

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE
MAMPOSTERÍA SOMETIDA A COMPRESIÓN UNIAXIAL ELABORADA
CON MATERIALES CARACTERÍSTICOS DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.

POR

JOSÉ LUIS ÁLVAREZ BARAJAS

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE
MAMPOSTERÍA SOMETIDA A COMPRESIÓN UNIAXIAL ELABORADA
CON MATERIALES CARACTERÍSTICOS DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.

POR

JOSÉ LUIS ÁLVAREZ BARAJAS

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL.

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN.

FEBRERO, 2016.

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Civil.
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la Tesis « Investigación del Comportamiento Estructural de Mampostería Sometida a Compresión Uniaxial Elaborada con Materiales Característicos del Estado de Nuevo León», realizada por el alumno José Luis Álvarez Barajas, con número de matrícula 1651303, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Estructural.

El Comité de Tesis:

Dr. Fabián René Ruvalcaba Ayala
Director de tesis

M.I. Luis Manuel Aranda Maltez
Asesor Externo

Dr. Roberto Pérez Martínez
Co-director de tesis

Vo. Bo.

Dr. Cesar Antonio Juárez Alvarado
Subdirección de Estudios de Posgrado.

San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Febrero 2016.

Como un homenaje a mis padres.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
AGRADECIMIENTOS	XVII
RESUMEN	XIX
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	3
1.3 HIPÓTESIS PRINCIPAL	3
1.3.1. HIPÓTESIS SECUNDARIA.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	5
2.1 INFLUENCIA ESTRUCTURAL DEL MORTERO, PIEZAS E INTERACCIÓN.....	6
2.1.1. MORTERO.....	6
2.1.1.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO (ESTADO PLÁSTICO).....	7
2.1.1.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO (ESTADO SECO).....	8
2.1.2. PIEZAS.....	11
2.1.3. INTERACCIÓN.....	16
2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA.....	18
2.2.1. ACOMODO Y RELACIÓN ENTRE DIMENSIONES DEL MURO.....	19
2.2.2. COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN.....	21
2.2.3. COMPORTAMIENTO A TENSIÓN.....	26
2.2.4. COMPORTAMIENTO A CORTANTE.....	26

2.2.5. COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS BIAXIALES.....	28
2.2.6. COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS DE FLEXIÓN FUERA DEL PLANO.	29
2.2.7. COMPORTAMIENTO A FLEXO-COMPRESIÓN.....	30
2.3 MODOS DE FALLA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA.....	31
2.3.1. FALLA POR CARGA AXIAL A COMPRESIÓN.....	31
2.3.2. FALLA POR CARGA AXIAL A TENSIÓN.....	32
2.3.3. FALLA POR CARGAS A CORTANTE.....	33
2.3.4. FALLA POR CARGAS BIAXIALES.....	34
2.3.5. FALLA POR CARGAS A FLEXIÓN.....	35
2.3.6. FALLA POR CARGAS LATERALES ESTÁTICAS Y CÍCLICAS.	36
2.4 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE MAMPOSTERÍA.....	37
2.4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	37
2.4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAGONAL.....	39
2.4.3. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CARGA.....	40
2.5 FORMULAS PARA OBTENER LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA MAMPOSTERÍA.....	42
2.5.1. FORMULAS EMPÍRICAS.....	42
2.5.2. FORMULAS FENOMENOLÓGICAS.....	44
CÁPITULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	51
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS.....	52
3.3 FASE EXPERIMENTAL.....	53
3.3.1. MORTEROS.....	53
3.3.2. PIEZAS.....	55
3.3.3. MURETES.....	56
3.3.3.1. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	58
3.4. PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS.....	61
3.4.1. MORTEROS.....	61
3.4.1.1. ENSAYES A COMPRESIÓN.....	61
3.4.1.2. ENSAYES A TENSIÓN.....	62
3.4.2. PIEZAS.....	63
3.4.3. MURETES.....	65
3.4.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	68
3.4.5. GRAFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO.....	69
CAPÍTULO 4.RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	71

4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TENSIÓN DEL MORTERO.....	71
4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS PIEZAS.....	72
4.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS MURETES.....	74
4.4. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN	76
4.4.1. MORTEROS A COMPRESIÓN.	76
4.4.2. MORTEROS A TENSIÓN.	77
4.4.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MORTERO.....	79
4.4.4.1. PIEZAS DE CONCRETO NORMAL.....	80
4.4.4.2. PIEZAS DE CONCRETO LIGERO.	81
4.4.4.3. PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA.....	82
4.4.4.4. PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS.....	83
4.4.5. MURETES.....	84
4.4.5.1. MURETES DE CONCRETO NORMAL.....	84
4.4.5.2. MURETES DE CONCRETO LIGERO DE 2 CELDAS.....	86
4.4.5.3. MURETES DE ARCILLA DE DOS CELDAS.	88
4.4.5.4. MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA.	90
4.4.5.5 MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MURETES	92
4.5. MODOS DE FALLA.....	95
4.5.1. MODOS DE FALLA EN MORTEROS.....	95
4.5.2. MODOS DE FALLA EN PIEZAS.....	96
4.5.2.1. PIEZAS DE CONCRETO NORMAL.....	96
4.5.2.2. PIEZAS DE CONCRETO LIGERO.	97
4.5.2.3. PIEZAS DE ARCILLA.....	98
4.5.3. MODOS DE FALLA EN MURETES.	99
4.5.3.1 MURETES ELABORADOS CON BLOQUES DE CONCRETO NORMAL.....	100
4.5.3.2. MURETES ELABORADOS CON BLOQUES DE CONCRETO LIGERO.	101
4.5.3.3. MURETES ELABORADOS CON TABIQUES DE ARCILLA DE DOS CELDAS.....	102
4.5.3.4. MURETES ELABORADOS CON TABIQUES DE ARCILLA MULTIPERFORADOS.....	103
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	105
5.1. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS PIEZAS.....	105
5.1.1. ANÁLISIS DE VALORES DE RESISTENCIA EN BLOQUES DE CONCRETO.	106
5.1.1.1 RESISTENCIA DE DISEÑO PARA PIEZAS DE CONCRETO.....	108
5.1.2 ANÁLISIS DE VALORES DE RESISTENCIA EN PIEZAS DE ARCILLA.	110
5.1.2.1 RESISTENCIA DE DISEÑO PARA PIEZAS DE ARCILLA.....	112
5.2. ESTUDIO DE VALORES DE RESISTENCIA OBTENIDOS EN MORTERO.	114

5.3. ESTUDIO DE LOS VALORES A COMPRESIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE EN MURETES.....	116
5.3.1. MURETES DE CONCRETO	116
5.3.1.1. MURETES DE CONCRETO NORMAL.....	116
5.3.1.2. MURETES DE CONCRETO LIGERO.....	123
5.3.2. MURETES DE ARCILLA.....	128
5.3.2.1. MURETES DE ARCILLA CON DOS HUECOS.....	128
5.3.2.2. MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA.....	133
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	137
ÁPENDICE A. VERIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS PIEZAS.....	140
BIBLIOGRAFÍA	144

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA	2
FIGURA 2. A) ENSAYE DE PILAS. B) ENSAYE DE COMPRESIÓN DIAGONAL	2
FIGURA 3. ELEMENTOS BÁSICOS DE LA MAMPOSTERÍA	6
FIGURA 4. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA DIFERENTES MEZCLAS DE MORTERO [15].	9
FIGURA 5. RELACIÓN ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA UN MORTERO EN ESTADO TRIAXIAL [18].	10
FIGURA 6. DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE ACUERDO AL PORCENTAJE DE HUECOS [19].....	11
FIGURA 7. INTERACCIÓN ENTRE TENSIÓN Y COMPRESIÓN BIAxIAL EN PIEZAS [24]	13
FIGURA 8. RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA DE PILAS Y PIEZAS DE CONCRETO [6]	13
FIGURA 9. RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA DE PILAS Y PIEZAS DE ARCILLA [6].....	14
FIGURA 10. VISTA MICROSCÓPICA DEL ENLACE GENERADO ENTRE UNA PIEZA Y MORTERO [31]	16
FIGURA 11. EFECTO DE LA SUCCIÓN DE LAS PIEZAS EN LA ADHERENCIA PARA DIFERENTES PROPORCIONAMIENTOS DE MORTERO [32].....	17
FIGURA 12. COMPORTAMIENTO DE JUNTA HORIZONTAL ANTE CARGAS DE COMPRESIÓN [30]	18
FIGURA 13. ARREGLOS TÍPICOS DE MUROS [16]	20
FIGURA 14. MURO DE ADOBE CON UNA RELACIÓN DE ESBELTEZ DE 5.	20

FIGURA 15. RELACIÓN DE ASPECTO Y RIGIDEZ DE UN MURO [36].....21

FIGURA 16. ESFUERZOS ACTUANTES SOBRE PIEZAS Y MORTEROS [12].....22

FIGURA 17. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA PRISMAS ELABORADOS CON DISTINTAS PIEZAS Y MORTERO CEMENTO:CAL:ARENA (1:0:3) [5]22

FIGURA 18. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PARA PRISMAS ELABORADOS CON DISTINTAS PIEZAS Y MORTERO CEMENTO:CAL:ARENA (1:1:6) [5]23

FIGURA 19. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE A) PIEZAS, B) MORTERO Y C) PRISMAS [15]25

FIGURA 20. DIAGRAMAS ESFUERZO-DESPLAZAMIENTO PARA TENSIÓN EN DIRECCIÓN PARALELA A LA JUNTA A) FALLA GLOBAL B) FALLA DE LA INTERFASE [37].26

FIGURA 21. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE MURETES SOMETIDOS A COMPRESIÓN DIAGONAL PARA DIFERENTES PIEZAS DE ARCILLA [5].....27

FIGURA 22. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE MURETES SOMETIDOS A COMPRESIÓN DIAGONAL PARA DIFERENTES PIEZAS DE CONCRETO Y SILICOCALCAREAS. [5]27

FIGURA 23. RESISTENCIA BIAxIAL DE MAMPOSTERÍA CON UNIDADES SOLIDAS DE ARCILLA [39]29

FIGURA 24. A) FLEXIÓN PARALELA A LAS JUNTAS DE MORTERO, B) FLEXIÓN PERPENDICULAR A LAS JUNTAS DE MORTERO [33].....29

FIGURA 25. DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA EN FLEXIÓN SIMPLE CORRESPONDIENTE A LA FLEXIÓN PRODUCIDA PARALELA Y PERPENDICULARMENTE A LAS JUNTAS [33].....30

FIGURA 26. CARGA QUE PRODUCE FLExo-COMPRESIÓN EN UN MURO [29].....30

FIGURA 27. FALLAS TÍPICAS A COMPRESIÓN [38].....32

FIGURA 28. FALLAS TÍPICAS A TENSIÓN [38].....33

FIGURA 29. FALLAS TÍPICAS A CORTANTE [38]34

FIGURA 30. INTERACCIÓN ENTRE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN EN UN MURETE [40]35

FIGURA 31. FALLA POR FLEXIÓN EN UN MURO [38]	36
FIGURA 32. FALLA POR: A) CARGA LATERAL B) CARGA CÍCLICA REVERSIBLE [29]	36
FIGURA 33. ESPECÍMENES EXPERIMENTALES A) PILA (NMX-C-464-2013) [38], B) MURETE (RILEM) [42]	38
FIGURA 34. RELACIÓN ENTRE RESISTENCIAS EXPERIMENTALES OBTENIDAS EN LOS ENSAYES SIN Y CON ROZAMIENTO ENTRE EL DISPOSITIVO Y EL MURO PARA DISTINTAS ESBELTECES [43]	39
FIGURA 35. RELACIÓN ENTRE LAS RESISTENCIAS EXPERIMENTALES OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS SIN Y CON ROZAMIENTO ENTRE EL DISPOSITIVO Y EL MURO PARA DISTINTAS ESBELTECES REFERIDOS A ESBELTEZ A 2 [43]	39
FIGURA 36. MODELO EXPERIMENTAL PARA PRUEBAS A COMPRESIÓN DIAGONAL [38]	40
FIGURA 37. COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS PROMEDIO A VELOCIDAD RÁPIDA Y VELOCIDAD LENTA [23]	40
FIGURA 38. CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTALES [23]	41
FIGURA 39. ENVOLVENTES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA PRISMAS Y MUROS DE LADRILLO Y CONCRETO [45]	43
FIGURA 40. RESISTENCIA DEL MORTERO ES ESTADO TRIAXIAL [31]	45
FIGURA 41. ENVOLVENTE DE RUPTURA DE LADRILLO RECOCIDO [31]	45
FIGURA 42. ENVOLVENTE DE FALLA DE LADRILLO RECOCIDO [31]	46
FIGURA 43. CRITERIOS DE FALLA DE LADRILLO RECOCIDO [31]	48
FIGURA 44. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE RESISTENCIA DE MAMPOSTERÍA VS. ESTIMADA [22]	52
FIGURA 45. A) PROCESO DE MEZCLADO, B) PRUEBA DE FLUIDEZ Y C) MOLDES CÚBICOS DE MORTERO	53

FIGURA 46. A) ESPÉCIMEN CUBICO PARA PRUEBAS A COMPRESIÓN B) BRIQUETA PARA PRUEBAS A TENSIÓN	54
FIGURA 47. CONDICIONES DE CURADO POR 28 DÍAS PARA MORTEROS (CUBOS Y BRIQUETAS) .	54
FIGURA 48. A) BLOQUE DE CONCRETO NORMAL DE DOS CELDAS, B) BLOQUE DE CONCRETO LIGERO CON DOS CELDAS, C) TABIQUE DE ARCILLA MULTIPERFORADO CON DOS CELDAS Y D) TABIQUE DE ARCILLA MULTIPERFORADO	55
FIGURA 49. A) RECIPIENTE PARA CALENTAR AZUFRE B) MOLDE PARA CABECEO Y C) PIEZAS CON CABECEO	56
FIGURA 50. A) MURETES DE CONCRETO NORMAL, B) MURETES DE CONCRETO LIGERO, C) MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADAS DE DOS CELDAS Y D) MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA.	57
FIGURA 51. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE MURETES	60
FIGURA 52. EQUIPO DE PRUEBAS, EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y PLACAS PARA COMPRESIÓN.	61
FIGURA 53. MÁQUINA DE PRUEBA Y GRAPAS SUJETADORAS PARA LA PRUEBA A TENSIÓN DIRECTA	62
FIGURA 54. DISPOSITIVO DE CARGA PARA PRUEBAS A COMPRESIÓN DIRECTA EN PIEZAS	64
FIGURA 55. DISPOSITIVO DE CARGA EN MURETES	65
FIGURA 56. DISPOSITIVOS DE TRANSPORTE.....	66
FIGURA 57. INSTRUMENTACIÓN DE LOS MURETES.	68
FIGURA 58. CRITERIOS PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD	69
FIGURA 59. PUNTOS CARACTERÍSTICOS DEL DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO PARA A) PIEZAS Y MORTEROS Y B) MURETES	70
FIGURA 60. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO A COMPRESIÓN PARA MORTERO TIPO I.	76

FIGURA 61. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL DE MORTEROS EXAMINADOS.....	77
FIGURA 62. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO A TENSIÓN PARA MORTERO TIPO 1	78
FIGURA 63. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN A TENSIÓN UNIAxIAL DE MORTEROS EXAMINADOS.....	78
FIGURA 64. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN A TENSIÓN Y COMPRESIÓN UNIAxIAL DE MORTEROS EXAMINADOS.	79
FIGURA 65. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADO NUMÉRICAMENTE PARA PIEZAS DE CONCRETO NORMAL SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL	80
FIGURA 66. DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE PIEZAS DE CONCRETO NORMAL SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL	81
FIGURA 67. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADO NUMÉRICAMENTE PARA PIEZAS DE CONCRETO LIGERO SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL	81
FIGURA 68. DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE PIEZAS DE CONCRETO LIGERO SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL	82
FIGURA 69. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADO NUMÉRICAMENTE PARA PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL	82
FIGURA 70. DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL	83
FIGURA 71. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADO NUMÉRICAMENTE PARA PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL.	83
FIGURA 72. DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN AXIAL	84
FIGURA 73. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADOS MATEMÁTICAMENTE PARA MURETES DE CONCRETO NORMAL A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA POR COMPRESIÓN AXIAL.....	85

FIGURA 74. DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL DE MURETES DE CONCRETO NORMAL A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA. A)650 KG/SEG), B)440 KG/SEG Y C)215 KG/SEG.....	86
FIGURA 75. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADOS MATEMÁTICAMENTE PARA MURETES DE CONCRETO LIGERO A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA POR COMPRESIÓN AXIAL.....	87
FIGURA 76. . DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL DE MURETES DE CONCRETO LIGERO A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA. A)650 KG/SEG), B)440 KG/SEG Y C)215 KG/SEG.....	88
FIGURA 77. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADOS MATEMÁTICAMENTE PARA MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA POR COMPRESIÓN AXIAL.....	89
FIGURA 78. DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL DE MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA. A)500 KG/SEG), B)330 KG/SEG Y C)165 KG/SEG	90
FIGURA 79. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN PROMEDIO Y AJUSTADOS MATEMÁTICAMENTE PARA MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA POR COMPRESIÓN AXIAL.	91
FIGURA 80. DIAGRAMAS EXPERIMENTALES ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL DE MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA. A)500 KG/SEG), B)330 KG/SEG Y C)165 KG/SEG.....	92
FIGURA 81. MODOS DE FALLA EN MORTEROS A COMPRESIÓN.	95
FIGURA 82. MODOS DE FALLA EN MORTEROS A TENSIÓN	96
FIGURA 83. MODOS DE FALLA EN PIEZAS DE CONCRETO	97
FIGURA 84. MODOS DE FALLA EN PIEZAS DE CONCRETO LIGERO	98
FIGURA 85. MODOS DE FALLA EN PIEZAS DE A) ARCILLA MULTIPERFORADA Y B) ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS.	99
FIGURA 86. MODOS DE FALLA EN MURETES DE CONCRETO NORMAL.	100
FIGURA 87. MODOS DE FALLA EN MURETES DE CONCRETO LIGERO	101

FIGURA 88. MODOS DE FALLA EN MURETES ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS. ...	102
FIGURA 89. MODOS DE FALLA EN MURETES ARCILLA MULTIPERFORADA	103
FIGURA 90. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE CONCRETO ELABORADAS EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN.	108
FIGURA 91. COMPARACIÓN GRAFICA DE RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA PIEZAS DE CONCRETO.	109
FIGURA 92. COMPARACIÓN GRAFICA DE RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA PIEZAS DE CONCRETO LIGERO	110
FIGURA 93. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE ARCILLA ELABORADAS EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN.	112
FIGURA 94. COMPARACIÓN GRAFICA DE RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA DE DOS HUECOS.	113
FIGURA 95. COMPARACIÓN GRAFICA DE RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA.	113
FIGURA 96. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN OBTENIDOS EN MORTERO TIPO I (1:0.25:3) A) COMPRESIÓN Y B) TENSIÓN	114
FIGURA 97. COMPARACIÓN GRAFICA DE RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA MORTERO TIPO 1 ..	115
FIGURA 98. VARIACIÓN DE RESISTENCIA AL MODIFICAR LA VELOCIDAD DE CARGA EN MURETES DE CONCRETO.....	117
FIGURA 99. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN OBTENIDO PARA PIEZAS DE CONCRETO NORMAL, MORTERO TIPO I Y MURETE.....	119
FIGURA 100. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL PARA MURETES Y PILAS ELABORADOS EN DIFERENTES INVESTIGACIONES.....	120
FIGURA 101. VARIACIÓN DE RESISTENCIA AL MODIFICAR LA VELOCIDAD DE CARGA EN MURETES DE CONCRETO LIGERO.	123
FIGURA 102. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL PARA MURETES Y PILAS ELABORADOS EN DIFERENTES INVESTIGACIONES.....	125

FIGURA 103. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN A COMPRESIÓN UNIAxIAL PARA MURETES Y PILAS ELABORADOS EN DIFERENTES INVESTIGACIONES.....	126
FIGURA 104. VARIACIÓN DE RESISTENCIA AL MODIFICAR LA VELOCIDAD DE CARGA EN MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADAS DE DOS CELDAS.....	129
FIGURA 105. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN OBTENIDO PARA PIEZAS DE BARRO MULTIPERFORADO DE DOS CELDAS, MORTERO TIPO 1 Y MURETE.....	130
FIGURA 106. VARIACIÓN DE RESISTENCIA AL MODIFICAR LA VELOCIDAD DE CARGA EN MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADAS	133
FIGURA 107. DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN OBTENIDO PARA PIEZAS DE BARRO MULTIPERFORADO, MORTERO TIPO 1 Y MURETE.	135
FIGURA 108. CRITERIOS PARA DETERMINAR LA TOLERANCIA DE FORMA	141

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA PARA DIFERENTES TIPOS DE MORTEROS	7
TABLA 2. DOSIFICACIONES DE DISTINTOS TIPOS DE MORTERO [14]	9
TABLA 3. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN TÍPICAS PARA DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS [21]	12
TABLA 4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA PIEZAS ESTRUCTURALES [26].....	14
TABLA 5. VALORES MÁXIMOS ABSORCIÓN INICIAL Y ABSORCIÓN TOTAL EN 24 HORAS [26]	15
TABLA 6. RESISTENCIA DE MORTEROS A TENSIÓN SEGÚN SU CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA [26].....	17
TABLA 7. ALGUNOS FACTORES QUE DETERMINAN EL COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA.	19
TABLA 8. RESISTENCIA DE DISEÑO A COMPRESIÓN DE LA MAMPOSTERÍA PARA ALGUNOS TIPOS DE PIEZA [14]	23
TABLA 9. EFECTO DEL ESPESOR DE LA JUNTA EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN [22].....	24
TABLA 10. RESISTENCIA DE DISEÑO A CORTE DE LA MAMPOSTERÍA PARA ALGUNOS TIPOS DE PIEZA [14]	28
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS MURETES (BS-1052)	38
TABLA 12. RESULTADOS DE ENSAYES EN PRISMAS [23].	41
TABLA 13. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LAS PIEZAS UTILIZADAS	55

TABLA 14. DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE MURETES.....	57
TABLA 15. VELOCIDADES DE CARGA APLICADAS	65
TABLA 16. RESISTENCIA A COMPRESIÓN OBTENIDA EXPERIMENTALMENTE EN MORTERO TIPO 1	72
TABLA 17. RESISTENCIA A TENSIÓN OBTENIDA EXPERIMENTALMENTE EN MORTERO TIPO 1....	72
TABLA 18. RESISTENCIA MEDIA A COMPRESIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE CONCRETO ELABORADAS EN NUEVO LEÓN.....	73
TABLA 19. RESISTENCIA MEDIA A COMPRESIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE ARCILLA ELABORADAS EN NUEVO LEÓN	74
TABLA 20. RESISTENCIA MEDIA A COMPRESIÓN OBTENIDA EN DISTINTOS TIPOS DE MURETES ELABORADOS EN NUEVO LEÓN.....	75
TABLA 21. MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MORTERO TIPO 1.	79
TABLA 22. PUNTOS PROMEDIO OBTENIDOS PARA MURETES DE CONCRETO NORMAL A DIFERENTES PORCENTAJES DE ESFUERZO.	85
TABLA 23. PUNTOS PROMEDIO OBTENIDOS PARA MURETES DE CONCRETO LIGERO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ESFUERZO.....	87
TABLA 24. PUNTOS PROMEDIO OBTENIDOS DE MURETES DE ARCILLA CON DOS CELDAS A DIFERENTES PORCENTAJES DE ESFUERZOS.....	89
TABLA 25. PUNTOS PROMEDIO OBTENIDOS DE MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ESFUERZOS.....	91
TABLA 26. MÓDULOS DE ELASTICIDAD EN MURETES DE CONCRETO NORMAL Y CONCRETO LIGERO	93
TABLA 27. MÓDULOS DE ELASTICIDAD EN MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA.....	94
TABLA 28. RESISTENCIA A COMPRESIÓN OBTENIDA EN DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE CONCRETO ELABORADAS EN NUEVO LEÓN.....	106

TABLA 29. COMPARACIÓN DE RESISTENCIA EN DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE CONCRETO. ...	107
TABLA 30. RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.	109
TABLA 31. RESISTENCIA A COMPRESIÓN OBTENIDA EN PIEZAS DE ARCILLA OBTENIDA EXPERIMENTALMENTE.	111
TABLA 32. RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS DE ARCILLA DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.	112
TABLA 33. RESISTENCIAS DE DISEÑO PARA MORTERO TIPO 1.	115
TABLA 34. RESISTENCIA PROMEDIO DE MURETES DE CONCRETO NORMAL A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA.	117
TABLA 35. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO DE MURETES CON PIEZAS CONCRETO NORMAL A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA.	118
TABLA 36. RESISTENCIAS PROMEDIO DE MURETES DE CONCRETO NORMAL	118
TABLA 37. VALORES DE RESISTENCIAS Y MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA PILAS Y MURETES.	120
TABLA 38. RESISTENCIA DE DISEÑO (f_m^*) (NTCM-04) [14].	120
TABLA 39. RESISTENCIA PROMEDIO DE MURETES DE CONCRETO LIGERO A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA.	123
TABLA 40. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO DE MURETES CON PIEZAS DE CONCRETO LIGERO A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA.	124
TABLA 41. RESISTENCIAS PROMEDIO DE MURETES DE CONCRETO LIGERO	124
TABLA 42. DIFERENTES MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA PILAS Y MURETES.	126
TABLA 43. RESISTENCIA DE DISEÑO (f_m^*) [14].	127
TABLA 44. RESISTENCIA PROMEDIO DE MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA DE DOS CELDAS A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA.	128

TABLA 45. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO DE MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA DE DOS CELDAS A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA.....	129
TABLA 46. RESISTENCIAS PROMEDIO DE MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA DE DOS CELDAS.	130
TABLA 47. DIFERENTES MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA PILAS Y MURETES.....	131
TABLA 48. TABLAS DE DISEÑO PARA DETERMINAR (f_m^*) A PARTIR DE LA RESISTENCIA DE LAS PIEZAS DE BARRO [14]	131
TABLA 49. RESISTENCIA PROMEDIO DE MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA.	133
TABLA 50. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO DE MURETES CON PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADAS A DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA	134
TABLA 51. RESISTENCIAS PROMEDIO DE MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA	134
TABLA 52. DIFERENTES MÓDULOS DE ELASTICIDAD PARA PILAS Y MURETES.	135
TABLA 53. TABLAS DE DISEÑO PARA DETERMINAR (f_m^*) A PARTIR DE LA RESISTENCIA DE LAS PIEZAS DE BARRO [14].	136
TABLA 54. ESPESORES DE PAREDES PARA BLOQUES LISOS.....	140
TABLA 55. RELACIÓN ENTRE ÁREA NETA Y ÁREA BRUTA EN PIEZAS DE CONCRETO	142
TABLA 56. RELACIÓN ENTRE ÁREA NETA Y ÁREA BRUTA EN PIEZAS DE ARCILLA.....	142

AGRADECIMIENTOS

La realización del presente trabajo fue posible al apoyo de muchas personas e instituciones a las cuales me dispongo a agradecer su ayuda:

- A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Por darme el apoyo y la oportunidad de ser parte de esta prestigiada institución.
- A LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AL INSTITUTO DE INGENIERÍA.
Por proporcionarme el tiempo, conocimientos y equipos, medios indispensables para la realización de este trabajo.
- AL DR. FABIÁN RENE RUVALCABA AYALA.
Por su constancia e interés, y mi más sincero agradecimiento por sus conocimientos, guía, apoyo y consejos al realizar esta investigación.
- AL DR. JORGE H. CHÁVEZ GÓMEZ, AL DR. ROBERTO PÉREZ MARTÍNEZ Y AL M.I. LUIS MANUEL ARANDA MALTEZ.
Por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación
- AL PERSONAL TÉCNICO, BIBLIOTECARIO Y ADMINISTRATIVO.
Agradezco su indispensable ayuda en especial a Marychuy, Beto, Jesús, Ramiro, Jesica y Miriam ya que sin su ayuda mucho de este trabajo no hubiera sido posible.
- A MIS PROFESORES DE LICENCIATURA Y POSGRADO.
En especial al Ing. Alberto Barrón por ser ejemplo académico y de vida.

- A MIS COLEGAS Y GRANDES AMIGOS.

Por siempre estar a mi lado, por sus consejos, apoyo, compañía y gran amistad. Especialmente al Ing. Edwin Rodríguez Martínez, al Ing. Juan Jesús Gutiérrez Trejo, al Ing. Guillermo Ortiz Méndez y al Ing. Alejandro Alvarado Sabag y a Osiris Ramírez

- A MIS HERMANAS

Espero siempre ser un buen ejemplo para ustedes, gracias por nunca abandonarme.

RESUMEN

José Luis Álvarez Barajas
Candidato para el Grado de Maestro en Ciencias
con especialidad en Ingeniería Estructural.
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Civil

Título de estudio:

INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MAMPOSTERÍA SOMETIDA A COMPRESIÓN UNIAXIAL ELABORADA CON MATERIALES CARACTERÍSTICOS DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.

En este trabajo se describen las fases de la investigación experimental realizada para determinar las propiedades mecánicas de estructuras de mampostería, las cuales fueron basadas en materiales locales de la zona Norte de México.

Esta investigación fue dirigida en el laboratorio de estructuras del Instituto de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería Civil.

Las propiedades estudiadas fueron la resistencia a la compresión mediante la aplicación de cargas verticales uniaxiales sobre especímenes de mampostería, así como, propiedades similares en las piezas de mampostería y morteros empleados.

En el Capítulo 1, se presenta una breve introducción sobre el estado de la mampostería estructural en nuestro país. Además, se plantean los objetivos de estudio y la justificación que llevó a realizar este proyecto.

En el Capítulo 2, se exponen las bases teóricas y experimentales en el campo de la mampostería que fueron utilizadas como fundamento para desarrollar esta investigación.

En el Capítulo 3, se presenta el plan experimental desarrollado para lograr los objetivos planteados. Se destacan las variables de estudio, las características de los especímenes, se indica el procedimiento y criterios utilizados para realizar las pruebas, así como, el proceso para la fabricación de los muretes. Además, se muestran todos los instrumentos y equipos utilizados para realizar las pruebas planteadas en la investigación.

El Capítulo 4, contiene los resultados de las pruebas realizadas, se incluyen los valores de resistencia, valores de deformaciones y diagramas esfuerzo-deformación. También, algunas propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad obtenido a través de los diagramas esfuerzo deformación.

El Capítulo 5, muestra un análisis de los resultados obtenidos.

El Capítulo 6, contiene las conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio experimental para determinar el comportamiento mecánico a compresión de la mampostería elaborada con materiales característicos del estado de Nuevo León.

Firma del asesor interno:

Dr. Fabián Rene Ruvalcaba Ayala.

Firma del asesor externo:

M.I. Luis Manuel Aranda Maltez

PLANTEAMIENTO

*“El punto esencial, es que la mampostería no ha estudiado nuestras normas,
su comportamiento no depende de la norma.”*

DR. RICHARD KLIGNER, UNIVERSIDAD DE TEXAS.

1.1 ANTECEDENTES

La definición de mampostería proviene de las palabras mano y puesto, es decir, el elemento que se realiza mediante la colocación de piezas que se unen y acomodan con un mortero de manera manual.

Grandes construcciones como pirámides, torres, puentes, iglesias y palacios se levantaron gracias a la mampostería y actualmente su principal uso es para la construcción de edificaciones de baja y mediana altura debido a su bajo costo, durabilidad, alta eficiencia como material aislante (acústico y térmico), su resistencia al fuego y la facilidad de construcción. El uso de sistemas constructivos a base de mampostería es muy popular en países de Sudamérica, Centroamérica y Europa [1], en México cerca del 90% de las viviendas están construidas a base de muros de cargas realizados con bloques de concreto o ladrillos, un equivalente cercano a 25 millones de viviendas [2].

Debido al amplio uso de la mampostería ha sido necesario desarrollar códigos o reglamentos que normen la construcción y diseño. Para esto, se han recopilado conocimientos existentes, que en un inicio se basaron en empirismo puro, creencias e hipótesis, y ya en la actualidad se han enriquecido con resultados de investigaciones experimentales y numéricas que han dado paso a beneficios directos para el diseño estructural, ya que han permitido mejorar las técnicas de construcción, desarrollar edificios de mampostería más altos, muros más esbeltos y económicos (Figura 1).



Figura 1. Ejemplos de construcciones de mampostería: a) Iglesia de Nuestra Señora de Fátima, México. b) Edificio Monadnock, Estados Unidos. c) Museo Natural de Escocia.

En México, las primeras investigaciones que buscaron explicar el comportamiento de la mampostería se iniciaron alrededor de 1970, época en la que se obtuvieron valores representativos de sus propiedades (Figura 2), además, se realizaron ensayos individuales sobre piezas y morteros para caracterizarlos mecánicamente y así poder relacionar indirectamente su influencia sobre el comportamiento de la mampostería.

Las investigaciones realizadas por Esteva [3], Meli y Reyes [4], Meli [5], Meli y Hernández [6] fueron en gran medida la base experimental para la creación de los primeros códigos oficiales referentes al diseño estructural de mampostería en México.

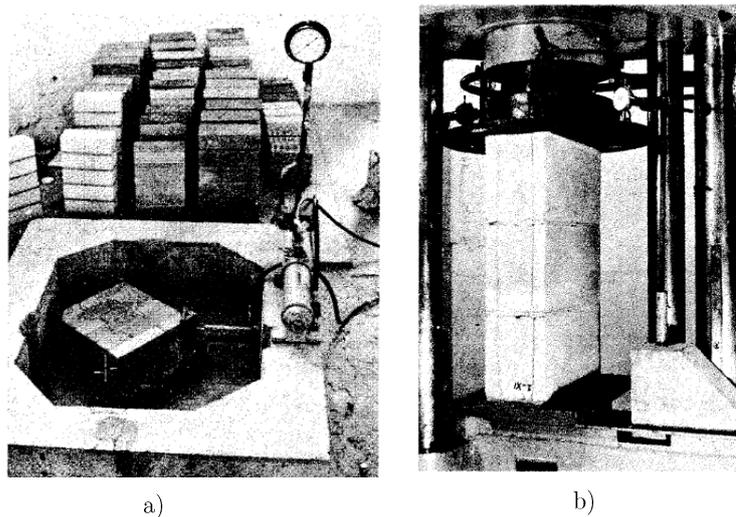


Figura 2. a) Ensayo de pilas. b) Ensayo de compresión diagonal. [4]

A pesar de que el estudio experimental se inició hace más de 40 años, son pocos los estados de la república que cuentan con un código que presente referencias locales para el diseño estructural de mampostería, esto debido a la carencia de trabajo experimental en laboratorios y a los recursos que implica su análisis. Sin embargo, ya en algunas

universidades al sur [7], [8], [9] y norte del país [10] se han estado desarrollando investigaciones tratando de conocer el comportamiento de la mampostería elaborada con materiales de cada región, información que permitirá establecer construcciones seguras y las bases para el diseño estructural de cada estado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL.

Estudiar el comportamiento de estructuras de mampostería sometidos a carga de compresión uniaxial, elaborados con materiales característicos del estado de Nuevo León.

1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS.

- Estudiar el comportamiento mecánico de los componentes básicos de mampostería (Piezas y morteros).
- Estudiar la influencia que tiene la velocidad de carga en la determinación de la resistencia a compresión.
- Determinar valores de resistencia a compresión en mampostería usada localmente para fines de diseño.

1.3 HIPÓTESIS PRINCIPAL

Los materiales utilizados en mampostería para la construcción en el estado de Nuevo León presentan características mecánicas adecuadas que brindan estructuras seguras ante carga axial a compresión.

1.3.1. HIPÓTESIS SECUNDARIA

- El modificar la velocidad de carga en provocará que el comportamiento esperado en la mampostería sea diferente, lo cual dependerá de la magnitud de dicha variación y del tipo de material.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los criterios actuales de diseño de estructuras de mampostería han sido derivados casi en su totalidad mediante bases formuladas con la experimentación en pilas, muros y pequeños especímenes llamados muretes. Esto ha llevado a diseños más confiables, sin embargo, la investigación experimental sobre el comportamiento de estructuras de mampostería ha sido limitada en México.

Usualmente se aplican códigos o normas para realizar el diseño estructural, aunque en ocasiones se desconoce las características mecánicas de los materiales y si son adecuados para aplicar estos procedimientos de diseño, ya que los materiales y los procesos de construcción hacen que la mampostería de cada región presente variadas propiedades mecánicas, que lógicamente, pueden ser diferentes a lo presentado por la mampostería elaborada en una zona determinada. Por lo tanto, es importante para cada estado conocer las características estructurales de los elementos con los que se construye, en este caso mampostería que aunado a un adecuado trabajo entre la experimentación y las bases numéricas permitirá validar, extender y mejorar los métodos actuales de diseño estructural.

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

“La tendencia actual en todos los aspectos del diseño estructural está dirigida al mejor aprovechamiento de los materiales de construcción, que obliga al conocimiento de los elementos citados a fin de proponer criterios y diseños racionales que den lugar a estructuras seguras y económicas”

DR. LUIS ESTEVA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

En este capítulo se presenta el estado del arte sobre estructuras de mampostería y los principales factores que influyen en su comportamiento. Se aborda el comportamiento de las piezas, morteros y después el comportamiento del conjunto.

GENERALIDADES

Al analizar y diseñar mampostería se debe tener en cuenta algunas implicaciones especiales que difieren del comportamiento y criterios aplicados en elementos estructurales realizados a base de concreto reforzado o acero, algunos de estos factores se presentan a continuación:

- | | |
|------------------------|--|
| a) Diversidad | Es debida a las técnicas variadas y formas de construcción al elaborar mampostería, además, a la extensa gama de materiales que se utilizan (ladrillos, bloques, tabiques extruidos, adobes, rocas, etc.) y las distintas dosificaciones de mortero. |
| b) Material Compuesto | Su comportamiento estructural depende de las características mecánicas de los materiales que la conforman, y de la interacción que se genera al trabajar en conjunto. |
| c) Material Anisótropo | La anisotropía propia de las piezas y el mortero se conjuga con su interacción dentro de un muro. |

- d) Construcción Otro aspecto importante, es la sensibilidad de sus variables mecánicas al momento de su construcción, ya que su elaboración es artesanal.
- e) Desconocimiento La mayoría de las investigaciones realizadas sobre mampostería en México, se concentran en la zona centro del país.

2.1 INFLUENCIA ESTRUCTURAL DEL MORTERO, PIEZAS E INTERACCIÓN.

Una peculiaridad de la mampostería es que las piezas y el mortero tienen propiedades mecánicas diferentes y además generan una unión (interacción) que influye de manera importante en el comportamiento mecánico del conjunto. Por lo tanto, la mampostería tiene tres componentes básicos que son: el mortero, las piezas y su interacción (Figura 3), componentes que se describen en los siguientes apartados.

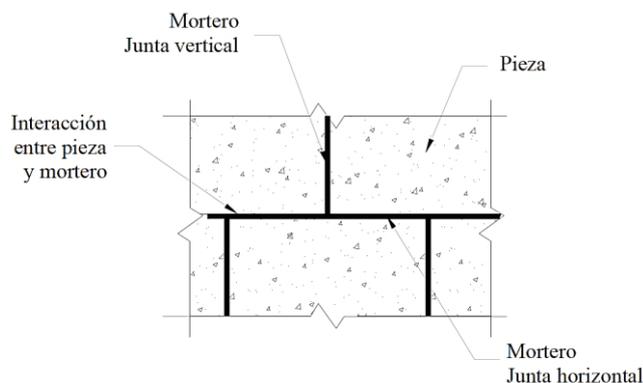


Figura 3. Elementos básicos de la mampostería

2.1.1. MORTERO.

El mortero es una mezcla de agregado fino (arena), aglutinantes (cemento y cal) y agua que forman una mezcla perfectamente plástica al instante de su colocación, mezcla que endurece en corto tiempo, adquiriendo rigidez y resistencia propias [11].

La función principal del mortero en un muro es unir las piezas y sellar las juntas contra la penetración de aire o humedad y sus propiedades mecánicas dependen principalmente de la dosificación y las características de sus componentes, estas se pueden describir en dos etapas: en estado fresco y en estado endurecido.

2.1.1.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO (ESTADO PLÁSTICO)

A) TRABAJABILIDAD:

Es la propiedad más importante en estado plástico de un mortero, ya que de este factor depende en gran medida la correcta construcción de un muro, evitando concentraciones de esfuerzos o excentricidades accidentales. Un mortero con buena trabajabilidad es aquel que presenta deformaciones pequeñas al colocar piezas sobre él, además, una mezcla trabajable facilita el acomodo y colocación de las piezas al construir un muro [12]. La trabajabilidad de una mezcla se puede verificar con la prueba de fluidez, en la que se recomienda oscile cercano a valores de 110% [13].

B) GRADO DE RETENCIÓN DE AGUA:

Un mortero con adecuado grado de retención, es aquel, que permite se genere un enlace fuerte entre la pieza y el mortero, sin que esta absorción modifique su resistencia por pérdida de humedad. Esta propiedad es importante cuando se aplica sobre superficies altamente absorbentes que reducen la humedad del mortero, de esta característica depende considerablemente la resistencia cuando la mampostería es sometida a esfuerzos de tensión o cortante.

La Tabla 1 muestra la capacidad de retención de agua para diferentes dosificaciones de mortero, donde se observa que en morteros con cantidades mayores de cal esta propiedad incrementa.

Tabla 1. Capacidad de retención de agua para diferentes tipos de morteros

Tipos de mortero (ASTM) (Cemento : Cal : Arena)		Grado de retención de agua
Tipo M o S	1 : 0.25 a 0.5 : 0.75 a 4.5	Baja
Tipo N	1 : 1 : 6	Alta
Tipo O	1 : 2 : 9	Muy alta

La trabajabilidad y el grado de retención de agua dependen directamente de una buena relación agua-cemento con la que se obtienen mezclas de buena resistencia, buena adherencia y de baja contracción.

2.1.1.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO (ESTADO SECO)

Cuando el mortero adquiere rigidez y resistencia propia, otras características mecánicas toman importancia, ya que el mortero ahora contribuye en la resistencia de la mampostería. Algunas propiedades importantes son la resistencia a compresión y tensión, la capacidad de deformación y la adherencia [12].

A) RESISTENCIA A COMPRESIÓN:

La resistencia a compresión del mortero es muy variable y depende principalmente del tipo de cementante utilizado y de la relación agua/cementante. Los morteros a base de cal son de baja resistencia a compresión del orden de 1 a 10 kg/cm², sin embargo, son muy trabajables, de fraguado lento y con buena retención de agua. Por otra parte, los morteros a base de cemento tienen resistencias mayores con valores entre 40 y 200 kg/cm² aunque son menos trabajables y su capacidad para retener agua es menor.

Los morteros que contienen más de un cementante se les conoce como morteros mixtos. En muchos sitios del país aún prevalecen los morteros elaborados con cemento y cal que reúnen las ventajas de dos materiales, dando lugar a mezclas de buena resistencia y trabajabilidad. También se usan ampliamente los cementantes premezclados, como los llamados cementos de albañilería que contienen cemento, cal y aditivos plastificadores.

Experimentalmente la resistencia a compresión de un mortero se determina sometiendo a compresión axial especímenes cúbicos de 5 cm. En México, se aplica la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010 [13], donde la resistencia obtenida se usa como un parámetro para el control de la calidad y para la determinación de otras propiedades mecánicas del mortero como el módulo de elasticidad y la resistencia a tensión

La referencia inmediata en México sobre dosificaciones de mortero para uso estructural se encuentra en las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Mampostería (NTCM) [14], que proponen 3 dosificaciones para morteros de uso estructural (Tabla 2).

Tabla 2. Dosificaciones de distintos tipos de mortero [14].

Tipos de mortero (NTCM-2004)	Partes de cemento	Partes de cal	Partes de arena	Resistencia típica a compresión (kg/cm ²)
Tipo I	1	0 a 0.25	No menos de 2.25 y no más de 3 veces la suma de los cementantes	125
Tipo II	1	0.25 a 0.5		75
Tipo III	1	0.5 a 1.25		40

Según la dosificación utilizada el comportamiento será diferente, ya que las características mecánicas de cada agregado dentro de la mezcla contribuyen al comportamiento global del mortero. Para visualizar la influencia de los agregados en el comportamiento de una mezcla, en la Figura 4 presentada por Kaushik [15], se observa como con distintos tipos de mortero se obtienen diferentes niveles de deformación y resistencia, en dichas mezclas se utilizaron tres proporcionamientos manteniendo la misma cantidad de cemento pero variando la cantidad de cal y arena en la mezcla.

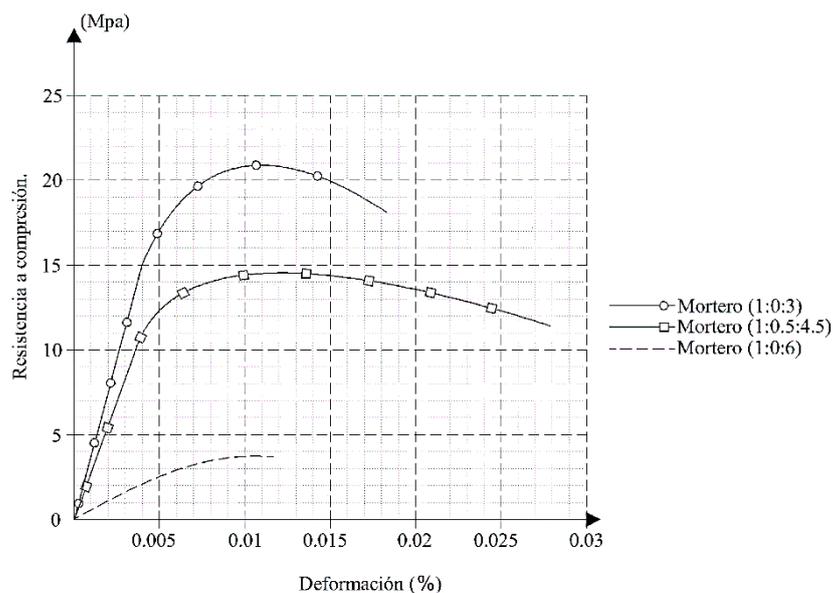


Figura 4. Diagrama esfuerzo-deformación para diferentes mezclas de mortero [15].

De acuerdo al comportamiento de un mortero de uso general, una mezcla cemento: arena bien proporcionada (Mortero 1:0:3), presenta buena resistencia pero una capacidad de deformación moderada, por otra parte, cuando la cantidad de arena es mayor que la de los cementantes, se presentan elementos de baja resistencia y deformación (Mortero 1:0:6). La adición de cal a una mezcla cemento arena logra que el mortero presente buena resistencia y altos niveles de deformación, (Mortero 1:0.5:4.5) Por lo tanto, el rol del cemento es proporcionar resistencia, el rol de la cal no es incrementar la resistencia, si

no brindar propiedades de plasticidad, retención de agua, impermeabilidad, estabilidad volumétrica, durabilidad, adherencia, economía y ductilidad. Por último, la función de la arena es proporcionar estabilidad volumétrica y atenuar la contracción por secado [16].

La resistencia a tensión del mortero mediante ensayos estándar oscila alrededor del 10% de la resistencia a compresión.

B) MÓDULO DE ELASTICIDAD.

Evidencias experimentales muestran que el módulo de elasticidad varía entre 10,000 y 50,000 kg/cm² [17] sin embargo, este valor no corresponde directamente al presentado en una junta entre dos piezas, donde el mortero está sometido a un estado triaxial de esfuerzos, y no a un estado biaxial, esto es porque además de los esfuerzos de compresión provocados por la carga vertical, se generan esfuerzos perpendiculares a la carga debido a la interacción que existe entre las piezas y el mortero. Cuando el mortero es más deformable que la pieza, los esfuerzos suelen ser de tensión y viceversa, esta característica influye directamente en la resistencia a compresión que puede llegar a presentar el muro.

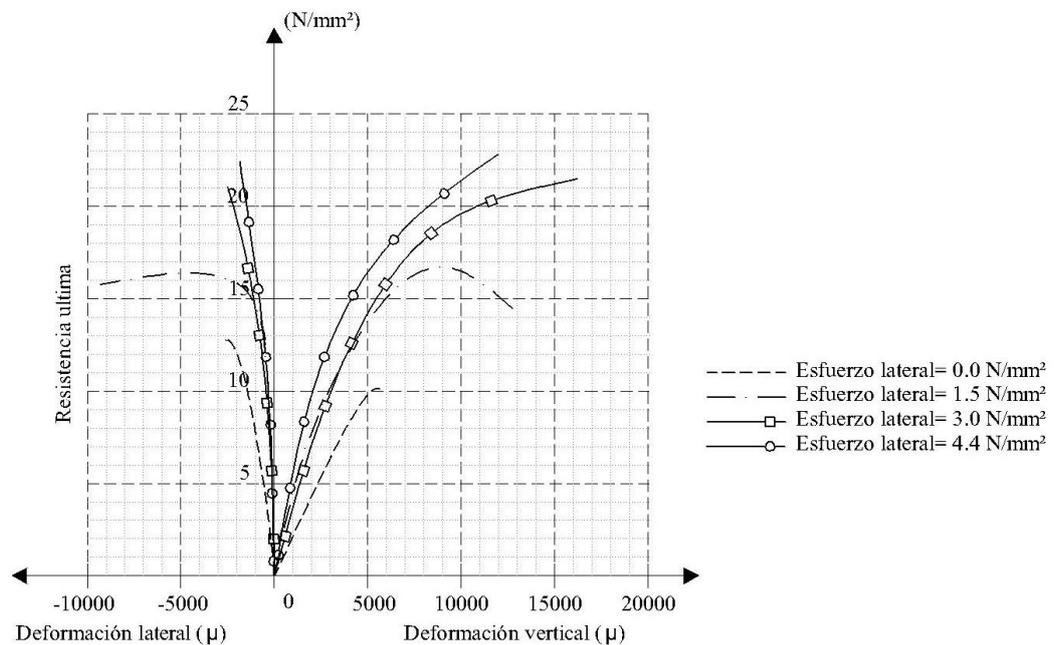


Figura 5. Relación esfuerzo-deformación para un mortero en estado triaxial [18].

La Figura 5 muestra una relación de esfuerzo-deformación [18] que caracteriza como la resistencia a compresión y las deformaciones del mortero se modifican al colocar carga

lateral sobre el espécimen, ya que al incrementar las cargas de compresión lateral, la resistencia a compresión vertical aumenta y al ser de tensión, la resistencia a compresión disminuye.

2.1.2. PIEZAS.

Son elementos estructurales que naturalmente pueden estar compuestos de rocas labradas o no labradas y artificialmente pueden elaborarse a base de arcillas, concreto y otros materiales.

Comúnmente las piezas se elaboran con una geometría regular, que dependiendo del porcentaje de huecos sobre su superficie pueden clasificarse como: sólidas, huecas o multiperforadas (Figura 6). En México, los criterios para las dimensiones, geometría y el tipo de piezas se regulan de acuerdo a la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012 [19].

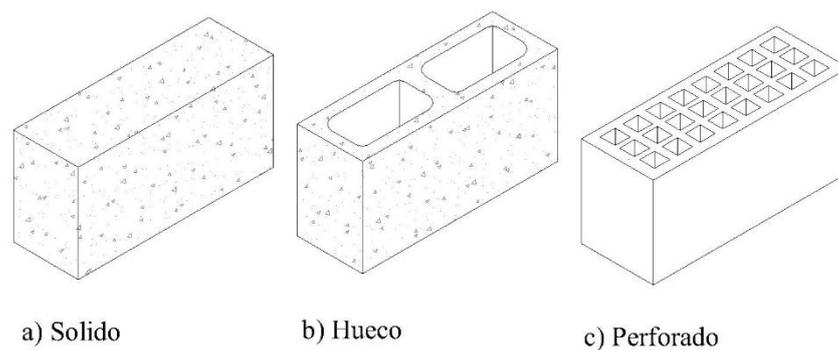


Figura 6. Distintos tipos de piezas de acuerdo al porcentaje de huecos [19].

Una pieza de uso estructural debe tener las propiedades mecánicas necesarias para construir un muro con un espesor mínimo de 100mm, es decir, que tenga la capacidad de soportar las cargas que se generan por acciones gravitacionales y accidentales (sismo, viento, etc.). Las piezas huecas deben tener celdas o perforaciones ortogonales a la cara de apoyo (solo se admiten piezas con huecos verticales) [19].

Las propiedades mecánicas de una pieza dependen principalmente del material, proceso de elaboración y su forma, algunas de las más importantes son: la resistencia a compresión, absorción, humedad y la capacidad de deformación, además de las características estructurales, otras propiedades son importantes y varían dependiendo del tipo de pieza aunque en la mayoría de los casos, las piezas de mampostería presentan buenas propiedades como aislantes térmicos, acústicos y son capaces de resistir fuego.

A) RESISTENCIA A COMPRESIÓN:

En México, para determinar la resistencia a compresión se realiza el ensaye basado en NMX-C-036-ONNCCE-2013 [20], algunas resistencias típicas de unidades de mampostería se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resistencias a compresión típicas para distintos tipos de piezas [21].

Material	Resistencia a compresión, fp. (kg/cm ²)	Coefficiente de variación, (CV)%.
Tabique rojo de arcilla recocido	35 – 115	10 – 30
Tabique extruido perforado verticalmente	150 – 430	11 – 25
	310 – 570	15 – 20
	150 – 400	11 – 26
Tabique extruido macizo	375 – 900	5 – 16
Tabique extruido, huecos horizontales	75 – 80	13 – 18
	50 – 80	16 – 30
Bloques de concreto		
Ligero	20 – 50	10 – 26
Intermedio	20 – 80	7 – 29
Pesado	70 – 145	7 – 28
Tabicón	45 – 120	11 – 35
Silicio Calcáreo	175 – 200	11 – 15

La resistencia a compresión que exhibe la pieza en un muro cargado axialmente, presenta un comportamiento peculiar debido al estado de esfuerzos que se genera. Ya que la pieza, además de estar sometida a cargas de compresión en dirección perpendicular a la junta horizontal, por la interacción entre la pieza y el mortero se generan esfuerzos de tensión paralelos a la junta horizontal. De acuerdo a los trabajos de Meli y Reyes [4], Meli y Hernández [6], Mayes y Clough [22], Priestley y Elder [23] las piezas con alta resistencia a compresión tienden a resistir mayores esfuerzos de tensión antes de agrietarse. Khoo y Hendry [24] presentaron un estudio basado en un diagrama que explica la relación entre compresión y tensión bajo un estado biaxial en ambas direcciones (Figura 7) donde los subíndices C_o y T_o son las resistencias obtenidas mediante un estado de carga uniaxial a compresión y tensión respectivamente. Se puede observar que a mayores esfuerzos de tensión, se presenta una reducción en la resistencia de esfuerzos de compresión, situación similar al que exhibe la pieza en el muro. Sin embargo, este comportamiento es aproximado, ya que se han investigado piezas que desarrollan un estado triaxial de compresión, comportamiento que es contradictorio al comúnmente aceptado [53]. La

importancia de esta propiedad es que al fracturarse una pieza, el muro pierde estabilidad, dando paso a agrietamientos y en algunos casos a la falla.

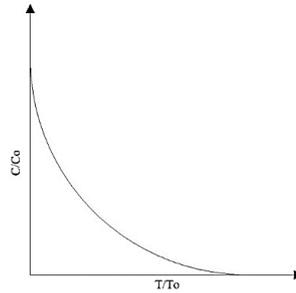


Figura 7. Interacción entre tensión y compresión biaxial en piezas [24].

En investigaciones realizadas en México durante la década de 1970 [6] se obtuvo una relación indirecta entre la resistencia a compresión de las piezas con la resistencia de la mampostería en pilas, donde las pilas resistieron entre el 45 al 60% con respecto a las piezas de arcilla y concreto respectivamente (Figura 8 y 9).

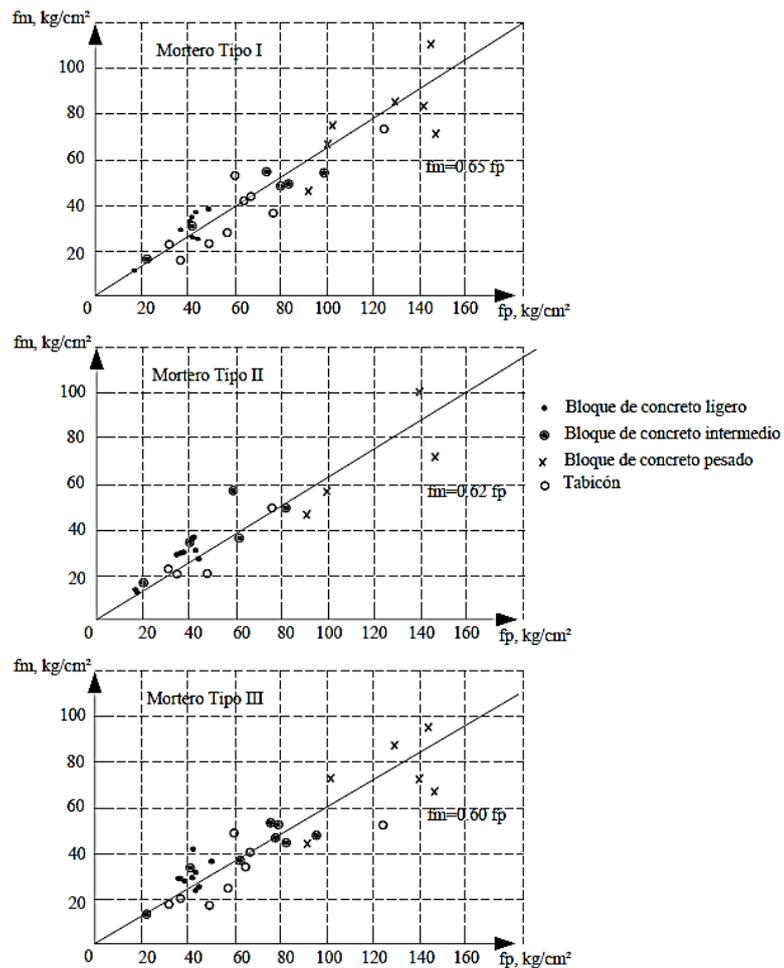


Figura 8. Relación entre resistencia de pilas y piezas de concreto [6].

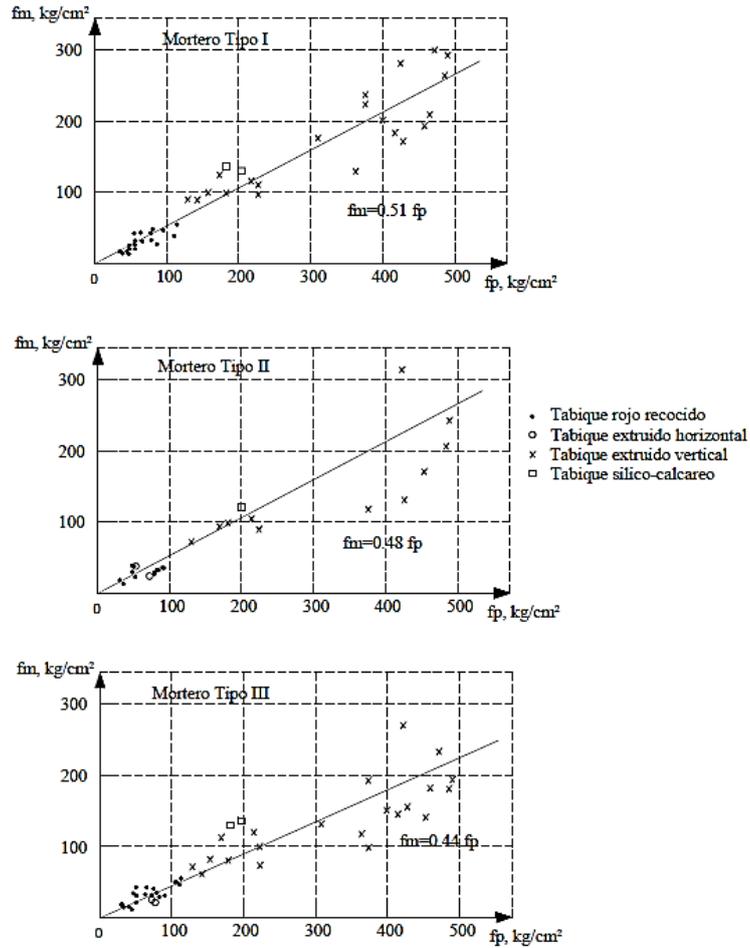


Figura 9. Relación entre resistencia de pilas y piezas de arcilla [6].

De acuerdo a la norma mexicana vigente, la Tabla 4 muestra las resistencias mínimas para piezas en muros de uso estructural.

Tabla 4. Resistencia a compresión para piezas estructurales [26].

Tipos de pieza	Geometría	Resistencia media \bar{f}_p . (kg/cm ²)	Resistencia mínima $\bar{f}_p \text{ min.}$ (kg/cm ²)
Bloque	Macizo	150	120
	Hueco	90	70
	Multiperforado	150	120
Tabique (largo > 300mm)	Hueco	90	70
	Multiperforado	90	70
Tabique (largo < 300mm)	Macizo	110	70
	Hueco	90	70
	Multiperforado	150	120

B) MÓDULO DE ELASTICIDAD.

El módulo de elasticidad presenta un amplio rango de variación, análisis experimentales indican una relación aproximadamente lineal del orden de 300 veces la resistencia a compresión para piezas de arcilla [27] y 1000 veces para piezas a base de cemento [28] en pruebas a compresión directa. Sobre la relación esfuerzo deformación de las piezas a compresión, los resultados de bloques y ladrillo, indican que esta relación es casi lineal hasta la falla y que el efecto de las perforaciones en tabiques de arcilla genera un comportamiento frágil con una falla súbita, sin embargo, para piezas de baja resistencia como bloques ligeros el comportamiento suele ser más dúctil y no lineal [29].

C) CAMBIOS VOLUMÉTRICOS.

Dependiendo del tipo de material se tiene variaciones volumétricas en las piezas, tal es el caso de las piezas elaboradas con arcilla que presentan cambios volumétricos con la variación de la humedad, es decir, son más pequeñas cuando salen del horno y aumentan de volumen a medida que pasa el tiempo, el 50% de esta expansión se produce en los primeros seis meses, cuyos valores están dentro del rango de 0.0002 in/in a 0.0009 in/in [30]. En el caso de bloques de concreto, los cambios volumétricos también se relacionan directamente con la humedad de las piezas, ya que los bloques se contraen a valores que oscilan entre 0.002 in/in a 0.0045 in/in estos efectos causan pequeñas grietas en la mampostería y la adición de esfuerzos internos. [30]

D) ABSORCIÓN Y HUMEDAD:

Es importante mencionar que la capacidad de absorción de una pieza tiene un efecto considerable en las características mecánicas de la mampostería. La Tabla 5 muestra los valores máximos de absorción inicial y absorción total en 24 horas según lo indica la norma mexicana vigente [26].

Tabla 5. Valores máximos de absorción inicial y absorción total en 24 horas [26].

Tipo de material	Absorción inicial para muros expuestos al exterior (g/min)	Absorción inicial para muros interiores o con recubrimiento (g/min)	Absorción total en 24 h. en porcentaje
Concreto	5	7.5	12
Arcilla artesanal	-	-	23
Arcilla extruida o prensada	5	7.5	19

Esta propiedad influye directamente con la resistencia al corte y con la tensión del muro, además con la adherencia entre la pieza y el mortero, ya que una pieza que supera los límites de absorción tiende a modificar la relación agua-cemento en la mezcla y por lo tanto cambia la resistencia y propiedades del mortero dentro del muro, es por eso que en ocasiones en piezas con altos niveles de absorción, se suelen saturar previamente antes de su colocación, esto ocurre principalmente en las piezas a base de arcillas.

2.1.3. INTERACCIÓN.

La sección donde se unen la pieza y el mortero forma un enlace que se encarga de resistir y transmitir los esfuerzos de tensión y cortante que llega a sufrir el muro cuando es sometido a diferentes tipos de carga.

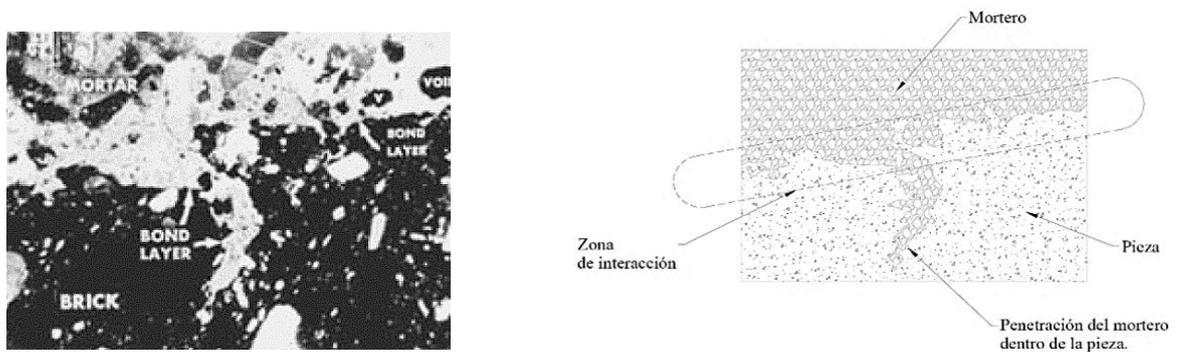


Figura 10. Vista microscópica del enlace generado entre una pieza y mortero. [31]

Se generan principalmente dos tipos de enlace, el primero aparece cuando el mortero penetra por capilaridad dentro de la pieza y el segundo en la zona de interacción, donde la irregularidad de la pieza al contacto con el mortero desarrolla un plano que impide el desplazamiento de una superficie sobre otra (Figura 10). El comportamiento mecánico de los enlaces se describe en los siguientes puntos:

A) COMPORTAMIENTO A TENSIÓN NORMAL A LA JUNTA:

Para los efectos de tensión, la resistencia de esta interfase está influenciada por la unión química que a su vez depende directamente de la capacidad de absorción de las piezas y la capacidad de retención del mortero. Es decir, cuando se pone en contacto la pieza con el mortero, la pieza succiona porciones de mezcla de mortero a través de sus poros, donde se producen cristales en la zona de absorción, los cuales logan que quede

ligada la pieza y el mortero. Esta unión se encarga de resistir las fuerzas de tensión en la mampostería. La Tabla 6 muestra una relación entre la capacidad de retención de agua del mortero y el comportamiento de la interfase cuando la mampostería es sometida a esfuerzos de tensión [26].

Tabla 6. Resistencia de morteros a tensión según su capacidad de retención de agua [26].

Tipo de mortero	Retención de agua	Resistencia de la interfase a tensión.
Tipo I	Baja	Alta
Tipo II	Alta	Moderada
Tipo III	Muy Alta	Baja

Gráficamente, se puede observar este mismo efecto en los trabajos de Boyton, et al. [30] y Gallegos [32], donde se obtuvieron resistencias mayores en dosificaciones de Cemento:Cal:Arena de 1:0:3 y 1:1:6. Esto es debido a que los niveles de retención en estas mezclas son bajos y permiten que se genere un enlace fuerte entre la pieza y el mortero. Por otra parte, se puede observar que en elementos de altos niveles de retención de agua se generan bajos niveles de adherencia (Figura 11).

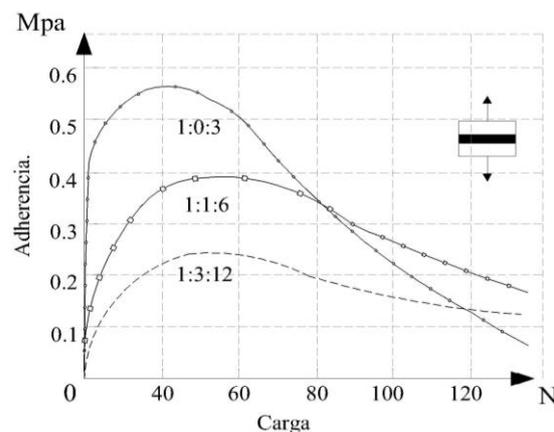


Figura 11. Efecto de la succión de las piezas en la adherencia para diferentes proporcionamientos de mortero [32].

B) COMPORTAMIENTO POR CORTANTE PARALELO A LA JUNTA DEL MORTERO.

La resistencia de la interfase ante fuerzas de corte, estará determinada primeramente por la unión química, pero además por la fricción que se desarrolle con la superficie del mortero y la piezas, la Figura 12 muestra cómo actúan los esfuerzos en esta zona, se puede observar como al ser una unión formada por elementos de diferentes características

mecánicas, uno de los dos componentes tiende a ser más deformable, usualmente el mortero. Por esta condición se genera entre la pieza y el mortero efectos de cortante entre la interfase la cual tendrá que resistir y transferir estas cargas entre la pieza y el mortero. Conforme se incrementa la carga sobre el muro, aumentan las cargas de cortante, ya que la pieza no se desliza sobre el mortero ni viceversa.

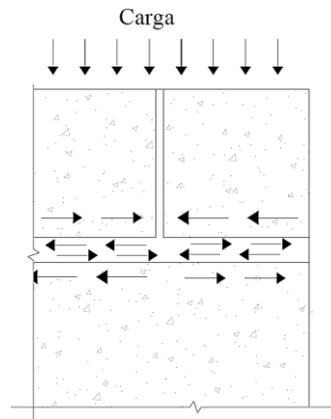


Figura 12. Comportamiento de la junta horizontal ante cargas de compresión [30].

Para evaluar la resistencia de la interacción a cortante, se han establecido diferentes ecuaciones en las que intervienen las características de cohesión que regularmente oscilan entre 0.01 a 0.025 N*mm/mm². La resistencia por cortante de la interfase se incrementa linealmente conforme se incrementan los niveles de confinamiento sobre la mampostería [33].

2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MAMPOSTERÍA.

La mampostería es un material de construcción que se caracteriza por poseer propiedades heterogéneas y de anisotropía, ya que se encuentra compuesta por dos entidades con características mecánicas diferentes. Además, entre ellas se genera un enlace físico y químico que influye en el comportamiento general del muro. Se ha demostrado que la mampostería es débil al someterse a tensión pero fuerte a compresión, por lo que en la práctica se diseña comúnmente para que tenga la capacidad de resistir cargas de compresión. Un resumen general de los factores que determinan la resistencia de la mampostería se muestra en la siguiente tabla, donde se incluye la influencia de las características mencionadas en los apartados anteriores de las piezas, morteros e interacción y además factores cuando estos elementos trabajan en conjunto.

Tabla 7. Algunos factores que determinan el comportamiento de la mampostería.

Unidades	Mortero	Interacción	Mampostería
Resistencia a compresión	Resistencia a compresión	Resistencia a corte	Acomodo de las piezas
Resistencia a tensión	Resistencia a tensión	Resistencia a tensión	Relación entre dimensiones
Material	Deformación		Tipo de carga
Absorción	Retención de agua		
Geometría			

2.2.1. ACOMODO Y RELACIÓN ENTRE DIMENSIONES DEL MURO.

Los arreglos de construcción en mampostería son tan variados que el comportamiento puede variar, en este apartado se presentan algunos arreglos y tipos de muros utilizados en México.

A) ARREGLO:

Es ideal que en las hiladas que se generen sean traslapados ya que esta configuración permite una mejor distribución de esfuerzos entre los elementos que conforman el muro, razones por lo que de manera general los arreglos típicos para muros estructurales son de sogá, de cabeza o el amarre americano [16] (Figura 13), sin embargo, es importante mencionar que el acomodo dependerá del espesor del muro y en algunas ocasiones de las especificaciones arquitectónicas del proyecto, un ejemplo es el acomodo a pila, que es común verlo en fachadas como detalle arquitectónico, pero en ocasiones también sirviendo como elemento estructural, la desventaja de esta configuración es que se genera una zona de falla a lo largo del muro, ya que la junta de mortero aparece a lo largo del plano sometiendo a la interfase a esfuerzos mayores al compararlos con un arreglo traslapado.

Algunos reglamentos como el ACI 530-05 [34], EUROCODIGO 6 [35] y NTCM-04 [14] presentan especificaciones para el acomodo de las piezas principalmente cuando se utilizan como elementos estructurales, esto es para tener un buen comportamiento estructural y para la adecuada colocación del acero de refuerzo.

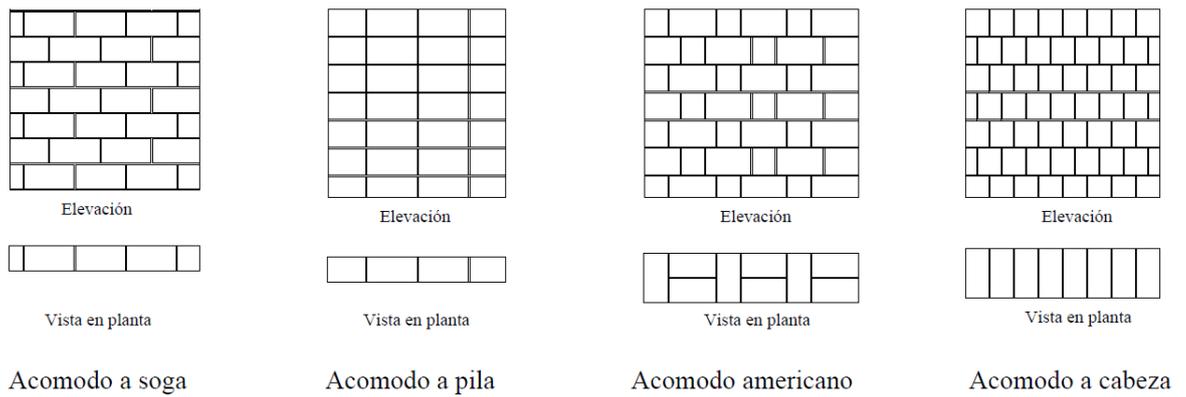


Figura 13. Arreglos típicos de muros [16].

B) RELACIÓN DE ESBELTEZ (ALTURA-ESPESOR):

De esta característica depende en gran medida la estabilidad del muro y su capacidad de resistir cargas, principalmente verticales, ya que puede fallar por la generación de esfuerzos por excentricidad o inestabilidad.

Las NTCM [14], para mampostería confinada y reforzada interiormente proponen que el espesor de un muro estructural no sea menor a 10 cm. y que la relación entre la altura libre y el espesor del muro no sea mayor a 30.

Es decir, para las piezas típicas de 15 cm. de espesor, la altura máxima que permite es de 4.5 m. Sin embargo, hace algunas décadas debido a las técnicas y a la carencia de acero de refuerzo se tenían relaciones altura-espesor muy bajas, como se muestra en la Figura 14, un muro de adobe con un ancho cercano a 1 m. construido hasta una altura aproximada de 5 m.



Figura 14. Muro de adobe con una relación de esbeltez de 5.

C) RELACIÓN DE ASPECTO (ALTURA-LONGITUD):

La capacidad de resistir cargas laterales que producen esfuerzos de cortante en un muro es debido a su rigidez, la cual depende de la relación de aspecto, que es la relación entre la altura de un muro y la longitud, entre más baja es esta relación mayor es la rigidez lateral del muro. La Figura 15, muestra diferentes relaciones de aspecto que determinan la rigidez lateral de un muro, es decir, con una relación H/d menor a 0.25, la capacidad del muro para resistir cargas de cortante es alta y las cargas laterales actuantes generan efectos de flexión poco importantes sobre el muro, por otra parte cuando la relación oscila entre 0.25 a 4.0 la flexión incrementa su magnitud, cuando la relación H/d es mayor a 4, el muro tiene una baja capacidad para resistir cargas de corte y la flexión predomina sobre la resistencia propia del muro [36].

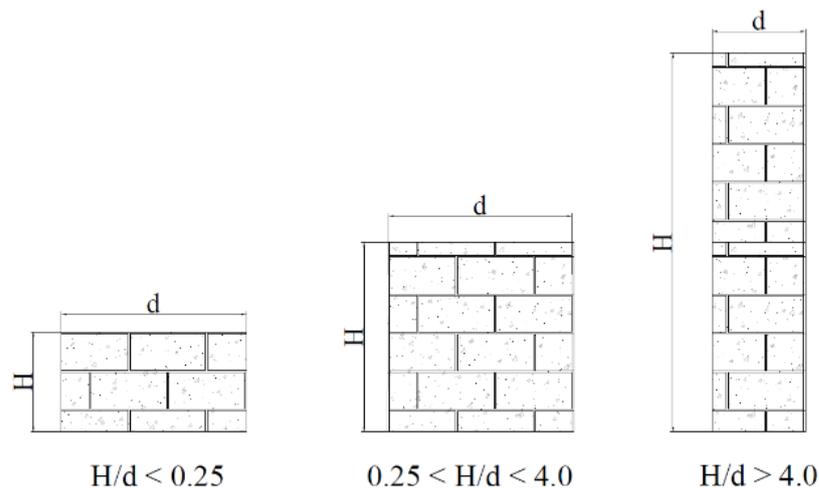


Figura 15. Relación de aspecto y rigidez de un muro [36].

2.2.2. COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN.

Cuando la mampostería es sometida a esfuerzos de compresión el material menos deformable restringe las deformaciones transversales del otro elemento, es decir, cuando las unidades son más rígidas que el mortero, estas experimentan un estado de compresión debido a la carga y otro de tensión bilateral ya que restringe la deformación del mortero (Figura 16a), por otro lado, el mortero sufre esfuerzos de compresión en todas sus direcciones inducido por la carga vertical y por la restricción de la pieza.(Figura 16b).

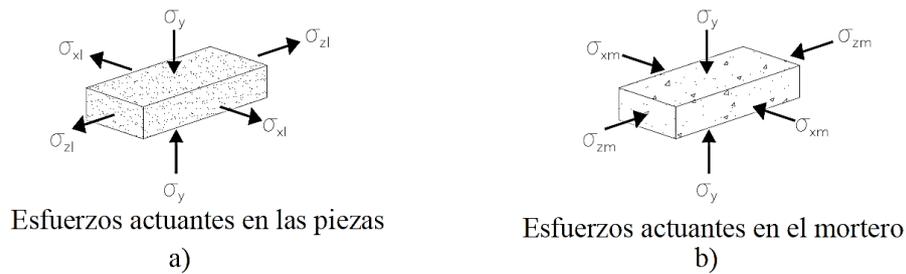


Figura 16. Esfuerzos actuantes sobre piezas y morteros [12].

En resultados experimentales obtenidos por Meli, 1979 [5] se muestran diagramas esfuerzo deformación para distintas configuraciones de pilas (Figura 17 y 18). En la curva obtenida para tabiques con huecos verticales y con una dosificación de cemento: arena (1:3) presenta un comportamiento lineal hasta la falla cercana a esfuerzos de 140 kg/cm^2 con una deformación aproximada de 0.0025, sin embargo, para la misma pieza pero con mortero con dosificación (1:1:6) exhibe un comportamiento no lineal y la falla cercana a esfuerzos de 90 kg/cm^2 con deformaciones aproximadas de 0.002, es evidente como la resistencia, la ductilidad y el comportamiento elástico se modifican dependiendo la dosificación del mortero.

De igual manera, se puede apreciar en las gráficas como dependiendo del tipo de pieza se tendrán resistencias diferentes, se observa como los prismas elaborados con arcilla extruida reflejan resistencias mucho mayores a los elementos elaborados con tabique recocado y concreto, sin embargo las piezas extruidas presentan un capacidad de deformación menor que las piezas de concreto o arcilla.

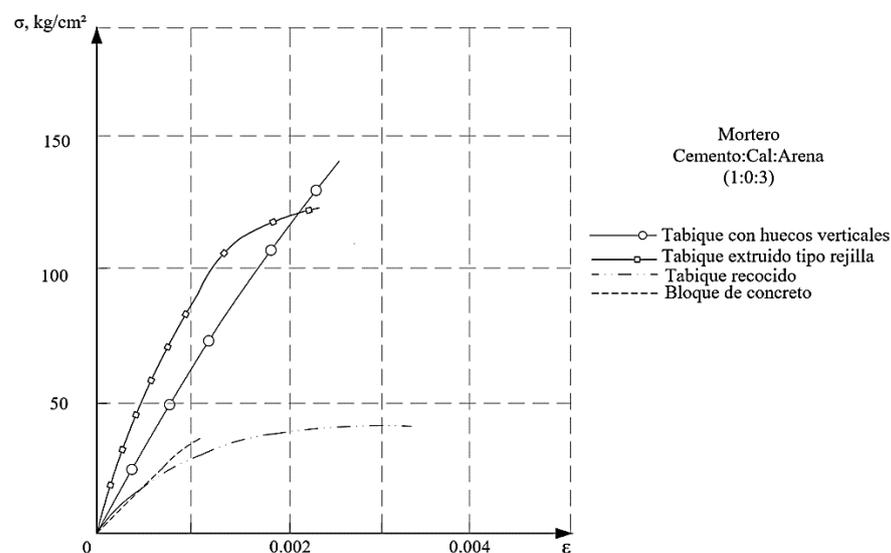


Figura 17. Diagrama esfuerzo-deformación primas elaboradas con distintas piezas y mortero cemento:cal:arena (1:0:3) [5].

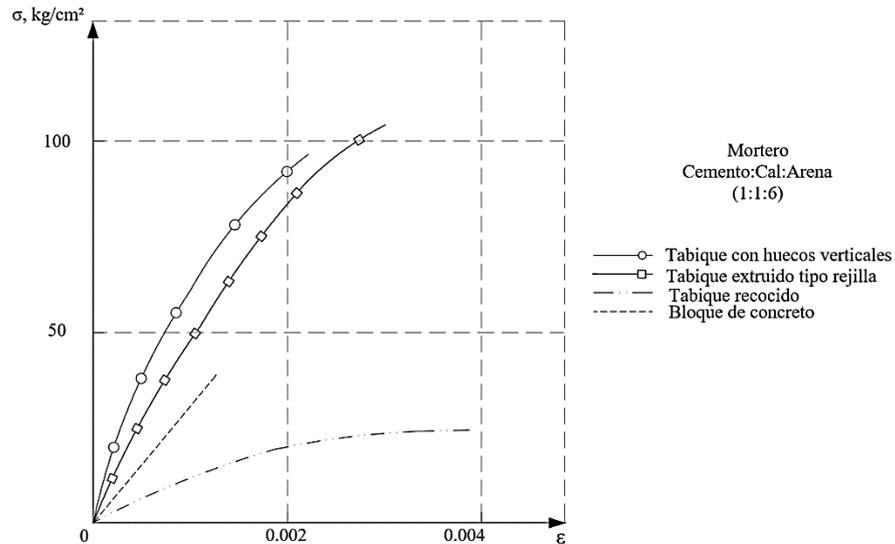


Figura 18. Diagrama esfuerzo-deformación de primas elaboradas con distintas piezas y mortero cemento:cal:arena (1:1:6) [5].

En las NTCM-04 [14] se presentan valores específicos de las propiedades mecánicas de diseño para las combinaciones más usuales de piezas y morteros (Tabla 8). Para otros materiales se indican las pruebas necesarias para determinar dichas propiedades.

Tabla 8. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería para algunos tipos de pieza. [14].

Tipo de pieza	Valores de f_m^* en kg/cm^2		
	Mortero		
	I	II	II
Tabique de arcilla recocido ($f_p^* > 60 \text{kg/cm}^2$)	15	15	15
Tabique de arcilla con huecos verticales ($f_p^* > 120 \text{kg/cm}^2$)	40	40	40
Bloque de concreto (tipo pesado $f_p^* > 100 \text{kg/cm}^2$)	20	15	15
Tabique de concreto (tabicón, $f_p^* > 100 \text{kg/cm}^2$)	20	15	15

A) INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA JUNTA:

Investigaciones señalan que al incrementar el espesor de la junta horizontal, la resistencia de la mampostería disminuye; este efecto es significativo para mampostería a base de ladrillos y despreciable en mampostería de bloques de concreto donde la relación entre la altura de la pieza y el espesor de la junta es pequeña, esto es reforzado por los trabajos realizados por Mayes y Clough [22].

La Tabla 9 muestra valores de resistencia obtenidos de pruebas experimentales en prismas conteniendo piezas elaboradas a base de arcillas

Tabla 9. Efecto del espesor de la junta en la resistencia a compresión [22].

Junta de mortero (in)	Resistencia a compresión de primas (Mpa)	Relación de resistencia
1/4	460.7	1
3/8	411.4	0.89
1/2	344.6	0.75
5/8	284.4	0.62
3/4	221.6	0.48

Se puede observar como la relación de resistencia con un ancho inicial se va reduciendo conforme se aumenta el espesor de la junta, las NTCM sugieren que el espesor de la junta para piezas mecanizadas oscile entre 10 y 12 mm, y para piezas de fabricación artesanal cercana a los 15 mm. La influencia de la junta vertical ha sido escasamente investigada, por lo que existen pocos resultados que indiquen cómo interactúan ante cargas de compresión uniaxial.

B) MÓDULO DE ELASTICIDAD:

En la actualidad, se ha buscado relacionar de manera indirecta los parámetros de resistencia obtenidos de pruebas uniaxiales en piezas y morteros con el comportamiento de la mampostería, en la Figura 19a se muestra el diagrama esfuerzo deformación de una pieza, los diagramas de tres tipos de morteros (Figura 19b) y los diagramas de los prismas contruidos con la combinación de los elementos anteriores (Figura 19c). Se observa como el módulo de elasticidad y el comportamiento es diferente para cada tipo de prisma, es por eso, que a partir de diagramas esfuerzo deformación, se han aplicado criterios para evaluar el módulo de elasticidad de la mampostería (E_m).

Al considerar el comportamiento del mortero y de la pieza como elástico lineal, Tena y Miranda (2001) [29], plantea que la relación entre el módulo de elasticidad del mortero y el módulo de elasticidad de las piezas sea determinado por la siguiente expresión:

$$\frac{E_m}{E_p} = \frac{1 + \gamma_t}{1 + \frac{\gamma_t}{\gamma_m}} \quad (1)$$

Donde γ_t es la relación entre el espesor de la junta del mortero y el espesor de la pieza, γ_m es la relación entre el módulo de elasticidad del mortero y el módulo de elasticidad de la pieza.

Por otra parte, en base a los resultados obtenidos en investigaciones experimentales [6] se plantea que el módulo de elasticidad se puede establecer con relaciones del orden de 450 veces la resistencia a compresión para piezas de arcilla y de 600 veces para piezas de concreto [29].

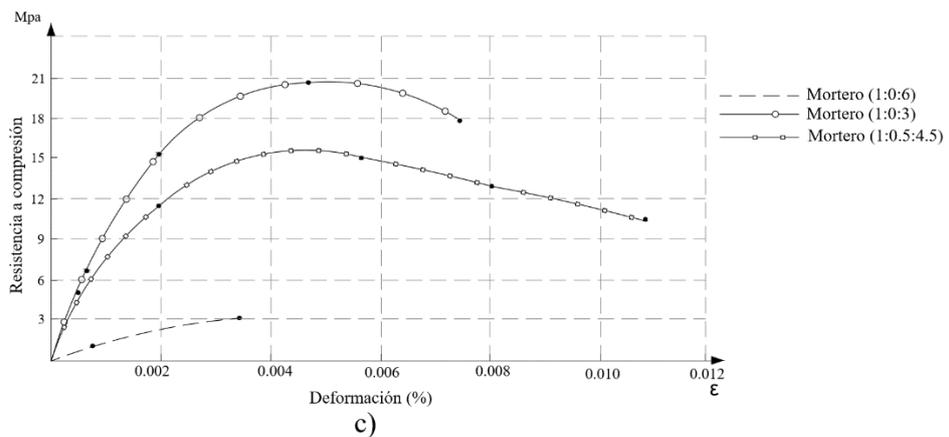
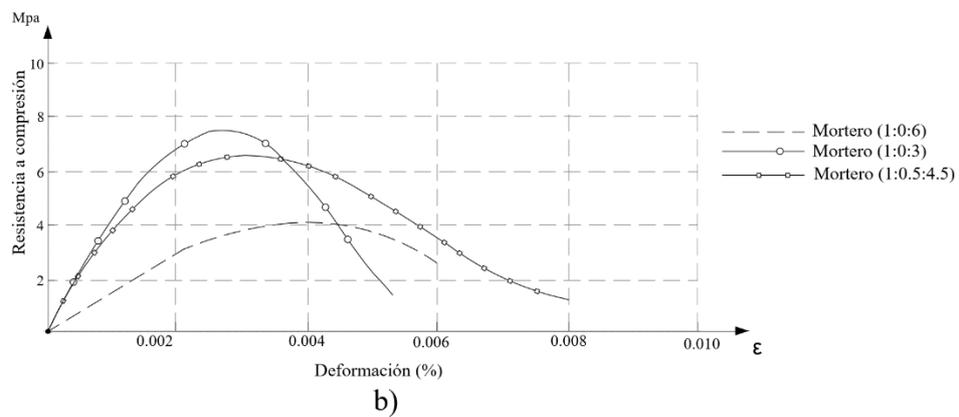
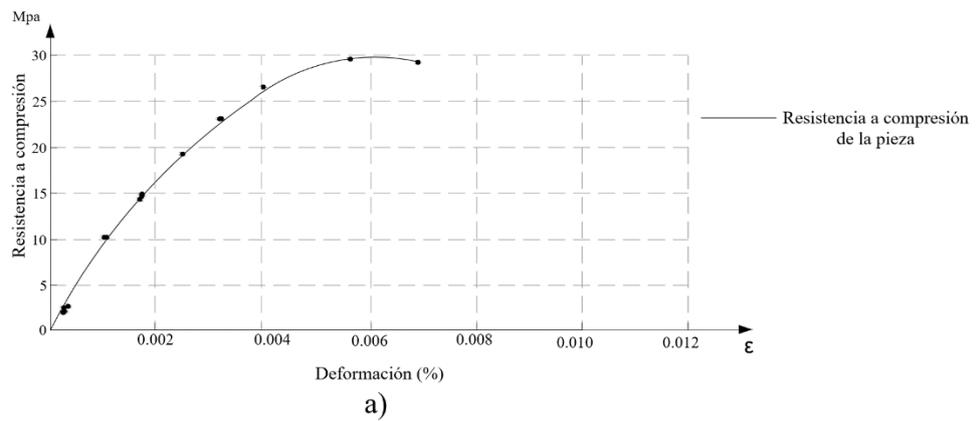


Figura 19. Diagramas esfuerzo-deformación a) Piezas, b) Mortero y c) Prismas [15].

2.2.3. COMPORTAMIENTO A TENSIÓN.

En ocasiones la mampostería puede llegar a ser sometida a esfuerzos de tensión y la zona de interacción entre la pieza y el mortero es la encargada de transmitir y contribuir a resistirlos, por lo tanto la capacidad de resistencia a la tensión será directamente proporcional a la resistencia que presente la interfase entre la pieza y el mortero.

Dependiendo de la resistencia de la interfase dependerá el comportamiento que presente a tensión, es decir, si el enlace es fuerte, se transmitirán esfuerzos entre la pieza y el mortero hasta que la resistencia de la pieza a tensión sea alcanzada, después se generará una pérdida rápida de resistencia hasta llegar a la separación total de espécimen (Figura 20a). Por otra parte cuando la resistencia del enlace es baja, se logra el desprendimiento de la interfase, que producirá una pérdida gradual de resistencia hasta que sea incapaz de mantener unida a la pieza y el mortero haciendo que se rompa el enlace por adherencia (Figura 20b).

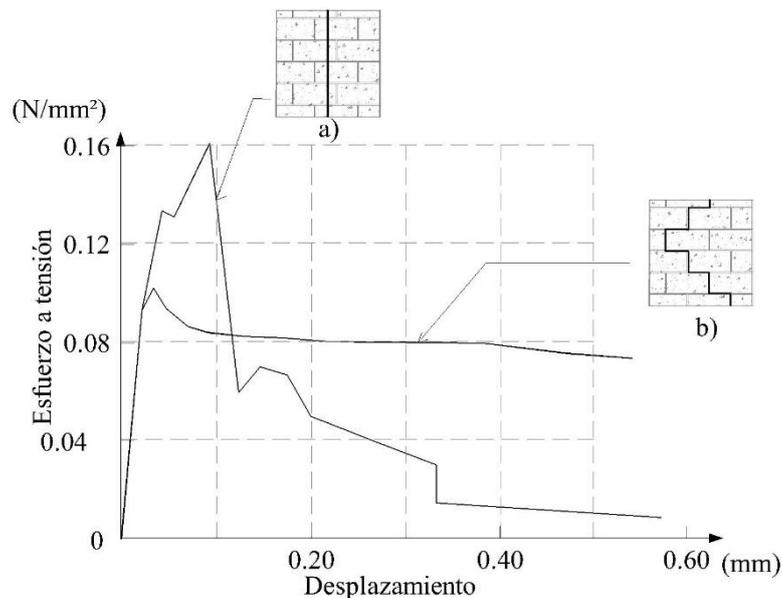


Figura 20. Diagramas esfuerzo-desplazamiento a tensión en dirección paralela a la junta: a) falla global
b) falla de la interfase. [37].

2.2.4. COMPORTAMIENTO A CORTANTE.

Existen casos donde la mampostería puede verse sometida a cortante, el caso más común es por la acción sísmica. Sin embargo, existen otros casos en los que se pueden reproducir este tipo de efectos, como hundimientos diferenciales o por una distribución poco uniforme de cargas verticales.

Para estudiar este comportamiento comúnmente se aplica la prueba por compresión diagonal en México [38], en la Figura 21 y 22 se muestran resultados obtenidos de este tipo de investigaciones, donde las resistencias a cortante difieren para distintos tipos de piezas, además, la resistencia se reduce cuando se emplean morteros de baja resistencia. Las curvas esfuerzo-deformación presentan un rango elástico muy variado y es considerable la diferencia de la capacidad de deformación antes de llegar al esfuerzo máximo. En general, el comportamiento a cortante de la mampostería se caracteriza por una fase aproximadamente lineal hasta que se produce el primer agrietamiento diagonal, posterior a ese punto el espécimen es capaz de seguir soportando cargas hasta que las deformaciones se incrementen alcanzando la falla. La pieza tiene una pequeña influencia en el esfuerzo cortante para el cual se produce este agrietamiento, y el tipo de mortero influye en la rigidez de la mampostería después del primer agrietamiento [29].

En los diagramas obtenidos por compresión diagonal, la pendiente representa el módulo de corte (G_m) que es una medida de la deformación a cortante que sufre la mampostería a un determinado nivel de esfuerzos.

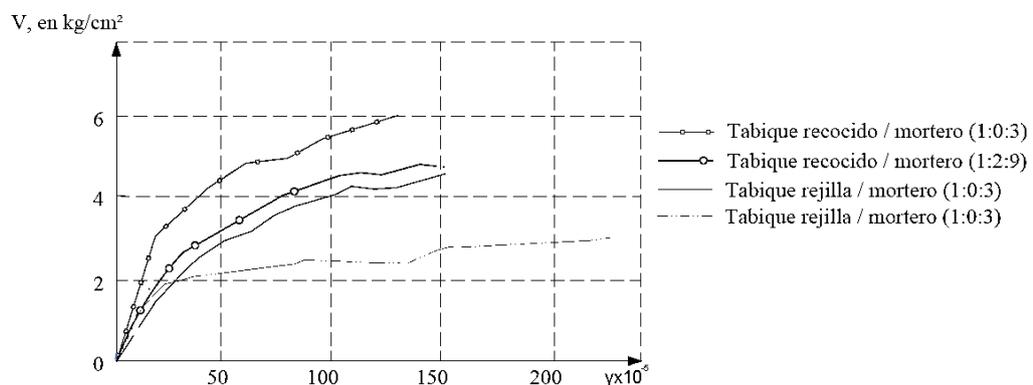


Figura 21. Diagramas esfuerzo-deformación de muretes sometidos a compresión diagonal para diferentes piezas de arcilla [5].

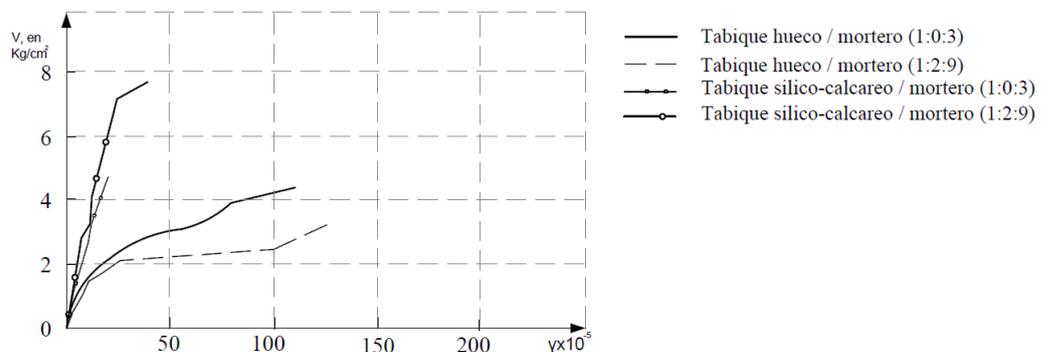


Figura 22. Diagramas esfuerzo-deformación de muretes sometidos a compresión diagonal para diferentes piezas de concreto y silicocalcareas [5].

El esfuerzo a corte varia usualmente entre 2 y 10 kg/cm² y es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a compresión [12].

$$V_m = \sqrt{f_m} \quad (2)$$

Las resistencias de diseño para mampostería elaborada con diferentes tipos de material y mortero se encuentran en las NTCM [14] (Tabla 10).

Tabla 10. Resistencia de diseño a corte de la mampostería para algunos tipos de pieza [14].

Tipo de piezas	Tipo de mortero	V _m * en kg/cm ²
Tabique de arcilla recocido (f _p *>60kg/cm ²)	I	3.5
	II Y III	3.0
Tabique de arcilla con huecos verticales (f _p *>120kg/cm ²)	I	3
	II Y III	2
Bloque de concreto(tipo pesado f _p *>100 kg/cm ²)	I	3.5
	II Y III	2.5
Tabique de concreto (tabicón, f _p *>100kg/cm ²)	I	3.0
	II Y III	2.0

2.2.5. COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS BIAXIALES.

Se han llevado a cabo investigaciones para obtener relaciones esfuerzo deformación de mampostería sometida a cargas de compresión-compresión y compresión-tensión, para la mayoría de los casos se observó un comportamiento no lineal debido al desplazamiento de las juntas de mortero a lo largo de las interfases ya que actúan como planos de falla.

El comportamiento por cargas biaxiales de compresión-compresión, presenta un estado no lineal y un módulo tangente (E_m) que cambia conforme incrementa la carga hasta la falla, por otra parte para acciones biaxiales de compresión-tensión la mampostería falla elásticamente a bajos niveles de carga y es elásticamente frágil cuando el esfuerzo principal es de tensión.

Investigaciones en esta área fueron realizadas por Page en 1983 [39], en cuyos resultados se puede apreciar cómo influye la orientación de la carga en las capacidades estructurales de la mampostería (Figura 23), esto debido a la interacción que existe entre los componentes y la orientación de la carga, ya que los elementos constitutivos de la mampostería desarrollan diferentes solicitaciones de carga, donde la resistencia que presenta

el espécimen estará determinada por el elemento que presente la menor resistencia ante alguna acción que se llegue a desarrollar, que puede ser de compresión, tensión o cortante.

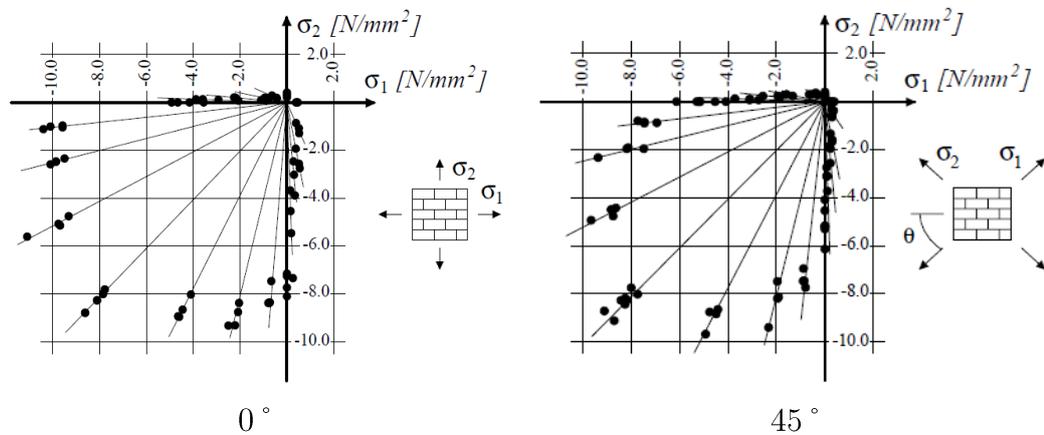


Figura 23. Resistencia biaxial de mampostería con unidades solidas de arcilla [39].

2.2.6. COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS DE FLEXIÓN FUERA DEL PLANO.

Cuando un muro es sometido a empujes sobre su superficie, por ejemplo: el viento, el elemento sufre efectos de flexión fuera del plano.

La acción de los efectos de flexión puede actuar de dos maneras que dependen de la orientación de la carga y los apoyos del muro. El primer caso se presenta cuando existe flexión paralela a las juntas (Figura 24a), el segundo caso aparece en dirección perpendicular a las juntas. (Figura 24b).

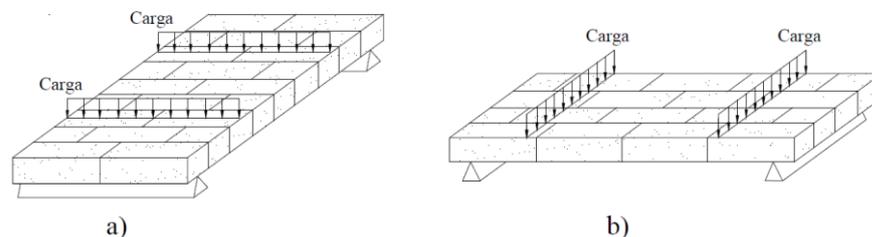


Figura 24. a) Flexión paralela a las juntas de mortero, b) Flexión perpendicular a las juntas de mortero [33].

El comportamiento a flexión simple es extremadamente débil en resistencia y deformación, la flexión paralela a las juntas horizontales es más desfavorable que la perpendicular, ya que para hacer fallar el muro únicamente se tiene que romper la adherencia de la interfaz por flexo-tensión [33]. Sin embargo, para el caso en que la flexión es perpendicular

a las juntas horizontales, la pieza, el mortero y su interacción contribuyen a la resistencia del muro. Esto se puede observar en el diagrama momento curvatura de la Figura 25 donde para un mismo muro, su comportamiento varía dependiendo del tipo de flexión.

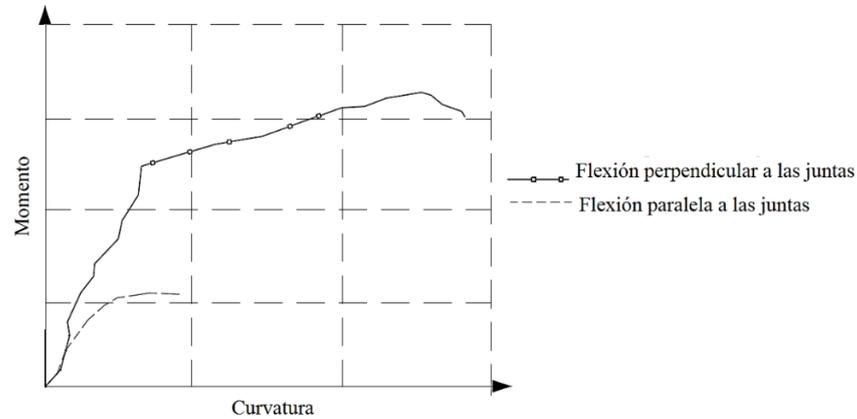


Figura 25. Diagramas Momento-Curvatura en flexión simple correspondiente a la flexión producida paralela y perpendicularmente a las juntas [33].

2.2.7. COMPORTAMIENTO A FLEJO-COMPRESIÓN.

Cuando el momento es ocasionado por efectos de excentricidad de la carga axial, se genera flexión paralela a las juntas horizontales, que generalmente es más favorable que el de flexión pura ya que presenta con mayores índices de resistencia y ductilidad. Esto se debe a que la resistencia es producida por las piezas, los morteros y su interacción, la rigidez del muro es mucho mayor.

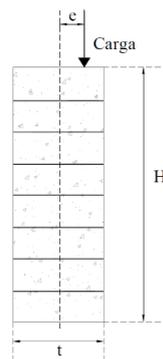


Figura 26. Carga que produce flexo-compresión en un muro [29].

2.3 MODOS DE FALLA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA.

La mampostería está sometida a diferentes condiciones de carga, tanto en servicio como experimentalmente, las cargas más comunes que llegan a producir la falla son:

- Carga axial (Tensión ó Compresión)
- Fuerzas cortantes y momentos de volteo (Flexión)
- Empujes normales al plano de los muros.

Se debe entender que la falla principal para cada caso de carga es aquella donde se acumulan las mayores grietas, originando una fuerte degradación tanto de la resistencia como de la rigidez.

2.3.1. FALLA POR CARGA AXIAL A COMPRESIÓN.

La mampostería a compresión (Figura 27a) presenta distintos mecanismos de falla, la más común es la falla por agrietamiento vertical (Figura 27b) y se presenta por el estado esfuerzos que se genera por la acción de la compresión. Sin embargo, cuando se utilizan piezas huecas puede darse la separación de sus caras.

La falla por aplastamiento de una pieza (Figura 27c) puede ocurrir con piezas de baja calidad, por ejemplo: en construcciones viejas cuyos muros tienen propiedades estructurales que se van degradando por el paso del tiempo. La falla por flexión (Figura 27d) puede ocurrir si el eje del muro está inclinado respecto al eje vertical, o por alguna debilidad local en la pieza o la junta.

En ocasiones se llega a presentar en pruebas experimentales fallas explosivas, comúnmente con piezas de alta resistencia y rigidez, que poseen además paredes delgadas. También es común obtener fallas con planos inclinados como la piramidal (Figura 27f) o por cortante (Figura 27e) estas son análogas a las fallas cónicas de cilindros de concreto y se forman cuando los dos materiales están bien integrados, existe una alta adherencia entre el mortero y pieza, además, no existen diferencias considerables de deformabilidad entre los elementos constitutivos.

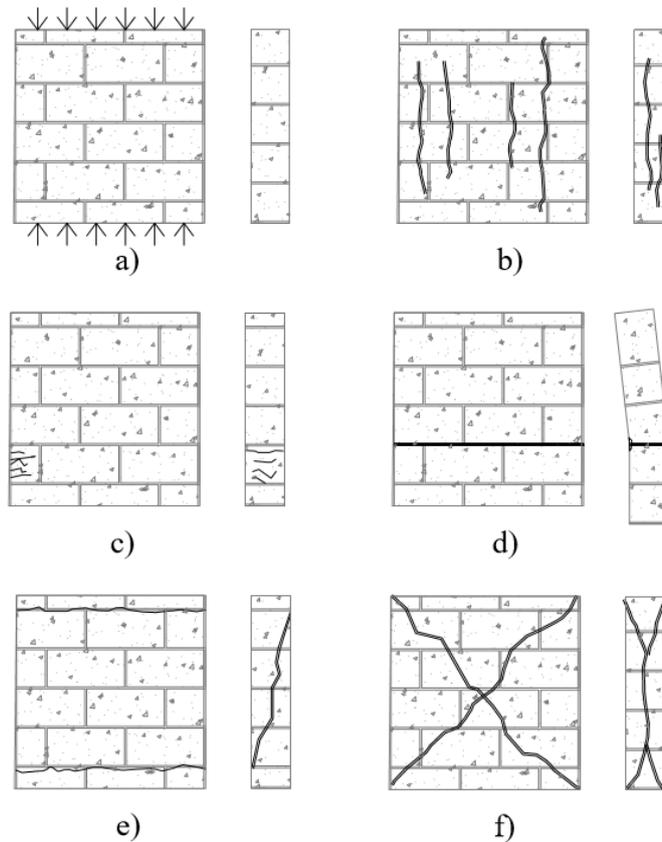


Figura 27. Fallas típicas a compresión [38].

2.3.2. FALLA POR CARGA AXIAL A TENSIÓN.

Por tensión, para cargas perpendiculares a las juntas horizontales (Figura 28a), la falla estará determinada por la resistencia que presente el enlace entre la pieza y el mortero.

Cuando la resistencia del enlace a tensión sea mayor que la capacidad de la pieza, la falla será de manera global, es decir, el eje de falla atravesará tanto a las piezas como a las juntas de mortero (Figura 28b), esta suele presentarse empleando morteros de alta resistencia y unidades con numerosas y pequeñas perforaciones. Por otra parte, las fallas más típicas se presentan sobre las juntas de mortero, la primera es de manera escalonada (Figura 28c), esta se presenta con piezas porosas y morteros de alta resistencia, la línea de falla se genera en las zonas débiles del mortero, sin embargo por la buena adherencia de la interfase tiene la capacidad de que tanto las juntas horizontales y verticales contribuyan a resistir esta acción.

Por otra parte cuando el enlace es de baja resistencia a tensión, se generará una falla horizontal (Figura 28d), donde la zona más débil a tensión de la junta se desprenderá

totalmente, esta falla se presenta comúnmente cuando se utilizan morteros de baja resistencia y piezas con poca capacidad de absorción.

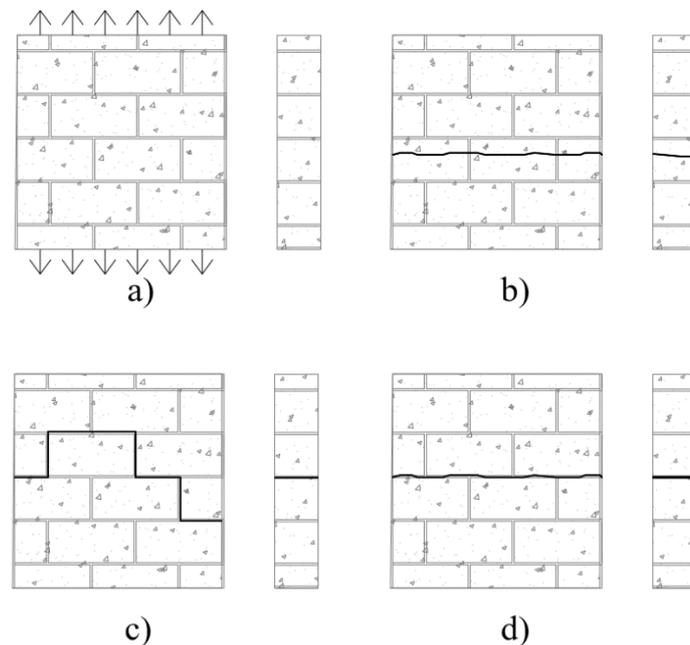


Figura 28. Fallas típicas a tensión [38].

2.3.3. FALLA POR CARGAS A CORTANTE.

Para analizar experimentalmente el efecto de las cargas de cortante se realiza el ensaye por compresión diagonal (Figura 29a) [38], este tipo de ensaye genera comúnmente las fallas típicas de un muro en servicio sometido a las mismas acciones.

La más común, es la falla por tensión diagonal (figura 29b), donde las grietas atraviesan indistintamente piezas y juntas, esta se genera cuando existe buena adherencia entre el mortero y las piezas, la cual es común obtenerla cuando se tienen morteros de buena resistencia, piezas con alta porosidad y absorción.

La falla por cortante (Figura 29c) aparece cuando se presenta un deslizamiento entre las piezas a través de la junta del mortero, esta falla se provoca cuando la adherencia entre la pieza y el mortero es relativamente baja, es común en piezas de baja absorción y por el uso de morteros de baja resistencia. También se llega a presentar cuando se tiene poca área de contacto entre el mortero y la pieza, es decir, cuando se utilizan piezas con grandes huecos. Otro caso que genera esta falla, es cuando se emplean piezas de gran tamaño donde la relación área del mortero y el área de la pieza es muy baja.

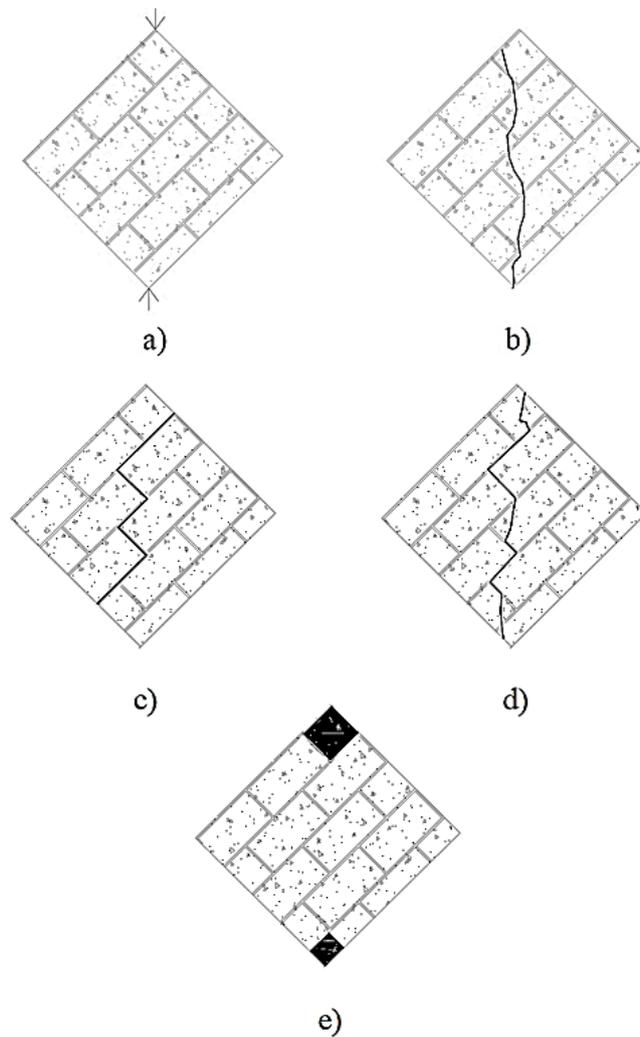


Figura 29. Fallas típicas a cortante. [38]

En ocasiones se llega a presentar un tipo de falla combinado (Figura 29d) en el que la grieta en parte atraviesa la pieza y en parte sigue la trayectoria de la junta de mortero. Experimentalmente se llega a presentar una falla por aplastamiento (figura 29e) de las piezas en las esquinas cargadas al realizar la prueba por compresión diagonal.

2.3.4. FALLA POR CARGAS BIAXIALES.

La relación de la interacción entre el estado biaxial generado por cargas verticales y horizontales se puede explicar de acuerdo a la Figura 30, cuando el esfuerzo principal es de tensión y con bajos esfuerzos a compresión se origina comúnmente una falla por tensión. Por otra parte, cuando los esfuerzos de tensión y compresión son de magnitudes

similares, la falla ocurre por corte, cuando el esfuerzo principal es por compresión, se provoca una falla por compresión incluso con grandes esfuerzos de tensión.

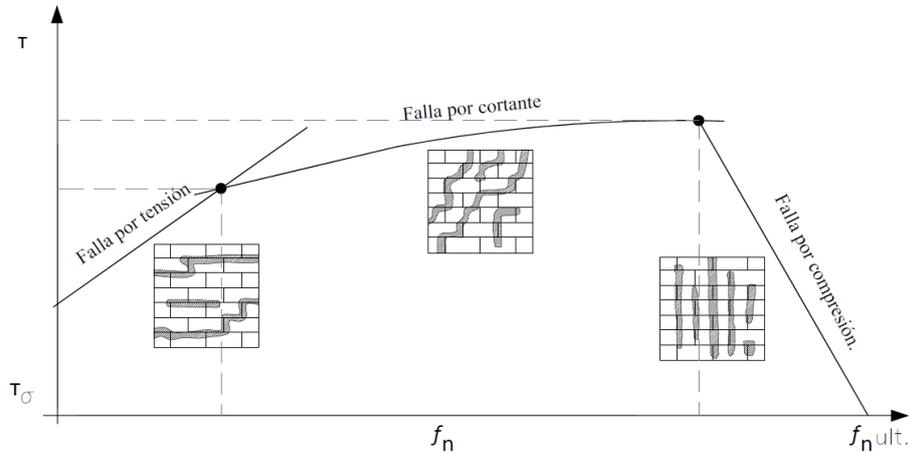


Figura 30. Interacción entre esfuerzos de compresión y tensión en un murete [40].

2.3.5. FALLA POR CARGAS A FLEXIÓN.

Esta se produce cuando se alcanza el esfuerzo máximo en tensión sobre el plano del muro (Figura 31a). La flexión en el muro es grave cuando no existe acero de refuerzo que tome los esfuerzos de tensión que la mampostería no es capaz de resistir.

Esta falla se identifica mediante grietas horizontales que se forman en los extremos, siendo mayores las grietas en la parte inferior y disminuyendo en longitud conforme se incrementa la altura del muro (Figura 31b).

Es poco común que se tengan problemas por flexión debido a que las cargas verticales contrarrestan los efectos de momento, o se evitan mediante la correcta colocación de refuerzo en los extremos del muro. Cuando las cargas de compresión son muy grandes y presentan excentricidades se llega a generar la falla por flexo compresión (Figura 31c), donde los patrones de agrietamiento son una mezcla de las fallas provocadas por compresión y flexión.

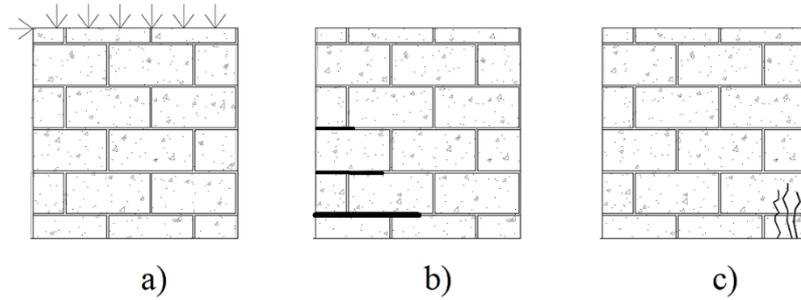


Figura 31. Falla por flexión en un muro [38].

2.3.6. FALLA POR CARGAS LATERALES ESTÁTICAS Y CÍCLICAS.

A) FALLA POR CARGAS LATERALES ESTÁTICAS Y CÍCLICAS.

Ante cargas laterales no reversibles el comportamiento de la mampostería es muy similar al efecto de las cargas de cortante (Figura 32a). Sin embargo, debido a la flexión que produce, el agrietamiento es menor.

En el caso de cargas laterales cíclicas (Figura 32b), los muros exhiben fallas por cortante y por flexión. Para cargas alternadas, el deterioro del muro es pequeño cuando existen distorsiones menores a las de agrietamiento (referido a la capacidad de rigidez y resistencia); cuando se supera este valor el deterioro depende de las características de reforzamiento del muro. Además, si se utilizan piezas huecas se tendrá un comportamiento más sensible que al usar piezas sólidas. La carga vertical ayuda a reducir apreciablemente estos efectos.

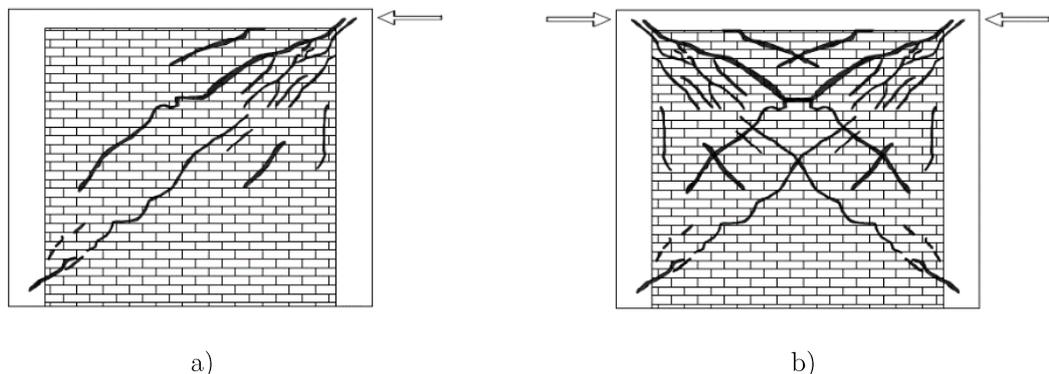


Figura 32. Falla por: a) carga lateral b) carga cíclica reversible [29].

Se ha observado que la rigidez lateral de la mampostería disminuye a medida que se incrementa el número de ciclos y el nivel de deformación lateral.

Además de la pérdida de rigidez lateral y el agrietamiento de la mampostería, se produce una reducción importante en los niveles de ductilidad de los ciclos históricos debido a que cuando se incrementa el desplazamiento lateral en una dirección se abren las grietas y al imponer un desplazamiento en la otra dirección la rigidez disminuye, una vez que se cierran las grietas del muro incrementa su rigidez lateral.

2.4 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE MAMPOSTERÍA.

Durante años se ha buscado determinar las propiedades mecánicas y explicar el comportamiento de la mampostería mediante modelos experimentales pero debido a la complejidad de elaborar modelos a escala natural ya sea por su alto costo, difícil elaboración, transporte y medición, se han desarrollado modelos experimentales simplificados para determinar las propiedades estructurales de la mampostería, en este capítulo se presentan algunos modelos utilizados para determinar ciertas propiedades mecánicas.

2.4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

En México, el ensaye más común para obtener la resistencia a compresión, es el de una pila o prisma que se realiza de acuerdo a la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 [38] (Ver Figura 33a). En general se acostumbra prisms de tres, cinco y hasta siete piezas, aunque la relación altura/espesor óptima se encuentra cercana a 4 [14]. El amplio uso de este ensayo se debe a la relativa facilidad de construcción, además de que se reproducen los modos de falla que ocurren en muros a escala natural.

Una pila, puede restringir las deformaciones inducidas por las cabezas de la máquina, de esta manera no influyen de manera importante en el comportamiento [4]. Existe evidencia experimental de que la resistencia de la mampostería en aparejo es notablemente menor que la resistencia de los prismas elaborados con piezas y mortero de las mismas características [41].

Comparando la resistencia entre prismas y muretes, se obtuvo que la resistencia de un murete es aproximadamente el 60% de la resistencia obtenida en una pila, es posible que estas diferencias existan por causas como el aparejo, el tamaño y la esbeltez de los especímenes.

Mann y Betzler [41] evaluaron diferentes modelos experimentales para compararlos con muros a escala real, llegando a la conclusión de que el ensayo más representativo para evaluar experimentalmente la resistencia y comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería es el ensayo propuesto por la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos de Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras por sus siglas en francés RILEM, este tipo de ensayo fue descrito por Wesche y Ilanzis [42] (Ver Figura 33b), que consiste en un elemento con piezas en aparejo a soga unidas con mortero tanto en las juntas horizontales como verticales.

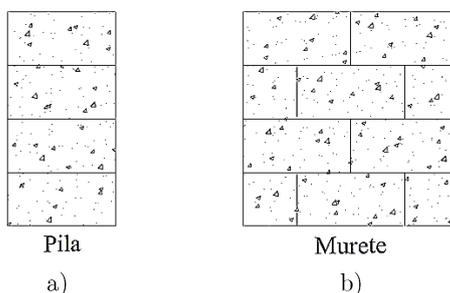


Figura 33. Especímenes experimentales: a) Pila (NMX-C-464-ONNCCE-2010) [38], b) Murete (RILEM)[42].

Las dimensiones geométricas para la elaboración de los muretes se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Características geométricas para el dimensionamiento de los muretes [42]

Dimensiones de la unidad (mm)		Dimensiones del murete.		
Longitud (lu)	Altura(hu)	Longitud (ls)	Altura (hs)	Espesor (ts)
≤300	≤ 150	≥ (2*lu)	≥ 5 hu	≥ tu
	> 150		≥ 3 hu	
> 300	≤ 150	≥ (1.5*lu)	≥ 5 hu	
	> 150		≥ 3 hu	

Un parámetro importante que puede generar diferencias en la resistencia a compresión es la influencia de las placas de carga, ya que restringe los desplazamientos del murete en la zona de contacto (Figura 34 y 35). Por esto, en elementos con relación de esbeltez muy bajas los resultados pueden llegar a ser poco representativos. Para evitar esto, se deben realizar ensayos sobre especímenes de esbeltez geométrica (h/t) cercana a 4 (NTCM) [14] ó 5 (RILEM) [42]. Sin embargo, otros códigos como el ACI 530-05 [34] señalan que la relación óptima es de 2 porque el resultado es únicamente el producido por la interacción de los materiales, mas no producido por la relación de esbeltez.

La influencia de las placas de carga para determinar la resistencia a compresión es importante para morteros de alta resistencia, sin embargo la influencia de las placas disminuye conforme se incrementa la esbeltez. En términos generales, la influencia de la fricción debido a las placas es del 10% para morteros de baja resistencia y del 30% para morteros más resistentes [43].

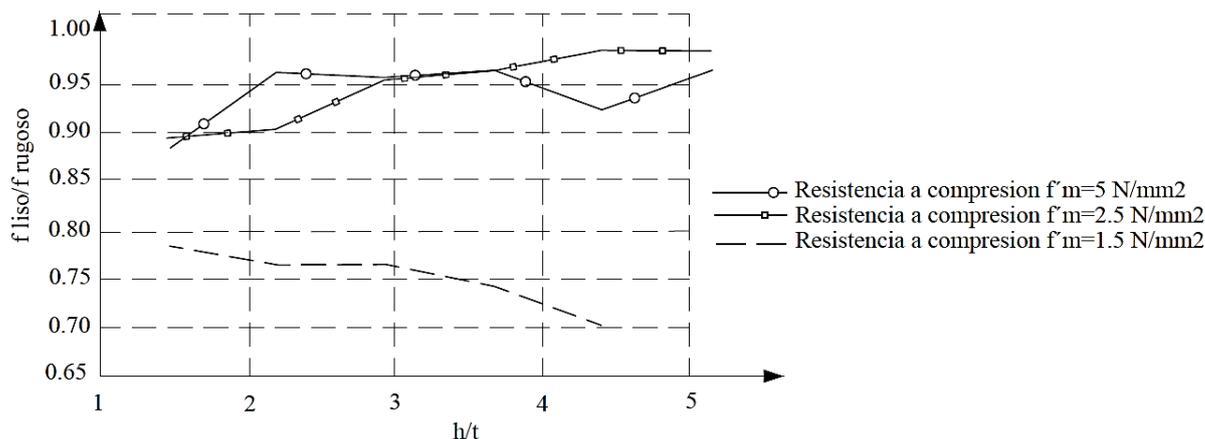


Figura 34. Relación entre las resistencias experimentales obtenidas en los ensayos sin y con rozamiento entre el dispositivo y el muro para distintas esbelteces [43].

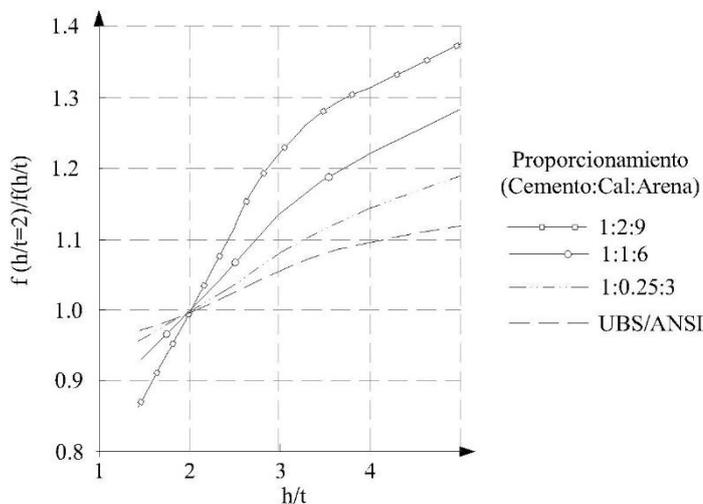


Figura 35. Relación entre las resistencias experimentales obtenidas en los ensayos sin y con rozamiento entre el dispositivo y el muro para distintas esbelteces referidos a esbeltez de 2 [43].

2.4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAGONAL.

En México, para estudiar este comportamiento se aplican fuerzas de compresión diagonal a un murete cuya longitud se basa en al menos una y media piezas. En este ensaye determinado por la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 [38] se produce un estado de esfuerzos a compresión a lo largo de la diagonal en la cual se aplica la carga, pero al mismo

tiempo se produce un estado de esfuerzos a tensión a lo largo de la diagonal perpendicular; por esta razón el modo de falla es prácticamente en todos los casos por tensión diagonal.

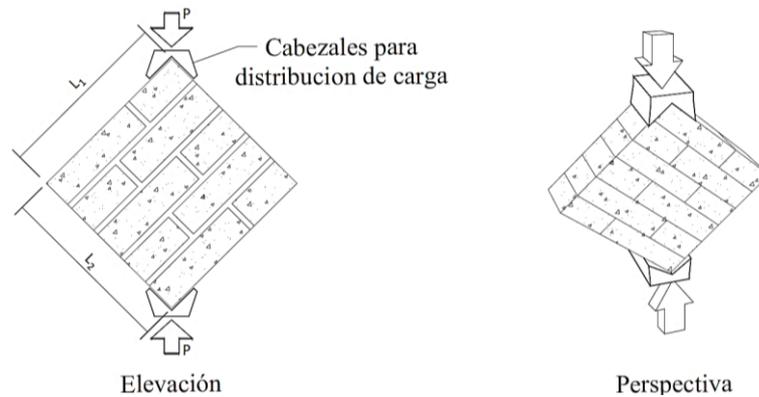


Figura 36. Modelo experimental para pruebas a compresión diagonal [38].

2.4.3. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CARGA.

Prietsley y Elder [23] realizaron ensayos de compresión sobre pilas de mampostería comparando dos velocidades de carga una de 0.0005 y 0.6% ϵ/s . De acuerdo a la evidencia experimental obtenida se demostró que a mayor velocidad de carga aplicada durante un ensayo a compresión existe un incremento en la resistencia de los especímenes.

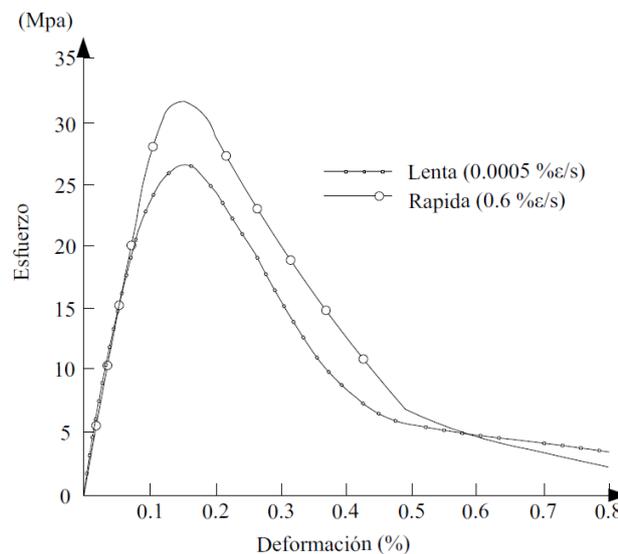


Figura 37. Comparación entre las curvas promedio a velocidad rápida y velocidad lenta [23].

Al comparar los resultados se puede observar que existe un incremento en la resistencia aproximadamente del 20%, al evaluar elementos sin refuerzo, además, se observó que la

velocidad de carga no afecto significativamente la deformación, ni los módulos de elasticidad. Los datos obtenidos de las pruebas experimentales se ajustaron al modelo propuesto de Kent-Park para concreto simple, el cual se adaptó para considerar la influencia de la velocidad de carga, los resultados experimentales presentaron una buena correlación con los especímenes reales (Figura 38).

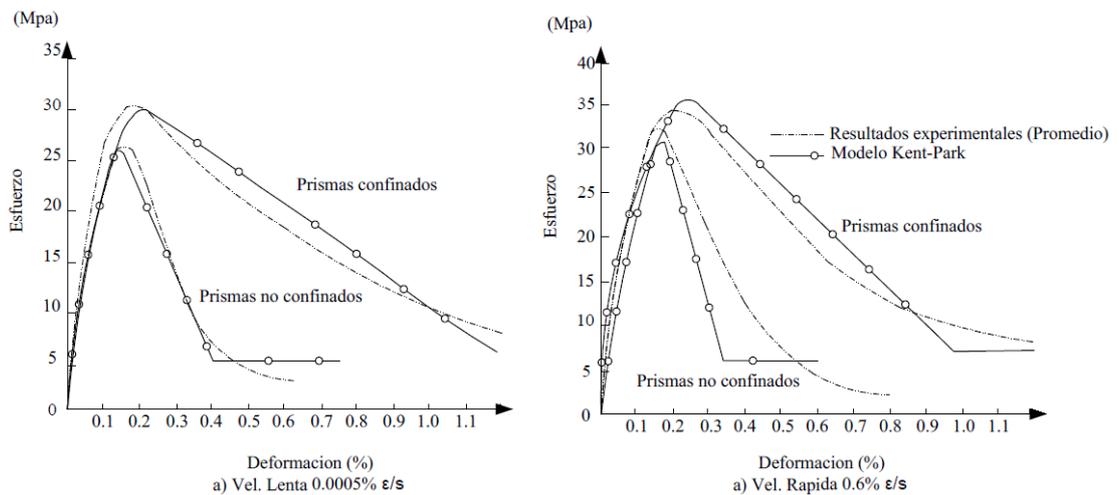


Figura 38. Curvas esfuerzo deformación teórica y experimental [23].

Tabla 12. Resultados de ensayos en prismas [23].

Especímen	Ancho del bloque (mm)	Confinamiento	Refuerzo vertical	Velocidad de carga	$f' m$ (Mpa)	ϵ_0	$f_{0.003}/f' m$	$f_{0.006}/f' m$	E_m (Gpa)
S1-1	190	No	No	Lenta	27	0.00165	0.63	0.24	32.7
S1-2					26	0.0015	0.59	0.16	26.4
S1-3					27.1	0.00145	0.54	0.07	28.6
S1-4	190			Rápida	31.2	0.0015	0.63	0.11	30.5
S1-5					32.4	0.0015	0.59	0.11	30.5
S1-6					30.9	0.00155	0.71	0.19	30.5
S2-11	140	No	No	Lenta	26.9	0.00155	0.34	0.05	28.4
S2-1	140			Rápida	33.7	0.0019	0.74	0.08	33.3
					33	0.00165	0.68	0.14	27.4
S2-7	140	Si	No	Lenta	29.9	0.0018	0.89	0.58	28.8
S2-13					30.3	0.0017	0.91	0.75	31.8
S2-2				140	Rápida	34.8	0.00185	0.95	0.51
	S2-3					32.2	0.0185	0.92	0.53
S2-12	34.8				0.00225	0.93	0.45	31.5	
S2-14	140			No	Si	Lenta	28.3	0.00185	0.52
S2-9	140	Rápida	33.2			0.00145	0.55	0.19	32.6
S2-15	140	Si	Si	Lenta	31.5	0.00185	0.9	0.5	33.9
S2-10	140			Rápida	36.4	0.00205	0.95	0.65	26.1

En el caso de elementos confinados con acero de refuerzo, se observó una modificación substancial, ya que la resistencia se incrementó a velocidad lenta, además se observaron altos niveles de ductilidad. En la Tabla 12 se presenta un resumen de los resultados obtenidos con diferentes condiciones de velocidad de carga y de refuerzo

2.5 FORMULAS PARA OBTENER LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA MAMPOSTERÍA.

Se han realizado bastantes intentos para desarrollar fórmulas matemáticas con las cuales se obtenga la resistencia a compresión de la mampostería, sin embargo, en México la investigación experimental desarrollada es insuficiente, costosa y discontinua. Por lo que además de lo complejo que es plantear un modelo matemático, es poca la información experimental que le sirve de referencia.

2.5.1. FORMULAS EMPÍRICAS.

En países avanzados en el estudio de estructuras de mampostería, el diseño se determina analíticamente mediante fórmulas basadas en estudios extensos y experimentales, a ese tipo de fórmulas se les denomina empíricas [33], la siguiente ecuación es una de las fórmulas de mayor uso asociada a esta propiedad en Europa la cual está contenida en el Eurocodigo 6 [44].

$$f = k \cdot f_b^A \cdot f_m^B \quad (3)$$

Donde f es la resistencia a compresión de la mampostería, f_b es la resistencia a compresión de los bloques y f_m es la resistencia a compresión del mortero. k , A y B son coeficientes cuyos valores están asociados a diferentes tipos de materiales y se ajustan de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos.

En Estados Unidos, el ACI 530-99 [45] establece una formula diferente (Ecuación 4) la cual representa una envolvente de todos los resultados experimentales con los cuales se formuló dicha ecuación y depende de las características resistentes de las unidades.

$$f = 2.8 + (0.2 \cdot f_b) \quad (4)$$

En esta expresión, f es la resistencia a compresión de la mampostería y f_b es la resistencia de la unidad. Las siguientes figuras (39a y 39b) muestran los resultados experimentales obtenidos de los prismas ensayados para determinar la ecuación anterior.

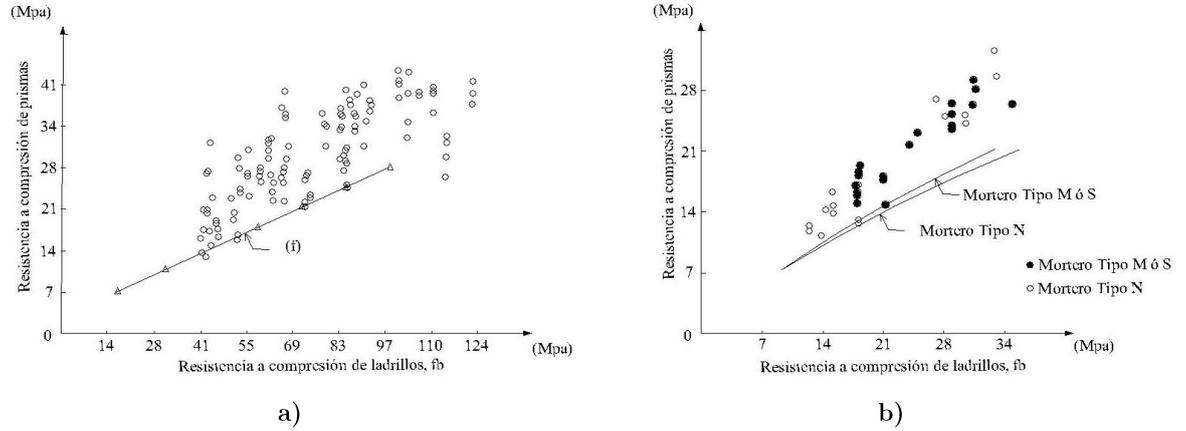


Figura 39. Envoltentes y resultados experimentales para prismas de ladrillo y concreto [45].

En México se tuvo como antecedente una ecuación para determinar la resistencia a compresión, la cual está contenida en las Normas Técnicas complementarias del Distrito Federal de 1966.

$$f_m = \frac{f'_t}{\frac{f'_t}{0.8 \cdot f_a} + 4} \quad (5)$$

Donde f_a es la resistencia a compresión directa a los 28 días del mortero empleado en la fabricación de mampostería, f_m es la resistencia a compresión de la mampostería, la determinación de f'_t que representa la resistencia de la pieza corregida por relación de esbeltez se determina con la siguiente ecuación:

$$f'_t = \frac{(1 - 2 \cdot r)}{3} \cdot f_b \quad (6)$$

En los términos de esta ecuación f_b representa la resistencia a compresión directa respecto al área bruta de la sección transversal de la pieza, ensayada en la misma dirección en que actúan las cargas en la estructura y r es la relación de esbeltez del espécimen.

Actualmente las NTCM [14] presentan 3 criterios para obtener la resistencia a compresión, la primera es mediante ensayos experimentales obtenidos de pilas, la segunda

consiste en el uso de valores representativos de la resistencia de la mampostería en función de la resistencia conocida de las piezas y cuando no se tiene alguna referencia sobre resistencia tanto de las piezas o los morteros se presentan valores indicativos de la resistencia mínima esperada.

2.5.2. FORMULAS FENOMENOLÓGICAS.

Además de las formulas empíricas, que se plantean en función de la relación de los resultados experimentales obtenidos de la pieza y el mortero con el muro, existen otras fórmulas para cuantificar la resistencia a compresión que se adaptan a distintos tipos de unidad y material.

En este campo destacan principalmente los trabajos realizado por Ohler [46] y Hilsdorf [47] por la aceptable correlación de los resultados obtenidos con sus fórmulas, además porque permiten considerar de forma explícita los aspectos fundamentales que condicionan el valor de la resistencia a compresión mediante parámetros sencillos, ya que en su planteamiento asumen que el fallo de las unidades y el mortero se puede representar con un comportamiento lineal, de acuerdo al modelo Mohr-Coulomb que generalmente se aplica a materiales para los cuales la resistencia a la compresión es superior a la tensión de acuerdo a esto Hilsdorf [47] propuso que la carga máxima en la mampostería este dada por:

$$P = \sigma_c^b \frac{\sigma_T^b + K \cdot \sigma_T^m}{\sigma_T^b + K \cdot \sigma_T^m} \text{ con } K = \alpha \cdot \frac{\sigma_T^m}{\sigma_C^m} \quad (7)$$

Donde $\sigma_T^b < \sigma_c^b$ son las resistencias a tensión y compresión de las unidades respectivamente ($\sigma_T^m < \sigma_C^m$ para el mortero), dado que las unidades son generalmente mucho mas resistentes que el mortero, se asume que σ_c^b es mayor que σ_C^m y α es igual a:

$$\alpha = \frac{t_m}{t_b} \quad (8)$$

Donde t_m es igual al espesor de la junta del mortero y t_b es la altura de la pieza. Sin embargo, las comparaciones contra resultados experimentales no fueron totalmente satisfactorias.

Posteriormente Khoo y Hendry [31] buscaron mejorar la formula anterior, por lo que realizaron una serie de ensayos de unidades a compresión y tensión, además de ensayos de mortero a compresión triaxial (Figura 40).

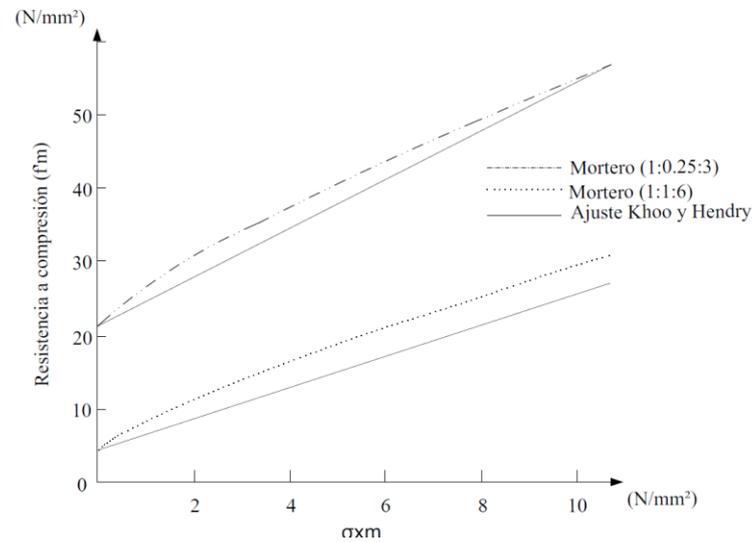


Figura 40. Resistencia del mortero en estado triaxial [31].

En estos resultados se encontró que la envolvente de ruptura de las unidades era convexa hacia el origen y considerablemente diferente a la línea recta teórica Mohr-Coulomb, asumida por Hilsdorf [47] (Figura 41).

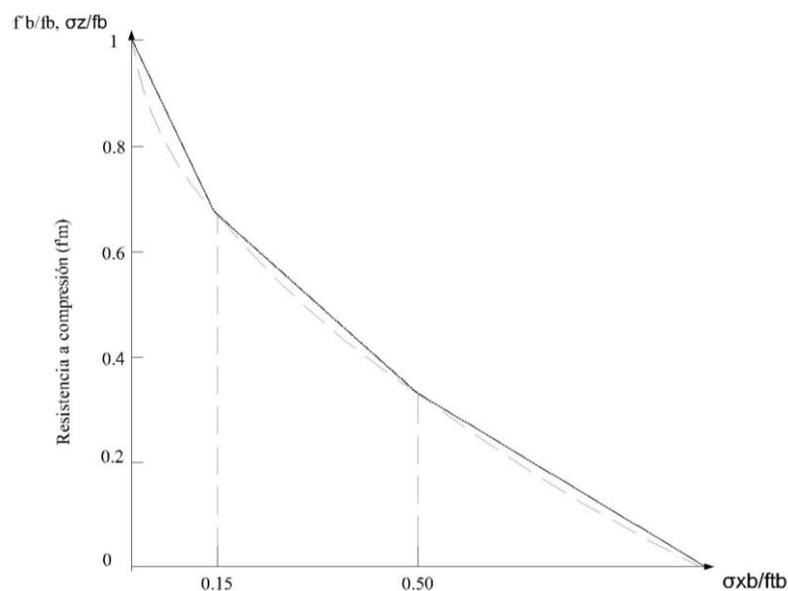


Figura 41. Envolvente de ruptura de ladrillo recocido [31].

Otra causa de la desviación de datos del modelo expuesto por Hilsdorf [47] contra los datos experimentales es el estado de esfuerzos interno que no satisface todas las condiciones de contorno.

La Figura 41 presenta la envolvente de ruptura de un ladrillo recocido, en las abscisas el esfuerzo a tensión está dividido por la resistencia a tensión, en ordenadas el esfuerzo de compresión actuante está dividido entre la resistencia a compresión de la pieza, en cualquier punto a la derecha de la curva la pieza falla.

Por otra parte, el modelo tampoco considera la incidencia de las juntas verticales con las envolventes de falla para cada componente (unidad y mortero) establecidas, Khoo y Hendry [31] definen el punto de falla de la mampostería σ_z y σ_{xb} como la intersección de las envolventes de la unidad y el mortero tal como se observa en la Figura 42.

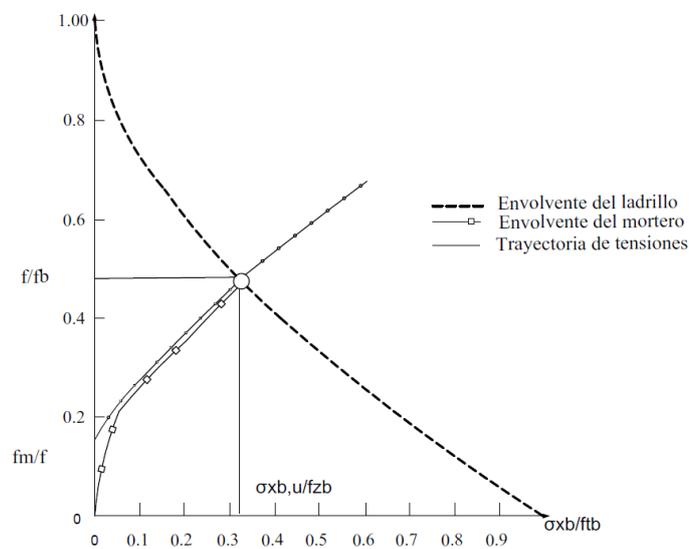


Figura 42. Envolvente de falla de ladrillo recocido [31].

Ohler [46] desarrollo un trabajo similar e incluyo algunas simplificaciones numéricas que lo condujeron a obtener la resistencia de la mampostería mediante la siguiente expresión:

$$f = f_m + \frac{a \cdot (f_b - f_m)}{1 + \frac{b \cdot \alpha \cdot f_b}{m \cdot f_{tb}}} \quad (9)$$

Donde f es la resistencia de la mampostería, f_m y f_b la resistencia de las piezas y el mortero en ensayo triaxial respectivamente, α la relación alto de la pieza y el ancho del mortero, a y b los parámetros de la envolvente trilinear de Ohler para la unidad y m la pendiente de la envolvente de falla del mortero, con esta fórmula se ha encontrado bastante aproximación con los datos experimentales en mampostería de ladrillo.

Como una alternativa al campo del análisis limite, el cual se supone un comportamiento perfectamente plástico de ambos componentes, es posible aceptar otra aproximación totalmente diferente, adoptar un comportamiento perfectamente frágil para los dos componentes de la mampostería. Este varía respecto a la hipótesis de Hilsdorf [47], ya que los esfuerzos laterales de las unidades (σ^b) son derivados ahora de un cálculo elástico. La propuesta de Tassios [52], asume un comportamiento elástico isotrópico para la unidad y el mortero, por lo que las deformaciones de cada componente son iguales. Con el estado de esfuerzos conocido, la falla tiende a ocurrir primero en las unidades como fue observado experimentalmente. Tassios eligió un criterio de falla Mohr-Coulomb para las unidades y obtuvo la expresión para la carga máxima (P_{max}): .

$$P_{max} = \frac{\sigma_C^b}{1 + \frac{\sigma_C^b}{\sigma_T^b} \cdot \frac{\alpha \cdot (\nu_m \cdot E_b - \nu_b \cdot E_m)}{(1 - \nu_m \cdot E_b) + (\alpha \cdot 1 - \nu_m \cdot E_m)}} \quad (10)$$

Donde ν , σ , E representan el coeficiente de poisson, los esfuerzos resistentes en compresión y tensión respectivamente, el módulo de elasticidad, los subíndices b y m representan la pieza y al mortero.

Se observa que la resistencia de la mampostería se incrementa cuando la resistencia a compresión o tensión de la unidad es mayor y disminuye cuando la relación del espesor de junta a la altura de la unidad es mayor.

Hilsdorf [47], propuso también un modelo para determinar la resistencia a compresión simple de pilas de mampostería, a partir de ensayos estándar a compresión de sus componentes. En este modelo se asume que los esfuerzos laterales σ_x y σ_z son iguales [22].

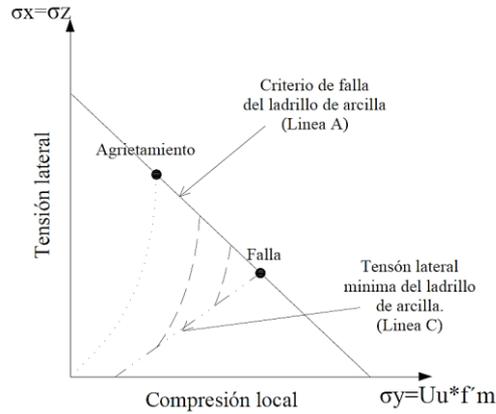


Figura 43. Criterios de falla de ladrillo recocido [31].

Donde los esfuerzos σ_x y σ_z están dados como una función del esfuerzo local máximo σ_y , el cual actúa en la dirección de la aplicación de la carga externa. En la Figura 43 la línea A representa el criterio de la falla para la resistencia de un bloque sujeto a un estado triaxial de esfuerzos, mediante la combinación de esfuerzos a compresión y de los esfuerzos laterales a tensión σ_x y σ_z , los cuales causan la falla local o agrietamiento de la unidad, efecto que se presenta de manera similar en cualquier tipo de mampostería cuando la pieza es más rígida que el mortero.

La expresión que define el criterio de falla de línea A, se muestra en la siguiente ecuación:

$$\sigma_x = \sigma_z = \sigma_{tb} \left[1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_{cb}} \right] \quad (11)$$

Donde σ_{cb} es la resistencia máxima a la compresión de la unidad y σ_{tb} es la resistencia de la unidad bajo tensión biaxial.

La línea C es el esfuerzo de tensión lateral mínimo, el cual actúa en la unidad para confinar el mortero y depende del comportamiento del mortero bajo compresión triaxial. Normalmente se supone que el comportamiento del mortero bajo compresión triaxial es similar al del concreto simple sujeto a compresión triaxial.

A partir de estudios experimentales efectuados sobre especímenes de concreto confinados sujetos a un estado triaxial de esfuerzos por compresión simple [28], se obtuvo que los datos experimentales obtenidos podrían ser ajustados con la siguiente ecuación:

$$f'_1 = f'_c + 4.1 \cdot \sigma_z \quad (12)$$

Donde $f'1$ es la resistencia a compresión de un cilindro de concreto lateralmente confinado $f'c$ es la resistencia a compresión uniaxial de un cilindro de concreto y σ_z es el confinamiento lateral del cilindro.

Si la ecuación es válida para morteros, entonces el confinamiento lateral mínimo o de la junta del mortero se puede calcular con la ecuación:

$$\sigma_{xm} = \frac{1}{4.1} (\sigma_y - \sigma_{cm}) \quad (13)$$

Donde σ_{xm} es el esfuerzo de compresión lateral en la junta del mortero, σ_y es el esfuerzo en la dirección "Y" y σ_{cm} es la resistencia a compresión uniaxial del mortero. Por simplicidad se supone que el esfuerzo lateral a tensión en los ladrillos σ_{xb} y el esfuerzo lateral de compresión en las juntas del mortero (σ_{xm}) se distribuye uniformemente sobre la altura de los ladrillos (tb) y el espesor de la junta de mortero (tm). Entonces por equilibrio de fuerzas tenemos la ecuación:

$$\sigma_{xb} \cdot tb = \sigma_{xm} \cdot tm \quad (14)$$

Sustituyendo la Ecuación 14 se tiene la expresión para la línea C:

$$\sigma_{xb} = \frac{tm}{4.1 \cdot tb} \sigma_y - \sigma_{cm} \quad (15)$$

Igualando las ecuaciones obtenemos la magnitud del esfuerzo máximo local en la falla (σ_y), la cual define la intersección de las líneas A y C, la expresión del esfuerzo local en la falla se muestra con la ecuación:

$$y = \sigma_{cb} \cdot \frac{4.1 \cdot \sigma_{tb} + \alpha \cdot \sigma_{cm}}{4.1 \cdot \sigma_{tb} + \alpha \cdot \sigma_{cb}} \quad (16)$$

Donde $\alpha = \frac{t_m}{t_b}$

Usando el coeficiente de no uniformidad en la falla U_u , el esfuerzo nominal promedio de la mampostería en la falla puede expresarse con la ecuación:

$$\sigma_{ym} = f' m = \frac{\sigma_y}{U_u} = \frac{4.1 \cdot \sigma \cdot tb + \alpha \cdot \sigma_{cm}}{4.1 \cdot \sigma \cdot tb + \alpha \cdot \sigma_{cb}} \quad (17)$$

Donde U_u es un coeficiente para la no uniformidad de los esfuerzos que generalmente se supone igual a 1.5

A partir de este modelo teórico de Hilsdorf [47] se deduce que la resistencia a compresión de la mampostería ($f'm$) se incrementa con el aumento de la resistencia a compresión de las piezas y del mortero, con el incremento de la resistencia a tensión de los ladrillos y la disminución en la relación del espesor de la junta. U_u es el factor que depende del espesor de la junta y la resistencia del mortero.

Una comparación de la resistencia analítica y experimental resultantes son presentados en la Figura 44, se observa que con el modelo teórico de Hilsdorf [47] la resistencia a compresión de los especímenes ensayados puede ser dentro de una tolerancia de $\pm 20\%$ de los valores reales con piezas de buena manufactura como lo exponen Mayes et al. [22].

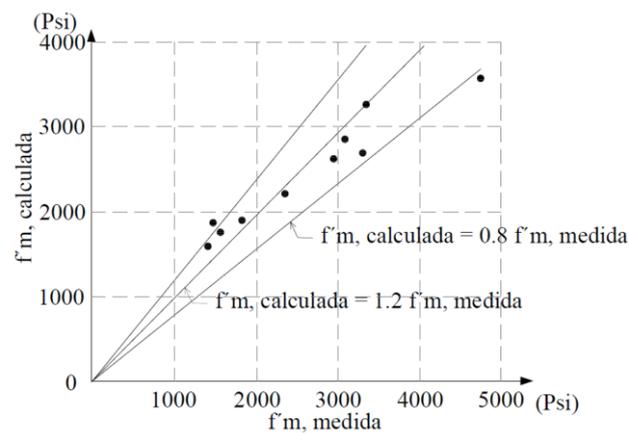


Figura 44. Comparación de los valores de resistencia de mampostería vs. estimada [22].

PROGRAMA EXPERIMENTAL

“Los estudios numéricos no los creó nadie, sólo la persona que los ha desarrollado. Los estudios experimentales los cree todo el mundo excepto quien los ha llevado a cabo.”

PROF. JAIME PLANAS ESCUELA DE INGENIEROS DE CAMINOS, C. Y P. DE MADRID

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.

En este capítulo se presenta el procedimiento y las actividades experimentales realizadas para investigar el comportamiento de muretes de mampostería sometidos a cargas verticales de compresión.

Para evaluar las propiedades mecánicas en piezas, morteros y muretes fue necesario llevar a cabo tres fases experimentales:

PRIMERA FASE:

Aquí se obtuvieron las propiedades mecánicas de las piezas utilizadas, que fueron cuatro tipos con diferentes materiales y geometrías, en total se analizaron 36 unidades, es decir nueve muestras por cada tipo de material. Se usaron en la investigación bloques de concreto ligero con dos celdas, bloques de concreto normal con dos celdas, tabiques de arcilla con dos celdas y tabiques de arcilla multiperforadas.

SEGUNDA FASE:

Para conocer el comportamiento mecánico del mortero empleado, se evaluaron experimentalmente nueve cubos para determinar el comportamiento a compresión y nueve especímenes denominados briquetas para estudiar el comportamiento a tensión directa.

TERCERA FASE:

Se construyeron y analizaron 36 muretes elaborados con los cuatro tipos de piezas de la primera fase y el mismo tipo de mortero analizado en la segunda fase. Los muretes fueron sometidos a tres velocidades de carga: lenta, moderada y rápida.

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS.

Los materiales usados para llevar a cabo la investigación experimental fueron los siguientes:

CEMENTO:

Se utilizó cemento hidráulico que cumplió con los requisitos especificados en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2010 [48].

CAL:

Para la elaboración de morteros se seleccionó cal hidratada de acuerdo a los requisitos especificados en la norma NMX-C-003-ONNCCE-2010 [49].

ARENA:

Se usó arena procedente de un banco de materiales que cumplió con las especificaciones de la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004 [50]

AGUA:

El agua utilizada para la realización de las mezclas de mortero, fue la disponible en la red de agua potable local.

PIEZAS:

Se usaron cuatro tipos de piezas de acuerdo al material de elaboración, las dimensiones y características de las piezas se verificaron de acuerdo a la NMX-C-404-ONNCCE-2011 [19].

MAQUINAS UNIVERSALES:

Para evaluar las propiedades de las piezas de concreto y morteros se utilizó una maquina universal Instron DX 600 con una capacidad de carga de 60 T. y control en la velocidad de carga.

Para determinar las propiedades de los muretes y de piezas elaboradas de arcillas se empleó una maquina universal Tinnius Olsen con una capacidad de 200 T. y con control en la velocidad de carga.

TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO LINEAL:

Para medir las deformaciones, se usaron instrumentos de medición conocidos como LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

3.3 FASE EXPERIMENTAL

En este apartado se describen los procedimientos experimentales usados para investigar los morteros, piezas y muretes, con el fin de lograr los objetivos de esta investigación.

3.3.1. MORTEROS

El mortero utilizado fue tipo 1 según lo señala la norma NTCM-04 [14], que indica una resistencia mínima esperada f_j^* de 125 kg/cm². Para elaborar dicho mortero fue necesario realizar una dosificación de manera volumétrica con cubetas graduadas con una proporción cemento:cal:arena de 1:0.25:3.

Para realizar la mezcla del mortero, se utilizó una revolvedora mecánica (Figura 45a) con la finalidad de obtener una mezcla con una adecuada manejabilidad. La fluidez del mortero fue de 115% (Figura 45b) utilizando una relación agua/cemento de 0.35. Enseguida se procedió a obtener los especímenes para lo cual se engrasaron previamente los moldes, y una vez llenos se cubrieron de acuerdo a las indicaciones señaladas en la norma correspondiente.



a)



b)



c)

Figura 45. a) Proceso de mezclado, b) Prueba de fluidez y c) Moldes cúbicos de mortero.

Los especímenes de mortero se elaboraron de acuerdo a la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013 [20] para pruebas a compresión y ASTM-C-307 [51] para pruebas a tensión. Para determinar estas propiedades se analizaron nueve especímenes, las muestras se construyeron con la misma mezcla elaborada para la construcción de los muretes.

Para determinar la resistencia a compresión, se elaboraron especímenes cúbicos de 5 x 5 cm (Figura 46a). Por otra parte para determinar la resistencia a tensión se probaron especímenes conocidos como briquetas, estos especímenes se caracterizan por que la zona de análisis se encuentra en el tercio medio de su longitud y presenta una sección transversal al centro de 2.54 x 2.54 cm (Figura 46b).



Figura 46. a) Espécimen cubico para pruebas a compresión b) Briqueta para pruebas a tensión.

Una vez que los especímenes fueron retirados de los moldes, se sometieron a las mismas condiciones de curado que los muretes por un periodo mínimo de 28 días antes de ser probados (Figura 47).



Figura 47. Condiciones de curado por 28 días para morteros (cubos y briquetas).

3.3.2. PIEZAS

Para la elaboración de los muretes, se seleccionaron algunas piezas de mayor uso para la construcción en el estado de Nuevo León. Esto de acuerdo a información proporcionada por diferentes organismos locales dedicados a la construcción.

En la Figura 48 se muestran las piezas utilizadas y en la Tabla 13 se presentan las características más importantes.

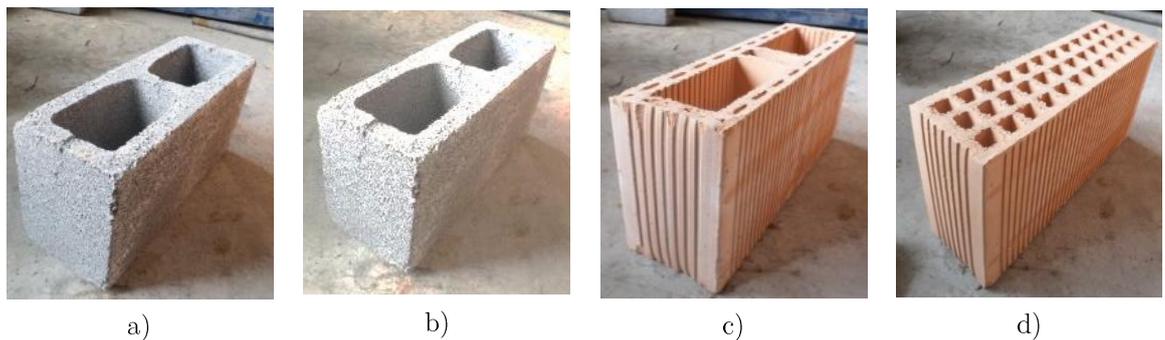


Figura 48. a) Bloque de concreto normal con dos celdas, b) Bloque de concreto ligero con dos celdas, c) Tabique de arcilla multiperforado con dos celdas y d) Tabique de arcilla multiperforado

Tabla 13. Descripción geométrica de las piezas utilizadas.

Tipo de piezas		Altura (cm)	Área Neta (cm ²)	Área Bruta (cm ²)
Bloque de concreto normal con dos celdas. (Figura 48a)		19.30	315.11	577.71
Bloque de concreto ligero con dos celdas. (Figura 48b)		19.20	335.45	565.92
Tabique de arcilla extruido con dos celdas. (Figura 48c)		19.60	195.18	432.32
Tabique de arcilla extruido multiperforado. (Figura 48d)		19.57	254.20	432.32

De acuerdo a la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013 [20] se prepararon las piezas para determinar su resistencia a compresión, la norma señala que la superficie de las unidades en contacto con las placas de la máquina de prueba se deben cabecear con mortero de azufre cuya resistencia mínima debe ser de 34.5 Mpa. La cual es lograda por la dosificación comercial contenida en el producto adquirido para esta prueba.

Para el proceso de cabeceo, inicialmente se calentó el azufre hasta llevarlo a un estado líquido y mediante el uso de una base para cabeceo se colocó la unidad sobre el azufre en estado líquido, cuidando que este no excediera los 5 mm. Posteriormente, se niveló la pieza y se retiraron los excedentes, se dejó la pieza a temperatura ambiente para la fase de curado (Figura 49).

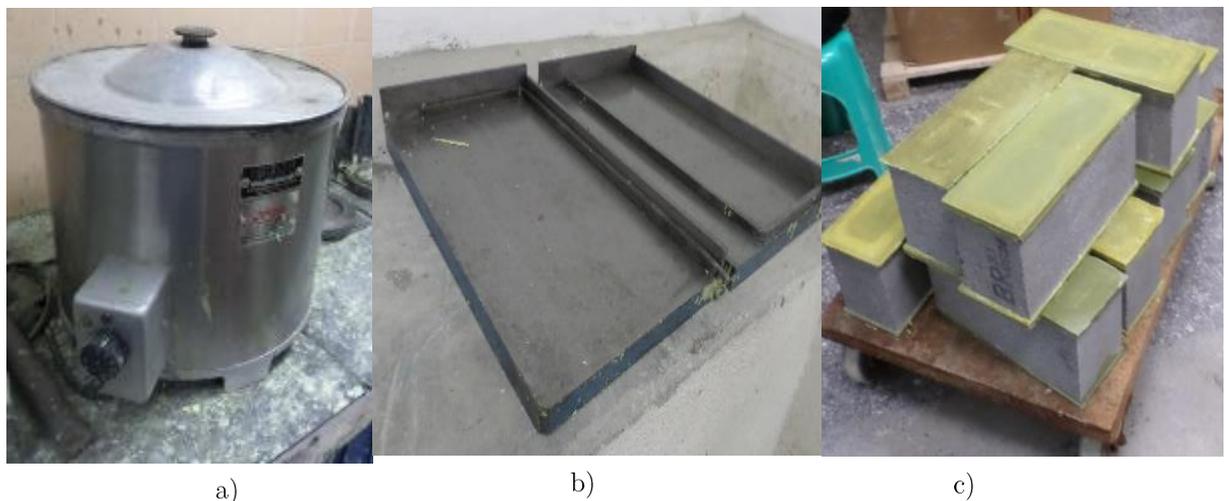


Figura 49. a) Recipiente para calentar azufre b) Molde para cabeceo y c) Piezas con cabeceo

Los especímenes se examinaron después del completo secado del azufre, ya que la resistencia en periodos menores es baja y puede provocar errores en las mediciones debido a deformaciones excesivas o fracturas tempranas en el cabeceo.

3.3.3. MURETES

Se elaboró una serie de muretes cuya geometría se basó en lo señalado por RILEM [42]. Se construyeron cuatro grupos de muretes distintos, la Tabla 14 muestra las dimensiones y características más importantes, puede observarse que los muretes elaborados con piezas de concreto presentaron una relación de esbeltez cercana a 5 y los elaborados con piezas de arcilla una relación aproximada de 7, sin embargo, la relación de aspecto para todos los especímenes oscilo cercana a uno.

Tabla 14. Dimensiones y características geométricas de muretes.

Murete	Pieza	Espesor (cm)	Ancho promedio (cm)	Altura promedio (cm)	Relación de aspecto (Altura/Ancho)	Relación de esbeltez (Altura/espesor)
E1 a E3 E4 a E6 E6 a E9	Concreto normal con dos celdas	14.7	79.6	82.25	1.03	5.60
E10 a E12 E13 a E15 E16 a E18	Concreto ligero con dos celdas	14.4	79.6	81.8	1.03	5.68
E19 a E21 E22 a E23 E24 a E27	Arcilla multiperforado con dos celdas	11.2	78.2	83.4	1.07	7.45
E28 a E30 E31 a E33 E34 a E36	Arcilla multiperforado	11.2	78.2	83.3	1.07	7.44

El arreglo de las piezas en cada hilada es como se muestra en la Figura 50, se colocaron piezas completas y mitades. Para el caso de piezas de concreto se tenían medias piezas prefabricadas. Para las piezas de arcilla se cortó una pieza completa a la mitad, las juntas de mortero tanto horizontales y verticales fueron construidas con un espesor aproximado de 10 mm siguiendo las especificaciones técnicas indicadas en la norma NTCM-2004 [14].

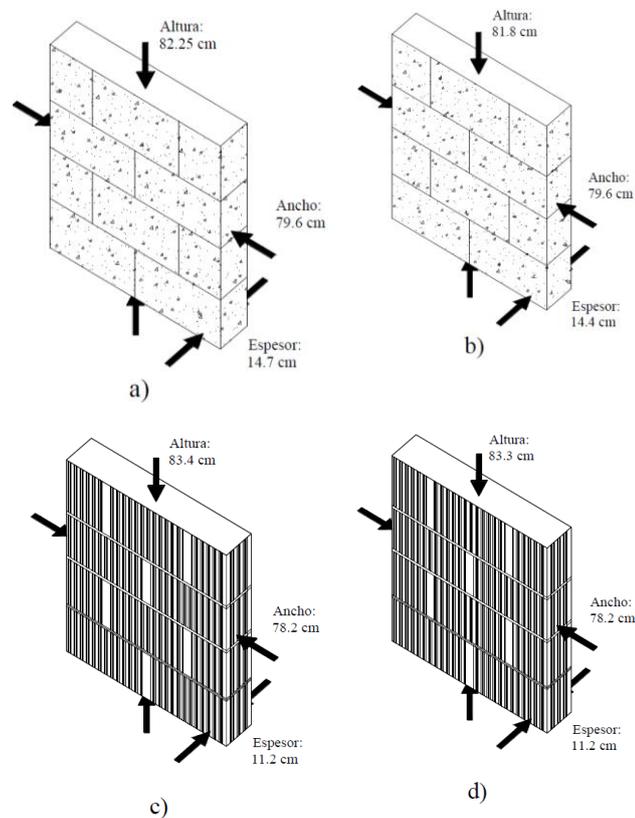


Figura 50. a) Muretes de concreto normal, b) Muretes de concreto ligero, c) Muretes de arcilla multiperforada con dos celdas y d) Muretes de arcilla multiperforada.

3.3.3.1. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.

Los muretes se elaboraron en el laboratorio del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL por personal capacitado, estos se construyeron sobre una superficie plana y limpia, usando nivel de mano y plomada.

La temperatura al momento de la elaboración y curado oscilo entre 23 y 28 ° C con valores de humedad cercanos al 70%.

El proceso de construcción de los muretes fue el siguiente:

1. Previamente se cortaron mitades de piezas de arcilla. El corte se realizó con cortadora de disco. Para las piezas de concreto, se usaron mitades previamente prefabricadas.
2. Para la construcción, se nivelo la superficie de desplante con arena silica, sobre la cual, se puso una placa base usada para asentar los muretes.
3. Posteriormente, se colocó una hoja de policarbonato engrasada sobre la placa base, esto para evitar que la hoja se adhiriera a los muretes.
4. Previamente las piezas de arcilla se saturaron en agua, en cambio las piezas de concreto se colocaron en estado seco, para evitar problemas de absorción.
5. Sobre la hoja de policarbonato se colocó una capa de mortero de 10 mm para después colocar dos piezas completas en la primera hilada, para unir las se colocó mortero en las superficies de contacto tanto en las caras horizontales y verticales (Figura 51a).
6. Después se colocaron las siguientes piezas con el mismo procedimiento, pero ahora iniciando la hilada con una mitad de bloque, para de esta manera lograr intercalar las juntas verticales en el murete (Figura 51b), cada hilada esta era nivelada adecuadamente con un nivel del mano (Figura 51c).

7. En cada murete se realizaron 4 hiladas, la primera y la tercera con dos piezas completas, la segunda y la cuarta con una pieza entera y dos mitades (Figura 51d y e).
8. Las juntas horizontales y verticales en los muretes fueron remetidas para uniformizar las juntas (Figura 51f).
9. Para colocar la última capa de mortero que entra en contacto con la placa de carga, fue necesario sellar los huecos de los bloques con cubos de poliestireno cortados al mismo tamaño de las celdas existentes (Figura 51g).
10. Posteriormente se colocaron hojas de policarbonato en las caras laterales del murete sobresaliendo a una altura de 10 mm y se procedió a colocar la última capa de mortero (Figura 51h).
11. Sobre el mortero se colocó una hoja de policarbonato para que al igual que en la base, generar una superficie lisa y nivelada en el murete.
12. Una vez construido el espécimen se colocó una cubierta de plástico durante 3 días, para evitar una pérdida excesiva de humedad y grietas (Figura 51i).
13. Una vez removida la cubierta de plástico, el murete se expuso a condiciones ambientales por 28 días antes de ser probado (Figura 51j).



Figura 51. Proceso de construcción de muretes.

3.4. PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS.

Una vez elaborados todos los especímenes de prueba se procedió a ensayarlos a compresión vertical uniaxial. En este apartado se presenta la metodología usada y los cálculos necesarios para determinar los valores de resistencia y los diagramas esfuerzo deformación.

3.4.1. MORTEROS.

Después de 28 días de elaboración de los especímenes de mortero, se realizaron las siguientes pruebas para determinar la resistencia a tensión y compresión.

3.4.1.1. ENSAYES A COMPRESIÓN.

Esta prueba consistió en colocar las muestras de mortero en la máquina universal Instron entre dos placas circulares, en las cuales la placa inferior permanece fija y la placa superior permite rotaciones para adaptarse al plano de superficie de la pieza. Las lecturas de las deformaciones y las cargas fueron registradas por el mismo equipo (Ver figura 52).

En esta prueba se aplicó una velocidad de carga según lo indicado en la norma NMX-C-061-ONNCE-2013 [13] en la cual se establece que se debe aplicar la carga a una velocidad conveniente hasta el 50% de la resistencia máxima esperada. Enseguida, se ajustan los controles de la máquina para aplicar una velocidad uniforme de traslado de la cabeza móvil, de tal manera que la carga restante no se aplique en menos de uno ni más de dos minutos.

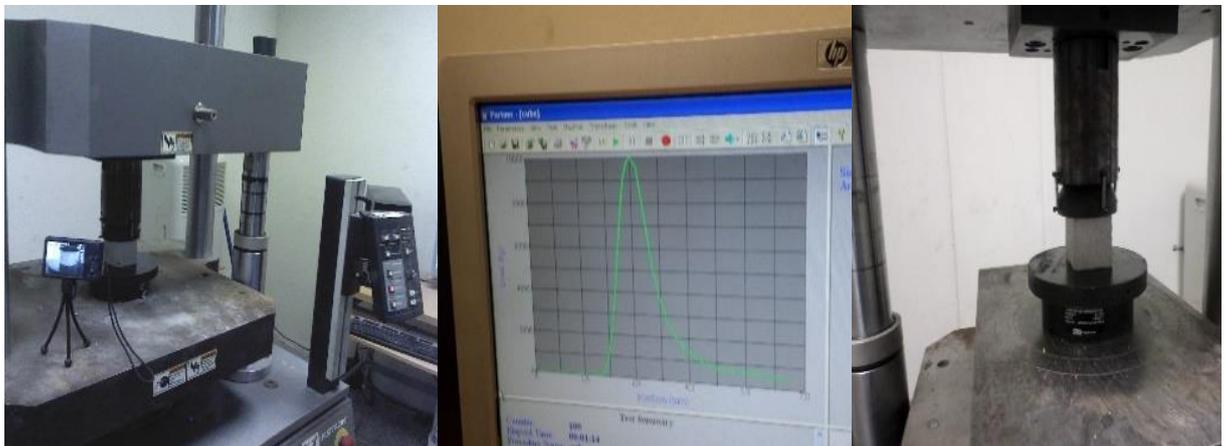


Figura 52. Equipo de pruebas, equipo de adquisición de datos y placas para compresión.

La resistencia a compresión (f_j) para cada cubo se estimó conforme la ecuación:

$$f_j = \frac{P}{S} \quad (18)$$

Donde P es la carga máxima axial aplicada por el cubo en kilogramos y S es el área de la sección transversal en centímetros cuadrados.

La resistencia de diseño, según la norma NTCM (2004) [14] se estimó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f_j^* = \frac{\overline{f_j}}{1 + 2.5 * C_j} \quad (19)$$

Donde $\overline{f_j}$ es la resistencia media a compresión pura de los cubos y C_j es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de los cubos. De acuerdo a dicha norma, el coeficiente de variación de los cubos no deberá ser menor a 0.20.

3.4.1.2. ENSAYES A TENSIÓN.

En este caso, se examinarán nueve especímenes denominados briquetas, la prueba consistió en colocar los especímenes sobre una máquina de prueba con dos grapas adheridas a la máquina que sujetaron los especímenes, los cuales fueron sometidos a cargas directas de tensión. Las lecturas de las deformaciones y las cargas fueron registradas por el mismo equipo (Figura 53). Las condiciones de carga aplicadas sobre las briquetas fueron de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-307 [51].



Figura 53. Máquina de prueba y grapas sujetadoras para la prueba a tensión directa.

La resistencia a tensión del mortero se determinó con la ecuación:

$$S = \frac{P}{bd} \quad (20)$$

Donde P es la carga axial máxima a tensión resistida por la briqueta en kilogramos y bd es el área de la sección transversal al centro del espécimen, normal a la aplicación de la carga, en centímetros cuadrados.

De igual manera se obtuvieron las resistencias de diseño a tensión de morteros, con la siguiente expresión matemática:

$$f_{jt} = \frac{\overline{f_{jt}}}{1 + 2.5 * C_{jt}} \quad (21)$$

Donde $\overline{f_{jt}}$ es la resistencia media a tensión pura de las briquetas y C_{jt} es el coeficiente de variación de la resistencia.

3.4.2. PIEZAS.

El procedimiento de prueba para las piezas se especificó de acuerdo a la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013 [20], la cual consiste en transmitir la carga a través de dos placas rectangulares en la cual la placa inferior permanece fija y la placa superior está conectada a un cabezal que permite rotaciones para adaptarse al plano de superficie de la pieza.

La pieza es cabeceada con azufre, con la finalidad de reducir los efectos de fricción entre la placa de carga y la pieza, además para tener una superficie uniforme y nivelada para la aplicación de la carga.

La medición de los desplazamientos y la carga se realizaron con la maquina universal Instron DX-600.

Para determinar la resistencia a compresión de las piezas se seleccionaron nueve unidades de cada tipo de pieza a las cuales se aplicó una velocidad de carga similar a la indicada en la norma correspondiente para piezas.



Figura 54. Dispositivo de carga para pruebas a compresión directa en piezas.

La resistencia a compresión se calculó conforme a la ecuación:

$$f_p = \frac{P}{A} \quad (22)$$

Donde P es la carga axial máxima resistida por la pieza en kilogramos y A es el área bruta de la sección transversal en centímetros cuadrados.

La resistencia de diseño a compresión para cada tipo de pieza se determinó de acuerdo a lo establecido en la norma NTCM (2004) mediante la ecuación:

$$f_p^* = \frac{\overline{f_p}}{1 + 2.5 * C_p} \quad (23)$$

Donde $\overline{f_p}$ es la resistencia media a compresión pura de las piezas y C_p es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas.

El coeficiente de variación de las piezas según dicha norma no será en ningún caso menor a:

- 0.35 para piezas de producción artesanal
- 0.30 para piezas provenientes de plantas mecanizadas sin un control de calidad
- 0.20 para piezas provenientes de plantas mecanizadas con un control adecuado de calidad.

3.4.3. MURETES.

Para investigar el comportamiento estructural de la mampostería ante cargas de compresión se construyeron nueve especímenes por cada tipo de pieza. Además de las diferencias geométricas y de propiedades mecánicas de los muretes, también se aplicaron tres velocidades de carga diferentes que se muestran en la Tabla 15 para esto se sometieron tres especímenes de cada grupo a una velocidad de carga diferente.

Para el caso de la investigación, se le denominó como velocidad moderada a la velocidad especificada en las NMX-C-464-ONNCCE-2010 [38] la cual fue incrementada o disminuida un 50% para establecer la velocidad rápida y lenta respectivamente.

Tabla 15. Velocidades de carga aplicadas.

Tipo de carga	Velocidad (kg/cm ² /min)
Lenta	11.25
Moderada	22.5
Rapida	33.75

Para aplicar la carga uniforme se colocó una placa de acero de 5" de espesor sobre el puente entre la maquina universal Tinnius Olsen y el murete, además se tuvo que colocar otra placa en la base de la misma que permanecía fija para cubrir toda la longitud del murete (Ver figura 55).

Para complementar los valores de desplazamiento obtenidos por la propia máquina, se fijaron dispositivos LVDT sobre ambas caras del murete de prueba y se compararon los valores obtenidos.



Figura 55. Dispositivo de carga en muretes.

Para transportar los muretes de la zona de curado al área de pruebas fue necesario desarrollar un dispositivo que permitiera su transporte y colocación en la maquina universal de forma segura.

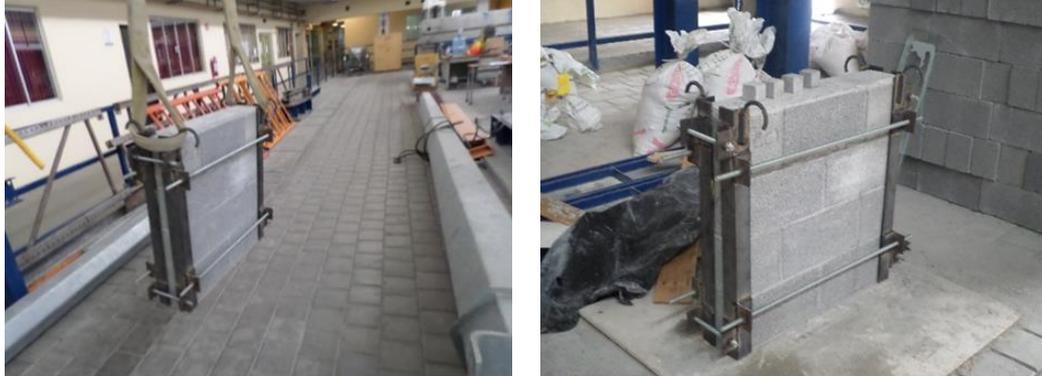


Figura 56. Dispositivos de transporte

Dicho dispositivo, se diseñó de manera que no dañara los muretes, además se le adicionaron cintas de neopreno en toda la zona de contacto para evitar dañarlo (Ver figura 56).

La secuencia de experimentación aplicada sobre los muretes fue la siguiente:

1. Calibración de la maquina universal. Se realizó una verificación de la carga aplicada, mediante dispositivos externos de calibración.
2. Calibración de los LVDT.
3. Mediciones: Se realizó una medición de los muretes y las placas de compresión, para así obtener los centros geométricos de cada elemento y así hacer coincidir el eje de compresión de todos los elementos involucrados en la prueba, de esta forma se trató de evitar problemas de excentricidad.
4. Colocación de los dispositivos de transporte.
5. Transporte del murete hasta la maquina universal.
6. Retiro del dispositivo de transporte.

7. Colocación de los LVDT en el murete. La instrumentación sobre el murete consistió básicamente en la colocación de 2 dispositivos de medición de desplazamientos (LVDT) sobre las placas del espécimen alineados al centro del murete en cada cara, esto debido a la sensibilidad y a los pocos equipos disponibles en el laboratorio. (Ver figura 57). Además, se colocaron otros dispositivos sobre el puente y la base de la maquina universal para verificar que esta no se desplazara al momento de aplicar la carga o al alcanzar la carga máxima.
8. Verificación de la maquina universal y del puente para la adquisición de datos. Pevio a cada prueba se realizó una verificación rápida sobre las lecturas correctas de carga y desplazamiento.
9. Aplicación de la carga. Se procedió a iniciar la prueba, aplicando la velocidad de carga programada para cada espécimen.
10. Recolección de datos. La adquisición de datos se realizó mediante la maquina universal y el puente adquisidor de datos.
11. Verificación de los mecanismos de fractura. Se observaron detalles del murete durante cada incremento de carga y los mecanismos de fractura presentados en los especímenes.
12. Carga máxima. La carga máxima fue establecida como la carga de mayor valor registrada por la maquina universal.
13. Falla del espécimen. Se aplicó carga hasta que el espécimen presento la fractura y/o desprendimiento del material.
14. Análisis final de fractura y colapso. Se tomó evidencia de los patrones de agrietamiento mostradas en los especímenes ensayados.



Figura 57. Instrumentación de los muretes.

Para determinar la resistencia a compresión máxima f_m^* de los muretes, se obtuvieron las cargas máximas resistidas por los nueve especímenes de cada tipo se estimó conforme la ecuación:

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (24)$$

Donde P es la carga axial máxima resistida por el murete en Kg y A es el área bruta de la sección transversal en centímetros cuadrados.

La resistencia de diseño a compresión para cada tipo de muretes se determinó de manera similar a lo señalado en la norma NTCM (2004) [14] basado en la ecuación:

$$f_m^* = \frac{\overline{f_m}}{1 + 2.5 * C_m} \quad (25)$$

Donde $\overline{f_m}$ es la resistencia media a compresión axial de los muretes y C_m es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de los muretes.

3.4.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad se determinó a través de los diagramas esfuerzo deformación, tal como lo indica dicha norma. El modulo será medido en el rango que establece el punto determinado por 0.00005 y el punto determinado por el 40% de la resistencia máxima lograda (Ver Figura 58).

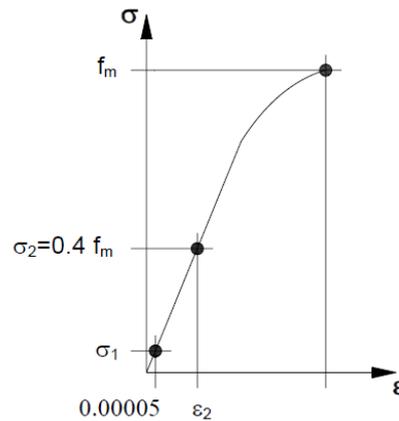


Figura 58. Criterios para determinar el modulo.

Lo anterior se resume en la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (26)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad en Mpa (kg/cm^2).

σ_1 = El esfuerzo axial correspondiente a 0.00005 de deformación en Mpa (kg/cm^2).

σ_2 = El esfuerzo axial correspondiente a 40% de la carga máxima en Mpa (kg/cm^2).

ε_2 = Deformación unitaria producida por el esfuerzo σ_2 .

La deformación unitaria se calculó como:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad (27)$$

Donde:

δ = Acortamiento medido a lo largo de la longitud instrumentada en mm

l_0 = Longitud instrumentada en mm.

3.4.5. GRAFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO.

Las gráficas promedio mostradas para piezas y morteros se elaboraron con hasta siete puntos característicos que representan valores del 50%, 75%, 90% y 100% del esfuerzo máximo antes y después de la carga máxima. Es decir, a estos niveles de esfuerzo se determinaron las deformaciones y esfuerzos correspondientes en cada prueba realizada,

las cuales posteriormente se promediaron, dando paso a la obtención de puntos promedio mediante los cuales se pudo definir la forma del diagrama esfuerzo deformación (Ver Figura 59a). El criterio aplicado para los muretes fue el mismo, sin embargo solamente se pudieron evaluar 5 puntos debido a la cantidad de información recolectada, posterior a la carga máxima se pudo evaluar únicamente un punto que representa el promedio al 95% del esfuerzo máximo en todas las pruebas (Ver Figura 59b).

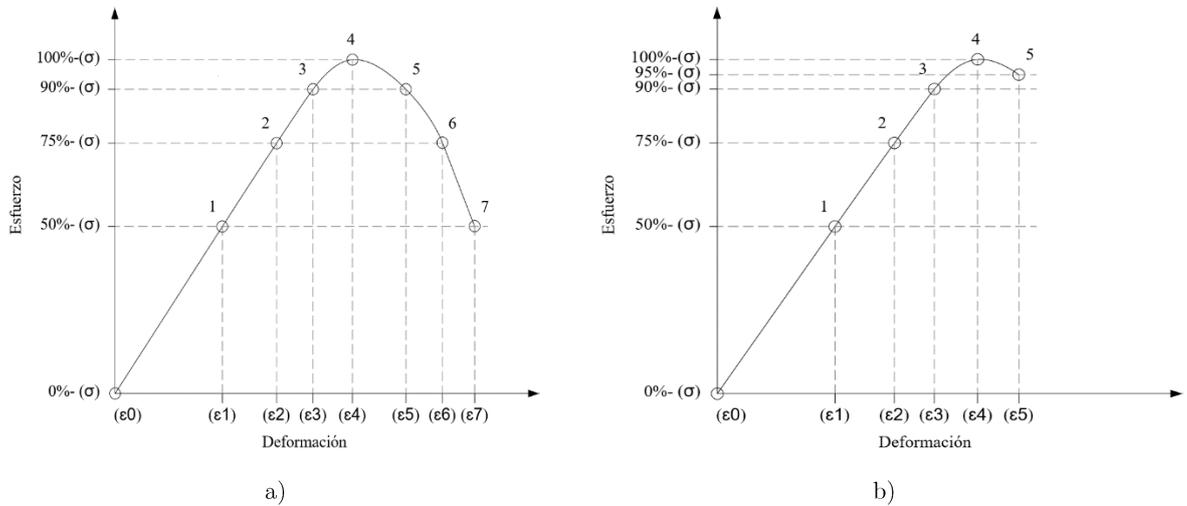


Figura 59. Puntos característicos del diagrama esfuerzo deformación promedio para
a) Piezas y morteros y b) Muretes.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

“La naturaleza ha puesto en nuestras mentes un insaciable deseo de ver la verdad”
Cicerón.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la investigación experimental, todas las pruebas físicas fueron realizadas en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Se muestran las características individuales de cada componente y después los resultados obtenidos de los muretes. La investigación se realizó de acuerdo a la norma correspondiente para cada elemento.

Se le denominó como resistencia a compresión al valor obtenido en los registros de las maquinas universales donde se alcanzó la carga máxima e inicio un comportamiento descendente en el diagrama esfuerzo-deformación.

4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TENSIÓN DEL MORTERO.

Los valores de resistencia a compresión obtenidos de los especímenes cúbicos de mortero se muestran en la Tabla 16, se incluyen los valores de las cargas máximas, resistencias y los coeficientes de variación. De acuerdo a los resultados, en el mortero se presentó un bajo coeficiente de variación, aproximadamente del 5% y una resistencia promedio de 171.48 kg/cm².

Por otra parte, al someter los especímenes a fuerzas de tensión directa se obtuvieron valores de resistencia de 17.11 kg/cm². Sin embargo, los coeficientes de variación obtenidos fueron cercanos al 20%, valor mayor al compararlo con los resultados determinados a compresión, debido al estado frágil del espécimen a tensión, la Tabla 17 muestra los resultados de estos ensayos.

Tabla 16. Resistencia a compresión obtenida experimentalmente en mortero Tipo 1.

Mortero	Dosificación (cemento:cal:arena)	Carga máxima (kg)	Área neta (cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia media (\bar{f}_j) (kg/cm ²)	Coefficiente de variación experimental
M1	1:0.25:3	4142	24.85	166.68	171.48	5.13%
M2		4342	24.95	174.04		
M3		4231	25.00	169.24		
M4		4137	24.72	167.36		
M5		4162	25.00	166.48		
M6		3892	24.75	157.24		
M7		4421	24.9	177.56		
M8		4390	24.85	176.64		
M9		4652	24.73	188.1		

Tabla 17. Resistencia a tensión obtenida experimentalmente en mortero Tipo 1.

Mortero	Dosificación (cemento:cal:arena)	Carga máxima (kg)	Área neta (cm ²)	Resistencia a tensión (kg/cm ²)	Resistencia media (\bar{f}_{jt}) (kg/cm ²)	Coefficiente de variación experimental
T1	1:0.25:3	111	6.45	17.21	17.11	19.57%
T2		82	6.45	12.71		
T3		124	6.45	19.22		
T4		142	6.4	22.19		
T5		109	6.4	17.03		
T6		93	6.44	14.44		
T7		85	6.43	13.22		
T8		107	6.43	16.64		
T9		137	6.43	21.31		

4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS PIEZAS.

En esta fase se presentan los valores obtenidos de los cuatro tipos de piezas, la siguientes tablas (Tablas 18 y 19) contienen los resultados de resistencia a compresión axial.

De manera general, se observó que las unidades elaboradas con concreto ligero presentaron una resistencia menor al compararlas con las piezas de concreto normal y por otra parte, la resistencia presentada por las piezas de arcilla fue superior a las piezas de concreto.

En cuanto a la resistencia a compresión obtenida, las piezas de concreto ligero presentaron valores promedio de 51.24 kg/cm^2 , las de concreto normal de 90.67 kg/cm^2 y las de arcilla multiperforada de 220.93 kg/cm^2 y finalmente, la resistencia media de los tabiques de arcilla de dos celdas fue de 210.51 kg/cm^2 .

Para todos los casos, se presentaron coeficientes de variación bajos que oscilaron entre el 5 y 8% para las piezas de concreto, y en el rango del 2 al 3% para las piezas de arcilla, esto es debido a que las piezas provienen de bancos de materiales con procesos de fabricación mecanizados, con buenas técnicas de curado y una adecuada selección de materias primas.

Tabla 18. Resistencia media a compresión de distintos tipos de piezas de concreto elaboradas en Nuevo León.

Tipo de pieza	Muestra	Área neta (An) (cm ²)	Área bruta (Ab) (cm ²)	An/Ab	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia media (\bar{F}_p) (kg/cm ²)	Coefficiente de variación experimental
Bloque de concreto normal	BC1	315.2	576.3	0.547	53632	93.06	90.67	8.15%
	BC2	312.3	576.2	0.542	57911	100.51		
	BC3	577.7	577.7	0.546	45705	79.11		
	BC4	314.9	577.2	0.546	47230	81.82		
	BC5	315.5	578.2	0.546	58581	101.32		
	BC6	315.1	577.7	0.545	51759	89.59		
	BC7	316.1	580.7	0.544	53482	92.11		
	BC8	315.8	577.7	0.547	52098	90.18		
	BC9	315.3	578.2	0.545	51046	88.29		
Bloque de concreto ligero	BL1	338.7	561.3	0.603	27577	49.13	51.24	4.56%
	BL2	337.1	565.9	0.596	27102	47.89		
	BL3	335.7	569.9	0.589	30596	53.69		
	BL4	336.2	565.9	0.594	30485	53.87		
	BL5	335.7	569.9	0.589	28807	50.55		
	BL6	332.1	563.3	0.593	30625	54.37		
	BL7	333.2	565.9	0.589	28807	50.9		
	BL8	332.3	569.9	0.583	29455	51.69		
	BL9	338.2	561.3	0.603	27566	49.11		

Tabla 19. Resistencia media a compresión de distintos tipos de piezas de arcilla elaboradas en Nuevo León.

Tipo de pieza	Muestra	Área neta (An) (cm ²)	Área bruta (Ab) (cm ²)	An/Ab	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia media (\bar{F}_p) (kg/cm ²)	Coefficiente de variación experimental
Tabique de Arcilla multiperforado con dos celdas	TA1	194.9	432.3	0.451	89354	206.68	210.51	1.93%
	TA2	195.9	431.9	0.454	90356	209.23		
	TA3	196.8	432.6	0.455	93960	217.22		
	TA4	192.8	434.1	0.444	92654	213.43		
	TA5	196.9	432	0.456	91021	210.72		
	TA6	193	432.7	0.446	89324	206.46		
	TA7	194.3	430.9	0.451	92354	214.32		
	TA8	194.6	433.3	0.449	91658	211.54		
	TA9	197.2	432.5	0.456	88652	204.96		
Tabique de Arcilla multiperforado	TAM1	253	432	0.586	93102	215.54	220.93	3.11%
	TAM2	256.2	432.7	0.592	97625	225.64		
	TAM3	256.4	432.3	0.593	102011	235.96		
	TAM4	253.6	431.9	0.587	95432	220.98		
	TAM4	252.7	431.9	0.585	92651	214.51		
	TAM5	254	434.1	0.585	94652	218.04		
	TAM6	252	432.5	0.583	92621	214.14		
	TAM7	256.9	432.6	0.594	95497	220.77		
	TAM8	254	434.1	0.585	94652	218.04		
	TAM9	252.9	433.3	0.584	96538	222.8		

4.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS MURETES.

Uno de los objetivos principales en esta investigación fue determinar el comportamiento mecánico de muretes de mampostería. En este apartado se presentan los resultados obtenidos al ensayar los 36 muretes elaborados con diferentes piezas y con mortero tipo 1. Además de tener distintos tipos de piezas, se aplicaron diferentes velocidades de carga axial, la información obtenida al evaluar estas variables se muestra en la Tabla 20. En términos generales los muretes elaborados con concreto normal, resistieron una carga aproximada de 53.69 T. y una resistencia promedio de 46.33 kg/cm². Los muretes con bloques de concreto ligero tuvieron una carga promedio de 29.25 T. y una resistencia promedio de 25.48 kg/cm², los muretes con piezas de arcilla perforada con dos celdas resistieron una carga promedio de 48.85 T. y una resistencia promedio de 55.46 kg/cm² y finalmente, los tabiques de arcilla multiperforada presentaron una carga máxima promedio de 58.29 T. y una resistencia promedio de 66.17 kg/cm².

Tabla 20. Resistencia media a compresión obtenida en distintos tipos de muretes elaborados en Nuevo León.

Tipo de murete	Espécimen	Velocidad de carga	Área bruta (Ab) (cm ²)	Carga máxima (kg)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia media (f_m) (kg/cm ²)	Coefficiente de variación experimental	
Bloque de concreto normal	E1	Rápida (650 kg/seg)	1170.12	59779.13	51.09	48.15	5.34%	
	E2		1183.06	55701.52	47.08			
	E3		1157.10	53549.87	46.28			
	Bloque de concreto normal	E4	Moderada (440 kg/seg)	1178.08	55631.31	47.22	45.91	4.69%
		E5		1154.20	54345.32	47.08		
		E6		1163.62	50528.05	43.42		
	Bloque de concreto normal	E7	Lenta (215 kg/seg)	1162.80	52267.86	44.95	44.03	2.92%
		E8		1158.60	50387.51	43.49		
		E9		1169.90	51075.49	43.66		
Bloque de Concreto ligero	E10	Rápida (650 kg/seg)	1146.04	32673.60	28.51	27.03	4.87%	
	E11		1152.35	30606.42	26.56			
	E12		1144.32	29763.76	26.01			
	Bloque de Concreto ligero	E13	Moderada (440 kg/seg)	1150.24	31180.18	27.11	25.56	5.30%
		E14		1151.23	28760.86	24.98		
		E15		1144.32	28144.89	24.60		
	Bloque de Concreto ligero	E16	Lenta (215 kg/seg)	1145.75	29085.26	25.39	23.86	6.72%
		E17		1148.21	27582.65	24.02		
		E18		1147.32	25449.39	22.18		
Tabique de arcilla multiperforado de dos celdas	E19	Rápida (500 kg/seg)	884.80	54417.20	61.50	59.95	3.40%	
	E20		877.50	53289.34	60.71			
	E21		881.50	50817.36	57.65			
	Tabique de arcilla multiperforado de dos celdas	E22	Moderada (330 kg/seg)	886.00	49714.55	56.11	54.05	3.96%
		E23		879.80	47684.16	54.20		
		E24		883.70	45810.92	51.84		
	Tabique de arcilla multiperforado de dos celdas	E25	Lenta (165 kg/seg)	879.00	48305.11	54.95	52.38	4.36%
		E26		878.20	45308.61	51.59		
		E27		876.00	44315.52	50.59		
Tabique de arcilla multiperforado	E28	Rápida (500 kg/seg)	876.50	65094.35	74.27	70.06	6.91%	
	E29		879.30	62551.38	71.14			
	E30		885.70	57365.46	64.77			
	Tabique de arcilla multiperforado	E31	Moderada (330 kg/seg)	884.30	61585.04	69.64	66.82	4.26%
		E32		880.10	58840.41	66.86		
		E33		883.30	56485.83	63.95		
	Tabique de arcilla multiperforado	E34	Lenta (165 kg/seg)	880.30	56929.49	64.67	61.65	4.27%
		E35		878.80	52601.93	59.86		
		E36		878.30	53059.07	60.41		

4.4. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN

En esta sección se presentan las gráficas esfuerzo deformación de todos los especímenes estudiados experimentalmente para esta investigación.

Las gráficas mostradas son las curvas obtenidas de las muestras sometidas a cargas de compresión, el eje vertical es el esfuerzo obtenido a partir del cociente entre el área bruta y la carga aplicada. Por otra parte, el eje horizontal indica las deformaciones que fueron obtenidas como desplazamientos y matemáticamente transformadas a deformaciones.

4.4.1. MORTEROS A COMPRESIÓN.

A través del diagrama esfuerzo deformación promedio obtenido (Figura 60), se puede apreciar un comportamiento elástico lineal hasta aproximadamente un 85% del esfuerzo máximo, una vez alcanzada la carga máxima, la pérdida de resistencia del espécimen fue gradual, hasta la falla. La carga promedio máxima osciló cercana a los 171 kg/cm² a deformaciones aproximadas de 0.011.

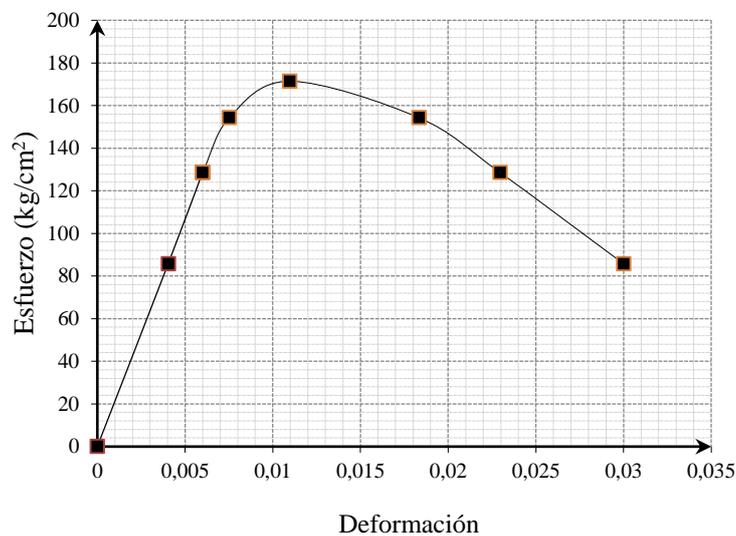


Figura 60. Diagrama esfuerzo deformación promedio a compresión para mortero Tipo 1.

La curva promedio anterior se determinó a partir de los nueve diagramas obtenidos de los cubos de mortero examinados en esta investigación (Figura 61). La curva se definió con los criterios mostrados en la Figura 59a este trabajo.

Se puede apreciar como el comportamiento de los especímenes fue muy similar, incluso después de alcanzar la carga máxima no se presentaron variaciones importantes en la forma del diagrama antes o después de ese punto.

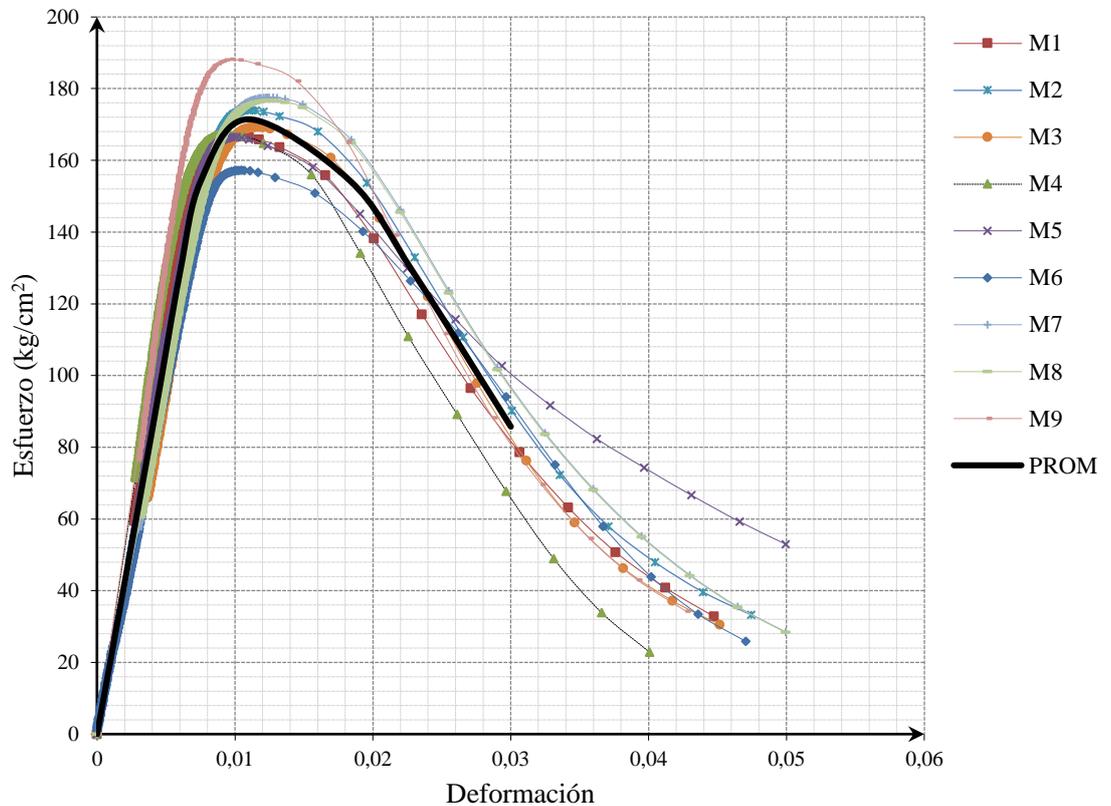


Figura 61. Diagramas esfuerzo deformación a compresión uniaxial de morteros examinados.

4.4.2. MORTEROS A TENSIÓN.

El comportamiento a tensión de las briquetas (Figura 62) presento un rango elástico lineal hasta llegar a la falla del espécimen, dicha falla fue súbita, fragmentando al espécimen en dos piezas. La resistencia promedio máxima se alcanzó a valores cercanos de deformación de 0.00088 la cual fue a un esfuerzo de aproximadamente de 17 kg/cm².

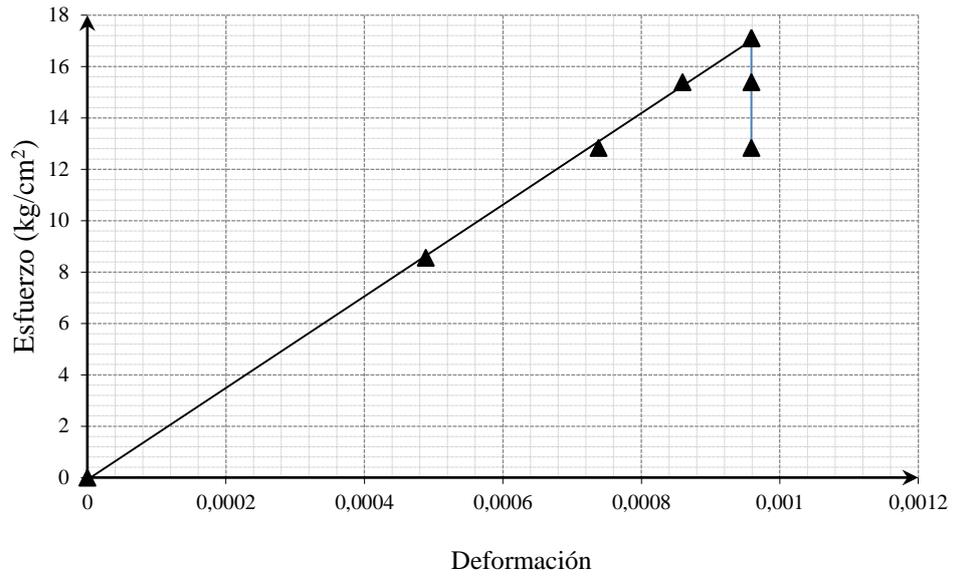


Figura 62. Diagrama esfuerzo deformación promedio a tensión para mortero Tipo 1.

En la Figura 63 se muestran los diagramas a través de los cuales se determinó la curva promedio, la cual se realizó determinando el promedio de la resistencia a diferentes niveles de esfuerzo, posterior a esto, suponiendo un comportamiento lineal, se ligaron los puntos y se determinó el diagrama promedio mostrado.

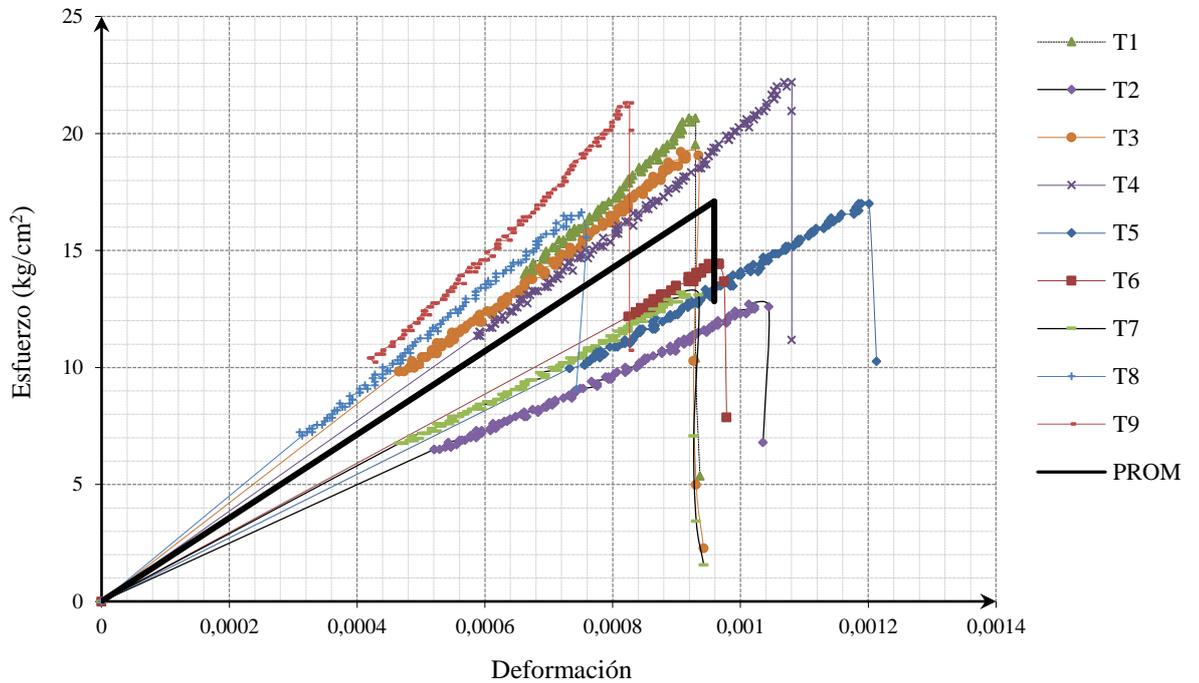


Figura 63. Diagramas esfuerzo deformación a tensión uniaxial de morteros examinados.

4.4.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL MORTERO.

El comportamiento a tensión y compresión exhibido por el mortero examinado en las curvas promedio se muestra en la Figura 64, se puede apreciar como es muy superior la capacidad a compresión en el mortero en términos de resistencia y deformación. Sin embargo la pendiente en ambos diagramas es muy similar.

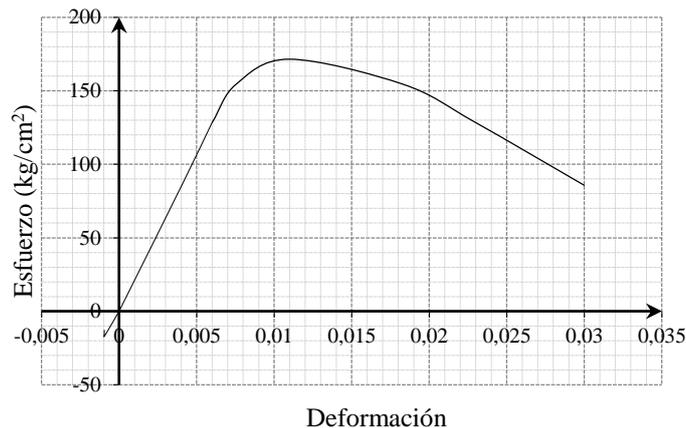


Figura 64. Diagramas esfuerzo deformación a tensión y compresión uniaxial de morteros examinados.

Es por eso, que a través de los diagramas esfuerzo-deformación se pudo determinar el módulo de elasticidad obtenido al evaluar muestras cubicas de mortero y briquetas sometidas a carga axial, cabe mencionar que este valor no representa el módulo de elasticidad que se presenta en un muro, lo obtenido se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Módulo de elasticidad para Mortero Tipo 1.

Mortero (cubos)	Compresión			Tensión			
	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)	Relación promedio (E _j /f _j)	Mortero (briquetas)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)	Relación promedio (E _j /f _j)
M1	20956	21406	125	T1	19297	17439	1018
M2	20577			T2	12745		
M3	20231			T3	19724		
M4	25445			T4	21728		
M5	23024			T5	15582		
M6	17762			T6	14255		
M7	19497			T7	13095		
M8	19224			T8	17950		
M9	25933			T9	22575		

El módulo de elasticidad promedio a compresión y tensión oscilo cercano a valores de 21,406 kg/cm² y 17,439 kg/cm² respectivamente. Según la literatura este valor oscila entre 10,000 y 50,000 kg/cm² [17], relacionándolo con la resistencia a compresión obtenida, es equivalente aproximado a 125 veces su valor y a tensión de 1000 veces.

4.4.4. PIEZAS.

Aquí se presentan parte de los resultados experimentales obtenidos mediante relaciones esfuerzo-deformación promedio de cada uno de los grupos de piezas probados, así como, graficas conteniendo todas las relaciones de las pruebas realizadas individualmente.

4.4.4.1. PIEZAS DE CONCRETO NORMAL.

Para las piezas de concreto normal con dos celdas se obtuvo el diagrama promedio mostrado en la en la Figura 65, los especímenes mostraron un comportamiento casi lineal hasta la falla. La resistencia promedio fue de 90.67 kg/cm², la cual se presentó a una deformación aproximada de 0.0033.

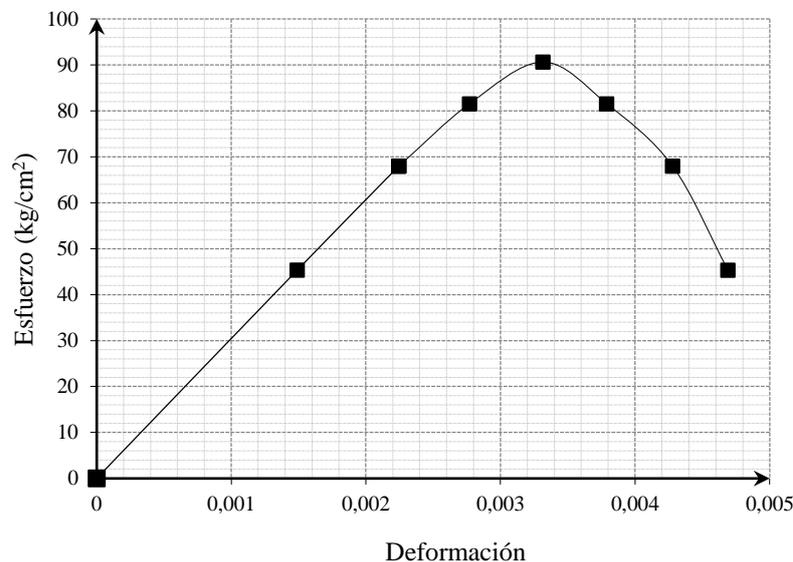


Figura 65. Diagrama esfuerzo-deformación promedio y ajustado numéricamente para piezas de concreto normal sometidas a cargas de compresión axial.

Los diagramas obtenidos experimentalmente y a partir de los cuales se determinó la curva promedio que está basada en los criterios mostrados en la Figura 59, se muestran

en la Figura 66, en la que se puede apreciar que antes de alcanzar la carga máxima el comportamiento de los especímenes fue similar.

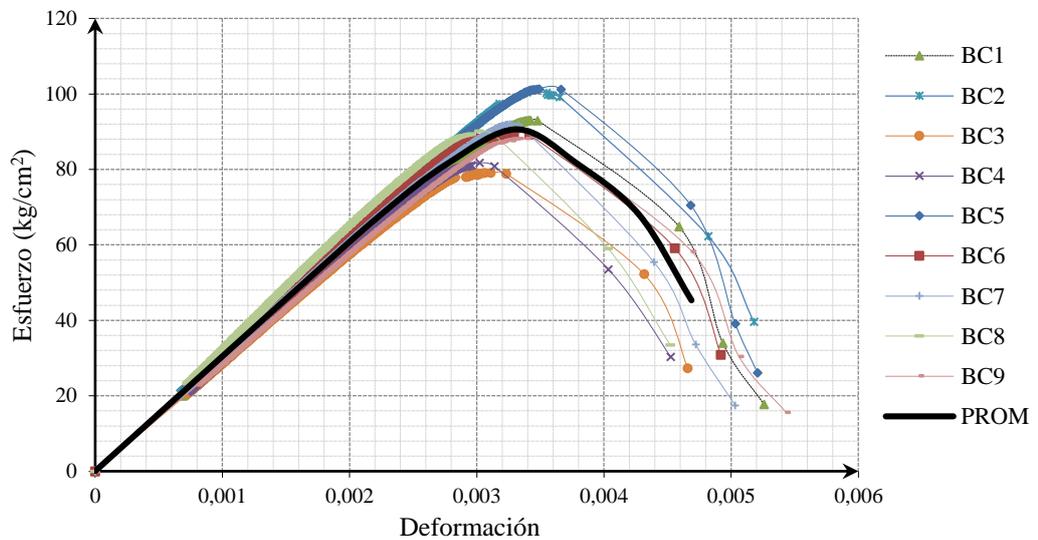


Figura 66. Diagramas experimentales esfuerzo-deformación de piezas de concreto normal sometidas a cargas de compresión axial.

4.4.4.2. PIEZAS DE CONCRETO LIGERO.

Por otra parte las piezas de concreto ligero presentaron un comportamiento lineal hasta esfuerzos cercanos al 80% del esfuerzo máximo, sin embargo, la capacidad de estas piezas fue mucho menor en términos de resistencia y deformación al compararla con las piezas de concreto ya que el esfuerzo máximo promedio osciló cercano a los 51.24 kg/cm^2 que se logró una deformación aproximada de 0.0062 (Ver Figura 67).

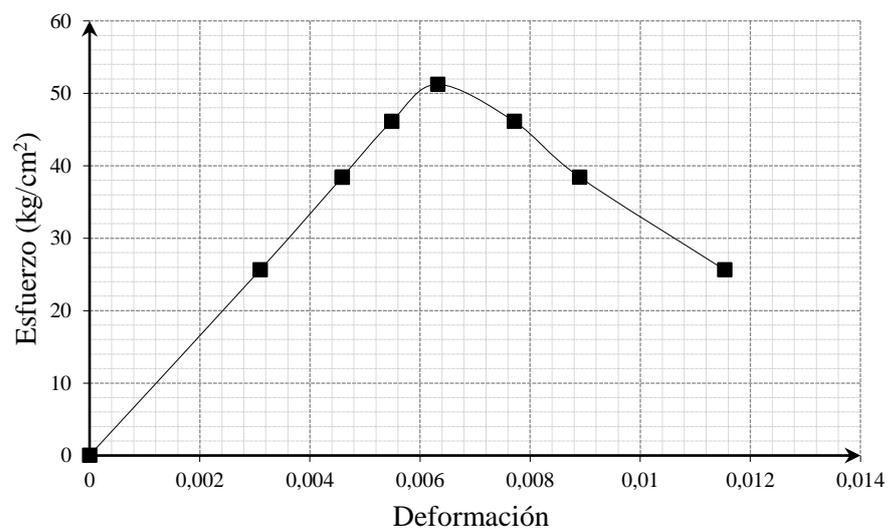


Figura 67. Diagrama esfuerzo-deformación promedio y ajustado numéricamente para piezas de concreto ligero sometidas a cargas de compresión axial.

Los diagramas obtenidos experimentalmente de las nueve piezas ensayadas y sobre las cuales se determinó la curva promedio aparecen en la Figura 68.

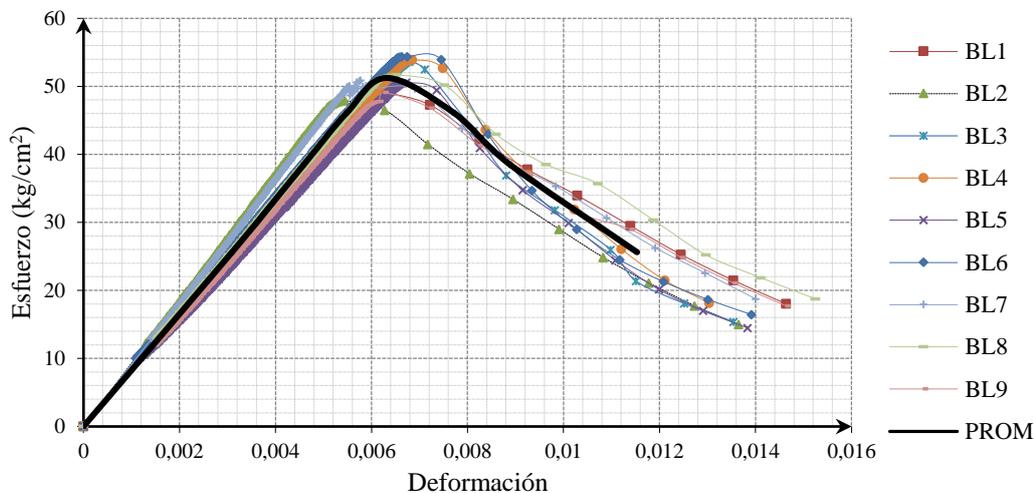


Figura 68. Diagramas experimentales esfuerzo-deformación de piezas de concreto ligero sometidas a cargas de compresión axial.

4.4.4.3. PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA.

También se analizaron piezas elaboradas con arcilla extruida multiperforadas que presentaron un comportamiento lineal hasta alcanzar el 90%, el esfuerzo máximo fue de aproximadamente 220.93 kg/cm², una vez logrado este valor se presentó una meseta donde la carga disminuyó gradualmente a pesar de incrementarse la deformación en la pieza, posterior a ese punto las piezas mostraron una caída abrupta (Ver Figura 69).

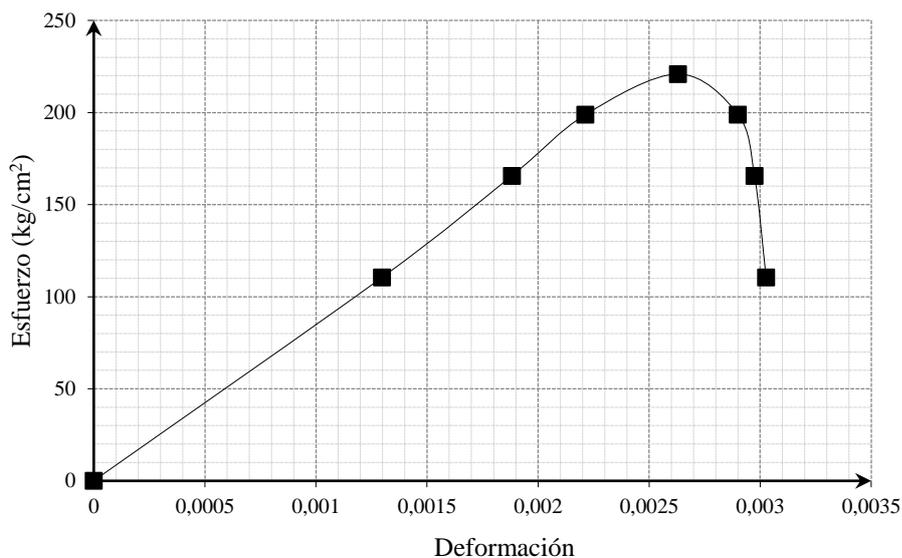


Figura 69. Diagrama esfuerzo-deformación promedio y ajustado numéricamente para piezas de arcilla multiperforada sometidas a cargas de compresión axial.

Esta información se determinó a partir de las nueve piezas de arcilla ensayadas, se puede apreciar en la Figura 70, que la forma de los diagramas y las resistencias obtenidas son muy similares en todos los casos.

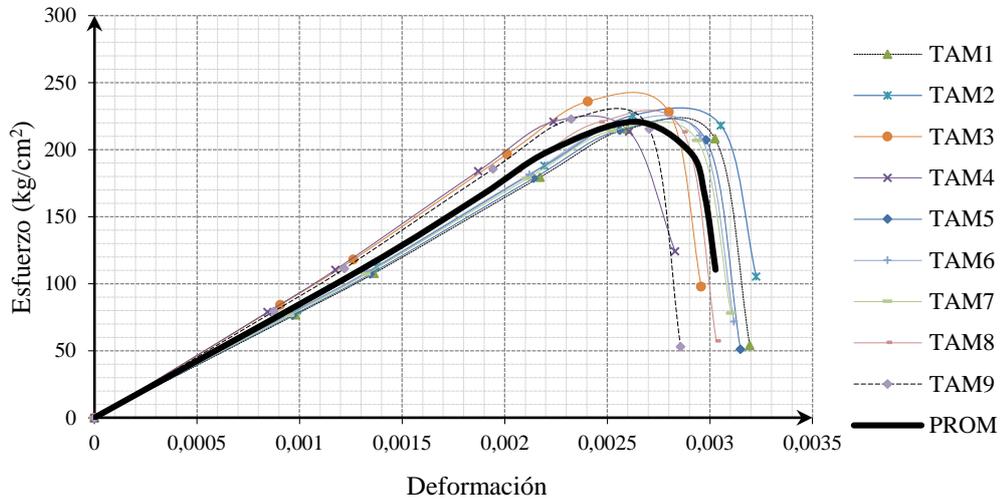


Figura 70. Diagramas experimentales esfuerzo-deformación de piezas de arcilla multiperforada sometidas a cargas de compresión axial.

4.4.4.4. PIEZAS DE ARCILLA MULTIPERFORADA CON DOS CELDAS.

El comportamiento para piezas multiperforadas con dos celdas (Figura 71), fue prácticamente lineal hasta alcanzar la carga máxima. Posterior a este valor, la capacidad de carga se perdió súbitamente por la aparición de una falla frágil en la pieza. El esfuerzo máximo promedio osciló cercano a los 210.51 kg/cm² a una deformación de 0.0031.

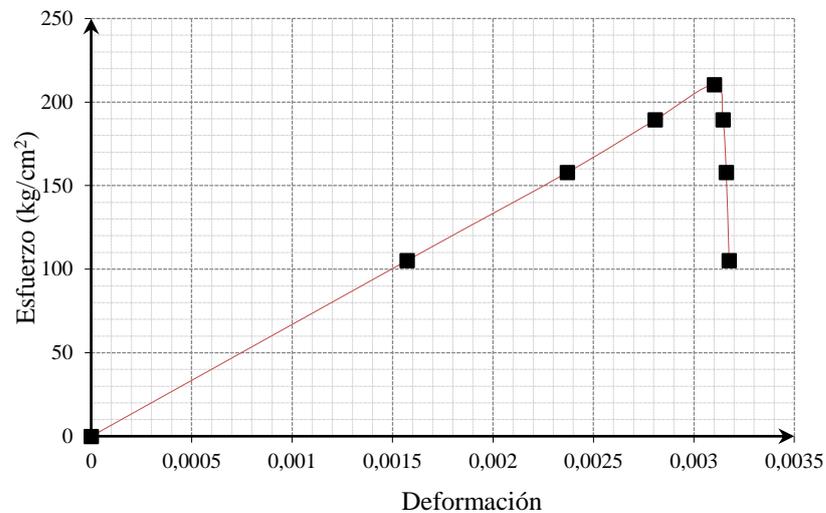


Figura 71. Diagrama esfuerzo-deformación promedio y ajustado numéricamente para piezas de arcilla multiperforada con dos celdas sometidas a cargas de compresión axial.

Los diagramas esfuerzo deformación obtenidos (Figura 72), presentaron variaciones menores, y a partir de estos se pudo determinar el diagrama esfuerzo deformación promedio.

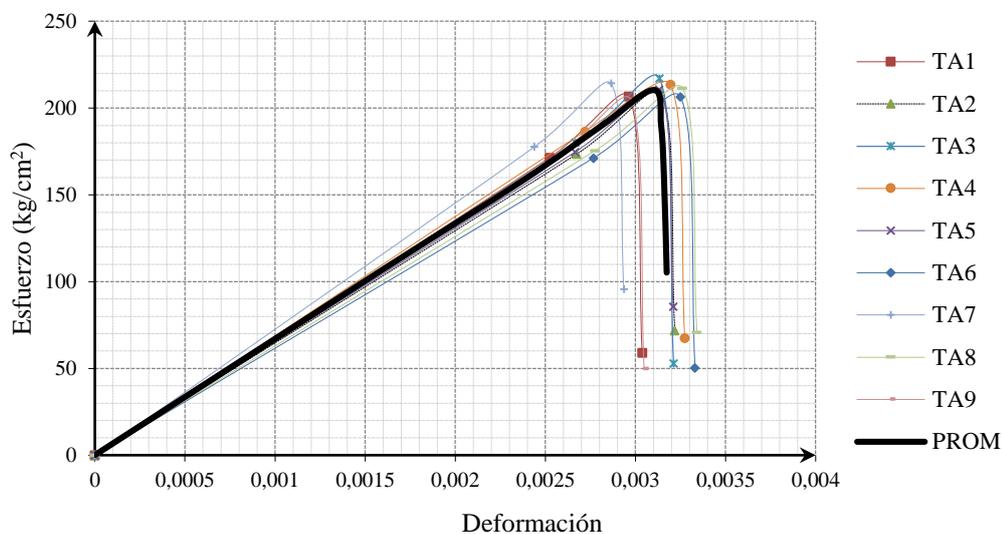


Figura 72. Diagramas experimentales esfuerzo-deformación de piezas de arcilla multiperforada con dos celdas sometidas a cargas de compresión axial.

4.4.5. MURETES.

Los diagramas esfuerzo-deformación obtenidos al probar experimentalmente muretes construidos con diferentes tipos de piezas y sometidos a diferentes velocidades de carga se muestran en este apartado.

De la misma forma como se obtuvo el valor del esfuerzo para especímenes de mortero y piezas, el esfuerzo obtenido en los muretes fue determinado mediante la relación de la carga entre el área bruta del murete.

4.4.5.1. MURETES DE CONCRETO NORMAL.

Los especímenes elaborados con piezas de concreto normal, presentaron su resistencia máxima a una deformación aproximada de 0,0015. Además, conforme se incrementó la velocidad de carga, las muestras presentaron un aumento en su resistencia, sin embargo, la pendiente del rango elástico se vio levemente modificada. La Figura 73 muestra una tendencia del comportamiento esperado basada en los resultados promedio obtenidos en los muretes de concreto sometidos a diferentes velocidades de carga.

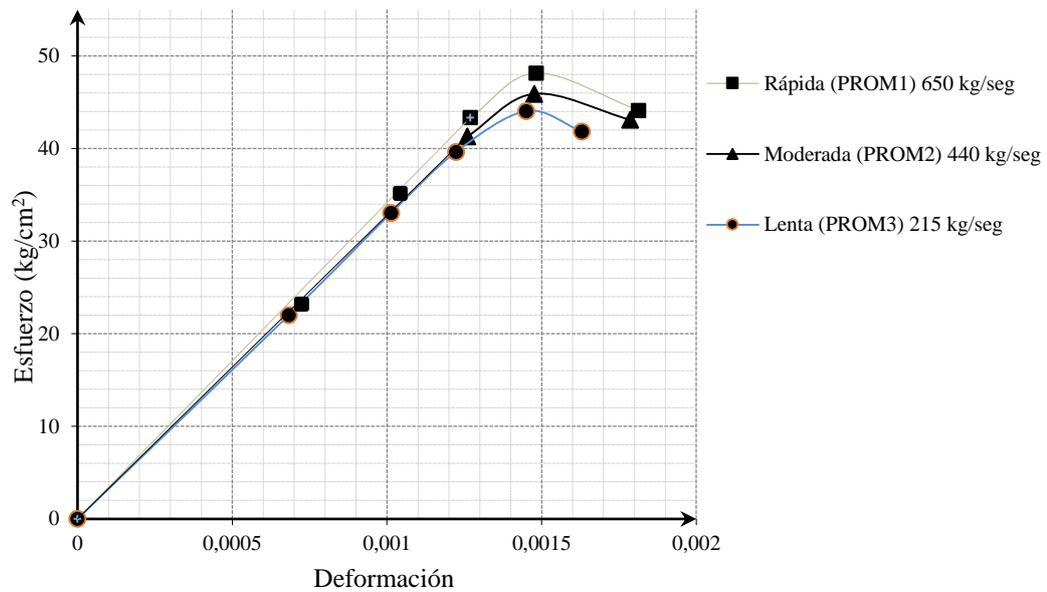


Figura 73. Diagramas esfuerzo-deformación promedio y ajustados matemáticamente para muretes de concreto normal a diferentes velocidades de carga por compresión axial.

Los diagramas anteriores se determinaron a partir de la información experimental obtenida al evaluar experimentalmente tres especímenes a diferentes velocidades de carga, a partir de estos resultados se determinó la curva promedio, con los criterios mostrados en la Figura 59b de este trabajo, los puntos determinados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Puntos promedio obtenidos para muretes de concreto normal a diferentes porcentajes de esfuerzo.

Promedio a nivel de esfuerzos.	Muretes velocidad rápida (650 kg/seg)		Muretes velocidad moderada (440 kg/seg)		Muretes velocidad lenta (215 kg/seg)	
	Deformación	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm ²)
0 %	0.000000	0.00	0.000000	0.00	0.000000	0.00
50%	0.000764	24.08	0.000690	22.95	0.000683	22.02
75%	0.001100	36.11	0.001067	34.43	0.001013	33.03
90%	0.001270	43.34	0.001260	41.32	0.001223	39.63
100%	0.001482	48.15	0.001477	45.91	0.001450	44.03
95%	0.001813	44.12	0.001787	43.10	0.001630	41.83

La Figura 74 muestra los resultados experimentales de los muretes ensayados a velocidad moderada, lenta y rápida y su respectivo diagrama promedio.

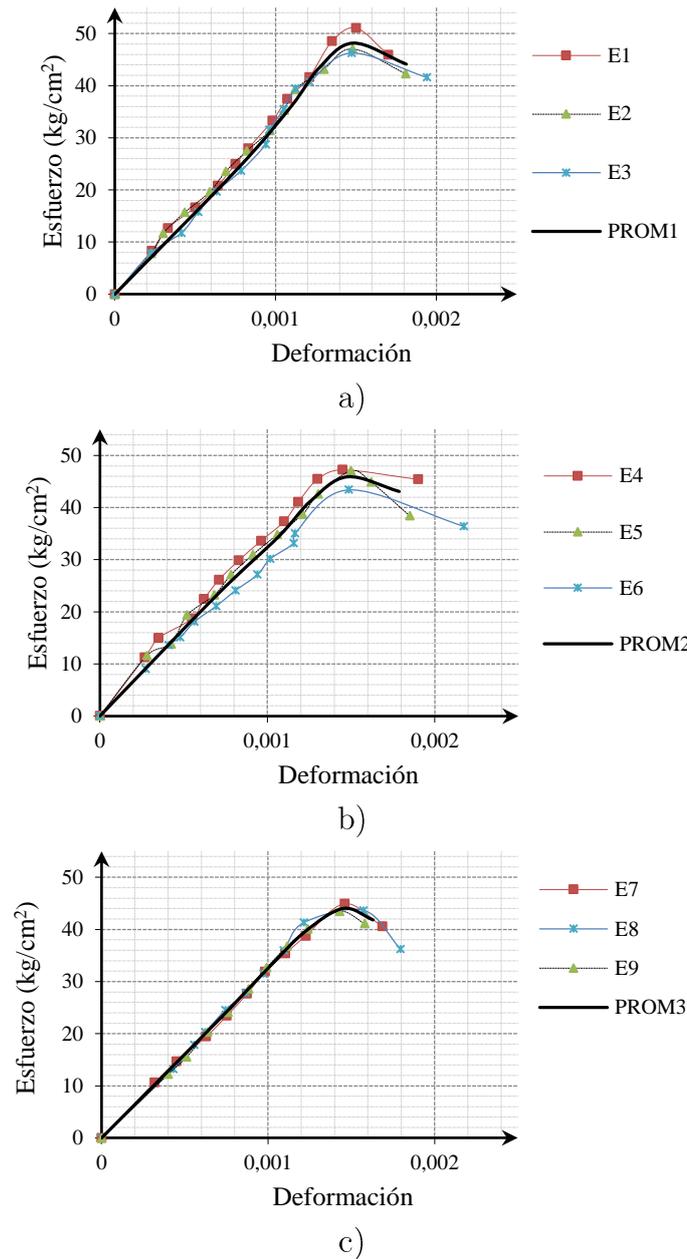


Figura 74. Diagramas experimentales esfuerzo deformación a compresión uniaxial de muretes de concreto normal a diferentes velocidades de carga. a)650 kg/seg), b)440 kg/seg y c)215 kg/seg

4.4.5.2. MURETES DE CONCRETO LIGERO DE 2 CELDAS.

Al determinar el comportamiento de los muretes elaborados con piezas de concreto ligero (Figura 75) se obtuvo también un comportamiento casi lineal a valores aproximados del 75% de la carga máxima y a una deformación de 0.001. Estos especímenes presentaron menor capacidad de carga y deformación ante carga axial al compararlo con los

muretes elaborados de concreto. En este caso, la resistencia máxima se logró a una deformación aproximada de 0.0016.

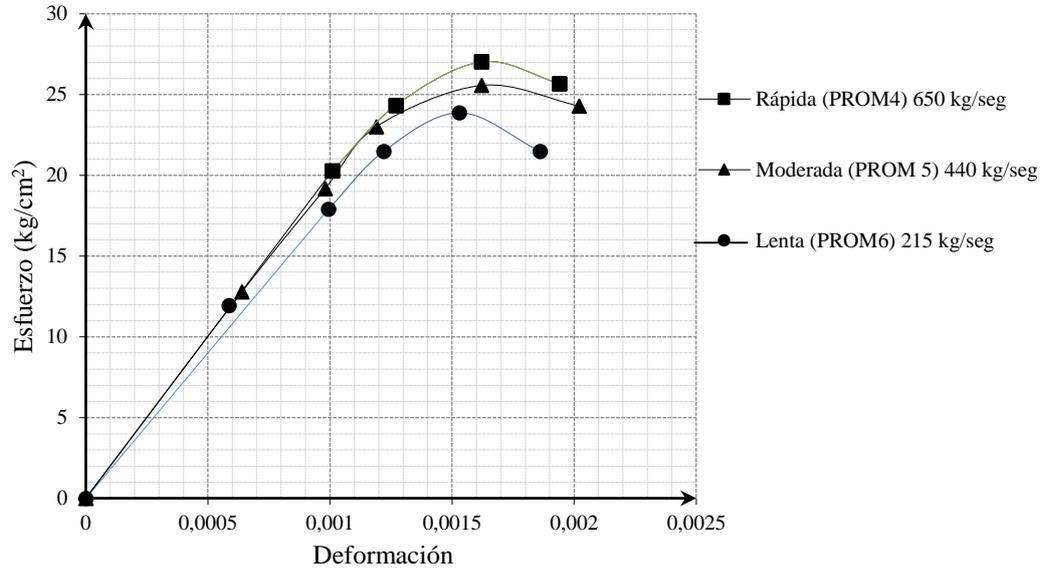


Figura 75. Diagramas esfuerzo-deformación promedio y ajustados matemáticamente para muretes de concreto ligero a diferentes velocidades de carga por compresión axial.

Los diagramas anteriores se determinaron a partir de los valores promedio de resistencia y deformación determinados a diferentes porcentajes de esfuerzos (Tabla 23).

Tabla 23. Puntos promedio obtenidos para muretes de concreto ligero a diferentes porcentajes de esfuerzos.

Promedio a nivel de esfuerzos.	Muretes velocidad rápida (650 kg/seg)		Muretes velocidad moderada (440 kg/seg)		Muretes velocidad lenta (215 kg/seg)	
	Deformación	Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm²)
0%	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00
50%	0.0006	13.51	0.0006	12.78	0.0006	11.93
75%	0.0010	20.27	0.0010	19.17	0.0010	17.90
90%	0.0013	24.32	0.0012	23.01	0.0012	21.48
100%	0.0016	27.03	0.0016	25.56	0.0015	23.86
95%	0.0019	25.68	0.0020	24.29	0.0019	21.48

Los diagramas experimentales obtenidos se muestran en la Figura 76, se puede apreciar la variación entre las muestras y las diferentes resistencias al modificar la velocidad de carga.

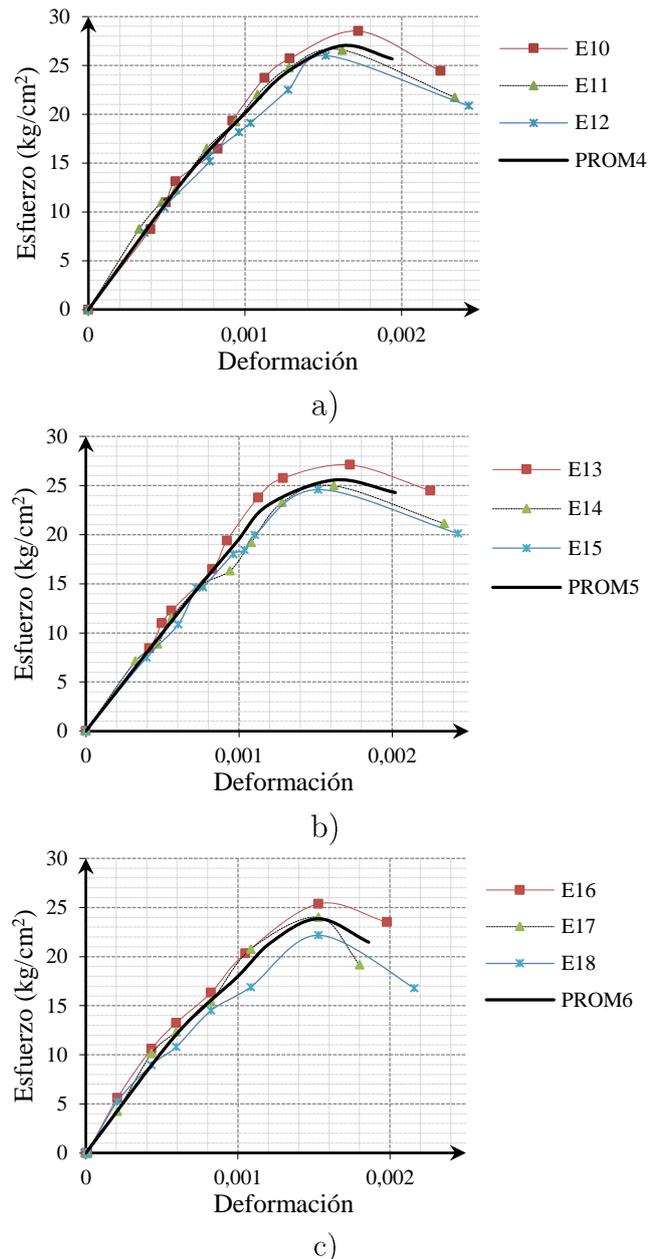


Figura 76. Diagramas experimentales esfuerzo deformación a compresión uniaxial de muretes de concreto ligero a diferentes velocidades de carga. a) 650 kg/seg, b) 440 kg/seg y c) 215 kg/seg

4.4.5.3. MURETES DE ARCILLA DE DOS CELDAS.

Los resultados expresados en diagramas esfuerzo-deformación de los especímenes elaborados con piezas de arcilla multiperforada con dos celdas (Figura 77) alcanzaron la resistencia máxima a una deformación cercana a 0.0017, posterior a lograr la carga máxima, los especímenes perdieron rápidamente su resistencia, estos especímenes mostraron mayor capacidad de resistencia y una buena capacidad de deformación al compararlos con los muretes de concreto.

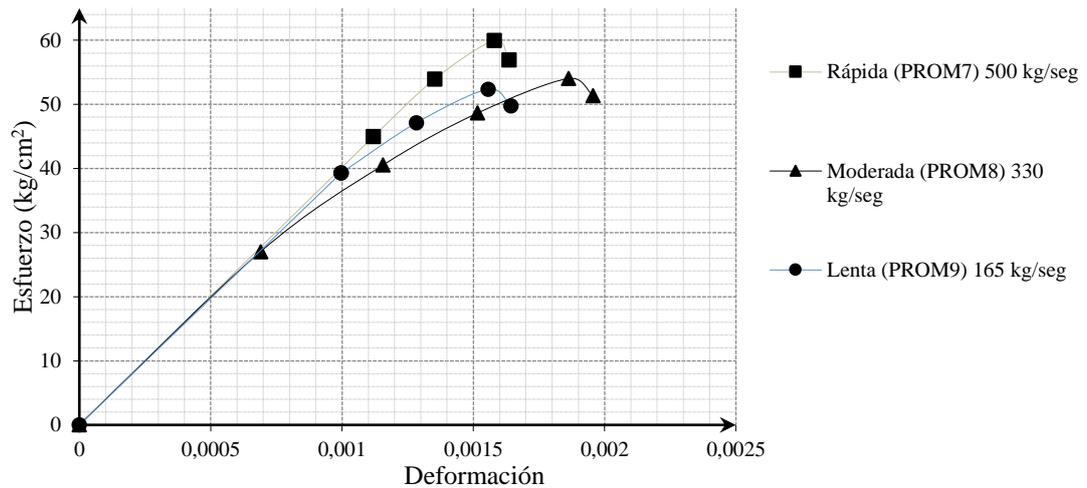


Figura 77. Diagramas esfuerzo-deformación promedio y ajustados matemáticamente para muretes con piezas de arcilla multiperforada con dos celdas a diferentes velocidades de carga por compresión axial.

A partir de los puntos obtenidos al determinar los promedios de esfuerzo y deformación (Tabla 24) a diferentes niveles de esfuerzos se determinaron los diagramas anteriores que representan una tendencia del comportamiento promedio esperado.

Tabla 24. Puntos promedio obtenidos de muretes de arcilla con dos celdas a diferentes porcentajes de esfuerzos.

Promedio a nivel de esfuerzos.	Muretes velocidad rápida (500 kg/seg)		Muretes velocidad moderada (330 kg/seg)		Muretes velocidad lenta (165 kg/seg)	
	Deformación	Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm²)
0%	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00
50%	0.0007	29.98	0.0007	27.03	0.0006	26.19
75%	0.0011	44.97	0.0012	40.54	0.0010	39.28
90%	0.0014	53.96	0.0015	48.65	0.0013	47.14
100%	0.0016	59.95	0.0019	54.05	0.0016	52.38
95%	0.0016	56.96	0.0020	51.35	0.0016	49.76

Los resultados obtenidos al ensayar los nueve muretes de arcilla se muestran en la Figura 78, en ellos se presentan variaciones de resistencia y deformación leves entre muestras, y se puede apreciar que la pendiente de para la mayoría de los diagramas es similar.

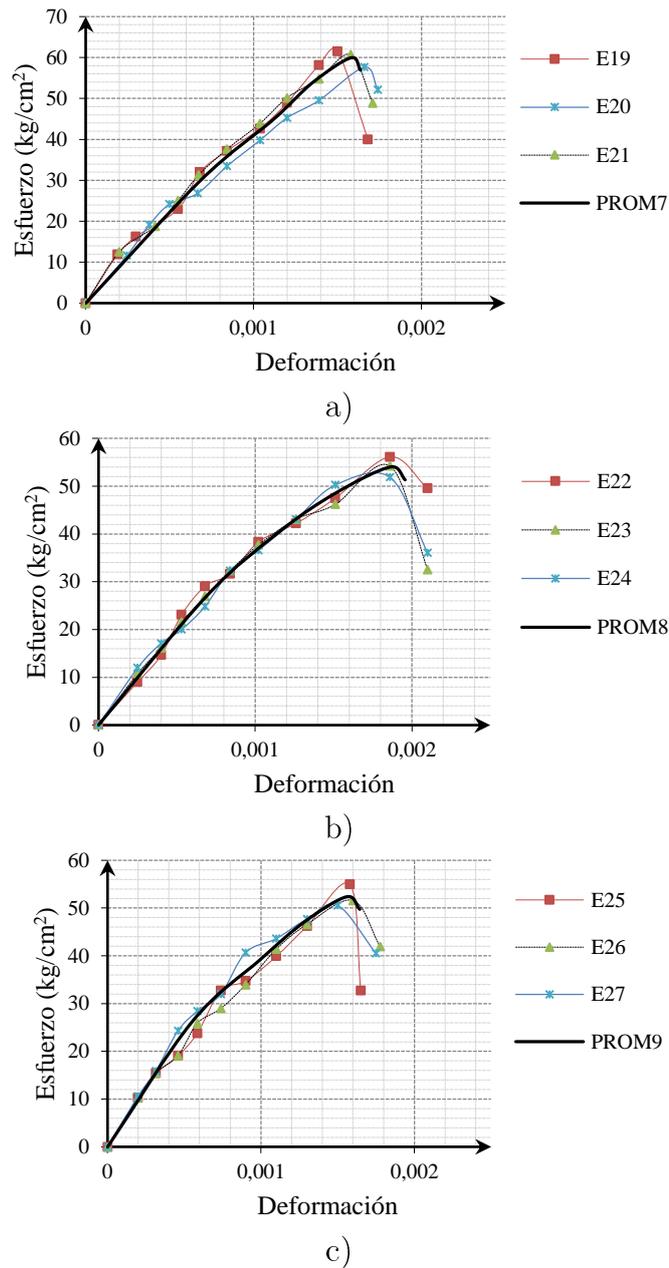


Figura 78. Diagramas experimentales esfuerzo deformación a compresión uniaxial de muretes de arcilla multiperforada con dos celdas a diferentes velocidades de carga. a) 500 kg/seg), b) 330 kg/seg y c) 165 kg/seg

4.4.5.4. MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA.

Por otra parte, al examinar los muretes elaboradas con piezas multiperforadas (Figura 79), y representarlos mediante graficas esfuerzo-deformación pudo observarse que mantuvieron un rango elástico hasta aproximadamente un 85% del esfuerzo máximo, la resistencia máxima osciló alrededor de 70 kg/cm² y se alcanzó a niveles de deformación de 0.0014.

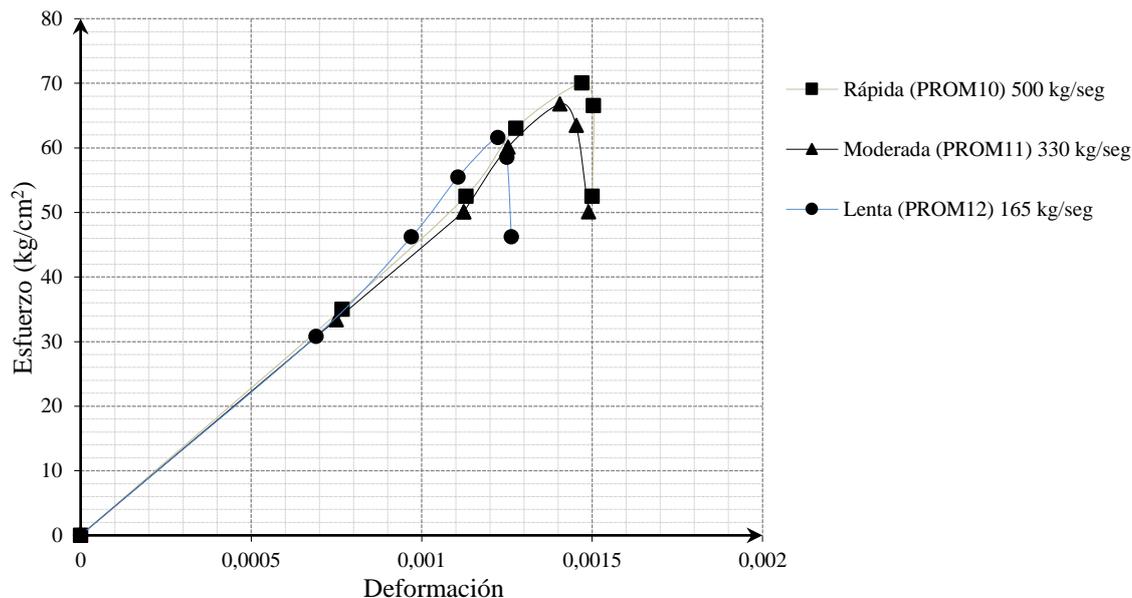


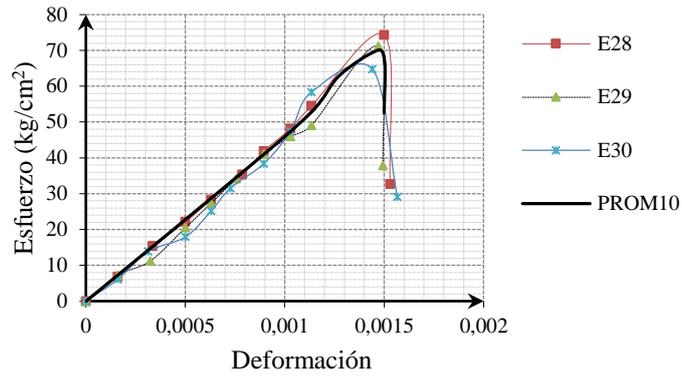
Figura 79. Diagramas esfuerzo-deformación promedio y ajustados matemáticamente para muretes con piezas de arcilla multiperforada a diferentes velocidades de carga por compresión axial.

Tabla 25. Puntos promedio obtenidos de muretes de arcilla multiperforada a diferentes porcentajes de esfuerzos.

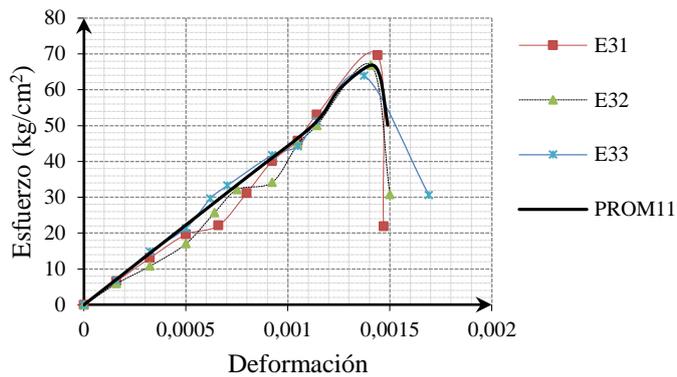
Promedio a nivel de esfuerzos.	Muretes velocidad rápida (500 kg/seg)		Muretes velocidad moderada (330 kg/seg)		Muretes velocidad lenta (165 kg/seg)	
	Deformación	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación	Esfuerzo (kg/cm ²)
0%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50%	0.0008	35.0300	0.0008	33.4083	0.0007	30.8217
75%	0.0011	52.5450	0.0011	50.1125	0.0010	46.2325
90%	0.0013	63.0540	0.0013	60.1350	0.0011	55.4790
100%	0.0015	70.0600	0.0014	66.8167	0.0012	61.6433
95%	0.0015	66.5570	0.0015	63.4758	0.0013	58.5612

Los resultados que sirvieron para determinar las curvas anteriores se muestran en Figura 80, en esta se muestran los tres diagramas obtenidos para cada caso de carga al evaluar los muretes de arcilla multiperforada, a partir de esto se pudieron determinar los promedios de resistencia y deformación a diferentes niveles de esfuerzos que dieron forma al diagrama promedio mostrado (Tabla 25).

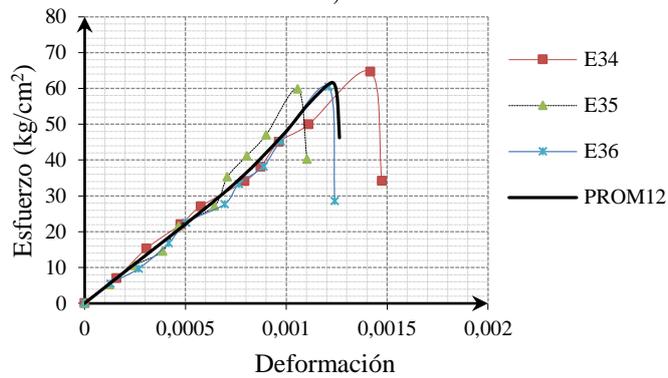
Se puede apreciar los distintos valores de resistencia obtenidos y los similares valores de deformación desarrollados por los especímenes. Respecto a la pendiente de los diagramas no se mostraron variaciones significativas entre los resultados a excepción de los examinados a velocidad lenta. (Ver figura 80).



a)



b)



c)

Figura 80. Diagramas experimentales esfuerzo deformación a compresión uniaxial de muretes de arcilla multiperforada a diferentes velocidades de carga. a)500 kg/seg), b)330 kg/seg y c)165 kg/seg

4.4.5.5 MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MURETES

Otra característica estudiada en esta investigación es el módulo de elasticidad de los muretes al ser sometidos a cargas de compresión, la siguiente tabla (Tabla 26) muestra los valores obtenidos experimentalmente en cada una en las muestras elaboradas con distintos tipos de piezas.

Tabla 26. Módulos de elasticidad en muretes de concreto normal y concreto ligero.

Murete	Tipo de pieza	Velocidad de carga	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad promedio a diferentes velocidades de carga (kg/cm ²)	Variación respecto al módulo de elasticidad obtenido a velocidad moderada (%)	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)
E1	Bloques de concreto normal de dos celdas	Rápida (650 kg/seg)	36343	35361	+5.71%	33877
E2			35737			
E3			34005			
E4		Moderada (440 kg/seg)	34488	33453	--	
E5			33957			
E6			31914			
E7		Lenta (215 kg/seg)	32825	32871	-1.94%	
E8			32750			
E9			32878			
E10	Bloques de concreto ligero de dos celdas	Rápida (650 kg/seg)	20100	20014	+2.97%	19919
E11			20033			
E12			19909			
E13		Moderada (440 kg/seg)	20364	19928	--	
E14			19972			
E15			19448			
E16		Lenta (215 kg/seg)	20586	19310	-3.20%	
E17			19642			
E18			17702			

De esta tabla pueden observarse ligeras variaciones en el módulo de elasticidad obtenido de los muretes elaborados con piezas de concreto normal de dos celdas, mayores variaciones fueron obtenidas en los muretes sometidos a una velocidad de carga rápida. En el caso del módulo de elasticidad obtenido de piezas de concreto ligero, puede apreciarse variaciones similares entre lo obtenido a velocidad de carga moderada, lenta y rápida.

La Tabla 27 presenta el módulo de elasticidad obtenido de muretes elaborados con tabiques de arcilla de dos celdas y multiperforados. De los valores obtenidos para ambos casos se aprecia una mayor variación en los valores que representan el módulo de elasticidad determinado al aplicar una velocidad de carga rápida respecto a la moderada.

Tabla 27. Módulos de elasticidad en muretes de arcilla multiperforada.

Murete	Tipo de pieza	Velocidad de carga	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad promedio a diferentes velocidades de carga (kg/cm ²)	Variación respecto al módulo de elasticidad obtenido a velocidad moderada (%)	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)
E19	Tabiques de arcilla Multiperforada con dos celdas.	Rápida (500 kg/seg)	44229	41944	+4.73%	40391
E20			42430			
E21			39172			
E22		Intermedia (330 kg/seg)	42165	40049	--	
E23			39475			
E24			38507			
E25		Lenta (165 kg/seg)	39531	39182	-2.21%	
E26			39200			
E27			38817			
E28	Tabiques de arcilla multiperforada	Rápida (500 kg/seg)	44933	44036	+3.13%	42761.67
E29			42537			
E30			44640			
E31		Intermedia (330 kg/seg)	43926	42700	--	
E32			42416			
E33			41758			
E34		Lenta (165 kg/seg)	42819	41548	-2.77%	
E35			41124			
E36			40702			

4.5. MODOS DE FALLA.

En este apartado se muestran los modos de falla que se presentaron en los especímenes probados en las diferentes etapas experimentales de esta investigación.

4.5.1. MODOS DE FALLA EN MORTEROS.

4.5.1.1. MORTEROS A COMPRESIÓN.

Al ser sometidos a fuerzas de compresión uniaxial, los cubos de mortero presentaron un patrón de agrietamiento típico, en el cual las grietas formaron ángulos de 45° en los vértices del cubo. Conforme se incrementó la carga, estas grietas se ampliaron hasta provocar la falla del espécimen.

La falla se caracterizó por provocar un agrietamiento gradual en las caras del espécimen, la cual siguió el mismo ángulo hasta coincidir con otra grieta, enseguida, la cara se desprendió del espécimen y provocó la falla total (Figura 81).



Figura 81. Modos de falla en morteros a compresión.

4.5.1.2. MORTEROS A TENSIÓN.

En los especímenes sometidos a tensión axial, el modo de falla se caracterizó por fragmentar en dos partes el espécimen, es decir, se presentó una grieta horizontal perpendicular a la dirección de la carga aplicada, esta grieta se amplió y propago súbitamente provocando la división del espécimen en dos piezas.

En la figura 82 se muestran los especímenes antes de ser probados experimentalmente y los modos de falla en cada uno de ellos.



Figura 82. Modos de falla en morteros a tensión.

4.5.2. MODOS DE FALLA EN PIEZAS.

En esta parte se muestran detalles sobre los modos de falla en las piezas que fueron investigadas experimentalmente, en general, los patrones de falla exhibidos por las piezas corresponden al caso típico, es decir, al modo de falla piramidal, caracterizado por la formación de un núcleo piramidal al centro de la pieza.

4.5.2.1. PIEZAS DE CONCRETO NORMAL.

De la misma forma que lo ocurrido en los cubos de mortero, las grietas principales de los bloques de concreto aparecieron 45° en los vértices del espécimen, enseguida cuando todas las grietas se interseccionaron y provocaron la falla se observó la fase de reducción de la resistencia de la pieza, la falla del espécimen fue súbita, expulsando fragmentos a alta velocidad.



Figura 83. Modos de falla en piezas de concreto.

En la figura 83 se puede observar algunos detalles de las diferentes fases de la falla en las piezas de concreto, donde se aprecia la forma de falla piramidal exhibida por la pieza probada experimentalmente.

4.5.2.2. PIEZAS DE CONCRETO LIGERO.

En la Figura 84 puede apreciarse el patrón de agrietamiento ocurrido para las piezas de concreto ligero, el modo de falla fue caracterizado por la formación de grietas inclinadas en los vértices de las caras principales de las piezas, formando ángulos de 45° .

A diferencia del modo de falla para piezas de concreto normal, las piezas de concreto ligero no exhibieron una expulsión de fragmentos a gran velocidad.



Figura 84. Modos de falla en piezas de concreto ligero.

4.5.2.3. PIEZAS DE ARCILLA.

Aquí se muestran detalles sobre los modos de falla ocurridos en piezas de arcilla (Figura 85), se puede observar que los primeros agrietamientos se presentaron instantes previos al alcanzar la carga máxima.

Al analizar el agrietamiento en las piezas, se observó que antes de lograr la carga máxima se iniciaron fracturas verticales interiores hasta llegar a las paredes exteriores de

la pieza, enseguida las muestras fallaron súbitamente, arrojando fragmentos a alta velocidad. Las grietas principales se presentaron a 45° en los vértices e interiormente se fracturaron todas las caras siguiendo la misma inclinación de las grietas principales.



Figura 85. Modos de falla en piezas de a) arcilla multiperforada y b) arcilla multiperforada con dos celdas.

4.5.3. MODOS DE FALLA EN MURETES.

En esta sección se presentan los detalles más importantes sobre los modos de falla ocurridos en los muretes investigados experimentalmente.

4.5.3.1 MURETES ELABORADOS CON BLOQUES DE CONCRETO NORMAL.

El modo de falla predominante en muretes construidos con bloques de concreto normal exhibió tres etapas de agrietamiento (Figura 86), la primera etapa se caracterizó por la formación de grietas verticales en todas las caras del espécimen al sobrepasar aproximadamente el 40% del esfuerzo máximo. Esto se asume debido al estado de esfuerzos generado entre la pieza y el mortero, donde los esfuerzos de tensión generados al interior del murete provocaron la formación de grietas verticales.

La segunda etapa se caracterizó por la aparición de grietas a 45° en los vértices del murete, estas aparecieron posterior al lograr aproximadamente el 75% del esfuerzo máximo. Posterior al lograr la carga máxima se mostró una pérdida gradual de resistencia, propagando las grietas y causando la falla, con lo cual se dio paso al desprendimiento de algunos fragmentos del murete.

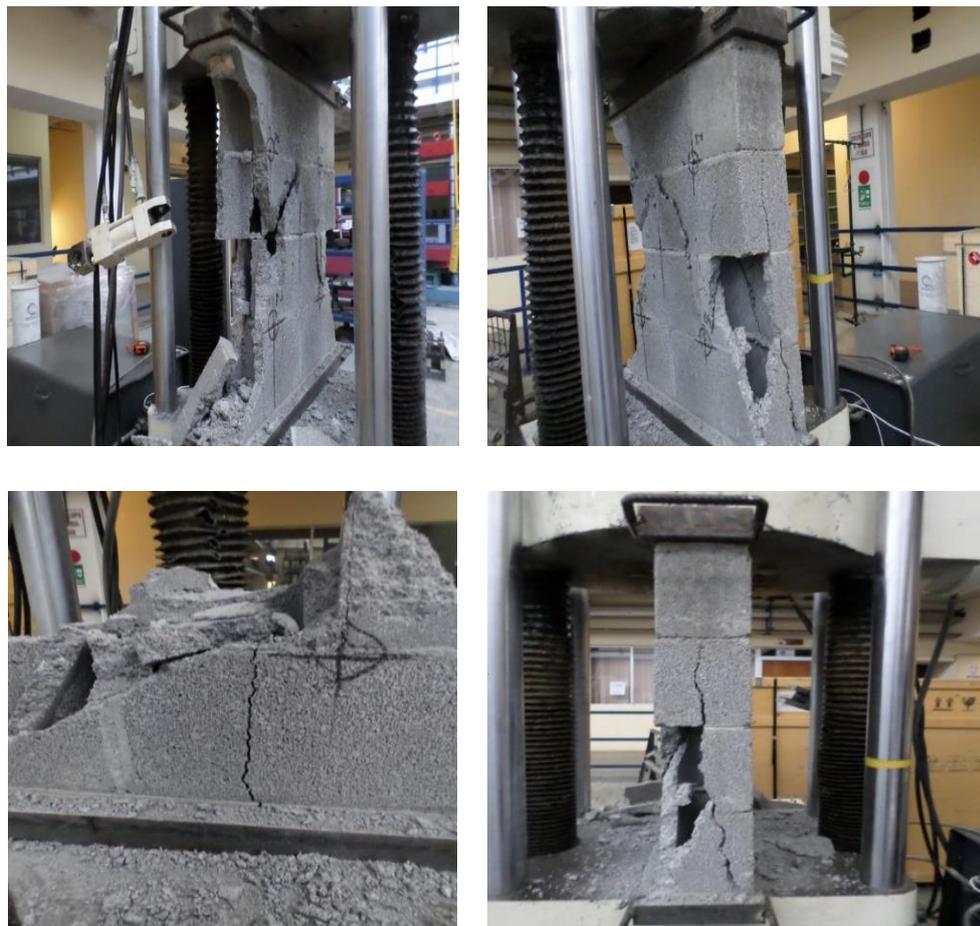


Figura 86. Modos de falla en muretes de concreto normal.

4.5.3.2. MURETES ELABORADOS CON BLOQUES DE CONCRETO LIGERO.

El patrón de agrietamiento que se presentó en muretes elaborados con bloques de concreto ligero fue similar al ocurrido en los muretes de concreto normal (Figura 87), inicialmente aparecieron grietas verticales en todas las caras del murete aunque en menor cantidad comparadas con las presentadas en los especímenes anteriores.

Al llegar aproximadamente al 75% del esfuerzo máximo aparecieron grietas a 45° formando cuatro fragmentos que alcanzada la carga máxima se desprendieron entre sí, la diferencia en los agrietamientos entre los especímenes de concreto es que estos tuvieron desprendimientos inducidos también por las grietas verticales.



Figura 87. Modos de falla en muretes de concreto ligero.

4.5.3.3. MURETES ELABORADOS CON TABIQUES DE ARCILLA DE DOS CELDAS.

Estos tipos de muretes, al ser sometidos a compresión y al superar el 50% del esfuerzo máximo, presentaron un patrón inicial de grietas verticales que se extendían conforme se incrementaba la carga, al lograr aproximadamente el 75% del esfuerzo máximo, dichas grietas ya eran muy visibles en todas las caras del espécimen. Una vez que se alcanzó la carga máxima, se generó un abultamiento al centro del espécimen, el cual generó inestabilidad y por consecuencia la falla total del murete. Cabe mencionar que este abultamiento se presentó de manera súbita (Figura 88).

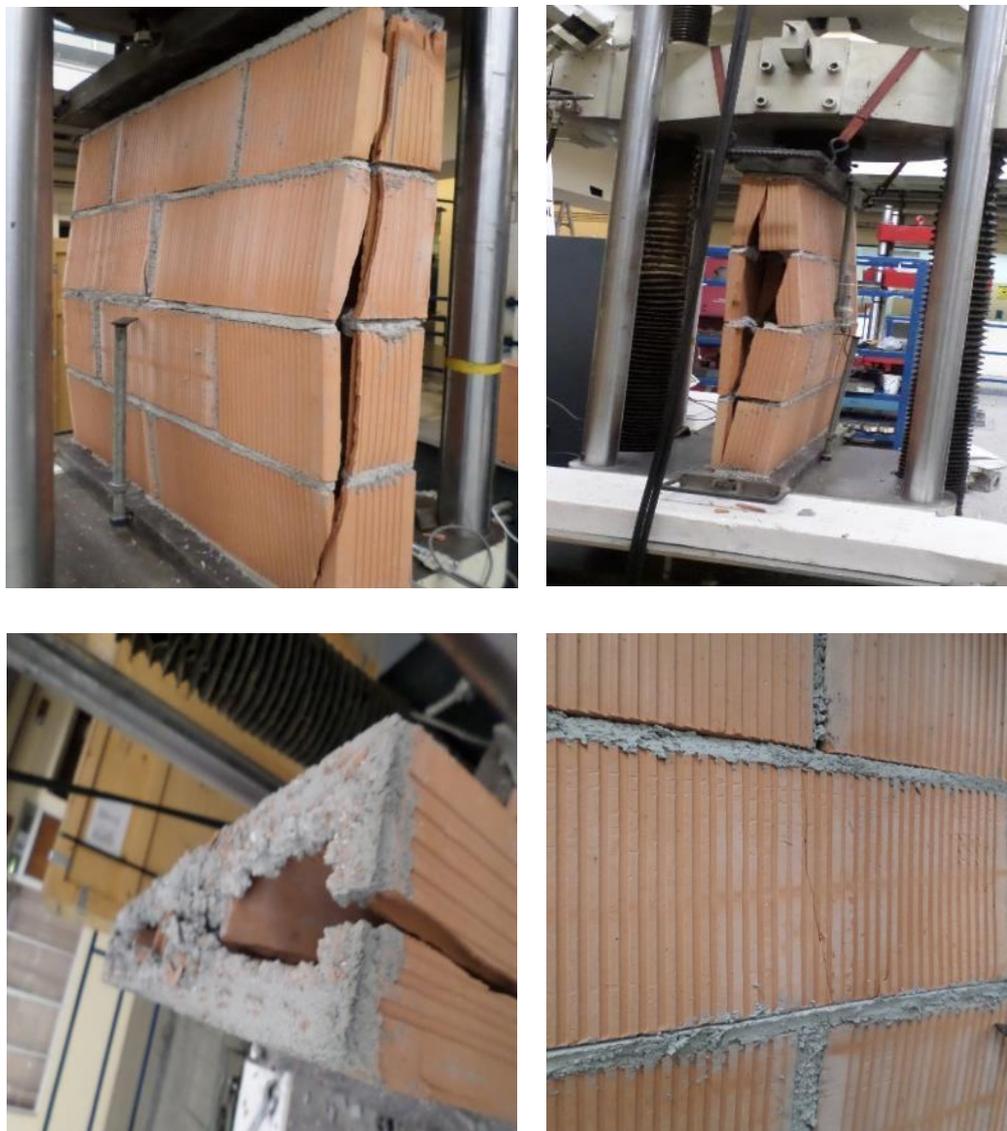


Figura 88. Modos de falla en muretes arcilla multiperforada con dos celdas.

4.5.3.4. MURETES ELABORADOS CON TABIQUES DE ARCILLA MULTIPERFORADOS.

El patrón inicial de agrietamiento para muretes elaborados con piezas de arcilla multiperforada inicio con grietas verticales paralelas a la dirección de la carga aplicada en todas las caras de los muretes, a un esfuerzo aproximado del 60% del esfuerzo máximo (Figura 89). Es importante mencionar que durante el proceso de aplicación de las cargas, se generaron grietas en el interior del murete, con lo cual se asume que también ocurrieron esfuerzos interiores que maximizaron la falla del murete.

Al incrementar la carga, las grietas verticales se extendieron hasta que se desprendieron algunos fragmentos del murete, con lo cual se generó inestabilidad y así se presentó la falla. Se pudo observar que una vez finalizada la prueba, los muretes presentaron una gran cantidad de grietas verticales que ocasionaron el desprendimiento de muchos fragmentos con solo tocar el murete.



Figura 89. Modos de falla en muretes arcilla multiperforada.

Los modos de falla obtenidos en los muretes probados experimentalmente en esta investigación, mostraron la interacción que se genera en todos los elementos que componen la mampostería, ya que ningún patrón de agrietamiento fue similar por que las propiedades de resistencia y deformación propia de las piezas, morteros y su interacción definen los mecanismos de falla en el muro.

Finalmente, es importante mencionar que los modos de falla que presentaron los muretes elaborados con diferente material, dependen de los materiales utilizados, del estado de esfuerzos al que es sometido el murete, la interacción entre los componentes, el tipo de carga y la velocidad de carga, entre otros.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

“Como ingenieros, debemos buscar el mayor bien para el mayor número de personas”

Emilio Rosenblueth

Este capítulo contiene un estudio de los resultados experimentales obtenidos. Se analizan las características más relevantes como comparativas de resistencia entre bloques, comparativas de resistencia de muretes y también se incluyen análisis de resultados experimentales contra resultados obtenidos por otros autores.

Dentro de los parámetros de comparación se menciona la resistencia mínima y promedio que deben presentar las piezas de acuerdo al material que la compone. También se utilizan como variables de comparación la resistencia de diseño con un coeficiente de variación del 20% que establece la norma mexicana NTCM-04 [14]. Finalmente se incluye como comparativa de la resistencia de diseño con un coeficiente de variación obtenido en el trabajo experimental.

5.1. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS PIEZAS.

El comportamiento de las piezas interviene directamente en la resistencia que presenta un muro estructural ante cualquier tipo de carga, ya que de sus características de resistencia, capacidad de deformación y absorción entre muchos otros parámetros, dependerá también en cierta parte la resistencia de la interfase. Si las características de las piezas son buenas el muro será construido con buenas propiedades estructurales, en cambio, si alguna de las propiedades del bloque es deficiente, afectará la capacidad de resistencia del muro.

5.1.1. ANÁLISIS DE VALORES DE RESISTENCIA EN BLOQUES DE CONCRETO.

Las piezas de concreto examinadas en esta investigación, fueron de dos tipos las primeras denominadas como piezas de concreto normal que se elaboran con una mezcla de grava triturada, cemento y agua las cuales presentaron un peso promedio de 11.80 kg. Las segundas, denominadas como piezas de concreto ligero se elaboraron a base de un agregado ligero llamado perlita, además de cemento y agua con un peso promedio de 3.9 kg. por pieza, todas las piezas utilizadas provenían de fábricas con procesos industrializados y con un adecuado control de calidad.

Al evaluar los valores obtenidos en las piezas de esta investigación que se muestran en la Tabla 28, y de acuerdo a la norma para piezas de uso estructural NMX-C-404-ONNCCE-2013 [26], se observó que las piezas de concreto ligero probadas en laboratorio presentaron resistencias por debajo de lo especificado tanto para el caso de resistencia mínima y promedio ya que los valores obtenidos fueron de 47.89 y 51.24 kg/cm² respectivamente. Por otra parte, las piezas de concreto normal presentaron valores establecidos en el rango de resistencia media indicados por la norma.

Tabla 28. Resistencia a compresión obtenida en distintos tipos de piezas de concreto elaboradas en Nuevo León.

Tipo de pieza	Resistencia promedio (\overline{fp}) (kg/cm ²)	Coefficiente real de variación	Resistencia de diseño (fp*) (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual. (kg/cm ²)	Resistencia media (\overline{fp}). NMX-C-404-ONNCCE-2013 (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual. NMX-C-404-ONNCCE-2013 (kg/cm ²)
Concreto Normal (Tabla 18)	90.67	8.15%	60.45	79.11	90	70
Concreto Ligero (Tabla 18)	51.24	4.56%	34.16	47.89	90	70

Por otra parte la Tabla 29 muestra una comparativa de los resultados obtenidos experimentalmente en piezas con características similares a las que fueron estudiadas por Meli y Hernández en 1971 [6], en dichos resultados se puede apreciar que en el caso de las piezas de concreto normal, las resistencias aquí obtenidas son de 91 kg/cm² contra valores mayores en el rango entre 100 y 135 kg/cm² obtenidas hace algunos años [6].

Tabla 29. Comparación de resistencia en distintos tipos de piezas de concreto.

Tipo de pieza	Resistencia promedio ($\overline{f_p}$) (kg/cm ²)	Coefficiente real de variación	An/Ab (%)
Piezas de concreto normal			
Concreto Normal (Tabla 18)	90.67	8.15%	54.54%
Meli y Hernández (1971) (Etapa 1) Banco 1	135	15%	56
Meli y Hernández (1971) (Etapa 1) Banco 3	100	20%	63%
Piezas de concreto ligero			
Concreto Ligero (Tabla 18)	51.24	4.56%	59.27%
Meli y Hernández (1971) (Etapa 1) Banco 2	42	16%	59.00%
Meli y Hernández (1971) (Etapa 1) Banco 3	43	24%	54.00%

En cambio, al comparar con los valores de resistencia obtenidos de los bloques de concreto ligero, probados en el laboratorio de estructuras de la FIC-UANL se observó un aumento comparado con los valores obtenidos en Meli y Hernández [6].

Otro factor importante de estudio son los coeficientes de variación. Con los procesos de fabricación actuales se ha logrado obtener variaciones menores al compararlo con los coeficientes obtenidos en 1971 [6], ya que se obtuvieron para piezas de concreto normal coeficientes de variación de 15 al 20% y en esta investigación se obtuvieron valores en concreto normal de 8.15%. Para las piezas de concreto ligero de esta investigación se obtuvo un coeficiente de 4.56%, que es menor a los índices de 1971 que fluctúan entre 16 y 24%.

Las unidades de concreto normal y ligero presentaron diferentes valores de deformación al alcanzar la resistencia máxima, las piezas de concreto normal lograron la resistencia máxima a una deformación aproximada de 0.0033 y las piezas de concreto ligero a un valor cercano a 0.0062, dichos resultados evidencian una menor capacidad de deformación y resistencia para las piezas de concreto normal, adicionalmente, se presenta un análisis de los resultados obtenidos mediante relaciones esfuerzo deformación (Ver figura 90).

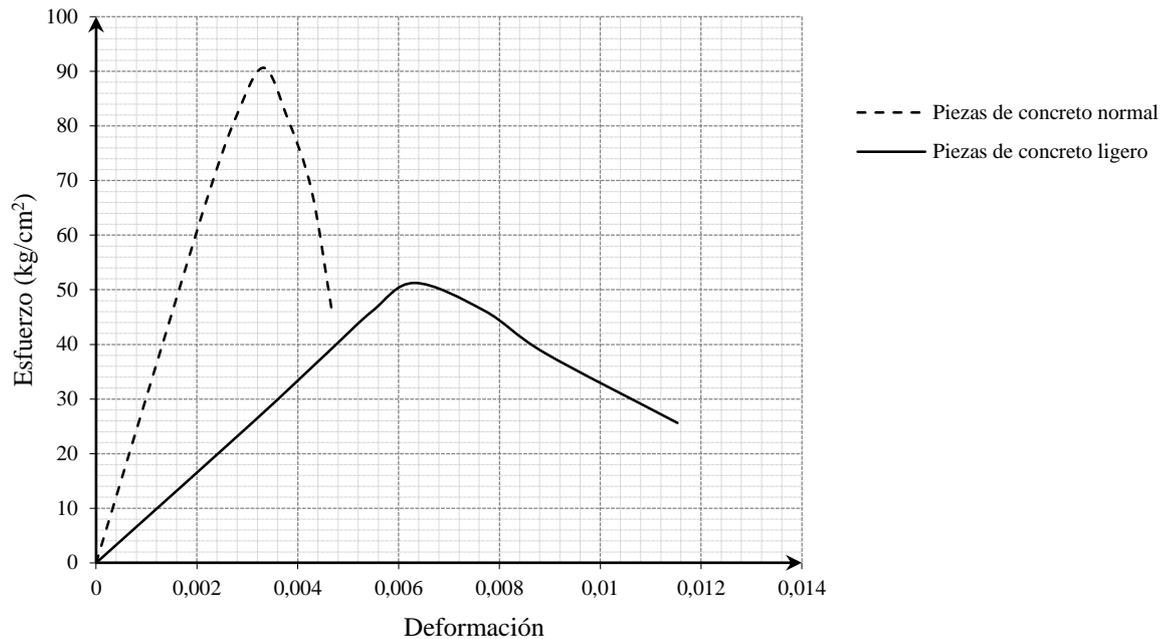


Figura 90. Diagramas esfuerzo deformación para distintos tipos de piezas de concreto elaboradas en el estado de Nuevo León.

5.1.1.1 RESISTENCIA DE DISEÑO PARA PIEZAS DE CONCRETO.

La resistencia de diseño es un parámetro importante en mampostería para uso estructural, para determinar este valor se toma en cuenta la resistencia media y el coeficiente de variación obtenido. La Tabla 30 muestra los resultados obtenidos en las piezas de concreto, en la primera columna se muestran las resistencias experimentales promedio obtenidas, en la segunda columna el coeficiente de variación experimental, la tercer columna contiene la resistencia de diseño considerando los valores de las dos columnas anteriores, la última columna contiene el valor de la resistencia de diseño según la norma NTCM-04 [14] la cual establece un coeficiente de variación del 20% mínimo (Ver Ec.23).

Su uso es vital cuando no se cuenta con información, ya que obteniendo la resistencia de las piezas (f_p^*) matemáticamente la norma NTCM-04 [14] establece valores tabulares para asociar con una resistencia de diversos tipos estructuras de mampostería (f_m^*), dicho valor tiene correlación con los valores de resistencia de diseño para piezas (f_p^*).

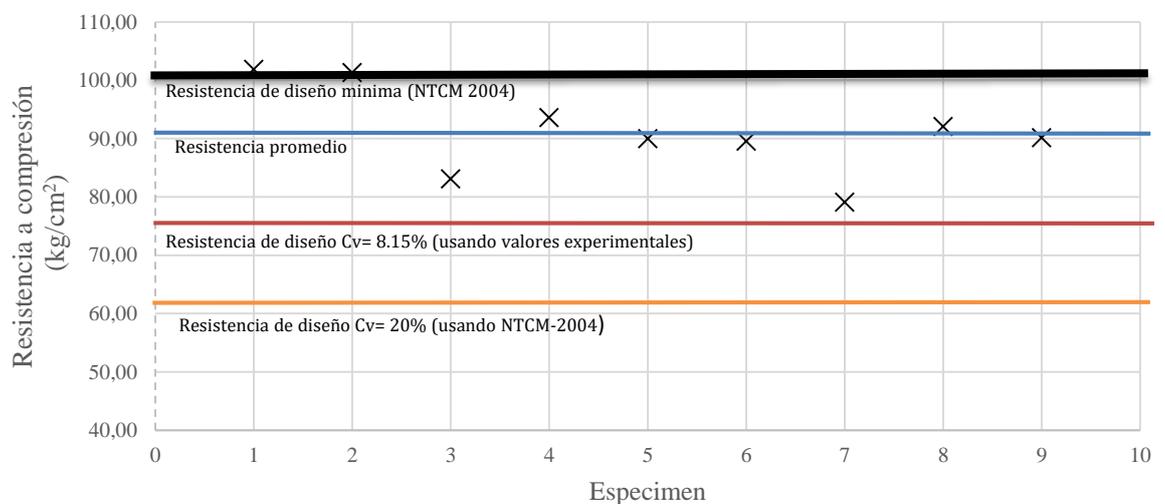
Tabla 30. Resistencias de diseño para distintos tipos de piezas del estado de Nuevo León.

Tipo de pieza	Resistencia promedio (f_p) (kg/cm ²)	Coefficiente real de variación (CRV)	Resistencia de diseño con CRV (f_p^*) (kg/cm ²)	Resistencia de diseño con NTCM-2004 (f_p^*) CV=0.20 (kg/cm ²)
Concreto Normal (Tabla 18)	90.67	8.15%	74.47	60.45
Concreto Ligero (Tabla 18)	51.24	4.56%	45.95	34.16

En la Figura 91 se muestra la resistencia de diseño mínima de las piezas (f_p^*), la resistencia de diseño promedio obtenida, la resistencia de diseño tomando en cuenta los coeficientes de variación obtenidos experimentalmente, y por último la resistencia de diseño de acuerdo a los especificado en la norma NTCM-04 [14].

Para las piezas de concreto normal, la resistencia de diseño basado en el coeficiente de variación experimental de 8.15% la resistencia es de 74.47 kg/cm² un 25.5% menor al mínimo establecido que es de 100 kg/cm². Aplicando el coeficiente de variación de 20% tal como lo establece la norma, la resistencia fue de 60.45 kg/cm² que representa 39.55% menor al valor mínimo establecido.

Al comparar dichos resultados, se puede apreciar que los valores obtenidos se localizan cerca del valor promedio de 90 kg/cm². Es importante mencionar que solamente dos piezas probadas experimentalmente obtuvieron valores de resistencia superior al mínimo establecido en la norma NTCM-04 [14].

**Figura 91.** Comparación gráfica de resistencias de diseño para piezas de concreto.

En el caso de las resistencias obtenidas de las piezas de concreto ligero, estas son mucho menores a lo fijado por la norma NTCM-04 [14]. En la Figura 92 puede observarse que los valores de resistencia obtenidos de las nueve piezas probadas experimentalmente, todos los valores fluctuaron alrededor de 50 kg/cm², dicho valor representa aproximadamente un 50% menos resistencia a lo establecido para este tipo de pieza.

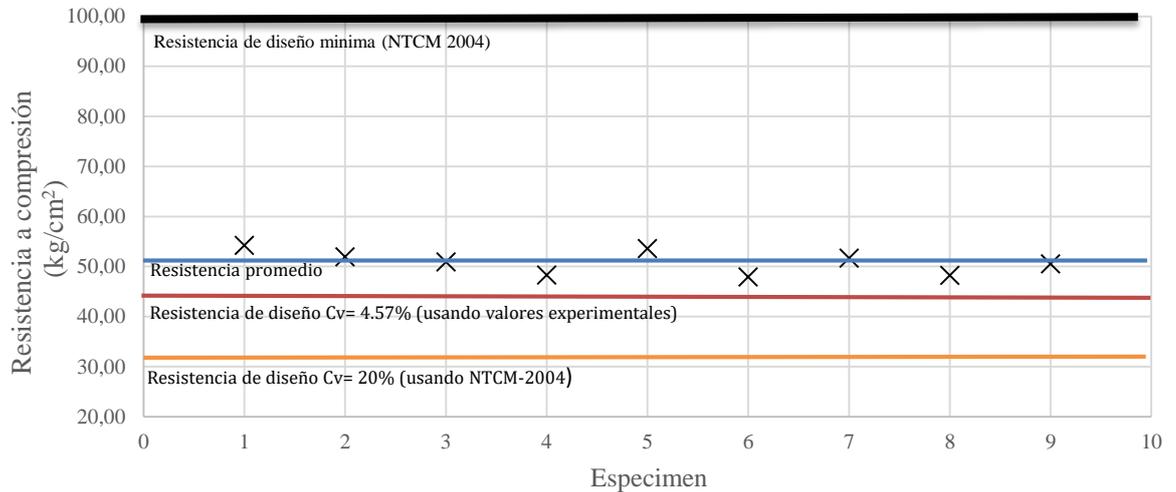


Figura 92. Comparación grafica de resistencias de diseño para piezas de concreto ligero

De los resultados anteriores, se demostró que las piezas de concreto normal y ligero presentaron un valor de resistencia menor a lo requerido por la norma y por lo tanto el uso de los criterios de diseño establecidos no aplican para determinar tabularmente la resistencia de estructuras de mampostería (f_m^*) en función de la resistencia de las piezas (f_p^*).

Es importante mencionar que los fabricantes manejan la resistencia media como la resistencia de diseño sin tomar en cuenta los coeficientes de variación.

5.1.2 ANÁLISIS DE VALORES DE RESISTENCIA EN PIEZAS DE ARCILLA.

Para el caso de tabiques de arcilla, la diferencia geométrica es muy marcada, las primeras que se denominaron como multiperforadas con dos celdas que tuvieron un peso promedio de 5.2 kg. y las segundas se les denominó como piezas multiperforadas, presentando un peso promedio de 5.8 kg.

Los valores de resistencias de diseño promedio y mínimas se muestran en la Tabla 31, puede observarse en términos generales que las resistencias de diseño mínima y promedio excedieron los valores de resistencia establecidos por la norma.

Para las piezas de dos celdas, se presentó una resistencia promedio de 210.51 kg/cm² y una resistencia mínima de 204.96 kg/cm². Para las piezas multiperforadas se obtuvo una resistencia promedio de 220.93 kg/cm² y una resistencia mínima de 214.14 kg/cm². Se puede apreciar, que en ambos casos se sobrepasa ampliamente la resistencia mínima establecida por la norma, por lo tanto, se puede concluir que debido a los valores de resistencia obtenidos, dichas piezas son consideradas de alta resistencia a compresión.

Tabla 31. Resistencia a compresión obtenida en piezas de arcilla obtenida experimentalmente.

Tipo de pieza	Resistencia promedio (\bar{f}_p) (kg/cm ²)	Coefficiente real de variación	Resistencia de diseño con NTCM-2004 (f_p^*) CV=0.20 (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual. (kg/cm ²)	Resistencia media (\bar{f}_p). NMX-C-404-ONNCCE-2013 (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual. NMX-C-404-ONNCCE-2013 (kg/cm ²)
Arcilla Multiperforada con dos celdas (Tabla 19)	210.51	1.93%	140.34	204.96	90	70
Arcilla Multiperforada (Tabla 19)	220.93	3.11%	147.29	214.14	90	70

Es interesante mencionar que en dicha tabla, los valores porcentuales del coeficiente de variación son de una dispersión menor al 5% en ambos casos. En la siguiente figura se puede apreciar una tendencia lineal hasta aproximadamente el 90% del esfuerzo máximo.

Los valores de resistencia máxima se lograron a deformaciones aproximadas de 0.0026 y 0.0031, para piezas multiperforadas y con dos celdas respectivamente, un menor valor comparado obtenido para piezas de concreto.

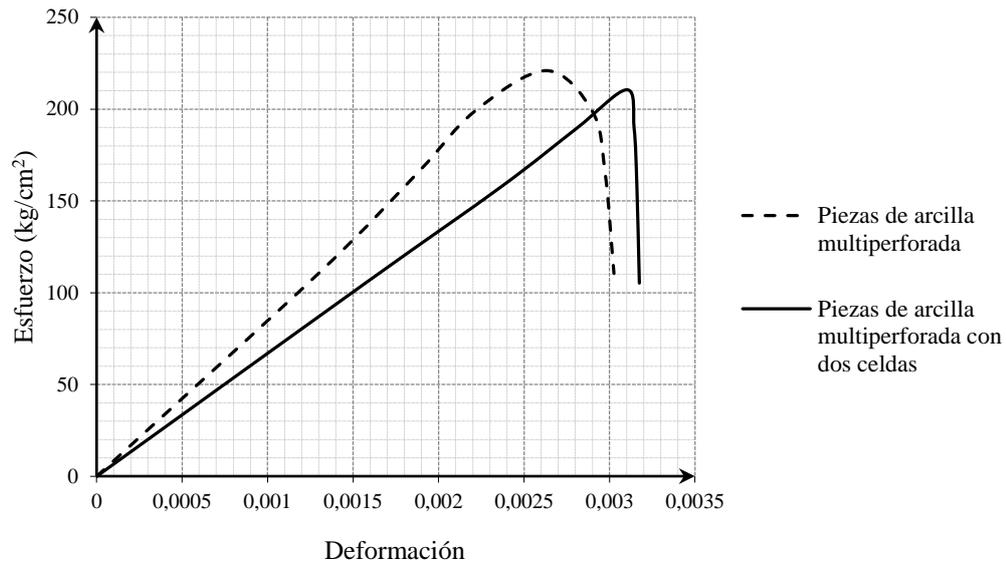


Figura 93. Diagramas esfuerzo deformación para distintos tipos de piezas de arcilla elaboradas en el estado de Nuevo León.

5.1.2.1. RESISTENCIA DE DISEÑO PARA PIEZAS DE ARCILLA.

Las resistencias de diseño para las piezas de arcilla establecidos por la norma NTCM-2004 [14], se muestra en la siguiente tabla (Tabla 32), se puede apreciar que la resistencia de diseño obtenida experimentalmente fue de 140.34 kg/cm² para las piezas de dos celdas y de 147.29 kg/cm² para las piezas de arcilla multiperforada.

Tabla 32. Resistencias de diseño para distintos tipos de piezas de arcilla del estado de Nuevo León.

Tipo de pieza	Resistencia promedio (\overline{fp}) (kg/cm ²)	Coefficiente real de variación (CRV)	Resistencia de diseño con CRV (fp^*) (kg/cm ²)	Resistencia de diseño con NTCM-2004 ($fp^*CV=0.20$) (kg/cm ²)
Arcilla Multiperforada con dos celdas (Tabla 19)	210.51	1.93%	201.24	140.34
Arcilla Multiperforada (Tabla 19)	220.93	3.11%	204.99	147.29

Gráficamente se puede observar que para las piezas con dos huecos, las resistencias de diseño obtenidas superaron el mínimo indicado por la norma NTCM, el cual fue de 125 kg/cm² (Ver figura 94).

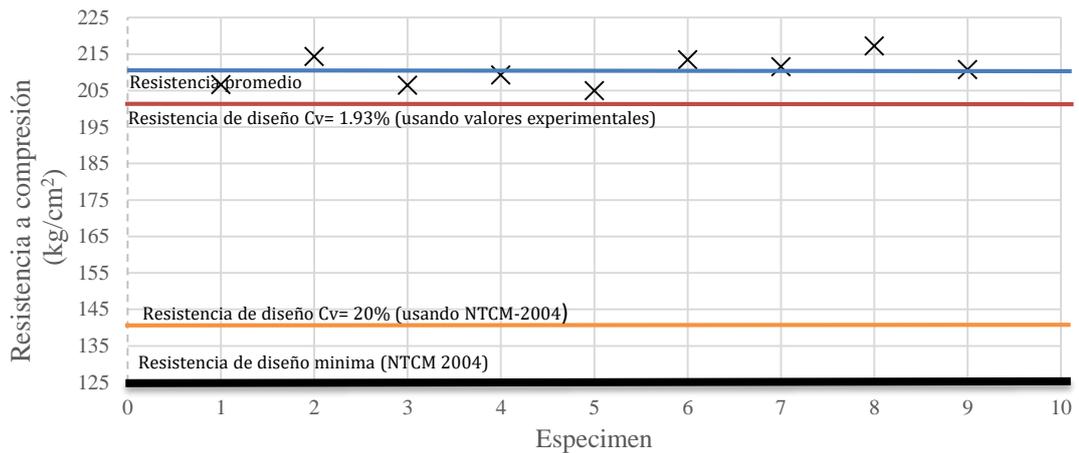


Figura 94. Comparación grafica de resistencias de diseño para piezas de arcilla multiperforada de dos celdas.

La resistencia promedio obtenida de las piezas experimentalmente fue superior en un 60% respecto a la resistencia de diseño mínima establecida por la norma mexicana [14]; un 55% superior a la resistencia de diseño afectada por un 20% de coeficiente de variación y finalmente dicha resistencia promedio fue mayor en un 5% en comparación al valor estipulado incluyendo un coeficiente de variación experimental del 1.93%. Las piezas multiperforadas también mostraron valores de resistencia superiores al ser comparados con las resistencias mínimas de diseño, dichos valores representaron un incremento aproximado de 7.77% respecto a los valores de resistencia de diseño que consideran un coeficiente de variación experimental del 3.11%. También se mostró una variación superior aproximada del 50% respecto a los valores de resistencia de diseño que incluye un coeficiente de variación del 20%. Finalmente, se pudo observar una mayor diferencia entre la resistencia promedio y la resistencia de diseño mínima indicada por la norma mexicana [14] del orden de 76.7% (Ver figura 95).

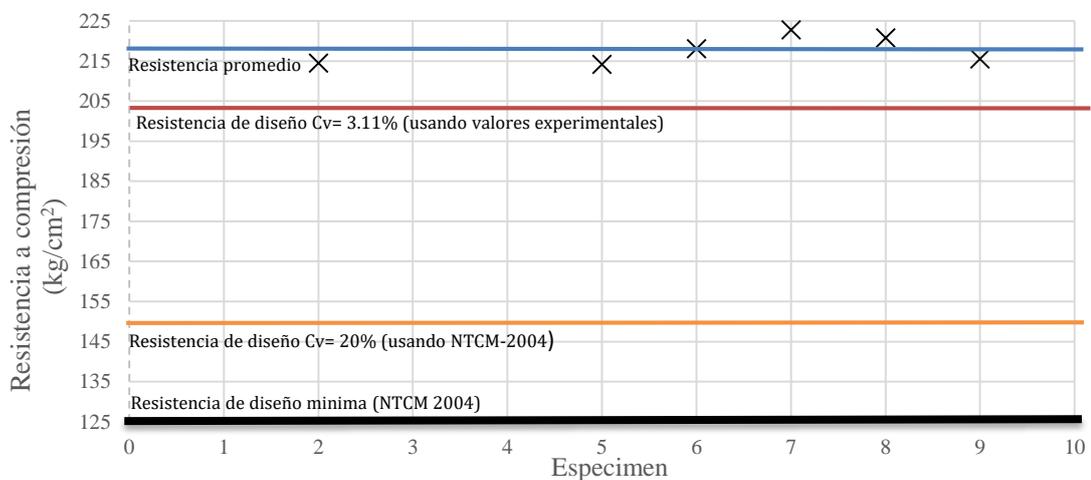


Figura 95. Comparación grafica de resistencias de diseño para piezas de arcilla multiperforada.

En base a los resultados obtenidos, las piezas de arcilla se pueden utilizar para aplicar las tablas de diseño incluidas en las NTCM-04, para así poder proponer un valor de resistencia de la mampostería (f_m^*).

5.2. ESTUDIO DE VALORES DE RESISTENCIA OBTENIDOS EN MORTERO.

Al igual que las piezas, las características mecánicas del mortero contribuyen en el comportamiento general que presenta un muro ante cualquier carga. En esta investigación se utilizó la dosificación cemento:cal:arena (1:0.25:3) tal como lo establecen las NTCM-04 [14] para morteros Tipo 1 y se elaboró con materiales característicos del estado de Nuevo León. En la Figura 96, se muestran las relaciones esfuerzo deformación obtenidas de las pruebas a compresión y tensión.

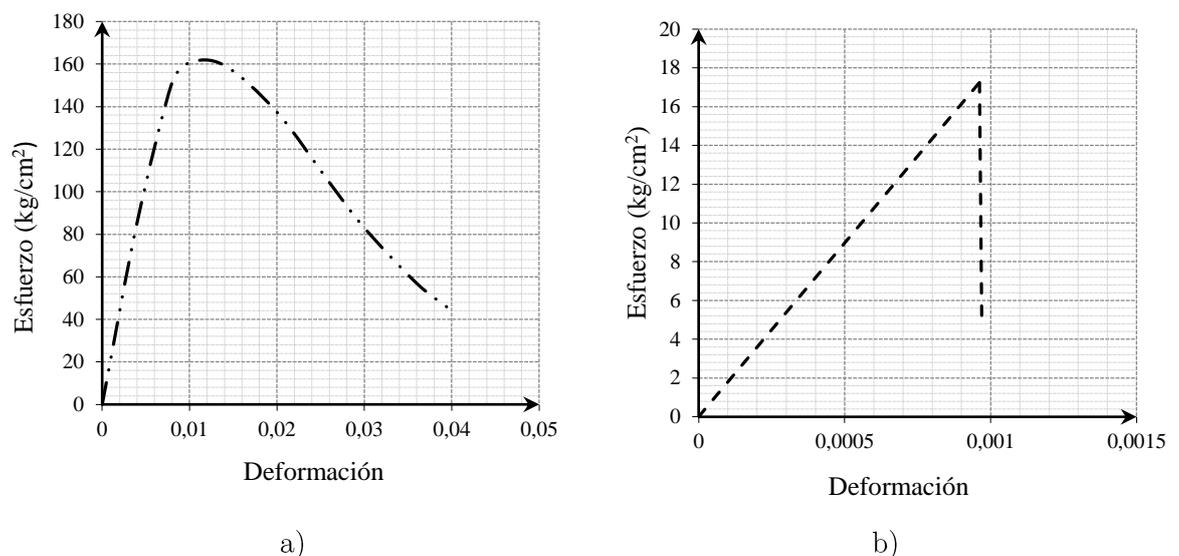


Figura 96. Diagramas esfuerzo deformación obtenidos en mortero Tipo I (1:0.25:3) a) compresión y b) tensión.

En base a los resultados a compresión (Figura 96a) se puede apreciar una tendencia elástico lineal hasta aproximadamente un 85% del esfuerzo máximo, una vez lograda la carga máxima la pérdida de resistencia del espécimen fue gradual. El comportamiento a tensión del mortero (Figura 96b), mostro una fase lineal hasta una carga de 17.11 kg/cm². Posterior a este punto el espécimen probado presento una reducción súbita en su resistencia.

Tabla 33. Resistencias de diseño para Mortero Tipo 1.

Tipo de mortero	Resistencia promedio (\overline{fp}) (kg/cm ²) (Tabla 16)	Coefficiente real de variación (Tabla16) (CRV)	Resistencia de diseño con CRV (fp^*) (kg/cm ²)	Resistencia de diseño con NTCM-2004 CV=0.20 (kg/cm ²)
Tipo 1	171.48	5.13%	151.99	114.32

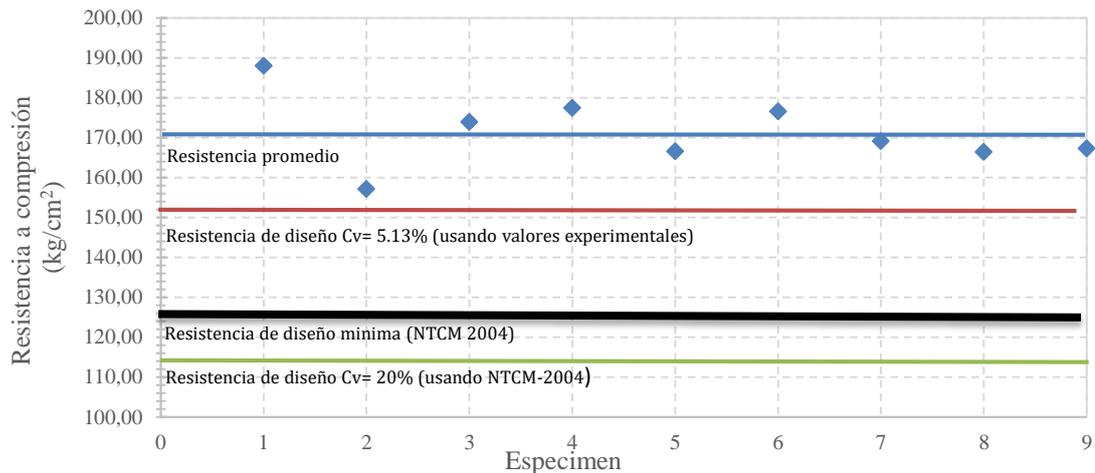


Figura 97. Comparación grafica de resistencias de diseño para mortero Tipo 1.

De los resultados mostrados en la tabla 33 se puede observar que la resistencia promedio obtenida fue de 171.48 kg/cm², y las resistencias obtenidas utilizando el coeficiente de variación experimental y el de la norma [14] son de 151.99 y 114.32 kg/cm² respectivamente. El coeficiente de variación obtenido experimentalmente fue de 5.13%.

En la Figura 97 se observa una comparativa incluyendo los resultados experimentales y los valores de diseño dictaminados por la norma, puede apreciarse que la resistencia promedio experimental fue un 50% superior a los valores de resistencia según la norma mexicana incluyendo un coeficiente de variación del 20% y además, una variación superior del 12.82% respecto a la resistencia de diseño con un coeficiente de variación experimental del orden del 5.13%, sin embargo, la resistencia de diseño obtenida de acuerdo a la norma mexicana, no supero el valor mínimo establecido.

5.3. ESTUDIO DE LOS VALORES A COMPRESIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE EN MURETES.

Aquí se hace un análisis de los valores de resistencia que se obtuvieron al probar experimentalmente los muretes bajo la acción de tres velocidades de carga distintas. En primer lugar se analizaron los valores de resistencia que fueron obtenidos de manera experimental, en segundo lugar se compararon dichos valores contra lo obtenido en otras investigaciones por otros autores y finalmente se incluye un estudio comparativo entre estos valores experimentales obtenidos en laboratorio y los valores establecidos por normas o reglamentos nacionales e internacionales.

5.3.1. MURETES DE CONCRETO

Para esta investigación se consideraron dos grupos de muretes con piezas de concreto, los primeros elaborados con piezas de concreto normal y los segundos con piezas de concreto ligero, la relación de aspecto promedio fue cercana a 1 y la relación de esbeltez a 5.6.

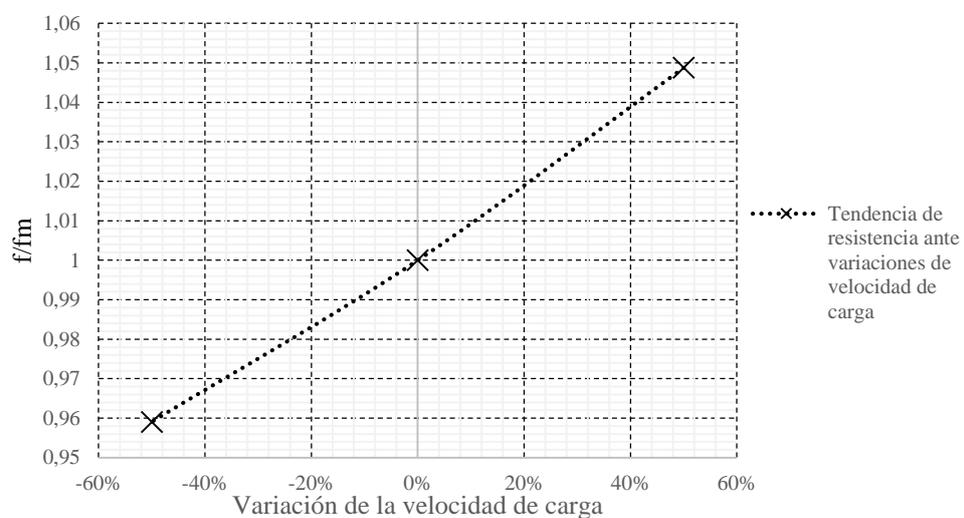
5.3.1.1. MURETES DE CONCRETO NORMAL.

Las resistencias obtenidas al ensayar experimentalmente los muretes de concreto normal se muestran en la Tabla 34, de manera general se puede apreciar que la resistencia obtenida a velocidad moderada de carga fue de 45.91 kg/cm^2 , mientras que la resistencia promedio de 48.15 kg/cm^2 fue lograda a una velocidad de carga rápida. Por último, se muestra la resistencia a compresión cuyo valor promedio de 44.03 kg/cm^2 fue obtenido para una velocidad de carga lenta. En la Figura 98, se muestra una comparativa grafica entre valores de resistencia nominal (resistencias obtenidas aplicando velocidades rápidas y lentas entre valores de resistencia a velocidad de carga moderada) indicadas en el eje vertical y variaciones de velocidad en el eje horizontal.

Tabla 34. Resistencia promedio de muretes de concreto normal a diferentes velocidades de carga.

Tipo de murete	Velocidad de carga	Resistencia promedio (f_m) (kg/cm ²)	Variación de resistencias promedio respecto a la velocidad moderada	Coefficiente de variación experimental
Bloque de concreto normal (Tabla 20)	Rápida (650 kg/seg)	48.15	4.88%	5.34%
	Moderada (440 kg/seg)	45.91	-	4.69%
	Lenta (215 kg/seg)	44.03	-4.26%	2.92%

De dichos resultados puede observarse una curva, que contiene la resistencia nominal obtenida experimentalmente y un ajuste para predecir valores de resistencia de muretes con características similares a los probados en esta investigación, con dicho ajuste se puede establecer que al modificar la velocidad de carga un $\pm 10\%$, se obtendrá una variación de la resistencia en un 0.9% .

**Figura 98.** Variación de resistencia al modificar la velocidad de carga en muretes de concreto.

Respecto al módulo de elasticidad para varios tipos de velocidad de carga se obtuvo una variación significativa entre los resultados, ya que a través de los diagramas esfuerzo deformación se determinó el módulo de elasticidad con variaciones cercanas al 5.71% , al incrementar la velocidad de carga y al reducirla se modificó un 1.94% respecto a lo obtenido a velocidad moderada (Tabla 35).

Tabla 35. Variación del Módulo de Elasticidad promedio de muretes con piezas concreto normal a diferentes velocidades de carga.

Tipo de pieza	Velocidad de carga	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)	Variación del módulo de elasticidad
Bloques de Concreto normal (Tabla 26)	Rápida (650 kg/seg)	35361	+5.71%
	Moderada (440 kg/seg)	33453	-
	Lenta (215 kg/seg)	32871	-1.94%

Respecto a la relación que existe entre el murete y sus componentes, en términos de resistencia, se pudo determinar un valor aproximado del 50% al relacionar la resistencia promedio obtenida en los muretes entre la resistencia promedio obtenida de las piezas. Por otra parte, la relación obtenida al relacionar la resistencia promedio de los muretes con la resistencia del mortero es del orden del 26.83% (Ver tabla 36).

Tabla 36. Resistencias promedio de muretes de concreto normal.

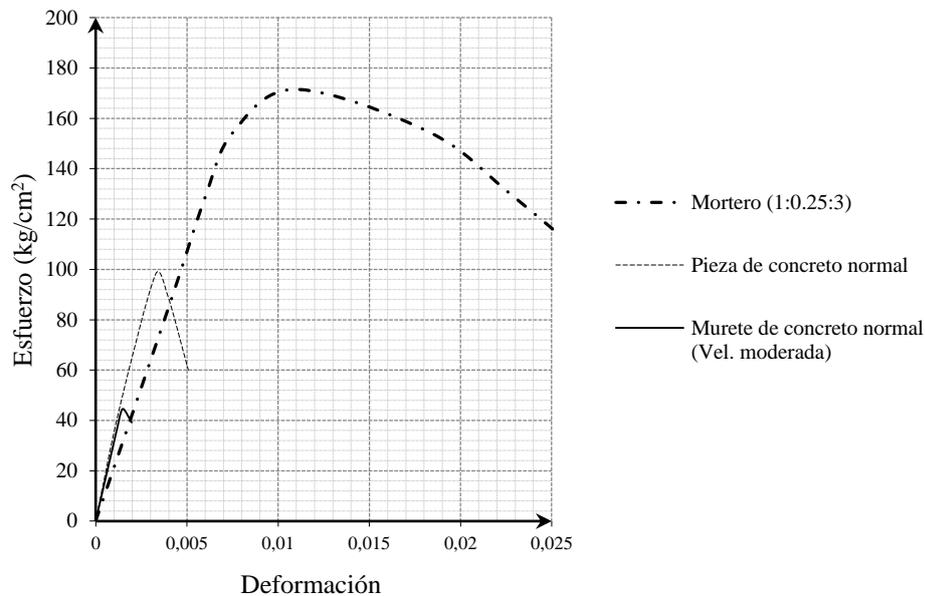
Resistencia promedio de los muretes a diferentes velocidades (Tabla 20) ($\overline{f_m}$) (kg/cm ²)	Resistencia promedio de la pieza (Tabla 18) ($\overline{f_p}$) (kg/cm ²)	Resistencia promedio del mortero (Tabla 16) ($\overline{f_j}$) (kg/cm ²)	$\overline{f_m}/\overline{f_p}$ (%) (Promedio)	$\overline{f_m}/\overline{f_j}$ (%) (Promedio)
46.03	90.67	171.48	50.77%	26.83%

La Figura 99 muestra los diagramas esfuerzo deformación promedio obtenidos de muretes, morteros y piezas obtenidos al aplicar una velocidad de carga moderada. Se puede apreciar que de manera individual la pieza y el mortero alcanzaron mayores niveles de deformación al alcanzar la carga máxima

Es decir, el mortero resulto más deformable y resistente que la pieza. Sin embargo, al estar contenidos dentro del murete y al ser sometidos en conjunto a carga de compresión

axial tuvo un comportamiento distinto respecto al murete, el cual presento una resistencia menor que sus componentes y un diagrama esfuerzo deformación que quedo contenido entre las curvas que representan la pieza y el mortero, alcanzando niveles menores de deformación y carga.

Figura 99. Diagrama esfuerzo deformación obtenido para piezas de concreto normal, Mortero Tipo 1 y Murete.



Se trató de establecer comparativas entre sistemas de mampostería de investigaciones realizadas por otros autores con los resultados de la presente investigación (Ver figura 100). En dicha comparativa no fue posible incluir sistemas de muretes con características similares a los usados en esta investigación, sin embargo, se pudo comparar resultados de pilas con morteros y piezas de geometría similar [6] y muretes con dosificaciones similares en morteros pero elaborados con piezas de concreto con resistencias del orden de 185 kg/cm^2 contra los 91 kg/cm^2 presentado por las piezas utilizadas en esta investigación. También se determinó que aunque las pilas son especímenes con características geométricas distintas a las de los muretes, presentan comportamientos similares a los obtenidos en esta investigación. Por otra parte, los muretes presentan comportamientos diferentes entre ellos, ya que los elaborados por Lourenco [40] presentan bajos niveles de deformación del orden de 0.0012 al alcanzar la carga máxima y además los de Kruston [31] muestran altos niveles de deformación del orden de 0.0034, los de esta investigación muestran un nivel intermedio de deformaciones de 0.0034, los de esta investigación muestran un nivel intermedio de deformaciones de 0.0015 y una resistencia menor que los anteriores. Sin embargo, es evidente la variación entre una curva y otra, aunque los valores de resistencia fueron muy similares.

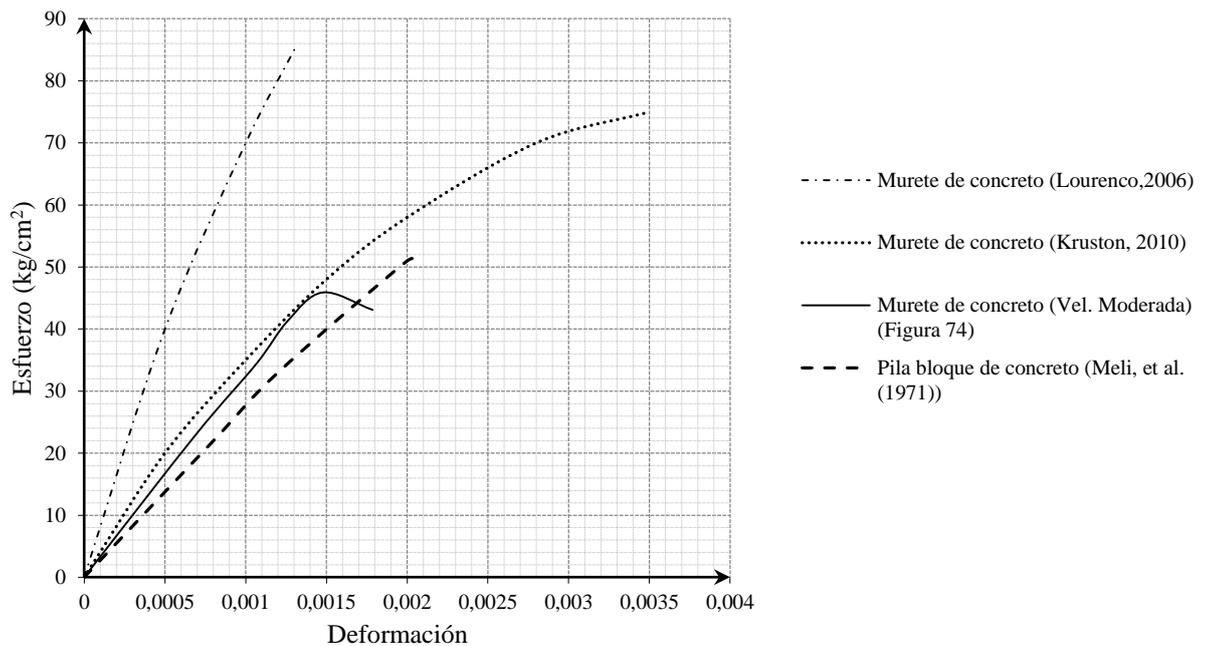


Figura 100. Diagramas esfuerzo deformación a compresión uniaxial para muretes y pilas elaborados en diferentes investigaciones.

Las resistencias promedio obtenidas de estos muretes y pilas se pueden verificar en la Tabla 37 donde se muestra un resumen de las resistencias obtenidas de las piezas (\bar{f}_p) y morteros (\bar{f}_j) con las que se elaboraron distintos especímenes experimentales de los cuales se incluye también su resistencia promedio (\bar{f}_m). Se puede observar que existe un rango de diferencia del 40 al 51% para piezas. Al relacionar la resistencia del mortero se muestran valores entre el 25 y 45%. Algunas de las razones por las que se redujo la resistencia, además de los efectos de esfuerzos internos producidos por la carga a compresión, influye el efecto de las dimensiones, el rozamiento entre las placas, condiciones de esbeltez, efecto de la junta horizontal, etc.

Tabla 37. Valores de resistencias y módulos de elasticidad para pilas y muretes.

Material	\bar{f}_p (kg/cm ²)	\bar{f}_j (kg/cm ²)	\bar{f}_m (kg/cm ²)	\bar{f}_m/\bar{f}_p (%)	\bar{f}_m/\bar{f}_j (%)	\bar{E}_m (kg/cm ²)	Promedio \bar{E}_m/\bar{f}_m
Bloque de dos huecos de concreto (Tabla 16,18,20 y 26) (1:0.25:3)	91	171	46	50.54	26.90	33877	736
Bloques de dos huecos concreto (Lourenco,2006) (1:0.25:3)	182	199	82	45.05	41.26	65306	792
Bloques de dos huecos concreto (kruston,2006) (1:0.25:3)	192	182	75	39.06	41.20	30050	467
Bloques de concreto intermedio (Meli y Hernández, 1971) (1:0:3)	82	178	49	47.19	27.52	26000	520

De la tabla anterior se puede observar que en esta investigación se presentaron valores con respecto al módulo de elasticidad de aproximadamente 700 veces la resistencia a compresión y en las otras investigaciones esta relación fluctuó entre 470 y 800 veces la resistencia a compresión.

Debido a la insuficiente información experimental es difícil evaluar directamente los resultados obtenidos en esta investigación contra lo que establece la norma mexicana (NTCM-04) [14], ya que en primera instancia la norma determina la resistencia de diseño a partir de pilas. Un parámetro que se puede comparar es obteniendo la resistencia de diseño a partir de la resistencia obtenida experimentalmente de las piezas y asociarlo con lo establecido en la norma NTCM-04 [14] para bloques y tabiques de concreto con relación altura/espesor no menor que 0.5 y con un $f_p^* > 100 \text{ kg/cm}^2$ (10 MPA), la resistencia de diseño a compresión podrá ser la que indica la tabla siguiente:

Tabla 38. Resistencia de diseño f_m^* (NTCM-04) [14].

Resistencia de la pieza (f_p^*) (Kg/cm ²) MPA	Resistencia de la mampostería (f_m^*) (Kg./cm ²) MPA		
	Mortero Tipo I	Mortero Tipo II	Mortero Tipo III
	(100)10	(50)5	(45)4.5
(150)15	(75)7.5	(60)6	(60)6
>(200)20	(100)10	(90)9	(80)8

Debido a los valores inferiores de resistencia obtenidos en esta investigación, que no superaron el mínimo de 100 kg/cm^2 , los valores de resistencia de diseño mostrados en la tabla 39 no pueden ser aplicados directamente tal como lo establece la norma mexicana.

Otros códigos permiten establecer la resistencia de la mampostería en función de la resistencia de la pieza y el mortero, el Eurocodigo 6 [35] propone la siguiente ecuación:

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (28)$$

Donde f_k es la resistencia característica de la mampostería ó resistencia de diseño, K es una constante que se calibra experimentalmente, f_b es la resistencia de diseño normalizada para la pieza utilizada, y f_m es la resistencia de diseño del mortero, por ultimo α y β son constantes determinados experimentalmente.

De manera general, para el tipo de piezas y mortero utilizadas en esta investigación se adapta la ecuación que se expresa numéricamente de la manera forma:

$$f_k = 0.45 f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (29)$$

Los valores usados en esta ecuación, son los aplicables para materiales similares a los utilizados en la presente investigación. El valor de resistencia de piezas de concreto normal modificadas por el factor de forma de 1.25 es (f_b) y mortero tipo 1 (f_m) en esta investigación, se obtiene:

$$f_k = 0.45 f_b^{0.65} f_m^{0.25}$$

$$f_k = 0.45 * (90.67 * 1.25)^{0.65} * 171.48^{0.25}$$

$$f_k = 43.05 \text{ kg/cm}^2$$

Comparando este valor de resistencia obtenido contra los valores cuyo promedio fue de 46.03 kg/cm², lo cual representa un valor de 5.8% superior a lo obtenido por el código Europeo.

5.3.1.2. MURETES DE CONCRETO LIGERO.

En el caso de los muretes elaborados con piezas de concreto ligero los resultados obtenidos aplicando una velocidad de carga moderada mostraron un valor promedio de 25.56 kg/cm². Para muretes sometidos a velocidad de carga rápida, se obtuvo una resistencia promedio de 27.03 kg/cm² y por último, se logró un valor de resistencia media aproximada de 23.86 kg/cm² cuando el murete fue expuesto a una velocidad de carga lenta. En términos del coeficiente de variación fueron de 4.87%, 5.30% y 6.72% para casos de velocidad de carga rápida, moderada y lenta respectivamente (Ver tabla 39).

Tabla 39. Resistencia promedio de muretes de concreto ligero a diferentes velocidades de carga.

Tipo de murete	Velocidad de carga	Resistencia promedio (\bar{f}_m) (kg/cm ²)	Variación de resistencias promedio respecto a la velocidad moderada	Coficiente de variación experimental
Bloque de concreto Ligero (Tabla 20)	Rápida (650 kg/seg)	27.03	5.75%	4.87%
	Moderada (440 kg/seg)	25.56	-	5.30%
	Lenta (215 kg/seg)	23.86	-7.12%	6.72%

En la figura 101, se puede apreciar que el comportamiento obtenido en los muretes respecto a las resistencia moderada se adapta con una buena correlación a un modelo lineal, con lo cual se permite establecer que al incrementar o disminuir la velocidad de carga en un 10%, se tendrá una modificación del 1.24% respecto a la resistencia a compresión.

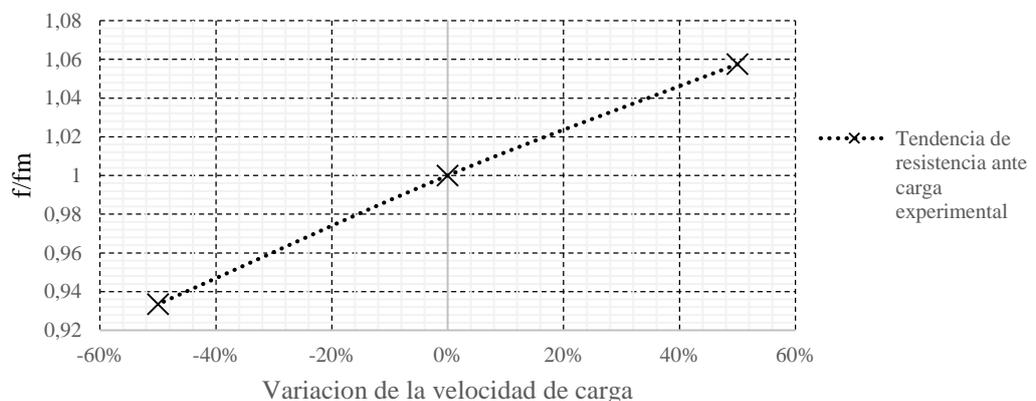


Figura 101. Variación de resistencia al modificar la velocidad de carga en muretes de concreto ligero.

Considerando el módulo de elasticidad y modificando la velocidad de carga, se observaron bajos índices de variación, ya que respecto al obtenido a velocidad moderada, la diferencia al incrementar la velocidad un 50% fue 0.43% mayor y un 3.20% menor al reducirla en un 50 %, por lo que se evidencia que el módulo de elasticidad no sufre variaciones importantes al modificar la velocidad de carga (Ver Tabla 40).

Tabla 40. Variación del Módulo de Elasticidad promedio de muretes con piezas de concreto ligero a diferentes velocidades de carga.

Tipo de pieza	Velocidad de carga	Módulo de Elasticidad promedio (kg/cm ²)	Variación del módulo de elasticidad
Bloques de concreto ligero (Tabla 26)	Rápida (650 kg/seg)	20014	+0.43%
	Moderada (440 kg/seg)	19928	-
	Lenta (215 kg/seg)	19310	-3.20%

De acuerdo a lo obtenido en muretes de concreto ligero, la capacidad a compresión fue menor a lo obtenido en muretes con piezas de concreto normal, ya que presentaron resistencias de 25.48 kg/cm². Estos muretes también tuvieron una relación entre la resistencia de la pieza y la del murete cercana al 50% y una relación del 14.85% contra la resistencia del mortero.

Tabla 41. Resistencias promedio de muretes de concreto ligero.

Resistencia promedio de los muretes a diferentes velocidades (Tabla 20) $(\overline{f_m})$ (kg/cm ²)	Resistencia promedio de la pieza (Tabla 18) $(\overline{f_p})$ (kg/cm ²)	Resistencia promedio del mortero (Tabla 16) $(\overline{f_j})$ (kg/cm ²)	$\overline{f_m}/\overline{f_p}$ (%) (Promedio)	$\overline{f_m}/\overline{f_j}$ (%) (Promedio)
25.48	51.24	171.48	49.74%	14.85%

En la Figura 102, se puede apreciar como el comportamiento presentado por el murete está influenciado directamente por las características de sus componentes, la pieza empleada presentó un nivel moderado de deformación y baja resistencia al ser comparado con el mortero, ya que en este caso el mortero fue más resistente y deformable. El diagrama obtenido en el murete, presentó una pendiente menor a la obtenida en la pieza y el mortero, fallando a niveles de esfuerzo y deformación menores.

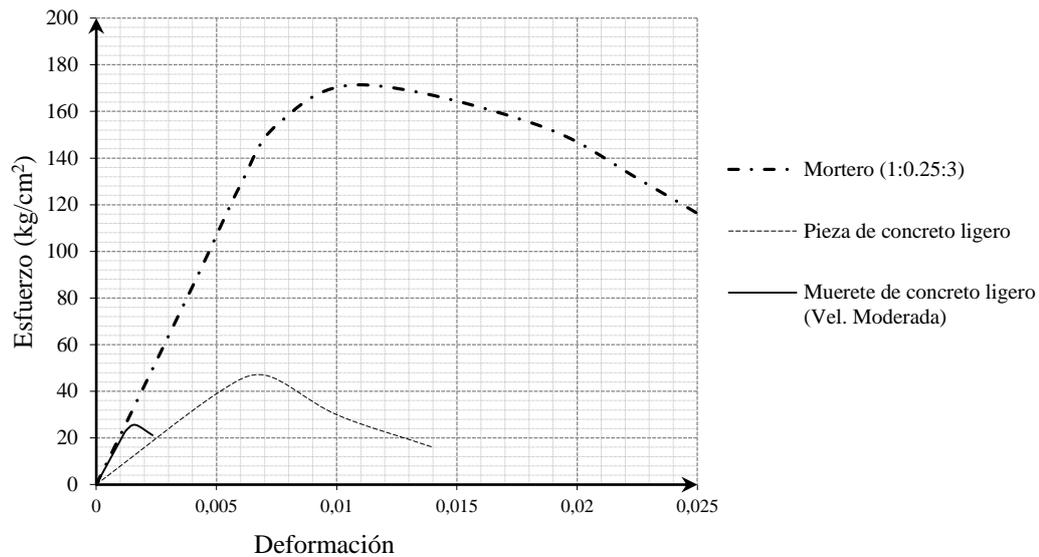


Figura 102. Diagramas esfuerzo deformación a compresión uniaxial para muretes y pilas elaborados en diferentes investigaciones.

Para los muretes elaborados con piezas de concreto ligero, comparando los resultados contra otras investigaciones que utilizaron dosificaciones de morteros y piezas similares (Figura 103).

En Meli [6] se aprecia una curva que representa un comportamiento muy similar a pesar de las variaciones geométricas. En términos de resistencia y deformación, los muretes desarrollados en esta investigación alcanzaron una carga máxima aproximada de 25 kg/cm² a niveles de deformación de 0.0016, mientras que en las pilas probadas por Meli [6] se obtuvieron esfuerzos cercanos a 40 kg/cm² y a deformaciones de 0.002, por lo que la resistencia y la deformación fueron en ambos casos superiores aproximadamente un 40% a lo obtenido en esta investigación.

Otra referencia usada para comparar los resultados obtenidos de muretes con piezas de concreto ligero, se muestra en los trabajos realizados por Ruvalcaba [52], en los que se puede apreciar en el diagrama obtenido como el comportamiento presenta un mayor índice de deformación y una resistencia moderada, esto es debido a que la mezcla Cemento:Cal:Arena fue de 1:1:5, presenta una cantidad mayor de arena y cal, que reduce la resistencia del mortero pero incrementa su capacidad de deformación. Las diferencias entre ambas curvas obedece también al tipo de piezas empleadas, ya que en dicha investigación fueron usados bloques de concreto sólido, la cual permitió mayores niveles de deformación que los muretes usados en la presente investigación.

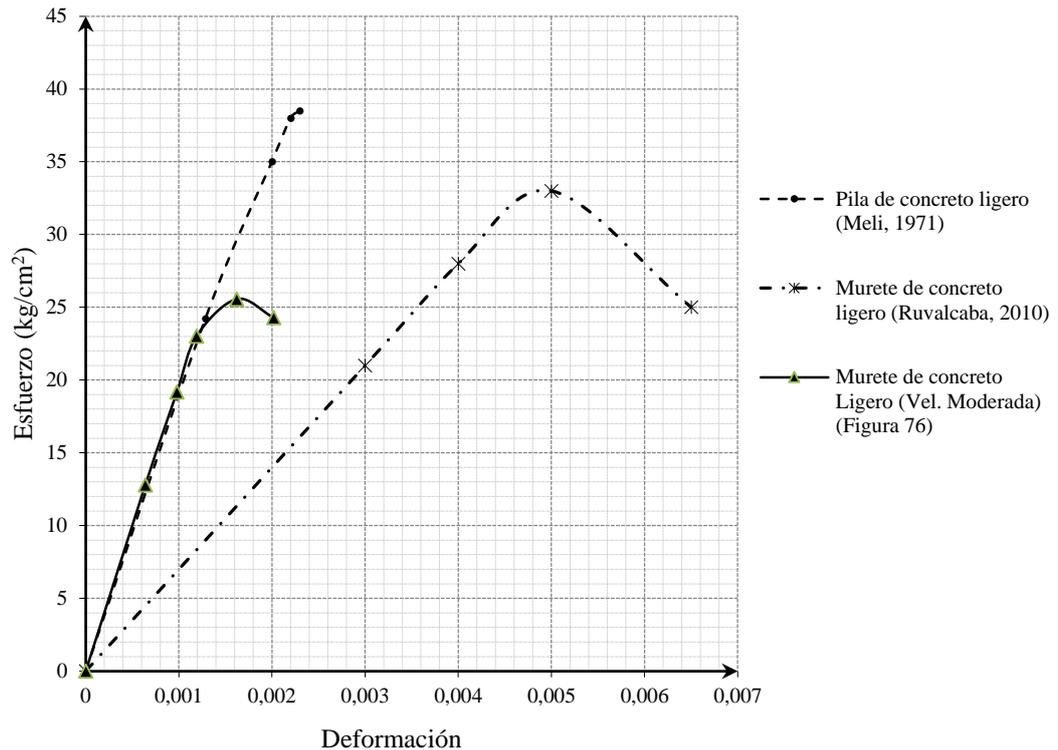


Figura 103. Diagramas esfuerzo deformación a compresión uniaxial para muretes y pilas elaborados en diferentes investigaciones.

La relación entre la resistencia de las piezas y la mampostería en las investigaciones presento valores muy dispersos que van desde el 45 al 80% mientras que la relación entre la resistencia de las piezas y la resistencia de los morteros (\bar{f}_j) va desde el 14% hasta el 15.5% (Ver tabla 42).

Tabla 42. Diferentes módulos de elasticidad para pilas y muretes.

Material	\bar{f}_p (kg/cm ²)	\bar{f}_j (kg/cm ²)	\bar{f}_m (kg/cm ²)	\bar{f}_m/\bar{f}_p (%)	\bar{f}_m/\bar{f}_j (%)
Bloque de concreto ligero (Meli 1979) (1:0:3)	35	188	28	80.00	14.89
Bloque de concreto ligero solido (Ruvalcaba, 2010) (1:1:5)	73	-	33	45.20	-
Bloque de concreto ligero (Tabla 16,18 y 20) (1:0.25:3)	51	171	26	50.90	15.20

Al igual que lo ocurrido con los muretes de concreto, es difícil relacionar directamente las resistencias obtenidas en los muretes con los valores indicados en las normas mexicanas (NTCM-04) [14]. Cuyos valores mínimos establecidos son de 100 kg/cm² para la pieza,

con lo cual se puede determinar un valor de resistencia de 50 kg/cm², los valores determinados de esta investigación fueron de 34.16 kg/cm² en piezas y 25.48 kg/cm² en los muretes.

Tabla 43. Resistencia de diseño f_m^* [14].

Resistencia de la pieza (f_p^*) (Kg/cm ²) MPA	Resistencia de la mampostería (f_m^*) (Kg/cm ²) MPA		
	Mortero Tipo I	Mortero Tipo II	Mortero Tipo III
	(100)10	(50)5	(45)4.5
(150)15	(75)7.5	(60)6	(60)6
>(200)20	(100)10	(90)9	(80)8

Aplicando el mismo criterio usado en el apartado anterior, aquí se usa el Eurocodigo 6 para establecer algún tipo de relación con los valores de resistencia experimentales mediante la ecuación (29).

Sustituyendo esta ecuación con los valores asociados a los componentes de esta investigación la ecuación queda:

$$f_k = 0.45 f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (30)$$

De acuerdo a lo obtenido en piezas de concreto ligero modificadas por el factor de forma de 1.25 y mortero tipo 1 en esta investigación que de acuerdo a la norma este valor no podrá ser mayor a 200 kg/cm² ni dos veces f_b , por lo que f_m es de 128.1 kg/cm², se obtiene:

$$f_k = 0.45 f_b^{0.65} f_m^{0.25}$$

$$f_k = 0.45 * (51.24 * 1.25)^{0.65} * 128.1^{0.25}$$

$$f_k = 27.64 \text{ kg/cm}^2$$

Comparando este valor de resistencia de diseño obtenida contra los valores experimentales se obtuvo una resistencia promedio de 25.48 kg/cm².

5.3.2. MURETES DE ARCILLA.

Además, de los muretes elaborados con piezas de concreto, se analizaron dos tipos de muretes de arcilla ambos grupos elaborados con piezas multiperforadas, sin embargo el primer tipo presenta dos grandes huecos cuadrados en su geometría y los segundos pequeños huecos cuadrados distribuidos uniformemente sobre su superficie.

5.3.2.1. MURETES DE ARCILLA CON DOS CELDAS.

Al analizar experimentalmente su comportamiento, los muretes con piezas de dos huecos mostraron las resistencias contenidas en la Tabla 44, en esta se puede apreciar que la resistencia promedio a velocidad intermedia fue de 54.05 kg/cm^2 y al incrementar un 50% esta velocidad la resistencia incremento un 10.92% con respecto a la intermedia, por otro lado al reducirla un 50% la resistencia disminuyo un 3.18%.

Respecto a los coeficientes de variación obtenidos a las distintas velocidades de carga no se observó una variación considerable entre los resultados a diferentes velocidades de carga, ya que para todos los casos no se mostraron diferencias mayores al 1%, sin embargo el coeficiente fue mayor a velocidad lenta y se redujo conforme se incrementó la velocidad de carga.

Tabla 44. Resistencia promedio de muretes con piezas de arcilla multiperforada de dos celdas a diferentes velocidades de carga.

Tipo de murete	Velocidad de carga	Resistencia promedio ($f\bar{m}$) (kg/cm^2)	Variación de resistencias promedio respecto a la velocidad intermedia	Coefficiente de variación experimental
Tabique de barro multiperforado con dos celdas (Tabla 20)	Rápida (500 kg/seg)	59.95	10.92%	3.40%
	Moderada (330 kg/seg)	54.05	-	3.96%
	Lenta (165 kg/seg)	52.38	-3.18%	4.36%

Gráficamente, se puede apreciar que el comportamiento de los muretes a diferente velocidad de carga presentan un comportamiento no lineal ya que se presentó un efecto mayor al incrementar la velocidad (10.92%) que al reducirla (3.18%), sin embargo ajustando su comportamiento a un modelo lineal, se pudo establecer que la resistencia de los

muretes presentan una variación del 2.18% por cada incremento del 10% su velocidad de carga y de un 0.62% al reducir un 10% la velocidad de carga. (Ver Figura 104)

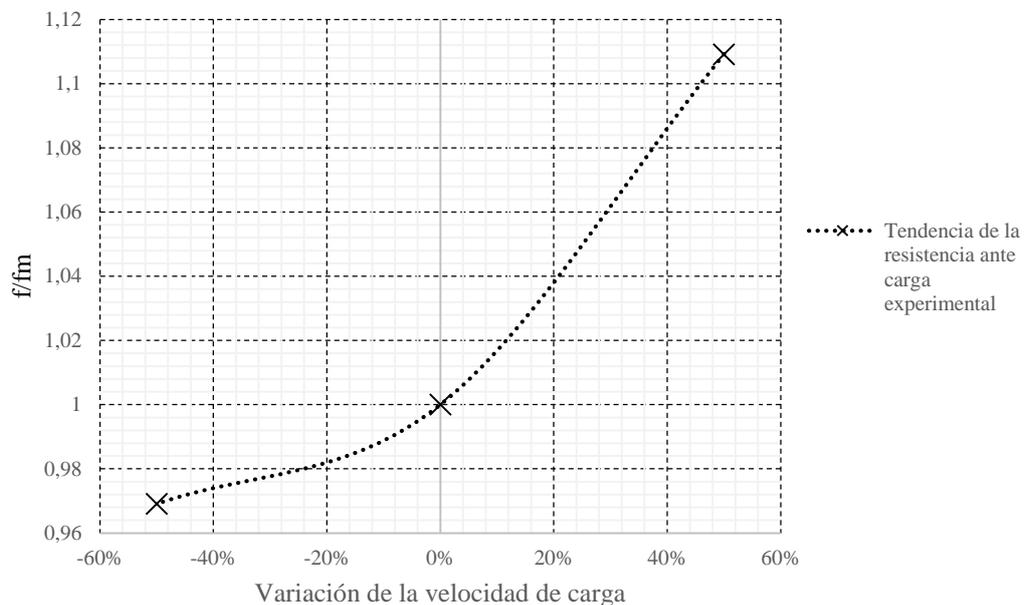


Figura 104. Variación de resistencia al modificar la velocidad de carga en muretes con piezas de arcilla multiperforadas de dos celdas.

Respecto a lo módulos de elasticidad obtenidos se observaron bajos niveles de variación respecto a los especímenes examinados a diferentes velocidades de carga, ya que al modificar la velocidad de carga se presentaron diferencias del orden del 2% al 4% respecto a los módulos de elasticidad obtenidos para todos los casos de carga (Tabla 45).

Tabla 45. Variación del Módulo de Elasticidad promedio de muretes con piezas de arcilla multiperforada de dos celdas a diferentes velocidades de carga.

Tipo de pieza	Velocidad de carga	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)	Variación del módulo de elasticidad
Tabiques de arcilla multiperforada de dos celdas (Tabla 27)	Rápida (500 kg/seg)	41944	+4.73%
	Moderada (330 kg/seg)	40049	-
	Lenta (165 kg/seg)	39182	-2.21%

La resistencia media de los muretes con piezas de arcilla de dos celdas fue de 55.46 kg/cm² en las que existe una relación entre la resistencia de la pieza y la resistencia del

murete cercana al 25% de la capacidad de la pieza (Ver tabla 46), respecto a la capacidad del murete respecto a la resistencia del mortero fue del 32.33%.

Tabla 46. Resistencias promedio de muretes de arcilla multiperforada de dos celdas.

Resistencia promedio de los muretes a diferentes velocidades de carga (Tabla 20) $(\overline{f_m})$ (kg/cm ²)	Resistencia promedio de la pieza (Tabla 19) $(\overline{f_p})$ (kg/cm ²)	Resistencia promedio del mortero (Tabla 16) $(\overline{f_j})$ (kg/cm ²)	$\overline{f_m} / \overline{f_p}$ (%) (Promedio)	$\overline{f_m} / \overline{f_j}$ (%) (Promedio)
55.46	210.51	171.48	26.35%	32.33%

En estos especímenes también se presentó un comportamiento en el que la resistencia fue menor que el de sus elementos constitutivos en términos de resistencia y una capacidad de deformación que presentó un valor intermedio entre sus componentes. La pieza presentó una capacidad de deformación menor pero una resistencia superior al compararse con el mortero empleado, por otra parte el mortero es más deformable que la pieza (Ver Figura 105).

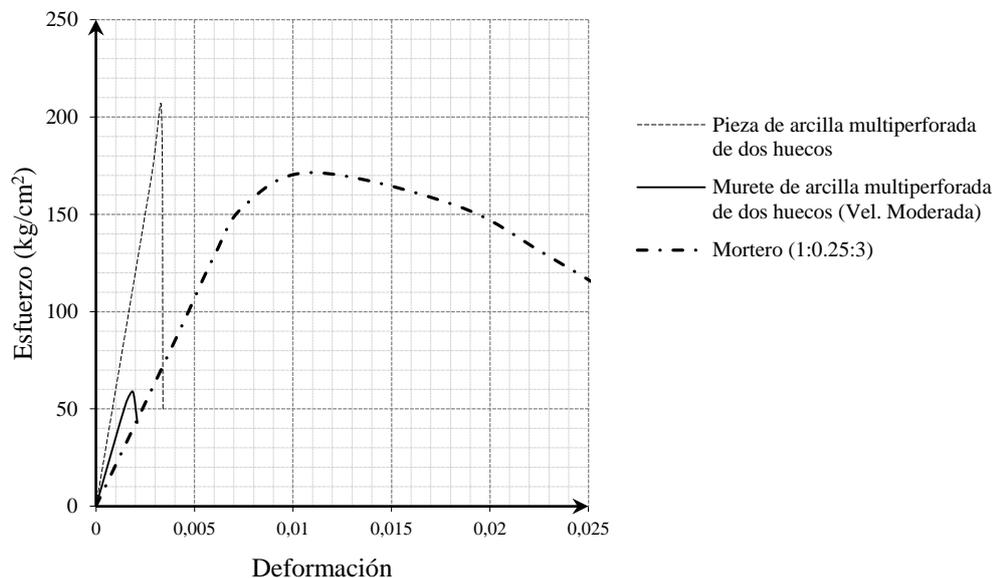


Figura 105. Diagrama esfuerzo deformación obtenido para piezas de barro multiperforado de dos celdas, Mortero Tipo 1 y Murete.

Es poca la información que se tiene en diagramas esfuerzo deformación con elementos de características similares, sin embargo algunos fabricantes del centro del país presentan información que nos permite verificar el comportamiento obtenido en los muretes de

arcilla, en los resultados mostrados en la Tabla 47 se puede apreciar que a pesar de que la resistencia de las piezas es diferente se presentó un módulo de elasticidad cercano.

Tabla 47. Diferentes módulos de elasticidad para pilas y muretes.

Material	$\overline{f_p}$ (kg/cm ²)	$\overline{f_j}$ (kg/cm ²)	$\overline{f_m}$ (kg/cm ²)	$\overline{f_m/f_p}$ (%)	$\overline{f_m/f_j}$ (%)	$\overline{E_m}$ (kg/cm ²)	Promedio $\overline{E_m/f_m}$
Tabique de barro multiperforado con dos celdas (Tabla 16, 19, 20 y 27)	210	171	55.46	26.41	32.43	40391	728
Novablock 10.5 (Novaceramic, 2013)	100	-	40	40.00	-	53812	1350

Al igual que los muretes de concreto es difícil comparar los resultados con lo mostrado en la Norma mexicana, sin embargo también a partir de la resistencia experimental obtenida en las piezas de barro podemos determinar la resistencia de diseño a compresión de la mampostería que será la que se obtiene de la Tabla 48.

La resistencia de diseño obtenida para las piezas, fue de alrededor de 140 kg/cm², utilizando este valor para un mortero tipo 1 la resistencia de diseño para la mampostería (f_m^*) debería ser de 40 kg/cm², experimentalmente se obtuvieron valores mayores, para la resistencia de diseño en los muretes de barro multiperforado de 55.46 kg/cm², siendo levemente superiores a lo especificado en el reglamento

Tabla 48. Tablas de diseño para determinar f_m^* a partir de la resistencia de las piezas de barro [14].

Resistencia de la pieza (f_p^*) (Kg/cm ²) MPA	Resistencia de la mampostería (f_m^*) (Kg/cm ²) MPA		
	Mortero Tipo I	Mortero Tipo II	Mortero Tipo III
(60)6	(20)2	(20)2	(20)2
(75)7.5	(30)3	(30)3	(25)2.5
(100)10	(40)4	(40)4	(30)3
(150)15	(60)6	(60)6	(40)4
(200)20	(80)8	(70)7	(50)5
(300)30	(120)12	(90)9	(70)7
(400)40	(140)14	(110)11	(90)9
(>500)>50	(160)16	(130)13	(110)11

Otro parámetro con el que podemos evaluar los resultados determinados en las piezas y morteros es a través de la fórmula establecida en el Eurocodigo 6.

Que de acuerdo al tipo de pieza, y a su geometría la ecuación 19 queda definida de la siguiente manera:

$$f_k = 0.40 f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (31)$$

En el cual la resistencia media de las piezas se multiplica por un factor de forma de 1.327 y de acuerdo a la norma la resistencia del mortero no será mayor a 200 kg/cm² ni a 2 veces la resistencia de la pieza por lo que sustituyendo valores se determinó la siguiente ecuación:

$$f_k = 0.40 \cdot 1.327 * 210.5^{0.65} * 171.00^{0.25}$$

$$f_k = 56.27 \text{ kg/cm}^2$$

La resistencia obtenida es cercana a la resistencia promedio obtenida en esta investigación que fue de 55.46 kg/*cm²

5.3.2.2. MURETES DE ARCILLA MULTIPERFORADA.

En los resultados obtenidos para las piezas multiperforadas, se determinó una resistencia promedio a velocidad intermedia, de 66.82 kg/cm² la cual incremento un 4.85% (70.06 kg/cm²) al aumentar un 50% la velocidad de carga y al reducirla un 50% la resistencia disminuyo un 8.34% (Tabla 49).

Tabla 49. Resistencia promedio de muretes con piezas de arcilla multiperforada diferentes velocidades de carga.

Tipo de murete	Velocidad de carga	Resistencia promedio (\bar{f}_m) (kg/cm ²)	Variación de resistencias promedio respecto a la velocidad intermedia	Coefficiente de variación experimental
Tabique de barro Multiperforado (Tabla 20)	Rápida (500 kg/seg)	70.06	4.85%	6.91%
	Moderada (330 kg/seg)	66.82	-	4.26%
	Lenta (165 kg/seg)	61.65	-8.34%	4.27%

Expresando gráficamente (Figura 106) los resultados anteriores se puede observar que se aproximan en buena medida a un modelo lineal, a través del cual se puede decir que la variación de la resistencia sería aproximadamente de 1.25% por cada 10% de incremento o reducción de la velocidad de carga.

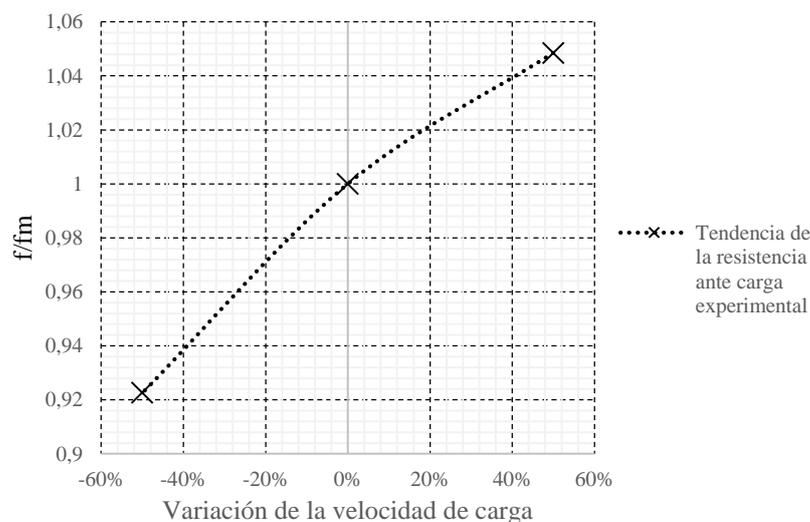


Figura 106. Variación de resistencia al modificar la velocidad de carga en muretes con piezas de arcilla multiperforadas

Por otra parte, respecto al módulo de elasticidad en los muretes ensayados a velocidad rápida se determinó una variación de 3.13% con respecto al módulo determinado a velocidad intermedia y en los especímenes a velocidad lenta una variación del -2.77%, por lo que evidencia la poca variación del módulo de elasticidad al modificar la velocidad de carga.

Tabla 50. Variación del Módulo de Elasticidad promedio de muretes con piezas de arcilla multiperforadas a diferentes velocidades de carga.

Tipo de pieza	Velocidad de carga	Módulo de elasticidad promedio (kg/cm ²)	Variación del módulo de elasticidad
Tabiques de arcilla Multiperforada (Tabla 27)	Rápida (500 kg/seg)	44036	+3.13%
	Moderada (330 kg/seg)	42700	-
	Lenta (165 kg/seg)	41548	-2.77%

Para los muretes de arcilla multiperforada, en los resultados se puede observar que la resistencia individual de las piezas fue mucho mayor a lo resistido por el murete con esto se pudo determinar una relación entre la resistencia de la pieza y el murete de aproximadamente el 30%. y resistió un 38.58% de la capacidad del mortero (Ver Tabla 51).

Tabla 51. Resistencias promedio de muretes de arcilla multiperforada.

Resistencia promedio de los muretes (Tabla 20) ($\overline{f_m}$) (kg/cm ²)	Resistencia promedio de la pieza (Tabla 19) ($\overline{f_p}$) (kg/cm ²)	Resistencia promedio del mortero (Tabla 16) ($\overline{f_j}$) (kg/cm ²)	$\overline{f_m} / \overline{f_p}$ (%) (Promedio)	$\overline{f_m} / \overline{f_j}$ (%) (Promedio)
66.17	220.93	171.48	29.95%	38.58%

El comportamiento observado a través de los diagramas esfuerzo deformación, muestra como a pesar de que las piezas arcilla y el mortero empleado presentaron altos niveles de resistencia, el murete presento niveles menores, de igual manera en términos de deformación, el murete resistió menos al compararse con sus componentes, el decremento se

debe en medida a la interacción y a la aparición de esfuerzos de tensión inducidos por el elemento más deformable (mortero) sobre el más rígido (pieza) y a los efectos inducidos por el espécimen experimental empleado y mencionados en párrafos anteriores. (Ver Figura 107)

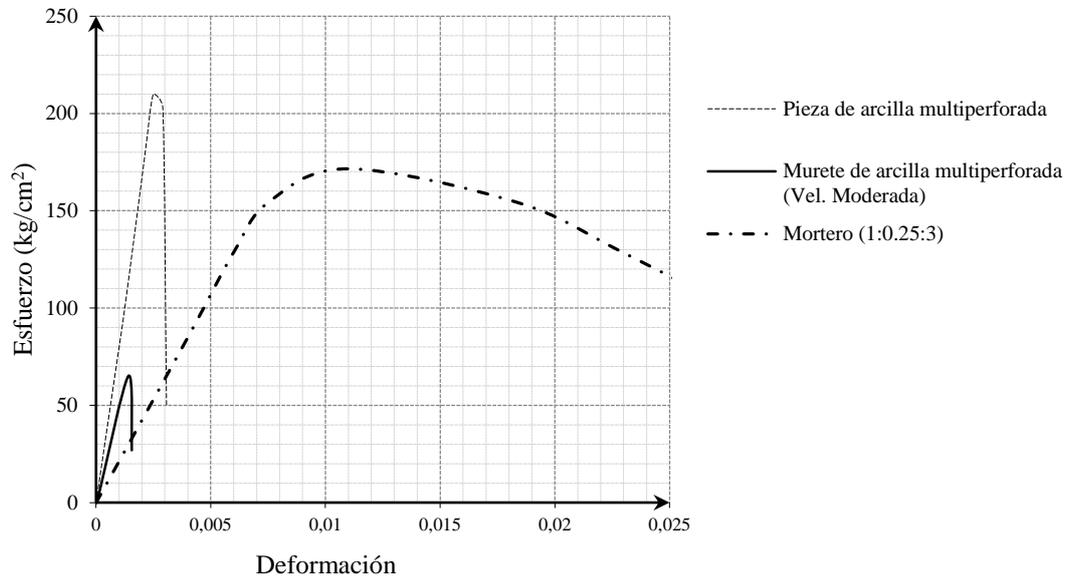


Figura 107. Diagrama esfuerzo deformación obtenido para piezas de barro multiperforado, Mortero Tipo 1 y Murete.

Comparar gráficamente los resultados obtenidos en esta investigación con otras es más complicado por la extensa variedad de piezas. Sin embargo, se pueden comparar las resistencias y los módulos de elasticidad obtenidos en elementos con configuraciones similares a las empleadas en esta investigación, en la Tabla 52 se presentan resistencias similares para piezas elaboradas en el centro del país.

Tabla 52. Diferentes módulos de elasticidad para pilas y muretes.

Material	\bar{f}_p (kg/cm ²)	\bar{f}_j (kg/cm ²)	\bar{f}_m (kg/cm ²)	$\frac{\bar{f}_m}{\bar{f}_p}$ (%)	$\frac{\bar{f}_m}{\bar{f}_j}$ (%)	\bar{E}_m (kg/cm ²)	Promedio $\frac{\bar{E}_m}{\bar{f}_m}$
Tabique de barro multiperforado (Tabla 16,19, 20 y 27)	221	171	67	30.31	39.18	42762	638
Multex 12 (Novaceramic,2013)	225	-	60	26.67	-	39316	655

Se puede apreciar como los módulos de elasticidad obtenidos son similares para los muretes elaborados en esta investigación y los resultados obtenidos en pilas con características geométricas similares, también los muretes de tabique multiperforado fueron muy

similares en resistencia y módulo de elasticidad al de las pilas. La relación entre la resistencia de las piezas y los muretes va desde un 25% hasta un 30%. La resistencia de diseño obtenida para las piezas, fue de alrededor de 150 kg/cm², utilizando este valor para un mortero tipo 1 la resistencia de diseño para la mampostería (f_m^*) debería ser de 60 kg/cm², experimentalmente se obtuvieron valores menores, para la resistencia de diseño en los muretes de barro multiperforado de 66.17 kg/cm², siendo levemente superiores a lo especificado en el reglamento

Tabla 53. Tablas de diseño para determinar f_m^* a partir de la resistencia de las piezas de barro [14].

Resistencia de la pieza (f_p^*) (Kg/cm ²) MPA	Resistencia de la mampostería (f_m^*) (Kg/cm ²) MPA		
	Mortero Tipo I	Mortero Tipo II	Mortero Tipo III
(60)6	(20)2	(20)2	(20)2
(75)7.5	(30)3	(30)3	(25)2.5
(100)10	(40)4	(40)4	(30)3
(150)15	(60)6	(60)6	(40)4
(200)20	(80)8	(70)7	(50)5
(300)30	(120)12	(90)9	(70)7
(400)40	(140)14	(110)11	(90)9
(>500)>50	(160)16	(130)13	(110)11

Otro parámetro con el que podemos evaluar los resultados determinados en las piezas y morteros es a través de la fórmula establecida en el Eurocodigo 6.

Aplicando los criterios de acuerdo al tipo de pieza, y a su geometría queda definida de la siguiente manera:

$$f_k = 0.40 f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (32)$$

En el cual la resistencia media de las piezas se multiplica por un factor de forma de 1.327 y de acuerdo a la norma la resistencia del mortero no será mayor a 200 kg/cm² ni a 2 veces la resistencia de la pieza por lo que sustituyendo valores se determinó la siguiente ecuación:

$$f_k = 0.40 \cdot 1.327 \cdot 220.93^{0.65} \cdot 171.00^{0.25}$$

$$f_k = 58.06 \text{ kg/cm}^2$$

La resistencia obtenida es cercana a la resistencia promedio obtenida en esta investigación que fue de 66.17 kg/cm².

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

*"La vida es y siempre seguirá siendo una ecuación incapaz de resolver,
pero tiene ciertos factores que conocemos"*

NIKOLA TESLA

Al evaluar el comportamiento mecánico de mampostería elaborada con materiales característicos del estado de Nuevo León se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Los procesos mecanizados y la calidad de las materias primas, ha logrado reducir significativamente los coeficientes de variación, esto al compararlos con investigaciones realizadas en los años 70.
- Se puede afirmar que el comportamiento de un muro estará determinado indirectamente por las características mecánicas de los elementos que la conforman y también por la interacción que entre ellos se genere.
- Basados en los resultados obtenidos, los muretes presentaron un comportamiento adecuado y lógico al ser ensayados a compresión, el uso de estos especímenes permitió examinar con claridad los modos de falla y determinar su comportamiento a compresión considerando todos los elementos principales de la mampostería que son las piezas, las juntas verticales y horizontales, estas últimas no existen cuando se usan pilas.
- Las piezas típicas analizadas en esta investigación y elaboradas en el estado de Nuevo León ponen en evidencia los bajos niveles de resistencia que se tienen actualmente, donde los fabricantes han dedicado atención a la uniformidad y costos, descuidado las características mecánicas de las piezas.
- Al aplicar los criterios de diseño de las Nomas Técnicas Complementarias, las resistencias de las piezas de concreto normal y ligero quedaron por debajo de

los mínimos especificados para utilizar las tablas de diseño que se incluyen en ese documento.

- Existe un gran desconocimiento por muchos fabricantes sobre los criterios de diseño en mampostería, ya que comercializan sus productos con una resistencia f_p^* , cuando el valor mostrado es el promedio de las resistencias obtenidas.
- El efecto de la variación en la velocidad de carga, para especímenes de concreto presenta un comportamiento, donde se pudo cuantificar con una buena correlación la resistencia con el incremento o reducción de la velocidad de carga, sin embargo, para los especímenes elaborados a base de arcilla se presentó un comportamiento variable al incrementar o reducir la velocidad de carga sobre los especímenes.
- Para recabar información útil para los modelos matemáticos, es importante estudiar las características mecánicas de la interfase entre la pieza y el mortero, ya que son pocas las evidencias experimentales que se tienen actualmente en México.
- En esta investigación se buscó caracterizar los elementos principales de la mampostería a compresión, en una segunda etapa se deben estudiar las características a cortante y los efectos del refuerzo que se coloca, esto para poder establecer criterios de diseño confiables en mampostería elaborada en Nuevo León.
- Al comparar los resultados obtenidos con los trabajos realizados en el centro del país, se pudo observar que en términos de resistencia, estos parámetros no varían significativamente unos respecto a los otros. Sin embargo, los módulos de elasticidad y la capacidad de deformación presentan grandes diferencias para elementos construidos con piezas y morteros de resistencias similares, esto es debido a las características de los materiales y a la dosificación del mortero.
- El utilizar especímenes con una relación altura-espesor mayor a 7 no permite conocer adecuadamente el modo de falla en muretes, ya que antes de presentarse la falla por compresión, se generan fallas por flexión o por inestabilidad. Esto sucedió en los especímenes de arcilla examinados en esta investigación.

- Las piezas y muretes elaboradas a base de arcilla presentaron una falla frágil al alcanzar su carga máxima, por lo que es importante tomar en cuenta esta característica en el diseño de mampostería y el caso de carga que actuara sobre ella.
- Es necesario realizar ensayos sobre pilas, utilizando configuraciones similares de piezas y morteros a los utilizados en esta investigación. Esto para comparar los resultados obtenidos y además cuantificar la influencia de la junta vertical y de la relación de esbeltez en la resistencia a compresión.

VERIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS PIEZAS.

En este apartado se hace una revisión de las características geométricas de las piezas utilizadas en esta investigación de acuerdo a lo señalado en la norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012 [19], que propone ciertas especificaciones para la determinación de las dimensiones de los bloques, tabiques, y ladrillos utilizados para la construcción, esta se enfoca principalmente en elementos destinados para usarse como piezas estructurales y su finalidad es brindar estructuras seguras ante cualquier solicitud de carga.

De acuerdo a la norma [19], las piezas huecas deben tener un área neta, mayor o igual al 50% y menor al 75% del área bruta. Además de acuerdo a sus dimensiones las paredes interiores y exteriores deben cumplir con los valores indicados en la Tabla 54.

Tabla 54. Espesores de paredes para bloques lisos.

Dimensión modular de bloques (Ancho x alto x largo) (cm)	Dimensión de fabricación de bloques (Ancho x alto x largo) (cm)	Espesor mínimo de paredes exteriores (mm)	Espesor mínimo de paredes interiores (mm)
10 x 20 x 40	10 x 19 x 39	20*	20
12 x 20 x 40	12 x 19 x 39	20*	20
14 x 20 x 40	14 x 19 x 39	25*	25
15 x 20 x 40	15 x 19 x 39	25*	25
20 x 20 x 40	20 x 19 x 39	32	25
25 x 20 x 40	25 x 19 x 39	32	30
30 x 20 x 40	30 x 19 x 39	32	30

* En caso de paredes de bloques expuestas a la intemperie sin recubrimiento el espesor mínimo debe ser de 30 mm en un 90% del área de dicha cara.

Otra consideración es que las dimensiones reales de las piezas no deben diferir $\pm 3\text{mm}$ en cualquier dimensión respecto a las de fabricación, además, la tolerancia de forma permite una desviación máxima de la arista de las piezas respecto a una línea recta perpendicular no mayor al 3%, dicha desviación se calcula como el cociente de la distancia que se desvía la arista media perpendicularmente a la línea de referencia entre la distancia hasta el punto medido. Estos criterios se muestran más a detalle en la Figura 108.

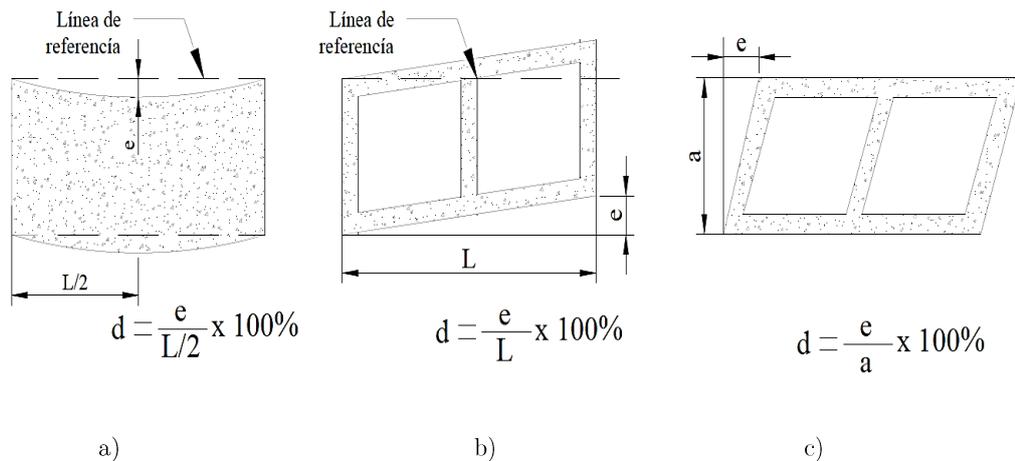


Figura 108. Criterios para determinar la tolerancia de forma

Basados en lo anterior y de acuerdo a la información obtenida al medir las piezas con la metodología indicada en la norma NMX-C-038-ONNCCE-2013 se pudo verificar que las piezas de concreto utilizadas en esta investigación que son de uso común en el estado, cumplen con las especificaciones indicadas, ya que las piezas tienen espesores de caras interiores y exteriores mayores a los 25 mm, así como, un cociente entre el área bruta y el área neta que oscila entre 50% y el 75% (Tabla 55).

Respecto a la tolerancia de forma, en ninguna pieza el valor de desviación fue mayor al 3%, obteniendo para el caso más crítico, una desviación de 1.05% para las piezas de concreto normal y para las piezas de concreto ligero de 1.22%

Tabla 55. Relación entre área neta y área bruta en piezas de concreto.

Tipo de piezas	Altura (cm)	Área Neta (An) (cm ²)	Área Bruta (Ab) (cm ²)	An/Ab (%)
Bloque de concreto normal con dos huecos	19.30	315.11	577.71	54.54%
Bloque ligero de concreto con dos huecos.	19.20	335.45	565.92	59.27%

En esta investigación también se utilizaron muestras de piezas multiperforadas, ya que su uso es común en el estado para construir muros estructurales, al aplicar los criterios de la norma, una pieza multiperforada debe tener una relación entre área neta y área bruta mayor al 50% y menor al 75%, además, deben contar con siete o más perforaciones de dimensiones similares y el espesor de las paredes no debe ser menor a 7 mm , además, cumplir con los criterios de tolerancia de forma mostrados en la Figura 108.

Tabla 56. Relación entre área neta y área bruta en piezas de arcilla.

Tipo de piezas	Altura (cm)	Área Neta (An) (cm ²)	Área Bruta (Ab) (cm ²)	An/Ab (%)
Tabique de arcilla extruido con dos huecos.	19.60	195.18	432.32	45.147%
Tabique de arcilla extruido multiperforado.	19.57	254.20	432.32	58.75%

En los resultados de las mediciones, las piezas de arcilla multiperforada de dos huecos presentan una deficiencia del 5% ya que se obtuvo un cociente entre área neta y área bruta menor al 50%, sin embargo, los espesores de las caras exteriores e interiores son mayores a los 7 mm (Ver Tabla 56).

Respecto a la tolerancia de forma, los valores obtenidos fueron cercanos a las tolerancias mínimas (3%) ya que se determinaron valores aproximados a 2.75%, con un desviación máxima de 5.55 mm al centro de la pieza (Figura 108a).

Las piezas multiperforadas, cumplen con lo indicado ya que el cociente entre área neta y área bruta fue del 58.75% y el espesor de sus caras mayor a los 7 mm especificados por la norma (Tabla 52), además, presentaron valores de tolerancia de forma cercanos al 2% en el caso más crítico (Figura 108a) que son inferiores a la tolerancia máxima.

Es importante señalar que las piezas de barro presentaron variaciones mayores en su geometría al compararlas con las de concreto, ya que al medir piezas incluso del mismo lote se tuvieron diferencias entre ellas hasta de 5 mm, algunas razones de estas variaciones van desde el proceso de elaboración, los métodos de secado o incluso una mala manipulación de la pieza en estado fresco que pudo modificar levemente su geometría.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Gallegos, y H. Ramirez, “*Edificaciones de Mampostería para Vivienda*”, En: *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*, Fundación ICA, México, 2003.
- [2] INEGI, “*Censos de Población y Vivienda*”, México, 2010.
- [3] L. Esteva, “*Comportamiento de muros de mampostería sujetos a carga vertical*”, Serie No.46, Instituto de Ingeniería, UNAM México, 1961.
- [4] R. Meli y G. Reyes, “*Propiedades mecánicas de la mampostería*”, Serie No.288, Instituto de Ingeniería, UNAM México, 1971.
- [5] R. Meli, “*Comportamiento sísmico de muros de mampostería*”, Serie No.352, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1979.
- [6] R. Meli y O. Hernández, “*Propiedades de piezas para mampostería producidas en el Distrito Federal*”, Serie No.297, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1971.
- [7] C. Flores y A. Roger, “*Determinación de la resistencia a tensión fuera del plano de la mampostería de bloques huecos de concreto*”, Tesis, Universidad Autónoma de Yucatán, México, 2008.
- [8] M. González Herrera, “*Comportamiento de la mampostería de bloques huecos de concreto de distintos espesores sujeta a compresión axial*”, Tesis licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, México, 2010.
- [9] V. González, “*Determinación de la resistencia a compresión axial de la mampostería de bloques de concreto usada en Yucatán*”, Tesis licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, México, 2006.

- [10] E. Treviño, S. Alcocer y L. Flores, “*Investigación experimental del comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques de concreto sometidos a cargas laterales cíclicas reversible reforzados con acero grado 42 y 60*”, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, México, 2004.
- [11] J. Martínez y J. Martín-Caro, “*Comportamiento mecánico de la obra de fábrica*”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001.
- [12] A. Tena y E. Miranda, “Comportamiento mecánico de mampostería” En: *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*, Fundación ICA, México, 2003.
- [13] NMX-C-061-0NNCCE-2010, “*Determinación de la resistencia a compresión de cementantes hidráulicos*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2010.
- [14] Gaceta Oficial del Departamento del D. F., “*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*”, México, 2004.
- [15] H. Kaushik, D. Rai and S. Jain, “*Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression*”, Journal of materials in Civil Engineering, 2007.
- [16] A. San Bartolomé, “*Construcciones de albañilería, comportamiento sísmico y diseño estructural*”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, 1994.
- [17] D. Vasconcelos y T. Sánchez, “Materiales y sistemas constructivos para vivienda de mampostería” En: *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*, Fundación ICA, México, 2003.
- [18] C. Barbosa, G. Lourenco and G. Mohamad, “*Tri-axial compression test on bending mortar samples looking al confinement effect analysis*”, North America Masonry Conference, 2007.
- [19] NMX-C-404-0NNCCE-2012, “*Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural: Especificaciones y métodos de ensayo*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2012. p. 4-10.
- [20] NMX-C-036-0NNCCE-2013, “*Resistencia a compresión de bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2013.

- [21] F. Robles, O. Gonzales y R. Meli, “*Apuntes de mecánica de materiales, Primer curso*”, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1984.
- [22] R. Mayes and R. Clough, “*A Literature survey compressive, tensile bond and shear strength of masonry*”, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkley, 1975.
- [23] M. Priestley and D. Elder, “*Seismic behavior of slender concrete masonry shear walls*”, University of Canterbury, 1982.
- [24] C. L., Khoo, “*A failure criterion for brickwork in axial compression*”, Proceedings Third International Brick and Masonry conference, Germany, 1973.
- [25] P. Dayaratnam, “*Brick and Reinforced Brick Structures*”, Oxford and IBH, India, 1987.
- [26] NMX-C-404-ONNCCE-2012, “*Bloques, ladrillos y tabicones para uso estructural: Especificaciones y métodos de ensayo*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2012.
- [27] Glanville and Barnet, “*Mechanical properties of bricks and brickwork*”, Report No. 22, Building Research Station, England, 1934.
- [28] F. Richard, P. Moorman and R. Woodworth, “*Thesis of the Stability of Concrete Masonry Walls*”, University of Illinois, 1958.
- [29] A. Tena y E. Miranda, “Comportamiento mecánico de mampostería” En: *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*, Fundación ICA, México, 2003.
- [30] R. Boyton and L. Gutschick, “*Bond of mortar to masonry units*”, National Lime Association 1964.
- [31] C. L. Khoo and A.W. Hendry, “*A failure criterion for brickwork in axial compression*”, Proceedings Third International Brick and Masonry conference, Germany, 1973.
- [32] H. Gallegos, “*Albañilería estructural*”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, 1989.
- [33] J. Martinez, J. Martin Caro y J. León, “*Comportamiento mecánico de la obra de fábrica*”, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001.

- [34] ACI 530-05, “*Building code requirements for masonry structures*”, Masonry Standards Joint Committee (MSJC), 2005.
- [35] Eurocode 6, “*Design of masonry structures*”, European Committee for Standardization, 2005.
- [36] T. Narendra, “*Design of reinforced masonry structures*”, 2nd Ed., McGraw-Hill, 2010.
- [37] H. Backes, “*On the behavior of masonry under tension in the direction of the bed joints*”, Aachen University of Technology, Germany, 1985.
- [38] NMX-C-464-ONNCCE-2010, “*Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante en muretes*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2010.
- [39] A. W. Page, “*The biaxial compressive strength of brick masonry*”, Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2, 1981.
- [40] P. B. Lourenco, H. Roman and Mohamad, “*Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects*”, Cement & Concrete Composites, 2007.
- [41] G. Sarangapani, R. Venkatarama and K. Jagadish, “*Structural characteristics of bricks, mortar and masonry*”, Journal of Structural Engineering, 2002.
- [41] W. Mann Y M. Betzler, “*Investigation on the effect of different forms of test samples to test the compressive strength of masonry*”, Proc. 10th Int. Brick and Block Masonry Conference, 2004.
- [42] K. Wesche Y A. Ilantzis, “*General recommendations for methods of testing load bearing walls*” in Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials (RILEM), Materials and Structures, 1980.
- [43] J. Noland Y K. Hanada, “*The effect of slenderness and end conditions on the strength of clay-units prisms*”, Proceedings of the first North American Masonry Conference, U.S.A., 1978.
- [44] Eurocode 6, “*Design of masonry structures*” (Part. 3), European Committee for Standardization, 2005.
- [45] ACI 530-99, “*Building code requirements for masonry structures*”, Masonry Standards Joint Committee (MSJC), 1999.

- [46] A. Ohler, “*Zur berechnung der druckfestigkeit von mauerwerk unter berucksichtigung der mehrachsigen spannungszustande in stein und model*”, Bautechnik, 1986.
- [47] H. K. Hilsdorf, “*An investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression*”, Designing Engineering and Constructing with Masonry Products, U.S.A., 1996.
- [48] NMX-C-414-ONNCCE-2010, “*Cementos hidráulicos: Especificaciones y métodos de ensayo*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2010.
- [49] NMX-C-003-ONNCCE-2010, “*Cal hidratada: Especificaciones y métodos de ensayo*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2010.
- [50] NMX-C-111-ONNCCE-2004, “*Agregados para concreto hidráulico: Especificaciones y métodos de prueba*”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México, 2004.
- [51] ASTM-C307, “*Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing*”, American Society for Testing Materials, 2012.
- [52] T.P. Tassios, “*Meccanica delle murature*”, Liguori Editore, Italia, 1988
- [53] G. Sarangapani, R. Venkatarama and K. Jagadish, “*Structural characteristics of bricks, mortar and masonry*”, Journal of Structural Engineering, 2002.
- [54] F. Ruvalcaba, “*Mechanical properties and structural behavior of masonry at elevated temperatures*”, Thesis, Manchester, The University of Manchester, England, 2010.