solera las fisuras y fallas se realizaron en ángulos cercanos a los 45° . La solera intermedia parecía llevar las diagonales hacia las esquinas de la misma en lugar de atravesarla al centro. Como el caso de las líneas Rojas rectas en la segunda imagen. La imagen muestra cómo las fallas se dieron en ángulos de 45° cuando no existía solera intermedia (Ilustración 94 Anexo C).

Se puede apreciar en verde la hipótesis mostrada en el modelo matemático para una solera intermedia. Las rajaduras no se dieron de esa forma. Las fracturas en el muro con solera se dieron de acuerdo a las líneas moradas, donde comenzaron a la izquierda arriba y trataron de seguir la línea verde. Cuando falló la solera intermedia en un extremo la rajadura atravesó la solera y se precipitó tratando de regresar a la línea de los 45° , representada en rojo, que se formó en un muro sin solera. Como se mencionó anteriormente, la solera ayudó a cambiar el ángulo no pudiendo cambiarlo por completo ya que la línea de falla buscó el camino más rápido al cimiento, siendo este el ángulo a 45° (Ilustración 94 Anexo C).

Es posible que este intento de seguir otro camino a los extremos de la solera intermedia, pudiera haber ayudado al muro a crecer su sección de la diagonal propuesta en el modelo matemático haciendo que el muro soportara más cargas por tener una diagonal con mayor grueso.

Comparando los resultados obtenidos para las gráficas carga contra deformación, se presentan los resultados de las deformaciones propuestas por el método de la diagonal equivalente.

En la primera gráfica se puede observar como los datos prácticos mostraron estar del lado conservador hasta los 3,000kg. Es en este punto donde se cree que se pierde el comportamiento lineal del sistema. Es donde las primeras fallas comenzaron a aparecer, los crujidos comenzaron a sonar y las primeras rajaduras comenzaron a aparecer sobre la mampostería y entre las sisas de la misma (Ilustración 95 Anexo C).

Para el caso de las deformaciones a media altura se puede notar que los valores teóricos muestran una tendencia a seguir las deformaciones dadas en la práctica. Los valores cambian aproximadamente a los 2,800kg cuando las deformaciones plásticas comienzan a afectar el sistema. En ambos casos luego del comportamiento lineal, existen grandes diferencias entre las deformaciones prácticas y las teóricas (Ilustración 96 Anexo C).

Los resultados fueron similares para los muros 2 y 3 en el rango elástico. Cabe hacer notar que las gráficas presentadas son comparaciones de los modelos prácticos y teóricos para el muro número 3. El muro número dos presenta comportamiento similar con la diferencia en el comportamiento de las deformaciones superiores donde el modelo teórico falla un poco. Las deformaciones a media altura si logra acoplarse al comportamiento teórico esperado. Para el caso del primero muro pareciera que la teoría no concuerda con los resultados prácticos. Queda entonces la duda de no poder concluir con solides que la teoría es correcta de acuerdo a lo práctico.

Para tratar de corregir estas inconsistencias con los resultados, se podrían hacer cambios en las propiedades de los materiales. Muchas de estas propiedades que determinan su resistencia a la deformación fueron tomadas de libros que no precisamente se referían al material específico que se estaba ensayando. Tal es el caso para el módulo de corte de la mampostería.

Se probaron otros modelos en los cuales se eliminaba la solera del centro y utilizar una sola diagonal. Se intentó con una diagonal de esquina a esquina con una solera restringiendo las deformaciones a media altura, pero en ambos casos los resultados fueron menos satisfactorios.

Cuando se deshicieron los muros se pudo observar que un problema muy grande presentado dentro de las sisas de concreto fue la falta de adherencia entre el mortero y los ladrillos. El mortero tipo M utilizado es el recomendado para este tipo de construcciones, con la diferencia que los ensayos para sus recomendaciones fueron efectuados en muros de mampostería con block. Esta diferencia en el material de pega crea conflictos en la adherencia. El block es más poroso que el ladrillo logrando así que el mortero se pegue más en sus uniones.

Otro factor que determinó la falta de adherencia entre el mortero y el ladrillo es el tipo de falla. Las fallas de agrietamiento se extendieron a través de las juntas. Debido a que la carga siempre busca el camino menos resistente para llegar a los cimientos se puede deducir que la carga utilizó las juntas como camino debido a la falta de adherencia entre el mortero y el ladrillo. Como resultado las fallas casi no atravesaron ladrillos, con algunas excepciones (Ilustración 97 Anexo C).

D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).

Básicamente los muros sujetos a carga sísmica en su plano muestran dos tipos principales de falla, falla a flexión y corte.

Primero que nada se debe entender que la falla principal es aquella en donde se acumulan la mayor cantidad de grietas producidas por los esfuerzos a los que está sometido el muro, esto es originado por una fuerte degradación tanto de la resistencia como de la rigidez de los materiales que conforman el muro.

En la falla por flexión es posible que previamente a esta se hayan dado pequeñas fisuras en las unidades de mampostería ya que al aplicarle la carga se oían algunos crujidos dentro del muro y a la vez se escuchaba cómo iban cayendo fragmentos de la mampostería, pero éstas son controladas por el refuerzo horizontal que conforma el muro, pero las grietas principales se encuentran localizadas en el extremo inferior opuesto de donde se aplicó la carga y en la esquina en donde se aplicó la carga y estas son producto principalmente de los siguientes efectos:

- El desgaste de los talones en el cimiento del muro debido a flexo compresión.
- El deslizamiento a través de la base del muro
- La rotura del refuerzo vertical por tracción o pandeo (Ilustraciones 98, 99, 100 Anexo D).

En una falla por corte es posible que se originen fisuras por flexión, incluso el refuerzo vertical (acero de las mochetas) pueden entrar en fluencia, degradando la rigidez, pero no la capacidad de carga. Luego se observó que se empezaron a producir las grietas diagonales a 45° y a partir de ese instante, el muro se empezó a desplazar manteniendo la misma carga aplicada (la curva cortante – deformación se mantiene plana), posteriormente se extrajo una unidad de mampostería para observar los daños internos sufridos en la mampostería y se observó que se producen unas fisuras en la parte central de las unidades y la cual causa una severa degradación de resistencia.

De acuerdo a los resultados se puede decir que en un promedio la carga lateral última resistida por los muros con refuerzo horizontal interior fue de 9596.13 Kg, esto comparado a la carga lateral resistida por el muro control sin refuerzo alguno de 6787 Kg, se puede decir que el refuerzo horizontal con base a los resultados aporta un 30% más de resistencia a cargas laterales.

También se puede observar en cuanto a los desplazamientos, los muros con refuerzo horizontal sufren menos desplazamiento en la parte media del muro y en cambio en el muro control el desplazamiento en los dos puntos es más parejo y

uniforme. También se observó que el muro 2 probado a los 14 días y el muro 3 probado a los 27 días, llegaron a la misma carga con la única diferencia en que el muro 2 sufrió mucho más desplazamiento que el muro 3 el cual tenía más días de fraguado del mortero.

Por último podemos comparar los valores obtenidos experimentalmente contra los resultados obtenidos teóricamente, comparando estos valores obtenemos que el teórico nos da una resistencia a carga lateral de 8028.72 Kg y el valor obtenido en los ensayos nos da en promedio 9596.13 Kg, lo cual nos da una diferencia del 16.33 % lo cual nos dice que el modelo utilizado para predecir la resistencia al cortante de parte del muro es un buen aproximado al valor real obtenido.

En lo que respecta a la adherencia del ladrillo con el mortero de pega, se observó en los muros ensayados que esta no fue muy buena debido a que el ladrillo se despegaba muy fácilmente del mortero en algunos puntos. El mortero utilizado fue el de clase M la cual posee una relación en volumen de 1 cemento por $\frac{1}{4}$ de cal y 3 de agregado fino (arena amarilla), este es el mortero especificado para unidades de mampostería de concreto (block) lo cual puede ser que para unidades de mampostería de arcilla cocida (ladrillo) este al tener propiedades distintas a las del block no tenga los mismos resultados de adherencia.

También se determinó que la adherencia no fue muy buena debido a que el agrietamiento producido por la carga lateral se inicia y se propaga a través de las juntas, y esto se genera cuando la resistencia de las piezas de mampostería es mayor en la relación con la resistencia de adherencia del mortero de pega, por lo que el agrietamiento siempre va a ocurrir en el elemento débil, que en nuestro caso es la junta de mortero. (Ilustración 101 Anexo D).

Se pudo observar la superficie que dejó la unidad de ladrillo en el mortero de pega, esto demuestra que la combinación entre la absorción del ladrillo y la capacidad de retener la humedad del mortero no fue buena. Ya que tanto el ladrillo

no tuvo la suficiente absorción para que el mortero se pudiera adherir bien a la unidad de mampostería y el mortero tampoco tuvo la suficiente capacidad de retener la humedad para que le diera tiempo al ladrillo poder adherirse mejor al mortero de pega (Ilustración 102 Anexo D).

Otro aspecto relevante fue que en algún punto del ensayo a carga lateral se observó que las unidades se estaban separando, como se puede observar en la ilustración 47, esto demuestra que lo que fallo primero fue el mortero de pega, el cual por un lado es mejor ya que si fuera el caso contrario, que la mampostería fallara antes que el mortero, esta situación sería más delicada ya que la mampostería es la que da más capacidad de resistencia a cargas laterales.

La ductilidad es la propiedad que tienen los materiales de deformarse visiblemente (plásticamente) antes de llegar a la ruptura. Esto es, que el material puede ser estirado considerablemente antes de romperse. Para el propósito de nuestros ensayos se tienen varios factores importantes para definir la ductilidad entre ellos está el límite elástico y el límite elasto-plástico y el punto de cedencia.

El límite elástico en nuestro caso, se puede decir que es la parte en donde solo trabaja la mampostería, es decir que la mampostería es la que recibe la carga lateral en su totalidad. Luego el límite elasto-plástico, es cuando el muro ya empieza a trabajar como sistema, es decir la mampostería y el acero horizontal interior empiezan a trabajar en conjunto para dar resistencia a la carga lateral aplicada. Por último el punto de cedencia se puede decir que es el periodo de tiempo en el cual se aplica la carga y el muro sufre un gran aumento de deformación sin aumento de la resistencia a la carga lateral, en otras palabras se dice que el punto de cedencia es el punto en el cual la deformación del material se produce sin incremento significativo del esfuerzo.

En la ilustración 27 se muestra el comportamiento ideal de un muro sometido a cargas laterales, como se podrá observar más adelante las gráficas producidas por los ensayos de los muros con refuerzo horizontal interior y el muro parámetro.

Para el muro que no cuenta con refuerzo horizontal (muro 4) se puede observar en la gráfica q en la parte marcada con el recuadro rojo, es la parte en donde trabaja la parte más rígida del sistema que en nuestro caso es la mampostería, el cual da un valor de carga de 2000 kg. Ahora lo que está indicando el círculo de color azul en la parte intermedia esto indica la parte en la que empieza a trabajar el sistema en conjunto que en este caso solo es la mampostería y el marco que conforma el muro, dando como un valor de carga de aproximadamente 6300 kg. Y por último la última parte en donde se observa que sufre un mayor desplazamiento lateral sin aumentar la resistencia a la carga, este es el punto de cedencia del muro (Ilustración 103 Anexo D).

Ahora teniendo esto en cuenta se puede tener obtener una relación entre el límite elasto-plástico y el límite elástico, el cual se puede definir como un buen indicador de la ductilidad del muro.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{4.8}{1.5} = 3.2$$

μ = Índice de ductilidad

Δ_u = Deformación última del muro

Δ_y = Deformación que está entre el límite elástico y elasto-plástico. Aproximadamente a la mitad.

Así sucesivamente se calcularon el índice de ductilidad para cada uno de los muros dando los siguientes valores, los siguientes muros cuentan con refuerzo horizontal distribuido a lo alto del mismo (Ilustraciones 104, 105, 106 Anexo D).

Ductilidad del Muro 5:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{26.3}{6.2} = 4.24$$

Ductilidad del Muro 6:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{13}{2.8} = 4.64$$

Ductilidad del Muro 7:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{28}{4.2} = 6.66$$

Por los valores obtenidos en los cuatro ensayos realizados (un parámetro y tres con refuerzo horizontal) la resistencia por el elemento rígido (la mampostería) fue casi la misma, esta variaba entre un rango de 2000 a 3000 kg. En lo que se pudo observar gran diferencia es en la resistencia que da el acero horizontal interior ya que en las ilustraciones 104, 105 y 106 el rango entre el límite elástico y elástico-plástico es considerablemente alto, ya que en este rango la gráfica sufre un gran aumento en resistencia a la carga lateral a comparación con el desplazamiento que sufre el sistema.

Ahora tomando los índices de ductilidad obtenidos con los ensayos, si solo tomamos los dos datos más parecidos en los ensayos de los muros con refuerzo horizontal, estos dan un promedio de 4.44 y si lo comparamos con el índice obtenido del muro parámetro (Muro 1), este nos dio un valor de 3.2, obtenemos que el refuerzo horizontal interior da un 36% más de ductilidad que un muro que no está reforzado horizontalmente.

En cuanto a la cuantificación y costo de los materiales utilizados para los diferentes sistemas constructivos utilizados podemos mencionar lo siguiente:

Tabla 48. Resumen cuantificación de material.

Materiales	Unidades	solera	sin solera	Refuerzo horizontal
Ladrillo estándar de 14cm	unidad	45.00	50.00	50.00
Refuerzo No.2	ml	55.00	40.90	58.90
Refuerzo No.3	ml	53.30	43.10	43.10
Concreto fc 210 kg / cm²	m ³	0.43	0.35	0.35
Formaleta 1 tabla	ml	18.40	13.60	13.60
Mortero de Pega	m ³	0.19	0.20	0.20
Tacos de concreto 2.5cm	unidad	54.00	42.00	42.00
Tacos de concreto 7.5cm	unidad	18.00	18.00	17.75
Levantado de muros	m ²	5.64	5.64	5.64

De la tabla se puede observar que la cantidad de unidades de ladrillo para el muro con solera utiliza cinco ladrillos menos que su contraparte de muros sin solera. Además de esta ventaja y de tener un poco menos de uso de mortero de pega, el muro con solera resulta más caro en el consumo de materiales. El consumo de refuerzo No. 2 presenta un incremento con respecto al consumo en muros sin solera y un pequeño ahorro comparado con el muro de refuerzo horizontal. Los 3 metros lineales más utilizados por el Refuerzo horizontal no son significativos en costos ni en cantidad de material por lo que se puede decir que cuesta más o menos lo mismo. En cuanto al consumo del refuerzo No. 3 se puede ver un incremento de más de una varilla y media por muro, algo que puede ser muy representativo en la construcción de una casa. Además el consumo de concreto extra utilizado para la solera intermedia representa un incremento en un 23% de concreto.

Comparando estos incrementos en aspectos importantes en cuanto a costos, siendo el concreto y el acero de refuerzo los materiales más costosos del muro, se puede decir que sin importar la variación de costos que pueda tener el ladrillo, el acero y el concreto en sus diferentes fluctuaciones de precios el muro con solera intermedia siempre será más caro de construir que un muro sin solera ni refuerzo horizontal. Este incremento en costos del muro con solera se ve reflejado también en un incremento en la resistencia a las cargas horizontales con respecto al muro parámetro “Sin Solera”. El incremento en costos como se puede observar en la siguiente tabla, la cual fue elaborada con costos probables de materiales para el año 2010. Es importante notar que estos precios varían constantemente y de proveedor a proveedor, por lo que son solamente aproximaciones.

Tabla 49. Cuantificación de materiales de muros realizados con costos a diciembre 2010.

Materiales	Solera	Sin solera	Refuerzo horizontal
Block de 35 kg / cm2 estándar de 14cm	Q157.50	Q175.00	Q175.00
Refuerzo No.2 G.40 (20 pies)	Q174.14	Q129.49	Q186.49
Refuerzo No.3 G.40 (40 pies)	Q153.93	Q169.16	Q169.16
Concreto f'c 210 kg / cm2	Q535.63	Q435.83	Q435.83
Formaleta 1 tabla	Q184.00	Q136.00	Q136.00
Mortero de pega	Q76.00	Q80.00	Q80.00
Tacos de concreto 2.5cm	Q27.00	Q21.00	Q21.00
Tacos de concreto 7.5cm	Q8.88	Q8.88	Q8.88
Total	Q1,317.06	Q1,155.35	Q1,212.35

VIII. CONCLUSIONES

A. Ensayos elaborados a los morteros.

- Se consideró mortero tipo M en la realización de los sistemas a comparar ya que es el que recomienda el FHA, sin embargo al observar los resultados de la resistencia a la compresión, resistencia a la adherencia entre el mortero y la mampostería y del coeficiente de fricción entre el mortero tipo M y el ladrillo llamado “súper block liviano”, se pudo concluir que no es el mortero ideal para la mampostería de este tipo de ladrillo, ya que el tipo de mortero depende de la mampostería ya que cambia las propiedades de cada material.
- Se observó que en el ensayo de resistencia a la compresión del mortero existió una variación considerable en el tipo de mezcla S. Debido a que se realizó la prueba según la descripción de la norma ASTM C109 se entiende que tal variación es debida a la diferencia de los materiales con los que se trabaja en Guatemala en relación con las que se hicieron para la normas del ASTM
- Los porcentajes, tanto de retención de agua, como de contenido de aire en las muestras de mortero de los cuatro tipos presentados realizadas para todos los ensayos mostrados en este trabajo satisficieron las especificaciones del ASTM, en específico de la norma C 270 del ASTM.

B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.

- Los ensayos realizados indican que sus medidas no son exactamente las indicadas por el proveedor, tienen variantes los cuales se deben posiblemente a su fabricación y tipo de calidad asegurada por el proveedor, puesto que se utilizaron calidad estándar y no la calidad superior.
- La resistencia a compresión obtenida fue menor para la unidad de mampostería que la propuesta por el proveedor, se obtuvo un valor de 53.14 kg/cm² siendo este el último resistido previo al colapso. Por el lado de la

absorción se determinó que este ladrillo tiene una calidad tipo media, influyendo en la adherencia de la mampostería al mortero. Posiblemente para mejorar la calidad de la adherencia se puede mejorar con un mortero adecuado, con contenido alto de cal para poder controlar la cantidad de agua retenida y la absorción de las demás propiedades del mortero.

- Las unidades de mampostería combinadas con el mortero reflejan una mejora en su resistencia a la compresión, posiblemente fue por la combinación utilizada de un mortero con resistencia mayor y contenido de cal balanceado, aunque no sea el mayor contenido de cal.
- En los muretes de tipo S predominó la falla por adhesión, evidenciándose así una pobre adhesión entre el mortero y las piezas. El poseer mayor contenido de cal mejoró su retención de agua, pero perdió en resistencia por lo que esto también afectó en el sentido que el mortero fallara mucho antes que la mampostería haciendo así que no se comportará como una mampostería ensamblada como tal. Mientras que en los muretes de tipo M se pudo observar mecanismos de falla más variados, observándose una conjunción de mortero – pieza más eficiente, haciendo que ambos trabajaran en conjunto, esto se evidencia en el tipo de falla semi – diagonal conseguida en el murete M2.
- El mayor valor a resistencia último fue de 1.28 kg/cm² para los muretes tipo M, y de 1.20 kg/cm² para los muretes tipo S. Se pudo observar que los valores obtenidos de resistencia a cortante para los muretes tipo M fueron más constantes, que los obtenidos para los muretes tipo S.
- De acuerdo a los resultados obtenidos para los dos distintos grupos de muretes, y de acuerdo a las características de la mampostería (el ser un elemento muy rígido), se concluye que para este tipo de unidad de mampostería se usen relaciones de cemento a cal de alrededor del 25% como máximo. En otras palabras

que se encuentren arriba de la intersección de las curvas esfuerzo – retención del agua. Lo cual aproximadamente corresponde a las dosificaciones de mortero tipo M.

- De acuerdo a lo observado en los ensayos a compresión diagonal, y de acuerdo a las trayectorias de falla desarrolladas en los muretes, podemos confirmar las expresiones teóricas que mencionan que la falla por cortante es originada en la sección central y se dirige hacia los extremos de la diagonal cargada. Esto como respuesta a los esfuerzos internos de tensión (a lo largo de la diagonal horizontal) y de compresión (a lo largo de la diagonal vertical) originados, que en conjunto generan los esfuerzos cortantes.

C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.

- La carga máxima soportada por los muros de solera intermedia fue de 9362.07 kg, 7957.76kg y 9830,18kg para los muros 1,2 y 3 respectivamente siendo los resultados más confiables los obtenidos para los muros 1 y 3 soportando cargas por encima de los 9,000kg. Estas cargas a su vez produjeron deformaciones en la parte superior de 30.73mm, 16.76mm y 34.43mm para los muros 1, 2 y 3 respectivamente, siendo muy similares las deformaciones para los muros 1 y 3 logrando soportar la mayor carga. Las deformaciones a media altura fueron de 8.78mm, 9.56mm y 17.55 mm para los muros 1,2 y 3 respectivamente, no siendo constantes en la cantidad de carga soportada ni en el comportamiento carga-desplazamiento.
- El rango elástico para los muros de mampostería en los tres muros con solera se presentó desde la carga cero hasta los 2,800kg aproximadamente. Luego de esta carga se comenzaron a escuchar crujidos y comenzaron a aparecer distintas rajaduras a distintas cargas. El comportamiento de las deformaciones también varía en magnitud luego de los 2,800 kg de carga manteniéndose constante tres fases en el comportamiento del muro a la relación carga-deformación. En los tres muros se presentó un rango lineal, un rango lineal medio, a veces complicado de identificar y un último

comportamiento final en el que las deformaciones crecieron con mucha rapidez.

- Para los muros 2 y 3 se nota que el punto crítico en el cual cambió la pendiente fuerza-deformación se da luego de pasada la marca de los 1.5-2mm de deformación. Luego de esta deformación el poco incremento de carga lograba grandes cambios en la deformación, demostrando ser crítico los desplazamientos más que la carga a la que ocurren. Aunque, para ambos casos este cambio se dio luego de los 6,000 kg de carga.
- Comparando el muro sin solera con los muros con solera, se observa que en ambos presentan los tres comportamientos distintos a lo largo del ciclo de carga, siendo los puntos en los que se presentaron los cambios con mayor deformación y menor carga para los cambios de elástico a semiplástico y de semiplástico a plástico. La mayor diferencia resulta del comportamiento luego de entrar al rango plástico, cuando las deformaciones comienzan a ser mayores a los 3 mm
- Las fallas se dieron en ángulos menores a los 45° debido a la existencia de una solera intermedia, aunque una vez las grietas atravesaron la solera se dirigieron en línea recta desde el punto de falla hasta la esquina inferior a compresión.
- En relación a las deformaciones teóricas comparadas con las obtenidas por los resultados de laboratorio se puede deducir que el modelo matemático es más conservador y atinado para cargas menores a los 2,800kg. Luego de esta carga, que coincide con el cambio al estado semi plástico, el modelo matemático pierde exactitud hasta ser completamente equívoco. No se logró encontrar un modelo matemático que lograra explicar con exactitud el comportamiento de las deformaciones con el incremento de cargas ya que los otros modelos propuestos presentaban datos equivocados.

- Respecto al mortero utilizado, a pesar de ser la mezcla recomendada para este tipo de construcciones, el mortero tipo M no logró adherirse a la mampostería provocando fallas de adherencia entre el mortero y la mampostería. Estas fallas se hicieron más notorias en las uniones del concreto con la mampostería, dejándose ver como el mortero se pegó mejor al concreto que a la mampostería.
- Con respecto a la cuantificación de materiales el muro de mampostería confinada mixta con solera intermedia presenta un costo 14% más caro que un muro sin solera intermedia con los precios a diciembre del 2010.

D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).

- La colocación de refuerzo horizontal interior dentro de las juntas entre unidades de mampostería, presenta una disminución en el desplazamiento en el punto medio del muro con respecto a su altura. Debido a que en el muro sin refuerzo se observa más un desplazamiento más uniforme en los dos puntos.
- Por medio de los ensayos se pudo observar que las trayectorias de falla manifestadas en los muros ensayados, cumplen con las expresiones teóricas que indican que estas fallas se originan en la sección central y se dispersan hacia los extremos de la diagonal cargada del muro, como respuesta a las fuerzas de compresión y tensión a las que está sometido.
- Los muros reforzados horizontalmente en las juntas presentan un incremento de un 30% aproximadamente de resistencia a la carga lateral a comparación de un muro que no tiene ninguna clase de refuerzo horizontal. A la vez se podría decir que la inversión extra necesaria para implementar el refuerzo en

los muros es pequeña a comparación a lo que ganamos en resistencia a las cargas laterales.

- La adherencia es un punto muy importante e influyente en la resistencia a las cargas laterales por lo que se debe poner mucha atención en la calidad del material de pega.
- Se determinó que los muros con refuerzo horizontal interior soporta una carga lateral en promedio de 9596.13 Kg el cual nos da un 30% más de resistencia a carga lateral que el muro parámetro (sin ningún refuerzo horizontal).
- La ductilidad es un aspecto muy importante para el rendimiento de un muro confinado y que el refuerzo horizontal es una alternativa muy eficiente para aumentar la ductilidad, ya que se observa que los muros reforzados horizontalmente tienen un desempeño elasto-plástico muy bueno ya que aumenta su resistencia notablemente y el desplazamiento es mínimo a comparación al aumento de resistencia.
- En cuanto a las hipótesis planteadas al inicio del estudio, y de acuerdo a los resultados obtenidos y las variables medidas en el presente estudio podemos mencionar que se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la nula, Para poder generalizar este concepto se necesita de mayor investigación experimental.

IX. RECOMENDACIONES

Con base a toda la información recopilada, los resultados obtenidos y las experiencias acumuladas en el desarrollo del presente trabajo de investigación, se puede emitir opiniones y valoraciones, así como recomendaciones, las cuales son mencionadas a continuación:

A. Ensayos elaborados a los morteros.

- Se recomienda tomar en consideración los resultados de resistencia a la compresión del mortero en base a cada tipo de mampostería que existe, ya que no se puede considerar un mismo tipo de mezcla para trabajarlo con todos en general.

B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.

- Se recomienda determinar las propiedades cualitativas y cuantitativas de los materiales que se utilizaran en un sistema constructivo o diseño, para así poder determinar su comportamiento y estandarizar los materiales utilizados. Así mismo utilizar equipos de laboratorio calibrados y que se encuentren en buen estado para la ejecución de las pruebas, ya que esto puede llegar a influenciar significativamente en los resultados a obtener.
- En cuanto al diseño experimental de los ensayos a compresión diagonal elaborados, se considera necesario que para ensayos futuros que se preste especial atención durante el montaje del muro se zunche el mismo con cinta, sin ejercer presión sobre este de tal forma que este permanezca más seguro, ya que durante los ensayos y por la característica de los mismos, en muchas ocasiones los muretes presentaron fallas en forma explosiva, e inesperada que pudiera afectar a las personas que estuvieran observando la ejecución de los mismos.

C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.

- Con respecto al comportamiento del muro, también se podrían buscar modelos que expliquen el comportamiento luego del rango elástico, ya que los modelos investigados presentan deformaciones dentro del rango elástico y limitan los resultados a los obtenidos en este rango. Se podrían estudiar modelos que expliquen las deformaciones plásticas para poder diseñar con mayor exactitud los muros, en especial cuando se traten de cargas horizontales sísmicas, las cuales se diseñan más allá del rango elástico.

D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).

- Se recomienda un estudio de durabilidad del hierro utilizado como refuerzo horizontal interior entre las juntas, debido a que el recubrimiento es mínimo y si éste no está cubierto de alguna clase de químico que evite la corrosión, éste podría llegar a afectar notablemente el desempeño del muro.

X. LITERATURA CITADA

Aguilar G.; Alcocer S. 2001. *Efectos del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales*. Cenapred. Pp 191

Alcocer S. 1997. *Comportamiento sísmico de edificaciones de mampostería: una revisión*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Pp 191

Anderson D.; Brzev S. 2009. *Seismic Design guide for Masonry Buildings*. Canadian Concret Masonry Producers Association. Pp 317

Aristizabal J.; González M. 2000. *Guía de estudio de sismoresistencia*. Centro de Construcción –SENA-. Pp 27

Armhein J. 1992. *Guía Informativa para mampostería reforzada con lechada*. Instituto de Mampostería de América. Pp 30

Armhein J. 1995. *Reinforced Masonry Engineering Handbook Clay and Concrete Masonry*. 5ta Ed. Masonry Institute of America. Pp 469

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2001. *Manual de Construcción, Evaluación, Rehabilitación, Sismo resistente de viviendas de Mampostería*. La Red de Estudios Sociales en Prevención de desastres de América Latina –LARED-. Pp 173

Asociación Guatemalteca de Ingenieros Estructurales Sismicos, NR-4 2004.

Besada R. 1998. *Recomendaciones de diseño para mampostería reforzada*. Universidad de los Andes. Pp 205

Brzev S. 2007. *Earth - Quake Resistant Confined Masonry Construction*. National Information Center of Earthquake Engineering Indian Institute of Technology Kanpur. Pp 99

Corzo M. 2004. *Notas mampostericas*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Pp 51

Fomento de Hipotecas Aseguradas, *FHA*. 2002.

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología - INSIVUMEH-. 2006. Sismología. Obtenido de: <http://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/indice%20sismo.htm> Fecha de acceso: 12/06/2010.

Meli R. 2009. *Diseño Estructural*. 2da. Ed. Limusa. Pp 595

Miranda E. 2004. *Comportamiento mecánico de la mampostería confinada*. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp 43

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. 2007. Pp 47

Ruiz J.; Sánchez T.; Miranda E. 2001. *Capítulo 6 Observaciones sobre el Comportamiento y Diseño de Edificaciones de mampostería en Zonas Sísmicas*. CENAPRED. Pp 38

Ruiz J.; Sanchez T.; Miranda E. 2001. *Comportamiento sísmico de edificios de mampostería no reforzada*. Cenapred. Pp 44

San Bartolome A. 1994. *Construcciones de Albañilería -Comportamiento sísmico y diseño estructural-*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Pp 246

XI. OTRAS REFERENCIAS

1. Colunga A.; Juárez A.; Salinas V. 2007. Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y sujetos a cargas laterales. Revista de Ingeniería Sísmica No. 76. Pp 32
2. Luders H.; Hidalgo P. 1986. Resistencia al esfuerzo de corte de muros de albañilería armada. Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Católica de Chile

XII. ANEXO

A. Ensayos elaborados a los morteros.

Ilustración 74. Bases metálicas para la realización de cubos de mortero para ensayos de 5cm X 5cm.

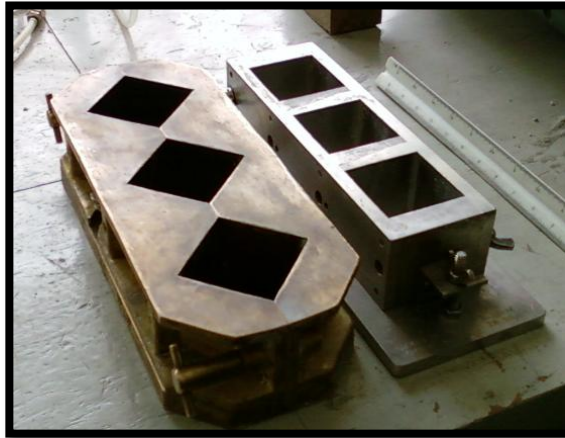


Ilustración 75. Herramientas utilizadas para la realización de las mezclas de mortero.



Ilustración 76. Muestra para observar antes de desencofrar las muestras de cubos de mortero.



Ilustración 77. Colocación correcta del sistema completo para el ensayo de adherencia.



B. Ensayos a unidad simple y prismas de mampostería.

Ilustración 78. Compresión de unidad de ladrillo.



Ilustración 79. Prismas de ladrillo ensayados a compresión.



Ilustración 80. Gato hidráulica de prueba a compresión.



Ilustración 81. Prismas a someterse a ensayo a compresión diagonal.



Ilustración 82. Prisma ensayado S1 (falla por adherencia).



Ilustración 83. Prisma ensayado S2 (Falla combinada).



Ilustración 84. Prisma ensayado S3 (Falla por adherencia).



Ilustración 85. Prisma ensayado S4 (Falla combinada).



Ilustración 86. Prisma ensayado M1 (Falla por adherencia).



Ilustración 87. Prisma ensayado M2 (Falla semi-diagonal).



Ilustración 88. Prisma ensayado M3 (Falla combinada).



Ilustración 89. Prisma ensayado M4 (Falla por adherencia).



C. Ensayos de muros confinados con solera según norma FHA y AGIES.

Ilustración 90. Falla a corte de muro 1 con solera intermedia.



Ilustración 91. Gráfica carga vs. Deformación superior comparativa entre muro 1 y 4

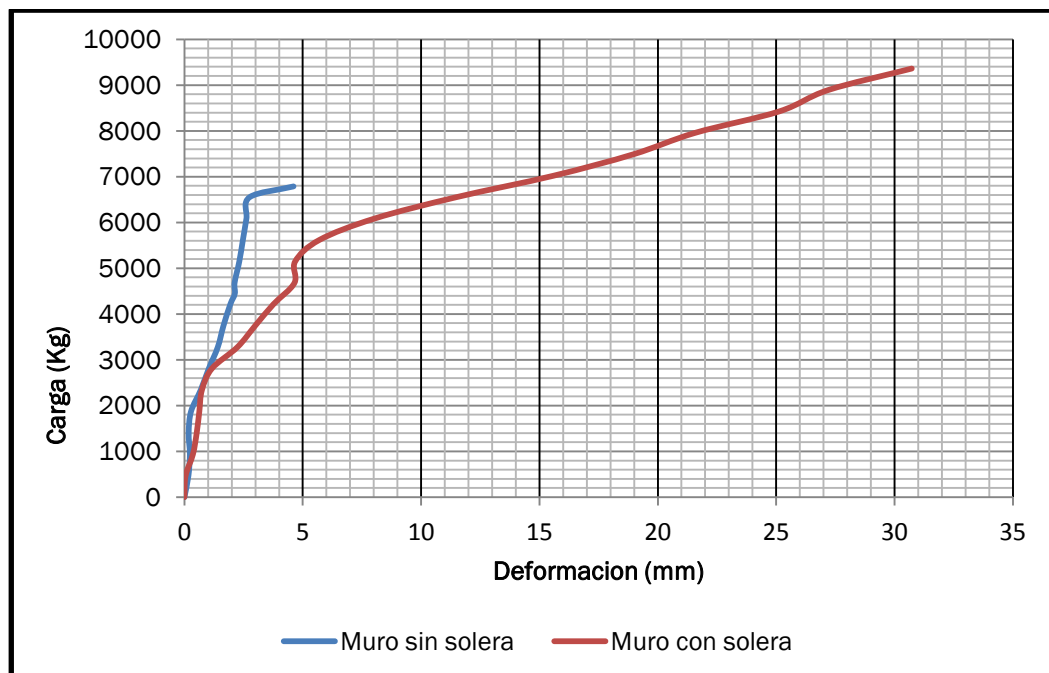


Ilustración 92. Gráfica carga vs. Deformación superior comparativa entre muro 2 y 4.

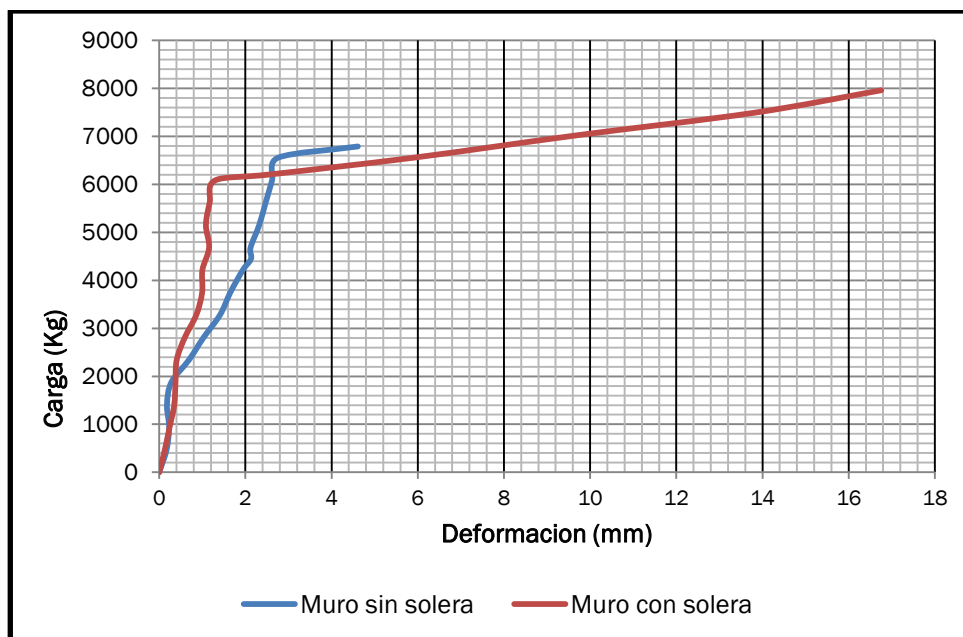


Ilustración 93. Gráfica carga vs. Deformación superior comparativa entre muro 3 y 4.

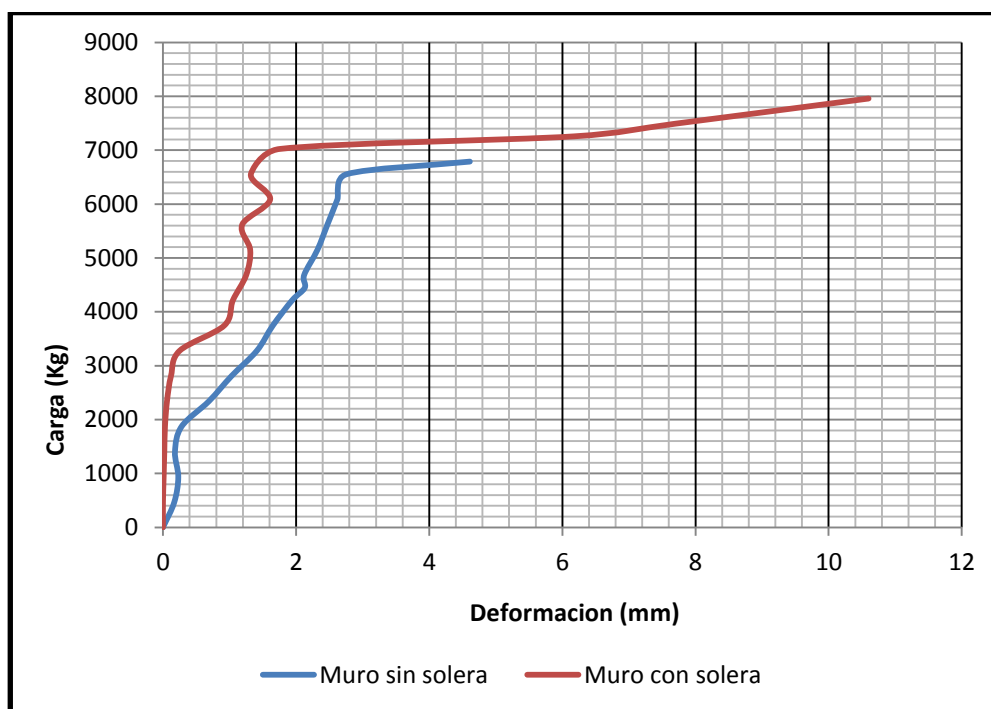


Ilustración 94. Comparación de fallas diagonales entre muro con solera intermedia y sin solera intermedia.

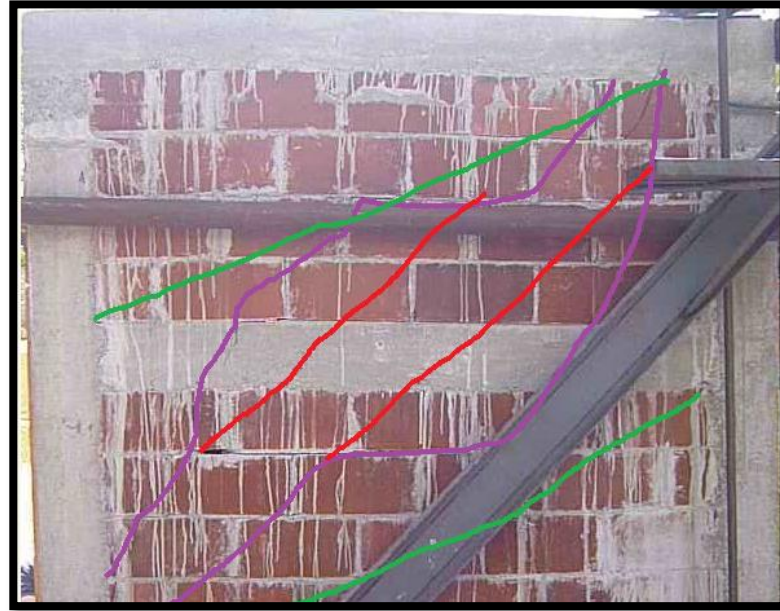


Ilustración 95. Gráfica comparativa entre deformación superior teórica vs práctica.

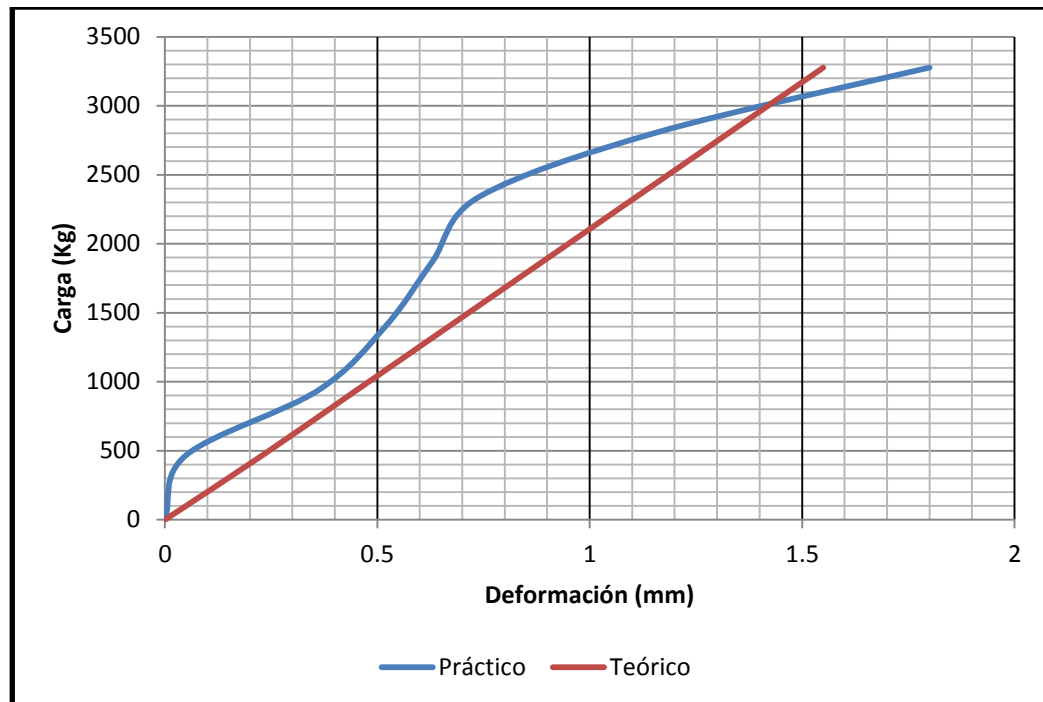


Ilustración 96. Gráfica comparativa entre deformación a media altura teórica vs práctica.

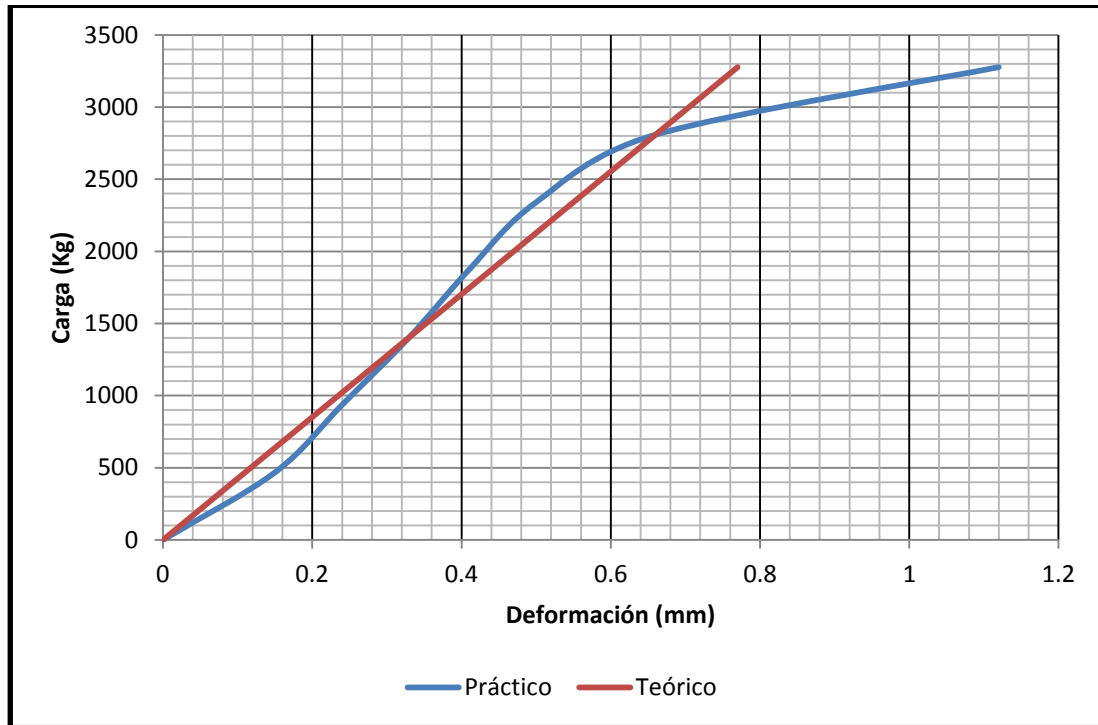


Ilustración 97. Falla de adherencia entre mortero y ladrillo.



D. Ensayos de muros confinados con refuerzo horizontal distribuido según normas NSR-10 (colombianas) y NTC (mexicanas).

Ilustración 98. Grietas en el extremo de aplicación de carga.



Ilustración 99. Grietas en el extremo inferior opuesto del lado de aplicación de carga.



Ilustración 100. Grietas en la parte central de la mampostería.



Ilustración 101. Poca adherencia entre ladrillo y mortero.



Ilustración 102. Superficie lisa en mortero de pega.



Ilustración 103. Carga vs. Deformación muro 4 (sin refuerzo horizontal).

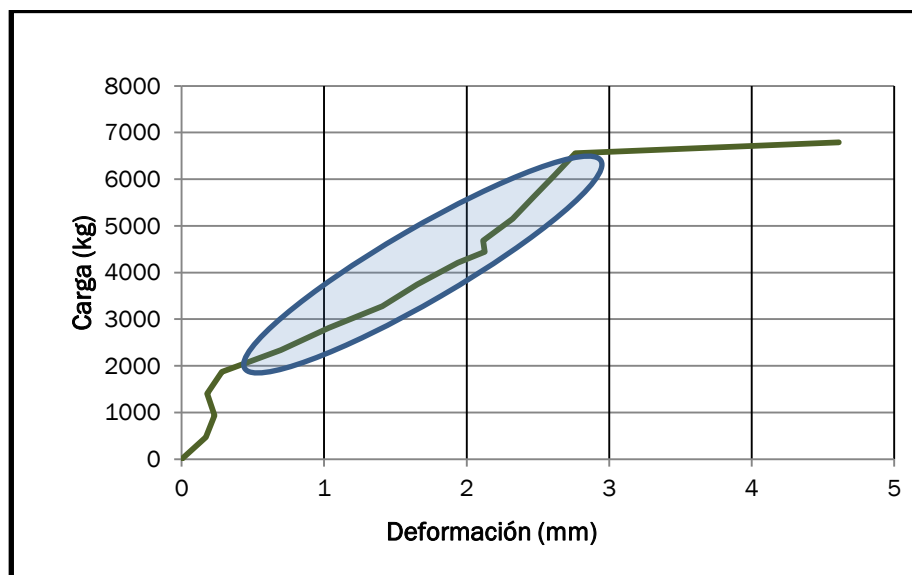


Ilustración 104. Carga vs. Deformación muro 5 (refuerzo horizontal distribuido).

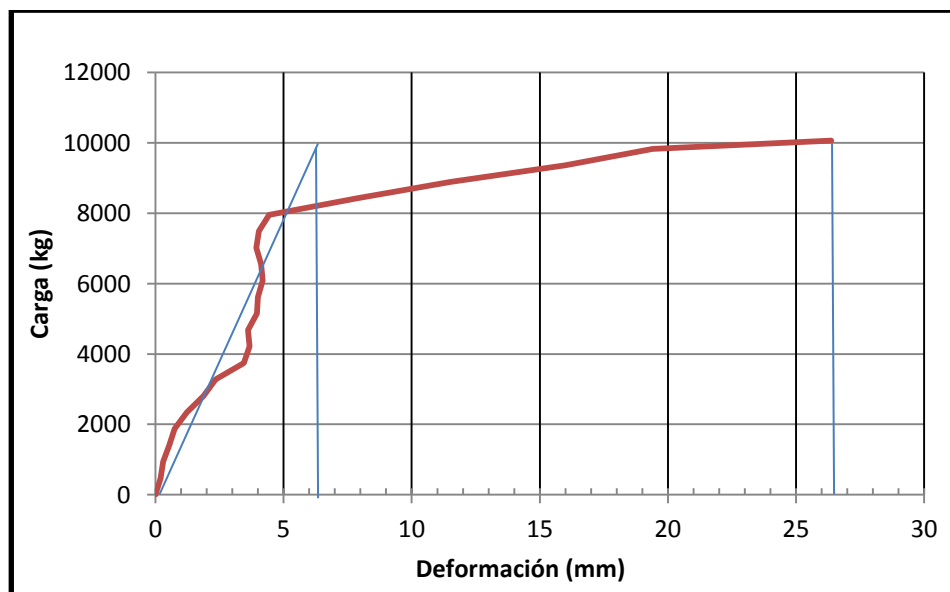


Ilustración 105. Carga vs. Deformación muro 6 (refuerzo horizontal).

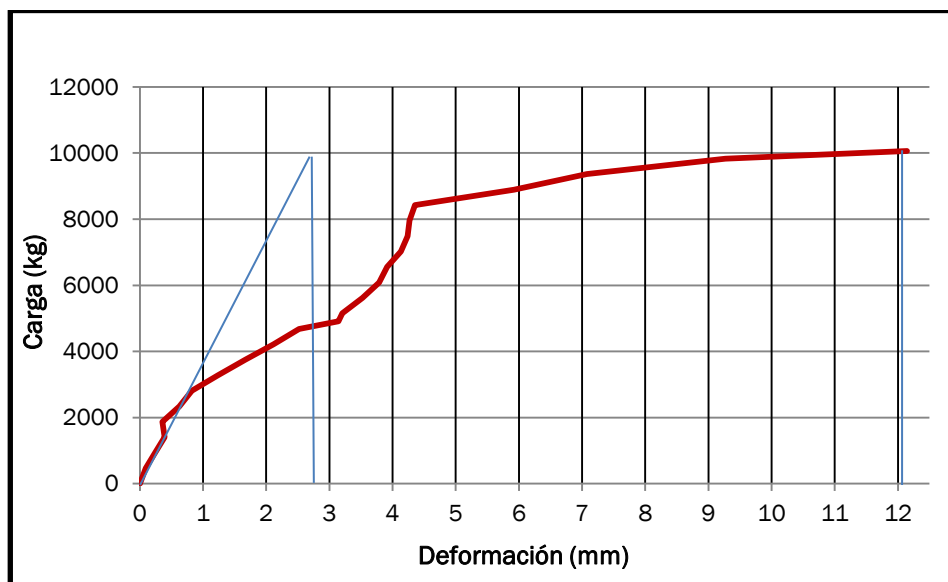
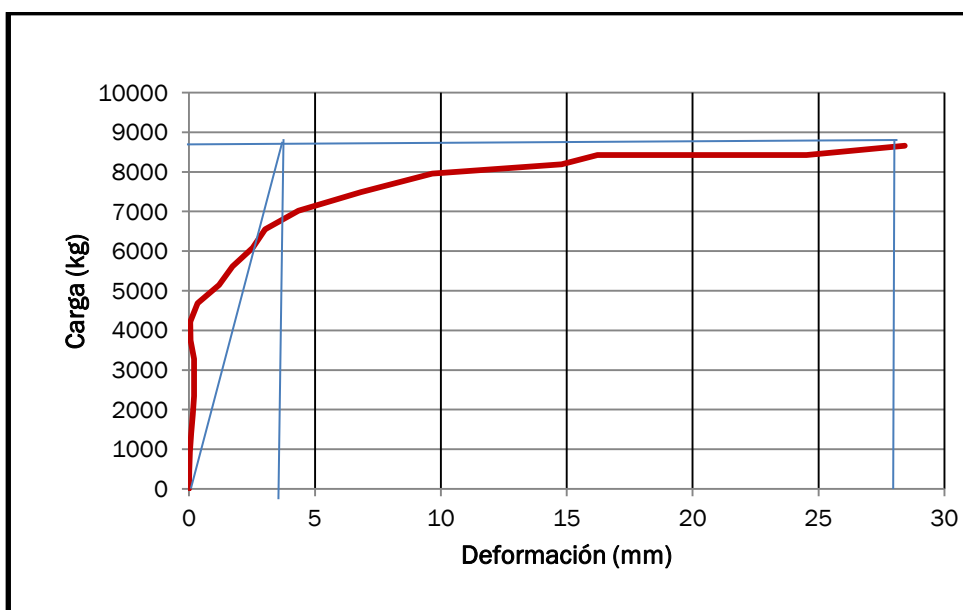


Ilustración 106. Carga vs. Deformación muro 8 (refuerzo horizontal).



E. Cálculo de deformaciones en Mathcad.

$$k(E,A,I,L) := \begin{pmatrix} E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 & -E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 12E \cdot \frac{I}{L^3} & 6E \cdot \frac{I}{L^2} & 0 & -12E \cdot \frac{I}{L^3} & 6E \cdot \frac{I}{L^2} \\ 0 & 6E \cdot \frac{I}{L^2} & 4E \cdot \frac{I}{L} & 0 & -6E \cdot \frac{I}{L^2} & 2E \cdot \frac{I}{L} \\ -E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 & E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -12E \cdot \frac{I}{L^3} & -6E \cdot \frac{I}{L^2} & 0 & 12E \cdot \frac{I}{L^3} & -6E \cdot \frac{I}{L^2} \\ 0 & 6E \cdot \frac{I}{L^2} & 2E \cdot \frac{I}{L} & 0 & -6E \cdot \frac{I}{L^2} & 4E \cdot \frac{I}{L} \end{pmatrix}$$

Seguidamente se muestra la matriz de rotación R:

$$R(\theta) := \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

El ángulo θ está medido en sentido anti horario para pasar de coordenadas locales a globales.

La diagonal equivalente del muro de mampostería se encuentra articulada al marco rígido por lo que su matriz de rigidez en coordenadas locales es:

$$D_{Local}(E,A,L) := \begin{pmatrix} E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 & -E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 & E \cdot \frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Rigideces de las columnas y la viga en coordenadas globales de la estructura:

$$E_{col} := 22200 \quad I_{col} := 933 \quad A_{col} := 280 \quad L_{col} := 120 \quad \text{en cm y kg}$$

$$k_{cL} := k(E_{col}, A_{col}, I_{col}, L_{col})$$

$$E_{viga} := 22200 \quad I_{viga} := 933 \quad A_{viga} := 280 \quad L_{viga} := 240$$

$$k_v := k(E_{viga}, A_{viga}, I_{viga}, L_{viga})$$

$$k_{cG} := R\left(\frac{-\pi}{2}\right)^T \cdot k_{cL} R\left(\frac{-\pi}{2}\right)$$

Rigidez de la diagonal en coordenadas globales de la estructura:

$$E := 22200 \quad A_c := 20 \cdot 14 = 280 \quad G_m := 2400 \quad A_m := 200 \cdot 14 = 2.8 \times 10^3$$

$$h := 240 \text{ cm}$$

Calculo de las dimensiones de la diagonal

relación de aspecto

$$\lambda := \frac{E \cdot A_c}{G_m \cdot A_m} = 9.25 \quad \text{OK}$$

$$\zeta := \frac{240}{240} = 1 \quad \text{OK}$$

$$w_{\text{diagonal}} := (0.35 + 0.022\lambda) \cdot h = 1.328 \text{ m}$$

$$A_d := 199 \quad L_d := 268 \quad h := 120 \quad E_d := 6000 \quad b := 240$$

$$D_G := R\left(\text{atan}\left(\frac{h}{b}\right)\right)^T \cdot D_{\text{Local}}(E_d, A_d, L_d) \cdot R\left(\text{atan}\left(\frac{h}{b}\right)\right)$$

Teniendo ya las matrices de rigidez en coordenadas globales de cada elemento estructural procedemos a armar la matriz de rigidez de la estructura.

$$T1 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$T2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Vector de carga en Kg

$$AE := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 468.1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Deformación en los apoyos

Deformaciones en los grados de libertad

$$\begin{pmatrix} D4 \\ D5 \\ D6 \\ D7 \\ D8 \\ D9 \\ D13 \\ D14 \\ D15 \\ D16 \\ D17 \\ D18 \end{pmatrix} := K^{-1} \cdot (AE) = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline D5 & 9.669 \cdot 10^{-3} \\ \hline D6 & 8.115 \cdot 10^{-4} \\ \hline D7 & -9.117 \cdot 10^{-5} \\ \hline D8 & 0.023 \\ \hline D9 & 1.232 \cdot 10^{-3} \\ \hline D13 & -7.229 \cdot 10^{-5} \\ \hline D14 & 0.011 \\ \hline D15 & -4.925 \cdot 10^{-4} \\ \hline D16 & -9.391 \cdot 10^{-5} \\ \hline D9 & 0.023 \\ \hline D10 & -5.401 \cdot 10^{-4} \\ \hline D11 & -5.649 \cdot 10^{-5} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} D1 \\ D2 \\ D3 \\ D10 \\ D11 \\ D12 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Reacciones en (D) diagonales

$$R_{D7} := DG \cdot \begin{pmatrix} D7 \\ D8 \\ D9 \\ D13 \\ D14 \\ D15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 385.867 \\ -192.934 \\ 0 \\ -385.867 \\ 192.934 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$R_{C1} := kcG \cdot \begin{pmatrix} D1 \\ D2 \\ D3 \\ D4 \\ D5 \\ D6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -60.412 \\ -420.381 \\ 5.199 \times 10^3 \\ 60.412 \\ 420.381 \\ 2.051 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

$$R_{D8} := DG \cdot \begin{pmatrix} D4 \\ D5 \\ D6 \\ D10 \\ D11 \\ D12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 330.482 \\ -165.241 \\ 0 \\ -330.482 \\ 165.241 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$R_{C5} := kcG \cdot \begin{pmatrix} D10 \\ D11 \\ D12 \\ D13 \\ D14 \\ D15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -77.206 \\ 255.14 \\ 6.254 \times 10^3 \\ 77.206 \\ -255.14 \\ 3.011 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

F. Esquemas del muro.

1. Muros con solera.

Ilustración 107. Elevación del muro con solera intermedia.

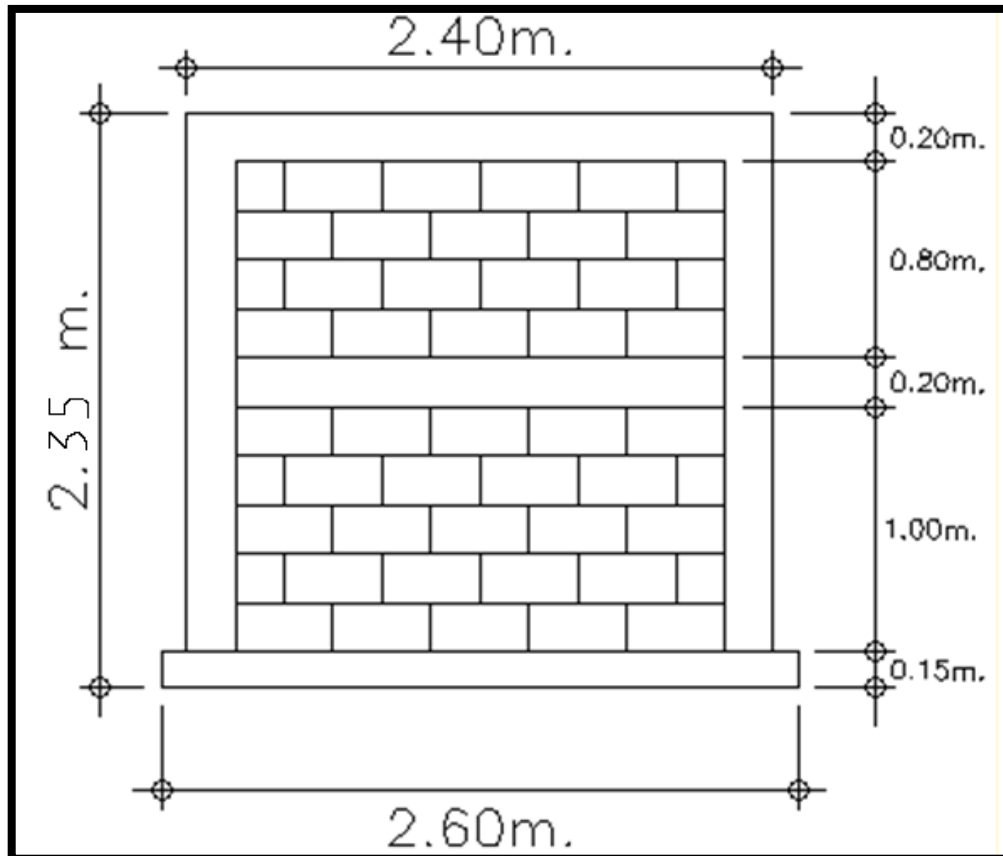


Ilustración 108. Detalle del armado del cimiento.

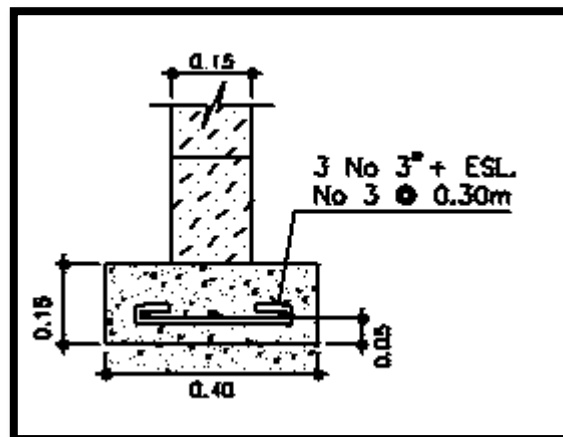


Ilustración 109. Detalle del armado de las soleras y cimientos.

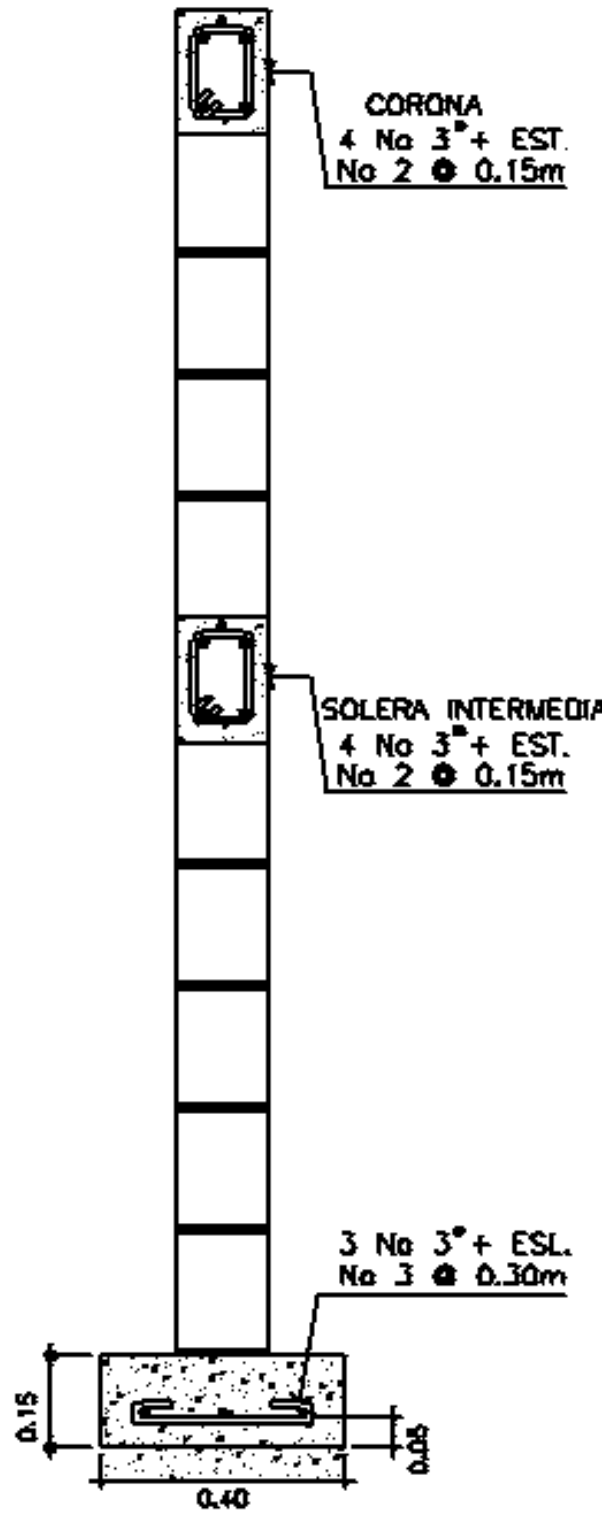


Ilustración 110. Detalle 1 de armado de columnas de muro con solera.

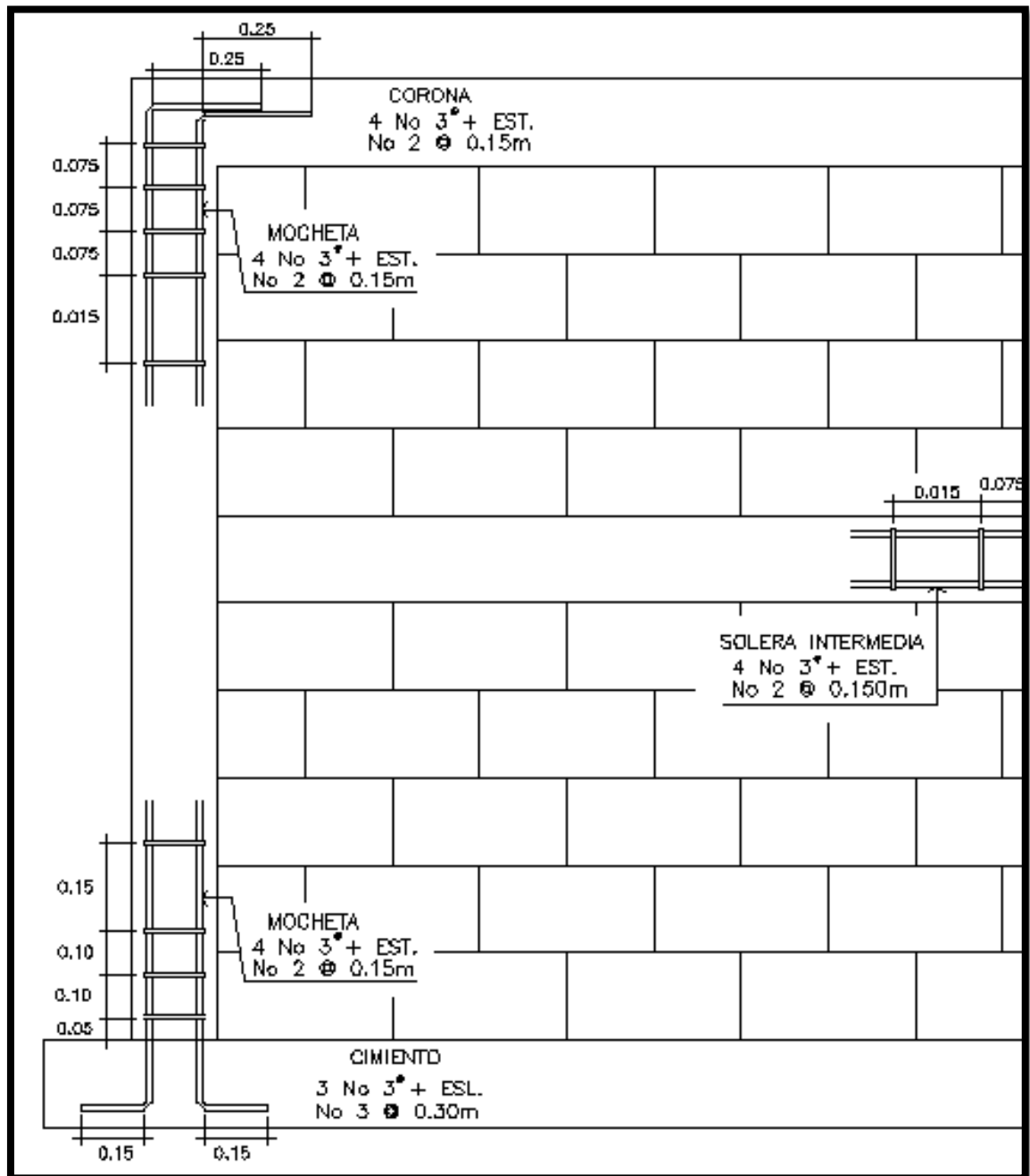
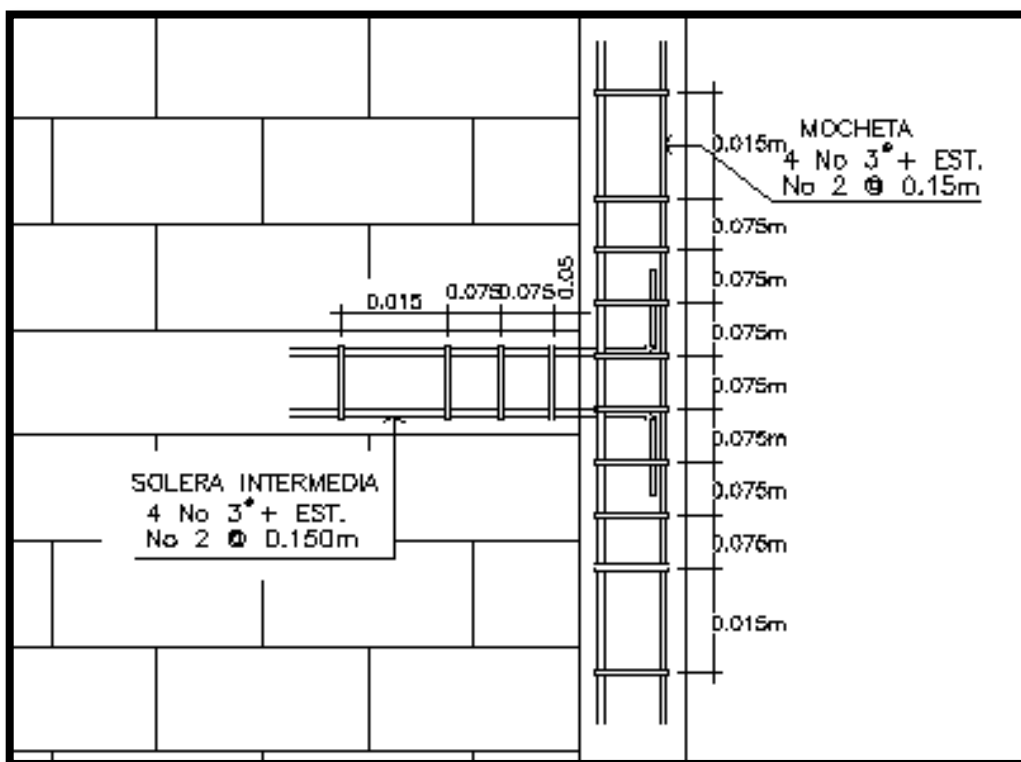


Ilustración 111. Detalle 2 de armado de columnas de muro con solera.



2. Muros con refuerzo horizontal distribuido.

Ilustración 112. Detalle de cimiento corrido.

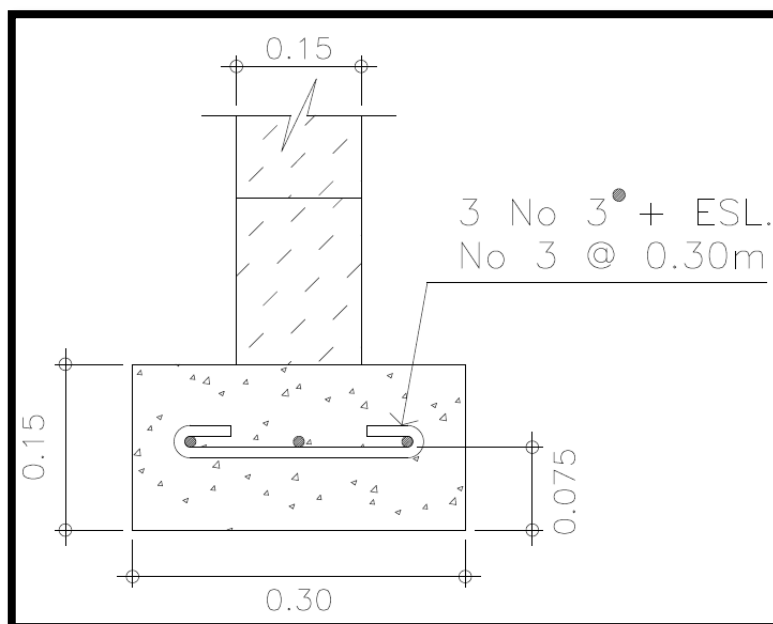


Ilustración 113. Elevación del muro con refuerzo horizontal distribuido.

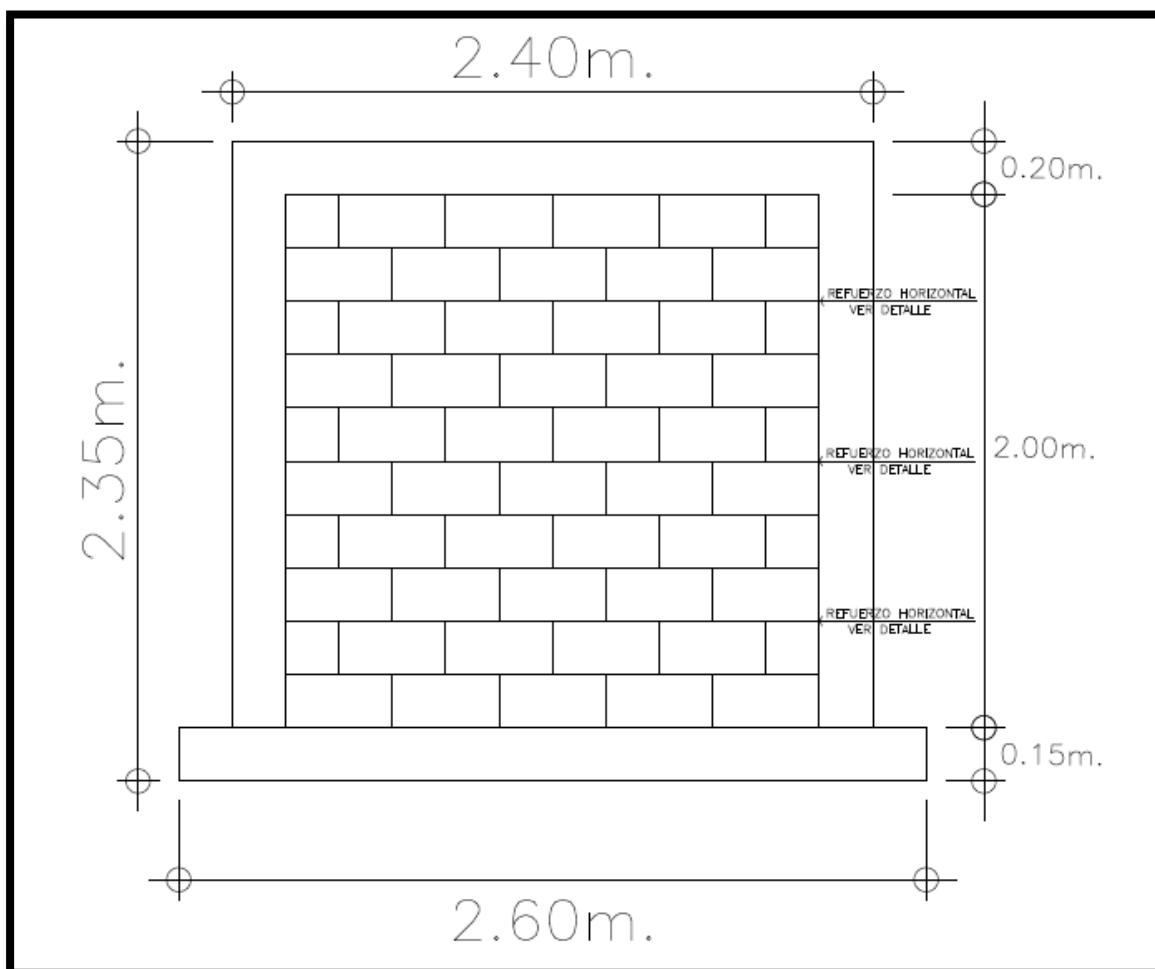


Ilustración 114. Detalle de armado de soleras y cimientos.

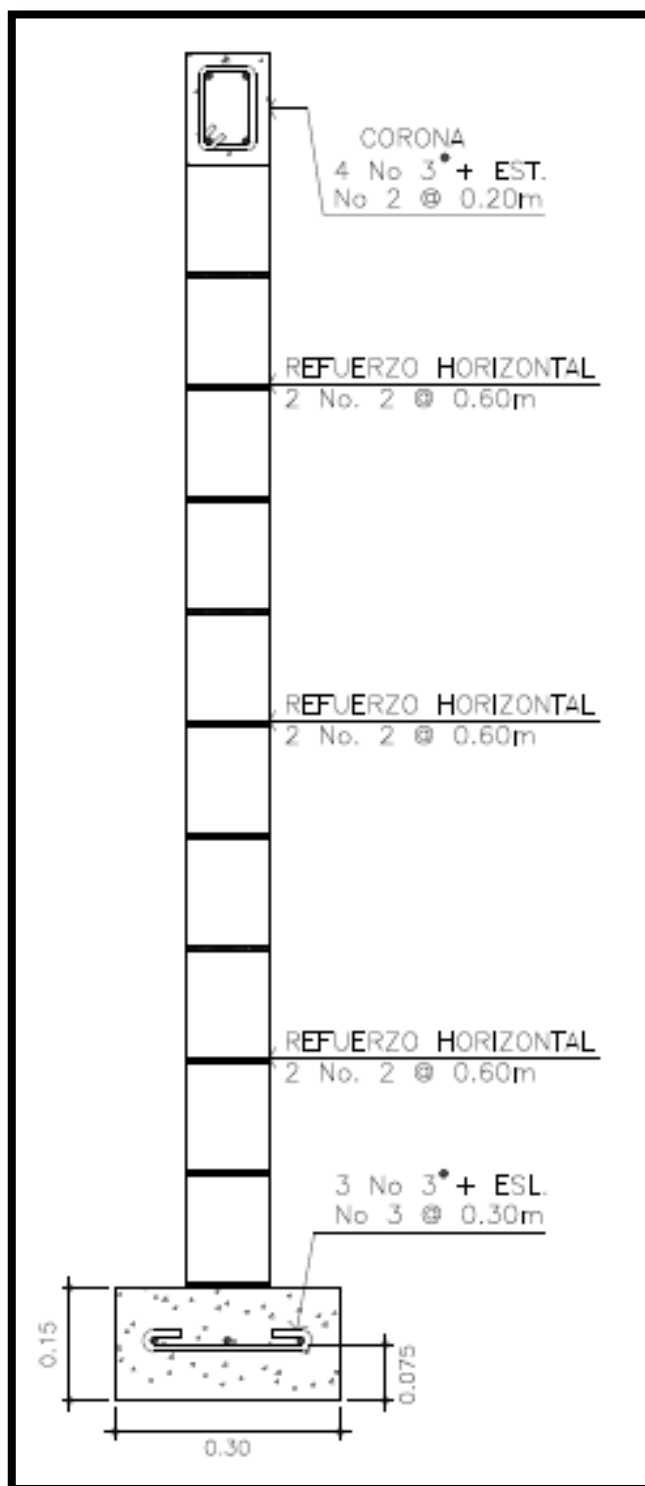


Ilustración 115. Detalle de armado de columnas de muro con solera.

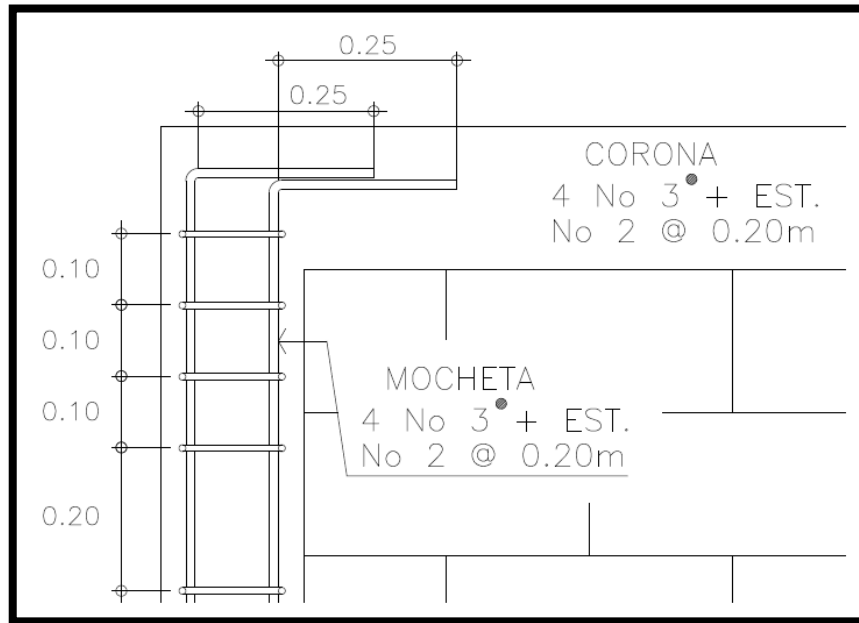


Ilustración 116. Detalle 2 de armado de columnas con solera.

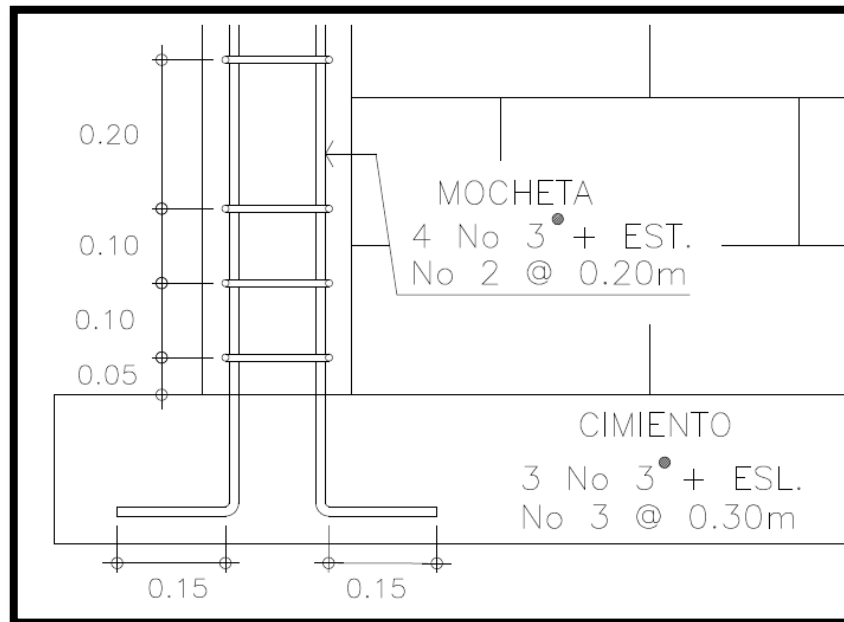


Ilustración 117. Detalle de refuerzo horizontal interior.

