

**Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas,
Químicas y Naturales. Secretaría de Investigación y Postgrado.
Doctorado en Ciencias Aplicadas**

Doctorando
Ing. Javier Alberto Duarte

Interacción estructural de elementos edilicios en Misiones, Argentina

**Tesis de Doctorado presentada para obtener el título de
“Doctor en Ciencias Aplicadas”**

“Este documento es resultado del financiamiento otorgado por el Estado Nacional, por lo tanto queda sujeto al cumplimiento de la Ley N° 26.899”.

Director
Dr. Oscar Möller
Co-Directora
Dra. Alicia Esther Ares

Posadas, Misiones 2021



Esta obra está licenciado bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Universidad Nacional de Misiones
Facultad de Ciencias Exactas,
Químicas y Naturales



**INTERACCIÓN ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS EDIFICIOS EN MISIONES,
ARGENTINA.**

**Por ing.
Javier Alberto Duarte**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la universidad
Nacional de misiones para optar al grado académico de
DOCTOR EN CIENCIAS APLICADAS

Posadas, República Argentina

2021

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Director

Dr. Oscar Möller

Co-Directora

Dra. Alicia Esther Ares

Tribunal Examinador (Resolución Consejo Directivo N° 375/20)

TORRISI, Gonzalo (UNCUYO)

DEBORTOLI, Mario (UNNE-CONICET)

KOLODZIEJ, Javier (UNaM-CONICET)

Defensa Oral y Pública (Resolución Consejo Directivo N° 0628)

Posadas, 11 de junio de 2021.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

INTERACCIÓN ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS EDILICIOS EN MISIONES, ARGENTINA.

**Por ing.
Javier Alberto Duarte**

Lugar de desarrollo del trabajo de tesis

Laboratorio de Ingeniería Civil
(Creado por Resolución C.D.Nº 040-19 – FIO-UNaM)

Comité Supervisor (Resolución Consejo Directivo Nº 628/21)

TORRISI, Gonzalo (UNCUYO)
MICHALUS, Juan Carlos (UNaM)
KOLODZIEJ, Javier (UNaM-CONICET)

CARRERA DE DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS

Proyecto De Carrera Nº 10933/11
Con reconocimiento de la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación
Universitaria (CONEAU) Nº 344/11.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

A mi estimado amigo Hugo Orlando Reinert.

Agradecimientos

Un trabajo de tesis no solo requiere un considerable tiempo de dedicación y concentración, sino también es posible gracias a la colaboración y soporte de las personas que deciden de común acuerdo acompañar el proceso creativo buscado mediante el aporte de diferentes recursos y colaboraciones.

Agradezco en favor de la educación pública a la facultad de ingeniería de la universidad nacional de misiones, al departamento de ingeniería civil y al laboratorio de Ingeniería Civil, por el espacio brindado para el desarrollo de las tareas experimentales de esta tesis y por el apoyo incondicional para el proceso de obtención de recursos.

Agradezco a la secretaria de políticas universitarias por la gestión de ayudas económicas para realizar esta tesis.

Agradezco a Oscar Möller y Alicia Ares por haberme dirigido en esta tesis de manera dedicada e impecable, sabiendo cuestionar en favor de mejorar los resultados.

Agradezco a mis profesores, en especial a los ingenieros Daniel Bressan, Julio Aníbal Mercanti y Fernando Rubén Detke, quienes son referentes para mí en el quehacer académico.

Deseo agradecer especialmente a mis compañer@s de tareas del departamento de ingeniería Civil, por la inspiración y referencia de sus quehaceres en la vida académica y profesional.

Especial agradecimiento para Hugo Reinert y Néstor Neudeck por su dedicada asistencia y soporte en laboratorio.

Especial agradecimiento a los que en su momento fueron estudiantes adscriptos a esta investigación: Fabio Gatelli, Cinthia Lucila Ferreyra, Matías Boni, Ariana Seufert, Ricardo Miranda, Maximiliano Galván, Gastón López, Alonso Vogel y Mauricio Dos Santos.

Quiero agradecer a los ingenieros Francisco Cruz y Héctor Romero Acuña por ser personas impecables que han sabido guiarme en momentos importantes de mi actividad profesional.

Deseo agradecer a mi madre, Ramona Ignacia Duarte (yiyi), por haberme dado todo lo que necesité siempre y estar a mi lado, por haberme mostrado un camino a seguir y la manera de ser valiente al mantenerme en él.

Agradecer a mis hijos Ignacio y Maitena, por ser mis maestros de vida al mostrarme amor incondicional, y a sus madres que han sido personas excepcionales y ejemplares con ell@s.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Contenido

Resumen.....	11
Summary.....	12
CAPÍTULO 1	14
INTRODUCCIÓN.....	14
Motivación	18
Hipótesis.....	20
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos	21
Justificación del estudio.....	22
Contenido de la presente Tesis.	23
CAPÍTULO 2	27
MARCO TEORICO.....	27
Conceptos generales.....	27
Análisis del contexto regional.....	28
Opiniones de autores referentes.....	35
Análisis numérico. Métodos de solución matricial.	51
Método de Elementos Finitos.....	52
Método de Elementos Finitos Extendido (XFEM).	55
CAPÍTULO 3	71
SISTEMAS CONSTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA REGIÓN.....	71
Conceptos generales.....	71
Situación edilicia de la región. Caracterización georreferenciada de los sistemas constructivos adoptados en la Provincia de Misiones.....	71
Procedimiento para el tratamiento de coordenadas geográficas y su conversión al sistema UTM.....	74
Tópico T1: Caracterización de cerramientos adoptados en Viviendas y otras construcciones edilicias.....	76
Tópico T2: Caracterización de mantenimiento de Viviendas y otras construcciones edilicias.....	82

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Tópico T5: Caracterización de mantenimiento de Viviendas y otras construcciones edilicias.....	86
Combinaciones de Tópicos: Correlación de los tópicos adoptados como principales para el relevamiento de construcciones edilicias.....	90
Tópicos Secundarios: características que inciden en forma indirecta en el comportamiento de sistemas constructivos.	100
Análisis del contexto por metodo FODA.	108
PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: CERÁMICAS Y MORTEROS DE JUNTA.	112
Concepción del programa experimental.....	112
Resistencia a Compresión del material cerámico.	115
Resistencia a Tracción del material cerámico.....	122
Características del mortero de junta.	128
CAPÍTULO 5	131
PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: LADRILLOS CERÁMICOS HUECOS.....	131
Caracterización Geométrica de Mampuestos.....	132
Rigidez mecánica de ladrillos LCH.....	134
Comportamiento Mecánico. Ladrillo LCH aislado.....	137
Ensayo a compresión.....	137
Síntesis, análisis e interpretación de resultados experimentales.....	150
CAPÍTULO 6	152
PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: CELDAS DE MAMPOSTERÍA.....	152
Segunda Etapa. Celda de mampostería con morteros de junta horizontal y vertical.	152
Ensayo a compresión centrada.	155
CAPÍTULO 7	173
PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: PANELES DE MAMPOSTERÍA.....	173
Respuesta de Paneles de Mampostería.	173
Síntesis, análisis e interpretación de resultados experimentales.....	181

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Ensayo tipo CEBR: Carga estática lineal excéntrica sobre base rígida. Carga en el borde de Núcleo central.	181
Ensayo CCBF: a Carga estática lineal centrada sobre base flexible de densidad variable.	197
Índice de Deformación Correlativa. Relación entre la deformación transversal y longitudinal del panel.....	214
CAPÍTULO 8	217
MODELACIÓN NUMÉRICA DE SISTEMAS DE MAMPOSTERÍA.....	217
Pautas generales.....	217
Modelos en probetas de cerámica.....	220
Modelo 4.1: barra lineal isotrópica sometida a compresión.	221
Modelos 4.2: probeta 3D sometida a compresión analizada mediante XFEM.....	223
Modelos 4.3: probeta 3D sometida a Tracción analizada mediante XFEM.....	227
Modelos en probetas de Ladrillos LCH.....	229
Modelo 5.1: Micro modelo Equivalente de elementos Barra (frame).	229
Modelo 5.2: Micro modelo Equivalente de elementos Área (Shell 3D).	233
Modelo 5.3: Macro modelo Equivalente de elemento Área (Shell 2D).....	235
Modelo 5.4: Ladrillo LCH 3D equivalente de material isotrópico experimental analizado por XFEM.	239
Parámetros generales en celdas de Mampostería.....	243
Modelo 6.2: celda 3D equivalente de material ortotrópico experimental analizada por XFEM.	246
Parámetros generales en paneles.....	249
Modelo 7.1: modelo numérico para Ensayo CEBR basado en XFEM.	249
Modelo 7.2: Ensayo CCBF y procedimiento numérico.	252
CAPÍTULO 9	258
APLICACIONES NUMERICAS AL DISEÑO DE MAMPOSTERÍAS.....	258
Parámetros de diseño globales.....	258
Modelos numéricos utilizados.....	259
Prototipo seleccionado para el análisis comparativo.....	259
Modelo Clásico de análisis Estructural	260

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Modelo de elementos Finitos.....	262
Materiales considerados.....	263
Parámetros del Suelo de Fundaciones.....	263
Parámetros del Hormigón Armado.....	265
Acero para hormigón estructural.....	268
Modelos materiales considerados para la mampostería.....	269
Modelo isotrópico lineal elastoplástico experimental.....	269
Modelo ortotrópico lineal elastoplástico experimental.....	271
Análisis y discusión de resultados obtenidos.....	274
Modelo 9.1: Análisis estructural de elementos finitos sin considerar colaboración de mamposterías.....	274
Modelo 9.2: Análisis estructural de Elementos Finitos considerando mamposterías como material isotrópico.....	275
Modelo 9.3: Análisis estructural de Elementos Finitos considerando mamposterías como material ortotrópico.....	276
CAPÍTULO 10.....	291
CONCLUSIONES SOBRE LA INTERACION DE CUERPOS EDILICIOS.....	291
Conclusiones del trabajo de Tesis Doctoral.....	291
Líneas de investigación a futuro.....	296
Comentarios finales.....	297
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN RELACIONADOS CON LA PRESENTE TESIS DOCTORAL.....	299
Se presenta a continuación una tabla Resumen a referencia (datos verificables en SASPI).	299
PUBLICACIONES EN EL MARCO DE LA PRESENTE TESIS.....	299
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	301

Resumen.

La provincia de Misiones aparece en la historia argentina caracterizada por los múltiples litigios territoriales como es el caso de la guerra de la triple alianza y los sesgos vinculados al perfil agrícola industrial que se forjó durante décadas con la consecuente somatización ambiental producto de la depredación de la flora y la fauna a través del avance de los polos productivos industriales que aún hoy mantienen su predominio en el ámbito socioeconómico de esta provincia.

Este aspecto tiene incidencia desde sus inicios sobre la cuestión de la demanda habitacional, la cual fue resuelta por diferentes medios de forma empírica a lo largo de la historia de la provincia. Como consecuencia se observan antecedentes en el ámbito habitacional que resultaron en sistemas constructivos diversos, cuyas características estructurales fueron obviadas en términos cuantitativos, acentuándose esto en el campo de las viviendas sociales.

El campo de estudio de la situación edilicia de las viviendas unifamiliares es extenso, debido a la variedad de ofertas de materiales componentes en los sistemas de albañilería: Ladrillos macizos, bloques cerámicos huecos, bloques de hormigón, como los más comunes. El problema de estos sistemas constructivos, radica en la falta de estudios, a nivel regional, de caracterización del comportamiento mecánico de la mampostería.

Partiendo del hecho de que todo medio continuo en contacto con otros cuerpos, es necesario transmitir esfuerzos, lo que pone de alguna manera en segundo plano la hipótesis de elementos pertenecientes a una "estructura independiente" del sistema constructivo, ya que la configuración de los estados tensionales pasa de incluirse en el diagrama de cuerpo libre a los diafragmas verticales constituidos por los muros de mampostería, y su propio comportamiento puede verse afectado por su interacción con otros materiales como el hormigón estructural, el acero o la madera.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para el diseño estructural de estos edificios bajo las condiciones regionales características. Se enmarca el análisis en un tipo de sistema constructivo de mamposterías de ladrillo cerámico Hueco (LCH). La selección del prototipo se lleva a cabo mediante el método de análisis DAFO (herramienta utilizada para generar un pensamiento estratégico), con el fin de obtener el mejor resultado desde el punto de vista científico y tecnológico. Luego se propone un proceso de modelación numérica y pruebas de laboratorio que permitirán definir modelos aplicables al análisis estructural de los sistemas constructivos regionales, a fin de establecer técnicas de optimización y diseño de este tipo de estructuras.

El trabajo se enfoca en la posibilidad de aportar información sobre los materiales característicos de la zona de la misión que no están caracterizados de forma estructural y que forman parte del mercado de la construcción en la provincia. Permitirá definir nuevos horizontes en términos de optimización para este tipo de materiales. Los temas propuestos para ser analizados proporcionarán información importante sobre la racionalización de los recursos y la optimización de los sistemas de construcción.

Palabras clave: Simulación numérica, Pruebas mecánicas, Albañilería.

Summary.

The province of Misiones appears in Argentinean history characterized by multiple territorial disputes such as the Triple Alliance war and the biases linked to the industrial agricultural profile that was forged over decades with the consequent environmental somatization resulting from the depredation of flora and fauna through the advance of industrial production poles that still maintain their predominance in the socio-economic sphere of this province.

This aspect has had an impact from the beginning on the question of housing demand, which has been resolved by different empirical means throughout the history of the province. As a consequence, there are antecedents in the field of housing which resulted in diverse construction systems, whose structural characteristics were ignored in quantitative terms, with this being accentuated in the field of social housing.

The field of study of the building situation of single-family dwellings is extensive, due to the variety of materials offered in the masonry systems: solid bricks, hollow ceramic blocks, concrete blocks, as the most common. The problem with these construction systems lies in

the lack of studies, at regional level, on the characterization of the mechanical behaviour of masonry.

Starting from the fact that any continuous medium in contact with other bodies, it is necessary to transmit stresses, which somehow puts in second place the hypothesis of elements belonging to an "independent structure" of the construction system, since the configuration of the stress states goes from being included in the free body diagram to the vertical diaphragms constituted by the masonry walls, and its own behaviour can be affected by its interaction with other materials such as structural concrete, steel or wood.

The aim of this work is to develop a methodology for the structural design of these buildings under the characteristic regional conditions. The analysis is framed in a type of hollow ceramic brick (LCH) masonry construction system. The selection of the prototype is carried out using the SWOT analysis method (a tool used to generate strategic thinking), in order to obtain the best result from a scientific and technological point of view. A process of numerical modelling and laboratory tests is then proposed that will allow the definition of models applicable to the structural analysis of regional construction systems, in order to establish optimization and design techniques for this type of structure.

The work focuses on the possibility of providing information on the characteristic materials of the Mission area that are not structurally characterized and that form part of the construction market in the province. It will make it possible to define new horizons in terms of optimization for this type of materials. The topics proposed to be analyzed will provide important information on the rationalization of resources and the optimization of construction systems.

Keywords: Numerical simulation, Mechanical tests, Masonry.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las construcciones edilicias en la provincia de Misiones de los asentamientos guaraníes en épocas de la colonización y evangelización jesuítica se ubicaban alrededor de la plaza y en hileras. Siete a doce unidades o habitaciones, construidas con mezclas de adobe, constituían una "manzana" que organizada como un elemento cerrado estaba rodeado de galerías perimetrales. Levinton [2007] menciona aspectos detallados sobre las construcciones en épocas de los jesuitas.

Entre finales de siglo XIX y principios de siglo XX sobreviene sobre Misiones un considerable contingente de inmigrantes que a través de Brasil llegan a las tierras de Misiones, como se relata en el trabajo de Fogeler [2007]. Este hecho es importante para el desarrollo de la región urbana de la zona central, posicionando a la ciudad de Oberá en segundo orden de importancia a nivel provincial, a pocos años de su fundación en 1928.

En el trabajo presentado por Gallero et Al. [2010] menciona que Misiones mediante la llegada de los inmigrantes atravesó un proceso de transformación de una región que presentaba una economía de tipo extractiva a una productiva en donde los forasteros recién llegados jugaron un papel importante favoreciendo la creación de industrias y nuevas zonas urbanas.

Con el paso del tiempo la tecnología fue mudando las opciones de los materiales componentes de viviendas. La solución técnica se traslada del adobe a los ladrillos cocidos asentados primero sobre morteros de barro y paja, pasando por alternativas que fueron resultado de la industrialización de la madera por parte de los inmigrantes, para luego llegar a los desarrollos actuales de sistemas semis industrializados utilizando ladrillos fabricados en serie y morteros con elementos a base de cemento como medio aglomerante de diferentes características y con diversas prestaciones.

Según Guerrero [2012], los tipos de arquitectura vigentes en la provincia responden a lo siguiente: por un lado la arquitectura de proposición normalmente ligada al ámbito académico (Universidad) y la arquitectura de producción enfocada en resolver las necesidades prácticas y económicas del medio social.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Esto parte de lo establecido por Diez [2008] en términos de asumir las bondades de la primera de las corrientes frente a la respuesta expeditiva de la segunda en un intento de amalgamar ambos criterios como compatibles en un mismo entorno arquitectónico.

En la actualidad los sistemas constructivos de viviendas en la provincia de Misiones aparecen en diferentes contextos según la región y el enfoque tecnológico analizado.

En términos de construcción de edificios y de acuerdo con usos y costumbres su caracterización cualitativa suele ser función de la disponibilidad de recursos materiales, entre los cuales los mampuestos o ladrillos abarcan un campo tecnológico que se extiende desde la producción artesanal en cantidades pequeñas a procesos industrializados y con características diferentes en cuanto a composición.

Con respecto a las tipologías de mampuestos usadas en la provincia de Misiones, estas se pueden zonificar en función a los centros de producción que se encuentran en diferentes puntos de la misma.

Se observa que en la zona sur en donde se utiliza los ladrillos comunes de olería artesanales fabricados en condiciones distantes por momentos de lo que implica un proceso industrializado salvo por la acción en los últimos años por parte de algunos emprendimientos en formato “cooperativa de trabajo” que toman acciones según objetivos específicos de industrialización a mediano plazo con la meta de tecnificar la producción de ladrillos macizos comunes en la provincia.

En lo que respecta a ladrillos macizos prensados en máquina su zona de incidencia es el centro oeste de la provincia constituyendo un conglomerado de empresas radicadas en la región que disponen de procesos de producción en serie y sistemas de gestión de la calidad que están en un nivel aceptable en cuanto a los estándares de la provincia establecidos como adecuados. Los ladrillos cerámicos huecos con tubos orientados en forma horizontal son parte fundamental de esta gama de opciones presentadas en la mencionada zona industrial.

Por último, en lo que respecta a bloques de hormigón simple, el desarrollo productivo de esta opción presenta menor proporción en términos de cantidad de producción periódica por lo cual es un sistema que, aunque puesto en marcha por empresas del medio radicadas en su mayoría en la zona centro este, no disponen de relevancia productiva en el tópico que se analiza en el presente documento.

Respecto al análisis de la situación edilicia en términos de viviendas unifamiliares el mismo es extenso y lo es también la problemática en disponibilidades tanto de tecnología como de recursos, dada la variedad de ofertas en términos de materiales componentes de los sistemas de mamposterías.

Si se revisa el entorno en forma cualitativa, se pueden observar diferentes criterios constructivos a lo largo del tiempo, lo cual sitúa a la mampostería con Ladrillos Cerámicos Huecos en una edad relativamente menor respecto a sistemas de Ladrillos Macizos y en un nivel de popularidad mayor respecto a Bloques de Hormigón, teniendo como particularidad en su fabricación la de ser un producto de manufactura industrializada.

A pesar de esto el ámbito de conocimiento de sus propiedades tanto físicas como mecánicas es escaso, aun teniendo en la provincia un considerable número de emprendimientos comerciales de este tipo y un marco legal favorable a la utilización de productos fabricados en el ámbito local.

La carencia se estima ubicada en las pautas de control de calidad que están sujetas a criterio de las empresas sin que el estado tome el papel que le corresponde al ser el principal consumidor de mampuestos cerámicos huecos en la provincia de Misiones a través de sus programas de viviendas sociales desarrollados por más de 30 años y en diversas operatorias que abarcan viviendas unifamiliares y edificios de departamentos entre otros, la mayoría impulsados por el Instituto Provincial de Desarrollo Habitacional (IProDHa).

En cuanto al marco reglamentario (CIRSOC 501, [2013]) es suficiente y adecuado para realizar pruebas normalizadas de obtención de estas propiedades, dando un marco empírico que muestra un nicho de conocimiento que es factible de desarrollar, conociendo el hecho que todo sistema en funcionamiento es perfectible y adaptable a nuevas situaciones.

Es importante señalar esto puesto que en forma frecuente los procedimientos normalizados suelen contemplar solo parte de las situaciones de campo y el laboratorista se enfrenta a una situación de toma de decisiones que indudablemente busca su base en un respaldo científico, así como argumentos razonables y dotados de la capacidad de generar información fidedigna y representativa del comportamiento de ciertos sistemas constructivos como es el caso de los análisis en el campo de la ingeniería estructural.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

En este punto es importante tener presente los preceptos de la teoría de la inconmensurabilidad propuesta por Kuhn [1962] y Feyerabend [1989] sobre la base de las cuales un sistema mecánico resistente puede incorporar prestaciones estructurales no contempladas a partir de reformular para una determinada situación estructural las condiciones de equilibrio, compatibilidad y constitución de dicho sistema. Por lo tanto el mismo sistema será diferente ante diferentes consideraciones de contorno referentes al tipo de análisis estructural efectuado sobre el mismo.

Respecto de los medios de unión utilizados para fijar mampuestos entre si y construir muros de mampostería (mampuesto significa puesto con la mano) actualmente los mampuestos se colocan adheridos entre sí mediante morteros de diversas características constitutivas como ser valores de modulo elástico y resistencia a tracción.

En experiencias de laboratorio se puede confirmar la ocurrencia de uno o más modos de falla potenciales: la falla por rotura en el dominio del mampuesto, la falla por rotura del mortero de junta vertical u horizontal y por último la falla por desprendimiento de la interface entre mampuesto y mortero.

Los sistemas de mampostería y su diseño estructural tienen su marco reglamentario dado por el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC) el cual comprende dos normas: el primero, CIRSOC 501 [2013] dedicado a las estructuras de mampostería, en el cual se establece el marco de normas para diseño y construcción de estructuras de mampostería compuestas por mampuestos asentados con mortero, de aplicación directa a la zona sísmica 0 (baja sismicidad) del territorio argentino.

El reglamento CIRSOC 501 E [2013] establece el marco normativo para viviendas de mampostería de bajo compromiso estructural. Está basado en la legalidad que da el uso extensivo de construcciones de mampostería preexistentes a los análisis ingenieriles, no reconoce el aporte estructural de armaduras, y considera que los muros tienen centrado en su eje el plano de cargas exteriores.

Con respecto al plano internacional existen antecedentes en toda Latinoamérica de existencia de reglamentos dirigidos a las construcciones de mampostería adaptando el enfoque de análisis a la realidad de cada región a partir de la mayor o menor exposición a las acciones laterales producidas por sismos.

Luego aparecen como referentes internacionales documentos emitidos por TMS (The Masonry Society), el IBC (International Building Code) con trayectoria en el campo de la seguridad reglamentaria que trasciende los 100 años. El enfoque de estos reglamentos sirve como base para el resto del mundo dado que son organizaciones con vasta experiencia en la formulación de normativas para la construcción edilicia.

En trabajos anteriores como en Reinert [2013] se intentó una evaluación cualitativa del comportamiento estructural de elementos acoplados mediante el planteo de un procedimiento de simulación de la respuesta mecánica de una vivienda de dos plantas cuya estructura fue resuelta siguiendo dos metodologías: la primera en el contexto de un análisis estructural elástico de tipo convencional en donde se reprodujeron los pasos convencionales del cálculo de una estructura resistente.

La segunda fue la simulación de una vivienda idéntica a través del método de elementos finitos considerando a los elementos de hormigón armado como elementos de barra mientras que las mamposterías se modelaron como elementos de área de 4 nodos primarios con un criterio de mallado que se buscó fuera compatible con el contexto arquitectónico de la mencionada vivienda, es decir, respetando aberturas y cambios de dirección de los cerramientos.

Motivación

La motivación de la presente Tesis Doctoral se basa en un aporte al conocimiento científico de aplicación respecto de las mamposterías de ladrillos huecos de fabricación regional, pensadas como diafragmas verticales con propiedades mecánicas de interés para la respuesta mecánica del conjunto edilicio.

Por otro lado, esta consideración abre paso a un considerable número de campos y aplicaciones no estudiados en forma cuantitativa y cualitativa con la posibilidad de establecer un cambio de enfoque en la concepción del análisis estructural en la actualidad.

Avanzar en el conocimiento de estos materiales es de considerable importancia dado que es un material frecuentemente utilizado no solo en el ámbito de las viviendas sociales sino también en las obras privadas que comprenden tanto construcciones de viviendas como edificios y establecimientos industriales entre otros.

Extendiendo el enfoque, si se piensa la posibilidad de salvar esa carencia de conocimiento permitirá a corto plazo hacer aportes significativos en términos de lograr prototipos de viviendas sustentables correctamente aprovechadas en lo que a sus materiales componentes corresponde.

El impacto sobre el costo en una vivienda es considerable, dado que por lo general un 30-35% del costo total pertenece al costo de la estructura resistente, además del hecho que de manera convencional, no suele contemplar el aporte estructural de las mamposterías de ladrillos huecos.

El confinamiento de mamposterías permite en forma potencial controlar otras problemáticas como ser estados fisuración que darían paso a la entrada de agentes externos en la vivienda con los consecuentes inconvenientes en términos de estados límites de servicios sobrepasados.

Se puede en efecto aportar información sobre los materiales tradicionalmente característicos de la zona de Misiones que en la actualidad abarcan un considerable porcentaje del mercado de la construcción en la provincia.

Se intenta con esto proponer nuevos horizontes en materia de aprovechamiento para este tipo de materiales a efectos de hacer un aporte desde un enfoque estructural al aprovechamiento de los recursos para la construcción de viviendas de toda índole especificando el contexto de viviendas sociales para los habitantes de recursos más reducidos.

Los tópicos propuestos para ser analizados brindan información importante en cuanto a racionalización de recursos y optimización de sistemas constructivos comenzando a delinear el objetivo general del presente trabajo de tesis doctoral: la comprobación de nuevos métodos para el análisis estructural de cuerpos edilicios orientado al caso de viviendas sociales que incorporen a las mamposterías como elementos de resistencia estructural.

Finalmente, a mediano plazo se pueden establecer líneas futuras que apunten al objetivo de innovar en términos tecnológicos en la forma de concebir, proyectar, diseñar y ejecutar sistemas constructivos de viviendas logrando la meta de acortar la distancia económica entre el usuario y su vivienda propia, esto es, la distancia existente entre poder adquisitivo y costo unitario de la construcción de una vivienda.

Hipótesis

“El comportamiento conjunto entre mamposterías y elementos de hormigón armado permite mejorar el aprovechamiento de los recursos utilizados en la construcción de cuerpos edilicios ampliando el paradigma del análisis estructural.”

Respecto al planteamiento de la hipótesis su estudio permite mejorar la comprensión de un comportamiento global acoplado en forma continua entre elementos de diferentes materiales que guardan similitud en cuanto al tipo de no linealidad mecánica que muestran cómo mejorar el aprovechamiento en el desempeño real de sus materiales componentes para las situaciones de acciones y efectos frecuentes en el campo de la construcción de viviendas de la región de la Provincia de Misiones.

No obstante dicha concepción se puede extender a sistemas edilicios en otras regiones siempre que se esté analizando el caso de mamposterías acopladas a elementos de refuerzo estructural.

Es posible además, desarrollar metodologías de diseño estructural que incluyan el aporte resistente de mamposterías livianas consideradas no estructurales aplicando técnicas de simulación numérica y predicción de resultados, a los efectos de aportar potencial economía a los actuales sistemas constructivos correspondientes a los cuerpos edilicios construidos en la región de la Provincia de Misiones.

Este hecho brinda el beneficio de reducir en forma considerable el costo unitario de la vivienda unifamiliar y/o demostrar que los sistemas actuales de viviendas poseen prestaciones mecánicas no aprovechadas a la fecha, por lo tanto la proyección de crecimiento del hábitat de una familia es factible a un costo accesible debido a la posibilidad estructural no utilizada en las construcciones si se piensan como sistemas acoplados.

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo consiste en proponer una técnica alternativa para el diseño estructural por comportamiento acoplado de cuerpos compuestos por piezas lineales de hormigón armado y paneles de mampostería de ladrillos cerámicos huecos de relación de vacíos mayor a 60%. Dicho objetivo se pretende lograr por combinación de técnicas de

simulación numérica por método de elementos finitos extendidos, y el uso de resultados de ensayos experimentales para la validación de las primeras.

Objetivos específicos

A continuación, se resume de manera ordenada los objetivos específicos propuestos a cumplir para el desarrollo del presente trabajo, a saber:

Caracterizar experimentalmente el comportamiento estructural de elementos de sistemas de mamposterías en cuatro etapas:

La primera etapa corresponde a la caracterización primaria de los materiales que sirven de materia prima para los elementos componentes de los sistemas de mamposterías que son objeto de estudio del presente trabajo de tesis doctoral. Se pretende en esta etapa comprender las propiedades físicas y mecánicas de cada una de estas materias primas. Esta etapa incluye cerámicas de mampuestos y morteros de junta.

En la segunda etapa se establece como consigna la caracterización de los ladrillos cerámicos huecos utilizados en forma convencional en los sistemas de mamposterías. En relación al estudio del mampuesto como elemento aislado sometido a esfuerzos de compresión en tres direcciones principales para poder constatar la existencia de ortotropía en el desempeño de este material para lo cual se pretende medir carga y respuesta en términos de su deformación específica y evaluar su comportamiento frente a efectos de compresión y/o tracción.

Se ha previsto determinar la resistencia a corte por adherencia. Con estos parámetros se puede completar la información necesaria para estudiar los modos de falla global que involucran al mortero de junta: la falla propia del mortero y la falla por adherencia en la interface entre mortero y mampuesto.

En una tercera etapa se tiene previsto experimentar ensayos de compresión sobre una celda de mampostería lo que es una combinación de mampuestos unidos por juntas de mortero convencional. El objeto de esta etapa es estudiar la interacción entre mampuestos y morteros de junta para verificar los posibles modos de falla que puedan ocurrir.

En una cuarta etapa se pretende conformar un panel de mampostería de dimensiones normalizadas para evaluar el comportamiento desde un enfoque macro con el agregado de

refuerzos de hormigón que permitan representar la situación más próxima a la realidad de estas estructuras.

Los ensayos previstos para esta etapa son: ensayo sobre base rígida con aplicación de carga excéntrica sobre el borde del núcleo central y un ensayo a compresión con aplicación de carga centrada sobre base flexible de densidad variable.

Para todas las etapas se prevé analizar desplazamientos transversales aplicando correlación cruzada mediante correlación de imágenes digitales implementando para ello software comercialmente en su versión no privativa o libre a efectos de poder establecer la relación entre deformación transversal y longitudinal en los diferentes tamaños de probetas.

Así también se prevé intentar una aplicación del método de elementos finitos extendido (XFEM) para poder estudiar los patrones de fisuración del material en la estructura interna de los mampuestos.

Analizar modos de falla mediante simulación numérica: de cada etapa se pretende disponer de un modelo numérico representativo de la respuesta estructural obtenida en el ensayo de manera adecuada, siendo el más importante de todos los modelos el correspondiente a la etapa 4 propuesto con el objetivo de ser de bajo costo computacional, manteniendo el nivel de precisión adecuado para el problema a resolver.

Se buscarán técnicas adecuadas para implementar modelos numéricos representativos del comportamiento elástico y plástico del sistema. Se prevé trabajar con conceptos de mecánica de fractura aplicada a materiales frágiles.

Justificación del estudio.

El aporte de esta investigación puede brindar acceso a formas de diseño en términos de la utilización de los recursos disponibles para la construcción de viviendas y de esta manera reducir los costos para un mismo nivel de seguridad.

Se espera que la información recolectada en el presente trabajo de Tesis Doctoral provean elementos para una adecuada caracterización de los sistemas de mampostería livianos, construidos con mayor frecuencia en la Provincia de Misiones.

Es necesario que en un corto plazo se cuente con metodología de diseño para elementos acoplados de mampostería y hormigón estructural considerada en el contexto de procesos de optimización con restricciones de confiabilidad que den acceso a la minimización de la función costo para este tipo de sistemas estructurales propuestos.

Además se pretenden aportar modelos numéricos que contribuyan al estudio del problema a través de la simulación numérica y tomando como apoyo y fuente la base experimental.

Se espera también que el alcance llegue a entidades públicas y privadas, profesionales y a través de estos actores se puedan analizar los indicadores adecuados que reflejen el beneficio adquirido por usuarios involucrados.

La temática analizada permite visualizar alternativas con el propósito de promover el uso de métodos de diseño probabilístico aplicables en el ámbito de la construcción y en el campo de la ingeniería estructural aplicada a la construcción de viviendas sociales y particulares del contexto regional. Luego se puede pensar en regiones del país que necesiten planteos de optimización de recursos de carácter regional.

Una parte importante del presente trabajo radica en la implementación de técnicas de análisis numérico que posibiliten estudiar cualquier sistema constructivo de tipo estructural para intervenir en su optimización de manera eficiente.

Contenido de la presente Tesis.

En el presente trabajo se desarrollan los elementos necesarios para la concreción de los objetivos mencionados tanto generales como específicos que se presentan en nueve capítulos.

El primero trata de establecer una introducción al tema de estudio una reseña de la problemática de los sistemas constructivos regionales, la importancia y justificación que motivan el presente trabajo los objetivos perseguidos y un resumen de los capítulos restantes en el cual se mencionan rasgos generales de cada uno de estos.

El segundo capítulo compila una síntesis del estado del arte sobre la temática desarrollada en el presente trabajo de tesis doctoral donde se establecen reseñas de los aportes más significativos en orden cronológico hasta la actualidad.

El tercer capítulo inicia con una revisión geo referenciada de sistemas constructivos de viviendas de mamposterías en sus diferentes formas y usos destacando las técnicas de construcción utilizadas desde las más antiguas hasta las más recientes.

Dicho relevamiento incluye tópicos referentes al estado de conservación de las viviendas, así como a los elementos que potencialmente puedan aportar a la rigidez global de la edificación vista como sistema estructural, como así también aquellos que indiquen un orden de proporción de cantidad de mampostería versus cantidad de refuerzos de hormigón.

En este contexto se hace mención a: tipo de mampuesto utilizado, si presenta patologías, tipo de revestimiento en paredes, tipo de estructura resistente, tipo de cubierta que tiene la vivienda.

En este capítulo se revisa estado del arte en análisis de sistemas estructurales de mamposterías sobre una recopilación de artículos para casos más frecuentes en materia de simulación numérica (desde la recuperación de patrimonio histórico hasta nuevas técnicas adaptables a los sistemas constructivos vigentes).

Durante el Cuarto capítulo se efectúa un resumen de los resultados experimentales obtenidos para diferentes tipos de probetas de cerámica en diferentes situaciones, pasando de ejecutar ensayos de compresión a ensayos de resistencia a tracción.

Para el cuerpo de ensayos de cerámicas, se cuenta con datos geométricos, propiedades físicas y mecánicas, y un trabajo de correlación de estas variables con los modos falla más comunes en estos sistemas.

El quinto capítulo corresponde a la etapa experimental correspondiente a los ladrillos ensayados en forma aislada a esfuerzos de compresión en el cual se analizaron resistencia, módulo elástico longitudinal y transversal así como condiciones de compatibilidad de deformaciones, propiedades físicas del ladrillo LCH y valores de resistencia a tracción por Flexión.

El sexto capítulo corresponde a la etapa experimental correspondiente a celdas de mampostería LCH ensayadas a esfuerzos de compresión centrada en el cual se analizaron resistencia, módulo elástico longitudinal y condiciones de compatibilidad de deformaciones.

El séptimo capítulo corresponde a la etapa experimental de paneles de mampostería ensayados en dos situaciones: Ensayo de Carga Excéntrica sobre Base Rígida (CEBR) y ensayo de Carga Centrada sobre Base flexible (CCBF). Se analizan propiedades geométricas y mecánicas concentrando esfuerzos en observar y concluir lo ocurrido en el sistema de paredes internas y externas de los mampuestos cerámicos huecos tratando de obtener datos de interés que puedan explicar el fenómeno y que permitan definir algunas abstracciones matemáticas de aplicación directa.

Se obtienen al final pautas de toma de decisión para elaborar técnicas de simulación aplicadas al caso regional.

El octavo capítulo presenta una reseña de modelos numéricos implementados para obtener rutinas de simulación, que permitan evaluar los patrones de comportamiento que permiten definir a posterior cuáles serán los posibles estados límites últimos en alguno de sus modos de falla usuales.

Se realiza la validación de resultados analíticos y experimentales, comparando resultados obtenidos a través del método de diseño planteado en función del mecanismo resistente propuesto, y rutinas de ensayos de los elementos diseñados.

Se presentan gráficas de verificación de estos resultados en términos de diagramas que relacionan las cargas de diseño con las deformaciones estimadas, frente al mismo sistema constatado en formato experimental.

Luego en el capítulo nueve se proponen y verifican aplicaciones destinadas a viviendas sociales de la región, a efectos de poder constatar la robustez del método de diseño propuesto para estudiar el comportamiento de las viviendas de mamposterías ejecutadas con ladrillos cerámicos huecos.

Los resultados mostrados en el presente capítulo son insumos para poder generar las superficies de respuesta a través de las combinaciones de variables principales y secundarias elegidas en función de los resultados obtenidos en el Laboratorio de Estructuras de La facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones, ubicada en la ciudad de Oberá en la zona centro de la Provincia de Misiones.

En el capítulo diez Se explicitan los aportes originales de la tesis y se presentan las conclusiones del presente trabajo, dando pruebas que confirman las hipótesis de

transferencia de cargas a través de las paredes, afirmando los métodos de diseños propuestos y desarrollados.

Asimismo, se presentan algunas propuestas para futuras líneas de investigación, con el objeto de estudiar en detalle cuestiones como ser: la incidencia del armado de juntas en el comportamiento de las mamposterías, su comportamiento cuando las juntas son elaboradas con materiales alternativos, y se detallan las referencias utilizadas en la elaboración del estado del arte.

Se dedica un segmento de este capítulo a presentar los agradecimientos pertinentes, a las personas y equipos de trabajo que sostuvieron apoyo para la realización de la presente tesis.

Luego se presentan las referencias bibliográficas utilizadas para elaborar el marco de referencia de la presente tesis. Los anexos posteriores contienen herramientas computacionales y metodologías implementadas para llevar a cabo los procesos de modelación y simulación implementados en el presente trabajo.

El presente trabajo de tesis doctoral fue realizado con fuerte aporte del laboratorio de Ingeniería Civil (LIC) dependiente del departamento de Ingeniería Civil y de la secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Misiones.

Los instrumentos de medición y equipos para llevar a cabo los ensayos experimentales son normalizados y verificados atendiendo a las normas IRAM y diferentes sistemas de calidad implementados en el mencionado laboratorio.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO.

Conceptos generales.

El análisis estructural aplicado a las construcciones civiles se ha orientado por considerable tiempo a la concepción de sistemas independientes sin considerar el aporte por contacto e interacción de otros elementos que son parte del cuerpo edilicio como es el caso de los cerramientos de mampostería u otros materiales. En ese contexto no se suele considerar a las mamposterías como elementos estructurales que aporten resistencia en un cuerpo edilicio.

El enfoque de la mecánica del medio continuo y los avances en el campo del análisis computacional ubican a los diafragmas verticales y horizontales en situación favorable para ser incluidos en los actuales procesos de diseño estructural que a partir de las plataformas multi-físicas de simulación numérica brindan una opción para evaluar el comportamiento mecánico de estos sistemas.

Esto es importante al establecer pautas de desempeño en sistemas estructurales. El uso de herramientas computacionales permite la consideración de no linealidad física y/o geométrica en dichos materiales para la mayoría de los casos.

Cabe destacar además la importancia que tiene en el campo de los materiales compuestos por mampuestos y mortero de adhesión (morteros de junta) el análisis en el campo plástico y cómo se desarrolla el camino hacia la instancia de falla o rotura de los mismos una vez que se alcanza algunos de los modos de falla posibles.

Dicho de otra forma, esto permite analizar la capacidad de acumular energía interna de deformación en los sistemas de mamposterías habilitando prestaciones estructurales no consideradas en el análisis estructural convencional.

En el ámbito de la provincia de Misiones la demanda habitacional es contenida mediante programas sociales que permiten a las familias acceder a la vivienda propia. En obras pertenecientes a programas sociales de desarrollo habitacional aparece la mampostería de

Ladrillos Cerámicos Huecos como alternativa razonable en cuanto a costos porque es un producto fabricado en la provincia y en un rango de alternativas diverso.

Cabe señalar que las tipologías edilicias son variables de acuerdo a la ubicación geográfica de los emplazamientos habitacionales, y al ser esto un tema bastante extenso se retoma su desarrollo en el próximo capítulo para tomar la concepción edilicia desde un enfoque cultural como punto de partida para el presente trabajo.

Por lo pronto se analizan resultados estadísticos obtenidos de publicaciones de censos nacionales de 2001 y 2010 y en informes de entidades autárquicas relacionadas al ámbito de la construcción de edificios. A continuación se presentan algunos comentarios al respecto de estos datos oficiales.

Análisis del contexto regional.

Durante el año 2009 la República Argentina según datos estimados de la Organización de Naciones Unidas, posee un 20 % de habitantes que viven en condiciones precarias. En el mismo informe se señalan: Haití con el 70% en la situación más desfavorable y Chile con el 9% en la mejor situación. En relación al censo 2010, esto representa una cantidad en el orden de los 8 millones de personas viviendo en situación de precariedad en la Argentina a esa fecha.

En términos de clasificación de cuerpos edilicios regionales, según datos de censos nacionales realizados entre [INDEC, 2001] [INDEC, 2011], se puede observar que en el primer segmento del total de viviendas relevadas en la misma un 54% corresponde a edificaciones de mampostería; en segundo lugar aparecen las viviendas de madera con un 45% del total; el porcentaje restante lo constituyen viviendas edificadas con tecnologías alternativas (chapa, adobe, materiales reciclados, etc.).

En el segmento correspondiente al censo 2011 la proporción correspondiente a viviendas de mampostería sufre un incremento hasta el 63%, mientras que las viviendas de madera disminuyen su proporción al 37%. Al respecto se puede observar en el informe de la Cámara Argentina de la construcción [2015] datos correspondientes a cómo sucedieron variaciones en términos del déficit habitacional poniendo dos líneas análisis: déficit por calidad habitacional recuperable e irrecuperable y déficit habitacional considerando la cohabitación de personas en una misma vivienda. Ambos parámetros sufrieron incrementos desde 2001

a 2010 y luego en un relevamiento EPH (encuesta permanente habitacional) se registran nuevos incrementos en mediciones realizadas a 2014.

A pesar de estos datos, no se cuenta con registros estadísticos de la composición estructural de estas viviendas, lo cual establece que existe escasa información en el proceso de caracterización estructural propuesto.

De todas formas, es posible establecer el estado del arte en términos de caracterización de las estructuras utilizadas en viviendas regionales de la provincia de Misiones apelando a un relevamiento geo-referenciado de sistemas constructivos clasificado según un conjunto de tópicos que comprende: tipo de mampostería, tipo de revestimiento, tipo de aberturas, tipos de techo, tipo de estructura resistente, cantidad de niveles edificados.

Dentro de las cuestiones analizadas en el presente trabajo, resaltan los siguientes puntos: carencia de información en el área estructural, insuficiencia de metodologías de diseño para el caso de viviendas regionales que consideren el trabajo interactivo entre refuerzos de hormigón y diafragmas de mamposterías como la insuficiencia de estudios formales en torno a materiales regionales además de la caracterización de relaciones constitutivas de los mampuestos más utilizados dentro de la provincia de Misiones y la caracterización de las propiedades mecánicas correspondientes a los hormigones elaborados en la provincia por los diferentes métodos disponibles.

Además es importante la insuficiencia de cobertura de la demanda edilicia en materia de vivienda en la región, esto según los registros del censo 2011, existe una demanda de hogares no cubiertos con vivienda del orden del 5%, por otro lado el 22,67% de la población censada en 2010 no posee vivienda propia; dicho porcentaje en 2001 figura del orden del 5%.

En cuanto a la calidad de vivienda de los habitantes de la provincia, en 2001 aparece un 42% de habitantes que viven en viviendas con piso de tierra o similar y sin instalación sanitaria de agua; este índice aparece en orden del 35% para 2010.

Esto deduce que un considerable sector de la población misionera vive en condiciones precarias. Al hablar de amenazas se detectan: Aumento sistemático del costo de los materiales por efecto de la inflación a nivel nacional y mundial, así como elevados índices de referencia que no están constatados en forma racional, elevado costo de los fletes para el

traslado de materiales externos a la región, Estancamiento de la industria de materiales de la construcción en Misiones, etc.

En términos de fortalezas se pueden destacar el gran número de instituciones de educación técnica, con infraestructura adaptable al planteo de actividades que permitan desarrollar un campo de conocimiento en este tipo de problemática así como la disponibilidad de recursos regionales potencialmente estructurales (basalto, suelo con alto contenido de hierro, arcillas grises, entre otros). Así también existe disponibilidad física para la realización de ensayos estructurales en la provincia.

Por otro lado la legislación provincial promueve la comercialización de materiales de la región a través de la ley de compra misionero. De acuerdo a un marco de oportunidades, se puede establecer lo siguiente: Posibilidad de generar estrategias de optimización estructural en construcciones de viviendas regionales, desarrollo de nuevos materiales de origen local que permitan un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, caracterización formal de los materiales regionales existentes con posibilidad de aportar desde las aplicaciones que surgen del presente trabajo a la matriz de crecimiento económico de la región.

Estado del Arte: Representación del comportamiento mecánico en sistemas de mamposterías.

Diversos enfoques se propusieron durante las últimas décadas a efectos de representar el comportamiento estructural de mamposterías haciendo hincapié en diferentes criterios, ya sea utilizando aplicaciones de la teoría de mezclas o mediante la propuesta de secciones homogeneizadas.

En trabajos anteriores como el de Reinert [2013] se evaluó el comportamiento estructural de elementos acoplados mediante el planteo de un procedimiento de simulación de la respuesta mecánica de una vivienda de dos plantas cuya estructura fue resuelta siguiendo dos metodologías: la primera en el contexto de un análisis estructural elástico de tipo convencional en donde se reprodujeron los pasos convencionales del cálculo de una estructura resistente

Estas aplicaciones surgieron al considerar a la mampostería como un material compuesto de elementos cerámicos unidos por morteros de junta para los cuales se definieron modos de falla principales: Fallas a través del mampuesto, fallas a través del mortero y fallas en la interface entre ambos.

De los tres modos mencionados el más sencillo de alcanzar aparenta ser el último dada la baja resistencia a las tensiones tangenciales que presta dicha interface dados que los valores requeridos por sistemas de cargas externas suele ser elevado [Reinert, 2013].

Para llevar a cabo el análisis de estos modos de falla es necesario utilizar rutinas normalizadas para medir parámetros relacionados a dichos modos de falla: Resistencia a Compresión y Tracción de cerámicas y mampuestos, Tensión básica de Adherencia de la interface mortero-mampuesto. La necesidad de obtener estos parámetros da origen a la ejecución de ensayos mecánicos en laboratorio. Con el avance de las técnicas computacionales se puede mejorar la base de datos experimental disponible.

En el presente capítulo se revisaron publicaciones de autores reconocidos en materia de análisis del comportamiento de mamposterías. Se evaluaron criterios y conceptos aplicados en la formulación de teorías que intentaron explicar el comportamiento de estos sistemas.

Se ha registrado una síntesis de cada trabajo en función al material de base necesario para la realización de la presente tesis: modelos adoptados, modos de falla considerados, experiencias realizadas para la validación entre resultados numéricos y experimentales, errores asumidos en cada caso. Cabe aclarar que los sistemas de mamposterías analizados en el presente capítulo corresponden al caso de mampostería de ladrillos macizos.

El presente trabajo de tesis doctoral trata sobre el análisis de comportamiento de los sistemas ejecutados con ladrillos cerámicos huecos de la región de la Provincia de Misiones acoplados o conectados con elementos resistentes de hormigón armado como pueden ser encadenados tanto verticales como horizontales en viviendas usualmente de tipo social.

En el marco teórico de referencia se revisaron los contenidos que forman parte del proceso de análisis de estado del arte para la presente tesis doctoral. En términos generales se revisaron los diferentes criterios de análisis para la problemática del comportamiento de sistemas de mampostería de características portantes.

La siguiente base de referencias bibliográficas tuvo su origen en el procedimiento descrito a continuación que está conectado a la necesidad de establecer los tipos de abstracción matemática probados hasta la actualidad en materia de simulación de sistemas estructurales.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

En principio se establecieron cadenas de palabras adoptadas en función del tema analizado y su transposición a un método numérico para la cuantificación de su comportamiento mecánico.

El primer paso se enfoca en formular una serie de preguntas para iniciar la idea generadora de la revisión. Dada la amplitud del tema de investigación y la necesidad de orientar la búsqueda de criterios hacia el problema de la modelación.

La primera inquietud se basa en aprender a modelar las mamposterías en el campo de la ingeniería estructural y obtener una línea de trazabilidad en la actualización de estas técnicas a lo largo del tiempo, además de poder interpretar en estos modelos la consideración o no de la no linealidad física en la formulación constitutiva de los materiales componentes del sistema estructural.

Por otra parte la no linealidad geométrica se presenta en varios aspectos (estructura alveolar de mampuestos, juntas de mortero, invasión del hormigón de refuerzo vertical en los "huecos" de los ladrillos LCH). A su vez el comportamiento de la interfase como se menciona más adelante forma parte de los principales modos de falla detectados en este tipo de sistemas.

Para buscar información se plantea el siguiente algoritmo lógico: obtener referencias bibliográficas aplicando criterios definidos (búsqueda sistemática), obtener datos comparables, analizar el contexto de estos datos, proponer los resultados significativos y sobre la base de su interpretación emitir conclusiones y juicios de valor para mejorar y actualizar la revisión.

Sobre estos puntos se han elegido palabras clave representativas del problema a analizar. La Tabla 2.1 presenta el conjunto de cadenas de palabras clave elegidas para la primera iteración de búsqueda sistemática de referencia bibliográfica. El protocolo de búsqueda se aplicó en tres idiomas: español, inglés y portugués, a efectos de ampliar el espectro de búsqueda y agregar componentes de carácter regionales si las hubiere.

	1	2	3
A	Modelos	Mamposterías	Ladrillo macizo
B	Caracterización	Mamposterías	Ladrillo Hueco
C	Comportamiento	Mamposterías	Ladrillo Hueco

Tabla 2.1: Cadenas de palabras clave para búsqueda de referencia bibliográfica.

En el marco teórico de referencia se revisaron contenidos que forman parte del estado del arte, en el tema de interés del área citada. Se utilizaron bases de datos científicas con índices de impacto adecuados y se redujo la búsqueda a las combinaciones de palabras clave traducidas al idioma inglés por obtener mayor cantidad de resultados disponibles así como mayor índice de impacto en el campo de estudio.

La Tabla 2.2 muestra un cuadro de síntesis de los autores que se consideraron relevantes para el desarrollo de la presente Tesis Doctoral, además de sus aportes en el campo de estudio de referencia.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Autores más relevantes.		
autor	Año	Aporte
Page	[1978]	Establece roles que implican resistencia y ductilidad asignados al mampuesto y al mortero de junta respectivamente.
Crisafulli	[1999]	propone para mamposterías confinadas con barras de hormigón armado, sometida a esfuerzos laterales, un modelo de bielas que consiste en un macro elemento de 4 nodos, que representa numéricamente fallas por compresión y por corte, sin incluir las fallas por estado tensionales planos.
Belytschko	[1999]	Junto a Black Proponen técnicas de minimización de malla MEF para analizar el problema de los patrones de fisuración en modelos numéricos de comportamiento mecánicos aplicados a distintos materiales.
Möes	[2000]	Junto a Black y Dolbow presentaron una forma de independizar el problema del tamaño de la malla acudiendo al enriquecimiento de las funciones de forma.
Oller	[2014]	Señala que los métodos más utilizados son aquéllos que preconizan las diferentes normativas simplificadas que rigen en cada país, ya que entre los calculistas existe un desconocimiento generalizado del comportamiento estructural de la mampostería que impide diseñar este tipo de estructuras de forma óptima.

Tabla 2.2: Cadenas de palabras clave para búsqueda de referencia bibliográfica.

Del protocolo de búsqueda se destacan desarrollos que enmarcan el tratamiento numérico de los modelos representativos de estructuras de mampostería, a saber: en el año 1997 Anthoine A., publica un trabajo referente a la homogeneización de mamposterías considerando que hasta este momento no se consideraban cuestiones como la incidencia del comportamiento microscópico auspiciado por la interacción entre mortero y mampuestos, así también el espesor de la pared no se considera hasta entonces como variable incidente en el problema.

Luego plantea una comparativa entre tres modelos: uno que considera a la mampostería como un problema de estado plano, otro modelo de estado plano generalizado en donde se tiene en cuenta el espesor de la pared, y un modelo tridimensional completo de análisis exacto del problema.

Para los modelos planos las hipótesis planteadas fueron: no considerar fuerzas de masa, tensiones proporcionales a las deformaciones, considerar una distribución periódica del campo de tensiones a lo largo del área del elemento.

Dentro de las conclusiones se establecen fronteras en términos de eficiencia para cada modelo estudiado, y se resalta la versatilidad del modelo plano generalizado como el de

mejor relación costo – utilidad mientras que aquel modelo que no considera el espesor de la pared presenta resultados dispares en el campo no lineal, hecho que no ocurre en el modelo plano generalizado.

A la vez recomienda el modelo tridimensional para cuando se quiera estudiar casos más complejos, como ser paredes de ladrillos huecos, paredes compuestas o juntas de mortero complejas.

Opiniones de autores referentes.

- Page et al., [1978], desarrolla resultados en términos de relaciones constitutivas para tensiones normales y tensiones tangenciales, llegando a establecer a través de sus gráficas los roles que implican resistencia y ductilidad pueden ser asignados al mampuesto y al mortero de junta respectivamente.

Esto hace pensar que debe existir un rango operacional mínimo y máximo para lograr condiciones óptimas de comportamiento. Luego si se observan las gráficas de comportamiento a cortante se puede inferir que el cambio en el comportamiento puede deberse al protagonismo que toma la interface entre ladrillo y mortero en la resistencia y deformabilidad.

Pensando en una escala microscópica si hablamos de ductilidad en el mortero podemos atribuir esto al considerable volumen de vacíos que puede poseer este material con lo cual dicha “ductilidad” viene de la mano de poder acomodar los granos en los vacíos que pueda tener la mezcla descartando la resistencia que pueda aportar la pasta aglomerante.

Este hecho se presume inherente tanto al tipo de aglomerante utilizado como al contenido porcentual que posea de este el mortero utilizado para efectuar las juntas teniendo en cuenta que las alternativas en ese caso son diversas.

- Pandé et. Al [1989], propone la equivalencia de un módulo elástico para el caso de mampostería a partir de trabajos desarrollados para muros de piedra, partiendo de constantes que aproximan el material real a un material equivalente que puede ser caracterizado en forma numérica. En su trabajo muestra graficas de resultantes de algunos procesos numéricos analizados para diferentes cocientes entre módulos de elasticidad de los materiales componentes en función del espesor del mortero de junta.

En las gráficas se puede observar una reducción de los módulos de elasticidad en las direcciones principales a medida que aumenta el espesor del mortero. En este contexto se refuerza lo dicho en párrafos anteriores en que parece ser un parámetro a tener en cuenta la relación de vacíos del mortero de junta, dado que puede afectar a través de fallas locales la forma de comportamiento del conjunto. A la vez se debe pensar en un espacio tridimensional para la correcta medida de las posibilidades que puedan tener estos sistemas de mamposterías.

- Luccioni et al. [1996], propone una herramienta de simulación de comportamiento en mamposterías sometidas a estados tensionales paralelos y perpendiculares a las juntas horizontales planteando dos espacios tensoriales: un espacio anisótropo real y un espacio isótropo ficticio involucrado en un procedimiento numérico por elementos finitos. La relación entre ambos espacios la define un tensor de transformación que considera el endurecimiento plástico del material, un criterio de daño plástico acoplado, y el umbral de comportamiento elástico.

Este modelo permite analizar el comportamiento de paneles de mampostería maciza a partir del conocimiento de los parámetros mencionados sumados a los módulos de elasticidad y módulos de poisson en las direcciones principales del medio considerado anisótropo.

Por otro lado, establece condiciones a cumplir para poder estudiar los parámetros mecánicos de la mampostería a partir de lo que define como una “celda” o porción de muro estableciendo la proporción geométrica, la baja dispersión en las características mecánicas de los materiales componentes y el gradiente macroscópico de tensiones.

En estos términos se asume posible evaluar un análisis global a partir de resultados obtenidos en el análisis de comportamiento de una celda. El planteo radica en analizar un dominio periódico acotado por el tamaño de la celda que replica en el universo (esto es el panel de mampostería) sus propiedades principales.

Dicho comportamiento analizado desde una porción del elemento global debe verificarse en el caso de los ladrillos cerámicos huecos a efectos de establecer cuáles son las pautas de funcionamiento a meso-escala para las paredes de mamposterías efectuadas con este tipo de ladrillo.

Por otra parte a la hora de considerar las propiedades del material en el caso de ladrillos huecos debe tenerse en cuenta la escala de análisis. Para el caso de usar micro modelos

compuestos de elementos sólidos puede considerarse isotropía tanto en la cerámica de los mampuestos como en el mortero de unión.

Luego a partir de modelos equivalentes se puede pensar en considerar para elementos sólidos un material configurado como ortótropo dado que es la diferencia en el comportamiento o respuesta mecánica de los mampuestos depende de la orientación de sus tubos, por lo tanto se puede asumir ortotropía para un material equivalente a efectos de reducir el costo computacional en modelos globales de mampostería.

- Crisafulli [1997], propone para mamposterías confinadas con barras de hormigón armado (marcos rellenos o “infilled frames” en idioma inglés), sometida a esfuerzos laterales, un modelo de bielas que consiste en un macro elemento de 4 nodos, que representa numéricamente fallas por compresión y por corte, sin incluir las fallas por estado tensionales planos.

Define a la predicción de la respuesta no lineal del comportamiento de estos elementos como una tarea difícil de lograr dado que requiere una calibración fina del modelo.

Lo mencionado se logra luego de varios ajustes de parámetros característicos, a saber: módulos de elasticidad de la mampostería para los diferentes campos de comportamiento, distancia considerada entre bielas, Rigidez axial de bielas y resortes considerados, entre otros factores de carácter adimensional.

La teoría que da contexto a los modelos de bielas representativos del comportamiento mecánico de sistemas estructurales surge bajo el concepto de obtener a través de la elaboración de un sistema de puntales y tensores los esfuerzos característicos aproximados que actúan sobre el cuerpo en cuestión.

Este método es difundido específicamente en sistemas de hormigón armado en donde los umbrales de resistencia a tracción son superiores. Si se hace la extrapolación al campo de los sistemas de mamposterías se puede asumir que la interfase adherente entre morteros y mampuestos juega un papel fundamental para definir el comportamiento mecánico de estos sistemas si se piensa en la misma como potencial fuente de fallas por deslizamiento.

Se caracterizan los siguientes sub-indicadores particulares: calidad del estudio geotécnico realizado; valoración estructural con métodos modernos y cumplimiento de factores de seguridad establecidos, calidad del cálculo estructural, su fiabilidad y racionalidad, entre los

aspectos más significativos, también se incluye la valoración del comportamiento estructural de los materiales de construcción empleados y la calidad general del diseño estructural realizado para la vivienda.

- Bustos et al [2000], realiza ensayos en escala cercana a la natural de mamposterías reforzadas en una mesa vibratoria. En estos se configuran factores de escala de parámetros específicos del prototipo ensayado sobre la base de criterios de semejanza, concluyendo que el comportamiento acoplado de los elementos de hormigón armado y los diafragmas de mamposterías en este tipo de sollicitación tienen un carácter marcadamente no lineal a un orden de magnitud de carga relativamente bajo en sus ensayos, a la vez que a través de vinculaciones entre elementos mediante armaduras localizadas, se logra inducir fallas por flexión en estos compuestos, con la consiguiente obtención de condiciones mínimas de ductilidad, cuestión imposible de lograr sin la presencia de refuerzos de acero.

También expresa a la flexión y el corte como los modos de falla más importantes en términos de mamposterías sollicitadas bajo acciones dinámicas estableciendo la predominancia en base al número de grietas ocasionadas por cada esfuerzo. Establece como conclusión la factibilidad de uso de los sistemas de mamposterías encadenados como elementos que aportan ductilidad al sistema estructural en su conjunto.

- Cecchi A., [2001] presenta un desarrollo referente a homogeneización multi-paramétrica de mamposterías en términos de su modelación como elemento estructural.

Entre sus consideraciones enmarca al mortero y al ladrillo en el campo elástico lineal utilizando técnicas de homogeneización en elementos que abarcan una secuencia periódica de ladrillos y juntas de morteros replicable en forma adyacente tal como propusieran otros autores de esta época como el caso de Sergio Oller.

A esta secuencia periódica se aplican ecuaciones multi-paramétricas de homogeneización para la definición de un modelo que intenta ser representativo del comportamiento global de la mampostería.

- Dimiotys C. et Al [2002], escribe sobre el grado de incertidumbre que muestran para la época los modelos vigentes. Menciona la importancia de considerar cuestiones paramétricas que trascienden la resistencia a compresión tanto del mortero como del ladrillo.

Para esto propone aplicar análisis por regresión usando el método de mínimos cuadrados para el estudio de la resistencia a compresión de los componentes de la mampostería. Dicha técnica se presume útil para estimar tendencias y poder calcular en forma aproximada ciertos parámetros de los materiales como ser el módulo de Young y el módulo de Poisson.

- Basilea S., [2007] define en su trabajo dos niveles de análisis, uno local y otro global definidos en términos de su forma computacional y relacionados a través de un operador matemático que traduce las deformaciones del nivel global al nivel local.

El algoritmo de solución desempeña los siguientes pasos: evaluación del error en el nivel local, transformación de resultados del nivel local al nivel global mediante la matriz A de transformación, corrección de error en el espacio global por iteración de Newton Raphson, transferencia al espacio o nivel local nuevamente para iterar sobre el error, que si bien es perceptible en el mencionado nivel, es necesario para delimitar el error o depurarlo a efectos de conseguir resultados convenientemente precisos.

En el nivel global se utilizan elementos finitos rectangulares de 8 nodos y cada uno de ellos con tres grados de libertad los cuales son dos desplazamientos y una rotación.

Las funciones de forma de cada nodo se definen en el trabajo de Basile S. para el nivel global mientras que para el nivel local se representa una secuencia o celda conformada por tres resortes que representan el comportamiento normal y tangencial de dicha celda. Por último el análisis de daño se realiza estableciendo funciones límite.

A efectos de utilizar este enfoque para definir funciones límite se debe establecer con anterioridad el conjunto de variables consideradas principales y secundarias además de definir límites superior e inferior para cada parámetro logrando de esta forma agregar al problema restricciones de confiabilidad.

- Bonaiuti [2008], concluye que el comportamiento estructural de mamposterías depende de la relación geométrica global entre su longitud de base y su altura, dando por resultado lo siguiente: Muros altos tienen comportamiento con predominancia de flexión, similar a los tabiques de hormigón armado mientras que los muros largos de baja altura muestran una similitud de comportamiento a los pórticos de barras (los pórticos experimentan un tipo de deformación similar a cortante). Por otra parte menciona la necesidad de actualizar la metodología vigente, a fin de aprovechar la disponibilidad tecnológica actual.

Esto tiene relevancia desde la realidad que conlleva la posibilidad de fácil acceso a herramientas informáticas que permiten elevar el detalle en el análisis estructural de elementos no contemplados usualmente como promotores de transferencia de cargas en el espacio lo cual debe equilibrarse con el hecho que modelos complejos sin aplicación no convergen a propuestas sustentables.

Por otra parte cualquier modelo actual debe considerar el comportamiento posterior a la fisuración dado que este aspecto es de suma relevancia en el resultado final del análisis estructural de este tipo de sistemas, sobre todo teniendo en cuenta que en el caso de las mamposterías de ocurrir un problema de fisuración trae aparejado otro tipo de problemáticas concernientes al cerramiento en si como ser filtraciones y gestación de hongos en paredes por problemas de humedad lo cual es un aspecto que a largo plazo produce inconvenientes a la salud de los usuarios de la vivienda.

- Anzani A., [2010], propone el estudio del comportamiento de la mampostería a través de un par de modelos visco elásticos acoplados en serie según los criterios de Kelvin (fluencia primaria), y Maxwell (fluencia secundaria).

La fluencia de 3er orden está considerada a través de un modelo de daño dispuesto por Maxwell y Bentham. En síntesis el modelo se compone de dos sistemas visco elásticos acoplados en serie que representan el comportamiento en el campo elástico y el campo plástico, considerando variables reológicas del material como la fluencia.

- Fontana C. [2011], menciona aspectos sobre el déficit habitacional que sufre Uruguay y destaca la carencia científica en cuanto a caracterización de materiales, comentando que en el vecino país se utilizan ladrillos cerámicos huecos, los cuales sufren de carencias tanto en el ámbito normativo como en el de regulación de su producción y su uso.

Entre algunas de las ventajas tradicionales de este tipo de materiales menciona: resistencia al fuego, bajo costo de mantenimiento, y excelente resistencia al intemperismo.

Así mismo se estudian mampuestos regionales en donde se deja registro de parámetros geométricos y mecánicos en términos de valores medios, desvíos estándar y coeficientes. Se analiza la absorción de los mampuestos como propiedad física. Entre las conclusiones volcadas se destaca como imprescindible la necesidad de normalizar el proceso de control

de calidad de los mampuestos, como así también apuntar al desarrollo de investigación en el campo de la ingeniería estructural a efectos de analizar la factibilidad de uso de los sistemas de mamposterías para mitigar problemas de demanda habitacional en la región.

- Mohamed et al., [2011], menciona la necesidad de plantear ensayos a escala reducida se da por lo siguiente: los ensayos a escala natural son costosos y riesgosos en cuanto al instrumental utilizado durante los ensayos.

En este trabajo se realizan ensayos a escalas 1:2, 1:4, y 1:6. Se determinaron las características constitutivas del mortero y del ladrillo antes de armar los modelos. Se obtuvieron resultados de ensayos a compresión, las velocidades de carga fueron de 0.18KN/seg para 1:2, 0.04 y 0.02 KN/seg para 1:4.

Para escala 1:6 se utilizó la técnica de ensayo a desplazamiento controlado, por una cuestión de compatibilidad de la maquina usada para ese modelo. La consideración fue capturar el comportamiento estructural de una estructura de mampostería, y sus diversos elementos bajo la influencia de una variedad de acciones.

Para entender el comportamiento fundamental de un sistema de mampostería, cada una de las acciones fue tomando forma separada y se considera para cada una de las escalas elegidas. La tasa de desplazamiento se obtuvo mediante la realización de pruebas de ensayo para determinar en principio el tiempo necesario para lograr la falla en ensayos a escala de 1/6, y luego ajustando la velocidad de desplazamiento, a fin de lograr la falla en esas pruebas.

- Herbert et al., [2011], analiza el efecto de escala en modelos reducidos utilizados para estudiar cargas laterales en mamposterías, debido al efecto del viento o de aguas de inundación. Aporta conceptos y enfoques en cuanto a técnicas de ensayo a escala reducida, describiendo y estableciendo relaciones entre prototipos a escala natural y modelos a escala reducida.

- Lourenço et al., [2012] propone un modelo isotrópico que admite fisuración con una orientación de grieta fija y una degradación de la respuesta al corte de forma constante para representar ambos materiales en la fase no lineal.

El modelo relaciona directamente la tensión principal con los valores de deformación principal calculados para cada paso de carga en el elemento. La relación constitutiva de los materiales componentes se resuelve por aplicación de funciones límite.

Ese mismo año se investiga el efecto de las juntas de mortero en el comportamiento de los enlaces de prismas reforzados con FRP mediante modelado numérico. La simulación numérica para este caso se realiza mediante la adopción de un enfoque de micro-modelado tridimensional no lineal.

Se consideran diferentes modelos de fisuras y se comparan los resultados en términos de distribución de tensiones y tensiones locales, respuesta global de deslizamiento de fuerzas y patrón de fisuración. Luego en [2014] presenta un análisis de seguridad de un edificio de oficinas que sufrió colapso en diciembre de 2007.

Se preparó un modelo de elementos finitos y se realizó un conjunto de análisis numéricos no lineales. Los resultados de los análisis muestran un buen acuerdo entre el daño observado en el edificio real y el daño obtenido numéricamente en la condición actual.

Para este caso el modelo de material adoptado para representar el comportamiento no lineal de la mampostería en el análisis es un modelo isotrópico de fisura fija de Secuencia Total que describe el comportamiento de tracción y compresión del material con una relación esfuerzo-deformación y se construyó utilizando el software denominado DIANA.

Al igual que los modelos tradicionales de fisuras impuestas aquellos correspondientes a fisuras basadas en la deformación total siguen un enfoque que se basa en evaluar la energía de fractura y proporcionan un algoritmo numérico más robusto.

Este modelo es muy adecuado para problemas destacados por agrietamiento o trituración del material. La función de ablandamiento de tensión seleccionada es exponencial y la función de compresión seleccionada para modelar el comportamiento de aplastamiento es parabólica.

Luego en [2016] se presentan dos modelos simples de homogeneización adecuados para el análisis no lineal de paredes de mampostería en plano cargado. Una celda elemental de enlace rectangular de funcionamiento se discretiza mediante veinticuatro elementos triangulares de esfuerzo plano de tensión e interfaces lineales de dos nodos. La no linealidad se concentra en el mortero reducido a la interface exhibiendo un comportamiento holonómico con ablandamiento.

Es de hacer notar que en los textos referidos a modelos numéricos con patrones de fisura impuesta se destaca lo siguiente: la imposición de la zona de agrietamiento puede tener argumento en la necesidad de mantener limitado el costo computacional en este tipo de modelos dado que si se pretendiera encontrar la traza de grieta de forma aleatoria la cantidad de cálculos a efectuar aumenta.

- Mira Díaz M. [2012], menciona que la discontinuidad y la heterogeneidad a múltiples escalas en los sistemas de mampostería establecen las causas que permiten caracterizar a dicho material compuesto como anisótropo.

Paralelamente trata de enfocar el estudio estructural en el mampuesto, en el mortero de junta, y en la interface que ocurre en la unión de los mismos. Menciona también que la anisotropía del material tiene relación con la distribución geométrica de las juntas además que la aparición de planos de debilidad origina baja resistencia a tracción en los sistemas de mamposterías.

Destaca la presencia de un desfase entre el desarrollo tecnológico e industrial de estos sistemas comparado con el desarrollo en investigación científica para la obtención de modelos estructurales representativos de su comportamiento mecánico.

Menciona diferentes metodologías de cálculo utilizadas en el diseño de estos sistemas, y hace hincapié en la carencia de conocimiento respecto de modelos sencillos de costo computacional razonable que permitan explicar el comportamiento de los sistemas de mampostería.

Menciona los siguientes mecanismos de falla en mamposterías: desprendimiento de mampuestos por esfuerzos de tracción, deslizamiento de mampuestos respecto del mortero de junta, fisuración por tracción en mampuestos y juntas, fisuración y deslizamiento combinadas en mampuestos y juntas, fisuración por aplastamiento de mampuestos y juntas.

- Villegas [2012], clasifica y describe metodología y tecnología para evaluación estructural en ensayos no destructivos, lo cual es un punto a tener en cuenta al momento de requerir comprobaciones experimentales para contrastar con resultados arrojados por modelos numéricos en lo que refiere a comportamiento de elementos acoplados de hormigón y mamposterías. En su trabajo menciona diferentes técnicas, entre las cuales se destacan las de emisión acústica como interesantes para la obtención de las constantes elásticas del material.

Estas pueden a posterior alimentar modelos numéricos que complementen la actividad experimental. A la vez las técnicas de ultrasonido aparecen como las adecuadas para el análisis de comportamiento de materiales rígidos como la mampostería o el hormigón.

- Villegas [2011] describe técnicas de monitoreo estructurales basadas en aspectos tensionales, también aplicables a la problemática planteada en el presente trabajo que permiten obtener parámetros como ser: estados tensionales de compresión en mamposterías, resistencia al corte en juntas de morteros, elaboración de curvas de tensión y deformación para mamposterías, estados principales de tensión, estimación de módulos de deformación y coeficientes de Poisson, entre otros.

Si bien estas técnicas no son específicas y aplicativas para el presente trabajo, es conveniente mencionarlas a modo de establecer la disponibilidad de metodologías para la obtención de parámetros que puedan alimentar modelos numéricos representativos de los problemas de fallas en mamposterías a analizar.

- CIRSOC 501E, [2013], establece definiciones en cuanto a tipología de mampuestos, dividiendo en macizos y huecos portantes, para los primeros la proporción entre sección neta y bruta no debe ser menor al 80% en todos los planos paralelos a la superficie de asiento del mampuesto, así también los agujeros en forma individual no deben superar una sección de más del 4 % de la sección bruta, y el espesor de pared interna y/o lateral debe ser mayor a 25 mm.

Para los mampuestos huecos portantes se establecen las siguientes restricciones: Sección neta menor al 40% de la sección bruta, relación altura/largo no mayor a 2/3. Por último define una cantidad de pisos no mayor a 2 para el caso de mampuestos huecos portantes con tubos orientados horizontalmente, por encima de esta restricción debe respaldarse la resistencia del mampuesto mediante ensayos de caracterización de su resistencia.

Para la resistencia característica se define un percentil 10%. En lo que respecta a valores de resistencia a compresión característica, los parámetros contemplados son: Resistencia especificada a la compresión de la mampostería basada en la sección neta correspondiente y Módulo de rotura o resistencia a tracción por flexión.

En cuanto a las hipótesis de diseño establecidas para mamposterías en el mencionado reglamento son similares a las impuestas para secciones compuestas como el hormigón armado con ajustes en los coeficientes de las expresiones de cálculo.

Para los morteros de junta se establece una clasificación en tres tipos según su resistencia: Elevada, intermedia y normal. Para esta clasificación se definen mediante tablas las proporciones de sus componentes.

Los morteros considerados por este reglamento, son los de cal reforzada con cemento y los llamados hormigones de gravilla o "grout". No están contempladas juntas hechas con morteros de cemento de albañilería y/o adhesivos comunes para cerámicas.

Estos últimos dada su usual aplicación pueden ocasionar particularidades en términos del comportamiento global al efecto de corte de la mampostería con lo cual son elementos a tener en cuenta más adelante en el presente trabajo. Por último están definidas las condiciones de utilización de los morteros, condiciones excluyentes para el tratamiento del diseño de mamposterías a través del documento referido.

A la vez, remite al diseño estructural bajo aplicación de tensiones admisibles, cuestión que se contrapone con los conceptos mencionados en el párrafo anterior. Dentro de los parámetros considerados en la reglamentación vigente se encuentran los que refieren a la geometría de los mampuestos, y respecto a los parámetros mecánicos se detectan tensiones admisibles de mampuestos, tensiones calculadas de aceros, y valores característicos de resistencia de morteros de unión usados en mamposterías.

También se mencionan recomendaciones en cuanto a armados y ubicación de elementos estructurales, de carácter arbitrario, que reducen la amplitud de la metodología propuesta.

- Sarhosis et al., [2013] presenta un trabajo sobre mamposterías unidas con morteros de baja resistencia, en el cual resalta la importancia de alimentar a modelos numéricos elaborados para describir el comportamiento mecánico de las mamposterías con leyes constitutivas que reproduzcan los hechos observados en las experiencias de laboratorio.

A su vez expresa que el número de parámetros definidos para explicar el comportamiento de las mamposterías ha incrementado su valor junto al avance tecnológico en términos de herramientas computacionales.

En su trabajo proponen un modelo obtenido por identificación de parámetros para mamposterías de junta blanda, o que tienen mortero de junta de baja resistencia, enfocando el mismo en la interface entre mortero y mampuesto.

La manera de modelar el sistema compuesto se efectúa mediante aplicación del método de elementos finitos modelando los mampuestos unidos mediante puntos de contacto que simulan el mortero de junta.

- Oller et al., [2014], sostiene que el diseño de estructuras de obra de fábrica no ha tenido un desarrollo paralelo y exhaustivo, como en el caso de otros materiales (hormigón armado, hormigón pretensado).

A su vez señala que los métodos más utilizados son aquéllos que preconizan las diferentes normativas simplificadas que rigen en cada país, ya que entre los calculistas existe un desconocimiento generalizado del comportamiento estructural de la mampostería que impide diseñar este tipo de estructuras de forma óptima.

En el trabajo de Oller se destaca que estas normativas frecuentemente están obtenidas sobre la base de estudios empíricos que intentan simplificar los mecanismos de comportamiento de la obra de fábrica y que traen como consecuencia sobre estimaciones de la estructura en términos de los coeficientes de seguridad a adoptar para su diseño.

Consecuencia del uso de este tipo de hipótesis de cálculo es que se formen mecanismos de carga que no han sido considerados, apareciendo fisuras donde en teoría y en base al cálculo inicial no debieron suceder.

A su vez, afirma que los métodos de cálculo avanzado (modelos constitutivos de la mecánica del medio continuo) deben ser el pilar sobre el que se desarrollen herramientas más eficaces para la descripción de la respuesta estructural de los sistemas de mampostería.

Así también los elementos finitos son una herramienta potente en la que se debe apoyar el cálculo de la obra de fábrica y debido a su tamaño pequeño respecto a las dimensiones globales de la estructura, se hace costoso resolverlos desde el punto de vista computacional.

Bajo estas condiciones proponen un modelo constitutivo homogeneizado para el análisis de mamposterías. Menciona que el uso de materiales compuestos para componentes estructurales requiere un diseño particular. Esto se debe principalmente a la alta anisotropía

y la relación de fuerza entre la fibra y la matriz. El proceso de diseño de estructuras realizadas con materiales compuesto se basa en métodos empíricos.

En la literatura relacionada hay una escasa cantidad de análisis de comportamiento de estos materiales sometidos a niveles de tensión por encima del límite elástico. Las técnicas convencionales no son suficientemente adecuadas para el análisis de materiales compuestos.

Asimismo, la utilización del método de elementos finitos para estudiar compuestos que están representados por un único material que tiene propiedades de todo el conjunto no ha arrojado resultados satisfactorios.

Una dificultad al utilizar el método de elementos finitos en modelos numéricos convencionales de sistemas compuestos es que los materiales altamente anisótropos sometidos a cargas superiores a su límite elástico demandan un refinamiento de malla localizado sobre la zona de falla.

En consecuencia, es necesario modelar materiales compuestos a través de las teorías que conducen a la simulación de comportamiento de los materiales anisotrópicos con comportamiento diferenciado para cada sustancia que forme parte del compuesto: buen manejo de la fase de refuerzo con fibras; capacidad para re-presentar el desplazamiento relativo entre la matriz y la fibra (desunión); entre otros. Todos estos fenómenos conducen a un desempeño global de dicho elemento compuesto que muestra pérdida de linealidad en la respuesta ajustada.

Respecto a procesos de optimización [Möller, 2008], al ser estos de carácter probabilístico cuando se incorpora el concepto de índice de confiabilidad se requiere un lote de datos importantes para el análisis por esta metodología.

Esto representa un costo considerable dado la gran cantidad de datos de comportamiento que se deben recopilar lo cual si se recurre al campo experimental lo vuelve una tarea difícil y por lo tanto es necesario adoptar técnicas de simulación de resultados y de aproximación de la respuesta por métodos de superficie de respuesta, redes neuronales, u otros métodos.

- Bakeer [2015], estudia la flexión en muros, asociada con acción del viento, sismo o efectos de 2do orden (Pandeo), expone diferentes modelos constitutivos adoptados para

mampostería, asociando su similitud con el modelo de hormigón, salvo por la parte post rotura que difieren, por cuestiones lógicas.

Propone un método de transformación matricial (TMM) basado en analizar el problema estructural dividiéndolo en varios elementos en donde se van concatenando las respuestas de cada uno de ellos. El método TMM ha sido validado en contraste con la solución analítica de las ecuaciones, diferenciales planteadas para el mismo problema.

Como resultado se ha propuesto una solución numérica, para el problema del pandeo en mamposterías que pudo ser implementada en MATLAB. Los algoritmos se desarrollaron considerando no linealidad física de los materiales plantea a futuro poder establecer correlaciones entre la mampostería y otros elementos estructurales.

- Brozovsky et al., [2015], Pone a discusión una aproximación numérica en campo elástico para modelos homogeneizados de mamposterías usando un tensor de escala basado en semejanza constitutiva de los materiales componentes, semejanza de volumen y masa entre morteros y mampuestos.

El trabajo presentado se enfoca en una herramienta diseñada para obtener parámetros constitutivos, que sean utilizables dentro de cualquier código de elementos finitos.

- Smoljanovic H., [2015], comenta sobre recientes desarrollos que combinan las prestaciones de métodos de elementos /diferencias finitas, con métodos de análisis por deformación discontinua o dislocación.

Es interesante destacar que la modelación incluye los elementos de transición de carga usados en los ensayos mecánicos agregando un elemento triangular de iguales propiedades que sirve para modelar la forma de aplicación de la carga. En sus conclusiones se destaca la posibilidad que tiene este modelo de representar situaciones de carga propias de sismos, impactos, donde la no linealidad geométrica involucra grandes desplazamientos.

- Según lo publicado por Ural et al., [2015], sobre la incidencia que tienen los tirantes o refuerzos de acero en el comportamiento mecánico de los arcos de mamposterías, se evalúan modelos con diferentes formas de colocación de refuerzos de acero, comparados con resultados de un arco testigo, que no posee tirantes.

Se puede apreciar a través de las imágenes de laboratorio, que planteo se selecciona para la obtención de las características constitutivas de los mampuestos, ensayados en algunas de sus direcciones principales, se efectúan ensayos en morteros de junta, y en celdas de mampostería de tamaño conocido.

Entre las conclusiones destaca el considerable incremento de la capacidad portante de arcos de mampostería, a través del aumento de su resistencia a tracción mediante la incorporación de tirantes de aceros, dispuestos de diferentes formas para distintos modelos analizados.

A la vez se puede apreciar que variando la disposición de los refuerzos de acero, también varía la situación tensional del arco, incluso dependiendo hasta de la forma de anclaje que presenta el tirante o tensor.

- Nor-E-Kuda [2016], presenta un modelo de elementos finitos que permite analizar mamposterías de ladrillo macizo sometida a cargas en su plano y perpendicular al mismo. El autor calibra el modelo numérico mediante datos obtenidos de otros desarrollos científicos comprobando la variación de la resistencia de mamposterías no reforzadas de ladrillo macizo, según la relación altura/longitud, según la existencia de aberturas y la ubicación de la misma dentro de la mampostería, entre otros aspectos referentes a los parámetros de modelación adoptados
- Zahra T. et al., [2016], propone un modelo numérico basado en conceptos de mecánica de fractura argumentando que la mayor parte de las normas de diseño sugieren formulaciones empíricas o según criterios utilizados en las normas de Australia (AS3700-2011); Código Americano (ACI 530-2005) y Eurocódigo (BS EN 1996-1-1: 2005; BSI, 2005). El segundo método aceptado es la prueba experimental de pilas bajo compresión uniaxial.

Hasta la fecha, las normas de diseño no incorporan cláusulas para la adopción de las teorías simplificadas para predecir la resistencia a la compresión de la mampostería. Muchos investigadores han utilizado las teorías de plasticidad en base a criterios o poniendo en práctica micro modelos propuestos en un marco de elementos finitos usando software comercial disponible en el mercado para modelar prismas de mampostería sometidos a compresión.

Muchos modelos reportados han demostrado predecir resistencias a la compresión superiores a los datos, y por lo tanto no pueden adoptarse en procedimientos de diseño estructural confiable.

El trabajo habla sobre la característica de la relación tensión deformación en la mampostería, su condición de material frágil estableciendo luego una forma de parábola para el primer segmento de su comportamiento y una vez superado el umbral del valor considerado para fractura en deformación específica surge una reducción de la rigidez o ablandamiento como ecuaciones calibradas sobre la base de una extensa revisión de autores.

- En Brooks, [2015], algunas de las hipótesis mencionadas para la configuración del problema de comportamiento de las mamposterías se asume que: no existen efectos de adherencia entre morteros y mampuestos, que el efecto de Poisson es despreciado, que la relación entre tensiones y deformaciones es proporcional, que no se consideran restricciones externas, y que las deformaciones del mortero se consideran isotrópicas, mientras que las deformaciones del mampuesto se consideran anisotrópicas.

En el capítulo 5 se establece el carácter inelástico y no lineal en términos de definir el comportamiento de la mampostería así como que el módulo de elasticidad no se ve influenciado por la altura de la pared.

El mismo está influenciado por la edad del mampuesto y por la marcada anisotropía del ladrillo el cual se puede definir en función de la densidad aparente del material mampuesto del cual depende la porosidad y por lo tanto la resistencia a compresión del mampuesto y por ende de la mampostería.

En el capítulo 8 del mismo libro menciona a la edad del mampuesto como determinante en la predominancia del comportamiento de la mampostería, esto es, mamposterías hechas con ladrillos de corta edad inducen un comportamiento marcado por un efecto de expansión de la mampostería, mientras que en los casos de paredes construidas con ladrillos de considerable edad, el efecto predominante es de contracción.

- Zhang et al, [2016] trabaja el tratamiento de arcos de mampostería a través de elementos sólidos lineales elásticos de 20 nodos para los ladrillos, y elementos de área de 16 nodos no lineales inelásticos para las juntas de motero. Para la no linealidad de los elementos de interface (junta) se considera un modelo cohesivo que contempla daño,

fisuración y dislocaciones de gran tamaño, utilizando un criterio de superficie de múltiple plasticidad.

De la presente revisión de referencias en el campo de la simulación numérica de mamposterías se pudo constatar la existencia de considerable número de opciones para implementar procedimientos de modelación en estructuras de mamposterías.

Las variantes de criterios aplicados se mueven entre la decisión de aceptar la no linealidad de los componentes de la mampostería y en establecer los límites de estos criterios para cada situación en particular en función de la considerable cantidad de factores que inciden en el comportamiento de ésta como material estructural.

Al margen de esto es importante establecer de manera correcta la incidencia que tiene la fisuración en el comportamiento de las mamposterías más allá del campo elástico, a efectos de poder establecer de manera asertiva los modos de falla probables y la manera en que están concatenados.

De todas formas sigue presente la carencia de conocimiento en el ámbito local lo cual es motivo para dejar sentadas bases en el ámbito regional sobre propuestas de diseño estructural para estructuras acopladas entre hormigón armado y mamposterías que permitan reducir la distancia entre el costo de una vivienda y la posibilidad de acceso a la misma por parte del usuario en función a su nivel de ingresos.

Con respecto al protocolo de búsqueda parece necesario diseñarlos de manera más específica, a efectos de resultados sin relevancia como también duplicaciones entre las diferentes concatenaciones de palabras clave.

Se pudo observar la importancia que le dan algunos autores a la relación entre módulos de elasticidad de los materiales componentes y el espesor de junta horizontal empleado en las paredes analizadas.

Es de observar que a medida que el espesor aumenta se reduce esta relación, mostrando que se puede pensar en un incremento de la ductilidad global del sistema estructural con el aumento del espesor de junta.

Análisis numérico. Métodos de solución matricial.

Al evaluar la metodología implementada por los autores citados hasta aquí es evidente que la herramienta numérica elegida por potencia y robustez es el método de los elementos finitos.

Si bien el mismo data de la década de 1960 y en sus principios fue aplicado a la aeronáutica con el paso del tiempo su potencia y robustez ha ganado terreno en más una rama de la ciencia, pudiendo lograr aplicaciones incluso en el campo de la biomedicina.

A continuación, se redacta una breve síntesis de los procedimientos numéricos que se utilizan en el presente trabajo a efectos de constatar y establecer pautas de diseño basadas en resultados experimentales.

Método de Elementos Finitos.

El mismo se basa en una síntesis reducida en establecer un dominio para representar numéricamente el problema en cuestión y separarlos en una cantidad finita de elementos que estarán definidos sobre la base de la información concentrada en sus nodos en términos de dicha representación numérica, es decir la información numérica que representa el fenómeno mecánico se concentra en los denominados grados de libertad que se asignan a los nodos de cada elemento.

Con esto se obtiene una versión acotada del problema continuo que implicaría la implementación de una función solución que resuelva un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que contiene cualitativamente la misma información de manera exacta.

Lo que se logra con la mencionada discretización es la posibilidad de resolver el problema mediante un sistema discreto de ecuaciones algebraicas que tiene como incógnitas a los datos correspondientes a los grados de libertad asignados a cada nodo.

Luego el siguiente paso es la ampliación de esa información al resto del medio continuo establecido por el dominio a través de técnicas de interpolación polinómica de diferente orden según el tipo de problema a resolver.

Por último se aplica integración numérica a los campos de información como ser tensiones y deformaciones para poder obtener datos de los esfuerzos aproximados a que se encuentra solicitada la estructura.

- [Chaves, 2010] establece que el Método de los Elementos Finitos (MEF) se aplica para resolver aproximaciones a ecuaciones diferenciales en derivadas parciales mediante el procedimiento de transformar un problema continuo en un conjunto de ecuaciones discretas dividiendo para ello el dominio original en subdominios llamados elementos finitos en los que las ecuaciones de gobierno siguen cumpliéndose y se traslada el problema a cada subdominio simplificando así la manera numérica de resolverlo.

Para esta implementación se deben en primera instancia adoptar funciones tales que permitan aproximar la función solución del problema en dicho subdominio. Dichas funciones se conocen como funciones de forma permiten representar la solución del problema en cada subdominio empleando únicamente los valores de solución nodales y desde estos extender la información a todo el dominio discreto entendiendo aquí que es donde se produce la aproximación a la solución real del dominio original.

En el mencionado contexto se establece que la distancia entre la función incógnita y función de forma miden de cierta manera la calidad de aproximación de la solución por Elementos finitos respecto de la solución exacta del problema.

- Según Zienkiewicz, [1994] se define al método de elementos finitos como un procedimiento de aproximación de problemas continuos basados en la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales que cumplen: condiciones de equilibrio, condiciones de compatibilidad de deformaciones y condiciones de contorno.

La particularidad del método reside en el hecho de que el medio analizado se divide en una cantidad de elementos discretos o finitos los cuales se pueden definir a través de un número finito de parámetros que pueden ensamblarse en forma global para brindar un sistema numérico finito y soluble con aproximación aceptable y convergencia efectiva desde el punto de vista matemático.

Para comprender en profundidad esta definición debemos describir la secuencia que comprende la resolución de un problema continuo mediante su aproximación por elementos finitos.

Se trata en síntesis de iniciar definiendo un dominio geométrico sobre el cual efectuar la discretización (mallado) de elementos los cuales llevan asignada información característica mediante la definición de nodos y un contorno que une a los mismos.

Estos nodos tienen asociados grados de libertad que darán acceso a un campo escalar el cual es el encargado al final del procedimiento de representar el comportamiento del sistema estudiado, y se encuentran ordenados y parametrizados según un sistema de coordenadas locales que es natural al elemento y difiere del sistema global.

Por lo tanto, es necesario encontrar una herramienta de transformación entre ambos sistemas de coordenadas que permita realizar los cálculos de manera simplificada en coordenadas locales para luego traducir dichos resultados a las coordenadas del sistema global.

Esto se realiza a través de funciones de forma o base, que se determinan con el objeto de interpolar la información nodal a través del contorno de cada elemento logrando así completar el proceso de aproximación del campo escalar estudiado.

En el caso del presente trabajo se enfoca en los desplazamientos y deformaciones que sufre un modelo representativo de los sistemas de mamposterías estudiados en las tres fases planteadas aquí: mampuesto en forma aislada, celda de mampostería y panel de mampostería reforzado perimetralmente con elementos de hormigón armado.

Un problema que surge al aplicar este proceso es aproximar adecuadamente el comportamiento de estos modelos cuando los umbrales de resistencia característica a compresión y a tracción del material componente de estos ladrillos se ven sobrepasados y ocurren en el prototipo esquemas y/o patrones de agrietamiento. Tales patrones son difíciles de representar mediante aproximación MEF porque implica un refinamiento particular del mallado del modelo para cada zona en donde ocurren las fisuras.

Esto se vuelve poco práctico a medida que el modelo se vuelve más complejo porque implica dos cuestiones: localizar la zona de agrietamiento y luego efectuar el refinamiento con el consiguiente reinicio del proceso de solución del sistema de ecuaciones. La técnica en síntesis que implica refinar el tamaño de la malla cerca de la zonas de agrietamiento da como consecuencia un aumento sustancial del costo computacional de este tipo de modelos que lo hace en algunos casos hasta un modelo inviable.

Método de Elementos Finitos Extendido (XFEM).

Según la teoría del método de elementos finitos se puede mejorar la precisión de un resultado obtenido de dos maneras: modificando el tamaño de los elementos o interviniendo en los términos de las funciones de forma.

El método de Elementos finitos Extendido (XFEM) se basa en el segundo planteo, y pretende desarrollar una herramienta capaz de representar campos de datos en sistemas discretos que son capaces de reproducir patrones de agrietamiento que sean independientes del tamaño de malla o de implicar un refinamiento y nuevo procedimiento de solución del sistema de ecuaciones resultante.

Varios autores han trabajado en el campo mencionado desde el año 1996 en adelante. En esta época se comienza a definir a XFEM como procedimiento formal, entre otros se destaca el trabajo de Mohamadi [2012] y Bakalakov [2017].

- En el trabajo de Vercher Martínez [2010], se menciona como importante el carácter singular que toman los problemas de mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL), en zonas en donde ocurren agrietamientos en donde la solución al planteamiento diferencial no logra suavidad suficiente requiriendo para el caso MEF tener que refinar la malla de manera localizada.

A su vez destaca la importancia de MEF para la obtención de los factores de intensidad de tensiones al ser importantes estos en la definición de parámetros correspondientes al campo de la MFEL.

Se define como singularidad a aquellos puntos en donde los valores de las tensiones tienden a infinito. Luego las singularidades encontradas en un problema tratado por MEF deben redefinirse en forma localizada para permitir mejor precisión en los resultados.

La ventaja que presenta XFEM en este tipo de problemas es que se puede resolver con independencia del mallado adoptado para la zona de singularidad, es decir, se enfoca en enriquecer las funciones forma con términos que permiten interpolar el comportamiento en la zona de agrietamiento así como en la zona conocida como punta de grieta.

Un dominio que no contiene singularidades dará como resultado funciones suaves, siendo la suavidad un concepto relacionado con la capacidad de una función de ser derivable en un cierto número u orden.

El concepto de partición de la unidad implica que en un dominio geométrico dado, la suma de las funciones de forma debe dar como resultado la unidad. Finalmente se debe acoplar el método Level set o LSM a XFEM para obtener una modelación del avance de la grieta de manera adecuada.

Un punto débil de XFEM radica en la velocidad de convergencia la cual es baja, razón por la cual algunos autores han dedicado diferentes propuestas para la solución de este inconveniente.

Dicha convergencia se ve condicionada por la zona de nodos enriquecidos destacándose como fundamental que el enriquecimiento se realice de forma geométrica o sea independientemente del tamaño de la malla. En el mencionado trabajo de Vercher Martínez se tiene una detallada síntesis de los conceptos principales en el tratamiento de la modelación de grietas mediante las funciones level set.

Las funciones level set se definen para establecer la discontinuidad del medio en dos situaciones: en el inicio de la grieta y en el desarrollo de la misma. Las siguientes ecuaciones definen el tratamiento de la representación numérica a través de esta metodología. Estas se presentarán en el capítulo subsiguiente que corresponde al tratamiento XFEM del problema mecánico planteado para la presente Tesis.

- Mohamadi [2012] en su libro referente al método XFEM presenta un relato exhaustivo sobre los conceptos aplicados a problemas macroscópicos para diferentes tipologías materiales.

Así se trata la aplicación de esta técnica a materiales isótropos, ortótropos, y se consideran otros efectos como ser tratamiento numérico de problemas de fractura en materiales compuestos, fisuración en materiales ortótropos, dinámica en la mecánica de fractura para fisuras crecientes, degradación de materiales por efecto de fractura y delaminación en materiales.

Algunos de estos tópicos son considerados factibles de extrapolar al caso de las mamposterías de Ladrillo Cerámico Hueco por ello es importante revisar y hacer énfasis en

el tratamiento desde un enfoque de material ortótropo y compuesto ya que no solo incide la resistencia y/o respuesta de los ladrillos sino también el papel que juegan los morteros de junta tanto en el plano horizontal como en el vertical.

Los primeros intentos de analizar problemas mediante XFEM datan del año 1999 cuando Bellitschko y Black propusieron una minimización de remallado para representar el crecimiento de una fisura. El término “extendido” se debe a la participación de Möes quien junto a Black y Dolbow presentaron una forma de independizar el problema del tamaño de la malla acudiendo al enriquecimiento de las funciones de forma.

En relación a este autor se muestra una descripción de cómo enriquecer nodos en una malla de elementos finitos con el objetivo de representar un patrón de agrietamiento en forma numérica.

Define que existen dos clases de enriquecimiento: enriquecer las funciones de base p (enriquecimiento intrínseco) y añadir términos de enriquecimiento a toda la aproximación (enriquecimiento extrínseco).

XFEM puede definirse como una versión local del método PUFEM (método de Elementos finitos con partición de la unidad) con aplicación del enriquecimiento solo en subdominios locales. Si se analiza el enriquecimiento de tipo extrínseco se puede apreciar que el mismo consiste en aportar al campo de desplazamientos nodales convencional del FEM tres términos que implican: desplazamiento discontinuo de grieta a través de un elemento, inicio o punta de grieta dentro de un elemento, componente de la interface material.

El enfoque XFEM se basa en enriquecer los nodos potencialmente expuestos a patrones de agrietamiento, discriminando el tipo de enriquecimiento entre un elemento que es atravesado por una grieta y un elemento en donde inicia esta.

El método opera con grados de libertad virtuales independientes adicionales para la definición de la geometría de la grieta y la aproximación del campo de desplazamientos. Que luego será combinado con el método de elementos finitos clásico para aproximar la solución global.

Los términos correspondientes al inicio de grieta representan por si solos un campo de desplazamientos discontinuo por lo tanto en esos nodos no es necesario incorporar la

función Heavyside que corresponde al campo de desplazamientos de un elemento atravesado por una grieta.

Luego resta resolver como rastrear correctamente un frente de grieta y predecirlo de manera adecuada. Es aquí donde se introduce la técnica LSM (Level Set Method). Existen muchas ventajas en la utilización de LSM para rastrear interfaces.

Primero, a diferencia de muchos otros esquemas para rastrear interfaces, el movimiento de la interfaz se calcula en una malla euleriana fija. Segundo, el método maneja naturalmente los cambios en la topología de la interfaz. Tercero, el método puede ser fácilmente extendido a dimensiones superiores. Finalmente las propiedades geométricas de la interfaz pueden ser obtenidas de la función de ajuste de nivel (χ).

- En [Andersson, 2017] se destaca que la evaluación del Factor de Intensidad de Tensiones se puede obtener mediante la evaluación de la integral J que mide la energía total de fractura en la grieta y a su vez dicha evaluación se puede hacer mediante la combinación de esta técnica con XFEM.

Señala que el metodo combinado mencionado no es adecuado cuando los esfuerzos son de compresión dado que implica un cierre de grieta por lo tanto esto genera inconvenientes en el algoritmo numérico utilizado.

Respecto al tratamiento de materiales compuestos existen varios autores que han trabajado con este tema haciendo aportes desde el campo de la simulación como así también en procesos de optimización de las técnicas de diseño de elementos conformados por materiales compuestos.

- Según lo expuesto en [Xia, 2017], una característica común de los procesos de optimización sin cálculo de gradiente es que se limita el número de variables de diseño a utilizar permitiendo el uso de algoritmos de optimización sin gradiente.

Sin embargo tales algoritmos de optimización sin gradiente no son aplicables cuando se trata de un mayor número de variables de diseño, como en los exigentes requisitos computacionales de la simulación.

Teniendo en cuenta que el presente autor considera un dominio geométrico compuesto por una matriz y una inclusión o compuesto distribuido en forma discreta dentro del dominio se ocupa de desarrollar en este trabajo un marco de optimización de topología para la

resistencia a la fractura de estructuras compuestas casi frágiles a través de un diseño óptimo de la distribución espacial de la fase de inclusión.

Por un lado a diferencia de trabajos anteriores en los que las formas de inclusión o las tipologías de diseño se fijan a priori, la optimización de topología adoptada en el presente trabajo ofrece nuevas posibilidades de diseño. Por otro lado, las variables de diseño de optimización de topología se actualizan sobre la información de gradiente, que es altamente eficiente en términos de iteraciones de diseño requeridas en comparación con los algoritmos sin gradiente.

Mediante aplicación de la optimización de la topología se tiene como objetivo encontrar un diseño de material óptimo dentro de un dominio de diseño prescrito para maximizar o minimizar ciertos objetivos y satisfacer una o varias restricciones de diseño.

El mérito clave de la optimización de la topología sobre el tamaño convencional o la optimización de la forma es que la topología estructural o la disposición del material dentro del dominio de diseño no se asume a priori, lo que da como resultado una mayor libertad sobre el diseño y en la mayoría de los casos a rendimientos más eficientes.

- En [Guangzhong, 2018], se hace referencia a la influencia que tiene el efecto de los llamados micro defectos en la trayectoria que sigue una fisura, y se propone en dicho trabajo combinar técnicas multi-escala con XFEM para aproximar la solución de manera adecuada. A su vez plantea el hecho de que tanto los métodos analíticos exactos como el MEF no son herramientas numéricas confiables para aproximar la solución a este tipo de problemas.

Respecto de XFEM valora la posibilidad que tiene el método de independizar la forma de efectuar el mallado respecto de la potencial trayectoria que puede tomar la grieta dado que al momento de interpolar entre nodos las funciones de forma vienen ampliadas con términos que permiten simular tanto el paso de una fisura a través de un elemento finito como también la situación en donde la punta de grieta este dentro de un elemento dado.

Para la aproximación de micro-defectos se menciona haber aplicado con éxito técnicas de homogeneización combinada con condiciones de contorno de Dirichlet, es decir que la solución del problema planteado toma la forma de una función que resuelve la ecuación diferencial que describe numéricamente dicho problema.

Además de esto se mencionan otros métodos que han logrado resolver el tema en cuestión a un razonable costo computacional como el planteo de volúmenes probabilísticos, volúmenes representativos y métodos multi-escala considerando discontinuidad.

Mediante el método de proyección multi-escala se puede ver demostrado en trabajos anteriores que las micro fisuras en la vecindad de la fisura principal tienen una considerable incidencia lo cual es bastante lógico dado que dicho estado aledaño a la trayectoria principal es una potencial de degradación de las propiedades de rigidez del material en forma local.

En este se plantea el equilibrio de esfuerzo a escala macro actualizando luego el campo de desplazamientos. Luego se aplican las condiciones de borde del dominio en micro escala para el campo de desplazamientos en macro escala. Se resuelve el equilibrio de fuerzas en el dominio a micro escala y se procede a verificar el cumplimiento de valores de tolerancia. Luego el proceso itera hasta que el error es menor a la tolerancia establecida como válida.

- En [Berrios et al, 2018] se desarrollan ensayos de propagación de fisuras en materiales metálicos utilizando como formato de probeta un sistema de doble viga en voladizo con el cual se puede estudiar el factor de intensidad de tensiones en modo KI.

A su vez señala la metodología propuesta para el ensayo dado que la normativa vigente no contempla ensayos normalizados para el análisis de este tipo de parámetros. Dicho procedimiento consiste en aplicar escalones de carga con equipo mecánico sobre la probeta para luego medir la propagación de fisuras a partir de la técnica de correlación de imágenes digitales, introduciendo luego las imágenes en un software CAD para su posterior determinación.

Este procedimiento es ajustable al caso de probetas cerámicas con ciertas modificaciones ya que en el presente trabajo de tesis doctoral no se analiza el efecto de cargas cíclicas sino se utiliza la aplicación de cargas monotónicas.

No obstante, se puede aplicar similar procedimiento para poder evaluar la tasa de liberación de energía de fractura, iterando los factores KI y KII en cada segmento de aplicación de carga en función del ángulo de apertura de la grieta.

A título informativo el tamaño de malla adoptado como adecuado para el ajuste correcto de los resultados en el trabajo de Berrios es del orden del 0.15% del tamaño de la probeta ensayada en forma experimental.

Esto implica tener presente varios aspectos de los cuales uno de los más importantes es poder determinar si la proporción del tamaño de malla debe ser el mismo al pasar a efectuar un análisis o simulación de tipo tridimensional.

- En [Konstantinos, 2011] se presenta un trabajo donde se valida un método para considerar la energía de fractura de modo mixto incorporando factores de intensidad de tensiones de los modos de falla I y II.

Se propone para la parte creciente del proceso de carga una función exponencial y una función lineal decreciente para la parte de daño por fractura. El criterio mixto basado en un enfoque de zona “incrustada” en donde avance hacia la falla se define por un criterio de tensión cuadrática nominal similar al de von mises consigue mejores aproximaciones a partir de la ocurrencia del daño en comparación con otro tipo de análisis planteados para esta problemática.

- [Hassanein, 2015] presenta en su trabajo un código en Matlab para aproximar patrones de fisuración en materiales anisotrópicos mejorando la precisión en la cuadratura de gauss a través del uso de una técnica general de mallado de nodos T3 con técnica de sub triángulo.

En paralelo se recurre a la técnica de la integral M para resolver el cálculo de los factores de intensidad de tensiones. Se utiliza para la implementación un código de elementos finitos extendido desarrollado en Matlab.

Las simulaciones han demostrado ser confiables para un número de nodos reducido. Asegura a su vez la importancia de incluir en un futuro a mediano plazo el estudio de las componentes de deformación producidas por efector térmicos dentro del presente algoritmo.

- [Cheng et. Al; 2018] presenta una rutina de control de propagación de fisuras (Controlable Crack Propagation-CCP) en el cual se propone un proceso de red neuronal BPPN combinado con un procedimiento particle Swarm Optimization (PSO) el cual permite obtener una selección adecuada de variables de diseño.

En principio funciona como elemento de revisión de un primer análisis basado en XFEM para luego analizar en concatenación el proceso BPPN y luego PSO logrando de esta forma

iterar sobre las partículas de material más aptas para ser separadas por el patrón de fisuración además de monitorear la velocidad óptima de propagación de la fisura.

Se entiende esto como un criterio para definir en función de las características de rigidez que definen a cada partícula dentro del material cual será el camino que dé como resultado la velocidad de propagación óptima de la fisura.

- En [Elruby, 2018] Se desarrolla una identificación automática de regiones críticas basada en el criterio de falla del material seleccionado. El enfoque permite la selección de la malla optimizada necesaria para la predicción precisa de las cargas de falla en el inicio de la grieta.

La determinación óptima del tamaño de la zona de enriquecimiento está automatizada. El enfoque propuesto se desarrolla como un algoritmo iterativo y se implementó en ABAQUS utilizando scripts Python. El algoritmo propuesto es validado contra datos de prueba de muestras sin muesca y datos de prueba relevantes de la literatura. Los resultados de las curvas de carga - desplazamiento pronosticado en caso de falla están en excelente acuerdo con las mediciones.

Las ubicaciones de inicio de la fisura muestran buen acuerdo con las observaciones de las pruebas. El algoritmo propuesto muestra una mejora significativa en la eficiencia computacional general en comparación con el XFEM convencional.

- En [Zhou, 2018], su trabajo está motivado por desafíos que involucran la construcción de métodos numéricos de alto orden para resolver problemas de mecánica de fractura elástica lineal. Los métodos de elementos finitos o elementos de límite con un refinamiento de malla uniforme producen una convergencia óptima en este tipo de problemas.

El método de elementos finitos extendidos (XFEM) es el método numérico que puede capturar la naturaleza singular del campo de tracción en las soluciones numéricas aplicadas a piezas fisuradas.

XFEM mejora el espacio de solución del método de elementos finitos al agregar las llamadas funciones de enriquecimiento para dar cuenta de la discontinuidad del desplazamiento a través de la superficie de la grieta y la singularidad en el frente de la grieta.

En particular, la solución analítica conocida a priori del campo de desplazamiento con baja regularidad se adopta como la función de enriquecimiento en los nodos cercanos al frente de la grieta. Una característica destacada de este esquema de enriquecimiento es que se puede usar una malla fija y agregar funciones de enriquecimiento de manera adaptativa solo alrededor de la grieta después de su propagación en una malla de elementos finitos fijos.

Algebraicamente, esto significa que una parte importante de la matriz de rigidez correspondiente a los grados de libertad del elemento finito estándar permanece sin cambios durante la propagación de la grieta. El mencionado método puede ser considerado como un método de descomposición de dominio especial. De hecho, se puede aproximar la solución en la región elegida como la combinación lineal de modos conocidos de soluciones de baja regularidad y resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales en este dominio mediante el método de colocación.

Se pueden utilizar métodos numéricos estándar en el dominio del complemento, y las condiciones de contorno se intercambiarán en la interfaz entre los dos dominios. Esto conduce a iteraciones entre las soluciones numéricas de los dos subdominios. Nuestra formulación de interfaz, sin embargo, evita estas iteraciones al transferir los coeficientes desconocidos de la combinación lineal a las condiciones de la interfaz y al establecer problemas de mínimos cuadrados para los coeficientes.

- En Huynh et al., [2019] una idea crucial fue utilizar una malla poligonal para representar el espacio de la técnica numérica actual por adelantado, y luego se estableció un refinamiento local de mallas estructuradas cerca de las discontinuidades. Debido a las diferencias en el tamaño y el tipo de elementos en los límites de esas dos regiones, los nodos colgantes producidos en la malla modificada se consideraron nodos normales en un elemento arbitrariamente poligonal. Conformar estos elementos especiales fue sencillo mediante el uso flexible de las funciones básicas sobre los elementos poligonales.

Aquí, en el análisis XFEM modificado se utilizan los modelos hiperelásticos para materiales compresibles como incompresibles. En el marco de los elementos finitos poligonales, se aplica una técnica de gradiente de corrección de funciones de forma para mejorar la precisión de la evaluación de la integración numérica de la forma débil.

Debido a la presencia de un salto en los desplazamientos cerca de las grietas, una malla estructurada de elementos cuadriláteros está incrustada en elementos poligonales incrustados. La ventaja de este enfoque es la creación de refinamientos de malla que se adaptan a regiones que contienen discontinuidades. Además, los reemplazos son fáciles de

controlar el refinamiento de la malla alrededor de las rutas de grietas que definitivamente pueden traer mejoras en la eficiencia computacional.

Se observa que las diferencias entre el tamaño y el tipo de elementos a lo largo del límite de dos regiones de malla conducen a la aparición de nodos colgantes. Tal dificultad se resuelve a través de las funciones de interpolación conformes empleadas en los polígonos. Para la implementación se toma una formulación lagrangiana actualizada en el método XFEM modificado.

Este enfoque permite que la geometría del dominio computacional se actualice periódicamente, y por lo tanto, el seguimiento de la deformación de las grietas se vuelve eficiente. Mientras tanto, el obstáculo para transferir datos de ciertas variables en el enfoque lagrangiano actualizado se ve facilitado por un mapeo adicional entre el elemento deformado y su contraparte no deformada.

- En Iskander [2018], se establecen diferencias importantes en la forma en que los materiales casi frágiles se agrietan cuando se someten a compresión uniaxial en comparación con la tracción uniaxial.

En la tensión uniaxial, típicamente una única grieta perpendicular a la tensión se propaga para causar la falla de la muestra, mientras que en la compresión uniaxial, se desarrollan múltiples grietas paralelas a la tensión de compresión antes de que la coalescencia de dichas grietas conduzca a la falla.

Existen diferencias cruciales entre las fallas de tracción y de compresión de los materiales casi frágiles. Los enlaces intermoleculares o interatómicos deben estirarse para romperse y pueden romperse cuando se alcanza la fuerza de unión máxima: la compresión de dichos enlaces no los romperá.

Este último punto se demuestra considerando la aplicación de la compresión hidrostática a una pieza de concreto completamente sólido: el concreto no fallará incluso bajo presiones extremas. Sin embargo, si se introduce una discontinuidad (por ejemplo, una burbuja de aire) en un campo de tensión, ya sea de tracción o de compresión, la burbuja perturba la tensión en la región circundante y en consecuencia actúa como un elevador de tensión. Si se aplica un esfuerzo de tracción o de compresión, el fallo es iniciado por esfuerzos de tracción locales alrededor de las discontinuidades y fallas.

Sin embargo, cuando se aplica compresión hidrostática, no se desarrolla tensión en la punta de ningún defecto con forma elipsoidal y probablemente no haya otro defecto con forma por lo que no se pueden romper los enlaces y no se produce agrietamiento.

Otras diferencias entre la tensión y la compresión son el patrón de agrietamiento y posiblemente el conductor de la propagación del agrietamiento. Las grietas se inician y se propagan cuando el material está lo suficientemente estresado para superar la fuerza de unión intermolecular / interatómica (fuerza cohesiva) y cuando hay suficiente energía liberada por un incremento en la longitud de la grieta para superar la demanda de energía para ese incremento (criterio de energía).

Tan pronto como se satisface la demanda de energía, la grieta comienza a extenderse y se propaga inestablemente causando fallas en la muestra: la tracción en la punta de la falla continúa aumentando mientras la grieta se propaga, ya que la carga aplicada es constante y el área de resistencia disminuye.

Tanto la resistencia cohesiva como los criterios de energía deben satisfacerse para que una grieta se alargue. En Tracción, es fácil satisfacer el primer criterio, por lo que la propagación se rige por el momento en que se cumple el segundo criterio.

- En el trabajo de Lone et al. [2018] sintetiza una serie de alternativas en términos de métodos Level set para la simulación de patrones de fisuración en materiales sólidos. En cuanto al método de elementos finitos extendidos (XFEM) asume que se usa para eliminar los inconvenientes de usar el método de elementos finitos para modelar la propagación de grietas en el dominio (se sabe que al usar FEM se tiene que refinar la malla en cada nuevo análisis, lo cual implica un considerable costo computacional).

A través de la partición de la unidad se agregan funciones de enriquecimiento especiales al método tradicional de elementos finitos para incorporar el efecto de diferentes discontinuidades en las formulaciones matemáticas. El método Level set es un algoritmo numérico que modela la evolución de un límite o interfaz presente en el dominio y su uso también simplifica la selección de nodos enriquecidos.

El método de conjunto de niveles se utiliza para representar y actualizar la geometría de la grieta y realizar un seguimiento preciso del crecimiento de la grieta a medida que se propaga a través del dominio. El método Level Set se utilizó para realizar un seguimiento de las grietas de propagación durante el crecimiento de la grieta utilizando conjuntos de niveles

y un método de elementos finitos extendidos con mallas que son independientes de las interfaces internas y la morfología del crack. Al usar el marco de la partición local de la unidad se modelan todas las discontinuidades y singularidades cercanas a la punta.

Para describir la geometría de las interfaces y la morfología de la fisura, los conjuntos de niveles se utilizan de manera que no se necesita una representación explícita de las grietas ni de las interfaces de material. Existen desarrollos para el método de conjunto de niveles junto con XFEM en la simulación numérica y modelado de fallas en materiales compuestos. La geometría de las interfaces de material y las grietas se describe mediante el método Level Set.

- En el trabajo de Patil et al. [2018], un método de elementos finitos multiescala (MsFEM) está acoplado con un método de campo de fase híbrido para simular problemas de fractura frágil. Este enfoque, junto con el mallado adaptativo, conocido como método de campo de fase de escala múltiple y adaptable (AMPFM), es bastante útil para el refinamiento de malla local.

Durante el refinamiento de la malla, los grados de libertad de la malla gruesa y la malla fina se vinculan mediante el uso de funciones de base multiescala. El enfoque de refinamiento de malla propuesto rastrea automáticamente una grieta de propagación y refina el dominio en la vecindad de la grieta utilizando los valores de la variable de campo de fase actual y su incremento.

Este enfoque cuando se aplica para simular el comportamiento de fractura de estructuras heterogéneas que contienen discontinuidades de pequeño tamaño distribuidas uniformemente (vacíos/inclusiones) conduce a una reducción significativa en la memoria y el tiempo de CPU.

Varios problemas numéricos se resuelven utilizando el AMPFM propuesto, y los resultados se comparan con el PFM estándar y los resultados de la literatura disponibles. En la formulación multiescala, los grados de libertad de escala fina y escala gruesa se acoplan mediante el uso de funciones de base multiescala. En el presente análisis de campo de fase, el campo de desplazamiento y el campo de fase de grieta se desacoplan y se resuelven de forma independiente.

Las funciones de base se construyen por separado para ambos campos. La condición de equilibrio se resuelve nuevamente para el modelo de elementos finitos a escala fina dentro del elemento grueso sometido a las condiciones de contorno mencionadas anteriormente.

Los desplazamientos u en todos los nodos de escala fina se obtienen de la solución, mientras que los desplazamientos de elementos gruesos ya se conocen a partir de las condiciones de contorno aplicadas. Para el caso del campo de fase de grietas, hay un grado de libertad por nodo.

Las funciones de base se pueden construir por separado. Por lo tanto, permite que PUFEM se combine con la formulación de campo de fase escalonada. La elección de las condiciones de contorno para la construcción de las funciones básicas tiene una gran influencia en la precisión de la solución multiescala. En este trabajo, se utilizan condiciones de contorno lineales para construir las funciones básicas.

- Rege y Lahmu [2017], efectúan una revisión del estado del arte asociado a los problemas de fracturas resueltos mediante técnicas XFEM. El primer problema al estimar las tasas de propagación de grietas por fatiga utilizando el método de elementos finitos es el cálculo de valores suficientemente precisos para el factor de intensidad de tensión para la grieta en las cargas máximas y mínimas aplicadas.

Para calcular el factor de intensidad de tensión, también se necesitan los campos de tensión y desplazamiento de todo el componente. Se conocen tres métodos simples para calcular los factores de intensidad de tensión de las grietas de modo I de un campo de tensión de elementos finitos. Estos métodos son: método de esfuerzo, método de desplazamiento y método de integral de línea, y todos se calcularon utilizando elementos de triángulo lineales (deformación constante) ordinarios, con un alto grado de refinamiento en la punta de la grieta.

La integral J puede evaluarse en un contorno remoto, como el límite exterior de la geometría, que mejora su precisión numérica, en comparación con el método de esfuerzo y el método de desplazamiento. Sin embargo, la aplicación de este método a problemas tridimensionales es más difícil porque la integral se convierte en una integral de superficie.

Es difícil definir la superficie y realizar la integración numérica. El método más preciso y eficiente para la evaluación numérica de la tasa de liberación de energía parece ser el método de dominio integral. Ellos calculan la integral J utilizando el teorema de divergencia,

en el que la integral de superficie tridimensional se transforma en una integral de dominio de volumen, que se evalúa mediante la cuadratura gaussiana.

- El trabajo de Rossi Cabral [2017] plantea un método para la obtención del factor de intensidad de tensiones mediante parámetros conocidos como el módulo E, el módulo G y la relación de Poisson μ . La formulación peridámica permite contabilizar la energía de deformación elástica dentro del cuerpo es posible realizar este cálculo en forma numérica. Para ello se determinan las energías para dos placas de igual geometría sometidas al mismo nivel de tensiones externas pero que difieren en la longitud de fisura. Una vez obtenido el valor de energía es posible calcular el factor de intensidad de tensiones.
- Nguyen et al. [2017] presenta un nuevo enfoque de simulación concurrente para el análisis isogeométrico (IGA) con el método sin malla para el estudio de problemas de grietas. En el presente método, el dominio físico general se divide en 2 subdominios que se formulan con el método IGA y mesh-free.

En el subdominio sin malla, la función de forma de mínimos cuadrados en movimiento se adopta para la discretización del área alrededor de las puntas de grieta, y el subdominio IGA se adopta en el área restante. Mientras tanto, la región de la interfaz entre los 2 subdominios se representa mediante funciones de forma acopladas.

La función de forma resultante, que comprende las funciones de forma libre de IGA y malla, satisface la condición de consistencia, asegurando así la convergencia del método. Además, se presentan las funciones de forma libre de malla aumentadas con las funciones de base enriquecida para predecir los campos de tensión singular cerca de la punta de una grieta. El enfoque propuesto también se aplica para simular la propagación de grietas en una condición de modo mixto.

- En Wang [2018], se estudia el problema de optimización de formas y topologías de las estructuras recubiertas en el marco de la representación de conjuntos de niveles. En comparación con el enfoque basado en la densidad del material que se basa en proyecciones de varios pasos, el método de ajuste de nivel puede proporcionar una descripción directa y exacta de la interfaz del material y la información geométrica, incluidas las direcciones normales del límite y el espesor del recubrimiento. Aunque la estructura recubierta consta de dos materiales (el material de recubrimiento y el material del sustrato), el método propuesto requiere solo una función de ajuste de nivel en la representación de la topología, lo que facilita el análisis de sensibilidad y la implementación numérica.

Se muestra que este método también puede extenderse naturalmente a problemas 3D. Una estructura recubierta consiste en un dominio de material de sustrato y un dominio de material de recubrimiento. El material de recubrimiento se coloca sobre las superficies del material de sustrato.

- El trabajo de Wilson et al. [2018] introduce una metodología basada en energía almacenada para calcular la fuerza motriz para el crecimiento de grietas que puede capturar la sensibilidad micro-estructural altamente local, esto en el contexto de las simulaciones de elementos finitos de plasticidad cristalina con representación explícita de la grieta mediante el Método de elementos finitos extendido (XFEM). Se ha demostrado que el modelo tiene buena concordancia con los modelos de plasticidad de dislocación discreta (DDP) en términos de la energía de configuración de dislocación de la punta de fisura, y con observaciones experimentales de grietas largas y muy cortas (sensibles a la microestructura) tanto para la resistencia a la fractura como para la tasa de crecimiento de grietas datos.

Se muestra que el método captura la sensibilidad micro-estructural, en contraste con el método J-Integral ampliamente utilizado. Al modelar diferentes longitudes de grieta, se cuantifica la disminución de la sensibilidad micro-estructural.

Visto el estado del arte se establece como proposición un marco de trabajo consistente en monitorear resultados experimentales en el campo elástico en primera instancia sobre la base de los resultados experimentales los cuales contienen información referente a instantes de rotura y efectos de agrietamiento en probetas.

En un segundo segmento poder validar modelos numéricos que contemplen este agrietamiento y este comportamiento no lineal a efectos de alcanzar idénticos valores de parámetros elegidos para el monitoreo estructural y la validación de resultados experimentales.

Luego de esto se propondrá un esquema simplificado para resolver parámetros de diseño de manera expeditiva y eficiente logrando balance entre convergencia y precisión para un problema de diseño estructural determinado.

Con respecto a la metodología a implementar será en las primeras etapas el método de elementos finitos para luego intentar rutinas XFEM en plataformas multifísica conocidas y

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

dejar sentadas bases para un código abierto de elementos finitos extendido que permita reproducir los parámetros más importantes que definen el comportamiento mecánico de los sistemas de mampostería reforzados con elementos de hormigón armado.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS CONSTRUCTIVOS UTILIZADOS EN LA REGIÓN.

Conceptos generales.

En la actualidad, es importante resaltar la diversidad de sistemas constructivos existentes en las diferentes zonas de la región central de la Provincia de Misiones. Para cada sistema se debe definir el conjunto de parámetros de diseño a optimizar, para luego comparar los diferentes sistemas constructivos en función del costo total mínimo de cada alternativa.

La realización del presente segmento el espectro observado se desarrolla principalmente en la zona centro de la Provincia de Misiones, Argentina, específicamente en la ciudad de Oberá y localidades próximas.

Por lo tanto en el presente segmento se detalla el procedimiento desarrollado para la caracterización georreferenciada de los sistemas constructivos y/o estructurales, a fin de mostrar las características de las diversas tipologías edilicias detectadas en las tareas de campo y gabinete para la elaboración de mapas regionales de sistemas constructivos tipificados en una cantidad definida de tópicos que están directa o indirectamente relacionados con las prestaciones estructurales en términos de propiedades mecánicas de estos sistemas.

Situación edilicia de la región. Caracterización georreferenciada de los sistemas constructivos adoptados en la Provincia de Misiones.

En el relevamiento realizado durante el período 2014 a 2015, según se puede apreciar en el esquema de la figura 3.1 se registraron las características de viviendas unifamiliares o multifamiliares, que posean dos plantas como máximo y que se encuentren ubicados según lo indicado para método 1 y método 2 evaluando los puntos marcados en cada gráfica para cada metodología.

Esto se adoptó por el hecho de que ciertos emplazamientos como es el caso de la Ciudad de Posadas y la Ciudad de Oberá poseen una densidad demográfica considerable con lo cual el muestreo requiere un costo computacional considerable que se pretendió balancear

evaluando por distancias de dos cuadras entre avenidas en vez de efectuarlo en cada esquina como muestra el método 2.

Se adoptó el mencionado muestreo como punto de partida para mantener balanceado el costo computacional de la tarea de caracterizar sistemas constructivos.

Con el objeto de correlacionar una codificación asignada fueron seleccionados seis tópicos de índole edilicia relacionados de forma inherente con los parámetros globales de rigidez y respuesta estructural de la vivienda: el tipo de cerramiento, si presenta algún daño, que tipo de revestimiento tiene esos cerramientos, cual es el tipo de carpintería utilizado, cual es la forma estructural adoptada para el sistema constructivo, y cuál es el tipo de cerramiento adoptado para la cubierta de techo, junto con coordenadas geográficas medidas según el sistema UTM (universal Transverse Mercator).

Para simplificar la representación gráfica en un mapa plano con diferentes series que representan los tópicos estructurales adoptados para la evaluación del proceso de caracterización de estos sistemas constructivos.

A efectos de enfocar el análisis del presente capítulo en el contexto de la estructura resistente, se decidió presentar ejemplos de los 6 tópicos analizados de la siguiente forma: los tópicos T1 T2 y T5 se presentan para 4 municipios de diferente magnitud y densidad poblacional mientras que los tópicos T3 T4 y T6 se presentan solo para los municipios de mayor jerarquía (Posadas y/o Oberá).

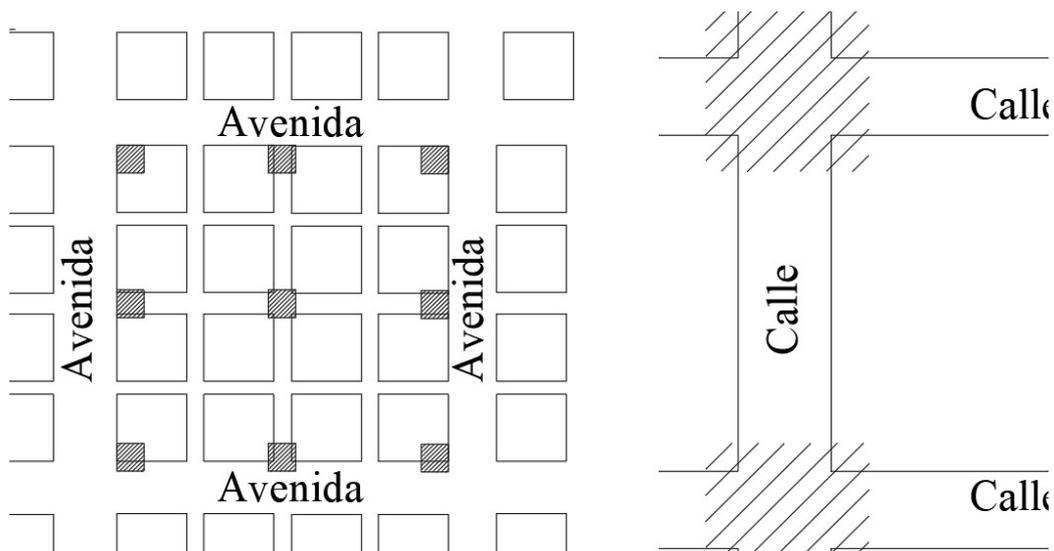


Figura 3.1. Esquema de estrategia de relevamiento para caracterización de sistemas constructivos.

En lo que respecta a zonas comerciales, se tuvieron en cuenta algunos locales que se consideraron relevantes. Como resultado de esta etapa se ha logrado confeccionar un mapa geo referenciado de sistemas constructivos el cual puede ser actualizado periódicamente según el alcance que se desee lograr.

Una vez confeccionado un mapa con las características edilicias y luego de procesar los datos obtenidos se puede inferir la tipología constructiva más frecuente en la región en diferentes contextos: tipos de cerramientos utilizados, cantidad de niveles de entepiso, tipo de solución resistente adoptada, calidad de los revestimientos utilizados en el edificio, tipo de cerramientos en cubierta de techos, patrones de daños observados, entre otros posibles de tenerse en cuenta.

Las edificaciones se relevaron en una primera etapa, mediante una inspección visual del estado de las construcciones. Paralelamente se utilizaron diferentes técnicas como el relevamiento en campo y herramientas informáticas tales como Google-Street View y dispositivos GPS para localizar cada edificación correctamente en el mapa.

El estudio se realizó siguiendo la codificación detallada en la tabla 3.1, generando para cada construcción un código de 12 dígitos, el cual va acompañado con las coordenadas de la vivienda:

<i>Tópico</i>	<i>Código</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tópico</i>	<i>Código</i>	<i>Descripción</i>
1-Pared	11	Maciza	4-Aberturas	41	Liviana
	12	Liviana		42	Pesada
	13	Ambos			
	14	madera			
2-Mantenimiento	21	correcto	5-Estructuras	51	Lineal
	22	regular		52	Superficial
	23	malo		53	Mixta
3-Terminación	31	Vista	6-Tipo Techo	61	Pesado
	32	Revocado		62	Semipesado
	33	ceramica		63	liviano
	34	varios tipos		64	carton
	35	Madera			

Tabla 3.1. Sistema de codificación de tópicos de caracterización.

Para la representación de la información relevada en campo fue necesario conocer la ubicación de cada punto en cuestión es que se optó por utilizar el sistema de posicionamiento global a efectos de contar con un sistema universal de ubicación y posicionamiento.

Para la representación gráfica de esta información se adaptó a un sistema de coordenadas cartesianas o coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) recurriendo para ello a las fórmulas de Coticchia-Surace.

Se seleccionó este método por su sencilla implementación en hoja de cálculo para procesar datos de magnitud considerable. La formulación mencionada fue basada en el trabajo de Moreno Cichela [2016] que se detalla en el párrafo siguiente.

Procedimiento para el tratamiento de coordenadas geográficas y su conversión al sistema UTM.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para efectuar el tratamiento de coordenadas asignadas a cada sistema constructivo en un mapa georreferenciado. El proceso comienza partiendo de datos pertenecientes al elipsoide de Hayford los cuales representan el semieje mayor y el semieje menor llamados a y b respectivamente:

$$a = 6378388,00.-$$

$$b = 6356911,946130.-$$

Los siguientes parámetros a calcular son la excentricidad, la segunda excentricidad, el radio polar de curvatura y el aplanamiento.

$$e = \sqrt{\left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}\right)} \quad (3.1)$$

$$e' = \sqrt{\left(\frac{a^2 - b^2}{b^2}\right)} \quad (3.2)$$

$$c = \left(\frac{a^2}{b}\right) \quad (3.3)$$

$$\alpha = \left(\frac{a-b}{a}\right) \quad (3.4)$$

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

e: excentricidad.

e': segunda excentricidad.

c: radio polar de curvatura.

a: Aplanamiento.

Luego se convierten las coordenadas geográficas de latitud y longitud desde grados sexagesimales a grados decimales para luego pasarlos a radianes. Luego se establece el signo de la longitud en función a su posición respecto del meridiano de Greenwich, siendo positivo el valor si la longitud está referida al oeste del mencionado meridiano.

Dicho procedimiento fue implementado en hoja de cálculo para obtener las coordenadas UTM de viviendas relevadas en los distintos emplazamientos urbanos analizados. En la tabla 3.2, se presenta un ejemplo de codificación realizado con los datos obtenidos durante el relevamiento correspondiente a la ciudad de Oberá.

En la misma se procedió a convertir las coordenadas geográficas obtenidas por sistema GPS (Global Position System) dadas para latitud y longitud en grados decimales a las correspondientes coordenadas UTM a efectos de elaborar los respectivos mapas con un menor consumo de recursos computacionales.

id	T1	T2	T3	T4	T5	T6	X	Y
1	11	21	32	41	51	63	610199.921	6972532.561
2	12	21	32	42	51	63	610197.436	6972121.536
3	12	22	32	41	53	63	610194.951	6972330.279
4	11	21	32	42	51	62	610175.07	6971911.799
5	12	21	31	41	51	62	610142.268	6971507.235
6	11	22	34	41	51	62	610106.483	6971711.008
7	11	21	34	42	53	61	610097.537	6971090.744
8	13	22	34	42	53	62	610081.633	6972975.891
9	11	22	32	42	53	61	610007.43	6972779.573
10	11	21	34	42	52	63	609993.414	6971341.235
11	12	22	32	41	52	62	609986.208	6972570.333
12	11	21	31	41	51	63	609964.836	6971008.737

Tabla 3.2. (Codificación y coordenadas UTM).

Luego para mejorar la representación de la información recolectada se utilizó en cada tópicos su código por separado en una serie diferente (para el tipo de mamposterías se aprecian

series 11 12 y 13 en nube de puntos de colores diferentes ubicados geográficamente en coordenadas UTM), con el fin de simplificar la presentación de los datos en cada mapa.

Los códigos se forman colocando los parámetros asignados en cada tópico uno seguido del otro. De todas formas cada sistema constructivo queda codificado de manera general con su código de 12 dígitos.

Respecto al tópico T2 el análisis se subdivide en viviendas/edificios con un mantenimiento correcto y viviendas con un mantenimiento regular y/o malo en función a cuestiones como ser: fisuras visibles, manchas de humedad, posible evidencia de descenso en pisos.

Los emplazamientos edilicios analizados fueron: Posadas, Oberá, Campo Viera, y San Vicente. Se tienen datos de otros municipios que no se procesaron para este trabajo por no considerarlos representativos de la situación general que se ve en el resto de las urbes auscultadas.

Se presenta a continuación y como primer resultado del trabajo producido en el presente capítulo mapas edilicios de cada localidad en términos del tipo de mampostería utilizado y discriminado geográficamente en tres series: viviendas de Ladrillo LM, viviendas de Ladrillo LCH y por último viviendas que tienen una combinación de ambos tipos de mamposterías.

Tópico T1: Caracterización de cerramientos adoptados en Viviendas y otras construcciones edilicias.

A continuación se muestran los mapas correspondientes al Tópico T1: Tipos de cerramientos utilizados. La figura 3.2 muestra las edificaciones relevadas en el municipio de San Vicente ubicado en el Departamento de Guaraní de la Provincia de Misiones.

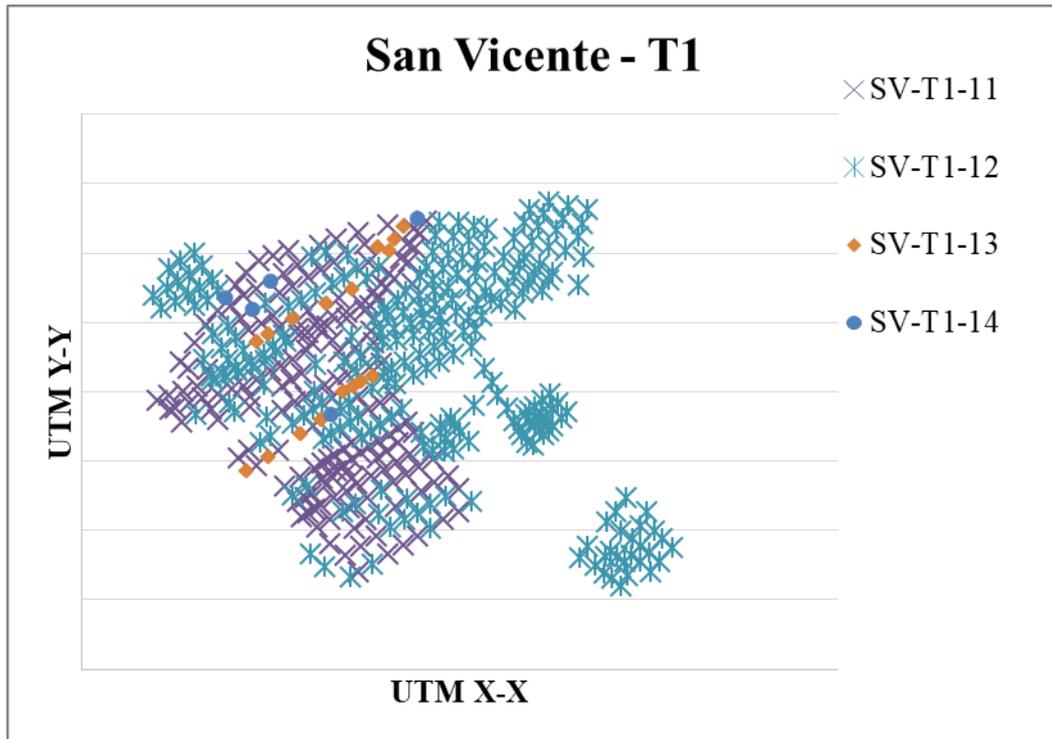


Figura 3.2. Tópico T1 de tipos de cerramientos: Municipio de San Vicente.

Para el municipio de San Vicente se pudo observar un porcentaje considerable de uso de los cerramientos de ladrillos LCH (Ladrillo Cerámico Hueco) en zonas diferentes en las cuales se visualizan en proporción similar el uso del ladrillo macizo (LM) como alternativa para los cerramientos de viviendas. Las combinaciones de ambas soluciones se concentran sobre avenidas principales y no representan un porcentaje importante al igual que las viviendas de madera que aparecen en ubicaciones aisladas dentro del ejido urbano.

La ciudad de San Vicente tiene en su desarrollo demográfico grandes extensiones de tierras no explotadas en el contexto habitacional. Dicho de otra forma quedan extensiones rurales muy cercanas o en situación de zona urbana en donde no se ha explotado la posibilidad de subdividir y emplazar sistemas de viviendas con lo cual el presente mapa presenta en algunos sectores hacia el cuadrante oeste – sur ciertos lugares en donde no se visualizaron emplazamientos habitacionales densos.

Todo parece indicar que los espacios hacia donde el crecimiento demográfico se orientó presenta como opción el sistema de cerramiento LCH, lo que se puede deber a que son emplazamientos de viviendas sociales financiadas por el Instituto Provincial de Desarrollo Habitacional (IProDHa). En este tipo de emplazamiento es común la solución de utilizar viviendas construidas con LCH.

En el caso de viviendas o edificios con combinaciones de ladrillos LM y LCH se pudo observar que por lo general los cerramientos originales son macizos y las ampliaciones refacciones y/o remodelaciones se realizaron utilizando LCH como material de cerramiento.

La figura 3.3 presenta la tipificación realizada en tópicos T1 para la Ciudad de Posadas, capital de la Provincia de Misiones y ubicada en el departamento capital hacia el sur oeste en cercanías del límite con la Provincia de Corrientes.

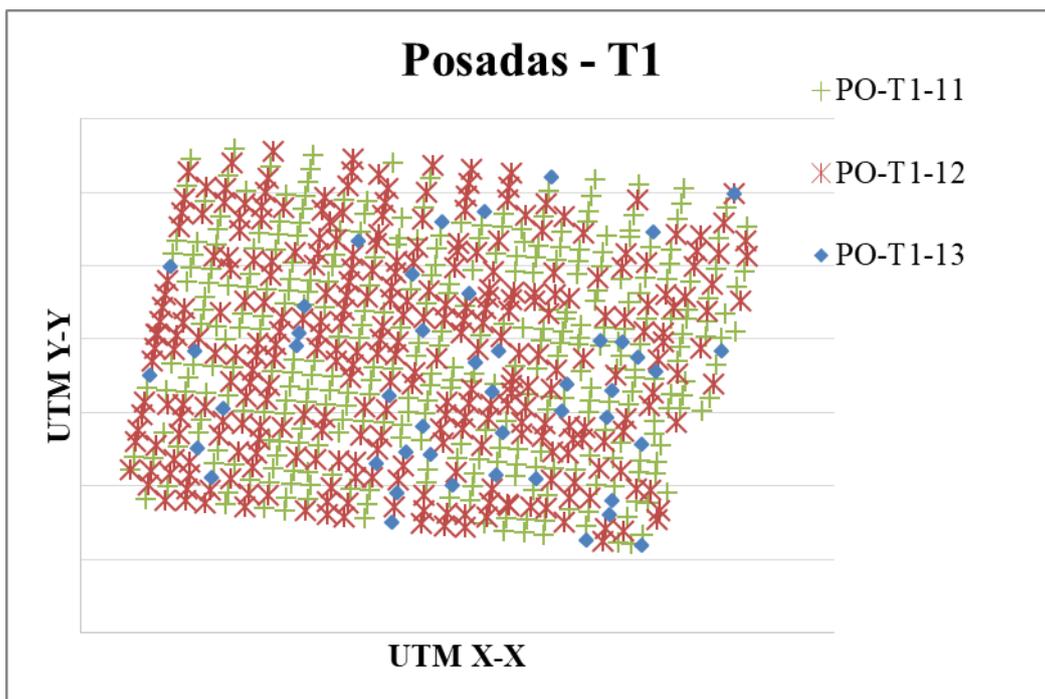


Figura 3.3. Tópico T1 de tipos de cerramientos: Municipio de Posadas.

Para el municipio de Posadas se analizó el cuadro confinado entre avenidas Jauretche, Urquiza y Quaranta mientras que el límite al oeste lo dio la avenida costanera. En general se pudo observar que las opciones elegidas se encuentran distribuidas de manera uniforme en la trama urbana volviendo a ser poco usual el caso de combinaciones de Ladrillos LM y LCH.

Se estima que la distancia a las olerías ubicadas en los sectores cercanos a la costa simplifican la decisión de uso de la opción de cerramiento con ladrillos LM. Si observamos hacia el lado Este sobre Avenida Jauretche las viviendas construidas con LCH aumentan en cantidad.

Las ubicaciones de sistemas constructivos ejecutados con LCH vuelven a coincidir con la ubicación de los emplazamientos de viviendas sociales financiadas por el IProDHa. Cabe destacar para el caso de Posadas se adoptó el metodo 1 para el tipo de relevamiento.

Es decir que cada punto está ubicado a 200 mts en promedio del próximo. Con esto queda asentado que para un análisis más detallado basta con aumentar la densidad de puntos relevados.

De esa forma se puede analizar con un mayor grado de detalle acosta de incrementar el costo computacional de manera considerable. Esto se ha descartado por que el espíritu de la tesis corresponde al campo de la optimización probabilística estructural.

Por otra parte da una opción como trabajo futuro la información recolectada, no solo en el ámbito de la construcción de edificios sino también en términos del crecimiento de municipios en la Provincia de Misiones.

La figura 3.4 representa la situación T1 para el municipio de Campo viera en el sector del casco Histórico de la ciudad el cual muestra una densidad poblacional reciente en pleno crecimiento.

Esto explica que en proporción es de los 4 asentamientos relevados el que presenta mayor proporción de viviendas de madera en condiciones precarias las cuales se señalan en el tópic CV-T1-14.

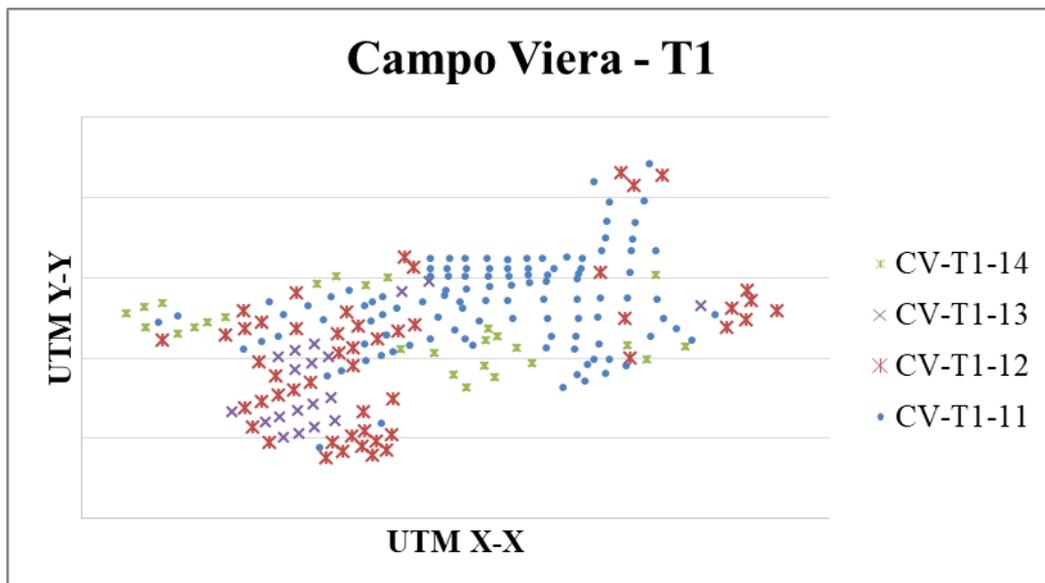


Figura 3.4. Tópico T1 de tipos de cerramientos: Municipio de Campo Viera.

Para el municipio de Campo Viera se analizó lo que se puede apreciar corresponde a zona céntrica de la ciudad y algunos desplazamientos demográficos orientados hacia el Oeste

traspasando la Ruta Nacional 14. Se pudo visualizar poco uso de LCH y una cantidad considerable de viviendas de madera.

La proporción de combinaciones entre LM y LCH se da en el caso de viviendas sociales que corresponden a los últimos prototipos lanzados por el IProDHa en donde se combinan fachadas elaboradas con ladrillos LM con el resto de la vivienda elaborada mediante uso de LCH.

En este caso aparecen nuevamente viviendas de madera pero distribuidas de forma diferente dado que aparecen casos tanto en la periferia como en las inmediaciones del centro cívico de la ciudad. Hay un mayor porcentaje de viviendas ejecutadas con LM.

Esto puede deberse a que existen olerías cercanas al casco céntrico que presentan en apariencia menor costo potencial en términos de su logística dado que las distancias son relativamente cortas. Para el caso de Campo Viera se puede ver que extensión tienen los emplazamientos de viviendas sociales si se observan los sub tópicos 12 y 13 como un solo caso.

El metodo utilizado para relevar en este caso fue el 2 (la distancia entre viviendas es de aproximadamente 100 mts). La baja cantidad de casos relevados se debe la baja densidad poblacional que presenta este municipio ubicado a 23 Km de la ciudad de Oberá y curiosamente su dirección de crecimiento es transversal a la dirección de la ruta 14.

Este hecho se señala solo a título informativo dado que en los casos analizados hay formas diferentes de avance en cada municipio que dependerán en principio de la ubicación de la vía principal de comunicación pero que en el caso de Campo Viera se adopta un esquema diferente.

En la figura 3.5 se describe la distribución T1 para la ciudad de Oberá ubicada en la zona centro de la Provincia de Misiones, con una población que ronda los 100.000 Habitantes y la cual ha tenido un crecimiento disperso en los últimos 15 años a raíz de los emplazamientos habitacionales bastante dispersos.

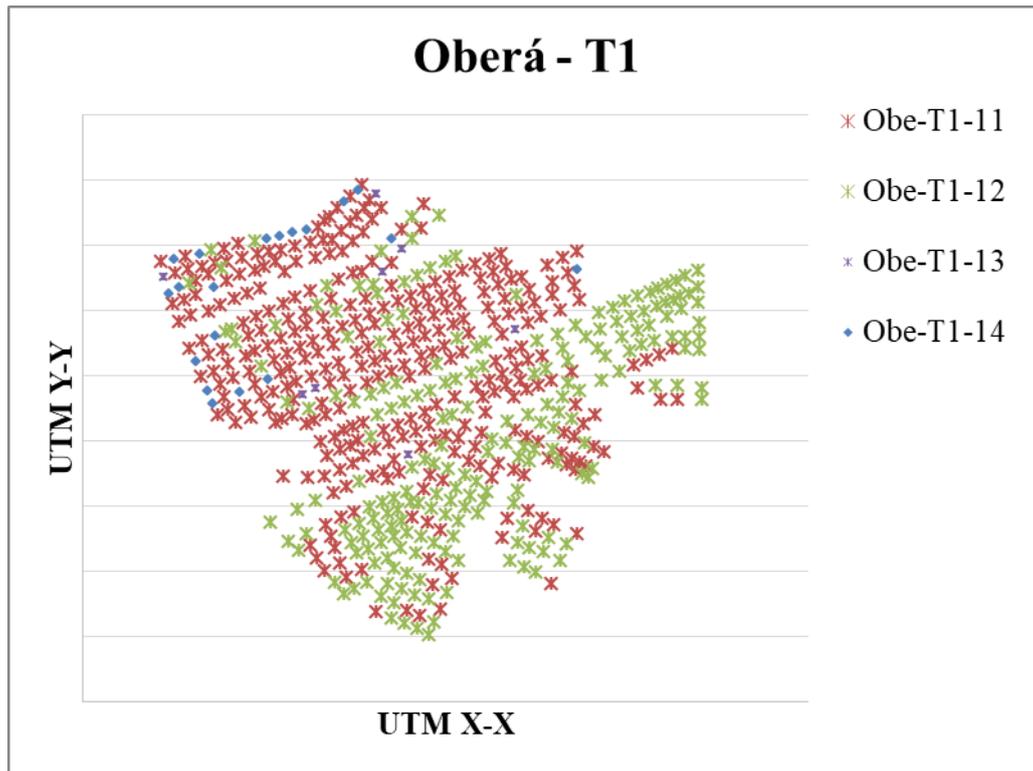


Figura 3.5. Tópico T1 de tipos de cerramientos: Municipio de Oberá.

Se observa que la mayoría de las construcciones son de mampuestos cerámicos tanto livianos como macizos y que en varios casos se puede apreciar una combinación de ambos.

En la ciudad predominan las construcciones de ladrillos LM sobre las edificadas con mampuestos livianos hacia el lado del casco histórico de la ciudad o bien en las zonas más antiguas siendo menos representativas aquellas que presentan una combinación de ambos y observándose una mayor densidad de edificios construidos con LCH en zonas de emplazamiento reciente.

En cuanto a la distribución de cada tipo de mampuesto se puede observar que las tipologías se encuentran uniformemente distribuidas en el mapa. Si bien no se puede evidenciar en las tablas y mapas anteriores, se ha observado que las edificaciones que presentan Ladrillos LCH son relativamente nuevas pues en la mayoría de los casos se corresponden con viviendas de menos de 20 años de edad como así también ampliaciones de vivienda de mayor edad que fueron ejecutadas con esta tecnología.

Así mismo, aquellas edificaciones que se registraron con el tópico "ambos", se refiere a edificaciones de ladrillos LM que han realizado ampliaciones más recientes con ladrillos LCH. Esto se encuentra relacionado con que la ciudad, al tener aproximadamente 90 años,

posee edificaciones antiguas de ladrillos LM, que eran los fabricados en la zona para luego mostrar un cambio de criterio de elección hacia los ladrillos LCH.

Al adaptarse los fabricantes a las nuevas tecnologías y debido al bajo costo de los mampuestos livianos en términos de comparación con los ladrillos LM por calidad y disponibilidad uniformes.

Con respecto al contexto general se ha observado una fuerte tendencia al uso de LCH en zonas linderas con avenidas principal y fue muy frecuente encontrar edificaciones que combinan en estos casos locales comerciales en planta baja con viviendas unifamiliares a partir de planta alta y/o pisos subsiguientes.

En estas edificaciones ha predominado el uso de ladrillos LCH para los cerramientos mientras que casas más antiguas ha predominado el uso de ladrillos LM revocados y solo en el caso de ampliaciones aparece como alternativa el uso de LCH en sectores ampliados donde en algunos casos aparecen patologías en forma de fisuras que acompañan la junta entre paredes construidas en diferentes etapas.

Esto puede aludir a que no se toman los recaudos adecuados al momento de ejecutar un correcto anclaje entre ambas etapas, o bien disponer los recursos arquitectónicos que permitan inducir y controlar dicho agrietamiento que en principio parece inevitable.

Con respecto al tipo de ladrillo LM utilizado es diverso al parecer por la diferente y considerable variedad de colores y texturas que estos presentaron. Esto puede justificarse en el hecho que la Provincia de Misiones tiene una considerable variedad de tipos de arcilla según la zona de donde provienen, lo cual permite inferir que la composición química y por lo tanto sus propiedades mecánicas pudieran ser diferentes en forma importante.

Tópico T2: Caracterización de mantenimiento de Viviendas y otras construcciones edilicias.

A continuación, se muestran los mapas correspondientes al Tópico T2: Tipo de mantenimiento observado en construcciones edilicias relevadas. La clasificación se ha discriminado en edificio con correcto mantenimiento, edificios con mantenimiento regular y edificio que presentan un incorrecto mantenimiento.

Con respecto al criterio adoptado para definir esta categoría se ha basado en las marcas características de un estado de mantenimiento de la construcción edilicia que responden a situaciones como ser manchas de humedad, estados visibles de fisuración, mapeos de grietas en revestimientos revocados y eventuales marcas de descenso en el piso en los encuentros con las mamposterías

En la figura 3.6 se describe la distribución T2 para la ciudad de San Vicente ubicada en la zona centro de la Provincia de Misiones.

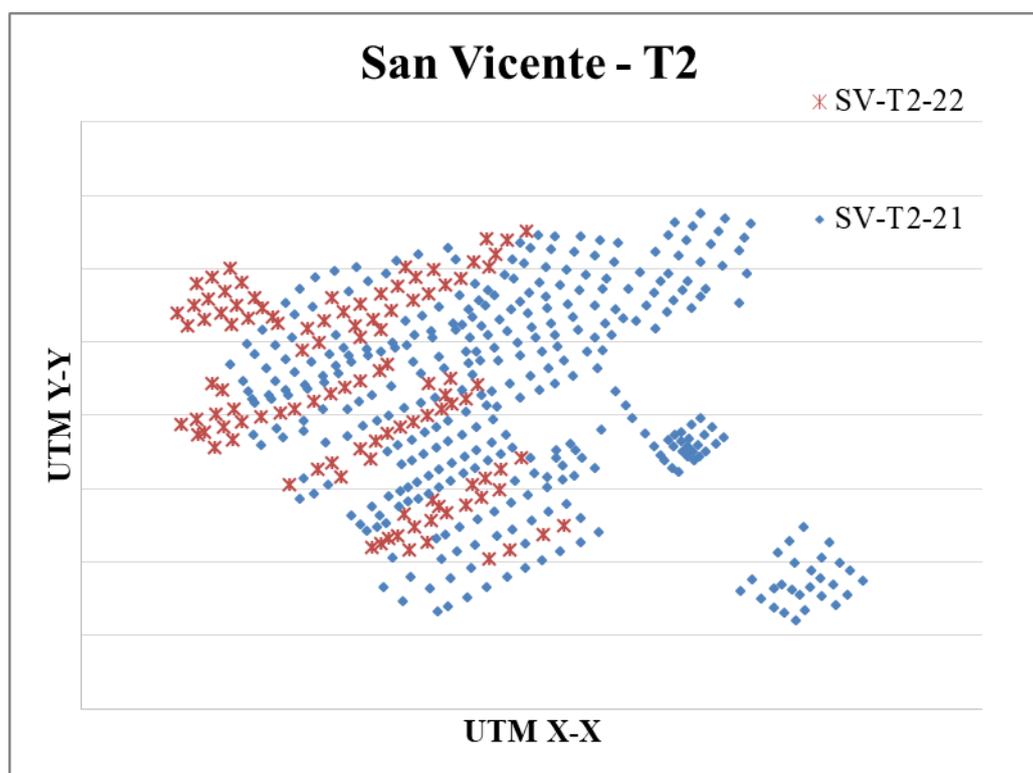


Figura 3.6. Tópico T2 de tipos de mantenimiento: Municipio de San Vicente.

La considerable cantidad de casos etiquetados como T2-21 (adecuado mantenimiento) se puede relacionar con la edad de las edificaciones que es relativamente corta, es decir se trata de cuerpos edilicios de conformación reciente que todavía no requieren su primer proceso de mantenimiento.

En menor cantidad aparecen los casos de mantenimiento no adecuado en su mayoría sobre arterias principales de la ciudad o sobre lados de la ruta Nacional N° 14 que cruza la ciudad por el lateral correspondiente al lado norte de la misma.

En la figura 3.7 se observa el caso de la ciudad de Posadas, en donde se puede apreciar que los problemas de mantenimiento surgen en los sectores más alejados de la costa que a su vez coinciden con las edificaciones catalogadas como T1-12.

Es posible que los sectores de menor poder adquisitivos se encuentran alejados de la zona céntrica de la ciudad y en ese caso no hay lugar a establecer un mantenimiento adecuado de las edificaciones.

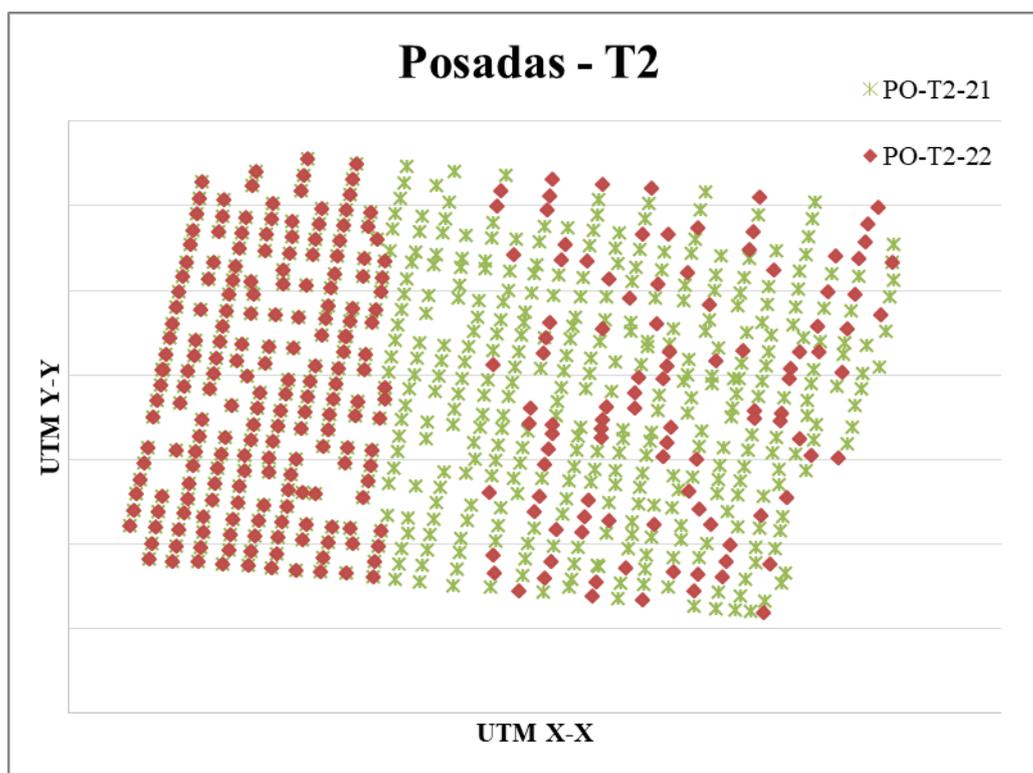


Figura 3.7. Tópico T2 de tipos de mantenimiento: Municipio de Posadas.

La figura 3.8 presenta el tópico T2 para el caso del municipio de Campo Viera. Se observan casos de mantenimiento no adecuado aislados y dispersos. La densidad poblacional de este emplazamiento es menor a las observadas en los demás municipios relevados.

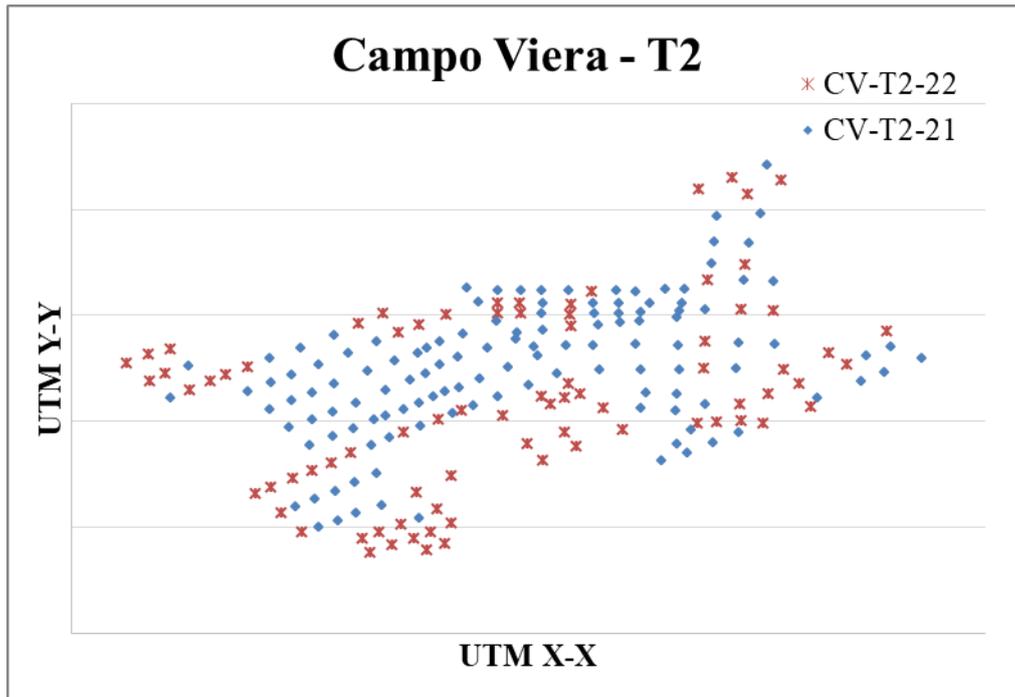


Figura 3.8. Tópico T2 de tipos de mantenimiento: Municipio de Campo Viera.

La Figura 3.9 presenta la distribución T2 para la Ciudad de Oberá en términos del tipo de mantenimiento recibido en las construcciones edilicias analizadas. Hay sectores específicos distribuidos en los que se observa un tipo de mantenimiento no adecuado.

En este municipio se pudo apreciar una cantidad considerable de casos en el tipo T2-22 en donde se observan estados de fisuración principalmente en caso de construcciones ejecutadas con ladrillos LCH. Respecto a las construcciones hechas con ladrillos LM, la mayoría de ellas en este municipio aparecieron en formato de ladrillo LM a la vista, como mínimo en la fachada y por lo general en todo el perímetro de la vivienda o edificación.

A continuación se muestran los mapas del Tópico T5: tipo de Estructura Resistente. En cuanto a esta categoría se adoptó el criterio de clasificar lo observado según tres grupos.

Un primer grupo correspondiente a aquellas edificaciones en donde la estructura resistente se compone de elementos lineales como ser encadenados y/o refuerzos verticales conectados entre sí (T3-51).

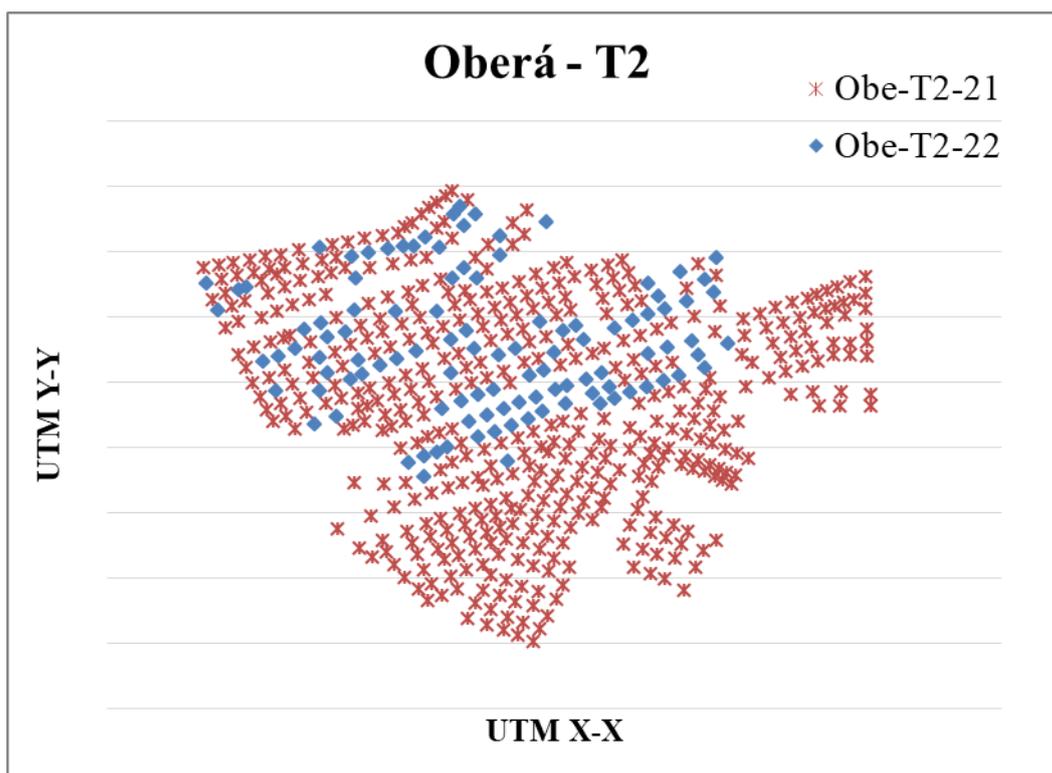


Figura 3.9. Tópico T2 de tipos de mantenimiento: Municipio de Oberá.

Tópico T5: Caracterización de mantenimiento de Viviendas y otras construcciones edilicias.

Un segundo grupo de cuerpos edilicios que tienen una estructura compuesta de diafragmas horizontales como ser losas de hormigón armado que están apoyados en forma directa sobre mamposterías de ladrillo ya sea LCH o LM (T3-52).

El tercer grupo los comprenden aquellas edificaciones que poseen una combinación de lo anterior conformando una estructura resistente independiente de Hormigón Armado (T3-53).

La figura 3.10 representa la distribución T5 para el caso de la ciudad de San Vicente. En esta grafica se observó una variedad interesante de los tres casos mencionados anteriormente.

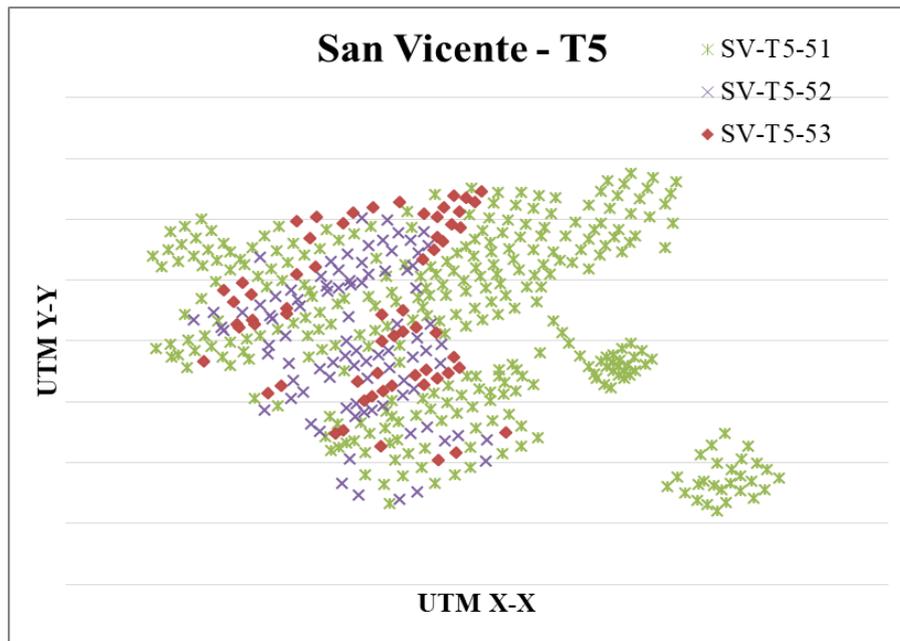


Figura 3.10. Tópico T5 de tipos de Estructura: Municipio de San Vicente.

Se observó también un predominio de las estructuras de tipo lineal en los emplazamientos correspondientes a conjuntos habitacionales de viviendas sociales lo cual no descartó la aparición de combinaciones T3-53 en cercanía de las avenidas principales y alrededor de la zona de emplazamiento de la terminal de ómnibus de la ciudad en donde se observando varios edificios de más de una planta con estructura independiente cerrados con LCH.

Se aprecia combinar más de un tópico en una codificación concatenada, reuniendo en grupos según los criterios descritos al principio de este segmento, por ejemplo, combinando el tipo de mamposterías con la manera en que fue definido el planteo estructural para cada emplazamiento.

En la figura 3.11 se observa el caso de la Ciudad de Posadas. Se pudo observar mayor cantidad de edificios en zonas alejadas del centro donde se replicó el formato de local comercial en planta baja con distribuciones de viviendas multi-familiares en pisos subsiguientes.

Fueron de cantidad menor los casos en donde la estructura se desarrolló en forma de diafragmas (losas apoyadas sobre paredes de mamposterías). El mayor número de edificaciones relevadas correspondió al caso de estructuras resistentes de tipo lineal conformadas por encadenados verticales y horizontales dispuestos en aristas de las edificaciones.

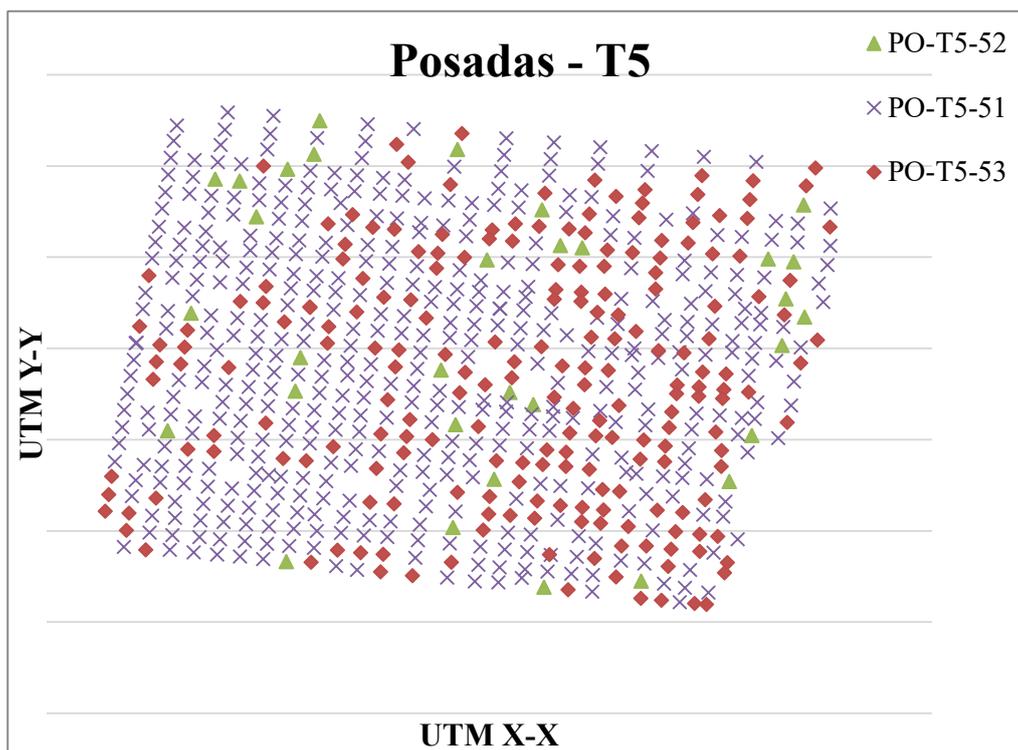


Figura 3.11. Tópico T5 de tipos de Estructura: Municipio de Posadas.

En la figura 3.12 se muestra el caso de la Ciudad de Campo Viera respecto al tópico T5 referentes a tipos de estructura.

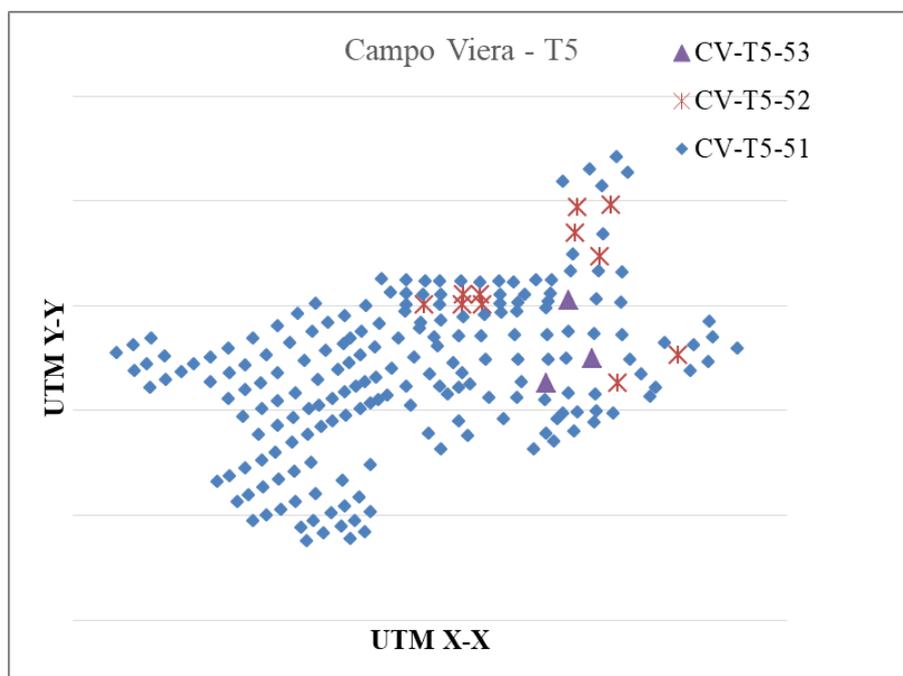


Figura 3.12. Tópico T5 de tipos de Estructura: Municipio de Campo Viera.

En el caso de Campo Viera al ser un municipio de corta edad no se observaron casos de estructuras independientes de varios pisos. Se observó a la vez una considerable cantidad de estructuras lineales y casos aislados de edificaciones con losas apoyadas sobre paredes de mampostería.

Es este caso se hace interesante utilizar una codificación combinada entre tópicos T1 y T5 al igual que en el caso de San Vicente para poder efectuar comparaciones de esta índole entre municipio que se encuentran transitando diferentes edades de crecimiento demográfico.

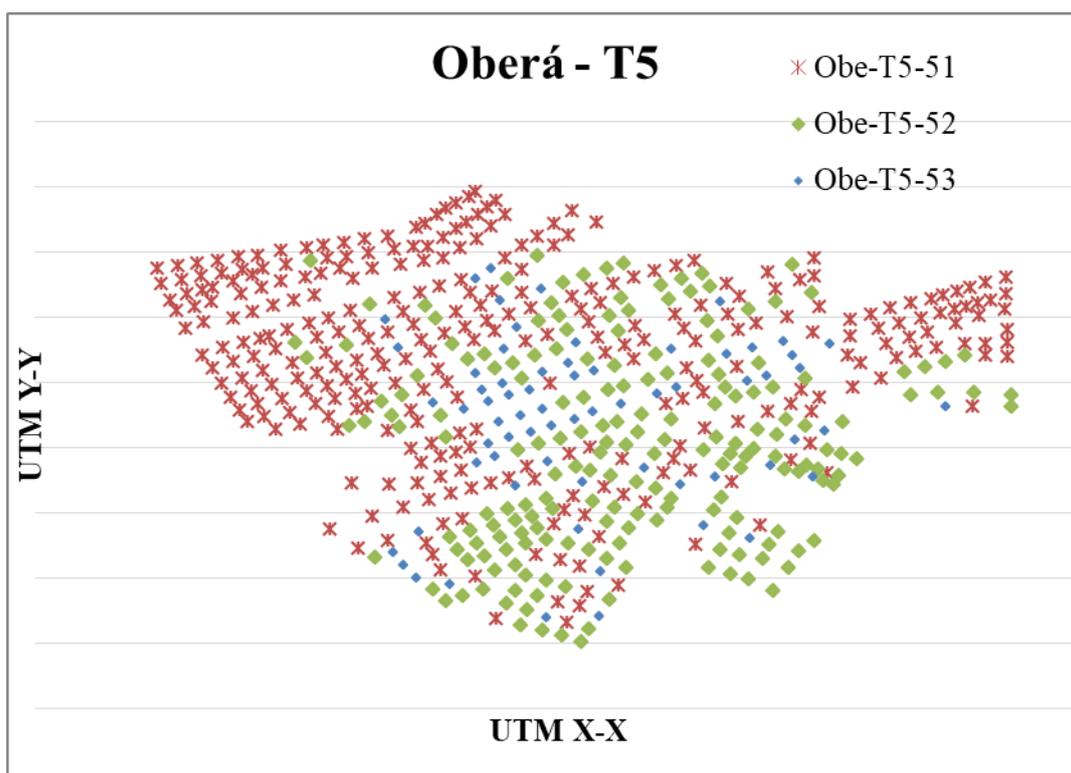


Figura 3.13. Tópico T5 de tipos de Estructura: Municipio de Oberá.

La figura 3.13 presenta datos relevados para el municipio de Oberá. El orden de proporción entre las diferentes categorías mostro un rango de uniformidad mayor en cantidad de casos observados habiendo una distribución pareja en cantidad para cada tipo de estructura definida.

En zonas correspondientes al casco céntrico se observado una cantidad creciente de edificios con estructura independiente mientras que los casos para estructuras lineales y superficiales aparecieron en el sector de análisis de una forma ecuánime.

Combinaciones de Tópicos: Correlación de los tópicos adoptados como principales para el relevamiento de construcciones edilicias.

A continuación se presentaron los mapas correspondientes a tópicos concatenados para los cuatro municipios relevados combinando T1 y T5 que son los que corresponden a tipos de mampostería y tipos de estructura resistente utilizados en la ejecución de los sistemas constructivos.

Comenzando en la figura 3.14 con el municipio de Oberá para combinación de T1 y T5 se puede apreciar el predominio de sistemas ejecutados en planta baja con sistema lineal de encadenados y ladrillos LM (1151) por un lado y de sistemas estructurales lineales con ladrillo LCH (1251) mientras que sobre avenidas aparecen construcciones con estructura independiente (1253) de más de un piso al menos.

El resto de las combinaciones son aisladas y pertenecientes en su mayoría a puntos singulares dentro del ejido urbano o en la periferia del casco céntrico. También se observa una zonificación de los casos más frecuentes hacia ambos lados de la ciudad. Hacia el lado Nor-oeste son más frecuentes las combinaciones de LM y estructura lineal y hacia el lado opuesto las combinaciones de LCH y estructura lineal.

Cabe destacar la movilidad que puede sufrir estos análisis dado que pueden mutar en mediano lapso de tiempo, es decir en pocos años puede haber cambios importantes.

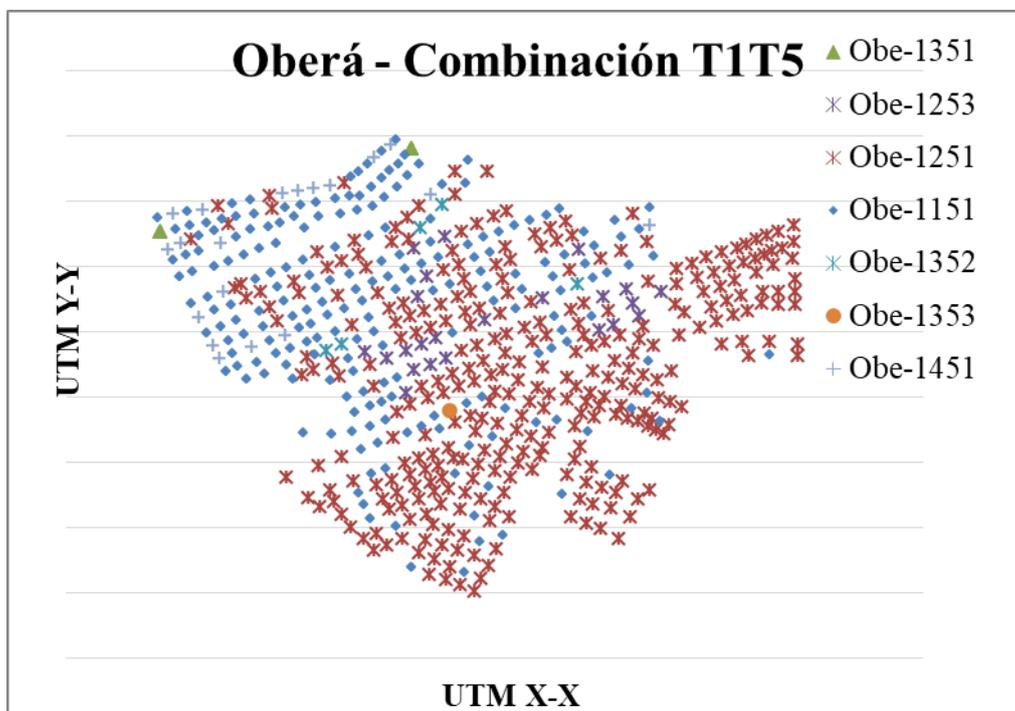


Figura 3.14. Tópico T1T5 Combinados: Municipio de Oberá.

La siguiente figura 3.15 muestra la situación para el caso del municipio de San Vicente. En lo que respecta a las viviendas de una planta la proporción de sistemas ejecutados con LCH es levemente mayor a los ejecutados con LM.

Luego se observa el emplazamiento sobre avenidas principales de la combinatoria correspondiente a edificios de más de una planta (1253 y 1353). Las viviendas restantes como ser las combinaciones de LM y LCH con diferentes tipos de solución estructural presentan una proporción más importante en este caso que en los anteriores en cuanto al análisis general de esta combinación.

Se observa en este caso que las construcciones sobre avenidas están dirigidas al formato de local comercial con viviendas en planta alta en uno o más pisos. Las zonas de crecimiento más recientes han utilizado la combinación de LCH y Estructura lineal (1251).

Se vuelve a observar esta sectorización geográfica entre los casos 1151 y 1251 pero esta vez en dirección Este-Oeste. Los casos 1251 alejados del casco céntrico corresponden a emplazamiento de viviendas sociales financiadas por le IProDHa. Sobre Ruta 14 predomina el uso de LM con distintas soluciones estructurales adoptadas.

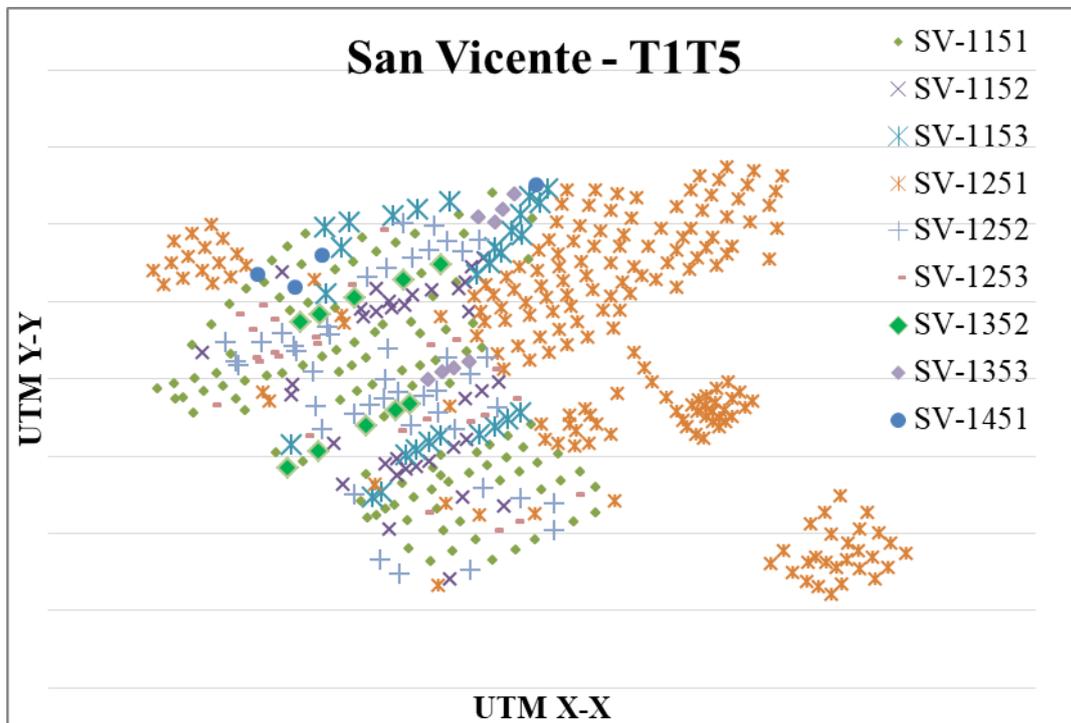


Figura 3.15. Tópico T1T5 Combinados: Municipio de San Vicente.

En la figura 3.16 se presenta para análisis la situación de la Ciudad de Posadas en términos de muros y sistemas resistentes. Cabe destacar que la distancia entre puntos relevados es de 200 mts en orden aproximado. Nuevamente predominan las soluciones en planta baja con uso exclusivo de solo un tipo de ladrillo (1151 o 1251).

Hacia el lado del casco céntrico aparecen los casos de estructuras de más de un piso (1153 y 1253). Los casos 1252 y 1152 correspondientes a viviendas de una planta techadas con losa de hormigón no han sido tan frecuentes. Se observan casos aislados fueran del casco céntrico.

En cuanto a las combinaciones de LM y LCH en una misma construcción no presenta una proporción considerable y se presentan en términos geográficos de manera aislada por la periferia del casco céntrico. En este relevamiento no se han detectado viviendas de maderas lo cual no indica que en punto no relevado no existan a pesar de que no formen parte principal del espíritu del presente trabajo de tesis doctoral.

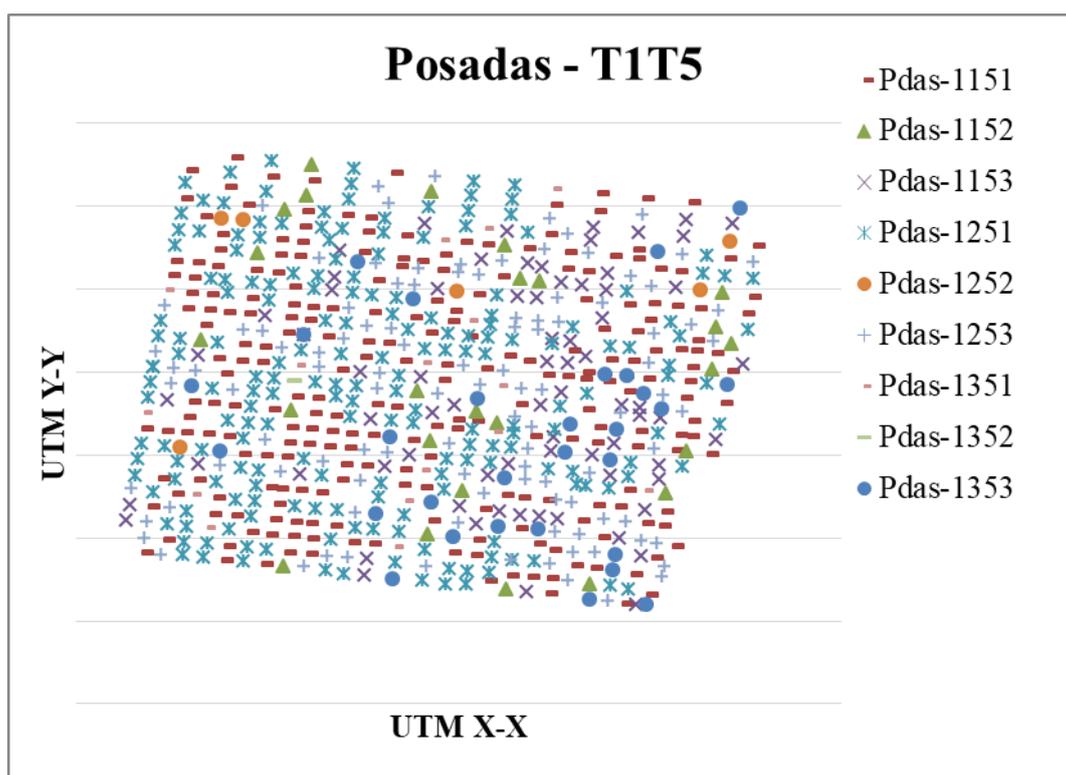


Figura 3.16. Tópico T1T5 combinados: Municipio de Posadas.

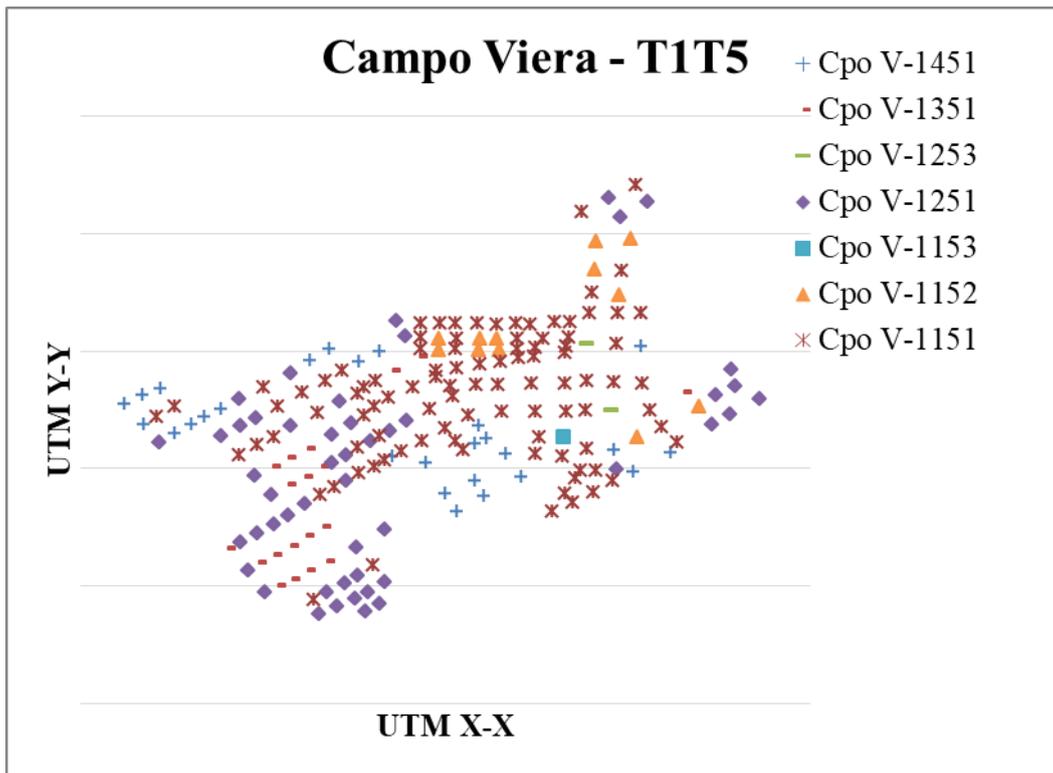


Figura 3.16. Tópico T1T5 Combinados: Municipio de Campo Viera.

En el municipio de Campo Viera tal cual se muestra en la figura 3.16 se puede observar que las combinaciones son diferentes a los casos anteriores a pesar de tener en cuenta que también difiere en términos de densidad poblacional. Hay mayor proporción de viviendas de madera ejecutadas en planta baja.

Las combinaciones LM y LCH corresponden a emplazamientos de viviendas sociales financiadas por IProDHa en los cuales se previó el uso de ladrillos LM en las fachadas según prototipos del año 2010 en adelante. Los casos 1151 y 1251 vuelven a ser lo más frecuentes en este municipio. Aparecen algunos casos de Losas de techo apoyadas sobre muros (1152-1252).

El casco céntrico presenta casos 1151 en la mayor parte de los casos relevados. Sobre la Ruta Nacional 14 predominan casos de viviendas de Ladrillo LM ejecutadas en planta baja. Se relevó un solo caso de construcción de ladrillos en más de una planta con estructura resistente planteada en forma independiente.

A continuación se presentan los mapas correspondientes a tópicos concatenados para los cuatro municipios relevados combinando T2 y T5 que son los que corresponden a tipos de

mantenimiento en viviendas y tipos de estructura resistente utilizados en la ejecución de los sistemas constructivos.

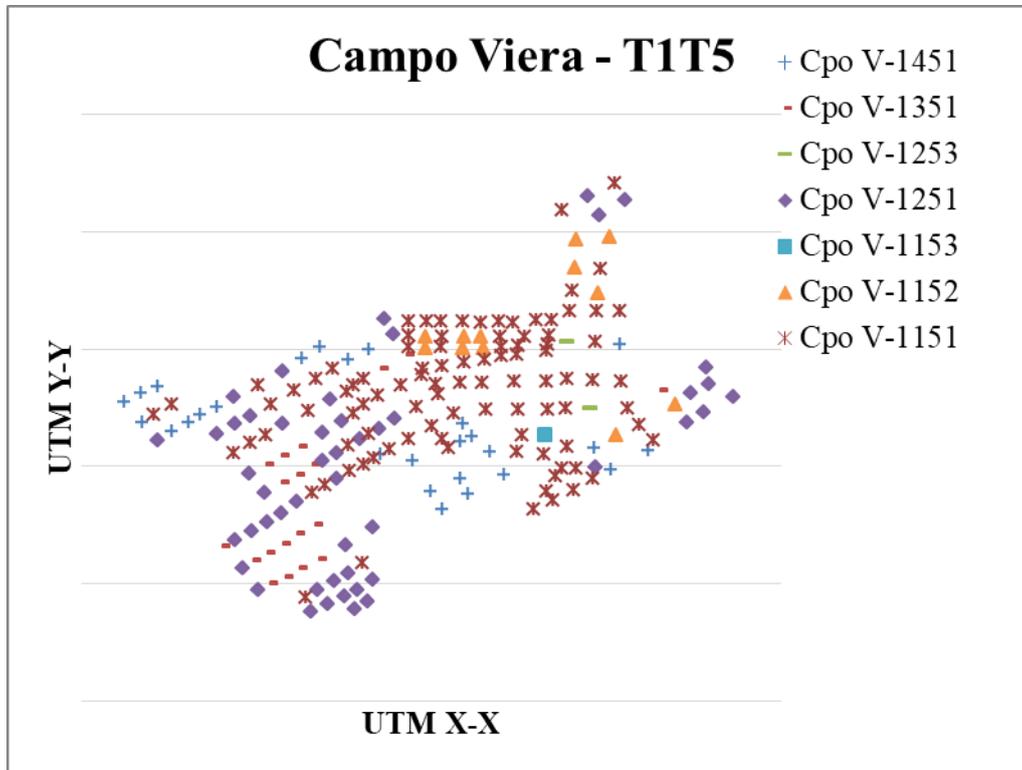


Figura 3.17. Tópico T2T5 Combinados: Municipio de San Vicente.

La Figura 3.17 muestra el caso T2T5 para el municipio de San Vicente. En esta ciudad se pudo observar el grado de mantenimiento de las construcciones el cual es regular en su mayor proporción sin discriminar el tipo de estructura utilizado para la construcción edilicia.

En general las edificaciones emplazadas en avenidas principales mostraron un mantenimiento adecuado así como en general las viviendas de una planta más alejadas del casco céntrico.

A su vez existen zonas marcadas en forma específicas en donde el mantenimiento se observó regular lo que corresponde a algunos sectores aislados en el cuadrante que dan al oeste (Combinación 2251).

Las estructuras de más de una planta mostraron un mantenimiento adecuado en mayor proporción habiendo casos aislados en donde el mismo se observó como regular.

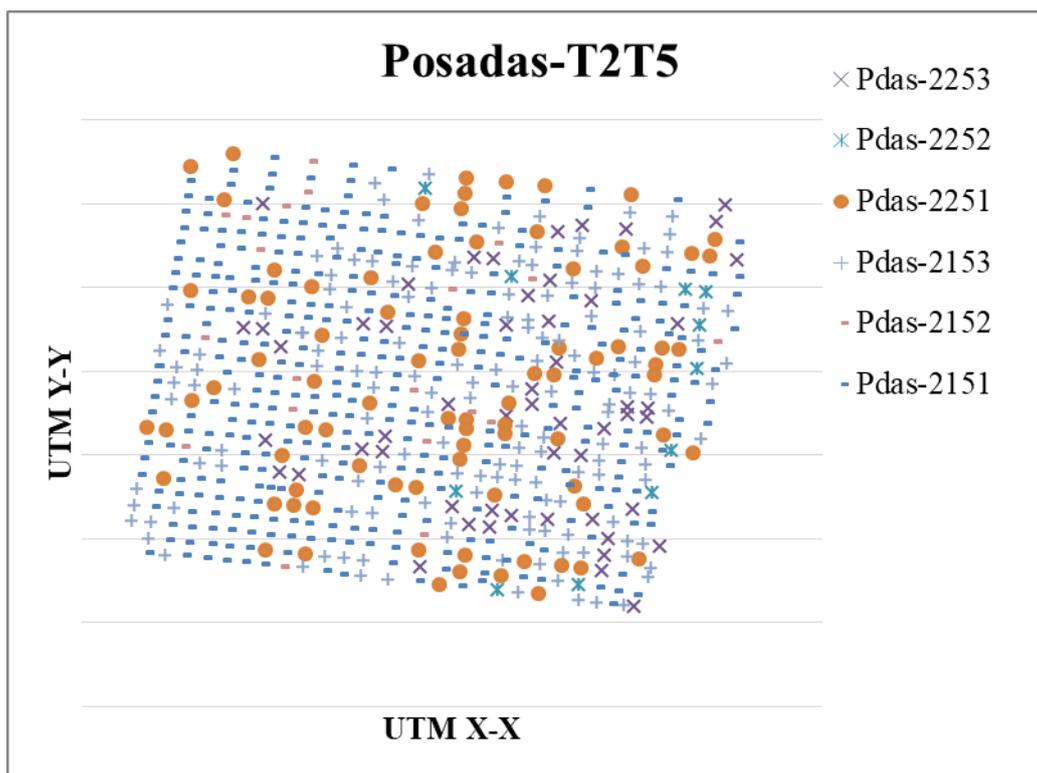


Figura 3.18. Tópico T2T5 Combinados: Municipio de Posadas.

En la figura 3.18 se presentó la situación combinada T2T5 para la Ciudad de Posadas. En este caso se observó que lo más frecuente fueron las construcciones correctamente mantenidas en alturas de una planta.

Las construcciones de más de una planta mostraron un mantenimiento regular en su mayoría. Las construcciones correspondientes a combinaciones 2152 y 2252 fueron de menor proporción predominando el correcto mantenimiento.

En la figura 3.19 se representó la combinación T2T5 para el caso de Campo Viera. Dicho Municipio mostró variedad en cuanto al tipo de mantenimiento observado. En general se observaron situaciones de un correcto mantenimiento. En casos de viviendas de una planta y otras techadas con losas de hormigón armado se observaron situaciones mantenimiento regular.

La distribución de estos casos es diversa denotándose los casos de poco o regular mantenimiento en la periferia del casco céntrico.

Para la figura 3.20 se preparó el relevamiento T2T5 en el caso de la Ciudad de Oberá. De lo observado se pudo apreciar que la mayor parte de las situaciones de mantenimiento regular se dieron en construcciones de planta baja y en la mayoría de las construcciones de más de una planta con estructura independiente. Dichos casos aparecieron dispersos en el mapa predominando en la mayoría de los casos el correcto mantenimiento en las construcciones.

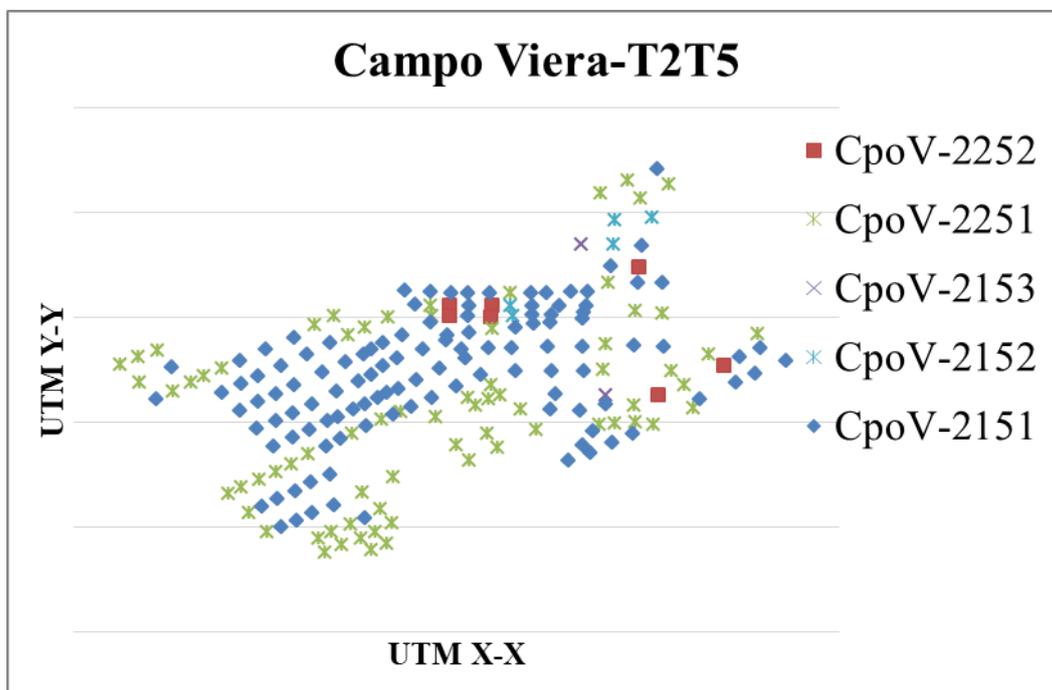


Figura 3.19. Tópico T2T5 Combinados: Municipio de Campo Viera.

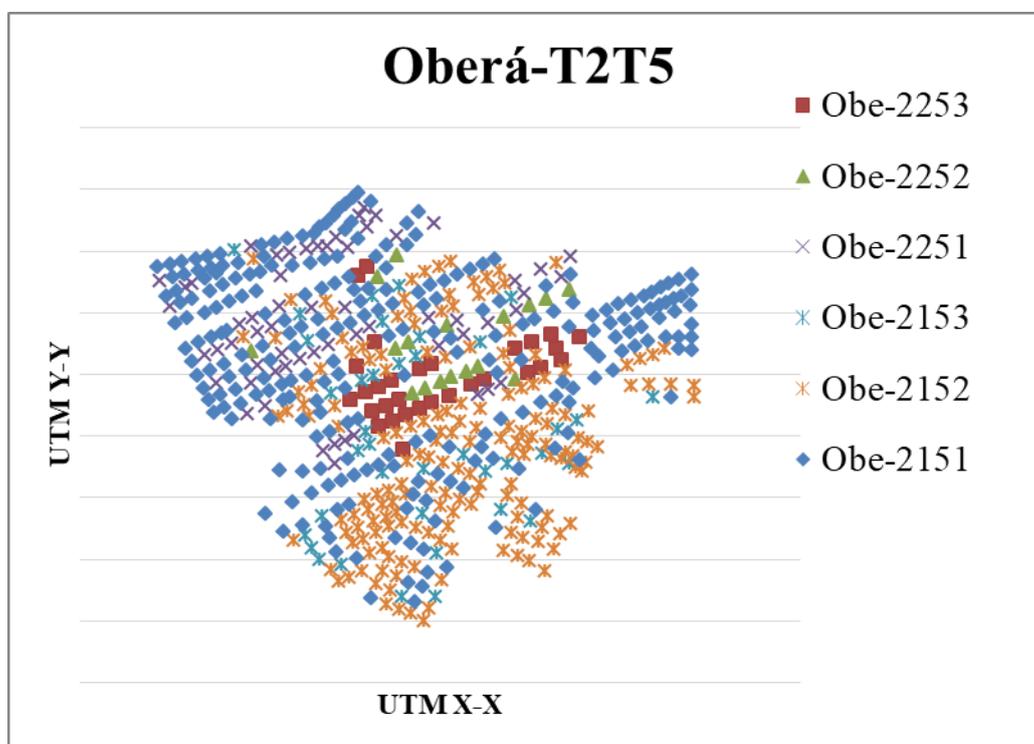


Figura 3.20. Tópico T2T5 Combinados: Municipio de Oberá.

En general se observaron diferentes situaciones para los 4 municipios lo cual abre la posibilidad de cuestiones a tener en cuenta en términos de correlacionar tipos de cerramiento y/o estructura con situaciones de mantenimiento de las edificaciones.

El aporte de esta información se pudo capitalizar en el proceso de selección del prototipo a analizar en términos de sus prestaciones mecánicas una respuesta estructural que pueda optimizarse con restricciones de confiabilidad.

Por último se combinaron los tópicos T1 y T2 para evaluar el mantenimiento y el tipo de cerramiento adoptado lo cual se plasmó en las próximas figuras. En la figura 3.21 se representó el caso de la ciudad de Posadas en donde se pudo observar que tanto las construcciones cerradas con LM como aquellas ejecutadas con LCH presentaron pocos casos de mantenimiento regular.

En el caso de las construcciones de LM hubo casos en donde se observó un mal mantenimiento de la construcción auscultada. En los casos en donde el mantenimiento no fue correcto no hubo un patrón geográfico característico y las situaciones ocurrieron en diferentes puntos de la ciudad dando lugar a estimar o inferir independencia de las patologías respecto de la posición geográfica.

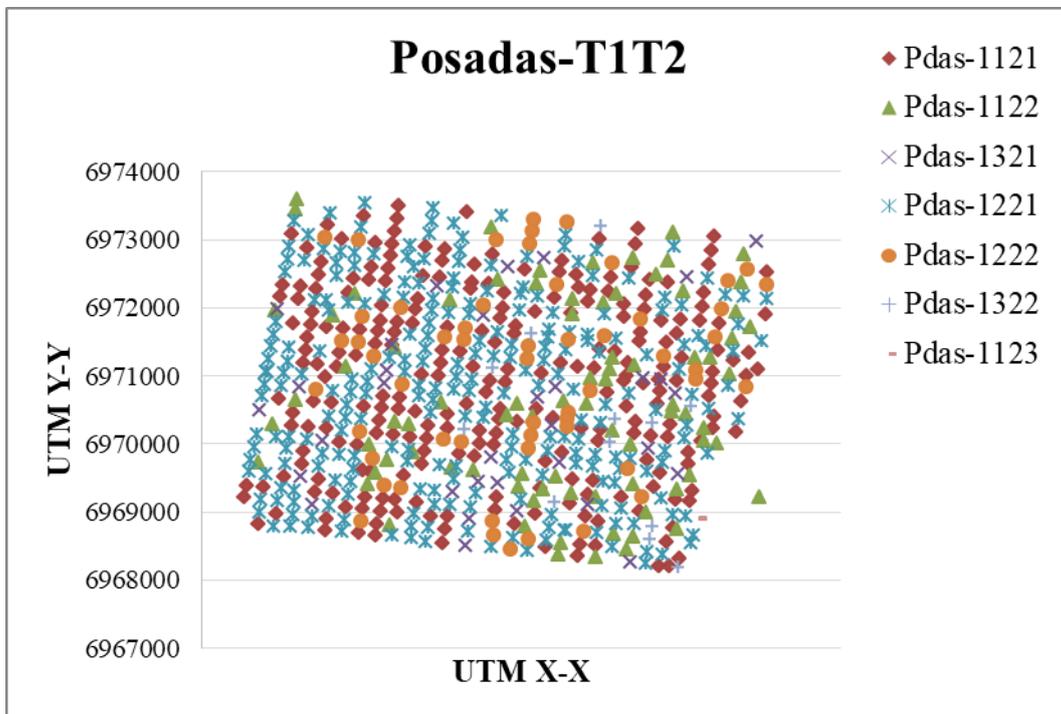


Figura 3.21. Tópico T1T2 Combinados: Municipio de Posadas.

Los casos de mal mantenimiento ocurrieron casi en los límites de la zona relevada algunas veces sobre avenidas principales y otras veces sobre calles internas. Las construcciones que tienen combinación de tipos de ladrillo en su construcción presentaron algunos casos de mantenimiento regular en forma aislada sin un patrón geográfico.

En la figura 3.22 ha recopilado los resultados de la combinación T1T2 para el caso de la ciudad de Oberá en donde se pudo observar que los casos de mantenimiento regular se detectaron en la zona del casco céntrico tanto en edificios construidos con LM y LCH o alguna combinación de estos.

Para este último tipo de combinación (1322) se detectaron casos en la periferia. En la combinación 1222 correspondiente a LCH y mantenimiento regular se observaron algunos casos en la periferia.

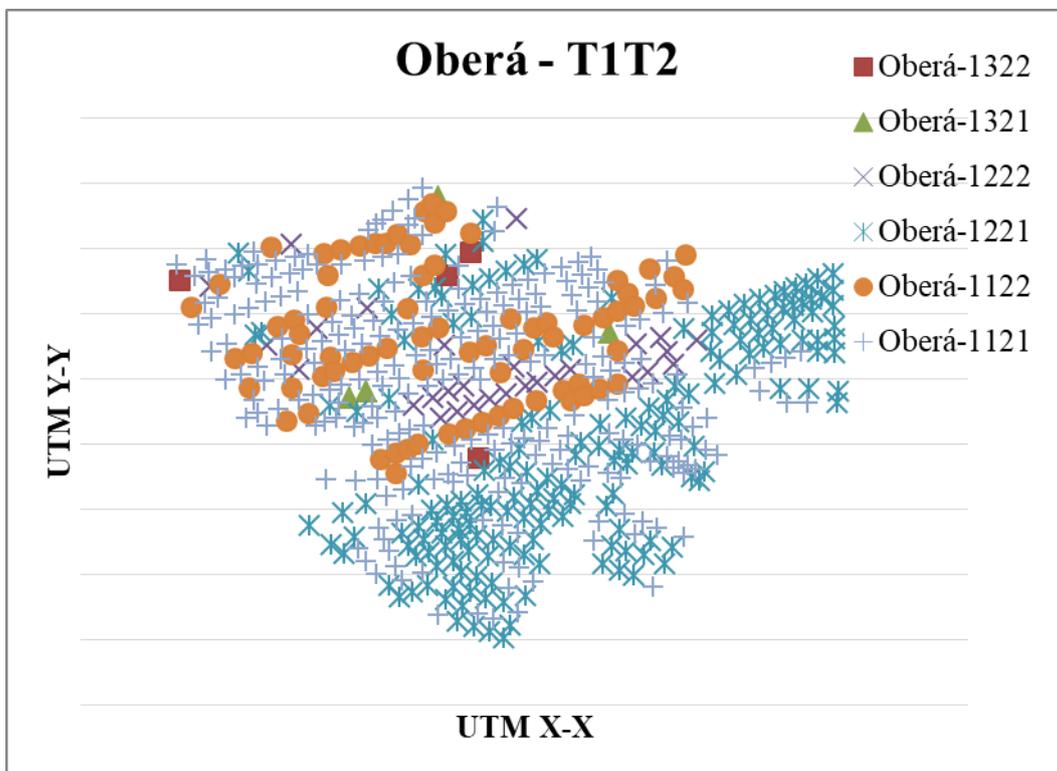


Figura 3.22. Tópico T1T2 Combinados: Municipio de Oberá.

En la figura 3.23 se presentó el caso del municipio de San Vicente el cual mostró que los casos de mantenimiento regular 1122,1222 y 1322 aparecieron en el sector Oeste y Norte-Oeste.

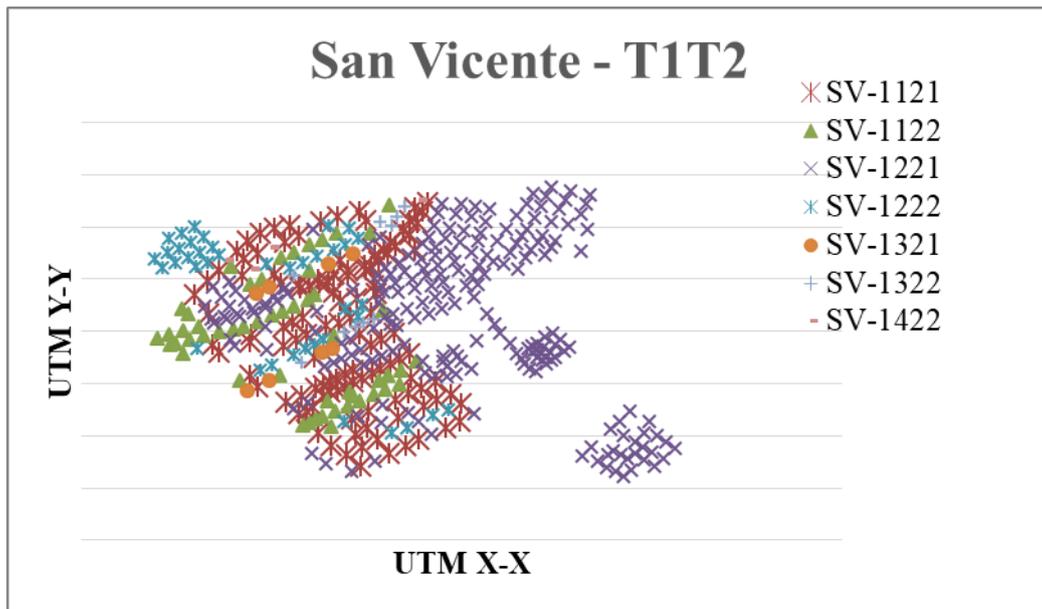


Figura 3.23. Tópico T1T2 Combinados: Municipio de San Vicente.

En la figura 23 se presentó el caso del municipio de San Vicente el cual mostró que los casos de mantenimiento regular 1122,1222 y 1322 aparecieron en el sector Oeste y Norte-Oeste. En general en este municipio el mantenimiento de construcciones edilicias se apreció como adecuadamente correcto.

La mayor parte de las viviendas construidas con ladrillos LCH mostraron un mantenimiento correcto lo cual puede correlacionarse con la edad de estas construcciones dado que en construcciones de mayor edad edilicia se detectaron más casos de mantenimiento regular.

Por último se observó el caso del municipio de Campo Viera que se ve representado en la figura 3.24. Casi todas las viviendas de madera mostraron mantenimiento regular a título informativo.

Con respecto a los casos de mantenimiento regular aparecieron en todos los tipos de cerramiento en proporción aceptable y reducida a pesar del hecho que se trata de un emplazamiento más reciente que en los demás casos analizados.

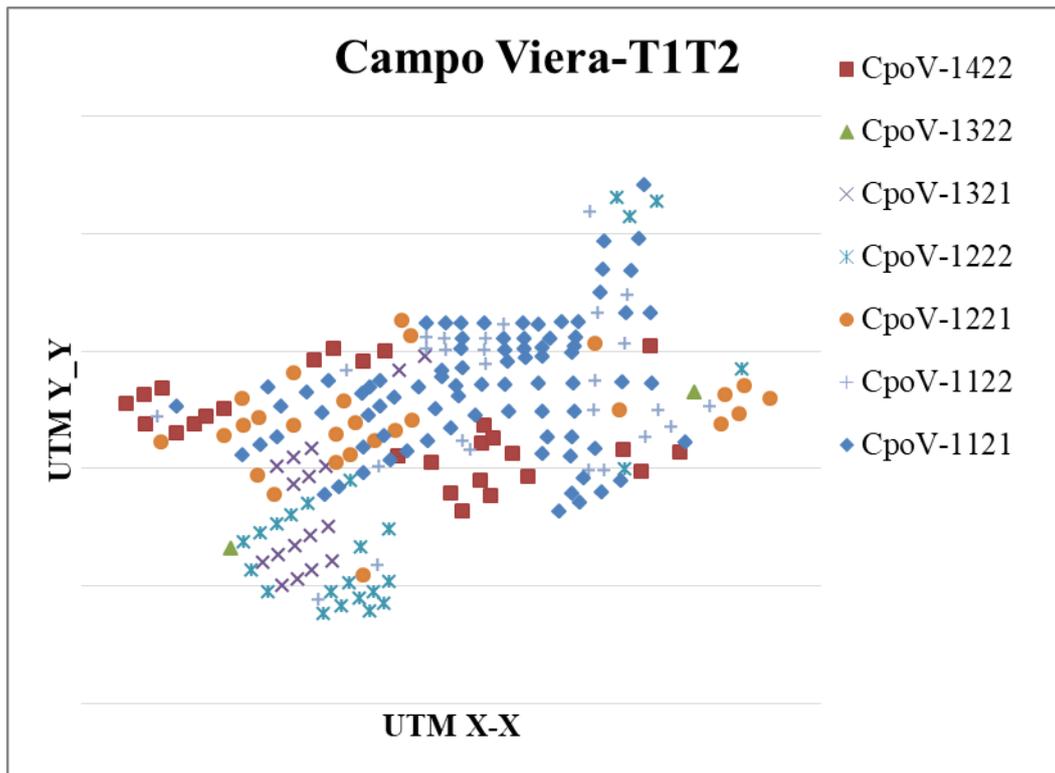


Figura 3.24. Tópico T1T2 Combinados: Municipio de Campo Viera.

Los casos de mantenimiento regular se presentaron en forma dispersa y sin un patrón definido por todo el sector relevado. Por lo demás en la mayoría de los casos se observó un tipo de mantenimiento correcto en general. Esto puede deberse a que el emplazamiento es de edad menor respecto al resto de los municipios relevados.

En una síntesis general se pudieron evaluar los principales tópicos para el presente trabajo que sirve a efectos de validar la selección de un prototipo de estudio para analizar su comportamiento mecánico y evaluar cómo establecer pautas que mejoren sus prestaciones así como elaborar una superficie de respuesta del problema en cuestión.

De lo analizado aquí se tienen elementos suficientes para realizar dicha selección con un conjunto de criterios basados en las tendencias que son adoptadas al hablar de sistemas constructivos en la Provincia de Misiones.

Tópicos Secundarios: características que inciden en forma indirecta en el comportamiento de sistemas constructivos.

Luego de haber evaluado los tópicos principales cuyos cambios afectan de manera directa la respuesta mecánica de un sistema constructivo se propuso presentar algunos mapas

georreferenciados que muestran otras características de los sistemas constructivos como ser: tipo de revestimiento de los cerramientos, tipo de carpintería adoptada, y el tipo de cubierta de techo elegida para cada caso. Se tomaron para este segmento los emplazamientos habitacionales de mayor densidad es decir la Ciudad de Posadas y la Ciudad de Oberá por considerar esto suficiente para completar el panorama del análisis georreferenciado de los cuerpos edilicios en esta provincia.

Para el caso de Oberá se analizó primeramente el tipo de revestimiento utilizados en las construcciones. Esto se plasmó en la figura 3.25 en donde se pudo observar que alternativas más seleccionadas por los usuarios son la pared a la vista y la pared revocada con motero (opciones 31 y 32 respectivamente).

En segunda instancia se observaron combinaciones de los anteriores en menor proporción y por ultimo las viviendas de maderas cuyos cerramientos son tablas cerradas con tapajuntas en la mayoría de los casos.

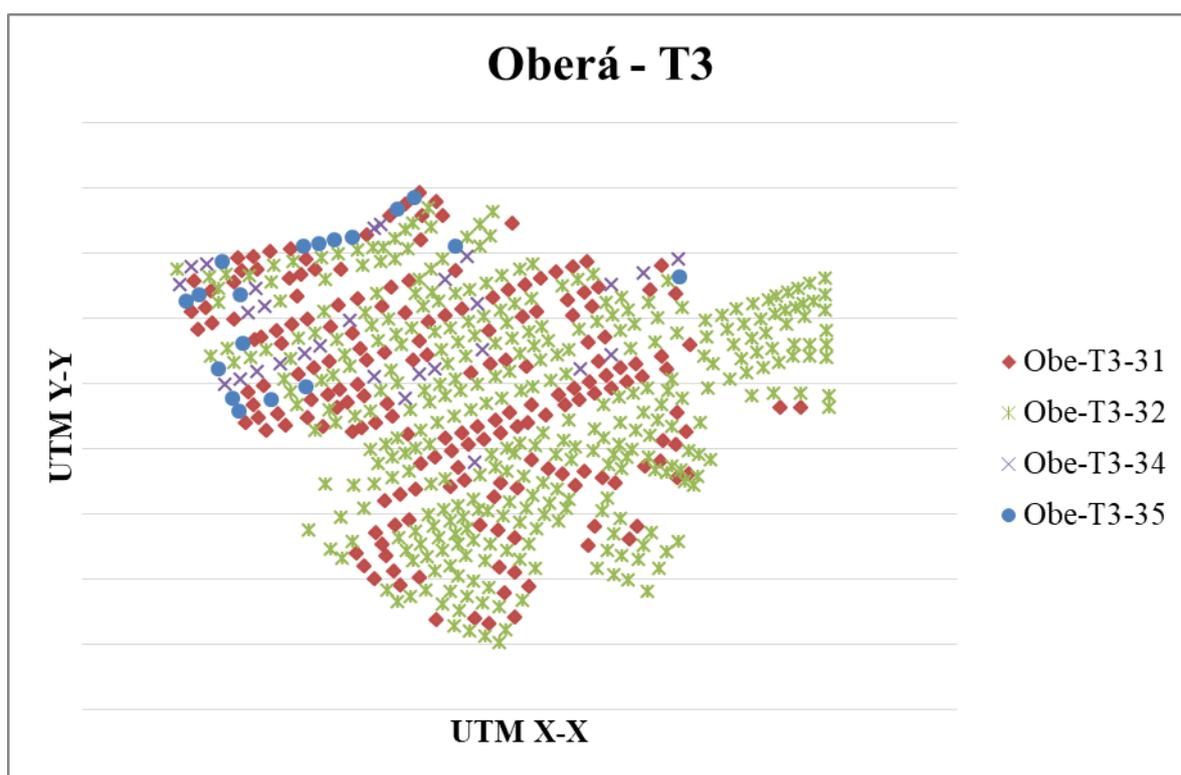


Figura 3.25. Tópico T3 Combinados: Municipio de Oberá.

No se observaron viviendas en donde se hayan usado piezas cerámicas como revestimiento exterior, lo cual no implica que pudieran aparecer algunos casos si se aumenta la densidad de muestreo del método utilizado para el muestreo.

Con respecto las carpinterías adoptadas se mostraron los resultados en la figura 3.26. En el caso de la ciudad de Oberá se pudo apreciar un mayor en peso en la adopción de carpinterías livianas (opción 41 correspondiente a aluminio) y los casos ejecutados con carpintería pesada (madera dura y/ o chapa plegada) presentaron levemente una menor proporción.

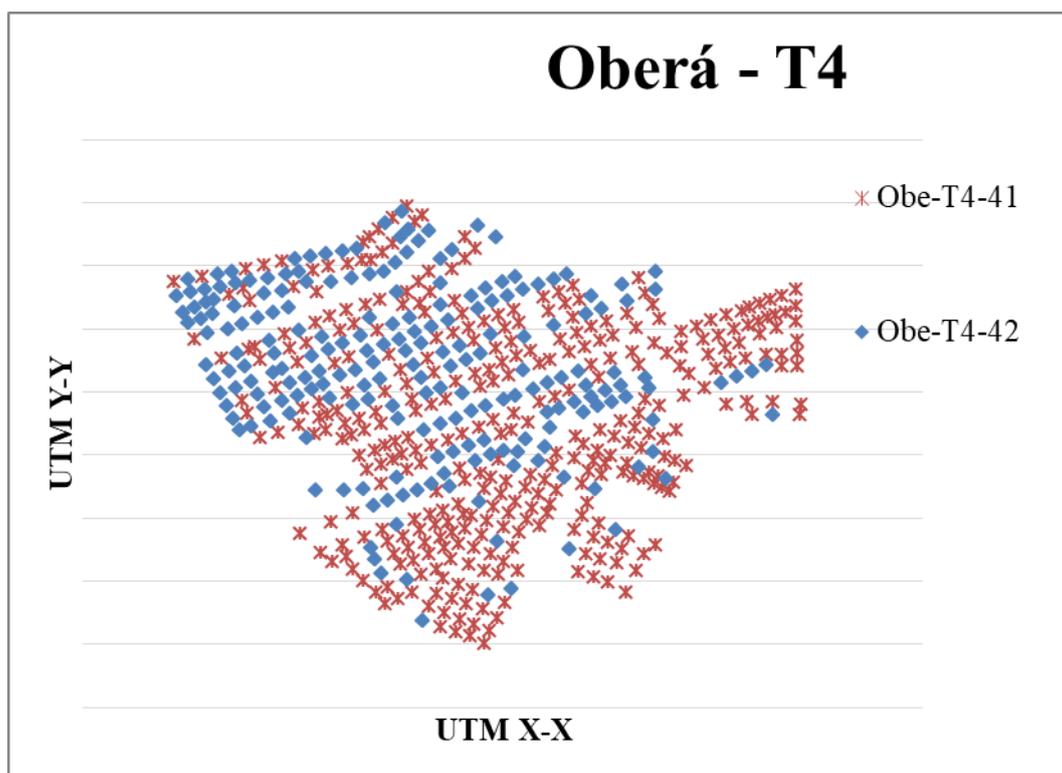


Figura 3.26. Tópico T4: Municipio de Oberá.

La figura 3.27 se elaboró para presentar el tipo de cubierta de techos. En el caso de la ciudad de Oberá se observó una considerable tendencia al uso de cubiertas de techo semipesadas y livianas. Las cubiertas semipesadas fueron definidas por ser una combinación de cubiertas de chapa acanalada apoyadas sobre tirantería de madera de gran escuadría.

Las cubiertas livianas también poseen chapa acanalada con la diferencia de tener en su estructura elementos esbeltos como ser perfilería de chapa plegada y/o elementos de filigrana (reticulados de hierro fino ya sea liso o nervurado).

Por ultimo en menor cantidad se observó un conjunto de construcciones con cubiertas de tipo pesado que incluyen además de estructura de madera cubierta de tejas de cerámica.

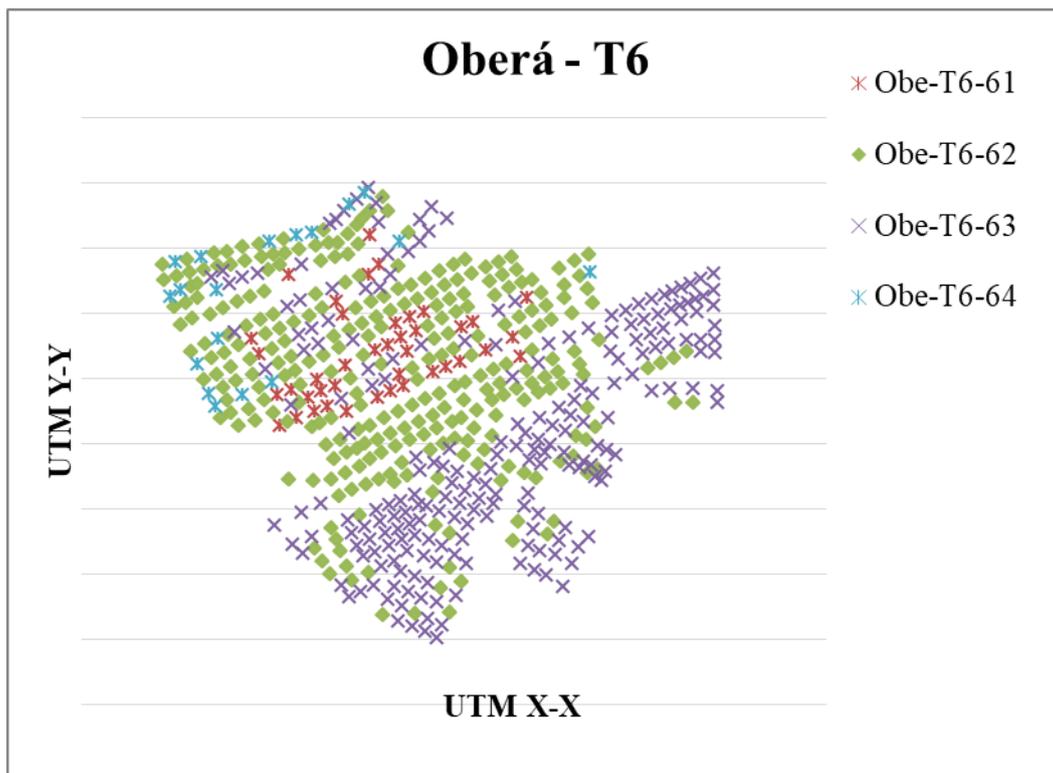


Figura 3.27. Tópico T6: Municipio de Oberá.

En síntesis para el caso de Oberá se observaron con mayor frecuencia las cubiertas semipesadas y livianas siendo las primeras frecuentes en todo el casco histórico mientras que la segunda opción aparece en la periferia de la ciudad y sectores cercanos a la ruta 14.

A partir de la figura 3.28 se presentó el mismo análisis anterior para el caso de la ciudad de Posadas. Empezando por el tipo de revestimiento se observó en esta ciudad menor proporción de paredes a la vista, gran cantidad de casos de muros revocados cuya proporción es cercana al 70% del total relevado. El porcentaje restante se distribuye entre el primer caso y algunos casos de combinaciones de muros vistos con paño revocados en laterales o en medianeras.

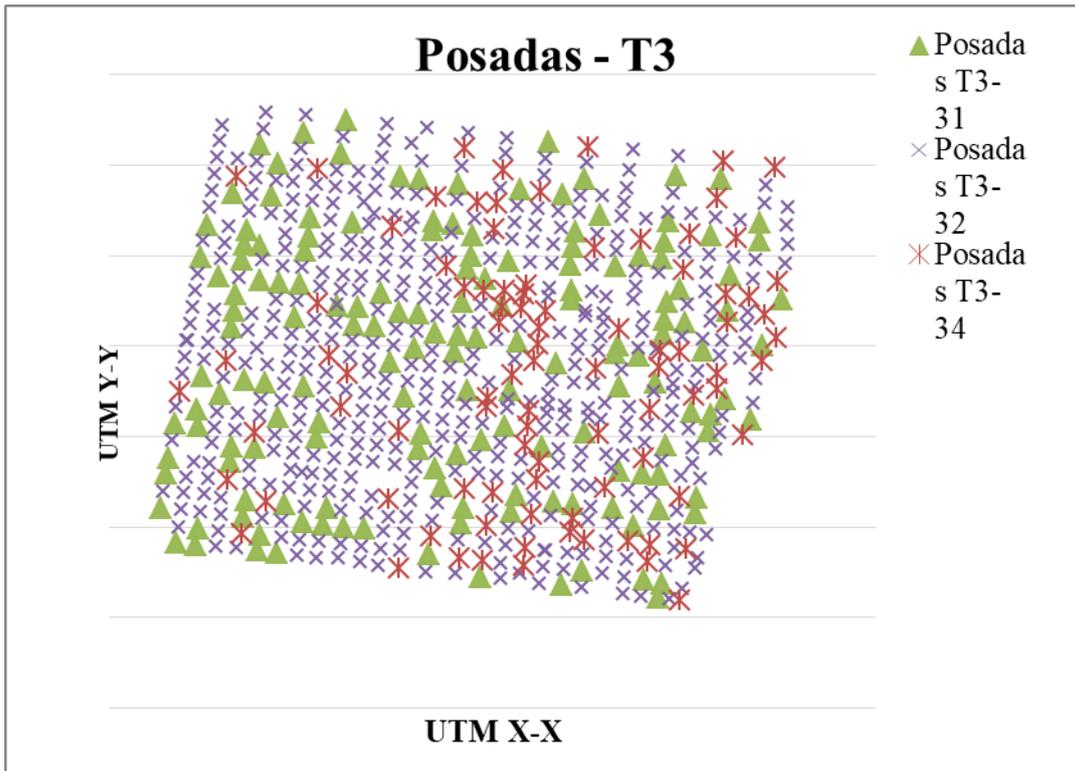


Figura 3.28. Tópico T3: Municipio de Posadas.

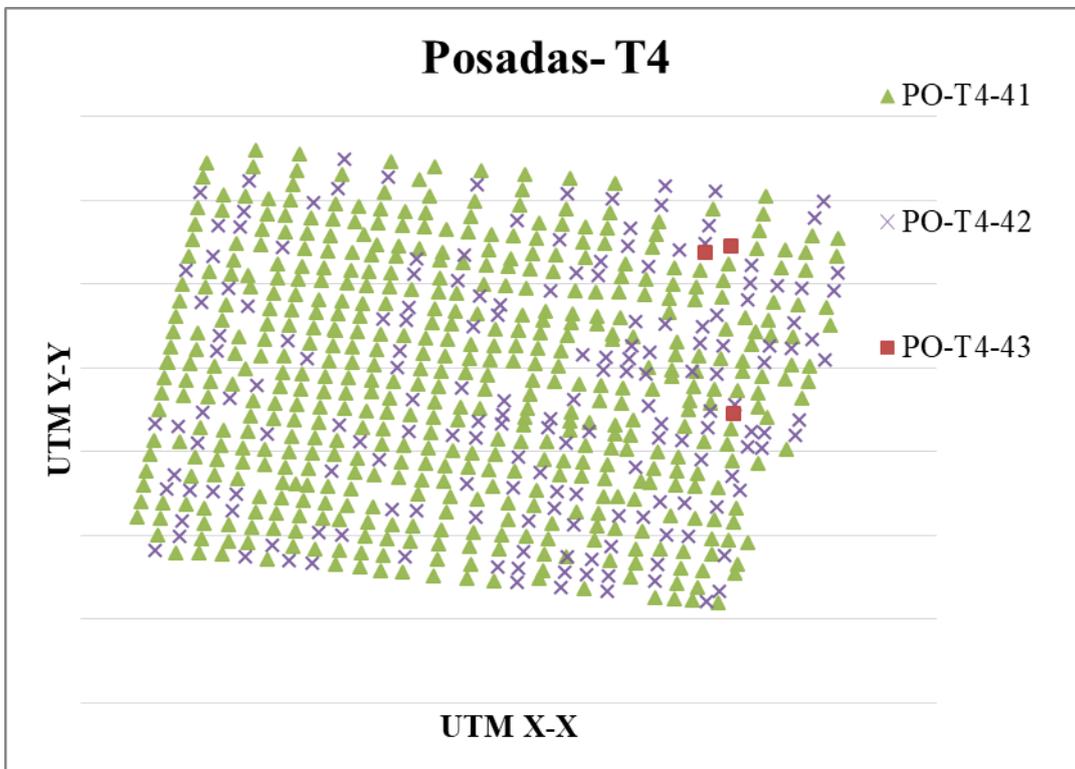


Figura 3.29. Tópico T4: Municipio de Posadas.

Luego se confeccionó la referencia de carpinterías para la ciudad de Posadas en el sector relevado en la figura 3.29. El resultado mostró que el 75% de las construcciones edilicias poseen carpinterías de tipo liviana mientras que el resto se distribuye en gran parte hacia carpinterías pesadas y una mínima fracción que presento una combinación de ambas tipologías.

Con respecto a las cubiertas de techo se observó tal como muestra la figura 3.30 una tendencia considerable hacia los casos de cubiertas livianas y semipesadas (opciones 63 y 62) mientras que un porcentaje reducido mostro cubiertas de tipo pesada sin que necesariamente estén concentradas en el casco céntrico.

De hecho se observaron emplazamientos habitacionales de viviendas sociales construidos con cubiertas de tejas en una zona extensa en la periferia de la ciudad. Con respecto al distribución geográfica de las diferentes tipologías no fue concentradas abajo patrones uniformes apareciendo de manera dispersa y aleatoria por todo el sector relevado con lo cual no se tiene una direccionalidad respecto de la zonificación de estas tipologías.

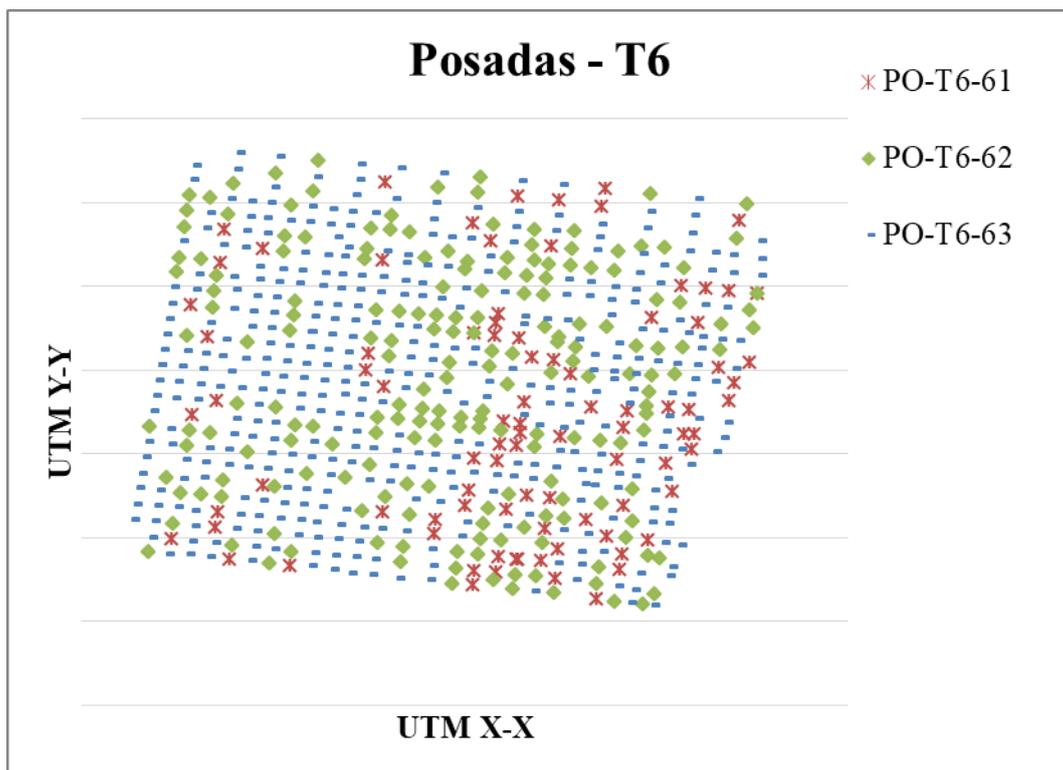


Figura 3.30. Tópico T6: Municipio de Posadas.

Entre otras cuestiones generales se debe aclarar que el mapa refiere a estructura de tipo lineal cuando esta está conformada por refuerzos longitudinales alrededor de los diafragmas de mampostería (encadenados horizontales y verticales). Para las estructuras superficiales

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

se refiere a aquellas construcciones que poseen más de una planta en elevación y por lo general dicho entrepisos son de hormigón armado. Por ende la categoría mixta representa una combinación de los casos anteriores.

Si bien se observaron chapas tanto de aluminio como de zinc, a estas últimas aún se las puede encontrar en edificaciones antiguas. La diferencia corresponde a una situación de disponibilidad tecnológica en diferentes épocas.

Por otra parte se vuelve a recalcar el siguiente hecho: se denominó techo pesado a aquellos que presentan estructura de madera con cubierta de tejas cerámicas y éstas se encuentran en el mapa con mayor densidad en las zonas más antiguas de la ciudad.

En cuanto a los techos livianos, se puede observar en el mapa que son escasas las edificaciones que presentan este tipo de estructura, la cual se corresponde con una cubierta de chapas con soporte metálico.

En lo que respecta al perfil constructivo en la provincia se observa que el mismo consta de considerable variedad en cuanto a sistemas de mamposterías para diferentes construcciones y que las tipologías se zonifican de acuerdo al tipo de producción característica de cada zona. A pesar de ello los emprendimientos productivos que involucran ladrillos LCH presentan un despliegue logístico considerable que permite que el producto llegue a más lugares dado que las empresas fabricantes cuentan con dispositivos y equipos de transporte para cubrir una región considerable.

Se considera que el abanico de tipologías depende en gran parte de: la distribución del casco urbano, cantidad de caminos mejorados, disponibilidad de mampuestos, distancia a fuentes de producción, costos de los materiales, costumbres de la zona, entre otros.

De acuerdo a los tópicos analizados, podemos inferir que hasta el momento las características constructivas más utilizadas en las edificaciones de la región se corresponden con: paredes de mampostería de LM y LCH en proporciones similares, estructura lineal y techo semi-pesado.

A partir de esto, se podrán iniciar los ensayos experimentales teniendo en cuenta que los esquemas estructurales y los prototipos deberán responder a dichas características constructivas.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

De igual manera se pueden analizar otros esquemas y prototipos para compararlos y determinar finalmente si la distribución más frecuente es la más óptima o en su defecto cuál de las tipologías analizadas cumple con dichas características.

Los resultados de este relevamiento permiten aportar datos interesantes para establecer parámetros orientados a optimizar la calidad constructiva de viviendas sociales las cuales en los casos más recientes presentan fachada de LM a la vista y Cerramientos en general construidos con LCH.

Análisis del contexto por metodo FODA.

Luego de revisar los mapas obtenidos se ha volcado la información en una matriz FODA (Tabla 3.3) para poder orientar de manera objetiva la selección del prototipo a estudiar

<p>Fortalezas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Experiencia en el campo de optimización de sistemas estructurales - Acceso a resultados experimentales de los materiales estudiados. - Vinculación con el medio productivo. - Disponibilidad de casos empíricos de evidencia. - Disponibilidad de equipamiento actualizado para el registro experimental. - Disponibilidad de nuevas tecnologías de simulación numéricas accesibles en formato de software no privativo. 	<p>Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de registrar ensayos mecánicos a diferentes escalas. - Mitigar la carencia de conocimiento científico en el área planteada. - Efectuar aportes al campo de la construcción de sistemas de viviendas acortando la distancia entre poder adquisitivo y costos unitarios de construcción. - Ampliar el campo de investigación actual en materia de optimización de sistemas estructurales de la Provincia de Misiones. - Aportar y ampliar las posibilidades de vinculación de la universidad con el medio productivo.
<p>Debilidades</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estado del arte orientado al campo de las mamposterías en forma orientada a elementos de tipo macizo. - Marco reglamentario formulado en condiciones empíricas. - Carencia de datos experimentales para mamposterías huecas. 	<p>Amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elevado costo de sistemas estructurales convencionales y/o carencia de cuantificación de las prestaciones mecánicas de los mampuestos/muros de mampostería de la región. - Elevado costo de construcciones de edificación de sistemas constructivos en el contexto social.

Tabla 3.3. Matriz FODA de sistemas constructivos existentes en Misiones.

Por lo expuesto en la matriz FODA y por los datos observados en los mapas de caracterización de los sistemas constructivos se puede plantear la selección de un prototipo de estudio orientado al caso de las mamposterías de ladrillos LCH utilizadas en los emplazamientos habitacionales de viviendas sociales característicos de la provincia de Misiones por los motivos detallados a continuación:

- Los sistemas de construcciones ejecutados con mamposterías de Ladrillo LCH son los más frecuentes en el ámbito de las construcciones de viviendas sociales y la demanda habitacional creciente en la Provincia de Misiones hace viable proponer un proceso de optimización de estos sistemas que en el caso de la presente tesis inicia en el campo de su comportamiento estructural que está parcialmente analizado y el cual se prevé factible de ser mejorado resultando en una mejora de la calidad de los sistemas constructivos junto con una adecuación de los recursos materiales afectados a la parte estructural que permite pensar en sistemas constructivos confiables desde este punto de vista a un costo accesible para los usuarios involucrados en el espectro mencionado.

- Los sistemas de mamposterías ejecutados mediante ladrillos LM son difíciles de caracterizar puesto que los bancos de arcilla que sirven de materia prima para su elaboración poseen tal diversidad que su optimización implica un análisis que trasciende el ámbito planteado en el presente trabajo por cuestiones que van desde costos de implementación de esos procesos de optimización hasta las limitaciones impuestas de manera implícita en la implementación de estos sistemas los cuales dificultan la posibilidad de establecer mejoras concretas y de impacto eficiente. En síntesis, el rango de diferentes arcillas es tan amplio que sería difícil establecer una caracterización general para este tipo de materiales.

- Los procesos productivos de fabricación de los mampuestos cerámicos huecos poseen un contexto racional adecuado para el planteo de actividades de caracterización de los materiales desde el enfoque del producto obtenido y su aplicabilidad en el medio provincial.

- La frecuencia de uso de los sistemas livianos de cerramientos ejecutados con ladrillos LCH es mayor y la posibilidad de estudiar las patologías que den lugar a enfoques de optimización para el caso de viviendas sociales presenta un campo de acción más sencillo de alcanzar.

Por todo lo expuesto, en el presente trabajo de tesis doctoral se optó por elegir a los sistemas de mamposterías elaborados con ladrillos LCH con relación de vacíos menor a 60% como eje central para el análisis de comportamiento estructural para luego plantear la formulación de metodologías que aporten nuevos paradigmas en los procedimientos de diseño basados en un análisis de desempeño de los mismos y desde un punto de vista inherente a la capacidad portante real de estos elementos una vez considerados resistentes en el campo estructural.

Se puede constatar que considerando el contacto existente entre cerramientos LCH y otros elementos resistentes de materiales como el hormigón armado se producen cambios importantes en la manera de ver la distribución de tensiones y el tránsito de diferentes acciones y efectos (viento, cargas permanentes, temperatura, y otros) a través del cuerpo edilicio contribuyen a una respuesta más equilibrada del sistema y aun mejor aprovechamiento de todos los elementos componentes de una construcción.

Este hecho es fundamental ya que se trata de poder mejorar el aprovechamiento de la inversión puesta en los cerramientos que es inevitable. Por otra parte una mejor comprensión del problema estructural puede llevar a situaciones que tienen que ver con el cuidado del ambiente como la disminución del consumo de cemento y aglomerantes que provienen de la clinkerización como también permite aprovechar de mejor manera el uso de aceros y otros productos cuya fabricación implica algún tipo de impacto ambiental.

Por otra parte se ha podido confirmar en trabajos descriptos dentro del estado del arte de la investigación en el campo de los sistemas de mamposterías que la disminución de los espesores de junta permite disminuir la probabilidad de falla por adherencia tangencial en la interface entre mampuestos y morteros.

De todas formas es necesario encontrar una solución tecnológica que permita mantener los mampuestos en contacto evitando así las fallas por deslizamiento con lo cual los cerramientos deberán estar confinados por refuerzos de materiales que presenten cierta ductilidad y resistencia mecánica para lograr el mencionado efecto.

Por lo pronto se pretende estudiar cómo funcionan estos cerramientos desde un enfoque estructural para poder plantear luego maneras de mejorar el aprovechamiento de las construcciones logrando disminuir el costo unitario global y mejorando las condiciones de la matriz energética involucrada en tal proceso.

En el siguiente capítulo se realizara una síntesis del análisis constitutivo realizado sobre los elementos que en la actualidad componen un sistema de mampostería, comenzando por estudiar las propiedades físicas y mecánicas de la cerámica de los mampuestos. Luego se verán las propiedades mecánicas de los morteros utilizados con frecuencia en las juntas de unión de mamposterías en la zona de Misiones.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: CERÁMICAS Y MORTEROS DE JUNTA.

Concepción del programa experimental.

La metodología consistió en obtener parámetros geométricos y mecánicos representativos del comportamiento mecánico del material mampostería. La tabla 4.1 muestra un cuadro general de ensayos experimentales que permitieron obtener datos que definan la respuesta estructural de los elementos de un sistema de mampostería de ladrillo LCH.

Etapa	Designación	Descripción	Parámetros a obtener
1	Cerámicas y Morteros	Análisis de propiedades geométricas, físicas y mecánicas	Resistencia a Compresión. Resistencia a Tracción. Energía de Fractura. Módulo Elástico a Compresión Módulo Elástico a Tracción Densidad Aparente (LCH)
2	Ladrillo LCH	Análisis de propiedades geométricas y mecánicas	Área neta Momento de Inercia Transversal Índice Blume Resistencia a Compresión Módulo Elástico a Compresión Índice de Deformación combinada acortamiento a compresión
3	Celda LCH	Análisis de propiedades geométricas y mecánicas	Resistencia a Compresión Módulo Elástico a Compresión Índice de Deformación combinada acortamiento a compresión
4	Panel LCH c/ Hº Aº Perimetral	Análisis de propiedades geométricas y mecánicas	Ensayo CEBR Ensayo CCBF

Tabla 4.1. Cuadro general de ensayos experimentales.

Se organizó el primer conjunto de resultados pertenecientes a la primera etapa de caracterización experimental la cual se enfoca en el análisis de las propiedades geométricas, físicas y mecánicas de los componentes.

Respecto de cada ensayo realizado y datos obtenidos, se elaboró la siguiente lista:

- Ensayos sobre probetas cerámicas a compresión (módulo de elasticidad de la cerámica, Carga de Rotura, acortamiento en rotura, curvas de Tensión en función de la deformación).
- Ensayos sobre probetas cerámicas a tracción (Energía de fractura, Resistencia a Tracción, Carga en Rotura, Alargamiento en Rotura, Curvas de Tensión en función de la deformación).
- Ensayos mecánicos en morteros (Resistencia a tracción por flexión, Resistencia a compresión, Curvas de Tensión en función de la deformación).

El objetivo de la presente etapa es lograr una caracterización física y mecánica a micro escala que permita brindar información respecto del comportamiento macro del sistema estructural.

Es de destacar que la cerámica es un material frágil con lo cual es razonable esperar que ocurran durante los ensayos a determinados valores de carga patrones de agrietamiento de manera súbita.

En los ensayos realizados luego de las primeras fisuras en probetas a compresión se observó que las mismas continuaban admitiendo carga, quizás por un reacomodamiento de las partículas que puede dar lugar a cierta acumulación de energía interna en la cerámica.

En algunos ensayos como los de resistencia a tracción se han tallado muestras provenientes de los mismos mampuestos y/o celdas ensayadas.

Para el caso de los morteros las probetas fueron moldeadas durante la ejecución in situ de los paneles construidos para la etapa 4. De estas probetas el primer ensayo efectuado fue el de resistencia a tracción por flexión para luego efectuar ensayos de resistencia a compresión con los restos del primer ensayo.

Marco normativo y equipamiento utilizado.

Se describe a continuación el marco normativo de referencia y el equipamiento utilizado en el programa experimental de la presente Tesis Doctoral, el cual fue cedido por el Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC) de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones.

La implementación experimental siguió el camino descrito a continuación. La metodología consistió en la obtención de parámetros geométricos y mecánicos representativos del material que componen los ladrillos (LCH) y luego mediante el análisis estadístico de resultados de experimentos

Con respecto a la instrumentación y medición de los ensayos a compresión se efectuaron en una prensa COSACOV con capacidad de 50 KN de capacidad nominal máxima y se utilizó un adaptador IBERTEST para probetas pequeñas para asegurar la estabilidad de la probeta durante el ensayo. El ensayo se basó en la norma IRAM 12586. La velocidad de ensayo se ajustó en el orden de 0.075 KN/seg.

En los ensayos de ladrillos LCH se utilizó una prensa hidráulica IBERTEST de capacidad de 1 MN la cual es parte del equipo a cargo del LIC. Los instrumentos de medición de carga y desplazamiento se detallan específicamente en cada capítulo correspondiente a las diferentes etapas del programa experimental mencionado.

En la tabla 4.2 se señala el marco normativo adoptado para los ensayos efectuados en el presente trabajo de Tesis Doctoral. Esta describe las normas utilizadas en el presente capítulo y los subsiguientes en términos de resultados experimentales.

Es adecuado mencionar que en el caso de las probetas de cerámicas el tamaño de las mismas se adoptó en función del intento de observar el comportamiento del material en las dimensiones afines a los espesores de pared del Ladrillo LCH.

Con respecto al encabezado de las mismas se aplicó un procedimiento de desgaste de lascaras hasta lograr paralelismo entre ambas y se decidió no utilizar los encabezados propuestos por la norma IRAM para evitar efectos adversos en las mediciones.

Norma	Descripción
IRAM 1569	Morteros y Hormigones y sus Componentes.
IRAM 1570	Morteros para Mampostería, Determinación de la Consistencia.
IRAM 1676	Norma Experimental, Morteros para Mampostería, Clasificación y Requisitos.
IRAM 1712	Hormigones y Morteros de Relleno para Mampostería, Muestreo y métodos de ensayo.
IRAM 1718	Morteros
IRAM 1729	Morteros para Mampostería, Mortero fresco. Determinación de la densidad aparente.
IRAM 1731	Hormigones y Morteros de Relleno para Mampostería, Requisitos.
IRAM 1733	Morteros para Mampostería, Mortero endurecido, Determinación de la densidad aparente.
IRAM 1764	Morteros, Método de ensayo de adherencia de los revoques y las carpetas.
IRAM 12502	Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros Nomenclatura y definiciones.
IRAM 12585	Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros Método de determinación de las características geométricas.
IRAM 12586	Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros Método de ensayo de la resistencia a la compresión.
IRAM 12737	Mampostería de Ladrillos y bloques cerámicos: Método para determinar la resistencia a la compresión de muros mediante el ensayo de pilas de mampostería.

Tabla 4.2. Cuadro general de ensayos experimentales.

Resistencia a Compresión del material cerámico.

En el presente tramo de este capítulo se elaboró una síntesis de los resultados obtenidos en ensayos realizados en el Laboratorio de Ingeniería Civil de UNaM en probetas de cerámica moldeadas y cocidas en el mismo proceso de fabricación de ladrillos LCH en fábrica. Con

respecto a las probetas ensayadas a tracción fueron talladas de los mismos ladrillos LCH que fueron ensayados a compresión.

La figura 4.1 muestra una vista general del ensayo y se observan los equipos e instrumentales utilizados para este ensayo.



Figura 4.1. Ensayo de resistencia a Compresión en probetas de cerámica.

Con respecto a la velocidad de avance de la prensa fue adoptada en función de generar un estado de carga monótonico, para evitar distorsiones en el resultado por efecto dinámico de aplicación de la carga. Los modos de rotura en probetas cilíndricas se observan algunos resultados en las figuras 4.2 a) b) y c).



a).

b).

c).

Figura 4.2. Algunos modos de falla en probetas de cerámica sometidas a Compresión.

Entre los modos de falla más frecuentes se encontraron la rotura en forma de cono doble (figura 4.2 a) y se pudo observar que el proceso de desintegración de partículas del material mostro cierta ductilidad al desarrollar las líneas y/o superficies de falla en el material.

Los resultados obtenidos en estos ensayos se resumieron en la tabla 4.3 presentando estadísticos de cada parámetro estudiado para el caso de probetas cilíndricas.

Luego de descartar valores alejados de la muestra y utilizar técnicas de simulación basadas en el metodo de Generación de números aleatorios por aproximación a una distribución discreta se amplió la superficie de respuesta de tales parámetros que se observan en la tabla 4.3 en donde se especifica el tipo de distribución aplicada a cada parámetro evaluado.

	Carga máx. [KN]	Tensión de fisuración [MPa]	Deformación de Fisuración [mm/mm]	Tensión máxima [MPa]	Deformación máxima [mm/mm]	E [MPa] Tramo 1	E [MPa] Tramo 2
media	4.83	7.21	0.0079	9.27	0.0137	902.53	599.32
Desvío	0.42	0.42	0.00	0.51	0.00	52.67	26.88
CV %	8.6%	5.83%	5.26%	5.48%	4.46%	5.84%	4.48%
Sesgo	-0.61	-2.21	-0.79	-0.85	0.50	0.06	-0.59
Curtosis	-0.56	3.91	-0.38	-0.46	-1.62	-1.46	-1.46
adoptado	4.24	6.62	0.0074	8.56	0.0128	828.79	561.70

Tabla 4.3. Resumen de Ensayo de probetas cilíndricas de Cerámica a Compresión.

Tomando como base las ecuaciones propuestas en [CIRSOC 501, 2007] las cuales se describen a continuación sobre la base de lo expreso en el mismo que dice “La resistencia especificada o característica a la rotura a compresión de la sección neta del ladrillo hueco se evaluará sobre una muestra representativa, compuesta de 10 o más unidades”. Luego la ecuación (1) es la que esta descripta para el caso de ladrillos. Se adoptó el criterio de trabajar con idénticas ecuaciones y realizar comparaciones con ensayos efectuados en Ladrillos LCH. El “valor adoptado” representa en cada caso el parámetro característico determinado mediante la ecuación 4.1. este criterio se repite en todos los parámetros experimentales.

$$f' = f_m \cdot (1 - 1.64 \cdot C.V.) \quad (4-1)$$

los resultados obtenidos pudieron constatar cuestiones que tienen que ver con el carácter probabilístico de cada parámetro estudiado.

En primer lugar se pudo observar que las probetas utilizadas mostraron baja dispersión en sus parámetros geométricos lo cual dio la conclusión de que el proceso de cocción de la cerámica no genera dispersiones importantes en la geometría final de los mampuestos a pesar de que existen diferencias en las medidas reales de cada pieza respecto de las consideradas nominales.

Con respecto a la relación $h/d = 2$ se verificó desvíos que se consideraron despreciables.

Luego se resumieron resultados referentes a parámetros mecánicos como ser la carga máxima alcanzada, la tensión a la que se alcanzó la fisuración, la tensión correspondiente a la carga máxima, y los valores de pendiente de la recta tensión-deformación que se adoptaron como valores del módulo de elasticidad en un primer análisis.

Los módulos adoptados corresponden a instantes previos y posteriores a la fisuración de la probeta, en donde el instante en que ocurrió la primera fisura se dedujo de la discontinuidad observada en los registros de cada ensayo.

En la mayoría de los casos se observó un salto en la curva experimental que puede explicar un agrietamiento y acomodamiento de las partículas de la probeta lo que explica el hecho de poder acumular energía interna de deformación.

Luego la curva se restableció en forma lineal con reducción de la pendiente. En la figura 4.3 se observa el registro de esfuerzos y deformaciones para una probeta sometida a una carga de compresión centrada mediante una prensa mecánica a velocidad de 0.075 KN/seg aproximadamente.

La adquisición se efectúa con un adquisidor de datos digital con capacidad de 5 datos por segundo como frecuencia de muestreo el cual se conecta a extensómetros y celdas de carga. El software de procesamiento de datos fue elaborado en la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones.

Los valores de módulo E fueron obtenidos de las rectas marcadas en la gráfica del ensayo utilizando interpolación lineal y los coeficientes de la función fueron calculados por el método de mínimos cuadrados.

Luego en la tabla 4.3 se resumieron los resultados de ensayos a compresión para probetas prismáticas de relación aproximada 1:1:2 (ancho alto y largo respectivamente). Se volvieron a presentar datos estadísticos a manera de establecer comparaciones con el tipo de probeta

anterior. Se ensayaron este tipo de probetas por ser correspondiente con la forma de las paredes de los ladrillos LCH estudiados.

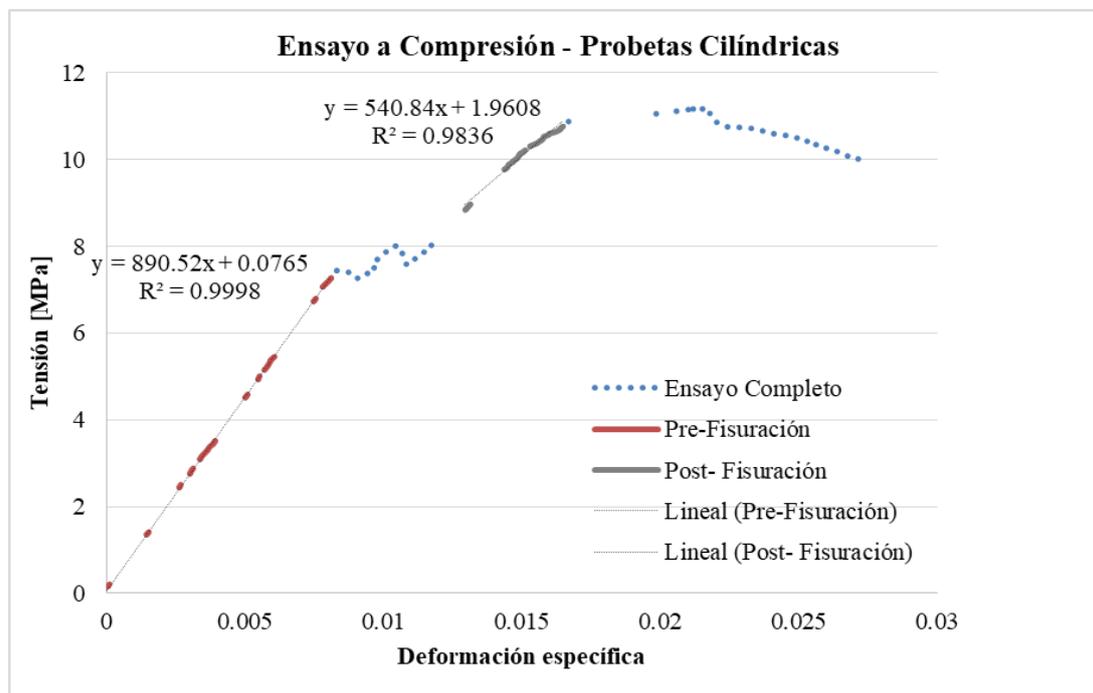


Figura 4.3. Registro de un ensayo a Compresión aplicado a una probeta de cerámica de forma cilíndrica.

Respecto a los valores de los parámetros estadísticos se procesaron de igual forma que en el caso de probetas cilíndricas aplicando generación de números aleatorios por método de simulación de Montecarlo.

Probeta	Carga máxima [KN]	Tensión fisuración [MPa]	Tensión máxima [MPa]	E [MPa] Tramo 1	E [MPa] Tramo 2
Promedio	2.80	6.56	7.59	1235.27	887.62
Desvio	0.13	0.21	0.33	105.42	80.12
Coef de variación %	4.5%	3.2%	4.4%	8.5%	9.0%
Sesgo	-0.15	-0.43	-0.25	-0.65	-0.58
Curtosis	-1.44	-0.07	-1.42	-1.26	-0.79

Tabla 4.4. Resumen de Ensayo de probetas prismáticas de Cerámica a Compresión.

En la tabla 4.4 se resumieron los resultados procesados de los ensayos a compresión efectuados en probetas de cerámica prismáticas. Se pudo ver que los datos se han ajustado de mejor manera descartando valores alejados para luego concluir que la simulación de números aleatorios ha mejorado el ajuste aun así en un porcentaje de referencia menor respecto de las correcciones por eliminación de outliers (valores alejados).

Se observaron diferencias en los valores de ambos tipos de probetas. Luego respecto al comportamiento mecánico medido en forma experimental la media en los coeficientes de variación fue menor como se esperaba en las probetas cilíndricas que en las probetas prismáticas (diferencias en algunos casos superiores a 1,5 veces).

Se asumió que esta diferencia se debió a un factor de forma que presentó un mejor tránsito de las tensiones en el primer caso por carecer de cantos vivos que pudieran generar distorsiones en los resultados.

Con respecto al tipo de distribución probabilística conviene aclarar ciertos conceptos. Los datos con Sesgo asimétrico hacia la derecha se llaman así porque la "cola" de la distribución apunta hacia la derecha y porque el valor de asimetría es mayor que 0 (es decir, positivo). Los datos asimétricos hacia la izquierda o con asimetría negativa se llaman así porque la "cola" de la distribución apunta hacia la izquierda y porque producen un valor de asimetría negativo.

Una distribución con un valor positivo de curtosis indica que la distribución tiene colas más pesadas que la distribución normal. Por ejemplo, los datos que siguen una distribución t tienen un valor positivo de curtosis. Una distribución con un valor negativo de curtosis indica que la distribución tiene colas más livianas que la distribución normal.

Con respecto a los valores de Sesgo y curtosis calculados a efectos de establecer de cada muestreo su ajuste a una distribución normal en los ensayos de probetas cilíndricas a compresión se pudo observar que los parámetros geométricos muestran una inclinación hacia la izquierda igual que los parámetros mecánicos salvo en el caso de la tensión de fisuración que arrojó un sesgo positivo. En el caso de las probetas prismáticas el sesgo es opuesto entre parámetros geométricos y mecánicos siendo negativo para los primeros y positivo para los siguientes.

No se apreciaron cambios significativos al combinar ambos resultados en las mediciones de sesgo y curtosis. Se pudo concluir en este aspecto que la mayoría de los parámetros geométricos y mecánicos de la cerámica se aproximan a una distribución de tipo normal lo cual implica simplificaciones en los procesos probabilísticos.

Con respecto a los resultados y su uso en procedimientos de simulación se recomienda utilizar los valores correspondientes a las probetas cilíndricas por tener mayor estabilidad y mostrar valores más controlados en el sesgo y la curtosis. Dichos parámetros se utilizarán para la etapa experimental N° 2 que corresponde a obtener los parámetros de resistencia mecánica pertenecientes a los ladrillos cerámicos huecos (LCH).

La dispersión observada en la tensión de fisuración es aceptable y razonable con lo cual se adoptaron estos valores para alimentar futuros procedimientos de simulación en la sección de relaciones constitutivas. Por otra parte las probetas prismáticas se analizaron por motivo de ser compatibles en cuanto a su forma respecto de la forma que tienen las paredes de los mampuestos.

	Carga máxima [KN]	Tensión fisuración [MPa]	Deformación de Fisuración [mm/mm]	Tensión máxima [MPa]	Deformación máxima [Mpa]	E [MPa] Tramo 1	E [MPa] Tramo 2
promedio	4.83	7.21	0.0079	9.27	0.0137	902.53	599.32
Desvío	0.42	0.42	0.00	0.51	0.00	52.67	26.88
CV	8.65%	5.83%	5.26%	5.48%	4.46%	5.84%	4.48%
Sesgo	-0.61	-2.21	-0.79	-0.85	0.50	0.06	-0.59
Curtosis	-0.56	3.91	-0.38	-0.46	-1.62	-1.46	-1.46
adoptado	4.24	6.62	0.0074	8.56	0.0128	828.79	561.70

Tabla 4.5. Valores característicos de cerámicas sometidas a compresión.

En la tabla 4.5 se volcaron los valores propuestos que serán verificados en las etapas subsiguientes a efectos de cotejar el comportamiento de la cerámica del material ladrillo cerámico y el material compuesto mampostería de ladrillo LCH.

El objeto de los capítulos subsiguientes es brindar resultados de los mismos ensayos para el caso del mampuesto en forma aislada llegando a estudiar el comportamiento del sistema completo interactuando ladrillos y mortero de juntas confinados por elementos de refuerzos ejecutados en Hormigón Armado. Es factible esperar cambios o diferencias puntuales en los parámetros medidos para cada instancia a pesar que es razonable el hecho que exista cierta trazabilidad en el conjunto de parámetros de respuesta del sistema estructural denominado mampostería de ladrillo LCH

Cabe destacar que los valores de deformación se han excluido de este segmento del presente trabajo por adoptar el criterio de analizar las correspondientes al material mampuesto en conjunto con el resto de los componentes del sistema constructivo. De todas formas su análisis está implícito en el Modulo Elástico obtenido a partir de los tramos de carga 1 y 2 respectivamente.

Resistencia a Tracción del material cerámico.

En cuanto al comportamiento mecánico de un material estructural como el caso de la cerámica se sabe que su respuesta es diferente para cada esfuerzo aplicado lo que habilita la posibilidad de modelarlo eventualmente considerando al mismo como material ortotrópico si se considera el proceso de extrusión al que es sometido el material antes de convertir en un elemento de uso estructural. Por esto se debe evaluar la respuesta a esfuerzos de Compresión y Tracción.

Habiendo estudiado en la sección anterior el comportamiento y la resistencia a compresión en probetas de cerámica se procedió a estudiar el comportamiento de las piezas sometidas a un esfuerzo de Tracción. En la figura 4.4 se aprecia una imagen del ensayo a tracción aplicado a fragmentos de mampuestos ensayados de los cuales se han tallado probetas para ensayarlas a esfuerzo de tracción.

En la figura 4.4 se muestra una imagen del ensayo realizado en laboratorio para obtener parámetros relacionados con la resistencia a tracción de la cerámica componente de los ladrillos LCH estudiados. El sistema consiste en dos ejes metálicos recubiertos con una vaina de polímero que sujetan la probeta por ambos extremos. A través de un pistón se aplica un esfuerzo de tracción controlado a velocidad tal que el proceso de carga sea monotónico.



Figura 4.4. Ensayo a tracción de una probeta de cerámica tallada de un ladrillo LCH.



Figura 4.5. Probetas ensayadas a tracción.

En la figura 4.5 se pueden apreciar los modos de falla obtenidos en los ensayos a tracción. Se puede percibir que en algunos casos la línea de falla ocurrió fuera de la zona inducida para la falla lo cual modificó la superficie considerada para el cálculo de la resistencia a tracción. Esto generó un aumento de la dispersión en el ancho de la línea de falla.

Probeta	Carga máxima [KN]	Tensión [Mpa]	Def. Esp. [mm/mm]	Gf [N/mm]	EA [Kg/cm ²]	E [N/mm ²]	Cf [N/mm ²]
Promedio	1.17	2.58	0.0087	0.21	151.37	680.51	692.38
Desvío	0.08	0.25	0.0008	0.02	9.09	53.24	60.05
CV%	6.94%	9.69%	8.97%	7.88%	6.01%	7.82%	8.67%
Sesgo	0.24	0.11	-0.17	-0.11	-0.76	-0.46	-0.40
Curtosis	-1.01	-0.70	-1.27	-1.41	-1.08	-0.37	-0.28
adoptados	1.06	2.23	0.0076	0.18	138.64	605.98	608.31

Tabla 4.6. Valores característicos de cerámicas sometidas a Tracción.

La tabla 4.6 muestra resultados en valor medio y desvío estándar de los ensayos de probetas de cerámica sometidas a esfuerzos de tracción en dirección paralela a la línea de extrusión (proceso de Fabricación del ladrillo) para los cuales se estimó la energía de fractura promedio siguiendo la metodología propuesta por [Hillerborg, 1978].

Hillerborgh desarrolló junto a otros investigadores en trabajos paralelos un modelo de bandas en el cual la zona de fractura es aproximada mediante un sistema de fisuras paralelas que son continuamente separadas en el elemento finito, se establece un ancho de la zona de fractura que se asume constante (h_c) a fin de evitar la sensibilidad por tamaño de malla. Esto asegura que la disipación de energía debida a fractura por unidad de área sea constante y que sea equivalente a la energía de fractura del material, G_F .

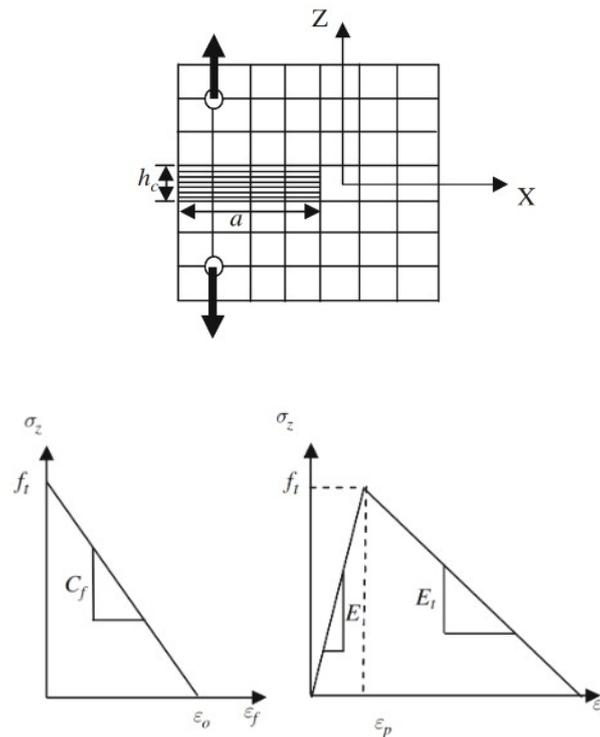


Figura 4.6. Energía de fractura G_f según el modelo de [Hillerborg, 1978].

En la figura 4.7 se puede apreciar una imagen de los ensayos efectuados para completar el cálculo de la energía de Fractura del material cerámico que como veremos en los capítulos subsiguientes es un parámetro necesario para alimentar los datos de entrada de modelos numéricos basado en la técnica XFEM (extended finite elements method).

La energía de fractura G_F definida como la energía consumida en abrir la fisura de una banda viene dada por:

$$G_F = h_C \int_0^{\epsilon_0} \sigma_z(\epsilon) d\epsilon \quad (4.2)$$

La integral representa el área bajo la curva esfuerzo –deformación, y si se adopta una relación entre estas, se tiene:

$$G_F = \frac{f_t^2}{2C_F} h_C \quad (4.3)$$

Donde las variables pueden ser extraídas a partir de la curva tensión-deformación registrada en forma experimental siendo C_f la pendiente de la curva de ablandamiento luego de ocurrida la rotura de la probeta.

Energía de Fractura del material cerámico.

En la tabla 4.9 se presentaron los valores calculados de energía de fractura en forma experimental a partir de las curvas de Carga y Desplazamiento obtenidas en laboratorio para los ensayos mostrados en la figura 4.7 en donde se realizaron dos tipos de fractura. La primera de ellas tiene que ver con un efecto de tracción directa analizado en probetas talladas de los mismo mampuestos ensayados a compresión en donde se analizó el efecto de este esfuerzo para las paredes interiores (figura 4.7 a.). Luego se analizó un efecto de tracción por flexión haciendo que la carga aplicada presente una excentricidad respecto del eje mecánico de la probeta.



a)

b)

Figura 4.7. Ensayo a Tracción: a) Tracción Directa b) Tracción por Flexión.

Se debe acotar que en extremos de la probeta se colocaron vainas de polímero para evitar distorsiones en el registro de datos durante en el procedimiento experimental dado que la fricción entre la cerámica y los dispositivos de anclajes se pudo apreciar en los registros. Cabe señalar que la línea falla observada en probetas ensayadas a tracción mostró coincidencia con la presencia de partículas de grano relativamente grande en función del espesor de tales probetas. Es sabido que las mezclas utilizadas para extruir ladrillos LCH

contienen un porcentaje de arenas lo cual se estima tiene impacto directo en cuestiones como resistencia mecánica y trayectoria de patrones de agrietamiento.

Con respecto a los resultados en la figura 4.8 se colocó una imagen de la curva experimental de ensayo a Tracción. Se observó un comportamiento lineal en tramos pre y post fisuración. La frecuencia de muestreo del equipo adquirente de datos (5 Hz) permitió registrar un acomodamiento que se estima se debió al inicio de la fisuración en la probeta dado que posteriormente prosiguió un ascenso de la curva experimental hasta alcanzar la rotura del material. Los ensayos se filmaron con cámara de alta velocidad dejando como dato particular que a una velocidad de 3 cuadros por segundo no se puede apreciar en detalle el desarrollo de la línea de fisura en la probeta dando esto cuenta del alto margen de fragilidad que presenta el material cerámico en los ensayos. Esto trajo como conclusión que condicionante en el comportamiento del ladrillo LCH. Es posible pensar que la resistencia a tracción de la cerámica juegue un papel importante en el comportamiento mecánico del mampuesto entre otros factores.

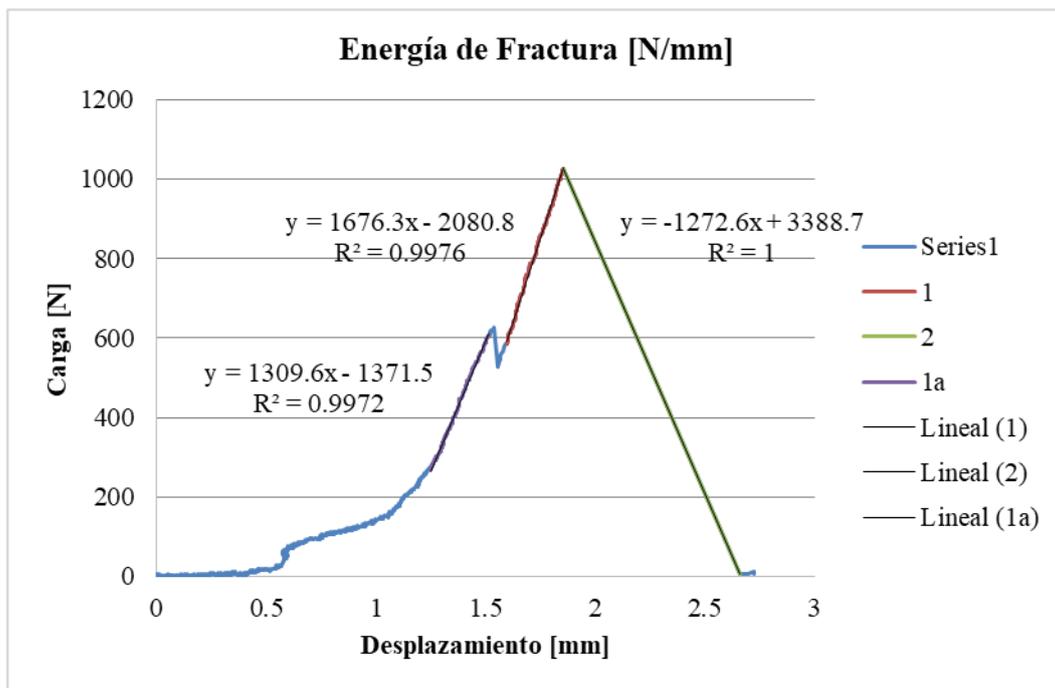


Figura 4.8. Curva experimental de una probeta ensayada a Tracción.

Propiedades Físicas de la cerámica.

Otro factor a tener en cuenta es el proceso de extrusión para la fabricación de los mampuestos que puede inducir una orientación de las escamas de partículas que conforman la arcilla usada como materia. Dicha arcilla es mezclada en proporciones dosificadas con residuo derivados de la madera (aserrín) y contenido de agregados finos y

se puede observar en la figura 4.9 que los planos de falla están condicionados por la concentración de tensiones producida alrededor de las partículas de agregado fino y por la orientación de las escamas que conforman la arcilla.



Figura 4.9. Trayectoria de las fisuras en probetas de cerámica.

Con esto quedó definido el conjunto de parámetros característicos propuestos para las propiedades mecánicas de la cerámica componente de los mampuestos LCH. Con respecto a las propiedades físicas se realizaron ensayos pertinentes y se estimó la densidad aparente de los mampuestos analizados obteniendo la tabla 4.7 la cual resume el procedimiento normalizado por norma IRAM 12599 para la obtención de la densidad de ladrillos cerámicos.

Ladrillo	Peso seco Ms [N]	Peso saturado Me [N]	Peso Sumergido Ma [N]	Densidad del agua [N/m ³]	Absorción [%]	Densidad aparente [N/m ³]
Promedio	59.46	71.86	42.41	9806.67	0.21	19868.84
Desvío	0.9708	1.1868	1.9655	0.0000	0.0088	1207.78
Coef de variación %	1.6%	1.7%	4.6%	0.0%	4.2%	6.1%
Sesgo	0.04	0.00	-0.47	-1.05	-1.06	-0.75
Curtosis	-0.7637	-0.8603	-1.2876	-2.1481	1.5685	-0.4297
Valores característicos	58.10	70.20	39.65	9806.67	19.63%	18177.94

Tabla 4.7. Densidad aparente de ladrillos LCH.

Los valores resumidos en la tabla se adoptaron como propiedades físicas para el material mampuesto estudiado. Los valores de densidad aparente se adoptaron como parámetro para modelar el peso unitario del material mampuesto en un procedimiento de simulación numérica a revisar en capítulos subsiguientes.

Respecto de los resultados estadísticos se puede asumir que el muestreo del material en este parámetro aproxima correctamente a un tipo de distribución normal dado que la asimetría o sesgo y la curtosis se encuentran dentro de valores aceptables de desviación para considerarlo así.

Características del mortero de junta.

En lo que respecta a mortero de junta se han evaluado diferentes mezclas entre las cuales se encuentran diferentes dosis de cemento combinado con cal hidratada y arena, cemento con fluidificante y arena, y cemento de albañilería y arena. Para estos morteros se han obtenido los datos correspondientes a propiedades físicas y mecánicas, a saber: Índice de consistencia, Densidad aparente, Tiempo de Fragüe, Resistencia a tracción por flexión y resistencia a Compresión. La tabla 4.8 muestra los tipos de morteros analizados en cuanto a sus propiedades físicas.

Tipos de mortero	
A	1 parte de Cemento, 8 partes de arena, 50 ml de resina.
B	$\frac{1}{4}$ parte de Cemento, 1 parte de cal, 3 partes de Arena
C	$\frac{1}{2}$ parte de Cemento, 1 parte de cal, 3 partes de Arena.

Tabla 4.8. Clasificación de Morteros analizados.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

fecha	Tipo de mortero	d ₁ [cm]	d ₂ [cm]	d ₃ [cm]	d ₄ [cm]	d _m [cm]	L Sup. [cm]	L Inf. [cm]
07/10/2017	B	22.87	22.81	22.36	23.16	22.8	25.08	20.52
09/10/2017	B	15.63	16.34	16.49	16.03	16.12	17.73	14.51
12/10/2017	C-1	23.69	23.83	23.64	23.43	23.65	26.01	21.28
12/10/2017	C-2	21.41	21.17	21.29	21.51	21.34	23.48	19.21
16/10/2017	C-1 C-2	22.45	21.88	21.31	22.04	21.92	24.11	19.73
Promedio		21.21	21.21	21.02	21.23	21.17	23.28	19.05
Desvío		2.23	1.96	1.81	2.08	2.02	2.22	1.82
Coef. De variación %		10.52%	9.25%	8.62%	9.80%	9.54%	9.54%	9.53%
Valores Característicos		18.09	18.46	18.48	18.32	18.34	20.17	16.51

Tabla 4.9. Datos de Consistencia de Morteros analizados.

En la tabla 4.9 se compilaron resultados de los índices de consistencia de los morteros analizados cuyos valores están entre los límites superior e inferior definidos por la norma IRAM. La tabla 4.10 se elaboró para mostrar estos resúmenes en los parámetros densidad aparente y Tiempo de fragüe.

mortero	Densidad	Tf.
	[N/m ³]	[hs.]
Promedio	19853.0	7.07
Desvío	218.82	0.95
Coef. De variación %	0.11	0.14
Sesgo	-1.28	0.05
Curtosis	-0.29	-1.71
Valor Característico	16789.6	5.73

Tabla 4.10. Datos de Densidad y Tiempo de Fragüe de Morteros analizados.

Cabe destacar que las muestras fueron evaluadas en conjunto y si se observan los valores han arrojado desvíos de orden bajo tomando en cuenta que corresponden a mezclas diferentes.

N ^a	R _f [MPa]	R _c [MPa]
Promedio	1.25	3.49
Desvío ST	0.10	0.33
CV	8.00%	9.49%
Sesgo	0.00	1.88
Curtosis	-1.20	5.17
Valor adoptado	1.11	3.03

Tabla 4.11. Datos de Densidad y Tiempo de Fragüe de Morteros analizados.

Respecto a las propiedades mecánicas de los moteros analizados se han obtenido valores característicos adoptados para los procedimientos de simulación numérica que se detallan en el Capítulo 7 del presente Trabajo de Tesis. A continuación se resumieron los datos obtenidos en ensayos mecánicos a tracción por flexión y a Compresión en la tabla 4.11.

Los resultados presentados en el presente capítulo se pretenden utilizar en el capítulo 8 correspondiente a la fase de simulación numérica de este trabajo de Tesis. Se realizará una rutina de simulación de los ensayos basada en los valores característicos calculados para tal fin y se verificara precisión y convergencia de estos modelos.

CAPÍTULO 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: LADRILLOS CERÁMICOS HUECOS.

Dentro del programa de caracterización experimental previsto se propuso el análisis del comportamiento mecánico de los elementos componentes de un sistema de mampostería de ladrillo LCH en principio en forma aislada y luego en modo de interacción en conjunto y frente al sistema de cargas que representan las acciones típicas para una vivienda social en el ámbito de la Provincia de Misiones.

El presente estudio inició analizando el comportamiento aislado de ladrillos LCH conocidos nominalmente como 18 18 25 (medidas nominales globales en cm) los cuales en el caso de una vivienda social comprenden el cerramiento exterior de la vivienda.

En los sistemas constructivos adoptados para viviendas sociales se consideran acciones que corresponden a los siguientes efectos: Carga permanente por materiales incorporados en la vivienda, sobrecarga por uso según el destino planeado y acciones laterales por efecto de viento que actúan sobre las cubiertas de techo trasladando su efecto a las paredes por estar vinculada a la estructura de techo.

Para la implementación de los ensayos mecánicos se adoptó lo establecido en normas IRAM 12586 e IRAM 12737 en cuanto a forma de aplicar cargas sobre los especímenes ensayados determinando un estado de carga monótonico que simula el caso de carga permanente sin incorporación de distorsiones por efectos de carga dinámica.

Se establecen etapas de estudio del comportamiento que inician en el ladrillo aislado y va incorporando elementos componentes que ocasionan diversas condiciones de borde (morteros de junta horizontal, morteros de junta vertical, y elementos de hormigón armado).

En el presente trabajo de tesis se pretende probar según la hipótesis planteada que los sistemas de mamposterías que en la actualidad deben considerarse estructura resistente pueden aportar cambios significativos dando acceso a prestaciones que mejorar la relación costo – beneficio de estos sistemas de mamposterías en particular en los casos que competen a emplazamiento habitacionales de tipo social.

Los efectos a tener en cuenta en el desarrollo e interpretación de resultados de esta etapa experimental se basan en poder determinar para los sistemas de mamposterías utilizados en la región: límite elástico, modos de fallas en el campo plástico, respuestas ante diferentes solicitaciones, que incidencia presentan las cargas excéntricas y como es el desempeño ante condiciones de borde variable como puede ser el caso de un muro asentado sobre un manto de suelo de densidad variable.

Completando esta base de datos se puede aproximar una superficie de respuesta correspondiente a los modos de falla del material mampostería. Luego al ser un material compuesto es de esperar que ocurran fallas en la interface de unión entre sus componentes (mampuesto y mortero de junta).

Una vez resuelta la fase experimental el siguiente paso es definir el conjunto de variables principales a utilizar en la etapa de optimización con restricciones de confiabilidad donde se aproximará una superficie de respuesta con el objetivo de obtener los elementos necesarios para minimizar la función costo del sistema constructivo en su faceta de estructura resistente.

El procedimiento de Optimización con restricciones de confiabilidad es externo al alcance de la presente tesis la cual busca el objetivo de probar la hipótesis principal en términos de los criterios a utilizar para el análisis estructural y rediseño de sistemas de mamposterías interactuantes con elementos de hormigón estructural.

Caracterización Geométrica de Mampuestos.

Se propone caracterizar la geometría de los mampuestos obteniendo los parámetros y propiedades geométricas que son relevantes para el análisis del comportamiento mecánico de los sistemas constructivos constituidos por estos elementos. En este contexto la figura 5.1 muestra cómo se adoptó el criterio de caracterización geométrica del mampuesto.

Como metodología de relevamiento se procedió a numerar paredes verticales primero de arriba hacia abajo segundo de izquierda a derecha luego en frente y contra frente del ladrillo.

Para las paredes horizontales se numeraron primero de izquierda a derecha segundo de arriba hacia abajo y luego frente y después contra frente.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

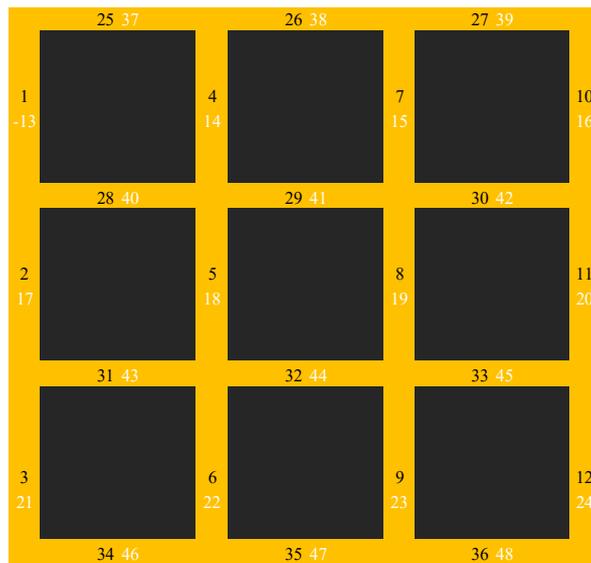


Figura 5.1: Numeración para espesores de pared.-

La tabla 5.1 recopiló los resultados estadísticos de los parámetros geométricos del ladrillo LCH en términos de establecer las propiedades geométricas que sirven al análisis del comportamiento estructural del material. Así se recopilaron parámetros como el área transversal, el momento de inercia, la relación de vacíos y los valores promedio de la geometría global (dimensiones externas) como la local (espesores de pared).

Muestra	Espesor Promedio				Globales Promedio			Parámetros Geométricos		
	Ve E	Ve I	Ho E	Ho I	Prom L1	Prom L2	h Prom	Area neta	% de vacíos V/V	Inercia
N°	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm2	%	mm4
media	7.92	7.80	8.70	7.17	173.3	240.8	172.3	7564.9	0.75	1.54E+07
desvío	0.59	0.49	0.64	0.50	1.33	3.57	1.90	405.49	0.01	1.01E+06
CV	7.42%	6.28%	7.34%	6.93%	0.77%	1.48%	1.10%	5.36%	1.75%	6.52%
Sesgo	1.30	0.44	0.71	0.83	-0.03	-1.30	0.83	0.36	-0.16	1.12
Curtosis	2.06	0.25	0.71	1.60	0.12	0.94	2.63	0.26	0.35	1.92

Tabla 5.1. Resumen de Parámetros geométricos de ladrillos LCH.-

En la tabla anterior se pudo observar los valores estadísticos correspondiente a los datos geométricos de ladrillos LCH relevados en laboratorio dando cuenta del proceso de fabricación y su calidad de elaboración.

[Whalpole, 2012] define las condiciones de asimetría (sesgo) y curtosis para las muestras analizadas en forma estadística dando cuenta de la relación y posición que tienen las medidas de tendencia central y respecto a la magnitud de la desviación que existe entre valores puntuales y las primeras mencionadas.

En términos de asimetría (sesgo) los valores obtenidos en cada parámetro son cercanos a cero en la mayoría de los casos. Respecto de las medidas interiores la asimetría es positiva lo cual indica que la media aritmética es mayor al resto de las medidas de tendencia central (mediana y moda). En las dimensiones globales pasa lo contrario es decir la asimetría es negativa con lo cual la media aritmética es menor a la moda y la mediana.

Respecto a la Curtosis de los datos recolectados mostraron valores positivos lo cual indica que sus distribuciones son de tipo leptocúrticas lo que implica una concentración de datos alrededor de las medidas del centro.

Algunos parámetros como la altura promedio y el espesor de pared vertical exterior mostraron valores de curtosis por encima de los asumidos compatibles con el tipo de distribución Gaussiana. Los valores de inercia de esta tabla corresponden a la sección transversal del ladrillo relevado.

Rigidez mecánica de ladrillos LCH.

Con respecto a la rigidez local en nudos se puede prever que la estructura interna del ladrillo LCH muestre un estado local de apertamiento a partir de las intersecciones entre paredes horizontales y verticales ocurridas en la sección transversal hueca del mampuesto.

Al observar la composición geométrica interna de los LCH se observó una estructura alveolar ortogonal dada por las intersecciones entre paredes internas tal como se da en las estructuras resistentes formadas por elementos lineales como ser vigas y columnas en una estructura de Hormigón Armado.

Esta similitud abrió la posibilidad de analizar la sección transversal en estos términos de continuidad y compatibilidad de deformaciones entre elementos horizontales y verticales. La tabla 5.2 permitió resumir los valores arrojados por el cálculo de rigidez relativa propuesto aplicado a la geometría de ladrillos LCH relevada.

Se pudo observar que los valores de índice de esbeltez propuesto según el criterio de Blume utilizado para pórticos de hormigón armado que fueron calculados según el algoritmo presentado a continuación el cual se basan en el concepto general de la ecuación 5.1 en donde se intentó representar la esbeltez local en cada pórtico interno.

$$\lambda_0 = 1/18 * \frac{I}{h} \quad (5.1)$$

$$\lambda_{m1} = 0.5 * \frac{h - 4e_m}{L_1 - 4e_m} \quad (5.2)$$

$$\lambda_{m2} = 0.5 * \frac{h}{L_1} \quad (5.3)$$

$$\lambda_{m3} = \frac{I_h/l_h}{\sum(I_v/l_v)} \quad (5.4)$$

λ : Índice de rigidez relativa.

I_h : Inercia de las paredes verticales.

I_v : Inercia de las paredes horizontales.

l_v : Longitud libre de paredes verticales.

l_h : Longitud libre de paredes horizontales.

Haciendo uso de las propiedades algebraicas y asumiendo que es aceptable trabajar con el valor medio de los espesores se llega a desarrollar la siguiente expresión aproximada

h : altura global del ladrillo.

e_m : espesor medio de paredes.

L_1 : Longitud global de ladrillos.

En ella se plasmó el cálculo del índice λ de tres maneras diferentes: primero calculando los valores en función de lo enunciado en la ecuación 5.1 lo que se resumió en la tabla como λ_{m3} , luego se calculó el valor con la ecuación 5.2 dando los valores ubicados en la columna λ_{m1} y por último se estimó una aproximación tomando la ecuación 5.3 dando los valores de λ_{m2} .

Con respecto a lo observado en los resultados obtenidos, de las diferentes formas de calcular el índice de esbeltez interna λ del mampuesto se llegó a concluir que es factible probar que existe efecto de pórtico entre las paredes horizontales y verticales tanto externas como internas de los ladrillos LCH relevados.

De todas formas se debe considerar que los nudos por intersección de paredes horizontales y verticales del mampuesto no tienen la misma ductilidad que una pieza de hormigón armado con lo cual el efecto de pórtico existe pero su tenor en forma comparativa es diferente.

Queda ver los resultados obtenidos por medio de la ecuación 5.4 en donde se aproximó el índice de esbeltez λ_o de los pórticos internos del ladrillo LCH en función de la inercia de la sección transversal y la altura del ladrillo cuyos valores fueron muy próximos a los calculados por los métodos enunciados en párrafos anteriores.

N°	h Prom [mm]	% vacíos V/V [%]	Inercia [m4]	Area [m2]	em [mm]	λ_{m1}	λ_{m2}	λ_{m3}
1	172.5	0.78	7.26E-06	0.01	7.78	0.505	0.504	0.65
2	174.0	0.75	8.68E-06	0.01	7.93	0.510	0.508	0.58
3	175.5	0.76	7.35E-06	0.01	8.00	0.508	0.506	0.58
4	175.7	0.76	1.00E-05	0.01	7.88	0.511	0.509	0.61
5	175.5	0.78	9.56E-06	0.01	7.46	0.510	0.508	0.77
6	174.5	0.76	7.53E-06	0.01	7.73	0.509	0.508	0.66
7	175.7	0.77	1.26E-05	0.01	7.55	0.513	0.510	0.70
8	176.7	0.76	9.45E-06	0.01	7.90	0.508	0.507	0.59
9	176.0	0.77	8.19E-06	0.01	7.61	0.516	0.513	0.77
10	174.2	0.77	1.03E-05	0.01	7.57	0.509	0.508	0.63
media	175.3	0.75	0.00001	0.01	7.895	0.497	0.497	0.540
desvío	1.27	0.01	0.00	0.00	0.35	0.01	0.01	0.1
CV	0.72%	1.75%	18.01%	5.36%	4.48%	1.68%	1.38%	14.7%
Sesgo	-0.96	-0.16	0.86	0.36	0.78	0.13	0.10	0.5
Curtosis	0.61	0.35	0.53	0.26	0.53	0.90	0.91	0.4

Tabla 5.2. Resumen de Parámetros geométricos de ladrillos LCH.-

Por lo tanto y teniendo disponibles varias formas de considerar el cálculo del índice de esbeltez interna del mampuesto se propuso optar por aquel método que arroje valores aceptables en términos estadísticos.

Esto se retoma en capítulos posteriores cuando se definan con mayor grado de detalle las herramientas de simulación que se usen para simular el problema en forma numérica y aproximar la superficie de respuesta de las mamposterías de este tipo de material.

A pesar de contar con la posibilidad de transferir esfuerzos entre paredes internas de ladrillos resta apreciar en los resultados de ensayos mecánicos que tan aprovechable es esta situación dado que el material cerámico según lo visto en el capítulo anterior mostro diferencias considerables en los valores obtenidos de Resistencia a Compresión y Tracción.

Con esto se intenta explicar que más allá de una buena situación de rigidez, los modos de falla globales del sistema de mampostería pueden ser influenciados por la condición anisotrópica del material como también las propiedades heredadas del ladrillo LCH luego de su proceso de fabricación (extrusión).

Comportamiento Mecánico. Ladrillo LCH aislado.

Ensayo a compresión.

Esta etapa comprende el ensayo a esfuerzo de compresión de ladrillos LCH de dimensiones nominales 18 18 25 de 9 tubos como se puede apreciar en la figura 5.2. Se desarrolla el análisis e interpretación de resultados para una cantidad considerable (40 contando pruebas descartadas) de ensayos realizados bajo procedimiento descrito en la norma IRAM 12586 el cual consiste en un ensayo a compresión con carga a velocidad normalizada para evitar efectos dinámicos en los resultados de la respuesta de la probeta.

Respecto a la preparación preliminar de la probeta se realizó una caracterización geométrica normalizada sobre cada mampuesto relevando espesores de pared vertical y horizontal así como internas y externas obteniendo el valor medio del espesor de pared y su desvío estándar.



Figura 5.2. Ladrillo LCH 18 18 25 para ensayar a compresión.-

Dada la baja dispersión de estos en su análisis estadístico se propone que el espesor de pared medio del mampuesto se considere como primer variable principal dado que su magnitud repercute sobre otros factores como ser la resistencia a compresión o la rigidez interna del mampuesto.

Luego se describe el proceso de encabezamiento utilizado según lo previsto en la norma IRAM 12586 el cual consta de nivelar y paralelizar las caras que tendrán contacto con el elemento de aplicación de la carga de compresión mediante el uso de un mortero hecho de yeso y cemento en proporciones 50%-50% tal como se muestra en la figura 5.3.



Figura 5.3. Ladrillo LCH 18 18 25 encabezamiento de caras horizontales.-

El equipo utilizado (prensa hidráulica IBERTEST) para el ensayo esta calibrado y posee capacidad para ensayar a compresión hasta una carga de 1 MN con la posibilidad de fijar en forma constante la velocidad de carga según las especificaciones que indique la norma de referencia (IRAM 12586).

En lo que respecta al instrumental utilizado para la medición de carga y desplazamiento se utilizaron una celda de carga de 0.3 MN. La velocidad de carga adoptada fue la necesaria para mantener el incremento de presión previsto por la norma que es del orden de 6 Mpa/min con tolerancia de 2 Mpa/min.

Los desplazamientos se midieron utilizando un potenciómetro con barra extensible de rangos de 25 a 50 mm de carrera máxima disponible.

La siguiente secuencia de imágenes mostrada en la figura 5.4 muestra el proceso de falla interna que sucede en un ensayo a compresión para un ladrillo LCH. El modo de falla observado es similar para diferentes cantidades de tubos horizontales.

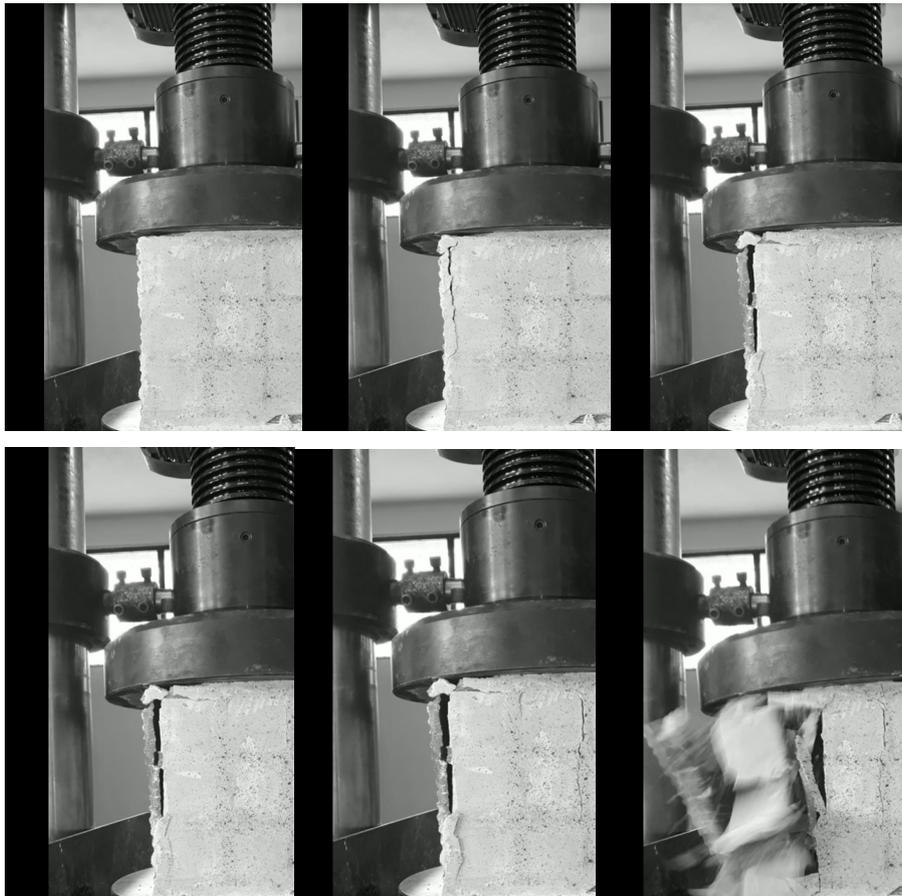


Figura 5.4. Ladrillo LCH 18 18 25 encabezamiento de caras horizontales.-

El proceso de falla ocurrido comienza por un acortamiento longitudinal en dirección de la línea de aplicación de la carga. Ocurren eventos de rotación y traslación en sentido perpendicular en las intersecciones de las paredes horizontales y verticales primero en la zona de contacto y luego en los tercios centrales.

Dichas rotaciones confirman que lo expuesto por poisson para materiales continuos y homogéneos se cumple para este tipo de elementos de tipo hueco (en forma interna) es decir ocurre un alargamiento en dirección transversal a la línea de aplicación de la carga.

Con respecto al modo de falla global se puede resumir que los giros en intersecciones de paredes del ladrillo marcan la existencia de esfuerzos internos de flexión y tracción que logran generar la falla de los nudos exteriores, con el consiguiente incremento de carga sobre las paredes internas verticales las cuales fallan cuando la carga supera un valor máximo que también se ha registrado para cada probeta.

La tabla 5.3 puede mostrar los resultados de **valores estimados de carga máxima** para los elementos centrales y la carga de rotura alcanzada en cada una de las probetas.

Probeta	Carga máx. [KN]	Tensión [MPa]	Deformación Específica	E [MPa]	G [MPa]	Δ [mm]
Promedio	149.52	13.33	0.00781	337.81	213.67	1.35
Desvío	6.75	0.825	0.00040	30.65	18.42	0.02
CV	4.54%	6.19%	5.27%	9.07%	8.62%	5.96%
Sesgo	-0.18	-0.14	2.39	0.67	1.42	2.39
Curtosis	-1.23	-0.93	7.78	16.59	2.26	7.69
Valor característico	140.02	12.17	0.0072	294.91	187.88	1.24

Tabla 5.3: Ladrillo LCH 18 18 25 Valores de Rotura a Compresión en dirección vertical.-

La adquisición de datos se realizó mediante un equipo capaz de tomar 5 datos (muestras) por segundo lo cual permitió que se pueda apreciar en los ensayos el proceso de puesta en carga de la probeta tal cual se observa en la figura 5.5 que muestra la gráfica de la carga aplicada en función del desplazamiento.

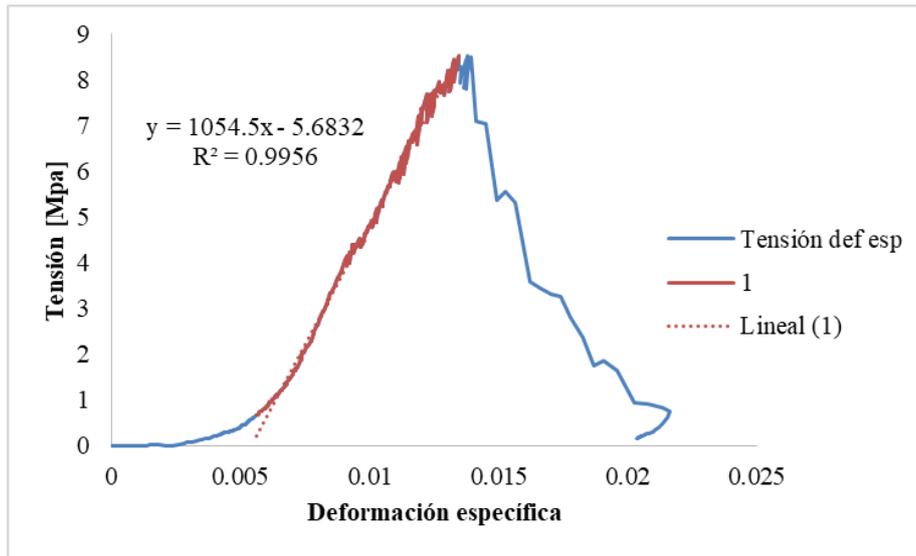


Figura 5.5: Ensayo de carga a Compresión ladrillo LCH 18 18 25.

Cabe resaltar que en casi la totalidad de los ensayos ocurrió un escalón o meseta de la recta Carga-Desplazamiento aplicada. Se asume que fue el instante posterior al primer agrietamiento y luego la probeta sufrió un reacomodamiento de sus partículas para absorber otro rango de carga a una pendiente menor (modulo E como pendiente de la función Tensión – Deformación) para llegar finalmente al instante de la rotura.

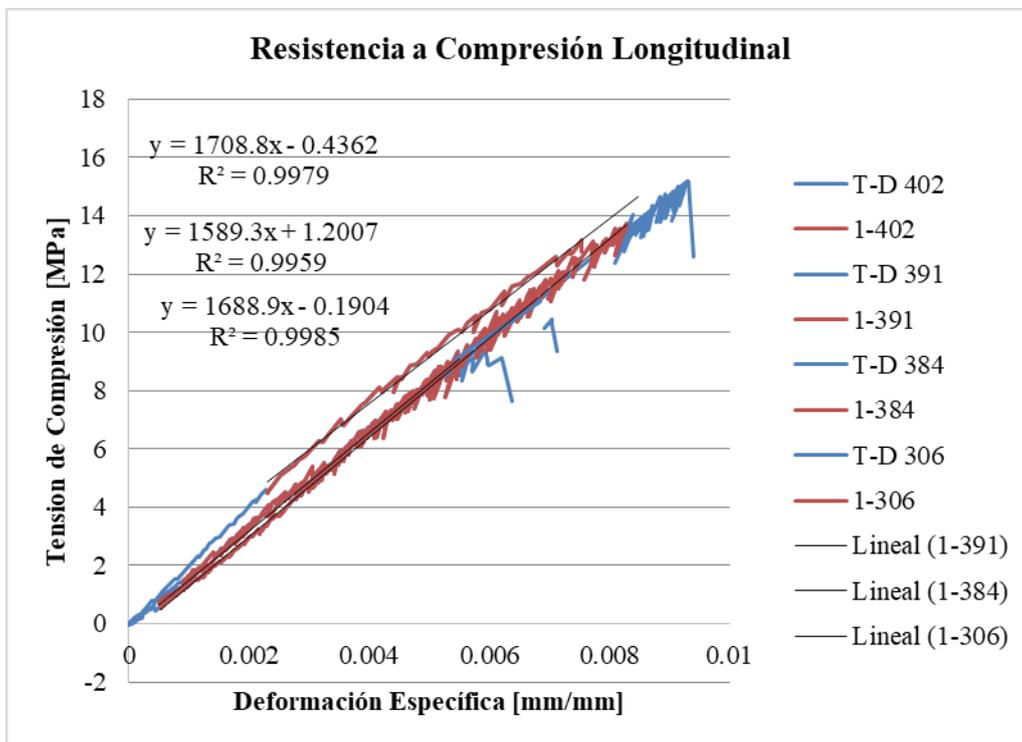


Figura 5.6: Curvas de Resistencia a Compresión Longitudinal LCH 181825.-

Tales efectos aparecen marcando un descenso en el valor de la carga absorbida por la probeta con el consiguiente micro proceso de puesta en carga similar a lo ocurrido en la parte inicial pero en menor escala.

Por último se observa en forma global una disminución de la pendiente de la función P-D en cada tramo donde ha ocurrido un agrietamiento lo que muestra primeramente que el límite elástico tiene un rango acotado por agrietamientos y seguido de un cambio de pendiente en la respuesta del mampuesto para luego llegar a un valor de rotura.

En la figura 5.6 se comparan diferentes curvas de Tensión vs. Deformación específica donde la tensión es considerada sobre paredes verticales (el área plana que recibe la carga rápidamente se deforma ocasionando que la presión se concentre en dichas paredes verticales). En la tabla 5.4 se colocan valores correspondientes a parámetros mecánicos de respuesta estructural de estas probetas y se agrega un resumen de los valores estadísticos calculados.

La figura 5.7 muestra un esquema ilustrativo de las direcciones de análisis adoptadas en los ensayos experimentales.

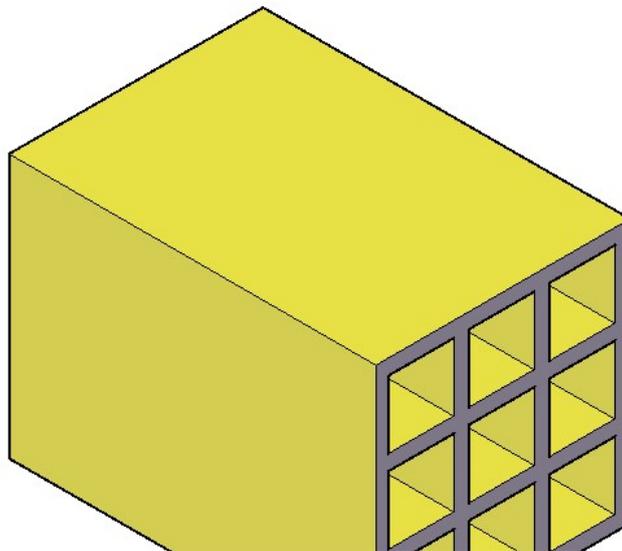


Figura 5.7: Esquema de distribución para direcciones de análisis.-

Con respecto a la estimación de parámetros mecánicos a partir de los datos experimentales se han obtenido el módulo de elasticidad Longitudinal en tres direcciones consideradas principales y se ha calculado el Modulo elástico Transversal para cada una de estas direcciones por ecuaciones de elasticidad conocidas (Tabla 5.4).

Respecto a la relación entre deformaciones específicas transversales y longitudinales, se optó por trabajar estos resultados aplicando la técnica denominada Correlación de Imágenes digitales (DIC). En ella se tomaron imágenes del ensayo en donde las probetas se prepararon en su superficie a filmar a efectos de generar un área de base blanca y puntos negros aleatorios en posición. Como en el caso del ladrillo LCH estamos en presencia de un material discontinuo puede ser incorrecto hablar del concepto de Poisson aplicado a materiales continuos y homogéneos por lo cual se adoptó el concepto de índice de deformación correlativa que brinda un enfoque general y mejor aplicable a este caso en donde si bien existe discontinuidad esta de alguna manera esta ordenada de forma ortogonal.

Ladrillo	1 Dirección Longitudinal (Período Elástico) [Mpa]			2 Dirección Transversal horizontal		3 Dirección Transversal Vertical	
	E1 ensayos a rotura	E2 ensayo campo elástico	E3 ensayo campo elástico	G32 [MPa]	E [MPa]	G31 [MPa]	E [MPa]
306	1743.30	411.60	331.86	219.85	411.60	207.44	331.86
314	2016.90	349.17	311.56	231.32	349.17	194.75	311.56
384	1684.00	315.07	252.30	208.73	315.07	157.71	252.30
391	1670.00	380.33	348.21	251.96	380.33	217.66	348.21
402	1614.00	344.04	427.95	227.92	344.04	267.51	427.95
405	1673.30	317.95	311.08	210.64	317.95	194.45	311.08
406	1919.10	290.55	364.81	192.49	290.55	228.04	364.81
407	1708.40	375.52	340.23	248.78	375.52	212.67	340.23
408	2296.00	325.12	313.76	215.39	325.12	196.13	313.76
PROMEDIO	1813.89	345.48	333.53	222.27	335.51	210.60	333.53
DESVÍO	175.63	29.93	32.69	17.67	26.67	23.86	38.16
COEF VAR %	10%	9%	10%	8%	8%	11%	11%
Sesgo	1.51	0.39	0.46	0.19	0.39	0.46	0.46
Curtosis	1.78	-0.49	1.93	-0.47	-0.49	1.93	1.93

Tabla 5.4: Ladrillo LCH 18 18 25 Módulos Elásticos en 3 direcciones.-

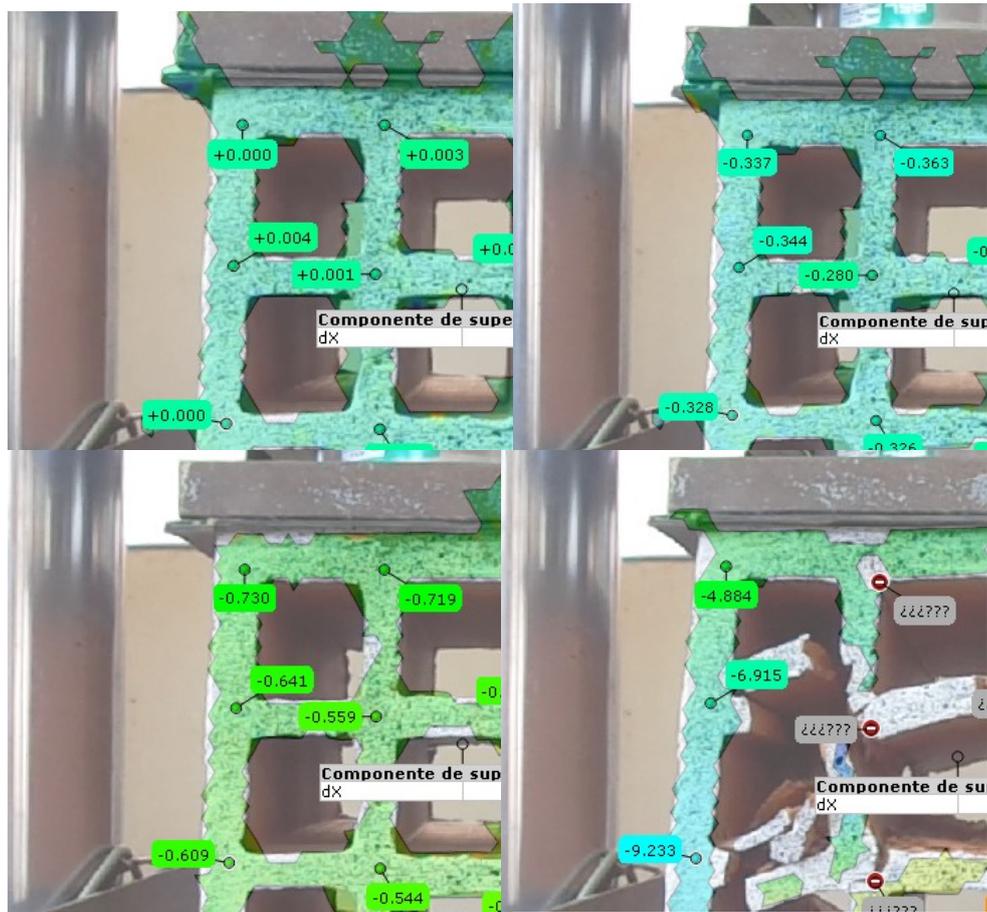


Figura 5.7: Desplazamientos Δ_x medidos por DIC.-

Luego en las figuras 5.7 y 5.8 se puede apreciar valores de desplazamiento relativo captados por un software que calcula el coeficiente de correlación cruzada en una imagen tratada con pintura blanca de base y moteado negro irregular para poder mejorar la diferencia de pesos en cada pixel de la misma.

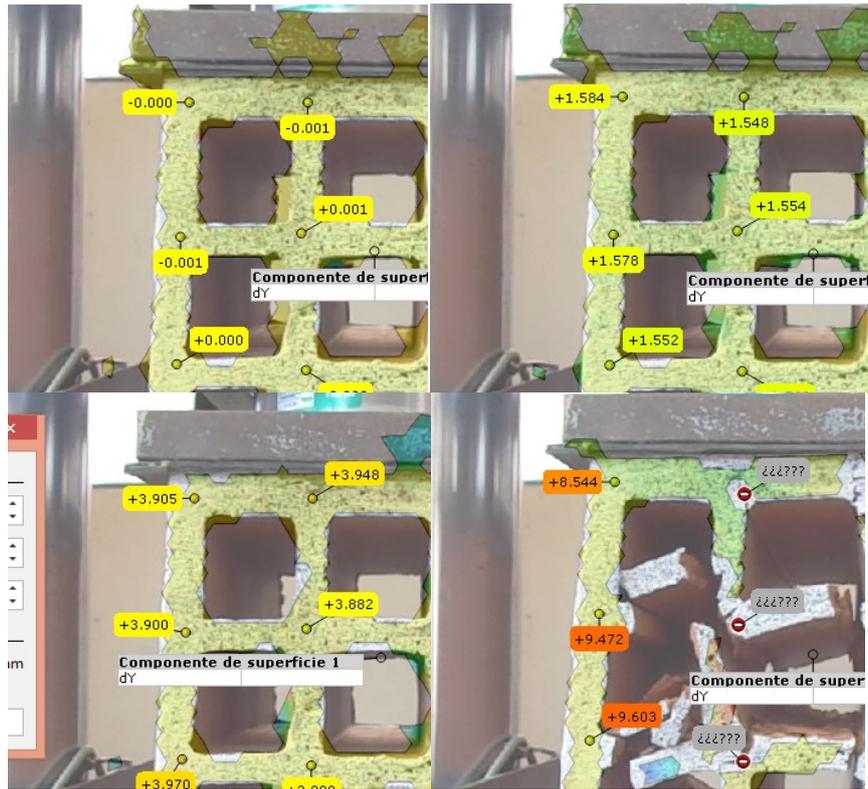


Figura 5.8: Desplazamientos Δ_y medidos por DIC.-

En un procedimiento formulado en hoja de cálculo con los datos exportados en formato *.csv se calcularon acortamientos y/o alargamientos relativos en las franjas horizontal y vertical del ladrillo y se evaluó el parámetro definido como índice I_{dc} (Índice de deformación correlativo).

La medición de los desplazamientos relativos adoptados como significativos en los ensayos se calculó como el valor medio de 4 líneas de desplazamiento relativo por cada dirección (horizontal y vertical).

Se debe aclarar que se adoptó este nombre por ser una forma discreta de representar el módulo de poisson que originalmente fue propuesto para materiales homogéneos y continuos en el caso estudiado en el presente trabajo de tesis.

La tabla 5.5 muestra una parte de los datos relevados y el resumen del análisis estadístico implementado. En ella se puede observar que si bien el valor medio está más cerca de lo considerado para el caso de materiales dúctiles como el acero el sesgo es negativo y posiciona la cresta de la “campana de Gauss” en un índice I_{dc} de 0.21 cercano al caso de los materiales frágiles como el hormigón.

De todas formas cabe aclarar lo siguiente: Si bien los índices se pueden asumir razonablemente próximos a los valores normales que arroja la teoría se trata de un material discontinuo cuyo comportamiento interno está gobernado por la relación de rigidez que muestran las paredes horizontales y verticales y en algunos casos puntuales esta aseveración se ve reflejada en altos valores de I_{dc} para ciertos ladrillos.

Esto plantea una línea de trabajo a futuro que comprende estudiar qué relación existe entre la relación de deformación transversal y el efecto de “pórtico” interno que se produce en el ladrillo LCH aislado.

Probeta	60	310	311	319	339	372
Valor medio	0.204	0.157	0.137	0.202	0.202	0.21
Desvío	0.016	0.018	0.012	0.015	0.014	0.01
C.V.	0.08	0.115	0.084	0.074	0.071	0.05
Sesgo	0.108	-0.414	-1.156	0.017	0.143	0.759
Curtosis	-0.638	-1.835	2.296	-0.554	-1.33	-0.05
adoptado	0.168	0.264	0.397	0.196	0.155	-0.051
Valor Promedio adoptado para I_{dc}			0.19			

Tabla 5.5: Ladrillo LCH 18 18 25 Índice de Deformación Correlativo.-

Ensayo a Tracción por Flexión.

En lo que respecta a ensayos a tracción por flexión se pudieron obtener pocos datos que se intentaron comparar con los parámetros obtenidos para las probetas de cerámica del capítulo 4 correspondiente al material componente de los mampuestos.



Figura 5.9: Caracterización de ladrillos ensayados a Tracción por Flexión.-

En la figura 5.9 se puede apreciar parte del proceso de caracterización geométrica realizado para estos mampuestos (datos en Tabla 5.6) en donde se analizaron las medidas tanto locales de espesores internos y externos como horizontales y verticales y se midieron parámetros globales como ser dimensiones globales, volumen y relación de Vacíos como se puede ver en las figuras 5.9 y 5.10 más adelante.

Nº	Pared exterior [mm]	Pared interior [mm]	Alto [cm]	Dif. Alto [%]	Ancho [cm]	Dif. Ancho [%]	largo [cm]	Dif. largo [%]	Alto Perf. [mm]	Ancho Perf. [mm]
187	10.08	8.09	18.28	1.6%	12.38	3.2%	24.24	3.0%	48.85	48.31
188	9.55	7.49	18.05	0.3%	12.23	1.9%	24.02	3.9%	48.48	48.69
189	9.99	7.91	18.21	1.2%	12.50	4.2%	24.54	1.8%	48.83	48.46
190	9.34	7.47	17.86	-0.8%	12.30	2.5%	24.11	3.6%	48.13	48.76
191	10.00	8.16	18.27	1.5%	12.37	3.1%	24.59	1.6%	48.29	48.03
192	9.21	7.44	17.87	-0.7%	12.19	1.6%	24.21	3.2%	48.58	49.05
193	10.08	8.09	18.28	1.6%	12.38	3.2%	24.24	3.0%	48.85	48.31
194	9.55	7.49	18.05	0.3%	12.23	1.9%	24.02	3.9%	48.48	48.69
195	9.99	7.91	18.21	1.2%	12.50	4.2%	24.54	1.8%	48.83	48.46
196	9.73	7.99	18.06	0.3%	12.23	1.9%	24.01	4.0%	48.83	47.43
Valor medio	9.71	7.78	18.09	0.01	12.31	0.03	24.20	0.03	48.71	48.39
Desvío	0.35	0.30	0.16	0.01	0.13	0.01	0.22	0.01	0.17	0.60
C.V.	3.6%	3.8%	0.9%	169.3%	1.1%	42.6%	0.9%	27.1%	0.4%	1.2%

Tabla 5.6: Resumen para ensayos de Ladrillo LCH 12 18 25 Caracterización geométrica.-

Muestra Nº	largo [cm]	Ancho [cm]	Alto [cm]	Volumen Global [cm ³]	Volumen de Huecos [cm ³]	Volumen Macizo [cm ³]	% VM/VG
137	24.33	18.09	12.34	5431.20	3067.65	2363.55	43.52%
139	24.25	18.18	12.45	5488.77	3026.47	2462.30	44.86%
143	23.34	17.89	12.25	5115.02	2935.29	2179.73	42.61%
144	24.25	18.01	12.48	5450.55	3023.53	2427.02	44.53%
145	24.25	18.14	12.29	5406.31	2988.24	2418.07	44.73%
Valor medio	24.08	18.06	12.36	5378.37	3008.24	2370.13	0.44
Desvío	0.42	0.12	0.10	150.27	49.54	112.17	0.01
C.V.	1.73%	0.64%	0.81%	2.79%	1.65%	4.73%	2.18%

Tabla 5.7: Resumen para ensayos de Ladrillo LCH 12 18 25 Caracterización geométrica.-

En ese contexto se elaboró el ensayo mostrado en la figura 5.10 sobre un ladrillo LCH a tracción por Flexión es decir aplicando una carga puntual a una probeta apoyada en dos puntos equidistantes a dicha carga como se observa en la mencionada figura.



Figura 5.10: LCH 12 18 25: Ensayo a Tracción por Flexión.-

De los resultados obtenidos en este ensayo se elaboró la Tabla 5.8 que contiene los valores de resistencia a tracción por flexión para 10 muestras que fueron pesadas y medidas en su geometría global. Se ha calculado el valor característico de resistencia a tracción por Flexión del mampuesto y se ha definido un valor característico siguiendo lo expuesto en la norma IRAM 12587.

Muestra Nº	Ancho [cm]	Alto [cm]	G' [Kg]	Tipo de encabezado	Tipo de rotura	G' [DaN]	MR [MPa]
157	12.255	18.120	949.078	Y-C	B	930.732	0.757
158	12.230	18.073	817.563	Y-C	B	801.760	0.657
159	12.328	18.223	1044.356	Y-C	B	1024.169	0.819
160	12.278	18.110	961.663	Y-C	B	943.074	0.767
161	12.338	18.163	783.704	Y-C	B	768.555	0.618
162	12.325	18.065	949.078	Y-C	B	930.732	0.757
163	12.300	18.060	949.078	Y-C	B	930.732	0.759
164	12.323	18.125	949.078	Y-C	B	930.732	0.753
165	12.278	17.935	949.078	Y-C	B	930.732	0.771
166	12.273	18.048	949.078	Y-C	B	930.732	0.762
Valor medio	12.29	18.09	930.18			912.20	0.74
Desvío	0.04	0.08	74.76			73.32	0.06
C.V.	0.29%	0.42%	8.04%			8.04%	7.94%

Tabla 5.8: Resumen para ensayos Ladrillo LCH 12 18 25 Caracterización geométrica.-

En la Tabla 5.9 se elaboró una síntesis de dos ensayos de adherencia realizados según norma IRAM 12592 en donde se puede apreciar los valores de resistencia en la interface entre mampuestos y mortero de junta.

cantidad de muestras estudiadas	6
---------------------------------	---

Celdas elaboradas	2
-------------------	---

Probeta	Carga máx. [Kg]	Area 1 [cm ²]		Area 2 [cm ²]		Area Media [cm ²]	adherencia "A" [Mpa]	Tipo de rotura
		Ancho [cm]	Largo [cm]	Ancho [cm]	Largo [cm]			
197/198/199	3326.86	17.63	23.97	17.44	23.47	832.01	0.39	C
200/201/202	1598.08	17.57	23.67	17.59	23.74	833.40	0.19	A

Referencias

- A: Rotura producida en el bloque**
- B: Rotura producida en la superficie de contacto**
- C: Rotura producida en ambos.**

Velocidad de carga : 900 DaN/min

Tabla 5.9: Ladrillo LCH 12 18 25 Ensayo de Adherencia.-

En la figura 5.11 se puede apreciar una imagen del ensayo correspondiente a la celda 200/201/202 en donde la rotura se produjo en el mampuesto y la misma ha sido de tipo frágil y súbita.



Celda N°2: Ladrillos
Rotura producida en
y uno de los laterales
permanecio intacto. |
juntas manifesto des|
alguno.

Figura 5.11: LCH 12 18 25: Ensayo de Adherencia.-

Síntesis, análisis e interpretación de resultados experimentales.

De los resultados observados en cada experiencia se pudieron recopilar los siguientes párrafos desarrollando un análisis e interpretación de los mismos en principio desde el punto de vista estadístico para posicionar la calidad de los mismos y luego desde un enfoque estructural resistente para poder establecer cuestiones a tener en cuenta en la etapa de simulación numérica.

En primer lugar y con respecto a la geometría relevada en ladrillos LCH 181825 se pudo observar que las dimensiones globales pueden ajustarse a una distribución de tipo normal y de dispersión considerablemente baja.

Luego las dimensiones interiores como ser los espesores externos e internos y, verticales como horizontales, arrojaron una dispersión mayor del orden del 6 a 7 % que se entendió justificada en los efectos locales que tuvo el proceso de horneado a que fueron sometidos.

Paralelamente la metodología de extrusión para moldear los mampuestos sumada a las condiciones de consistencia y contenido de humedad de la argamasa usada pudieron ser factores condicionantes de este resultado.

La dispersión en los parámetros como ser el área neta, el valor del momento de inercia de la sección transversal y el volumen neto se ven afectados por esta dispersión en forma directa dado que dependen de estos espesores.

Respecto a la relación de rigidez que se propone considerar en el interior del mampuesto se intentó generar un concepto que sirva para calibrar en la fase de simulación numérica a efectos de poder aproximar la respuesta estructural en principio de los elementos componentes y luego de la mampostería en forma global.

Esto último se planteó sobre la base de proponer un modelo numérico sencillo y eficiente que según [Oller, 2014] puede lograrse a partir del concepto de macro modelos cuando se trata de materiales compuesto como es el caso de la mampostería.

En relación a lo observado en los ensayos mecánicos a compresión y otros esfuerzos se pudo constatar la importancia que tiene en este tipo de sistemas las uniones internas entre espesores de pared. Esto se asume como válido por el comportamiento de los nudos que a primera vista son el lugar por donde inician las fallas y los patrones de agrietamiento a medida que aumentan la magnitud de la carga aplicada.

Con respecto a los resultados de comportamiento mecánico lo que se definió como carga máxima es el valor en cada experiencia para el cual empezaron los modos de falla ya comentados. Por lo tanto los valores descriptos en la tabla 5.3 fueron referidos a este instante del procedimiento experimental.

Respecto de los valores de relación entre deformaciones transversal y longitudinal se adoptaron valores característicos para proseguir con los cálculos posteriores que dependen del mismo.

Respecto de los parámetros como E y G para el mampuesto se presentaron solo los valores que corresponden con cada experimento en su etapa previa al inicio de la fisuración. Los valores posteriores se recolectaron pero mostraron un rango de dispersión considerable y se decidió estudiarlos más adelante cuando se analicen celdas y paneles de mampostería.

Con respecto a los ensayos a flexión se pudo constatar el carácter ortotrópico que tiene el mampuesto. Por lo tanto para los siguientes capítulos se intentara buscar la correlación entre las características asociadas a la flexión considerando la ortotropía.

Por ultimo en los ensayos de adherencia se pudieron obtener datos que se utilizaran para definir la resistencia de la interface mampuesto mortero, fenómeno a incluir dentro del modelo numérico.

CAPÍTULO 6

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: CELDAS DE MAMPOSTERÍA.

Segunda Etapa. Celda de mampostería con morteros de junta horizontal y vertical.

Prosiguiendo con el programa de caracterización experimental y habiendo estudiado lo que ocurre con los materiales componentes con anterioridad (lo que arroja el estudio del comportamiento de un ladrillo LCH en forma aislada) actuando a compresión y a tracción por flexión.

En el presente capítulo se efectuó una síntesis del análisis experimental sobre lo que ocurre con estos elementos ubicados convenientemente en un sistema de mampostería e interactuando en un material compuesto.

El siguiente tramo en el proceso de caracterización experimental de los sistemas de mamposterías LCH consiste en detectar cuáles son los modos de falla que ocurren cuando se aplican acciones a un sistema de mampuestos con mortero de junta en varias direcciones además de verificar los modos ocurridos en el tramo experimental de análisis de ladrillos LCH en forma aislada.

Se compiló la información experimental correspondiente al análisis a compresión de las denominadas celdas de mampostería las que se componen de un arreglo de mampuestos enteros y de a mitades unidos por morteros de junta verticales y horizontales dando un pack de mampostería a modo de “recorte” de una pared de dimensiones promedio en el orden de 18 cm de ancho por 37.5 cm de alto y 39 cm de largo.

La figura 6.1 muestra imágenes de una celda elaborada en laboratorio con las especificaciones mencionadas en el párrafo anterior con la salvedad de haberlas confeccionado en horizontal para mantener la forma global en dimensiones determinadas.

Para los espesores de junta vertical y horizontal se adoptó el mismo tamaño y la dosificación del mortero es similar a las estudiadas en el capítulo 4 utilizando cemento, cal y arena en cantidades conocidas y constantes en volumen aparente. No se hicieron celdas con mezcla de cemento, arena y fluidificante.

Respecto al encabezado de las probetas se utilizó un sistema de encofrado lineal asegurado con varillas roscadas y bulones que permitieron buscar la horizontalidad y paralelismo entre caras para asegurar condiciones mecánicas adecuadas durante el ensayo.



Figura 6.1. Elaboración de una celda de mampostería.-

La tabla 6.1 presenta valores estadísticos de las dimensiones globales medidas en las celdas que fueron fabricadas para ser ensayadas a compresión.

Se resumieron los estadísticos promedio y dispersión de cada dimensión global medida en cada arista de las celdas de mampostería. Se evaluó el sesgo y la curtosis para verificar la proximidad de la muestra con un tipo de distribución probabilística normal.

En el promedio y desvío típico horizontal de los 3 parámetros de dimensión global que son altura, largo y ancho no ocurrieron dispersiones excedidas en los mismos. Respecto a la asimetría se observaron valores compatibles con una distribución probabilística de tipo

cercana a la normal. En la curtosis la misma se presentó negativa en la mayoría de las mediciones. En el caso de la curtosis positiva denota menor distancia respecto del centro de la distribución que en el caso de tener curtosis negativa que implica distancias mayores a las medidas de tendencia central.

Celda N°	L1	L2	h
Promedio	173.63	374.68	359.13
Desvío Est.	1.21	2.93	0.98
CV	0.697%	0.782%	0.274%
Sesgo	-1.42	-0.05	0.80
Curtosis	2.46	-5.72	-1.48

Tabla 6.1. Geometría de celdas de mampostería.-

El objetivo de estudiar la siguiente etapa experimental consiste en evaluar los modos de falla que corresponden por un lado al mampuesto interactuando con el mortero de junta, por otro lado la falla en el mortero propiamente dicho y el interface entre los anteriores.

Se procedió a evaluar los 3 modos de falla mencionados en el capítulo 5. Se estableció una comparativa de tendencias y valores en el módulo elástico longitudinal correspondiente a la dirección usual de aplicación de la carga en el caso de sistemas de mamposterías para viviendas (cargas que transmite un encadenado horizontal, reacciones de apoyo de las cubiertas y estructuras de techo, entre otros).

La metodología de ensayo fue basada sobre lo especificado en la norma IRAM 12737. Se midieron desplazamientos en las 4 esquinas de cada celda para detectar en forma eventual posibles diferencias por asentamiento localizado y poder descartar casos en donde la placa de carga haya generado concentración de tensiones no deseadas en alguna zona de la superficie de aplicación de la carga.

La metodología de encabezado de las celdas se adoptó conforme a lo especificado en normas IRAM (12586-12737) aplicables al caso de ensayos de determinación de la resistencia a compresión en probetas hechas en formato de murete.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Para encabezar las probetas se utilizó una mezcla de cemento y yeso en la cual se reguló en porcentaje del segundo componente para manipular conveniente el proceso de fragüe dadas las dimensiones de la probeta a encabezar. Respecto al sistema de accionamiento hidráulico para aplicación de la carga se utilizó un pórtico de carga calibrando la velocidad de carga a 1 KN/seg.

El ensayo se realizó sobre una losa reactiva de 1,00 m de espesor perteneciente al laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones de características especificadas y conocidas.

En relación al sistema de medición de parámetros necesarios para el análisis experimental (carga de compresión y desplazamientos verticales en dirección de la carga aplicada), Se utilizaron los mismos equipos de la etapa anterior relatada en el capítulo 5: un adquirente de datos de 24 canales con posibilidad de registrar en forma digital datos de carga y desplazamiento en distintos formatos.

El instrumental de medición para el ensayo extensómetros analógicos tipo potenciómetros con rangos de 10 a 50 mm de capacidad máxima y celdas de carga de 100 KN de capacidad de tipo T-C (tracción/compresión).

Con respecto a la caracterización geométrica de los elementos componentes se adoptaron valores relevados del proceso de caracterización geométrica de los ladrillos LCH del capítulo 5.

Para el caso de los morteros se utilizaron para la confección de las celdas una matriz que permitió ejecutar los espesores de junta del mortero de adhesión con un espesor constante de 15 mm.

Ensayo a compresión centrada.

En los ensayos a compresión centrada se observaron los siguientes modos de falla: mismo efecto ocurrido en ladrillos ensayados en forma aislada (flexo-tracción en nudos por ensanchamiento transversal) hasta la primera fisura en paredes internas horizontales por dicho efecto para luego desarrollarse diferentes modos de falla (líneas de agrietamiento) que se sucedieron en algunos casos en el ladrillo y en otros casos tracción indirecta en la junta horizontal de mortero.

Respecto a los valores de módulo Elástico ocurridos se pudo observar que en referencia a los valores obtenidos en ensayos de ladrillos aislados los resultados en celdas fueron considerablemente similares lo que da pauta de la existencia de una correlación en el comportamiento como ladrillo aislado y en conjunto con un arreglo de juntas y otros ladrillos.

En la figura 6.2 se tomó una secuencia de falla de una celda en donde la falla involucro al ladrillo inferior en la pared horizontal externa en su lado derecho y se pudo constatar un efecto de tracción que ocasiono fisuración en la pared horizontal inmediata inferior para dar paso luego a un falla en la junta de mortero horizontal ocasionando un mecanismo de colapso que afectara a todo el sistema interno de paredes tanto horizontales como verticales.

Aquí se pudo captar que el proceso de falla combinado varios de los modos de falla mencionados al principio del presente capítulo: fallas locales en ladrillos, fallas en la interface entre ladrillos y mortero de junta y fallas en el mortero de junta apareciendo en ese orden según mostró la secuencia de imágenes ocasionando un mecanismo de colapso local cuando se alcanzó la resistencia a tracción del mortero generando fisuras verticales.

En la mayoría de los puntos de falla pertenecientes al ladrillo LCH las fisuras y roturas ocasionadas indicaron un agotamiento de la capacidad a tracción por flexión de la cerámica lo cual generó desprendimientos de las uniones entre paredes horizontales respecto de las verticales iniciando de esta manera la falla de todo el sistema a posterior.

En lo que respecta a aquellas fallas ocurridas en la interface entre mortero y ladrillo se puede apreciar entre las figuras 6.2 y 6.3 la correlación de una falla de interface que se propagó por todo el elemento hasta llegar al extremo opuesto de la celda experimentando una bifurcación en los lugares de intersección de la junta horizontal con las juntas verticales.

En forma global se pudo visualizar un plano diagonal de falla que recorrió el segmento transversal de la celda afectando a varios puntos de unión entre paredes horizontales y verticales cruzando inclusive por uno de los lugares en donde ocurrieron fallas por supuesta tracción indirecta en el mortero de junta horizontal.

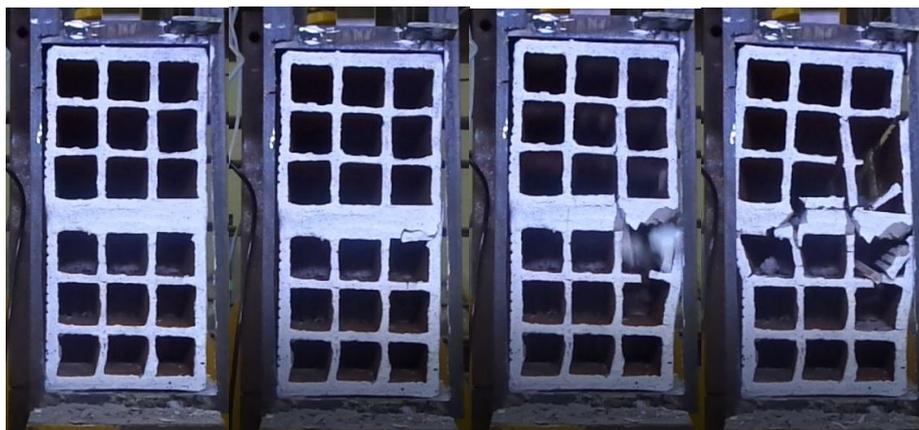


Figura 6.2. Secuencia de falla a Compresión en una celda de mampostería.-

En la figura 6.3 se captó el proceso de falla desde la vista lateral derecha pudiendo observar que la falla transversal se propagó en dirección longitudinal hasta encontrar un medio de falla posible en la junta vertical con lo que la rotura se propago desde ese punto en ambas direcciones: vertical y horizontal por la interface entre mortero y ladrillo LCH.

En la mencionada secuencia de imágenes se pudo visualizar que el desprendimiento del mortero de junta vertical respecto del ladrillo LCH ocurrió a ambos lados del mismo lo cual evidenció además una falla en la interface en el sector que más aporte tiene de material cementicio por una cuestión tecnológica (el efecto de “colado accidental del mortero en los tubos del ladrillo LCH).

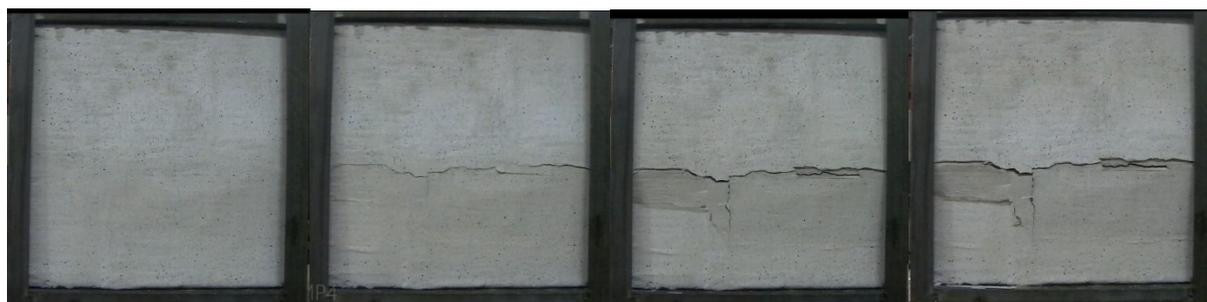


Figura 6.3. Vista lateral de falla a Compresión en una celda de mampostería.-

Se puede observar en dicha figura que los modos de falla tiene en común el efecto de desprendimiento de los extremos de las paredes horizontales por causa de los esfuerzos de flexión ocurridos ya sea combinado o en forma independiente.

Otra particularidad observada es la baja resistencia al corte ofrecida por el mortero de junta lo que indica un posible aspecto del sistema a ser optimizado dado que introduce un modo de falla al elemento mampostería o al menos contribuye a que proliferen los modos de falla correspondientes al ladrillo LCH. Veamos a continuación en detalle lo ocurrido en los casos más particulares.



Figura 6.4. Ensayo a compresión: fallas en celda 1.-

En la figura 6.4 se observaron dos modos predominantes en el mecanismo de falla: falla por tracción en las uniones de paredes internas de ladrillo y falla por tracción indirecta en el mortero de junta horizontal. No se detectaron fallas de adherencia en la interface entre ladrillo y mortero.

En la parte superior en las fallas propias del ladrillo se pudo observar una línea de falla que cruza de un extremo a otro en el segmento transversal en el cual ocurrió la falla. El mismo tipo de falla ocurre en la pared horizontal inmediata inferior.

Cabe destacar que en la parte inferior se observó una falla diagonal dentro de la pared vertical exterior que se combina con una falla a tracción por flexión. Luego se debe resaltar que en la inspección de los ladrillos para su proceso de caracterización geométrica se

observaron fallas provenientes del proceso de fabricación por extrusión del material primario.

En la figura 6.5 además de los modos de falla mencionados en la imagen anterior se pudo observar fallas en la interface entre mortero y ladrillo. Se visualizó a su vez que el plano diagonal global vuelve a aparecer desde esquina derecha superior hacia esquina izquierda inferior finalizando en el ladrillo inferior avistando una falla por flexo tracción.

En uno de los puntos de falla propios del mortero se observó indicios de aplastamiento por compresión (ver falla a la derecha en la imagen). A partir del plano de falla global que avanza de arriba hacia abajo y de derecha a izquierda, en el punto donde ocurre un efecto de aplastamiento mencionado del mortero nace un plano secundario de falla diagonal hacia el extremo opuesto del primero culminando en una falla por flexo tracción en la pared horizontal exterior del ladrillo inferior.



Figura 6.5. Ensayo a compresión: fallas en celda 4.-

En la figura 6.6 el modo de falla predominante es una falla por agrietamiento del mortero de junta horizontal seguido de una falla leve por desprendimiento de la interface entre mortero y ladrillo.

Este efecto ha generado en una segunda fase un efecto de flexo tracción en las paredes verticales interiores en su parte inferior. En el ladrillo inferior se pudo observar en su parte superior izquierda un agotamiento por flexo tracción que prácticamente ha destruido la pared vertical comprometida.



Figura 6.6. Ensayo a compresión: fallas en celda 11.-

En la figura 6.7 se vuelve a repetir el plano de falla diagonal con varios puntos de falla por flexo tracción en las inmediaciones del mortero horizontal que han dado lugar a un cuadro de agrietamiento en el mencionado mortero.

En puntos coincidentes han ocurrido fallas locales por desprendimiento de las paredes verticales debido al desplazamiento ocasionado por el agrietamiento del mortero. A la vez de las rotaciones ocurridas en nudos internos de los ladrillos se suceden cortes enteros en las paredes perpendiculares a las que ha rotado en su base.



Figura 6.7. Ensayo a compresión: fallas en celda 14.-

En el sistema se observó una dislocación global que hace imposible que la resistencia se sostenga en el tiempo como fue el caso del ladrillo LCH dado que al comparar los valores de rotura para las celdas fueron sustancialmente menores que en el caso de los ladrillos.

Por tanto se puede inferir que los elementos introducidos como novedosos en esta etapa del programa experimental que son el aumento de la esbeltez y el espesor de mortero de junta contribuyeron al decremento de las prestaciones del ladrillo en términos de resistencia mecánica a compresión.

El mencionado efecto de pórtico que experimenta el sistema al entrar en carga hace que inicie un mecanismo de colapso interno localizado que genera un cambio en las condiciones rigidez propia del sistema lo que explica el cambio de pendiente de la curva tensión-deformación de los ensayos estudiados y medidos.

Aun así la pendiente de este comportamiento determinada por el módulo E en el rango elástico se mantuvo en un rango similar lo que hizo pensar en el grado de deformabilidad que introducen estos dos efectos relativamente nuevos respecto de los ensayos realizados en ladrillos aislados.

Este aspecto es muy importante porque de mantenerse en rango durante todo el proceso de caracterización experimental daría respuesta a la configuración del sistema permitiendo

establecer los parámetros mecánicos de una pared a partir del análisis de un muestreo de ladrillos componentes.

Por otro lado los valores de carga máxima han disminuido considerablemente pudiendo deberse esta cuestión a la incorporación de un plano potencial de falla por la inclusión del mortero de junta en el presente análisis experimental.

Se realizó una descripción visual de lo observado en la parte lateral de las celdas en donde ese han observado cuestiones de interés en la comprensión de los fenómenos que dan lugar a la falla del sistema en general.



Figura 6.8. Ensayo a compresión: fallas en celda 1 lateral.-

En la figura 6.8 se observa que ha ocurrido en principio una bifurcación de las tensiones de adherencia en la interface mortero-ladrillo. A su vez se pudo visualizar el efecto de la falla de las uniones entre paredes horizontales y verticales que ocasionaron un desprendimiento y desplazamiento lateral de las paredes verticales exteriores.

La figura 6.9 permitió observar similares modos de falla con la salvedad de que la falla horizontal ocurrió tanto dentro del espesor del mortero en algunos sectores (ver a la izquierda de la imagen) para luego recorrer en un segmento la interface horizontal mortero ladrillo (IMLH) pasando por ultimo a la unión entre pared vertical y horizontal exteriores en parte (ver a la derecha de la imagen).



Figura 6.9. Ensayo a compresión: fallas en celda 11 lateral.-

En la figura 6.10 se corroboró un modo de falla acorde a unos de los valores más altos de resistencia a compresión dado que la falla fue súbita ocasiono un desprendimiento abrupto del extremo transversal derecho de la línea de ladrillos inferiores así como una falla en la interface vertical mortero ladrillo (IMLV).

Este desprendimiento se puede ver que tiene un extremo en la unión entre pared vertical y horizontal exterior derecha (tomando el plano transversal como base) que recorre la longitud completa de la probeta.



Figura 6.10. Ensayo a compresión: fallas en celda 14 lateral.-

En la figura 6.11 el modo de falla se concentró en la línea de mortero horizontal que unía las dos hiladas de ladrillos de la probeta ensayada.

Su propagación afectó tanto la IMLH como el espesor del mortero propiamente dicho sin afectar la junta vertical al menos en esta vista. De todas formas dicha falla permite asumir un efecto de rotación en sentido anti horario si tomamos como base el plano transversal que debió completarse con alguna falla interna en las uniones de las paredes horizontales y verticales del ladrillo.



Figura 6.11. Ensayo a compresión: fallas en celda 2 lateral.-

En lo observado en la figura 6.12 los modos de falla combinados fueron varios: desprendimiento lateral de paredes verticales, tracción indirecta en el mortero, falla de adherencia en IMLH, falla de adherencia en IMLV, tracción por flexión en una de las paredes horizontales exteriores de la línea superior del ladrillo y tracción por flexión en las paredes externas verticales.

Cabe destacar que en varios ladrillos mientras se analizaron sus propiedades geométricas se encontraron líneas de falla previas al proceso de elaboración de las probetas.

Se tomó la decisión de continuar con la elaboración de las mismas puesto que el hecho comprende una realidad de lo que sucede en la construcción de mamposterías: la no selección de piezas intactas sin defectos lo que implica que estas imperfecciones son parte del sistema y corresponde incluirlas naturalmente en el análisis experimental.



Figura 6.12. Ensayo a compresión: fallas en celda 17 lateral.-

De lo observado en las imágenes de las probetas ensayadas se puede concluir que los modos de falla predominantes son:

- fallas locales por flexo tracción en el interior del ladrillo debido a rotaciones en dichos “nudos” que están afectada por un efecto de pórtico que ocurre por la conformación transversal de los ladrillos. Este modo de falla por lo observado es el que inicia el resto de los mecanismos de falla ocurridos.
- Falla por aplastamiento del mortero en los casos en donde las fallas en uniones internas de la cerámica del ladrillo transmite carga localizada de compresión en algún punto del mortero.
- Falla de tracción indirecta en el mortero por efecto de la compresión aplicada en el mismo por los ladrillos
- Falla de adherencia por deslizamiento relativo entre el mortero y el ladrillo en su interface de contacto
- Falla por tracción directa en las paredes internas horizontales del ladrillo que dan como resultado un desplazamiento transversal hacia afuera de la probeta que actúa como inicio de otros mecanismos de falla

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

En general puede darse cualquiera de estos efectos y lo interesante es que dichas fallas no son enteramente independientes y las mismas interactúan haciendo que el mecanismo de falla actúe con mayor o menor velocidad.

A la vez las fallas por desprendimiento lateral son propias de probeta que han adquirido considerables valores de esfuerzo a compresión.

En los casos en donde la falla inició en el ámbito del mortero el tipo de falla fue de carácter dúctil mostrando valores de desplazamiento de mayor magnitud y alcanzando valores de resistencia menores al primer caso.

La tabla 6.2 muestra los resultados estadísticos de los ensayos realizados en 17 celdas de mampostería ensayadas a compresión centrada en el laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. Los parámetros obtenidos en forma experimental fueron la carga máxima y los acortamientos de la celda en cada esquina de la misma.

A continuación se presentan las expresiones que sirvieron para determinar los parámetros mostrados en la mencionada tabla:

$$\Delta l_m = \sum_{i=1}^n \Delta l_i \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}{h_m} \quad (6.2)$$

$$h_m = \sum_{i=1}^n h_i \quad (6.3)$$

$$\sigma_m = \frac{P_{exp}}{A_n} \quad (6.4)$$

$$A_n = \sum_{i=1}^n e_{v_i} * l_2 \quad (6.5)$$

Δl_m : Desplazamiento vertical medio.

Δl_i : Desplazamiento vertical registrado.

ε_m : deformación específica promedio.

h_m : altura global promedio de la celda.

σ_m : Esfuerzo axial de Compresión medio.

A_n : Área neta comprimida.

e_{vi} : espesores de paredes vertical del LCH.

Los valores presentados corresponden al promedio de los resultados individuales que ocurrieron en los ensayos midiendo carga y desplazamiento de probetas que fueron caracterizados de manera geométrica.

El desplazamiento vertical Δl_m se obtuvo mediante el promedio de los desplazamientos registrados en cada extremo de la probeta al momento de aplicar la carga vertical de compresión. A su vez la deformación específica se obtuvo tomando como referencia el valor de la altura global también obtenida en valor medio.

El esfuerzo de compresión medio se obtuvo de efectuar el cociente entre la carga aplicada y el Área neta equivalente obtenida de integrar los espesores de pared verticales en la longitud global l_2 de la celda.

Con respecto a los valores de dispersión que ocurrieron en el módulo E_r (Pendiente de la recta Esfuerzo – deformación luego de ocurrida la fisuración) se entendieron como valores lógicos de los modos de falla que se observaron considerablemente distintos en cada ensayo en particular aun con la salvedad de haberse mantenido los rasgos generales del comportamiento mecánico observado en los ensayos de ladrillos aislados referido al inicio de la falla por un efecto de flexo-tracción en la unión de las paredes horizontales internas con las paredes verticales externas.

CELDAS	Carga máx. [KN]	Acortamiento medio [mm]	Deformación específica máx. [mm/mm]	Esfuerzo máximo a Compresión [Mpa]	Módulo Ef [Mpa]	Módulo Er [Mpa]
PROMEDIO	35.3278	1.52	0.004	4.6613	1673.1868	873.53
DESVIO	2.2601	0.096	0.0001	0.3209	22.6658	59.2027
COEF VAR	6.40%	6.32%	2.99%	6.88%	1.35%	6.78%
Sesgo	0.04	-0.01	-0.03	-0.02	0.01	-0.01
Curtosis	0.06	0.09	0.12	0.2	0.07	-0.01
Valor adoptado	31.620	1.362	0.004	4.135	1636.142	776.400

Tabla 6.2. Ensayos a compresión en Celdas de mampostería LCH.-

Es importante aclarar que si bien el reglamento CIRSOC 501 especifica el ensayo de pilas de mampuestos (norma IRAM 12737) para establecer la resistencia a compresión de la mampostería, las probetas normalizadas de dicho ensayo no poseen juntas verticales. Además basado en el trabajo de Oller [2014] se buscó estudiar el comportamiento de una Porción de muro con ambos tipos de junta (horizontal y vertical) a efectos de captar lo que ocurre en las interfaces de ladrillo y mortero. En referencia a lo anterior y tomando base en el trabajo de Martínez [2003] se verificó la resistencia a compresión del bloque compuesto obtenida en estos ensayos con los siguientes criterios analíticos de Oller y Hilsdorf, mostrados en la figura 6.13.

Caracterización del comportamiento compuesto

Criterio de Hilsdorf (1969).-

$$f = \frac{f_b \left(f_{tb} + \frac{\alpha}{4.1} f_m \right)}{U_u \left(f_{tb} + \frac{\alpha}{4.1} f_b \right)}$$

datos

fb: 6.76 Mpa
 ftb: 2.23 Mpa
 fm: 3.49 Mpa
 Uu: 1.5 (parámetro recomendado)
 a: 2.07 s/ tamaño de celda

f:	3.19 Mpa	según Hilsdorf
----	----------	----------------

Criterio de Ohler (1986).-

$$f = f_m + \frac{a f_b - f_m}{1 + \frac{b \alpha f_b}{m f_{tb}}}$$

datos

fb: 6.76 Mpa
 ftb: 2.23 Mpa
 fm: 3.49 Mpa
 a: 0.6 (parametro de tabla)
 b: 0.6 (parametro de tabla)
 a: 2.07 s/ tamaño de celda
 m: 2 (parametro de tabla)

f:	3.69 Mpa	según Oller
----	----------	-------------

Figura 6.13. Cálculo analítico por fórmulas de Ohler (1986) y Hilsdorf (1969).-

Los parámetros constantes se adoptaron del mencionado trabajo de Martínez [2003], y puede apreciarse que existen diferencias considerables entre los valores analíticos y los que corresponden a resultados experimentales de la presente Tesis Doctoral, por lo tanto esta cuestión debe agendarse como una más de las líneas de trabajos futuros en esta investigación.

Se decidió entonces tomar como punto de partida el modelo propuesto por [Oller, 2014] y generar un formato de celda experimental como parte del proceso de caracterización de muros de ladrillos LCH de la Provincia de Misiones.

Con respecto a los rasgos estadísticos de esta muestra se puede decir que la mayor parte de los parámetros estadísticos ajustan a un tipo de distribución de tipo normal en principio cuando son evaluados antes de la formación de los primeros patrones de agrietamiento.

Esto tuvo sentido cuando se analizó la dispersión en E_r que es un parámetro medido luego de ocurrida la fisuración. En sus valores se pudo apreciar la considerable dispersión que muestra el comportamiento al activarse los mecanismos de falla internos entre paredes horizontales y verticales interiores.

La figura 6.13 es un ejemplo de cómo se efectuó el análisis y determinación de los módulos E_f y E_r de la tabla 6.2 se puede observar que los valores de ajustes encontrados son adecuadamente cercanos a la unidad lo cual da cuenta de la linealidad de comportamiento mecánico entre esfuerzos-deformaciones en estos sistemas y que una vez ocurridas las primeras fisuras todavía se mantiene cierto rango de linealidad con un cambio en el orden de magnitud de la pendiente de la recta de tendencia lo cual implica un cambio en el valor de la rigidez axial por causa de los patrones de agrietamiento iniciados.

Luego se debe analizar que ocurre cuando los modos de falla avanzan lo suficiente como para afectar la linealidad entre esfuerzos y deformaciones dado que se espera que ocurran fenómenos de alto orden de dispersión como es usual.

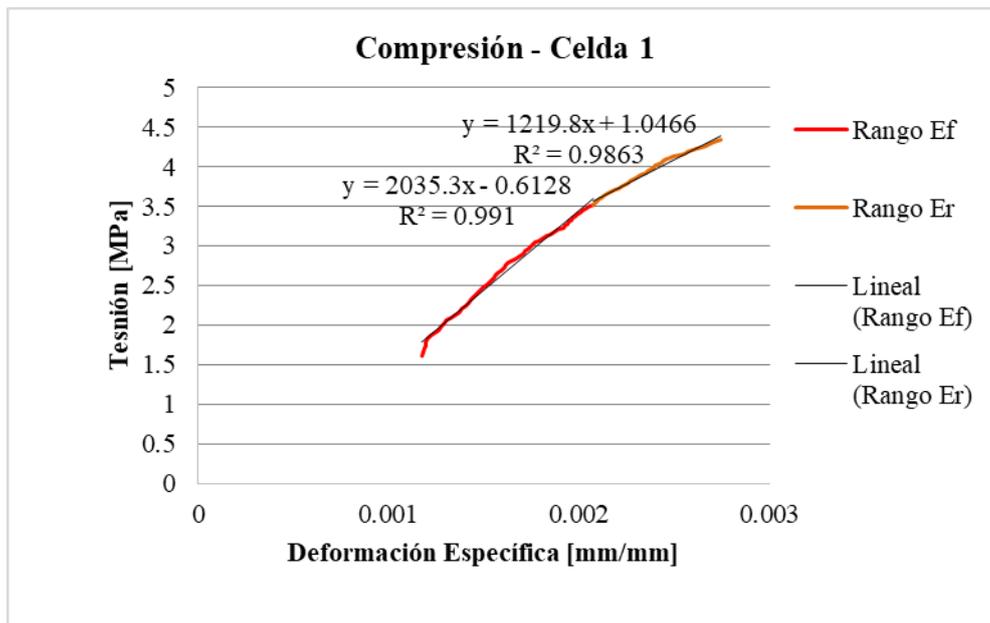


Figura 6.13. Ensayo a compresión: Módulos E pre y post fisuración.-

La figura 6.14 muestra las curvas que relacionan tensión y deformación para los ensayos realizados aplicando una carga monótonica de 1 KN/seg hasta alcanzar la rotura. En ella se representan líneas de tendencias aproximadas por método de mínimos cuadrados siendo “y”

la función que expresa dicha tendencia y R^2 el coeficiente de ajuste de la mencionada función.

Se puede apreciar que las pendientes de las curvas en la parte inicial son similares y se ha comprobado que el orden de magnitud es similar a lo visto en los ensayos a compresión de los ladrillos aislados.

Se observa también que los picos de resistencia ocurren en forma posterior a los mecanismos de falla y tienen un grado de dispersión considerable como se puede apreciar en los valores mostrados cuando se analizó la estadística de estos resultados.

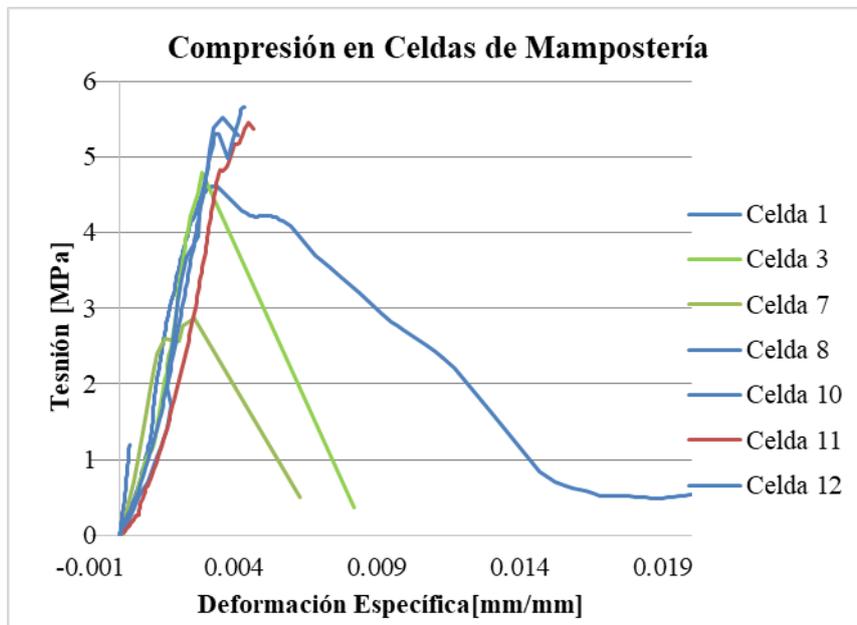


Figura 6.14. Ensayo a compresión: curvas constitutivas experimentales.-

Esto permite asumir criterios para evaluar el sistema en un modelo numérico que contemple estos efectos como se podrá ver en los capítulos subsiguientes cuando se termine de revisar lo pertinente a los ensayos realizados en paneles de mampostería.

La idea de modelar al sistema de mampostería como un elemento simplificado de área se ve factible en tanto y en cuanto se puedan encontrar los elementos matemáticos que permitan representar numéricamente el efecto de rotación transversal de las uniones en las paredes

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

interiores de los ladrillos como también lo valores de adherencia y propiedades de contacto que ocurren en las diferentes interfaces entre mortero y ladrillos.

Todas estas cuestiones deben analizarse en un enfoque de micro-modelo (modelo exacto de elementos finitos, por ejemplo) antes de pasar a la etapa de proponer macro-modelos (modelo simplificado por ejemplo de un elemento de Área que represente una pared de mampostería) que permitan balancear la relación entre costo computacional y representatividad del modelo.

CAPÍTULO 7

PROGRAMA EXPERIMENTAL DE CARACTERIZACIÓN: PANELES DE MAMPOSTERÍA.

En el presente capítulo se sintetiza la información en cuanto a la respuesta mecánica de muros de mampostería de ladrillo LCH unidos con morteros de junta horizontal y vertical. Dichos paneles se han confinado perimetralmente con elementos de hormigón armado elaborado in situ siendo construidos en laboratorio siguiendo reglas usuales de construcción de los mismos.

El objetivo del presente capítulo es analizar los resultados obtenidos en el análisis de muros de mampostería y respuesta estructural como sistema constructivo para luego proponer rutinas de simulación numérica que permitan validar los resultados obtenidos como también evaluar datos que permitan conformar una superficie de respuesta para funciones límite definidas en función a los paradigmas de diseño propuestos para estos sistemas.

En los modos de falla se observaron fisuras en el ladrillo, en el mortero, y fisuras por deslizamiento en la interface mortero-ladrillo vertical (IMLV) y en la interface mortero-ladrillo horizontal (IMLH). Con los resultados obtenidos se pretende evaluar la respuesta estructural en dos situaciones características de los sistemas de mampostería ejecutados para viviendas sociales.

Respuesta de Paneles de Mampostería.

En el presente capítulo se presenta una síntesis de los ensayos realizados en el Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones de cuatro paneles de mampostería de 120 cm de ancho, 240 cm de altura y 18 cm de espesor construido con 40 ladrillos LCH 181825 de los estudiados en capítulos anteriores el cual fue confinado por un refuerzo de hormigón armado de 10x15 cm alojando en su interior armadura longitudinal compuesta por dos barras de acero ADN 420 de 6 mm de diámetro.

En la figura 7.1 se presenta un esquema indicativo de la disposición de elementos y materiales seleccionado para la construcción del panel a ensayar. La sección de hormigón armado mostrada recorre el total del perímetro del panel de mampostería. En síntesis el panel se compone de ladrillos LCH unidos por mortero de junta de características

convencionales se refuerza en todo el perímetro con un encadenado de hormigón armado de calidad H-15.

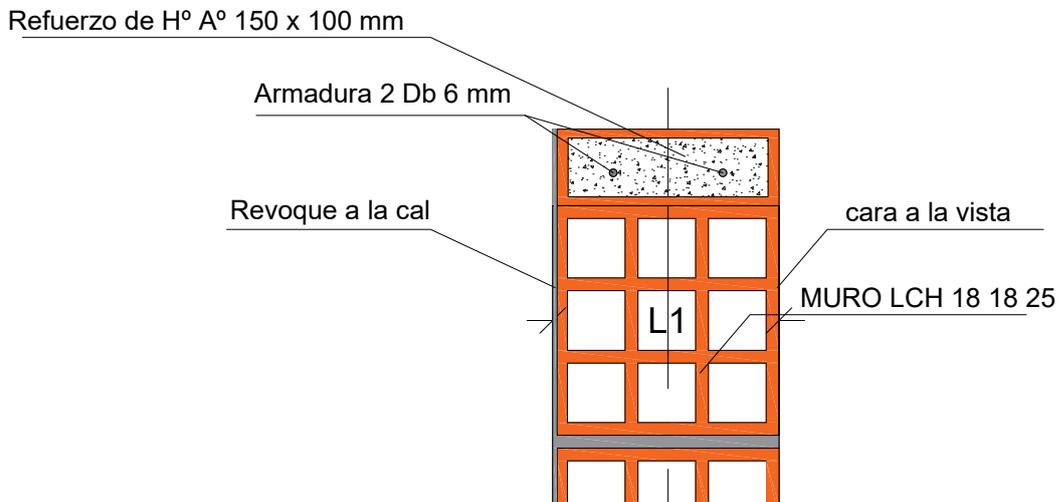


Figura 7.1. Esquema en elevación del cierre perimetral de Hormigón Armado de los paneles ensayados.

Para la presente etapa se intentó representar a través de los ensayos experimentales dos situaciones estructurales comunes:

- (a) Ensayo CEBR: Carga de compresión excéntrica y panel apoyado sobre una base rígida (la carga representa una reacción de entrepiso y cubierta de techo en una vivienda social).
- (b) Ensayo CCBF: Carga de compresión centrada sobre base flexible intentando recrear un caso de asentamiento diferencial sobre un aterrazamiento ejecutado con material de relleno en este caso suelo colorado de la región.

Para el estudio de ensayos CEBR y CCBF se utilizó un pórtico de carga diseñado para ensayos de elementos estructurales a macro escala (como se puede ver en la figura 7.0).

La carga se aplicó con un actuador hidráulico y fue medida con una celda de carga de 10 KN de tipo T-C (para ensayos de tracción-Compresión) y luego otra de 300 KN para ensayos de compresión.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

En el ensayo CEBR la línea de aplicación de la carga se alojó al borde del núcleo central estimado para la sección de recepción del plato de carga a efectos de poder apreciar alargamientos en una cara del panel y desplazamientos nulos o cercanos a cero en la cara opuesta.

En el ensayo CCBF la aplicación de la carga se efectuó mediante elementos de Hormigón H40 de resistencia verificada dispuesto en forma piramidal a efectos de ampliar al máximo la superficie de aplicación de carga.

Para la medición de desplazamientos verticales se utilizaron extensómetros analógicos conectados a una consola de adquisición de datos que es convertida la señal a valores de desplazamiento positivo (alargamiento) o negativo (acortamiento) según se dé el movimiento del mismo.

En la figura 7.2 a) y b) se observa cómo se efectuó la instrumentación para medir desplazamientos en los paneles construidos para los ensayos CEBR y CCBF los cuales fueron preparados en dos pórticos de carga diferentes dispuestos sobre la misma losa reactiva.

En la parte a) se observa que los extensómetros se han dispuesto en forma vertical para poder medir desplazamientos verticales en ambas caras, entendiéndose que en una se espera observar alargamientos del sistema y en la cara opuesta acortamientos del mismo.

Del lado comprimido los extensómetros debieran arrojar resultados cercanos a cero dado que la carga está prevista aplicarse sobre el borde del núcleo central con lo cual las deformaciones por compresión de esa cara debieran ser nulas. La base de este experimento está compuesta por la losa reactiva con la que se cuenta en el LIC.

En la parte b) se observa que la disposición de los instrumentos de medir desplazamientos han sido colocados en dirección horizontal debido a que en el ensayo a carga centrada sobre base flexible busca medir los alargamientos horizontales.

el ensayo CCBF se pensó a modo de inducir un asentamiento diferencial manipulando de manera adecuada la energía de compactación durante la preparación de la base flexible que está compuesta por capas de suelo colorado de la región compactado en capas separado en dos sectores: uno de densidad media y otro de densidad baja.



Figura 7.2. a) Ensayo CEBR. b) Ensayo CEBF.

En la figura 7.3 se observa la vinculación en la parte superior del panel aplicando rodillos de teflón en contacto con la parte superior de la probeta a los efectos de impedir el volcamiento de la misma al aplicar la carga prevista excéntrica. El sistema de fijación es fácilmente desmontable para poder desplazar los retenes sobre rieles fabricados en perfil de chapa conformada de espesor de 2 mm.

Los rodillos son de teflón para evitar efectos de fricción en el contacto entre el panel y los dispositivos de fijación superior a efectos de evitar el volcamiento de la probeta. Dichos rodillos están vinculados a los dispositivos de fijación mediante la interposición de rodamientos colocados a presión mediante varillas roscadas y bulones de diámetro suficiente.



Figura 7.3. Condiciones de borde impuestas en la parte superior de los paneles.

El sistema de adquisición de datos utilizado se muestra el mismo en la figura 7.4 el cual consta de una consola que permite monitorear una celda de carga de capacidad máxima de 300 KN, y una cantidad de extensómetros por probeta que está prevista acorde al tipo de ensayo.

Luego esto se procesa en un ordenador portátil que tiene un software elaborado por el Laboratorio de Simulación y Ensayos mecánicos (LABSE) de la Facultad de ingeniería. La consola de Adquisición permite configurar en simultáneo hasta 4 electro válvulas y 4 celdas de carga con 8 extensómetros de vástago y 8 galgas extensometricas siendo todo comandado por el mismo software quien tiene en su inicio una ventana de asignación de elementos a los canales de adquisición de datos (ver Figura 7.3).

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

La frecuencia de muestreo de este equipo es 5Hz (registro de 5 datos por segundo) lo cual hace que las curvas contengan una cantidad considerable de datos y en algunos casos se captan algunas señales de ruido por vibraciones de baja frecuencia.

En ese caso los ensayos han sido descartados o se han reconfigurado las condiciones de borde, por ejemplo (ensayos de Cerámicas a tracción) a efectos de mitigar estos inconvenientes y reducirlos a condiciones aceptables.

Luego los datos recopilados se procesan mediante software y se exportan a formatos que son compatibles con hojas de cálculo para la elaboración de tablas y graficas que permitan visualizar los resultados de una manera clara y concisa.



Figura 7.4. Equipo de medición de ensayo.

En el ensayo CCBF según se observa en la figura 7.5 se decidió enmascarar una de las caras con un revestimiento ejecutado con mortero de cal para mejorar la visualización de los patrones de agrietamiento durante el ensayo. Esto se muestra en párrafos posteriores donde se ven los resultados del ensayo y los patrones de fisuras ocurridos antes de la rotura.

Del lado opuesto se han colocado extensómetros en dirección horizontal para medir desplazamientos horizontales y evaluar deformaciones por flexo tracción coplanar por

asentamiento diferencial inducido a raíz de la diferencia de energías de compactación aportadas al suelo de base en el presente ensayo.



Figura 7.5. Preparativos de Ensayo tipo B: carga centrada sobre base flexible.



Figura 7.6. Preparativos de Ensayo tipo A: carga descentrada sobre base rígida.

En la figura 7.6 se muestra un equipo de filmación de alta velocidad que se utilizó para poder captar los desplazamientos laterales inducidos en el ensayo tipo A: carga descentrada

sobre base rígida. Dicho equipo permite ver filmaciones hasta una velocidad de 3 cuadros por segundo.

El objetivo del mismo es tener una idea cuantitativa de los esfuerzos de tracción por flexión que puede ocurrir en una pared por efecto de la carga de una estructura de entepiso y cubierta de techo la cual genera una situación de carga excéntrica en principio. Después de analizar resultados se puede concluir si el efecto de excentricidad de la carga aplicada es importante o se puede desestimar.



Figura 7.7. Preparativos de Ensayo tipo CCBF: carga centrada sobre base flexible.

En la figura 7.7 se observa el ensayo CCBF: Carga Centrada sobre Base Flexible. La base flexible la componen capas de suelo compactado dividido en dos sectores los cuales han acumulado dos grados de energía de compactación distintos. Del lado derecho del cajón se compactó con pisón metálico de 0.16 KN y del lado izquierdo con pisón de madera de menos de 0.05 KN.

Los desplazamientos medidos en el ensayo CCBF fueron dispuestos en dirección horizontal para poder captar valores de deformaciones generadas por el asentamiento diferencial del panel. La celda de carga utilizada para este ensayo fue de compresión de 300 KN y se apoyó sobre dados de H° simple de calidad H-40 según normas argentinas [CIRSOC 201, 2013].

Idéntico sistema de fijación superior (a base de rodillos de teflón) se utilizó en este experimento según se puede apreciar en la mencionada figura 7.6 en la imagen a la derecha donde se puede observar el revestimiento mencionado que se efectuó sobre una de las caras del panel.

Síntesis, análisis e interpretación de resultados experimentales.

A continuación se desarrolla una síntesis y presentación de los resultados de estos ensayos realizados en paneles de mampostería de 120 cm de ancho x 240 cm de altura y 18 cm de espesor a efectos de poder establecer el grado de correlación de los mismos con aquellos obtenidos en las etapas experimentales anteriores en términos de parámetros que definan el comportamiento mecánico del sistema así como su respuesta estructural ante estados de sollicitación predominantes en el caso de viviendas sociales.

Los parámetros a evaluar son la carga aplicada, desplazamiento relativo a la aplicación de esa carga, Momento-curvatura de flexión de los paneles sometidos a carga excéntrica, desplazamientos y deformaciones ocurridas por asentamiento diferencial, relación constitutiva para el esfuerzo de compresión con o sin excentricidad.

La evaluación de estados tensionales se calculó considerando la sección transversal que fue instrumentada con comparadores de desplazamientos, incluye las secciones de mortero y de hormigón armado actuantes como parte de la misma, tanto en el ensayo CEBR como en el ensayo CCBF.

Ensayo tipo CEBR: Carga estática lineal excéntrica sobre base rígida. Carga en el borde de Núcleo central.

Este ensayo tiene el objetivo de analizar la respuesta del panel a un efecto de compresión excéntrica que genera un estado de sollicitación a flexión en el plano vertical. Se intenta representar la acción del apoyo excéntrico de una cubierta de techo/borde de entrepiso sobre la parte superior del sistema mampostería.

Las condiciones de borde fueron descriptas en párrafos anteriores del presente capítulo así como los equipos e instrumentos de medición utilizados para evaluar la curvatura de flexión del muro.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Los parámetros medidos en este ensayo fueron 3 desplazamientos distribuidos en el ancho del panel en cada cara del mismo para establecer un valor medio de deformación específica que nos permita estimar el valor de la curvatura del muro a aplicarle una carga excéntrica. Luego se midió la carga aplicada para estimar el momento flector introducido por la excentricidad dada en la misma.

Se estimó el estado tensional de la zona instrumentada logrando evaluar valores alcanzados en ambos ensayos. Con los resultados obtenidos se pudo representar gráficamente la relación entre fuerzas y desplazamientos obtenidos en ambas permitiendo calcular estimaciones de estados tensionales y estados de sollicitación del sistema analizado.

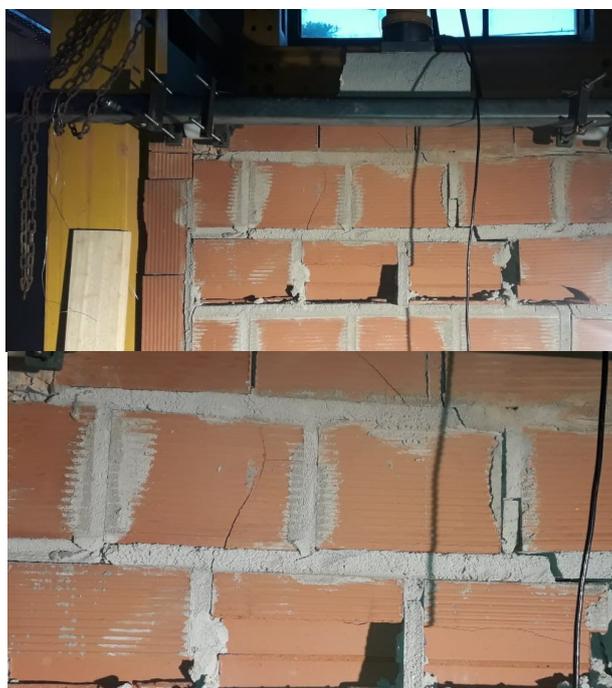


Figura 7.8. Respuesta mecánica de Ensayo CEBR: carga descentrada sobre base Rígida.

La aplicación de la carga se efectuó en forma lineal parcial comenzando desde el diámetro de la zapata del pistón apoyando sobre un dado de Hormigón simple de calidad H-40 el cual distribuye la carga en un ancho mayor simulando la descarga tronco piramidal que se espera ocurra en el caso de un apoyo de cabreada de techo o en un borde de entrepiso con elemento prefabricados. La figura 7.8 muestra la forma en que se ocurrió la fractura del muro panel una vez que se alcanzó la carga última.

En ella se ve que la falla diagonal global que apareció en el muro fue desarrollándose en forma local mediante varios efectos como ser descascaramiento de ladrillos por flexo tracción, corte diagonal en el mortero y fallas en la IMLH e IMLV.

Con respecto a los bordes de hormigón armado como era de esperar debían de experimentar un desplazamiento longitudinal y un desprendimiento del muro por efecto de la excentricidad ocurrida por el estado de carga actuante.

La figura 7.9 muestra este y otros efectos locales ocurridos en el ensayo durante la aplicación de la. En lugares donde se venció la resistencia a tracción del mortero se observaron desplazamientos en el ancho del panel dando paso a otros mecanismos de falla acoplados a este fenómeno.

En cuanto al efecto de compresión en dirección vertical, produce un ensanchamiento en la dirección normal a la aplicación de la carga que permite justificar la separación del refuerzo perimetral respecto de la mampostería. Esta separación se observa disminuida en las esquinas por la condición de compatibilidad entre los tramos horizontal y vertical de dichos refuerzos (efecto de pórtico).

Con respecto al modelo numérico este efecto mostrará un incremento en las deformaciones en dirección de la aplicación de la carga puesto que la rigidez impuesta por los encadenados se anula y la mampostería experimenta un efecto de ablandamiento similar a lo expuesto en [Lizárraga, 2016] en donde se presenta un modelo de análisis similar y se puede apreciar que la separación entre elementos de hormigón y mampostería desencadena un incremento en las deformaciones globales por pérdida de rigidez del conjunto.

En la misma figura se pudo apreciar la presencia de los modos de falla característicos de estos sistemas que son la falla por tracción en el ladrillo, tracción en el mortero y deslizamiento en las IMLV e IMLH. Estos efectos se vieron con frecuencia en todos los ensayos realizados en paneles para el ensayo CEBR y el ensayo CCBF.

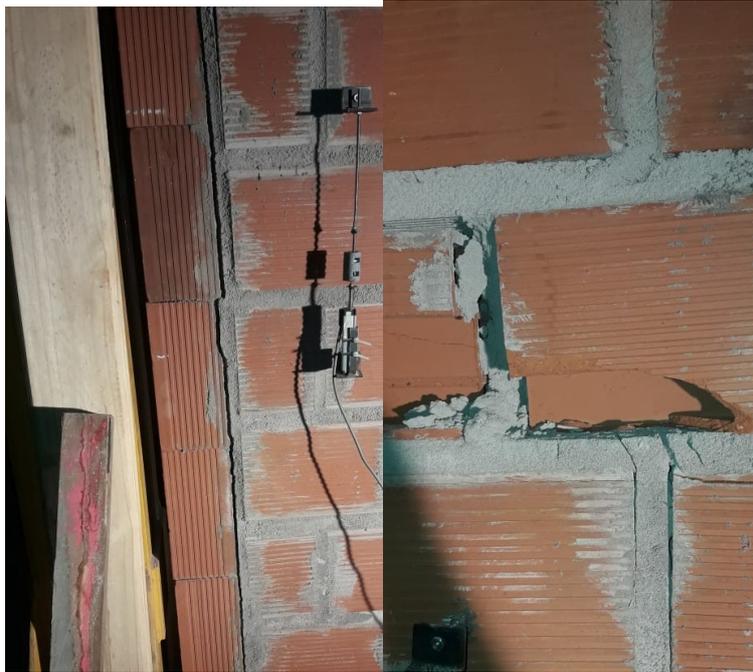


Figura 7.9. Resultados de Ensayo CEBR: carga descentrada sobre base Rígida.

Como se puede ver en la figura 7.10 una falla localizada en la parte superior del muro panel consistente en un desprendimiento de las paredes verticales externas de algunas hiladas de ladrillos tal como se viera en los ensayos realizados en capítulos anteriores.

En la imagen se puede apreciar la pérdida de verticalidad del refuerzo del lado derecho por causa del desprendimiento de este respecto del muro panel. En el trabajo de Crisafulli [1997] se menciona este hecho, con la diferencia que el tipo de efecto y la dirección de su aplicación difieren con el caso estudiado en el presente documento.

Por otra parte, la rigidez relativa mencionada por Crisafulli [1997, 107-109, figs. 5.8 a y b] ocurre también en este caso, aportando un incremento de resistencia al conjunto y como se viera en Reinert [2013] se traduce en una modificación de las trayectorias de esfuerzos que trae como consecuencia para este caso de aplicación de carga vertical: reducción de la carga axial sobre el refuerzo vertical de $H^{\circ}A^{\circ}$, incremento de las tensiones de corte y torsión sobre el muro y disminución de los valores a flexión en los encadenados horizontales, entre otros.

Por tanto es de esperar que mientras el panel y el refuerzo de hormigón armado se mantengan adheridos la resistencia del muro se mantendrá en valores considerables que luego decrecen al producirse la rotura de la interface en la unión “panel-encadenado”.

En La zona adoptada para colocar los instrumentos de medición de desplazamiento no se apreciaron dislocaciones ni fisuras a simple vista sin embargo se observaron lecturas de desplazamientos acorde a la carga y a la posición de la misma respecto del núcleo central, esto es hubo desplazamiento positivos (tracción) en el trasdós y negativos (compresión) en el intradós.



Figura 7.10. Resultados de Ensayo tipo A: carga descentrada sobre base Rígida.

Los instrumentos de medición de desplazamientos fueron clasificados por su posición en el panel llamando trasdós al lado traccionado e intradós al lado comprimido del mismo. Por ello los extensómetros del trasdós fueron los registros obtenidos en los dispositivos 1, 3 y 6 mientras que los extensómetros del intradós fueron los registros obtenidos en los instrumentos 2, 4 y 5.

Volviendo sobre la imagen de la figura 7.10 al observar la falla ocurrida en la zona superior a la de instrumentación del panel se puede asumir que existen evidencias de un descascaramiento por esfuerzos de tracción y una línea de agrietamiento que puede ser consecuencia del efecto de curvatura generado por la aplicación de la carga excéntrica.

En dirección paralela al plano de carga se observan líneas de falla que sugieren que para un determinado valor de carga el confinamiento producido por los refuerzos de hormigón se ha superado para un determinado valor de carga, lo cual pudo ser consecuencia del mismo efecto que produjo el descascaramiento en el panel.

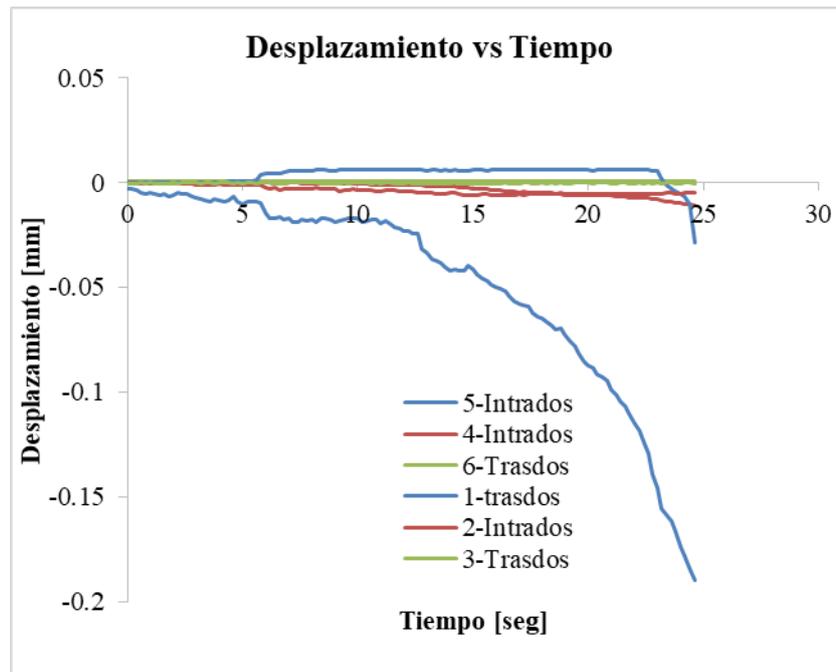


Figura 7.11. Desplazamientos en ensayo CEBR – Panel 1.-

La figura 7.11 muestra los registros de desplazamientos ocurridos en el Panel 1 durante el ensayo en donde se pudo observar la predominancia en el intradós de acortamientos que pueden asumirse como prueba de esfuerzos de compresión del panel en intradós.

Los desplazamientos en general promedian el orden de la décima de milímetro lo cual denota el carácter frágil de este tipo de materiales. Con respecto a la diferencia existente entre instrumentos de una misma cara se estima que puede ser consecuencia de un efecto de alabeo que ha sufrido el panel al someterse a la aplicación de la línea de carga excéntrica.

Para analizar el efecto de flexión se dispusieron estos instrumentos de medición a 110 cm de altura en ambas caras del panel para relevar una sección intermedia a 125 cm de altura del piso y mediante las lecturas registradas se calculó para cada valor de esfuerzo la curvatura que tomó el panel.

Se seleccionó de las muestras los datos filtrados y se calculó el desplazamiento promedio del intradós y del trasdós. Con estos valores se obtuvo la curvatura de la sección analizada como se verá en el próximo capítulo en el cual se detallará en profundidad este tema.

En la figura 7.12 se representa la relación entre Esfuerzo de Compresión/Tracción y deformaciones específicas ocurridas en el intradós y trasdós respectivamente. Respecto al esfuerzo de compresión se ha desarrollado presentado dos tramos marcado de respuesta estructural que se asumen definen orden de magnitud para cual se produjo la primer falla en el panel que ronda cerca de los 2 Mpa de esfuerzo a compresión.

Las líneas de tendencias muestran el orden de magnitud que se estima para la rigidez a Flexión de sistema compuesto por el panel y sus refuerzos perimetrales. Haciendo los cálculos con el valor del momento de inercia correspondiente se obtuvo valores de Modulo de Elasticidad longitudinal que son aceptablemente coincidentes con la gráfica de Esfuerzo-Deformación que se obtuvieron en la gráfica de la figura 7.11 donde se mostraron valores de esfuerzo a compresión en función de la deformación específica.

Luego se puede observar un acomodamiento de la estructura manifestado por un salto en la deformación específica seguido de un incremento del esfuerzo a compresión con disminución de la pendiente aproximada por las líneas de tendencia trazadas en la mencionada figura.

Respecto al esfuerzo de Tracción del trasdós se puede observar que fue cercano a cero en todo el ensayo confirmando con esto de manera aceptablemente aproximada que la carga se aplicó cerca del borde del lugar considerado como núcleo central.

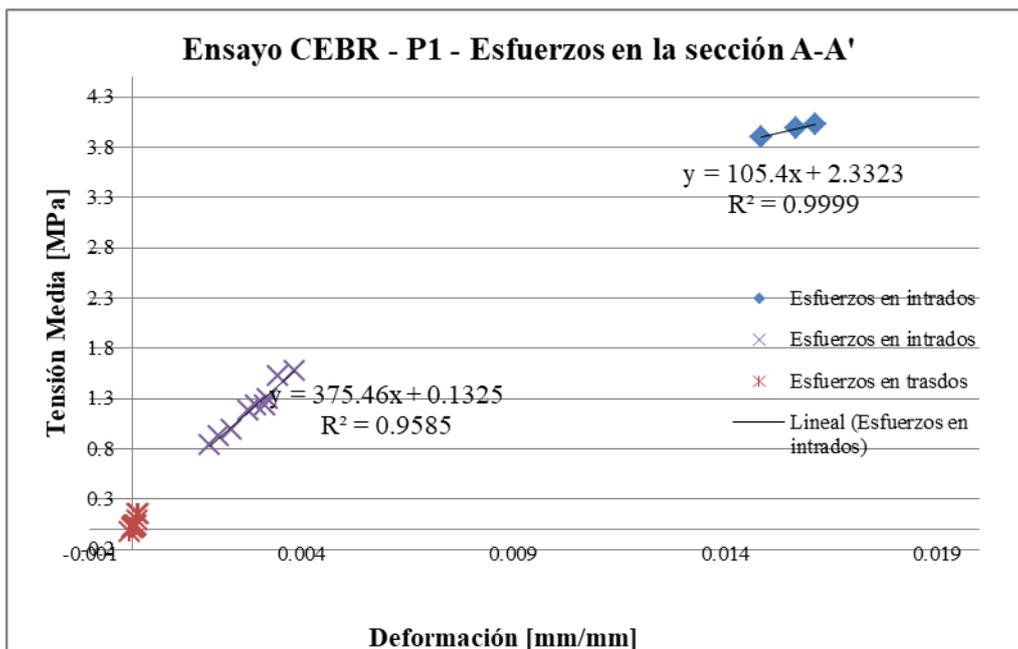


Figura 7.12. Compresión vs. Deformación en ensayo CEBR – Panel 1.-

Luego de obtener las mediciones se procedió a obtener el valor medio de cada grupo de desplazamientos para calcular el valor de curvatura en cada fuerza aplicada al panel. Para el cálculo de la curvatura se adoptó el criterio mostrado en la figura 7.13, donde se aprecia la relación Momento Flector – Curvatura $M-\phi$ para los ensayos CEBR.

El momento flector se calculó haciendo el producto de la carga aplicada por la excentricidad ($e=3$ cm) adoptada en forma determinística obteniendo un valor de Flexión constante en la altura del panel.

Se puede visualizar una zona propia del campo elástico y otras dos zonas en donde se percibe la reducción de la rigidez a flexión con posible pérdida de linealidad entre tensiones y deformaciones.

El registro de los paneles analizados en el ensayo CEBR dio como resultado un comportamiento marcadamente diferente en términos relativos del panel 1 respecto al panel 2 en sus diferentes escalones de carga (ensayo 2 1, 2 2, y 2 3 respectivamente). Esto da como resultado que hubo diferencias en términos de la rigidez a flexión que opuso cada panel a la carga aplicada lo cual abre la inquietud de buscar métodos alternativos para poder estudiar este fenómeno con un grado de detalle mayor.

Respecto al panel 2 al cual se realizaron más de un proceso de aplicación de carga se pudo observar que la fragilidad del material compuesto se pudo apreciar en el cambio de pendiente ocurrido en cada secuencia de carga lo cual indica que este tipo de materiales tiene un campo elástico de magnitudes reducidas posiblemente menor al que le puede corresponder a un hormigón de tipo estructural.

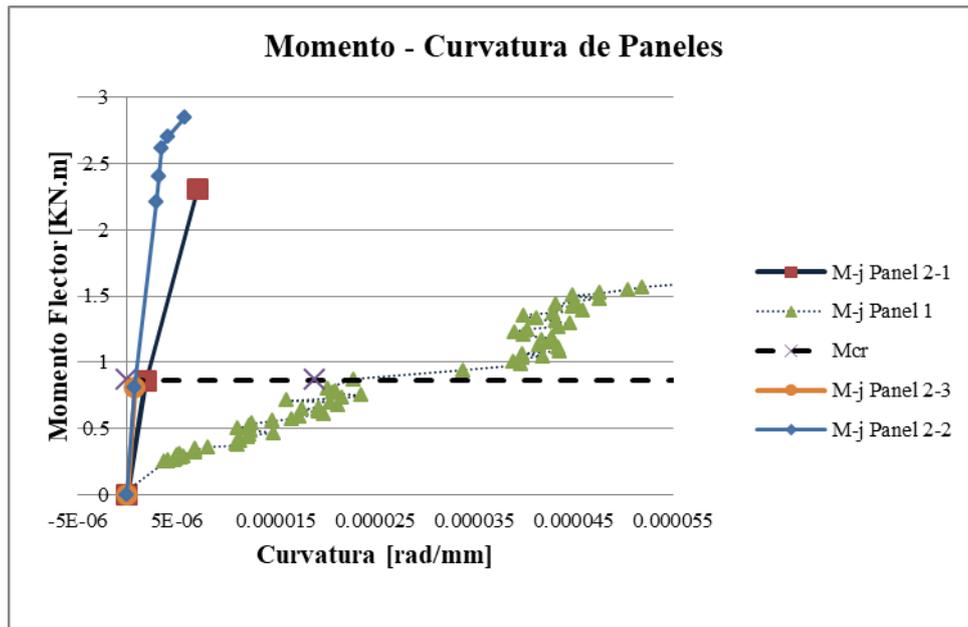


Figura 7.13. Relación Momento-Curvatura en ensayo CEBR – Panel 1 y 2.-

Luego se evaluaron los esfuerzos de compresión en función de la deformación específica en el intradós y el trasdós donde las deformaciones tienen valores por lo tanto se asumió en principio que la distribución de esfuerzos en la sección analizada constituye una superposición de efectos de esfuerzos de compresión y flexión al margen que la aplicación de la carga fue en el borde del núcleo central de la sección transversal horizontal.

La figura 7.14 describe el objetivo a lograr con los resultados del ensayo CEBR aproximar una distribución de tensiones de tipo triangular con valores nulos en el trasdós (cerca a cero) y esfuerzos de compresión en el intradós.

Uno de los objetivos de procesar el presente tratamiento de resultados experimentales se basa en lograr la calibración de un modelo numérico basado en valores experimentales de Rigideces Axial y a Flexión respectivamente, como se puede apreciar en el algoritmo planteado en las ecuaciones (7.1) a (7.6).

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_0} \quad (7.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_0} \quad (7.2)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (7.3)$$

$$\frac{P}{l_t h} = E_m \cdot \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \rightarrow E_m : \text{módulo experimental} \quad (7.4)$$

$$\frac{P}{A \cdot \varepsilon_m} = E_m \quad (7.5)$$

l_t : longitud del tabique

$E \cdot l_t h$: Rigidez axial del tabique (EA)

(7.6)

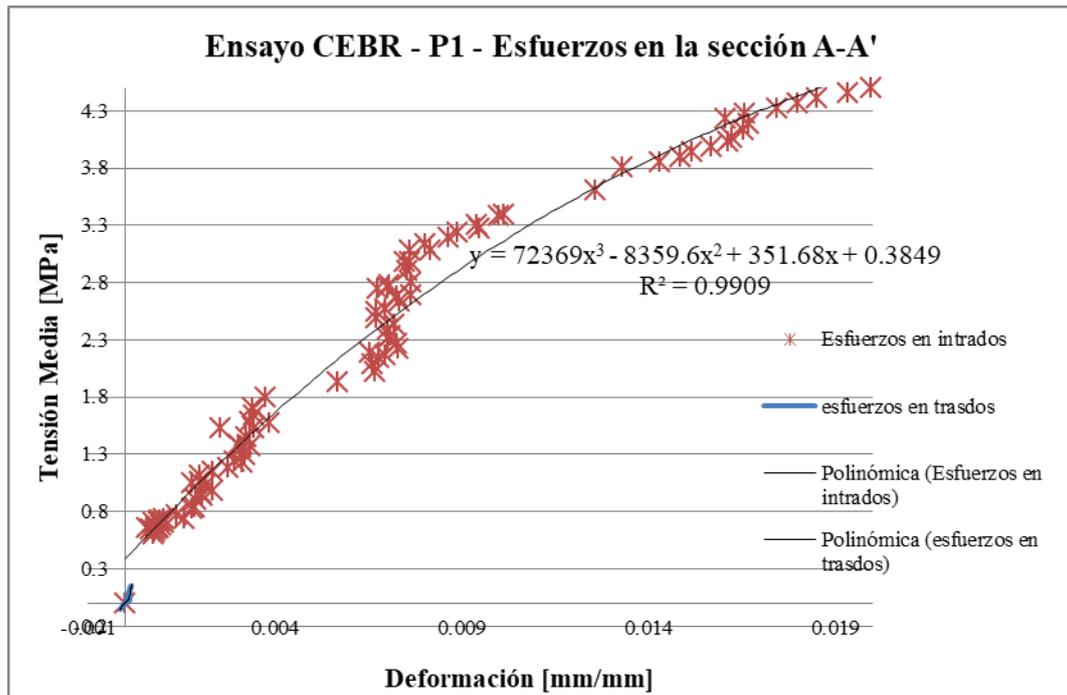


Figura 7.15. Esfuerzos en sección A-A' en ensayo CEBR-1.-

El valor de esfuerzo a compresión se calculó según el esquema de distribución de tensiones mostrado en la figura 7.15 en donde se considera un valor de esfuerzo de compresión f_c que representa la tensión promedio de compresión en la fibra extrema en donde se midieron desplazamientos.

Según lo planteado en las figuras 7.14 y 7.16 se aproximaron ecuaciones por medio de líneas de tendencia aproximadas para algunos casos en forma lineal y en otros en forma polinómica para obtener una estimación de los parámetros mecánicos (Modulo E, Rigidez EI) y luego formular modelos de Diseño por Resistencia.

La expresión polinómica que aproxima a los resultados de la curva que mide la tensión media en el intradós es de 4to orden y el coeficiente correspondiente al término lineal arrojó un valor en el orden de la centena. En el caso lineal se aproximaron las pendientes en las curvas experimentales antes y después del inicio de los patrones de fisuración que sufrió la probeta durante la aplicación de la carga.

En la figura 7.16 se representó la distribución de tensiones en dirección transversal para una sección determinada del panel y se pudo apreciar que las tensiones en el trasdós si bien no

son perfectamente nulas son muy cercanas a cero lo cual es útil a los efectos del presente trabajo.

Se puede observar en la figura 7.17 que los registros para el Panel 2 mostraron valores de Módulo E_r similares a los registrados en capítulos anteriores mientras que para el Módulo E_r hubo un crecimiento de la pendiente que puede tener base en la incorporación de los refuerzos perimetrales de hormigón armado que aporó un incremento de la resistencia global a partir de una reducción en la capacidad de almacenar energía interna de deformación.

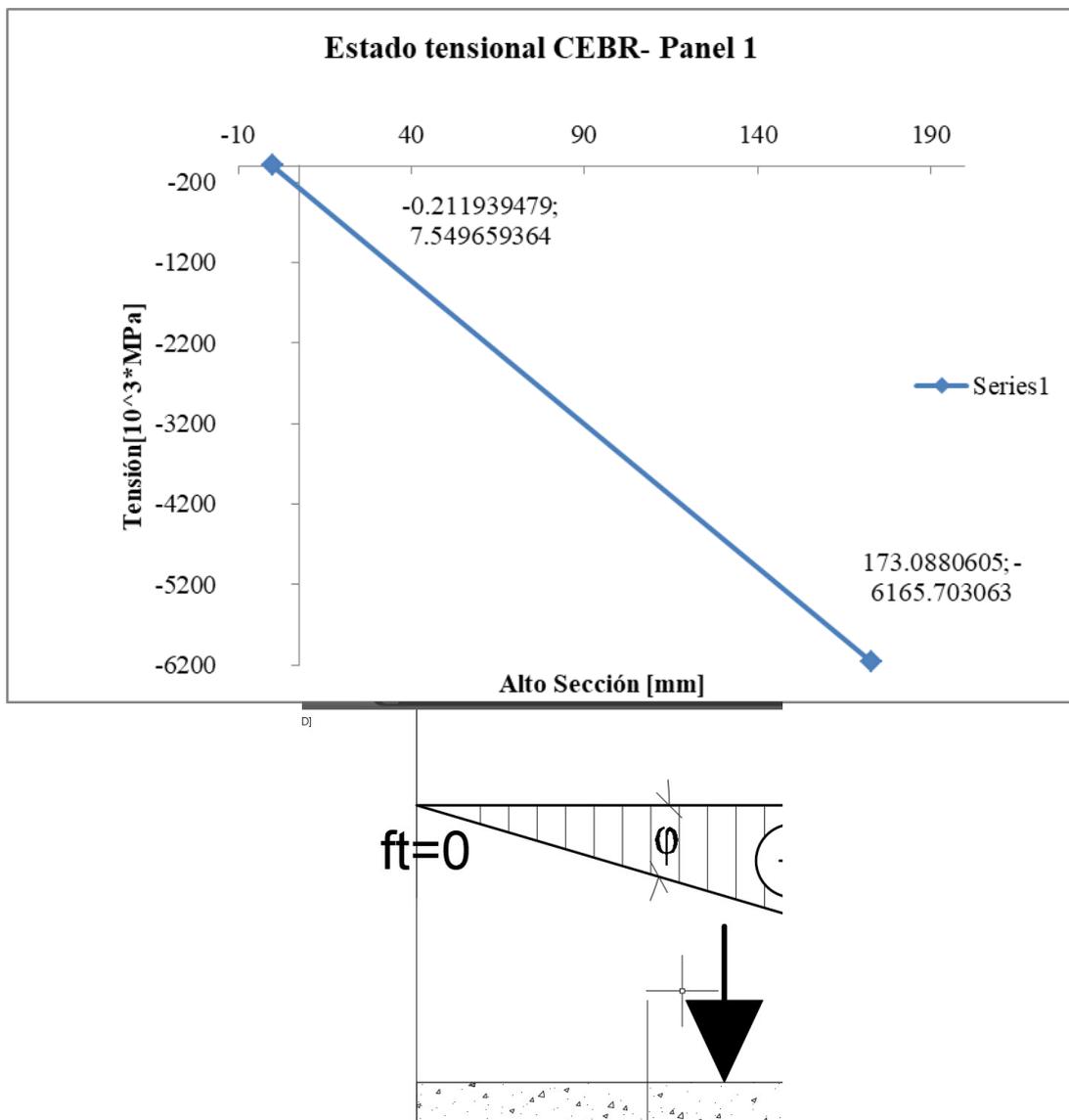


Figura 7.16. Verificación de equivalencia de Tensiones en A-A' para CEBR-1.-

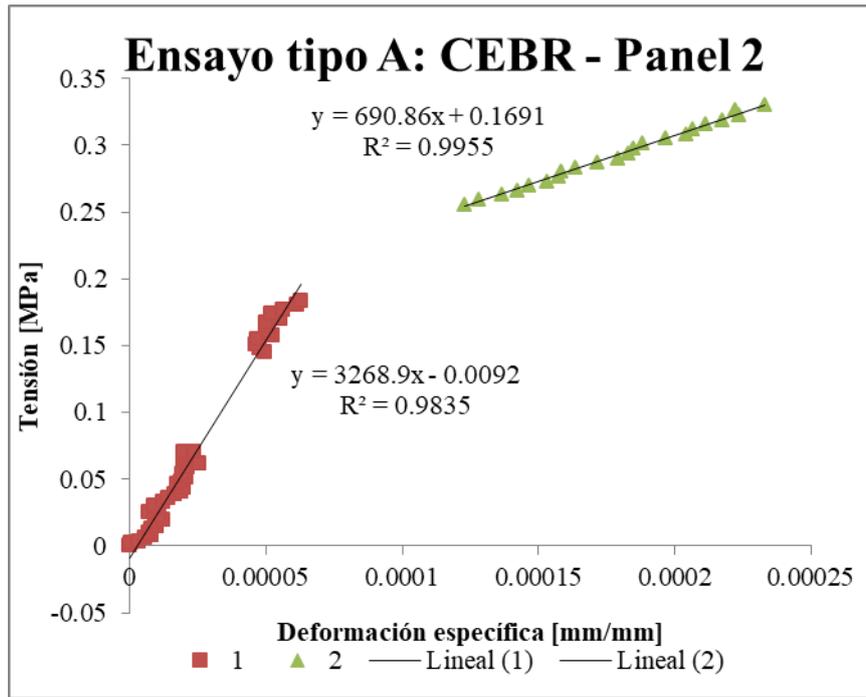


Figura 7.17. Resultados de Ensayo tipo CEBR-2: Esfuerzo medio vs Deformación específica.

Si se considera el esfuerzo a compresión en las paredes verticales de los mampuestos la respuesta del sistema se puede ver en la figura 7.18 que los esfuerzos a compresión son mayores en las paredes interiores verticales de los ladrillos que en el encadenado por una cuestión lógica de diferencia en la sección transversal que absorbe el esfuerzo.

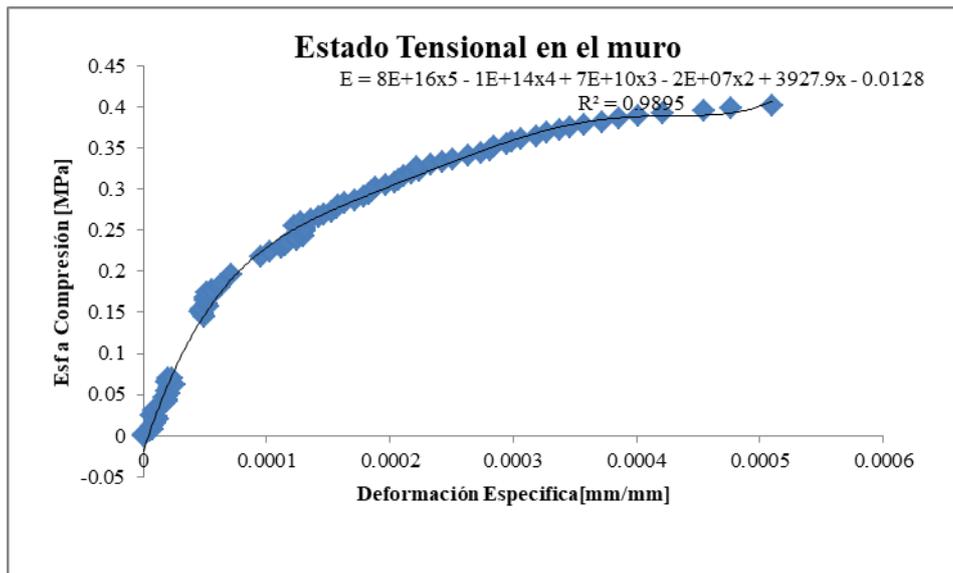


Figura 7.18. Resultados de Ensayo CEBR: Estados tensionales estimados en el muro.

Esto se debe a que se transmiten directamente a las paredes verticales de los ladrillos LCH y que las paredes horizontales interiores de estos actúan como estabilizadores de la rigidez del muro hasta que se vence la resistencia a tracción del material cerámico.

Se pudo apreciar la ubicación de la carga nuevamente el borde del núcleo central dados los registros de deformaciones obtenidos. Respecto al Panel 1 los valores de deformación específica fueron comparados siendo estos últimos menores en el caso del panel 2.

En términos de estabilidad experimental el panel 2 (ver figuras 7.19a y 7.19b) fue un ensayo de tendencia predominantemente lineal por lo cual luego de filtrar las señales se pudo procesar el registros y obtener un valor de modulo Elástico que se estima corresponde a instantes posteriores a la fisuración dados los valores comparados con el ensayo del primer panel.

En referencia al ensayo se pudo observar cierta correspondencia con lo visto en celdas y ladrillos aislados además de los vestigios de fisuras y fallas locales que fueron similares a su vez. Se volvió a repetir el patrón de flexo tracción en las uniones de paredes horizontales y verticales.

Es de señalar que este tipo de falla no es predominante hacia un lado de dicha unión con lo cual se produce indistintamente del lado de la pared horizontal como del lado de la pared vertical lo cual puede tener origen en el grado de rotación que experimenta el nudo en función de la relación de rigidez entre paredes internas.

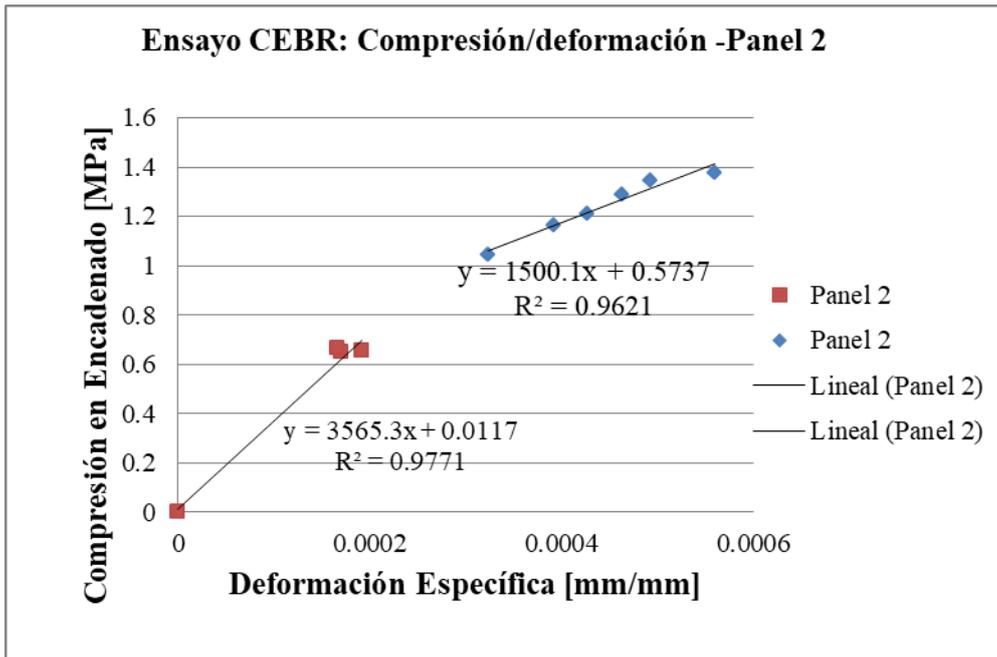


Figura 7.19a. Resultados de Ensayo tipo A: Registro Esfuerzo vs Deformación Panel 2.

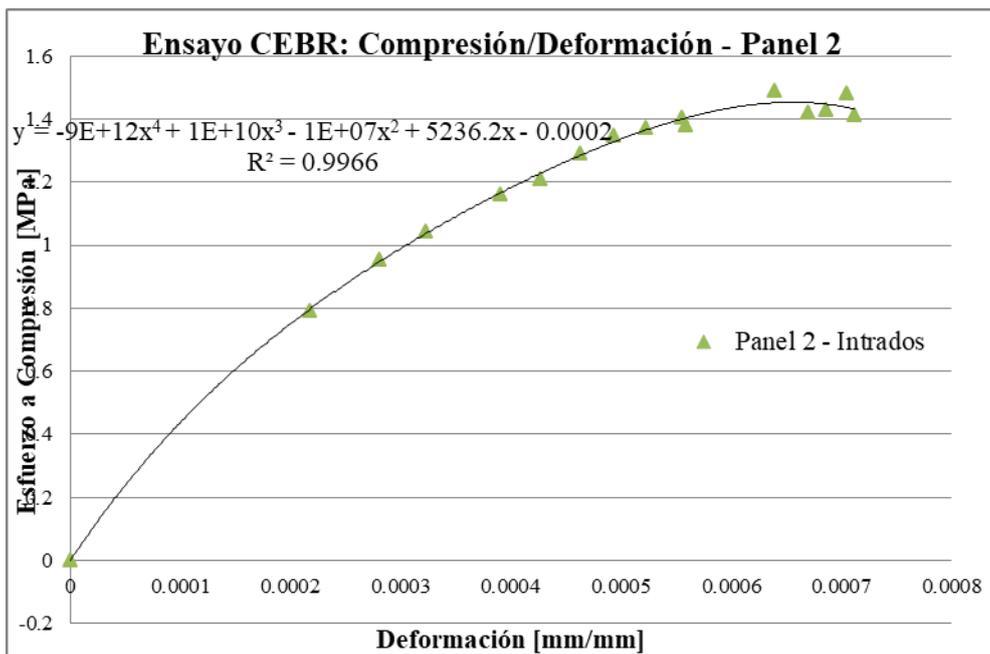


Figura 7.19b. Resultados de Ensayo CEBR: Registro Esfuerzo vs Deformación Panel 2.

En términos de comportamiento mecánico se pudo constatar una tendencia en cuanto a lo que ocurre en la mampostería y se puede correlacionar con las características principales del comportamiento en el ladrillo aislado. Por otro lado es lógico el incremento de rigidez en

el caso de los paneles ya que estos están reforzados con elementos de hormigón armado lo que justifica este incremento.

Como comentario adicional se pudo apreciar cierta relación numérica entre las pendientes de la aproximación lineal de cada línea de tendencia y el término lineal que acompaña la aproximación polinómica de cuarto orden propuesta para describir el problema.

Ensayo CCBF: a Carga estática lineal centrada sobre base flexible de densidad variable.

Se compilaron datos obtenidos en ensayo CCBF (Carga Centrada sobre Base Flexible) el cual consistió en un experimento de carga centrada sobre una base compuesta de un relleno de suelo colorado seccionado en dos partes cada una compactada a diferente densidad.

En uno de los extremos se aportó mayor energía de compactación con el objetivo de inducir un proceso de asentamiento diferencial produciendo esfuerzos de flexión y corte en el panel. Por este motivo los extensómetros que midieron desplazamientos fueron colocados en dirección horizontal a efectos de poder captar deformaciones por asentamiento diferencial inducido mediante el cambio de densidad en el suelo.

Con respecto al material de la base flexible se puede establecer que el suelo empleado es de tipo residual, caracterizado como limo arcilloso de coloración rojiza (tradicionalmente llamado colorado en la región) con características visuales uniformes. En el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) responden a una clasificación entre limos y arcillas de baja plasticidad (ML o CL).

El proceso de compactado se realizó en dos tramos, a izquierda y a derecha, empleándose en cada uno de los sectores diferente energía de compactación, con el objeto de simular/representar dos estados de densidad diferente, con el consecuente comportamiento geo mecánico asociado.

Se compacto por capas de 10 centímetros, alcanzando un colchón total de apoyo de 30 centímetros, lo cual se considera adecuado para la transferencia de solicitaciones de la pared al suelo como medio elástico. No se realizó control de la energía de compactación utilizada aun así se garantizó que en uno de los sectores se perciba a simple vista la mayor compactación.

Como criterios de contraste posterior se tomaron muestras para el control de contraste de densidades alcanzadas. No se pudo sacar probetas para tallado de triaxial dado que el tiempo transcurrido entre el moldeo de la cama de suelo y el ensayo específico de las paredes, generaron el cuarteo de la muestra de suelo, y ello debilita y torna muy susceptible el tallado de probetas para ensayos triaxiales.

La tabla 7.1 muestra los resultados correspondientes a los ensayos realizados para determinar la densidad

		Base de apoyo de pared (densidad mayor)		Base de apoyo de pared (densidad menor)	
		M1der	M2der	M1izq	M2izq
Peso de la muestra [gr]	Ws	101.6	108.3	85	79.2
Peso de la muestra+parafina [gr]	Wsp	113	122.6	96.1	86.1
Peso desplazado [gr]	Wdes	68.5	74.3	67.6	55
peso desplazado por la cuerda [gr]	Wcuerda	0.5	0.5	0.6	0.6
Volumen desplazado muestra+parafina [cm3]	Vdes	68	73.8	67	54.4
Peso unitario de la parafina [gr/cm3]	Yp	0.9	0.9	0.9	0.9
volumen de parafina [cm3]	Vp	12.67	15.89	12.33	7.67
volumen de suelo	V	55.33	57.91	54.67	46.73
Peso unitario del suelo [gr/cm3]	Y	1.84	1.87	1.55	1.69
Peso unitario del suelo seco [gr/cm3]	Yd	1.44	1.45	1.18	1.28

Tabla 7.1. Ensayo CEBF: Propiedades físicas del suelo de base.

La información resumida en la Tabla 7.1 fue provista por el equipo de investigación en Mecánica de Suelos y Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones y sus datos procesados en el Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC).

La preparación del panel en este ensayo consistió en instrumentar una cara con extensómetros para medir desplazamientos y del lado opuesto revestir con mortero para

visualizar de manera más detallada los procesos de falla ocurridos por la configuración adoptada para el mismo en términos de inducir un asentamiento diferencial en el suelo por diferencia de densidad.

La figura 7.20 muestra cómo fueron instalados los elementos de medición de desplazamientos. Los mismos fueron ubicados tratando de tener una junta vertical entre el punto fijo y el punto móvil de fijación del instrumento. La instrumentación se definió en función del comportamiento esperado del panel (alargamiento de las fibras longitudinales con fisuración vertical por asentamiento diferencial del suelo).

Luego atendiendo a los posibles modos de falla que pudieran ocurrir se buscó anclar los dispositivos de medición buscando un ladrillo diferente en cada extremo a efectos de captar valores específicos en caso de observar fallas en la IMLV. Paralelamente se efectuó una incisión en la cabeza superior de cada panel con el objetivo de reducir el efecto de la rigidez relativa entre elementos verticales y horizontales de hormigón armado aumentando de esta manera la posibilidad de carga sobre la mampostería y sus efectos posteriores.



Figura 7.20. Ubicación de extensómetros en el ensayo tipo B.

La figura 7.21 muestra fallas locales en el ensayo CCBF las cuales sucedieron como un deslizamiento de la IMLH y la IMLV en forma localizada alrededor del mismo ladrillo. Se

pudo captar que la línea de falla rodea perimetralmente uno de los ladrillos combinándose en ese caso más de un modo de falla.



Figura 7.21. Fallas locales en Ensayo tipo B: Carga centrada sobre base flexible.

La figura 7.22 muestra una falla dada por una separación por aplastamiento que ocasiono un efecto de tracción indirecta en el interior del espesor de una junta vertical.



Figura 7.22. Fallas locales en Ensayo tipo B: Carga centrada sobre base flexible.

Con respecto a la cara revestida de los paneles en la figura 7.23 muestra cómo se trasladó el efecto causado por el asentamiento diferencial inducido a la mampostería generando una falla vertical que en un sector se manifestó a través de un deslizamiento en la IMLH.

En imágenes posteriores se puede visualizar (una vez retirado el revestimiento después de la falla) el patrón de fisuración que ha transitado por ladrillos y por las diferentes interfaces tanto horizontales como verticales. Esto hace difícil la tarea de establecer que parámetros son los más incidentes en los principales modos de falla.

Luego se pudo observar que dicha falla atravesó la base de hormigón armado produciendo un estado local de rotura por efecto de tracción por flexión en las inmediaciones del contacto entre el panel y la base de suelo. La base de mortero utilizada en una de las caras de cada panel permitió visualizar la línea de falla de manera más práctica como en la mencionada fig. 7.23.

La figura 7.24 da prueba de tránsito del mencionado patrón a través de ladrillos e interface entre mortero y ladrillo como así también el efecto de falla por flexo tracción en la unión entre paredes internas del mampuesto puesto que se puede visualizar un desprendimiento de la pared vertical externa del ladrillo que experimentó la falla.

Entre los diversos modos de falla capturados de estos ensayos se pudo apreciar que la propagación de fisuras fue espacial atravesando en forma transversal como aleatoria el mismo panel dando como resultado desplazamientos de los patrones de agrietamiento a un lado y a otro de dicha probeta.



Figura 7.23. Fallas locales en Ensayo CCBF: fisuras por asentamiento diferencial.



Figura 7.24. Fallas locales en Ensayo CCBF: patrones de fisuras por asentamiento diferencial y desprendimientos por Flexo tracción.



Figura 7.25. Fallas locales en Ensayo CCBF: fallas en lados opuestos del mismo panel.

En la figura 7.25 se capturó dicho fenómeno observando internamente fallas por aplastamiento del mortero de junta aunque el efecto principal fuera el desprendimiento de la pared vertical exterior además de apreciarse una falla en la IMLH.

La ausencia de elementos materiales que aporten ductilidad y el carácter frágil del conjunto determina la forma en que dicho patrón de grietas se propaga en función a los estados tensionales complejos ocurridos en forma espacial al margen de la posibilidad de ocurrencia de un estado plano debido a la relación de lados de la probeta. En el panel 3 se pudo apreciar una falla de carácter global producto de esta fragilidad del sistema



Figura 7.26. Fallas locales atravesando la sección transversal del Panel 3.

. En la figura 7.26 se puede observar una falla de tracción diagonal ocasionada por esfuerzo de corte que se propaga hacia ambos lados de la zona de aplicación de la carga. En la parte superior izquierda se puede observar un efecto combinado de falla por corte diagonal con desprendimiento de la pared vertical exterior de un ladrillo que presenta cierta conexión con la falla por tracción diagonal.

En uno de los ladrillos se ve una línea horizontal que denota una falla por flexo tracción en la esquina superior del ladrillo que se propaga por la IMLV y se traslada al ladrillo adyacente cruzando en una diagonal que pasa a desprender luego la IMLH.

En la figura 7.27 se observa el desprendimiento lateral producido en la cara revocada del panel 3 en donde se asume que esa zona sufrió un efecto de aplastamiento por compresión dando inicio a la propagación de una fisura vertical que se asocia con el fenómeno de asentamiento diferencial inducido mediante la compactación de la base de suelo. Desde este ángulo parece ser que la falla es producto de un aplastamiento del ladrillo debido al esfuerzo de compresión producido por la aplicación de la carga aplicada en el ensayo.



Figura 7.27. Fallas locales por tracción diagonal por corte y desprendimiento del Panel 3.



Figura 7.28. Fallas internas y desprendimiento del Panel 3.

Se puede apreciar en la figura 7.28 que las líneas o superficies de falla se dan en las uniones entre paredes horizontales y verticales. En ocasiones la misma sigue una trayectoria regular lineal y en otras se dispersa en forma aproximadamente diagonal no lineal.

La falla va cruzando por la interface entre granos de arena y la masa de arcilla cocida. Con estos hechos se puede pensar en asociar el modo de falla de los ladrillos guarda cierta correlación potencial con el contenido de áridos finos de la mezcla el cual se sabe varía en función de las proporciones establecidas por cada fabricante.



Figura 7.29. Fallas locales interiores en el panel para ensayo CCBF.

La figura 7.29 muestra evidencias de aplastamiento en las paredes internas lo cual se estima ocurre luego de producido el desprendimiento de las paredes laterales del ladrillo. Es necesario a futuro estudiar cual es la situación que define la propagación de las líneas de falla a través de las paredes y sus uniones internas.

En cuanto a la figura 7.30 se puede observar cierta continuidad del patrón de agrietamiento que pasa de una falla en el ladrillo a una separación de la IMLV además del hecho que por encima del ladrillo fracturado la falla es diferente.

Luego se puede ver como una falla por desplazamiento de la IMLV se transforma en una falla de tracción diagonal por corte en la pared interna vertical de un ladrillo lo cual establece cierta existencia de compatibilidad de deformaciones en el material compuesto actuando como un continuo a macro escala.

También se puede observar cierta estabilidad del núcleo interno respecto de lo que ocurre en las paredes laterales exteriores dado que las paredes horizontales internas en su mayoría permanecen conectadas a dicha pared vertical interior.

Con respecto a esta imagen se puede apreciar un lugar en donde ocurre una bifurcación de una fisura vertical ocurrida en la pared vertical interior lo que podría entenderse como el lugar geométrico en donde se estima alojado el lugar donde se da la nulidad de las tensiones y deformaciones para este caso.



Figura 7.30. Trayectoria de patrones de fisuración de un material a otro.



Figura 7.31. Esquema general de fallas ocurridas en el Panel 4.

La figura 7.31 muestra un esquema general de fallas ocurridas en el ensayo correspondiente al Panel 4 ensayo CCBF en donde se pueden apreciar los diferentes modos de falla enunciados y señalados con anterioridad. En términos generales se pudo inducir la falla por

asentamiento diferencial y se pudieron registrar esfuerzos y deformaciones producto de dicho efecto inducido.

Si observamos en detalle la superficie en donde ocurrió el desprendimiento de la pared vertical correspondiente a ladrillos del panel, sensiblemente se ve nuevamente lo mencionado por Crisafulli [1997] dado que el área desprendida sigue una línea diagonal que se asume es causada por la diferencia en la densidad del suelo de base.

Por otra parte la fisura vertical generada en el tercio central del panel también sucede por la diferencia en la compactación del suelo, por lo tanto es un hecho a tener en cuenta en el control de densidad de terrenos aterrazados en donde la densidad del suelo de relleno no recibe un tratamiento adecuado.

Con respecto al instante en donde se separan los encadenados, la diferencia de densidad en el suelo de apoyo del panel permite inducir la fisura vertical ocurrida en forma global en el centro del panel.

Esto prueba la importancia de estudiar en detalle las consecuencias de generar en viviendas sociales sobre aterrazamientos sin control de densidad, puesto que el experimento intentar simular el efecto que tiene el emplazamiento de una construcción edilicia sobre un suelo que fue aterrazado sin controlar que los niveles de densidad del suelo sean uniformes en todo el desarrollo de la misma.

En la zona próxima al sector de aplicación de la carga se produjo un efecto global de desprendimiento de las paredes externas de los ladrillos. A medida que se desciende en altura en la probeta se disipa este efecto y aparece una dislocación vertical en donde se separan las diferentes IMLH e IMLV a lo largo del patrón de agrietamiento.

En conclusión el efecto de compresión se disipa a medida que aumenta la distancia al punto de aplicación de la carga cumpliendo con la hipótesis de concentración de la aplicación de la carga enunciada por Jean Claude Saint Venant en el contexto de la teoría de la Elasticidad.

Siguiendo con el análisis de resultados numéricos de este experimento se presenta a continuación los registros de los ensayos correspondientes a Panel 3 y Panel 4 en el formato Ensayo de carga centrada sobre base flexible.

La rampa de carga analizada dio como resultado una velocidad de aplicación de la carga de 2.16 KN/seg (ver Figura 7.32) sobre el panel durante el ensayo. Los instrumentos de medición de desplazamiento se colocaron en sentido horizontal en ambas caras de cada panel para evaluar desplazamientos que permitan calcular la curvatura por asentamiento diferencial inducida en el ensayo tipo CCBF.

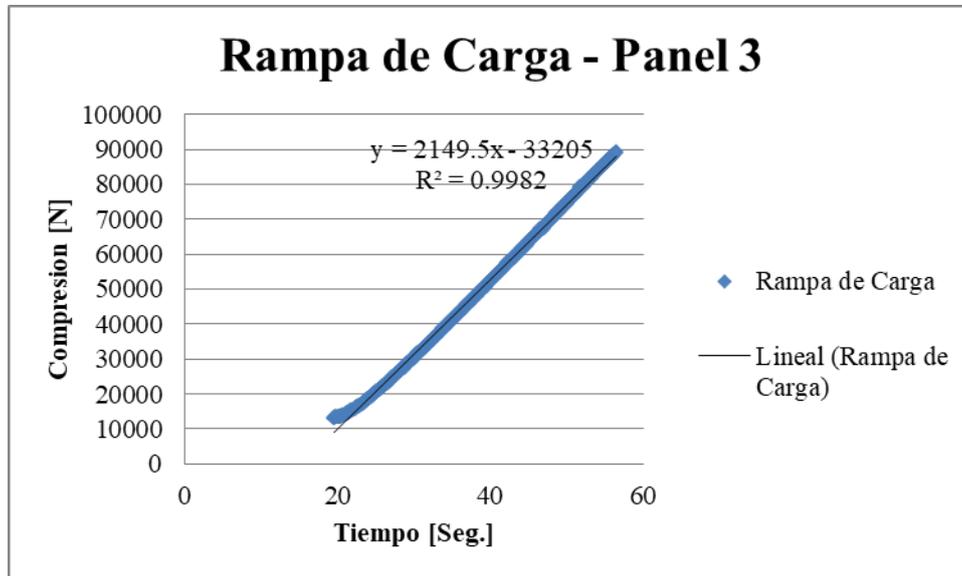


Figura 7.32. Verificación de la rampa de carga en el Panel 3.

La figura 7.33 muestra el desarrollo de los registros de desplazamiento para cada extensómetro numerando los mismos según la secuencia superior (KTM-25A), central (KTM-50A) y superior (KTM-25B). Es de señalar que la zona inferior de registro de desplazamientos arroja valores cercanos a cero mientras el extensómetro ubicado en la parte superior ha llegado a registrar alargamiento en el orden de la centésima de milímetro.

A los 20 KN de carga aplicada se observan salto en los registros de Carga-Desplazamiento lo cual puede deberse a la aparición de las primeras fallas localizadas. Luego al pasar los 50 KN los valores de desplazamientos se magnifican de manera considerable dando lugar a valores del orden de la centésima de milímetro creciendo gradualmente.

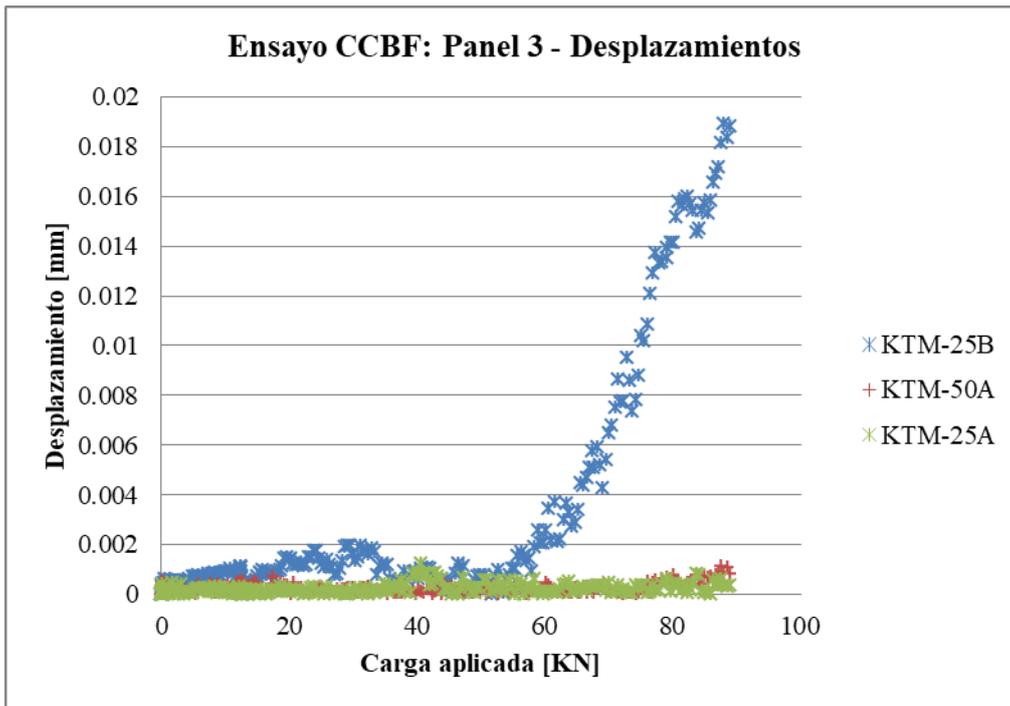


Figura 7.33. Desplazamiento vs Carga Aplicada.

En cuanto a su relación constitutiva si bien se realizaron escasa cantidad de ensayos a compresión y se dio prioridad a otros enfoques se confeccionó una descripción de la misma que se puede observar en la figura 7.34. De su análisis se puede estimar que la tensión de falla si consideramos la sección bruta de la pared se da para el orden de 0.25 Mpa.

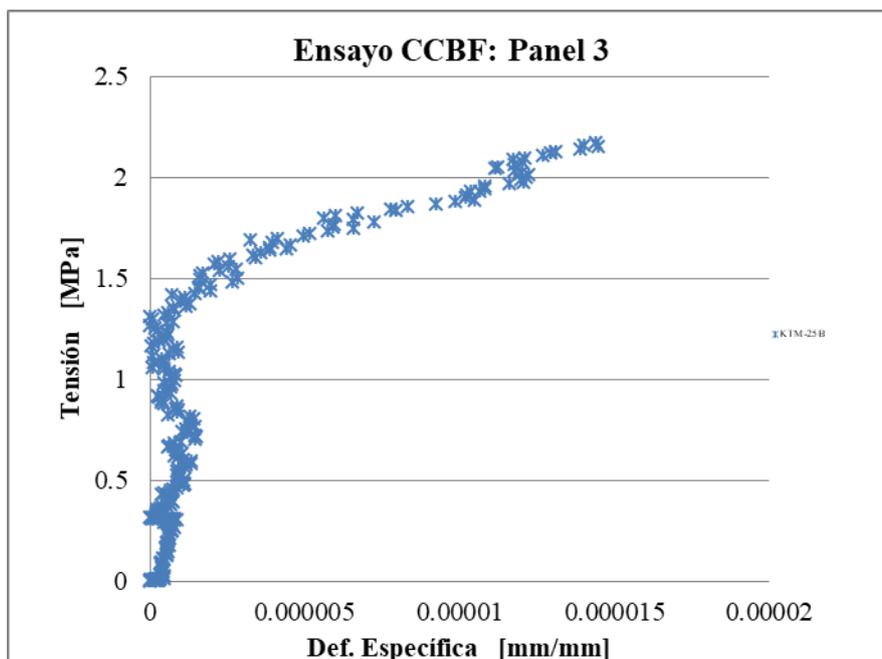


Figura 7.34. Relación Tensión-Deformación panel 3 Ensayo CCBF.

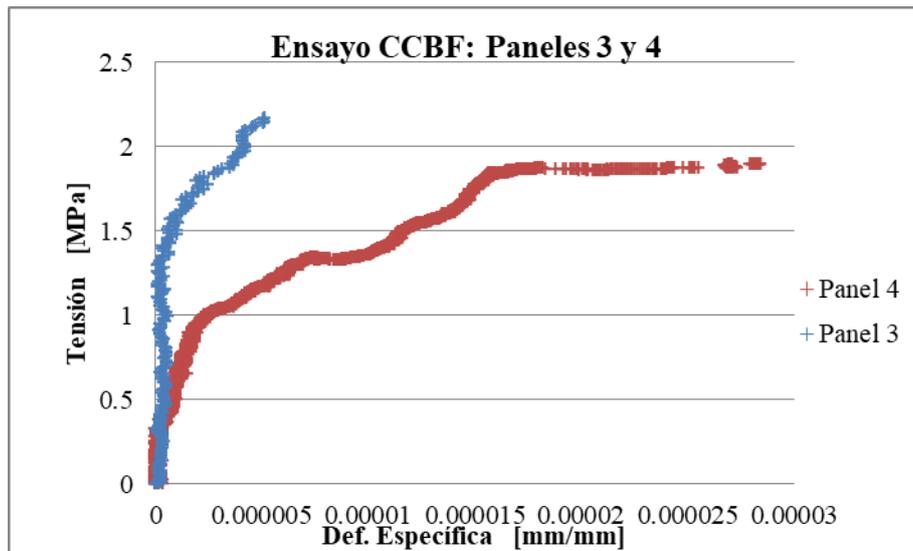


Figura 7.35. Relación Tensión-Deformación panel 3vs Panel 4 - Ensayo CCBF.

Para el caso del Panel 4 Ensayo CCBF según se observa en la figura 7.35 se apreció un comportamiento más dúctil comparando la misma sección de análisis entre ambos paneles. El orden de magnitud de la tensión de falla se ha mantenido en el mismo rango.

A efectos de establecer pautas de diseño para estos sistemas se resumieron estos valores característicos en la tabla 7.2 en donde se recopiló la información correspondiente a propiedades geométricas y mecánicas de los ensayos CEBR realizados para el presente capítulo.

ENSAYO DE PANELES CARGA EXCENTRICA CON BASE RIGIDA

Panel	Momento de Inercia [mm ⁴]	Despl. intradós [mm]	Despl. trasdós [mm]	Carga máx. aplicada [KN]	Esfuerzo a Compresión [Mpa]	Módulo Ef [Mpa]	Curvatura máxima [rad/mm]	Momento Máximo [KN.m]
CE 1	84558769	0.0005468	1.5597E-05	100.15	2.524	148.8887	0.0002	3.012
CE 2 1	84558769	0.0002668	0.00247049	76.70	2.401	3843.242	7E-06	2.301
CE 2 2	84558769	0.0001118	0.00090695	94.78	1.496	5719.967	6E-06	2.843
CE 2 3	84558769	0.0002914	0.00073459	98.23	1.514	5864.231	6E-06	2.947

Tabla 7.2. Parámetros obtenidos en Ensayo CEBR.

Luego de aplicar metodo de generación de números aleatorio previo descarte de valores alejados (outliers) se obtuvieron los siguientes parámetros estadísticos para el ensayo CEBR. Los datos obtenidos se ubicaron en la Tabla 7.3 a continuación.

Parámetro	Despl. intradós [mm]	Despl. trasdós [mm]	Carga máx. aplicada [KN]	Esfuerzo a Compresión [Mpa]	Módulo Ef [Mpa]	Curvatura máxima [rad/mm]	Momento Máximo [KN.m]
Valor medio	0.0003	0.0008	97.7960	1.5115	5791.66	0.0000	2.9348
Desvío Estándar	0.0000	0.0001	2.2064	0.0123	72.1331	0.0000	0.0735
C.V.	4.47%	10.35%	2.26%	2.40%	1.25%	7.57%	2.50%

Tabla 7.3. Estadísticos de Parámetros obtenidos en Ensayo CEBR.

A su vez la tabla 7.4 y la tabla 7.5 muestran los resultados obtenidos para los ensayos CCBF de los paneles 3 y 4. Se aplicó idéntica técnica en sus registros a efectos de obtener los estadísticos para ser utilizados en la fase siguiente donde se propuso un conjunto de modelos numéricos para representar en forma abstracta el problema de análisis de la respuesta estructural de los sistemas de mamposterías combinadas con elementos de Hormigón Armado.

Panel	Despl. Vertical estimado [mm]	P [KN]	fc [Mpa]	Módulo Ef [Mpa]
CCBF1	0.10	9.96	0.84	25493
CCBF2	0.07	10.11	1.58	9786
CCBF3	0.11	33.86	0.95	10620
CCBF4	0.09	30.19	1.33	13080
CCBF5	0.08	31.58	1.46	15313

Tabla 7.4. Parámetros registrados en Ensayo CCBF.

Despl. Vertical Estimado [mm]	Pcr [KN]	fcr [Mpa]	Módulo Ef [Mpa]
0.09	23.14	1.232	12199.75
0.0158114	12.034822	0.3224438	2502.6
17.57%	52.01%	26.17%	20.51%
-	-	0.37	3678.16

Tabla 7.5. Estadística ampliada de Parámetros obtenidos en Ensayo CCBF.

A modo de conclusión los máximos desplazamientos fueron mayores en el ensayo CCBF respecto de lo registrado para CEBR lo cual tiene sentido desde el punto de vista de que la

rigidez global de la mampostería depende de la rigidez del material de asiento utilizado para su apoyo.

Con respecto a las cargas admitidas por el panel para el ensayo CEBR dieron un rango alrededor de los 98 KN mientras que en CCBF las primeras fallas aparecieron en el orden de los 33 KN lo cual indica como primer impresión que parece aceptable pensar que se debe a que la presión de confinamiento que puede desarrollar el panel sobre una base rígida aumenta las prestaciones en lo que respecta a respuesta estructural de la mampostería como sistema resistente.

Índice de Deformación Correlativa. Relación entre la deformación transversal y longitudinal del panel.

La tabla 7.6 muestra la ubicación de puntos relevados en la superficie lateral del panel utilizado en el ensayo CEBF. Los valores de IDC obtenidos en el ensayo de paneles (Tabla 7.7) son menores a los evaluados y estimados en el caso de los ladrillos y celdas (estos últimos no se presentaron por ser de cantidad insuficiente para validarlos estadísticamente) lo cual induce a pensar en la incidencia que tiene la incorporación del hormigón armado en el sistema compuesto evaluado.

Distribución de puntos analizados

ancho: 118 mm

alto: 839 mm	17	13	9	5	1
	18	14	10	6	2
	19	15	11	7	3
	20	16	12	8	4

Tabla 7.6. Esquema general de puntos analizados por DIC.

	P3-1	P3-2	P3-3	P3-4	P3-5	Promedio	Desv Est.	C.V.
epsx	0.23	0.21	0.22	0.24	0.22	0.2235019	0.0132019	5.91%
epsy	1.02	0.99	1.04	1.15	1.00	1.0408202	0.0668457	6.42%
IDC	0.22	0.21	0.21	0.21	0.20	0.2112675	0.0079681	3.77%

Tabla 7.7. Valores de Idc en el Panel 3.

Los valores de IDC estimados por técnicas de Correlación de Imágenes Digitales se pretenden utilizar en la fase de simulación numérica de la respuesta mecánica de la mampostería como sistema estructural.

En el capítulo 8 se pretende utilizar la anterior presentación de los resultados experimentales y la formulación de dos funciones límite correspondientes a los dos tipos de ensayos realizados sobre paneles de mampostería: uno concerniente a la curvatura transversal límite que admite un muro cargado en forma excéntrica y otro concerniente a la deformación longitudinal límite que se admite por efecto de asentamientos diferenciales.

Teniendo en cuenta el comportamiento de las probetas en general hasta el presente capítulo en lo que respecta a los datos recopilados se puede asumir que el material en sus diferentes escalas ha revelado un carácter lineal hasta el instante de la primer fisura.

Luego en algunos casos siguió un comportamiento caótico y no lineal mientras que en otros casos se mantuvo esa linealidad ocurriendo cierta disminución en la pendiente de carga vs desplazamiento. De todas formas queda de manifiesto el cambio de comportamiento luego de la fisuración.

Otro hecho notable es que si bien los valores de deformación específica de las probetas de cerámica fueron cercanos a los esperables en probetas de hormigón las pendientes de comportamiento en las diferentes direcciones analizadas arrojaron valores bajos respecto al mencionado material

Respecto al análisis multidireccional hecho en los ladrillos LCH se observó que la dirección paralela a los tubos horizontales mostro una rigidez axial que supera en forma considerable a la rigidez en dirección perpendicular a dichos tubos. En las direcciones perpendiculares a los tubos las pequeñas diferencias en la pendiente de comportamiento se pueden asumir debidas a la minúscula diferencia de espesor que existe entre las paredes horizontales y verticales.

En las celdas se ha podido constatar que la inclusión del mortero de junta ha dado como consecuencia una reducción en la resistencia a compresión del conjunto confirmando lo expuesto por varios autores revisados en el capítulo 2 de la presente tesis. Por otra parte se constató que el espesor de mortero de junta se agrega como posible lugar de falla al conjunto Celda. Luego queda mencionar que siguió apareciendo de manera considerable la falla en unión de paredes horizontales y verticales del ladrillo.

En los paneles se pudieron obtener datos experimentales que debieron ser procesados de manera diferente a efectos de poder conseguir un metodo consistente que a un costo computacional razonable pueda ser representativo del problema de comportamiento mecánico de las mamposterías consideradas como elemento estructural. En el ensayo CEBR se debió plantear un modelo que correlacione momentos flectores con curvaturas mientras que en el ensayo CCBF se aplicó idéntico procedimiento de simulación que en ladrillos y celdas.

CAPÍTULO 8

MODELACIÓN NUMÉRICA DE SISTEMAS DE MAMPOSTERÍA.

Modelar numéricamente problemas en el campo de la Ingeniería Estructural incide en factores como el costo de las investigaciones y/o el tiempo invertido en ellas. Si se propusiera estudiar casos en escala real en prototipos estructurales es posible que sus costos hicieran inviable cualquier investigación al respecto. Por lo tanto cualquier avance en simulación numérica para resolución de problemas estructurales representa un aporte al campo científico.

El presente capítulo propone herramientas que permiten obtener resultados aproximados teniendo presente un costo computacional razonable y un orden de precisión aceptable. Se pretende que a futuro estos algoritmos permitan apuntar a la optimización estructural de estos sistemas en términos de las prestaciones potenciales que pueden brindar al usuario.

El presente capítulo pretende ordenar diferentes propuestas planteadas para comprender el comportamiento estructural de sistemas de mampostería fabricados con ladrillos LCH y morteros de junta tomando como base un modelo presentado en [Reinert, 2013] el cual establece una comparación entre metodologías de análisis estructural convencional aplicada exclusivamente a elementos de hormigón armado y su alternativa considerando a las mamposterías como elementos resistentes.

Se espera cumplir con el objetivo: proponer una herramienta numérica basada en un macro modelo equivalente, calibrado con los resultados experimentales presentados en los capítulos anteriores, que permita aproximar el comportamiento de estos sistemas con proximidad aceptable a bajo costo computacional a los efectos de poder utilizar estas aplicaciones en procesos de diseño y optimización de dichos sistemas incluyendo restricciones de confiabilidad.

Pautas generales.

En la fase experimental del presente trabajo de tesis doctoral fue necesario elaborar ciertas herramientas numéricas que permitan representar los resultados experimentales en códigos numéricos de simulación de la respuesta estructural, por lo tanto es factible recurrir a técnicas como el Metodo de Elementos Finitos (MEF).

En la búsqueda de aproximar un modelo numérico a un problema en particular se debe tener presente la relación que existe entre los conceptos de convergencia y precisión los cuales se asumen como inversamente proporcionales. Esto lleva a la necesidad de plantear un punto de equilibrio que permita resultados de modelos numéricos logrando proximidad aceptable a un costo computacional razonable.

En estos términos el enfoque de micro modelo que reproduce al detalle la geometría de los sistemas analizados en laboratorio presentan la desventaja de ser procesos que requieren un alto costo computacional por lo cual muchas veces son difíciles de llevar a un espacio de aplicaciones directas en el campo de la ingeniería estructural.

En el caso de los sistemas de muros de LCH ocurre esta cuestión que es el costo computacional que implica modelar cada ladrillo con sus paredes verticales y horizontales, los espesores de morteros de junta vertical y horizontal y cualquier elemento de Hormigón armado que se use como transmisor de cargas aplicadas a la mampostería.

Para que el proceso sea viable se debe apuntar a trabajar con macro modelos equivalentes del problema real guardando una adecuada relación entre precisión y convergencia además de permitir consideraciones en cuanto a condiciones de equilibrio y compatibilidad de deformaciones que sean representativas de las condiciones reales del prototipo en estudio.

Otra cuestión importante es la formulación de una relación constitutiva que sea representativa del comportamiento mecánico del sistema estudiado. Para ello se adoptó para el caso de micro-modelos un material isótropo no lineal basado en las propiedades físicas y mecánicas obtenidas a partir de ensayos realizados sobre probetas de cerámica.

Para los macro-modelos equivalentes se propuso un material ortótropo basado en propiedades obtenidas en ensayos de laboratorio efectuados sobre ladrillos y celdas cuya relación constitutiva es una aproximación de lo analizado en la fase experimental.

En los modelos utilizados para reproducir los resultados experimentales del capítulo 4 se simuló la probeta sometida a compresión como un elemento de barra vinculado en un extremo y con aplicación de una fuerza puntual en dirección axial a la misma en el extremo opuesto.

En ladrillos se probaron varios modelos combinando elementos de barra en algunos casos y elementos de área en otros. En los modelos basados en elementos de Área se intentó el

primer modelo equivalente basado en un material ortotrópico de parámetros obtenidos por ensayos experimentales.

En Celdas se continuó trabajando con modelos de área equivalente dados los resultados aceptables obtenidos en la fase anterior simulando ladrillos ensayados a compresión. Cabe destacar que en esta etapa se observaron valores de modulo elástico sobre la base de los resultados obtenidos en forma experimental a efectos de considerar el efecto que produjo la aparición del mortero de junta en la probeta evaluada.

En Paneles, se propusieron modelos diferentes para cada tipo de ensayo (CEBR-CCBF) y los parámetros de configuración de cada modelo fueron basados en datos experimentales. La interconexión entre elementos y nodos está basada en dos métodos (FEM y XFEM).

En la técnica FEM se logra la confección de una matriz de rigidez ensamblada que contiene la información del sistema referente a las propiedades geométricas y mecánicas del mismo. Dicha matriz de rigidez considera los datos experimentales obtenidos para el caso de ensayos realizados en paneles de mamposterías. En la técnica XFEM se genera un enriquecimiento de los nodos para producir efectos de: inicio de la fisuración (Crack tip) y trayectoria de patrón de dicha fisura.

La incidencia del encadenado se consideró en la matriz constitutiva del modelo 2D realizando el ajuste correspondiente en la dirección vertical dando como resultado la matriz mostrada en la figura 8.1 la cual responde a magnitudes de modulo elástico longitudinal estimado sobre base experimental del ensayo CCBF.

MATRIZ DE RIGIDEZ ELEMENTAL - ELEMENTO RECTANGULO DE 4 NODOS

	q9	q10	q11	q12	q13	q14	q7	q8	
Ke =	30526.736	12927.693	12927.693	4671.3511	-30526.74	-12927.69	-12927.69	-4671.351	q9
	12927.693	30526.736	-4671.351	-12927.69	-12927.69	-30526.74	4671.3511	12927.693	q10
	12927.693	-4671.351	30526.736	-12927.69	-12927.69	4671.3511	-30526.74	12927.693	q11
	4671.3511	-12927.69	-12927.69	30526.736	-4671.351	12927.693	12927.693	-30526.74	q12
	-30526.74	-12927.69	-12927.69	-4671.351	30526.736	12927.693	12927.693	4671.3511	q13
	-12927.69	-30526.74	4671.3511	12927.693	12927.693	30526.736	-4671.351	-12927.69	q14
	-12927.69	4671.3511	-30526.74	12927.693	12927.693	-4671.351	30526.736	-12927.69	q7
	-4671.351	12927.693	12927.693	-30526.74	4671.3511	-12927.69	-12927.69	30526.736	q8

Ke= t.A.[B'.D.B]

Figura 8.1. Matriz de Rigidez considerada para modelo numérico FEM-CCBF.

El proceso numérico se completa con la formulación de un vector representativo del sistema de fuerzas actuantes en forma exterior. las condiciones de borde que filtrara el sistema de ecuaciones a resolver se procede a buscar la solución del mismo planteando en principio un análisis elástico lineal estático para aplicación de carga de carácter monotónico.

Para el modelo representativo del ensayo CEBR se propuso restricciones de desplazamiento y rotación libre en la base. Para el modelo CCBF se propuso limitar el desplazamiento definiendo parámetros característicos de suelos regionales. La tabla 8.1 muestra los parámetros adoptados a tal fin.

Parámetros del modelo CCBF			
Area Comprimida global	Agm:	1572511	mm ²
Area neta comprimida	Anc:	47645.7	mm ²
longitud horizontal del elemento	Lhe:	240.8	mm
Longitud vertical del elemento	Lve:	172.3	mm
espesor	e:	173.3	mm
cantidad de elemento finitos	Ne:	40	
tipo de material adoptado		isotrópico	
Modulo Elastico Longitudinal	E:	12199.8	N/mm ²
coeficiente de deformación:	m:	0.19	
Modulo Elástico Tansversal	G:	7530.71	N/mm ²
Módulo de Reacción vertical	Kv	10	N/mm ³
tension de trabajo del suelo	st:	0.1	N/mm ²
tensión de rotura del suelo	sr:	0.3	N/mm ²
Asentamiento de calculo	Δv	0.0100	mm
Módulo de reacción horizontal	Kh	1.9	N/mm ³
tension de trabajo del suelo	st:	0.019	N/mm ²
tensión de rotura del suelo	sr:	0.057	N/mm ²
	Δh	0.01	mm

Tabla 8.1. Parámetros asignados a modelo numérico FEM-CCBF.

Modelos en probetas de cerámica.

Cada etapa experimental tuvo su segmento de simulación numérica a partir de diferentes modelos de elementos finitos a efectos de monitorear la proximidad del campo de

desplazamientos obtenido en los resultados de laboratorio y el campo de desplazamiento obtenido en cada simulación.

Modelo 4.1: barra lineal isotrópica sometida a compresión.

La figura 8.2 muestra un esquema de modelación para el ensayo de probetas de cerámicas a compresión desarrollo mediante técnica MEF denominado modelo 4.1. Esto siguió el objetivo de poder analizar en cada segmento del programa experimental las particularidades de cada etapa.

De los resultados obtenidos se observaron diferencias entre resultados experimentales y aquellos simulados en el orden del 21% en promedio con dispersiones del 14% lo cual podría dar como conclusión que el modelo basado en el material adoptado en esta instancia es poco robusto y es disperso respecto a los resultados obtenidos. Sin embargo conviene mantener los resultados de monitorear carga y desplazamiento.

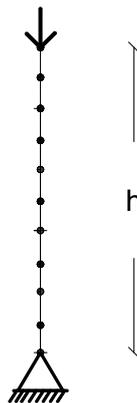


Figura 8.2. Esquema conceptual de formulación de un modelo 4.1: MEF-Cerámicas.

En la tabla 8.2 se resumieron los resultados obtenidos en base a los ensayos mostrados en el capítulo 4 para los ensayos de compresión a rotura. A modo de observación de lo mostrado en dicha tabla se observa que los valores promedio de los desplazamientos medidos y los simulados son cercanos y aceptables.

La figura 8.3 muestra la relación en forma gráfica entre estos resultados. Se puede ver que la aproximación propuesta tiene un sentido aceptable y puede obrar como herramienta para promediar el comportamiento de dichas probetas lo cual da lugar a proponer como alternativa la formulación de un material no lineal calibrado con datos experimentales sobre la base de un intervalo de confianza del 99%.

	Carga aplicada [N]	Δ [mm]	Δ sim [mm]	Dif. [%]
	4080.356	0.750	0.581	22.5%
	5826.013	0.967	0.829	14.3%
	5396.138	0.952	0.768	19.3%
	5389.426	0.741	0.767	3.5%
	6483.709	0.868	0.923	6.3%
	4949.759	0.606	0.704	16.2%
	4509.176	0.438	0.642	46.4%
	4885.577	0.488	0.695	42.5%
	4907.059	0.787	0.698	11.2%
	4422.303	0.820	0.629	23.3%
Promedio	5084.95	0.74	0.72	0.21
Desvío	712.18	0.18	0.10	0.14
C.V. %	14.0%	24.4%	14.0%	68.9%
Asimetría	0.65	-0.55	0.65	0.92
Curtosis	0.30	-0.70	0.30	0.09

Tabla 8.2. Comparación resultados – Ensayos a compresión de probetas cilíndricas.

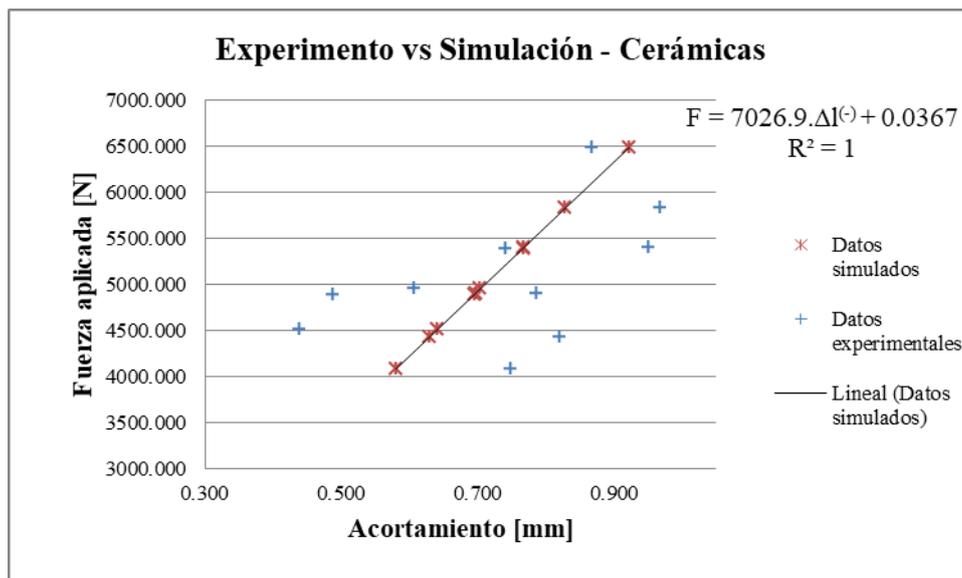


Figura 8.3. Comparativa entre curva experimental y datos simulados por MEF.

Respecto a los parámetros mecánicos adoptados se decidió un criterio de seguridad que permita ajustar de manera adecuada dichos resultados.

En una comparación efectuada para los ensayos a tracción se utilizó el modelo de barras utilizado a compresión compuesto por elementos de barra de 2 nodos y los resultados han mostrado una dispersión considerable que coloca a este modelo en una situación de baja calidad computacional. La tabla 8.3 muestra los resultados comparados.

	Carga simulada [N]	Desplazamiento experimental Δ [mm]	Desplazamiento simulado Δ_{sim} [mm]	Diferencia $\Delta/\Delta-1$ sim [%]
Promedio	464.63	2.08	3.50	1.38
Desvío	20.72	1.01	0.16	1.19
C.V. %	4.46%	48.85%	4.46%	85.97%

Tabla 8.3. Comparación de Modelos numéricos y resultados experimentales – Ensayos a Tracción en probetas cilíndricas de cerámica.

A efectos de obtener mejores herramientas de análisis y considerando que la modelación en elementos cerámicos sometidos a esfuerzo de tracción debe tener presente la energía de fractura, es necesario formular métodos que consideren estos parámetros para lograr resultados confiables. El espíritu de la presente tesis se enfoca en considerar el aporte estructural de las mamposterías LCH en cuanto a reducir el costo de la estructura resistente de una vivienda manteniendo los estándares de seguridad admitidos por el marco normativo por lo tanto se propone el estudio del comportamiento no lineal post fisuración como trabajo futuro a desarrollar.

Modelos 4.2: probeta 3D sometida a compresión analizada mediante XFEM.

El Modelo 4.3 descrito en la figura 8.4 es un cilindro configurado como un sólido 3D constituido por un material de parámetros físicos y mecánicos de base experimental, compuesto de elementos C3D8RH. (Ladrillo lineal de 8 nodos, híbrido, presión constante, integración reducida, control de reloj de arena).

Con respecto a los parámetros asignados para configurar el material, se adoptaron las constantes experimentales obtenidas en ensayos de laboratorio. Más adelante se describen estos parámetros.

El análisis implementado en el modelo consistió en asignar a una de las caras restricciones a desplazamiento en las direcciones del sistema cartesiano adoptado, mientras que en el lado opuesto se aplicó control de desplazamiento de valor determinado.

La configuración de la resolución del sistema de ecuaciones generado para representar el problema fue ajustada a un análisis completo aplicando la técnica de Newton-raphson y el tamaño de malla asignado a este modelo fue de 3 mm.

Para este modelo se asignó enriquecimiento de nodos sin definir propiedades de interacción de contacto (hecho que se adopta más adelante en los modelos LCH). Esta práctica es usual en problemas de mecánica de fractura aplicada a piezas de acero en donde específicamente se estudia la trayectoria en una pieza mecánica a efectos de optimizar su respuesta.

En el presente trabajo de tesis se busca validar modelos numéricos sobre la base de los resultados experimentales, por lo tanto el estudio de las trayectorias de fisura se propone para líneas futuras de trabajo.

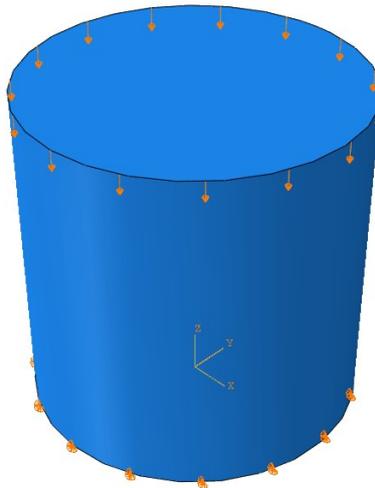


Figura 8.4. Modelo 4.2 de Probeta analizada por método XFEM.

En la figura 8.5 se observan resultados en términos de tensiones normales y deformaciones específicas en dirección al desplazamiento aplicado al modelo. Los valores obtenidos son validados por los datos experimentales, pudiendo apreciar que los valores de falla coinciden con los resultados de laboratorio.

Como hecho particular se denota el siguiente aspecto: las tensiones máximas se concentran en la base del modelo cerca de la zona de apoyo. Por otra parte al evaluar las tensiones de

Von mises las cuales se calculan mediante la siguiente expresión detallada en la ecuación 8-1, muestran la formación gradual de la zona de falla a partir de señalar el lugar en donde se han vencido las tensiones límite del prototipo estudiado.

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (8-1)$$

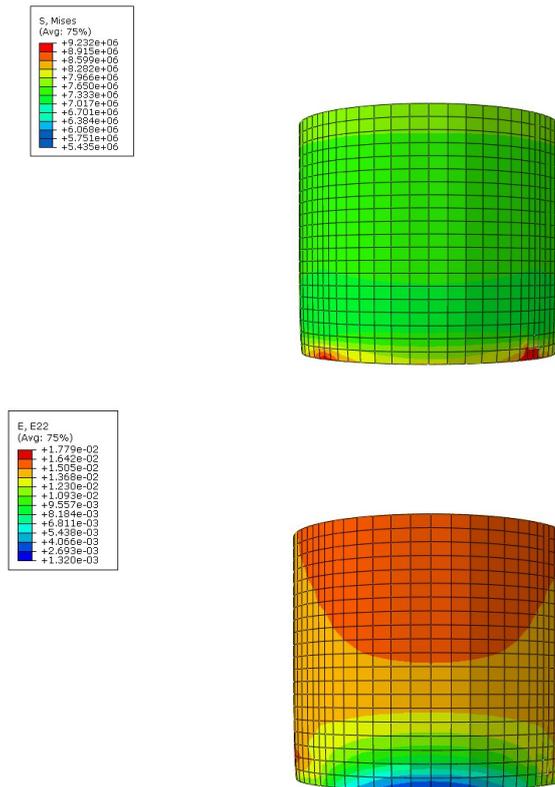


Figura 8.5. Resultados del modelo 4.2: estados de tensión y deformación específica.

Para comprender el sentido físico de la expresión anterior se describe a continuación en la figura 8.6 un esquema presentado por Bakalakovs [2017] en el cual se describe el criterio adoptado para implementar el enriquecimiento de nodos. El valor de Γ_d se asocia al versor n que apunta hacia un lado u otro de la fisura según el signo de la función $\phi(x)$ (criterio de métrica discreta de la función distancia en el espacio formulado).

En la figura 8.7 se muestran gráficos concernientes a la propagación de fisuras. Al no haber especificado una zona de inicio de la fisura se adoptó enriquecer el modelo completo lo cual resulta en un incremento del costo computacional que puede equilibrarse seleccionando un tamaño de malla adecuado y elemento acordes a la forma del modelo.

La función PHILSM, la cual se describe a continuación en la ecuación 8-2, representa la función distancia que permite definir la posición de la fisura en el elemento finito con nodos enriquecidos. La escala de colores muestra la magnitud que toma esta función respecto de la posición de la fisura.

$$\phi(x) = \|x - x^*\| \pm (n\Gamma_d (x - x^*)) \quad (8-2)$$

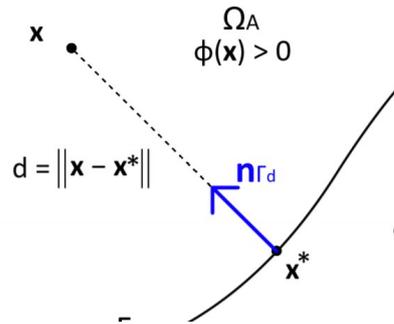


Figura 8.6. Representación esquemática del dominio de propagación de una fisura, Bakalagos [2017].

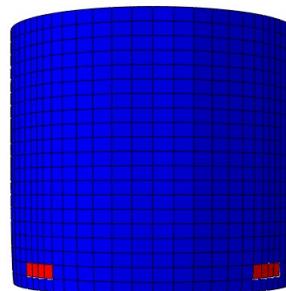
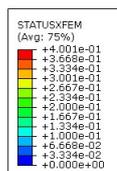
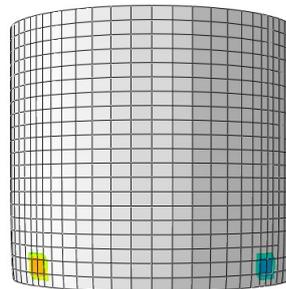
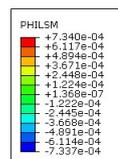


Figura 8.7. Propagación de fisuras y desarrollo de la función PHILSM = $\phi(x)$.

Por ultimo con respecto al modelo 4.2, el mismo se asume válido para ser utilizado en rutinas de elaboración de una superficie de respuesta del material a partir de datos obtenidos en laboratorio bajo normas.

Modelos 4.3: probeta 3D sometida a Tracción analizada mediante XFEM.

El Modelo 4.3 descrito en la figura 8.8 es un bloque fue configurado como un sólido 3D constituido por un material de parámetros físicos y mecánicos de base experimental, compuesto nuevamente de elementos C3D8RH como en el caso del modelo a compresión (modelo 4.2).



Figura 8.8. Comparativa entre curva experimental y datos simulados por MEF.

El modelo se analizó por desplazamiento controlado, asignado condiciones de borde en un extremo y un estado de alargamiento controlado en el extremo opuesto. El material fue configurado considerando las propiedades mecánicas medidas en laboratorio. La tabla 8.4 muestra los parámetros asignados al modelo 4.3.

En este modelo se definió la zona de inicio de fisura tomando como referencia la parte superior de la sección central del prototipo. La configuración de las propiedades de interacción se definió según criterios de penalización del comportamiento normal y tangencial sobre la base de los resultados experimentales, considerando máximos desplazamientos y tensiones al momento de la falla.

Nº	Modulo E [MPa]	Coeficiente de Poisson	Desp. máximo $\Delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Coeficiente de estabilidad cohesiva	Tensión máxima [MPa]	Densidad [N/m ³]	Tipo de ablandamiento
T3	900	0.19	0.74	1e-5	2.58	17897	lineal

Tabla 8.4. Parámetros físicos y mecánicos adoptados para modelos 3D de cerámica.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación. La figura 8.9 muestra el proceso de propagación del agrietamiento por tracción. En la misma se pueden apreciar el estado tensional cambiando alrededor de la propagación de la fisura, la cual coincide alrededor de la tensión de falla principal obtenida experimentalmente. Por lo tanto se pueden obtener parámetros válidos para el análisis de falla de las cerámicas (Cotejar energía de fractura, evaluar factores de intensidad de tensiones, entre otras tareas).

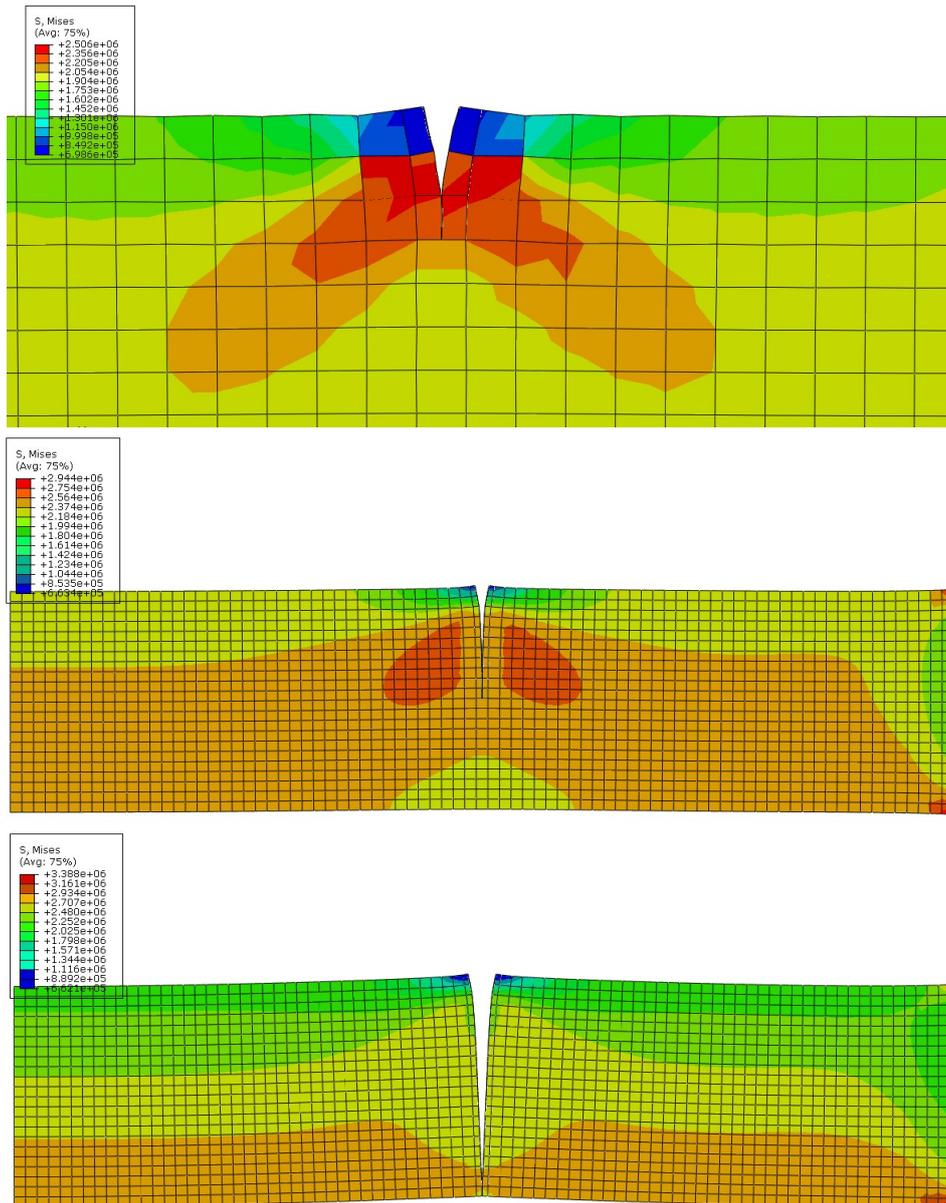


Figura 8.9. Comparativa entre curva experimental y datos simulados por MEF.

Modelos en probetas de Ladrillos LCH.

En el procedimiento de simulación numérica aplicado a ladrillos aislados la primer opción es un micro modelo configurando un material con las características experimentales determinadas a partir de los ensayos mostrados en el capítulo 4 donde se efectúa un tratamiento de la cerámica componente de los mampuestos midiendo sus características ante esfuerzos de compresión y ante esfuerzos de tracción.

Modelo 5.1: Micro modelo Equivalente de elementos Barra (frame).

El modelo 5.1 corresponde a un modelo compuesto de elemento barra que representan una porción transversal del ladrillo LCH de profundidad equivalente al espesor promedio de las paredes del mismo. Los parámetros mecánicos utilizados para los elementos de barra son los obtenidos en el capítulo 4 para las probetas de cerámica. El material utilizado en este modelo fue considerado isótropo no lineal adoptando los parámetros mecánicos obtenidos en los ensayos presentados en el capítulo 4.

La relación constitutiva formulada para el material se presenta en la figura 8.3 donde se puede apreciar la diferente respuesta del material a los esfuerzos axiales siendo mayor la resistencia a compresión por lo que se explica que las fallas en el ladrillo inicien por flexo tracción o por tracción directa en algunos casos.

En el caso de la cerámica estudiada su resistencia a tracción se posiciona en el orden del 15% de su Resistencia a Compresión lo cual da cuenta de ser un material de considerable fragilidad en su comportamiento a tracción con el agregado de presentar fallas en función a la disposición de agregado finos como ser arenas dentro de su masa de arcilla como se estableció en capítulos anteriores.

Los datos de esta curva característica fueron obtenidos en forma experimental y se corresponden con valores calculados según los criterios de intervalo de confianza definidos según Reglamento CIRSOC 501. A este material se le adjudico un criterio de elasto-plasticidad en base a Drucker y prager según lo expuesto en [García Garino, 2013]. En el mismo se adoptó un ángulo de fricción de 15.5° y un ángulo de dilatancia de 7° .

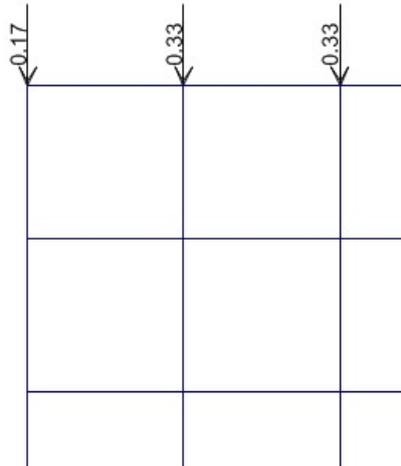


Figura 8.10. Configuración de condiciones de vínculo y Aplicación de carga en Modelo 5.1.

Con respecto a los resultados obtenidos con el modelo 5.1(Figura 8.10) hubo dos casos en donde la diferencia fue considerablemente mayor para valores de carga reducidos mientras que para los otros registros se observó una diferencia menor y aceptable considerando la cantidad de factores que deben evaluarse para un procedimiento de simulación numérica.

Al analizar la deformada de este modelo (fig. 8.11) se observa que entre las paredes horizontales y verticales se manifiesta un efecto aporcamiento entre barras. Este efecto se mencionó en el capítulo 5 cuando se estimó su valor por métodos analíticos aproximados. Este efecto es importante desde el enfoque de ser el causante de los efectos combinados de flexo tracción que inician los mecanismos de falla en el interior del ladrillo.

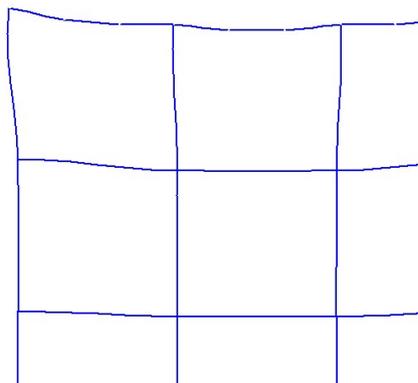


Figura 8.11. Elástica analizada para el Modelo 5.1.

En la tabla 8.5 (ver Fig. 8.12) en la cual se presentan los parámetros: mediciones de desplazamiento experimental, valor de Carga aplicada en el ensayo, desplazamiento obtenido según modelo numérico, diferencia porcentual entre datos experimentales y simulados; se puede observar que las diferencias en valor medio son aceptables ya que su

diferencia anda en el orden de 2% lo cual en términos globales puede aceptarse para después evaluar el costo computacional. El objeto principal de concebir este modelo fue poder estudiar las tensiones producidas por la flexo-tracción en nudos entre paredes verticales y horizontales a efectos de comparar con los valores constitutivos obtenidos en el capítulo 4.

Por otra parte se pudo observar que en el modelo se consideró a la cerámica como material isotrópico lo cual puede ser parte de las causas de las diferencias entre datos experimentales y los simulados por ordenador. Estas razones hicieron que el modelo de barras fuera descartado para la siguiente etapa por presentar diferencias con los resultados experimentales.

Desp. Experimental [mm]	Carga aplicada [N]	Desp. simulado [mm]	Dif. Abs.
0.55	8624.79	0.6100	10.4%
0.72	9073.19	0.6397	10.6%
0.31	3072.42	0.2165	29.1%
0.50	7356.08	0.5187	4.3%
0.17	3652.71	0.2574	47.8%
0.55	7146.05	0.5037	9.2%
0.50	7831.70	0.5521	10.5%
0.43	6597.25	0.4650	7.8%
0.84	10358.03	0.7766	7.5%

Promedio	0.51	7079.14	0.50	
Desvío	0.14	1834.80	0.13	
C.V. %	28%	26%	27%	
Sesgo	-0.01	-0.67	-0.43	
Curtosis	0.26	-0.21	-0.09	

Tabla 8.5. Comparación de Modelos numéricos y resultados experimentales – Ensayos a compresión en ladrillos LCH.

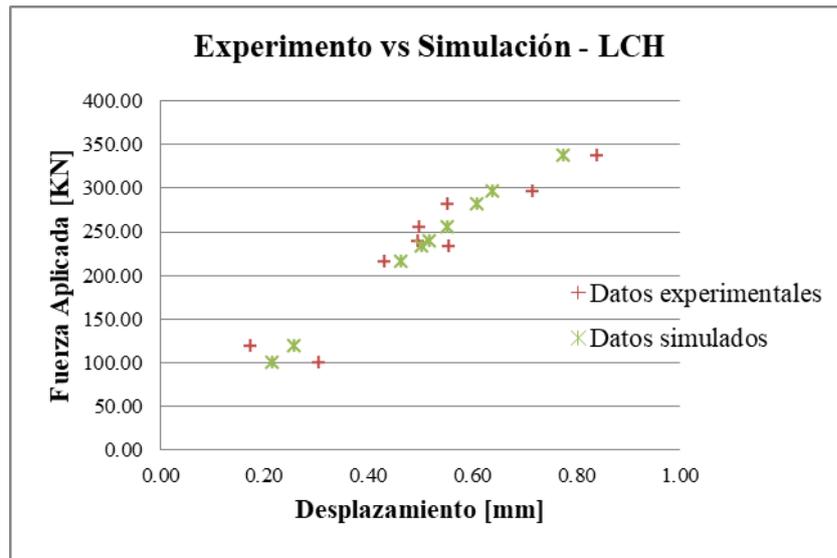


Figura 8.12. Comparación de resultados experimentales y datos numéricos simulados para ensayo LCH en modelo 5.1.

Este enfoque de micro modelo se ha desarrollado en cada etapa experimental logrando resultados acorde a lo estudiado en cada parte del programa experimental es decir se efectuaron análisis numéricos de mampuestos, celdas y paneles en formato de micro modelo.

Por último se calcularon las tensiones normales de tracción obtenidas mediante aplicación de cargas al modelo 5.1 y se obtuvieron los resultados de la tabla 8.6 que son analizados en los nudos internos que arrojaron los máximos esfuerzos normales.

	Carga aplicada [N]	Axil [N]	Flector [N.mm]	Tensión Normal [Mpa]
Promedio	1167.24	6.43	201.76	2.60
Desvío	63.78	0.22	11.51	0.15
C.V. %	5%	3%	6%	6%
Sesgo	-0.19	-0.39	-0.18	-0.18
Curtosis	-0.66	-0.61	-0.67	-0.66

Tabla 8.6. Análisis de tensiones Normales – Ensayos a compresión en ladrillos LCH.

De esta tabla se pudo concluir que los valores de esfuerzo normal que ocurren en el interior del ladrillo LCH (en las uniones entre paredes horizontales y verticales) son coincidentes con los valores relevados en ensayo a tracción del capítulo 4. Por lo tanto se comprobó que las fallas en ladrillos LCH se dan para esfuerzos normales en nudos internos y/o externos que vencen la resistencia a tracción de la cerámica.

Modelo 5.2: Micro modelo Equivalente de elementos Área (Shell 3D).

El modelo 5.2 es un micro modelo de áreas intersectadas que se configuran con las propiedades determinadas en el capítulo 4 y la geometría relevada en el capítulo 5 para lo cual se adoptó valores de espesor medio en la configuración de los elementos de área así como dimensiones globales promedio en términos del largo ancho y alto del ladrillo tal como se retrató en la figura 8.13 donde se mostró la composición geométrica realizada en el modelo como también las condiciones de borde adoptadas que incluyen los efectos correspondientes a la presión de confinamiento introducida a la probeta por los cabezales de la prensa que aplico el sistema de cargas monotónico.

De acuerdo a esto se debe reproducir la imposición de desplazamiento restringido de los que este en contacto con la prensa agregándoles restricciones en el plano horizontal en el caso de la parte inferior y coacciones en los nudos superiores del lado del cabezal móvil. Nuevamente se adoptó un material isótropo configurado con datos experimentales basados en los resultados del capítulo 4.

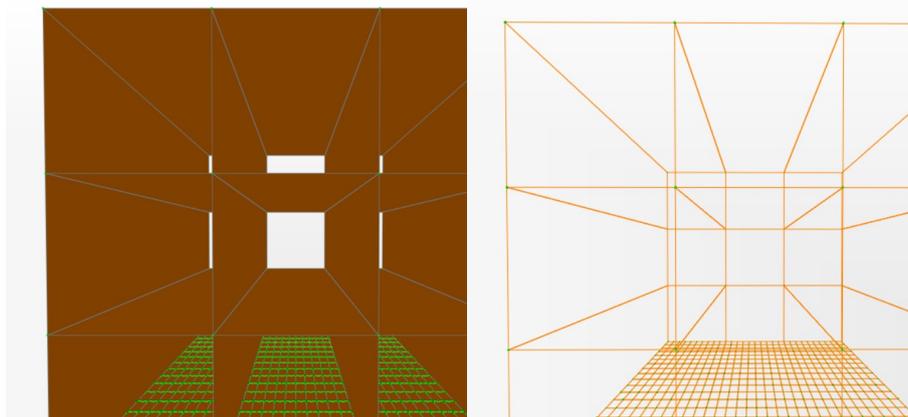
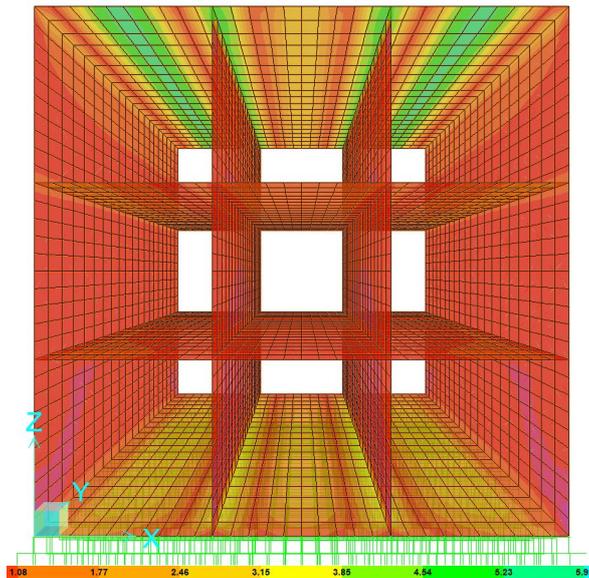


Figura 8.13. Configuración de condiciones de vínculo en Modelo 5.2.

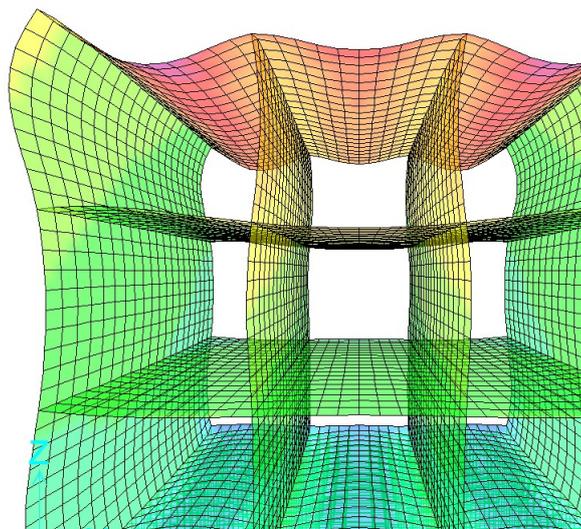
La calidad de los resultados obtenidos en el modelo 5.2 en términos de convergencia y precisión se presenta en la figura 8.14 comparando resultados de desplazamientos de

acortamiento en base a un determinado estado de carga aplicado en forma superficial sobre la cara superior del mismo.

A pesar de haber obtenido valores representativos de los datos experimentales el modelo 5.2 es poco práctico desde el punto de vista operativo dado que elaborar un modelo que representara un caso de una construcción de viviendas sociales es de un alto costo computacional. No obstante es un modelo apto para evaluar estados tensionales de probetas ensayadas en laboratorio con lo cual es factible generar una aplicación con el mismo.



a) Tensiones normales Sxx por aplicación de la carga de compresión en z.



a) Deformada con mapeo de valores U3 (descenso vertical).-

Figura 8.14. Estados de Tensión y Deformación en Modelo 5.2.

La lectura de datos simulados también es engorrosa aunque más precisa punto a punto por lo tanto se decidió solo presentar graficas que mostraron la similitud con lo ocurrido en los ensayos de laboratorio y validaron el fenómeno de falla por flexo tracción que se observó en las intersecciones ente paredes laterales verticales e interiores horizontales como puede apreciarse en la figura 8.14 en dichas intersecciones.

Modelo 5.3: Macro modelo Equivalente de elemento Área (Shell 2D).

El modelo 5.3 comprende la tercera opción definida para obtener una respuesta mecánica sobre la base de una simulación numérica fue elaborar un elemento de área equivalente compuesto por un material ortotrópico cuyos parámetros fueron medidos en cada etapa del programa experimental descrito en los capítulos anteriores. El desafío de este macro modelo radica en la posibilidad de representar el efecto transversal de falla por flexo tracción advertido en el capítulo 5. El primer paso es analizar un modelo numérico para el ensayo a compresión de un ladrillo LCH como se muestra en la figura 8.15.

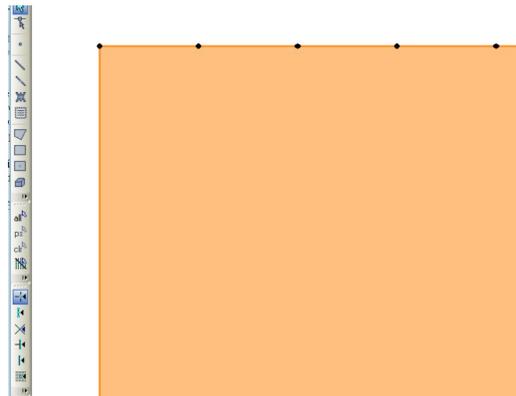


Figura 8.15. Esquema propuesto para el Modelo 5.3.

Dicho modelo está compuesto por un material adoptado como ortótropo con los datos experimentales obtenidos en el capítulo 5 donde se definieron módulos elásticos y transversales en 3 direcciones ortogonales que son: Dirección 1: longitudinal paralela a la dirección de los huecos del ladrillo; Dirección 2: transversal horizontal perpendicular a la dirección 1; Dirección 3: transversal vertical perpendicular a la dirección 1.

Para definir los valores de E en cada dirección se tomaron los datos estadísticos y se volcaron en la expresión descrita a continuación

$$E_i = E_{im}(1 - 1.64\delta_m) \quad (8.1)$$

δ_m : Coeficiente de Variación de la muestra

E_i : Modulo de Elasticidad Longitudinal en la dirección i.-

1.64: Coeficiente calibrado en función a adoptar una Distribución Normal Estándar.

Ladrillo	1 (Período Elástico) [Mpa]			2 Dirección Transversal horizontal			3 Dirección Transversal Vertical		
	E1 ensayos a rotura	E2 ensayo campo elástico	E3 ensayo campo elástico	G32 [MPa]	m32	E [MPa]	G31 [MPa]	m31	E [MPa]
PROMEDIO	1813.89	345.48	333.53	222.27	0.25	335.51	210.60	0.20	333.53
DESVIÓ	175.63	29.93	32.69	17.67	0.00	26.67	23.86	0.00	38.16
COEF VAR %	10%	9%	10%	8%	0%	8%	11%	0%	11%
Sesgo	1.51	0.39	0.46	0.19		0.39	0.46		0.46
Curtois	1.78	-0.49	1.93	-0.47		-0.49	1.93		1.93
Valores adoptados	1525.86	296.40	279.92	193.29	0.25	291.77	171.47	0.20	270.94

Tabla 8.7. Parámetros del material utilizado en el Modelo 5.3.

La tabla 8.7 muestra parámetros de un material ortotrópico no lineal adoptado para el modelo 5.3 (fila correspondiente a valores adoptados).

	Carga aplicada [N]	Desp. Experimental [mm]	Desp. simulado [mm]	Dif Abs. [%]
	8624.8	0.55	0.5333	3.5%
	9073.2	0.72	0.6843	4.4%
	3072.4	0.31	0.1900	37.8%
	7356.1	0.50	0.4549	8.5%
	3652.7	0.17	0.2259	29.7%
	7146.1	0.55	0.4419	20.4%
	7831.7	0.50	0.4843	3.0%
	6597.2	0.43	0.4080	5.4%
	10358.0	0.84	0.7887	6.0%
Promedio	7079.14	0.51	0.47	
Desvíó	1834.80	0.14	0.13	
C.V. %	26%	28%	28%	
Asimetría	-0.67	-0.01	0.17	
Curtois	-0.21	0.26	-0.18	

Tabla 8.8. Comparativa de resultados experimentales y simulados en Modelo 5.3.

En el análisis numérico del presente modelo se observó un ajuste adecuado con los resultados experimentales. Esta comparación se observan en la tabla 8.8 presentada a continuación.

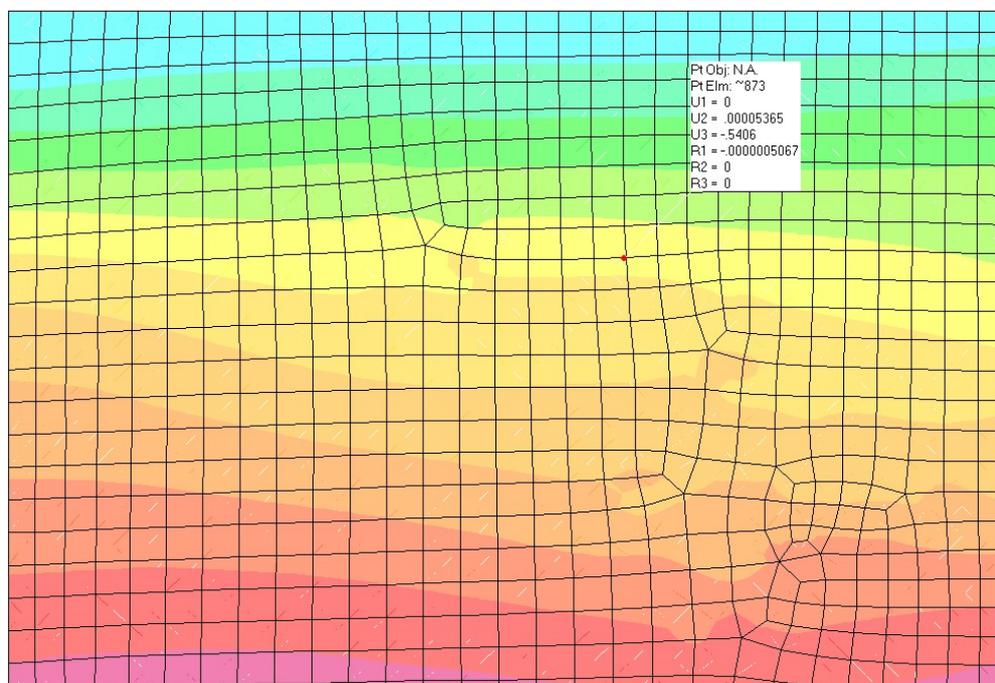


Figura 8.16. Desplazamientos Verticales para el Modelo 5.3 [escala en $\text{mm} \cdot 10^2$].

La figura 8.16 muestra el mapa de desplazamientos verticales para el modelo 5.3. Los resultados se ajustan en forma aceptable a lo obtenido en forma experimental tal cual se viera en la tabla 8.6 apreciando que es mayor la cantidad de casos con ajuste admisible. El resultado muestra un acortamiento vertical global del modelo, por lo tanto se recomienda su uso en el estudio de casos dentro del campo elástico. Los resultados por encima de los valores máximos medidos en ensayos de laboratorio no presentan un ajuste adecuado.

Con respecto las tensiones tangenciales mostradas en la figura 8.17 son valores bajos y acordes al contexto de aplicación de la carga. Luego en la figura 8.18 se muestran tensiones normales verticales del orden de 1 Mpa. Se aprecia que los valores son consecuencia de un efecto de compresión vertical constante aceptable para evaluar niveles de esfuerzo a un costo computacional económico (el tiempo de análisis promedio fue de 8 segundos).

El tamaño de malla es del orden de 8 mm en ambas direcciones en valor medio aproximado. Se asume que la irregularidad observada se debe a un ajuste con el resultado de tensiones tangenciales según se ve en la figura 8.18. Este criterio es adoptado por el software.

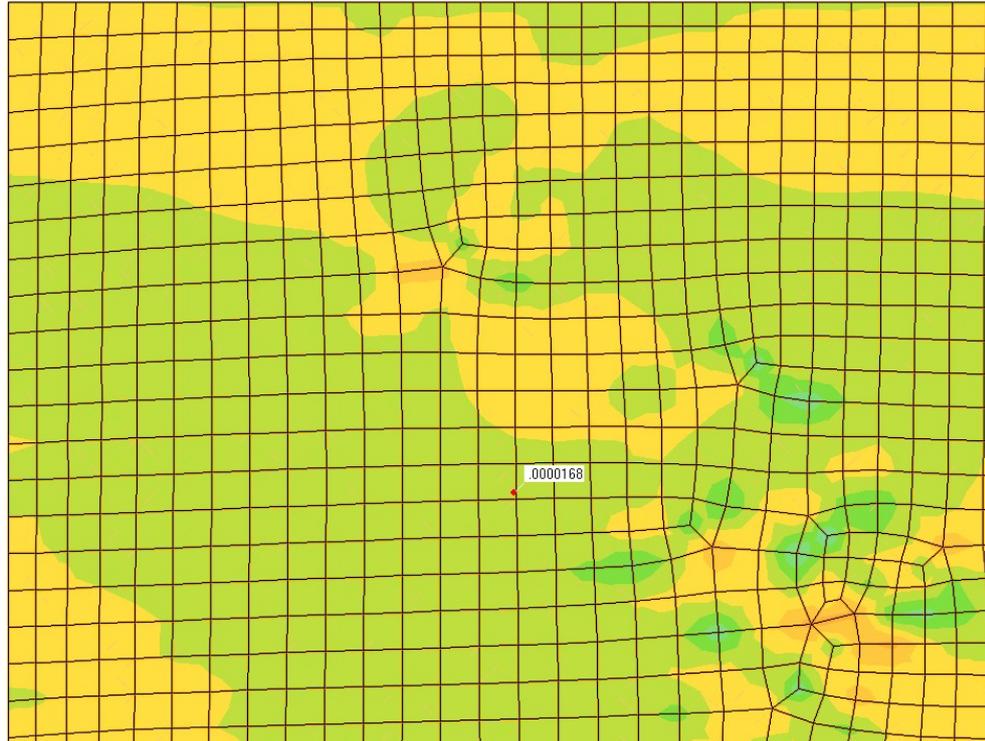


Figura 8.17. Esfuerzos Tangenciales en [Escala en $\text{Mpa} \cdot 10^6$] en el Modelo 5.3.

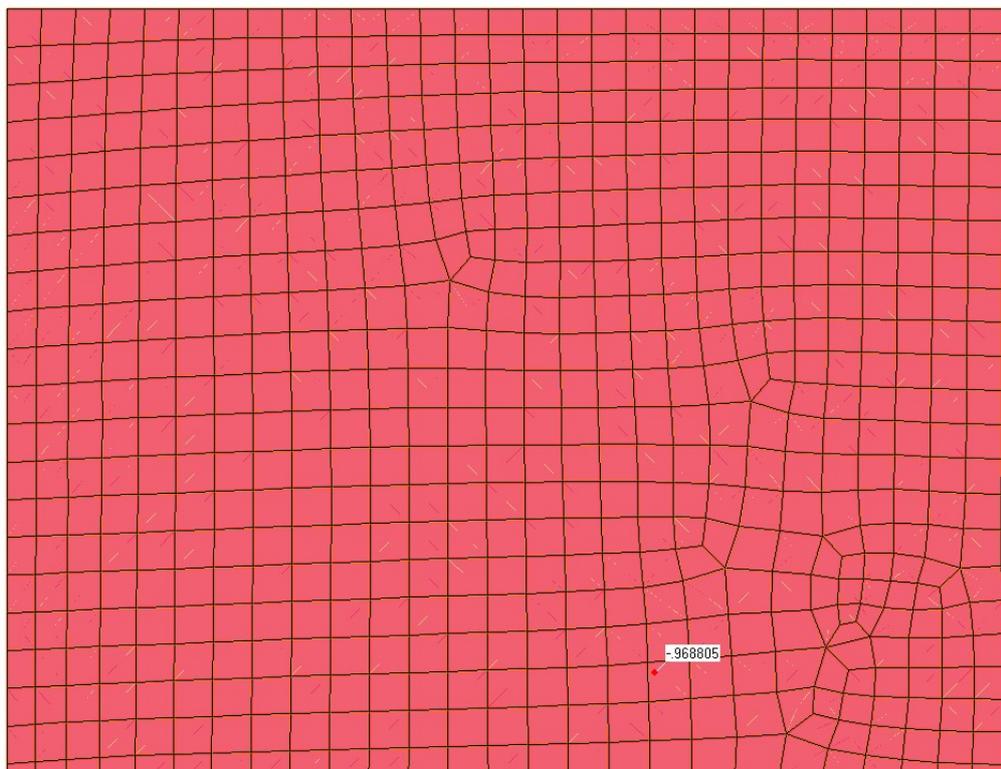


Figura 8.18. Esfuerzos Normales en [escala en $\text{Mpa} \cdot 10^3$] en el Modelo 5.3.

La malla adoptada fue configurada mediante elementos lineales de 4 nodos (funciones de interpolación lineal) adaptados en forma libre, logrando de esta manera menor costo computacional y tiempo de análisis adecuado.

Modelo 5.4: Ladrillo LCH 3D equivalente de material isotrópico experimental analizado por XFEM.

El modelo 5.4 reproduce el ensayo de laboratorio efectuado sobre ladrillos LCH de geometría nominal obtenida en el proceso de caracterización mencionado en el capítulo 5.

Se analiza aquí un modelo de material isotrópico experimental basado en los parámetros obtenidos en laboratorio y presentados en el capítulo 4 de esta Tesis. Se compone de elementos sólidos de material configurado con los resultados presentados en el capítulo 4 en términos de las propiedades obtenidas para el material cerámico componente. La tabla 8.9 resume los parámetros utilizados para configurar el modelo.

Material	Tensión de falla [MPa]	E [MPa]	G [MPa]	Gf. [N/m]	μ	fc [MPa]	ft [MPa]	tadh [MPa]	Gf [N/m]
LCH1	2.23	1085.00	213.67	1302	0.19	6.76	2.23	0.05	1302.00

Tabla 8.9. Parámetros adoptados en el Modelo 5.4.

Con respecto a la geometría de malla, el ladrillo se elaboró con elementos C3D8RH según se explica en otros modelos hexaédricos más adelante descriptos. El tamaño de la malla (7 mm) se ajustó con el criterio de balancear el tiempo de análisis y la precisión de los resultados de acuerdo con los criterios usuales para problemas numéricos de estas características.

El análisis del sistema matricial resultante se ejecutó aplicando el método de Newton Raphson en forma completa (full analysis) para un total de 12177 elementos y 65850 nodos y 148842 variables analizadas (descontando las condiciones de borde) registrando un valor en el tiempo de análisis de 500 seg.

La figura 8.19 muestra la geometría adoptada para el modelo, la cual responde al prototipo en estudio y consiste en un micro modelo de un ladrillo LCH de dimensiones nominales de fábrica. En su parte superior esta aplicado un desplazamiento de 5 mm.

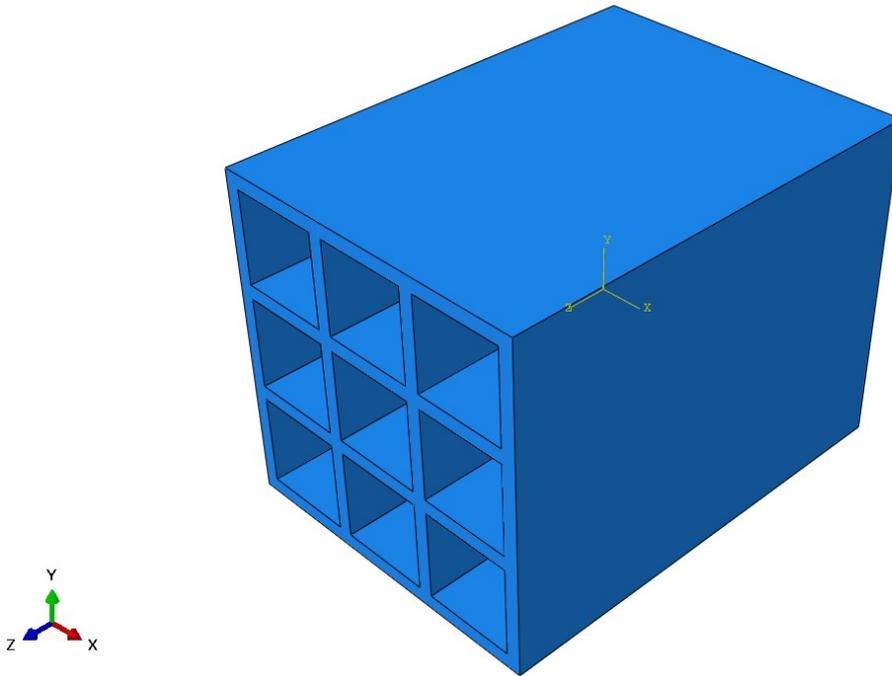


Figura 8.19 Modelo 5.4: Ladrillo isotrópico LCH 18 18 25 analizado por XFEM.

Este desplazamiento se desarrolló en 174 pasos (Step) durante el análisis del problema y mostró los resultados que se observan a continuación en la figura 8.20, donde se puede apreciar que para este caso la trayectoria de la fisura es consistente con los resultados de laboratorio en forma aceptable (pueden obtenerse mejores resultados aumentando la cantidad y calidad de los parámetros mecánicos utilizados).

La fisuración inicia en el paso 26 (de 174), en la parte superior y una falla en la parte inferior. Aparte del paso 27 la fisura superior comenzó a propagarse en forma longitudinal mientras que en la parte inferior se supone que cruzó en diagonal y se detuvo. En el paso la parte superior está completamente fisurada y ocurre un intervalo en donde no sucede nada. Luego ocurre un asentamiento, acompañado de una propagación de la fisura inferior y en la parte superior se produce un nuevo agrietamiento. Esta vez la trayectoria es curva y afectada el área central superior del ladrillo. Al final se contabilizan 4 zonas de falla, de las cuales dos sucedieron en la parte inferior y dos en la parte central superior.

En otras pruebas realizadas como la observada en la figura 8.21, se distinguieron zonas de falla diferentes, aunque coincidiendo en la mayoría de los casos en la parte superior del ladrillo. En esta figura se presenta el desarrollo de la función PHILSM, la cual forma parte de los términos de enriquecimiento que se suman a la expresión convencional (FEM) de las conocidas funciones de forma del modelo (dichas funciones forman parte de planteo analítico del método de elementos finitos).

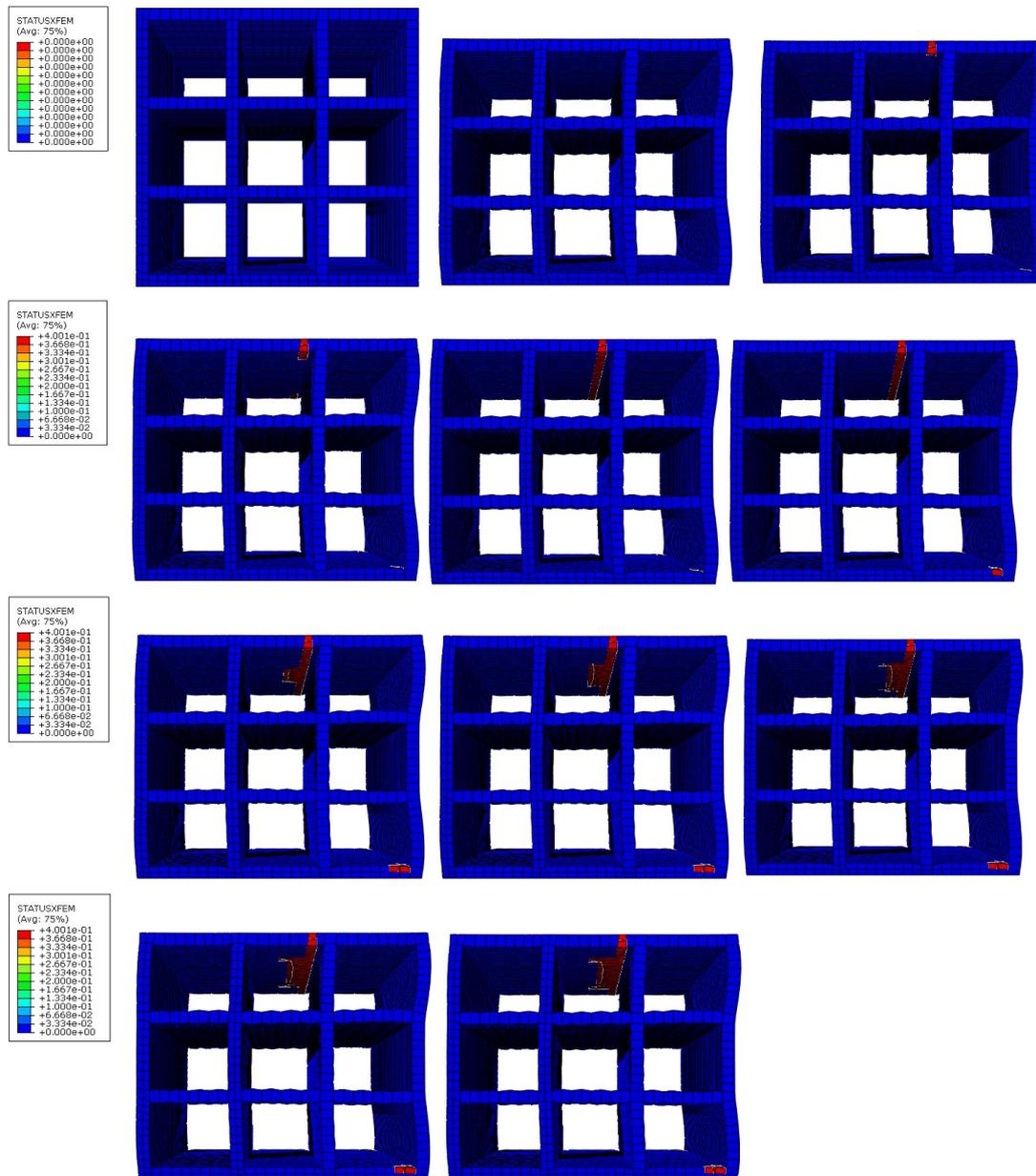


Figura 8.20 Modelo 5.4: proceso (simulado) de origen y propagación de fallas en un ladrillo LCH.

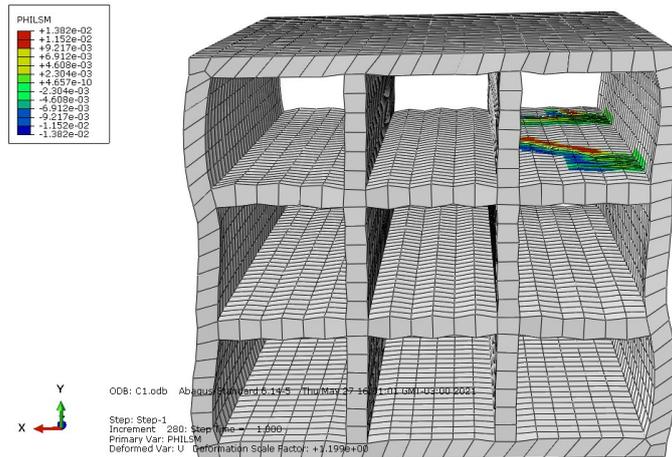


Figura 8.21 Modelo 5.4: Función PHILSM.

Los resultados en términos de las tensiones principales generadas en el modelo al instante de la primera falla se muestran en la figura 8.22 donde se puede observar que los valores de tensión superan los parámetros de resistencia utilizados para configurar el material. A pesar de ello hay zonas en donde ocurren estados de tensión muy superior y es un punto a tener en cuenta a futuro para lograr una mejora en la calidad de los datos arrojados por el mismo.

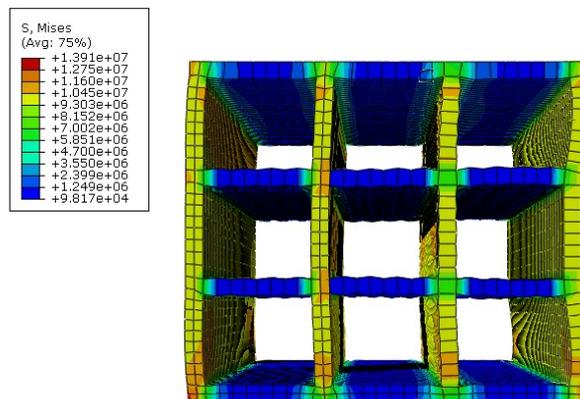


Figura 8.22 Modelo 5.4: Tensión de Von mises para el instante de la primer falla.

De los modelos numéricos presentados el más versátil es el modelo 5.4, además de ser el más prometedor por la posibilidad de estudiar la propagación de fallas, como así también al contar cuantificar la inclinación de las mismas y poder obtener datos en términos de los factores de intensidad de tensiones en sus diferentes modos (KI, KII y KIII).

Parámetros generales en celdas de Mampostería.

Para esta etapa se confecciono en base al modelo anterior (modelo 5.3) un elemento de área de dimensiones equivalentes a las celdas ensayadas en laboratorio a rotura por compresión sin excentricidad.

Los recaudos que se tomaron en esta etapa fueron referentes a la configuración de los parámetros mecánicos del material el cual debió contemplar la presencia del material de junta de bajo modulo elástico que empíricamente generó zonas de debilidad en la unión entre mampuestos con la contraparte de mejorar el arrostramiento lateral dado el excedente de mezcla que se depositó en los orificios de los ladrillos componente s estas celdas.

Con respecto a la geometría el tamaño del Área utilizado fue según dimensiones globales de la celda las cuales se presentan en la tabla 8.10 a continuación.

Celda Nº	L ₁ [mm]	L ₂ [mm]	h [mm]
Promedio	173.63	374.68	359.13
Desvío	1.21	2.93	0.98
C.V. %	0.697%	0.782%	0.274%
Sesgo	-1.42	-0.05	0.80
Curtosis	2.46	-5.72	-1.48

L₁: Ancho global de Celda.

L₂: Longitud global de Celda.

h: Altura global de Celda.

Tabla 8.10. Geometría de Celdas experimentales de Mampostería- Parámetros Estadísticos.

Los valores de módulo de elasticidad longitudinal están en el orden de los 2000 Mpa. No se consideró la resistencia tangencial en las juntas verticales por no asumirla incidente en la dirección de análisis del presente trabajo

Respecto a los estados tensionales observados en el capítulo 6 que fueron compatibles con los fenómenos observados en laboratorio mostrando concentración de tensiones de

compresión en una zona coincidente con la zona afectada por una falla y consecuente rotura de la probeta posteriormente.

Carga máx. [N]	Esfuerzo máximo a Compresión [Mpa]	Deformación específica máxima [Mpa]	Acortamiento experimental [mm]	Acortamiento Simulado [mm]	Dif Abs. [%]	
34847.89	5.02	0.0019	1.1990	1.3200	10.09%	
36314.20	4.80	0.0029	1.0272	1.3567	32.07%	
32125.28	4.27	0.0036	1.2891	1.2524	2.85%	
27514.25	1.84	0.0026	1.2185	1.1376	6.64%	
43379.05	5.28	0.0041	1.4847	1.5325	3.22%	
37914.42	4.99	0.0105	1.0730	1.3965	30.15%	
35806.65	4.75	0.0014	1.5013	1.3900	7.41%	
39073.45	5.45	0.0045	1.7104	1.4254	16.66%	
42797.06	5.66	0.0043	1.5472	1.5128	2.22%	
36014.51	4.78	0.0041	1.4763	1.3492	8.61%	
20612.70	2.72	0.0049	0.9537	0.9656	1.24%	
20258.42	2.68	0.0018	0.7455	0.9457	26.85%	
35713.94	4.75	0.0040	1.4381	1.3417	6.70%	
Promedio	35078.79	4.52	0.0039	1.3069	1.3280	
Desvío	8024.48	1.25	0.0022	0.2821	0.2017	
C.V. %	22.88%	27.65%	56.25%	21.59%	15.19%	

Tabla 8.11. Comparativa de Resultados experimentales y simulados en Celdas de Mampostería.

La tabla 8.11 muestra una comparativa entre resultados experimentales y sus homónimos simulados por MEF. La diferencia porcentual promedio quedo acotada alrededor del orden del 2% lo cual acerca la posibilidad de elaborar una aplicación que evalúe desplazamiento con aceptable proximidad y a un costo computacional accesible.

La figura 8.23 muestra el desplazamiento vertical obtenido en el modelo 6.1, en el cual se optó por mostrar la placa deformada para apreciar la deformación transversal causada por el acortamiento vertical, producto de la aplicación de la carga externa. El modelo se acorta en dirección vertical provocando un alargamiento en dirección horizontal. Los valores

registrados se ajustan a los valores de relación entre deformaciones longitudinal y transversal, lo cual confirma que el modelo es útil para ser utilizado en análisis elástico lineal.

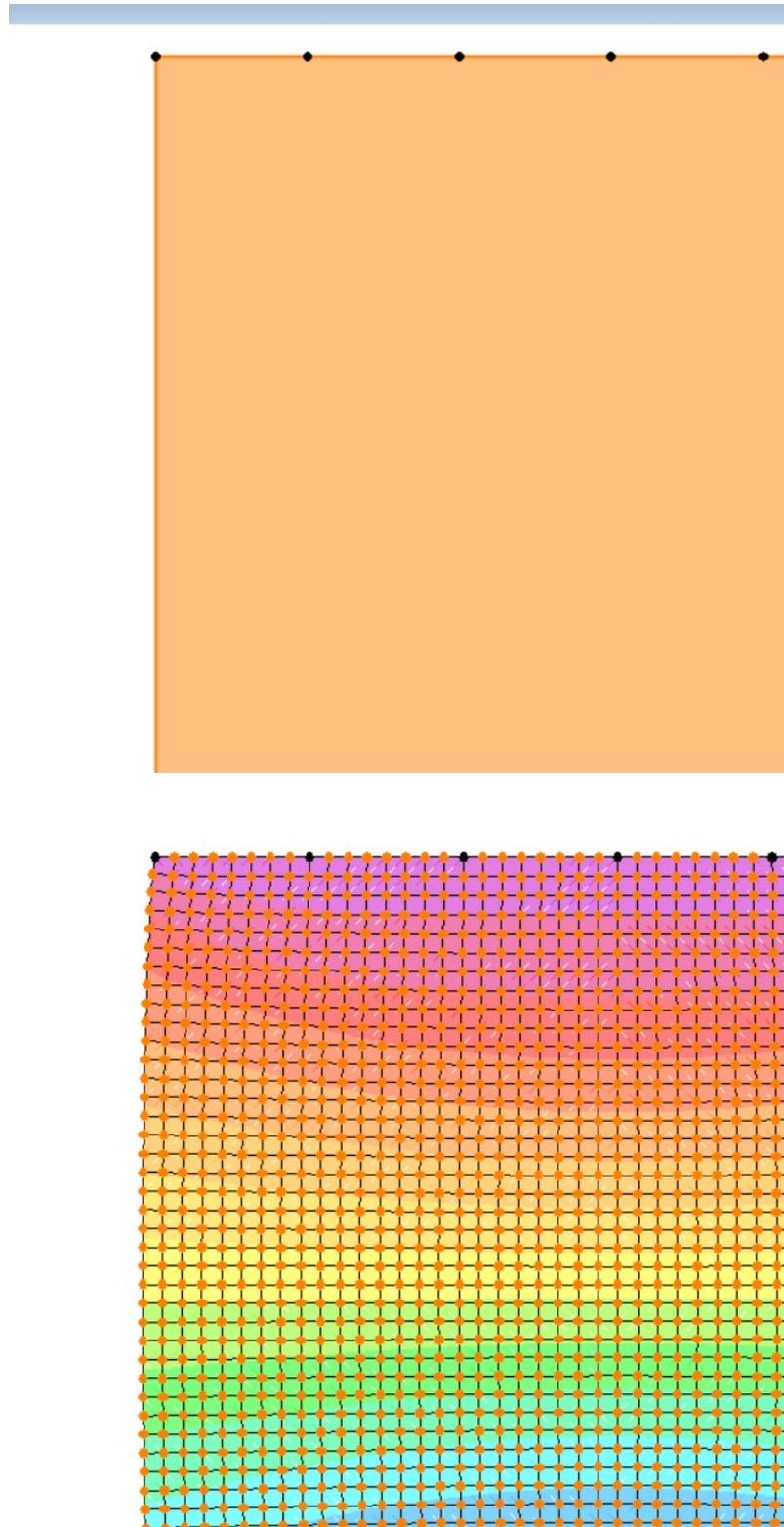


Figura 8.23. Cedas: Desplazamientos Verticales para el Modelo 6.1 [escala en $\text{mm} \cdot 10^3$].

La figura 8.24 muestra una gráfica de Fuerza vs. Desplazamiento en la que se observa la correlación entre resultados experimentales y desplazamientos simulados por MEF. La tendencia lineal de los resultados simulados por MEF no contempló la situación de agrietamiento que se observó en laboratorio puesto que no están incluidas en esta rutina las funciones level set y Heavyside para lograr esto. Estas funciones permiten según lo apreciado en el capítulo 2 representar en forma numérica agrietamiento en un elemento finito así como inicio de grieta en dichos elementos.

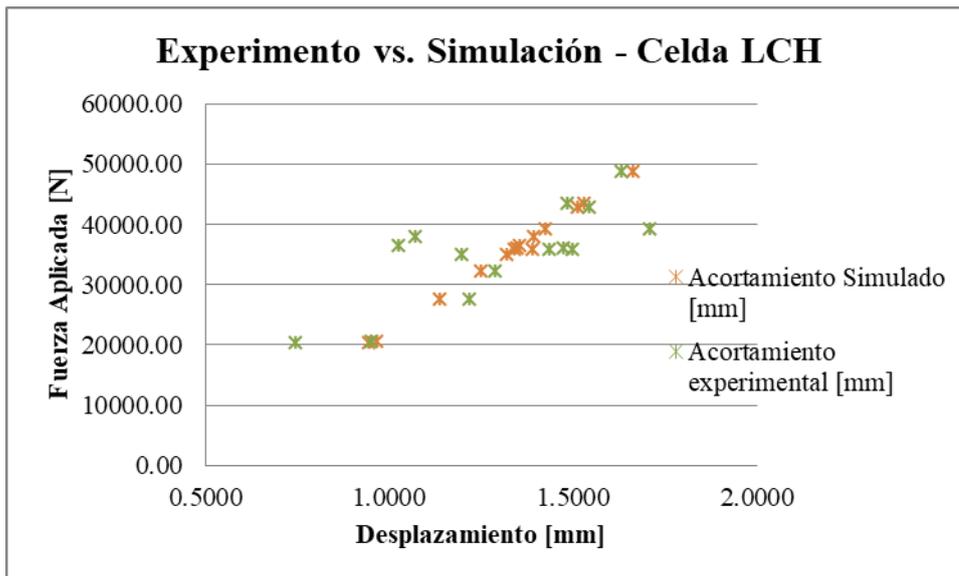


Figura 8.24. Comparación de resultados experimentales y datos numéricos simulados para ensayo LCH en modelo 6.1.

Modelo 6.2: celda 3D equivalente de material ortotrópico experimental analizada por XFEM.

Se elaboró un modelo de material ortotrópico equivalente con parámetros experimentales mencionados en el presente trabajo a efectos de verificar las situaciones de falla observada en los ensayos de laboratorio. El método de análisis se basó en aplicar un desplazamiento controlado en la parte superior del prototipo mientras que en la base se asignaron condiciones de restricción de desplazamiento vertical y lateral en ambas direcciones. Para lograr un balance adecuado en el tiempo de análisis se efectuaron pruebas con diferentes tamaños de malla a igual desplazamiento controlado como se muestra en la tabla 8.12.

Interacción estructural de cuerpos edificados en misiones, argentina.

prueba N°	Tamaño de malla [mm]	Despl. [mm]	Tiempo de análisis [seg]	falla (XFEM status)	Tension de Von Mises [Mpa]	S22 [Mpa]	ϵ princ. [mm/mm]	ϵ_{22} [mm/mm]
1	10	3	150	si	4.8	4.1	0.0033	0.01268
2	9	3	198	si	4.7	4.35	0.00025	0.00025
3	8	3	231	si	4.6	4.52	0.0004	0.00037
4	7	3	1112	si	4.85	4.45	0.0038	0.0142
5	6	3	no finalizado		-	-	-	-

Tabla 8.12. Tiempo de análisis vs. Tamaño de malla en Celdas de Mampostería.

Luego de definir como tamaño de malla el valor más cercano al espesor de pared de los ladrillos LCH se procedió a realizar pruebas que arrojaron los resultados de la tabla 8.13 en donde se observa que la falla en el modelo se ajusta a valores observados en los ensayos de laboratorio de manera aceptable.

prueba N°	Despl. [mm]	Tiempo de análisis [seg]	Tension de Von Mises [Mpa]	S22 [Mpa]	ϵ princ. [mm/mm]	ϵ_{22} [mm/mm]	falla (XFEM status)
1	3	242	4.84	4.5	0.00346	0.0138	si
2	2	225	3.4	2.67	0.0025	0.0077	no
3	2.5	301	4.03	3.93	0.0031	0.0115	si
4	2.1	199	3.6	3.15	0.0026	0.0096	no
5	2.2	190	3.9	3.3	0.00265	0.01015	no
6	2.3	191	4	3.6	0.00293	0.0106	si
7	2.4	344	4.1	3.7	0.00305	0.0111	si
8	2.6	390	4.2	3.8	0.0034	0.012	si
9	2.7	308	4.4	4	0.0036	0.013	si
10	2.8	324	4.5	4.2	0.0038	0.014	si
11	2.9	329	4.6	4.3	0.00395	0.0145	si

Tabla 8.13. Resultados numéricos (modelo 6.2-XFEM) en Celdas de Mampostería.

En términos de predecir la trayectoria de la fisura el modelo debe ser revisado y se deben agregar parámetros que permitan un nivel de predicción más acertado, sin embargo a efectos de permitir la elaboración de una superficie de respuesta se asumen cumplidas las expectativas. La figura 8.25 muestra resultados visuales obtenidos del modelo XFEM en el instante en que se produce la falla.

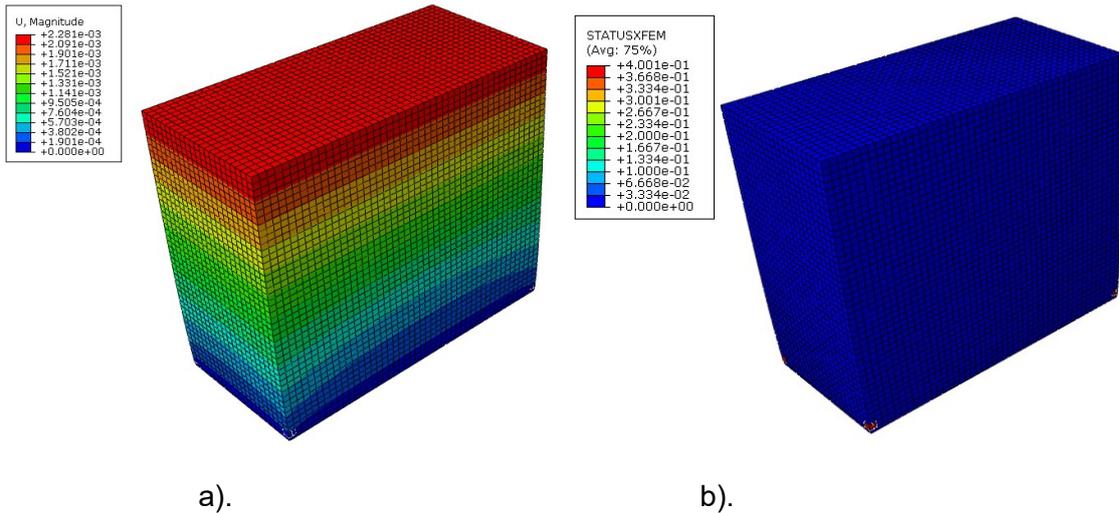


Figura 8.25. Resultados numéricos en modelo 6.2. : a) Desplazamiento máximo. b) ubicación de la zona de falla.

En esta figura se observa que el máximo acortamiento supera los 2 mm produciendo fallas en la base del modelo, hecho que no coincide exactamente con lo ocurrido en los ensayos de laboratorio. De todas maneras en la figura 8.26 se puede observar que los valores de tensión de von mises y deformación máxima son acordes a los resultados de laboratorio.

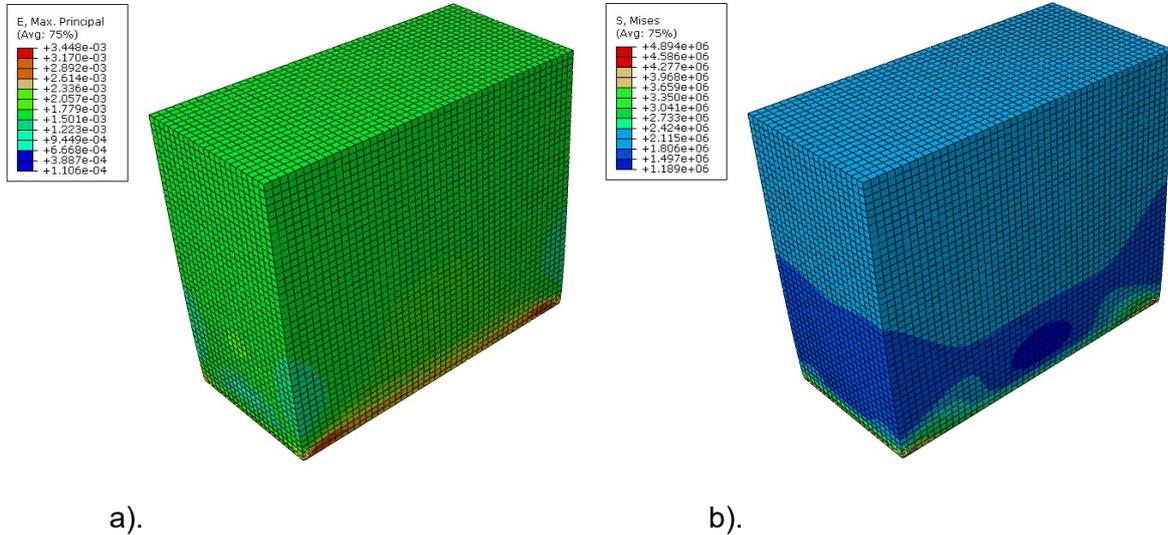


Figura 8.26. Resultados numéricos en modelo 6.2. : a) Tensión de Von Mises. b) máxima deformación al instante de la falla.

Ante lo expuesto se concluye que a pesar de requerir un tratamiento ampliado a efectos de poder predecir la posición y trayectoria de la propagación de grieta, el modelo funciona razonablemente para efectuar la elaboración de comparaciones del comportamiento compuesto con otros criterios de modelos homogeneizados tomando esto como parte de los trabajos futuros de la presente Tesis Doctoral.

Parámetros generales en paneles.

Los parámetros mecánicos obtenidos y calculados en los capítulos anteriores fueron utilizados para formular un modelo numérico que represente el comportamiento estructural en dos situaciones límites características de lo ocurrido para el caso de mamposterías ejecutadas como elementos verticales de 1140 mm de largo por 2280 mm de alto.

Se pretende completar la presentación de los resultados numéricos en paneles y la formulación de dos funciones límite evaluadas en los ensayos realizados sobre paneles de mampostería: el primero refiere a la curvatura transversal límite (j_1) para un muro cargado en forma excéntrica mientras que el segundo refiere a la curvatura longitudinal (j_2) límite que se admite por efecto de asentamientos diferenciales.

El problema estructural tuvo varias etapas de verificación de parámetros desplazamientos que fueron medidos en laboratorio en su mayoría en experiencias realizadas bajo criterios de Normas IRAM 12586, IRAM 12587, IRAM12590 entre otras.

Modelo 7.1: modelo numérico para Ensayo CEBR basado en XFEM.

La figura 8.27 muestra el esquema planteado para el modelo que pretende analizar la curvatura transversal por aplicación de carga excéntrica en la parte superior del panel. En la misma se asume como hipótesis que la aplicación de la carga no excede el perímetro concerniente a la zona que genera esfuerzos de compresión (núcleo central).

Al ser sometida a una carga excéntrica ubicada dentro del núcleo central se busca estudiar efectos de compresión sobre el muro.

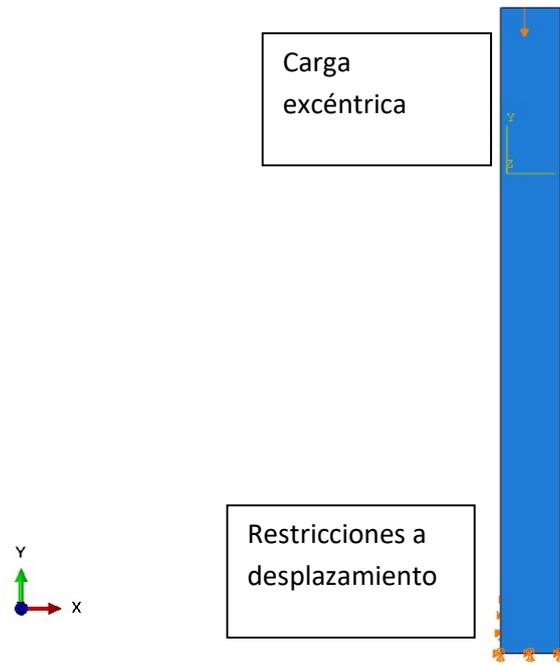


Figura 8.27. Modelo 7.1: Panel equivalente ortotrópico con enriquecimiento de nodos (XFEM).

En este problema el modelo se configuró sobre los siguientes criterios: geometría basada en las dimensiones de los prototipos ensayados en laboratorio, material elástico no lineal cuyos parámetros fueron basados en resultados experimentales (modulo E, resistencia a compresión, resistencia a tracción, criterios de daño medidos en ensayos) la tabla 8.14 muestra los parámetros asignados al material.

Material	tipo	densidad [N/m ³]	Módulo E [MPa]	Módulo G [MPa]	μ	fc [MPa]	ft [MPa]	tadh [MPa]	Gf [N/m]
CEL-1	isotrópico	10000.0	9841.05	4134.90	0.19	4.66	2.23	0.05	1302.00

Tabla 8.14. Parámetros materiales asignados al modelo 7.1.

Se adoptó como valor de resistencia a compresión el obtenido en ensayos del capítulo 6 (tabla 6.2), a efectos de considerar el modelo compuesto. Para la resistencia a tracción se adoptó el valor obtenido en el capítulo 4 (tabla 4.6). Para considerar la interface entre mortero y ladrillo se consideró el valor obtenido para ensayos de adherencia (tabla 5.9).

El modelo se analizó aplicando un valor de desplazamiento controlado en la cima del elemento geométrico preservando la ubicación establecida en el experimento (carga excéntrica en el límite del núcleo central). Con respecto a las condiciones de borde del modelo: en la cima se restringieron los desplazamientos laterales de acuerdo a lo efectuado

en laboratorio (fig. 7.3), mientras que en la base se restringieron los desplazamiento laterales y el desplazamiento vertical, sin efectuar restricciones a las rotaciones de la base, tal como se ensayó la probeta (Fig. 7.1).

El criterio adoptado para definir el daño fue el de máximo esfuerzo Principal asignando el valor de energía de fractura obtenido en laboratorio (tabla 4.6), luego la curva de ablandamiento se adoptó lineal, coincidente con los ensayos del capítulo 4. El tamaño de malla seleccionado para este caso fue de 3.46 cm en un elemento C3D8RH (elemento tridimensional de 8 nodos, híbrido, presión constante, integración reducida, control de reloj de arena. Análisis del sistema de ecuaciones resultante se realizó por método de newton Raphson. El tiempo de análisis para cada prueba del modelo se detalla a continuación en la tabla 8.15.

prueba N°	Desp. Controlado [mm]	tiempo de análisis [seg]	Tension de Von Mises [Mpa]	Tension de Falla	ϵ princ. [mm/mme.10 ³]	falla (XFEM status)
1	5	203	4	2.45	0.000214	si
2	4	220	4.08	2.74	0.000266	si
3	3	97	4.1	2.31	0.00026	si
4	2	47	3.9	2.31	0.000264	si
5	1	29	3.8	2.25	0.000259	si

Tabla 8.15. Resultados de pruebas en el modelo 7.1 para diferentes hipótesis de desplazamiento en la cima.

En la figura 8.28 se muestran los resultados visuales del modelo 7.1, en donde se pueden apreciar valores de desplazamiento el zona de propagación de fisura.

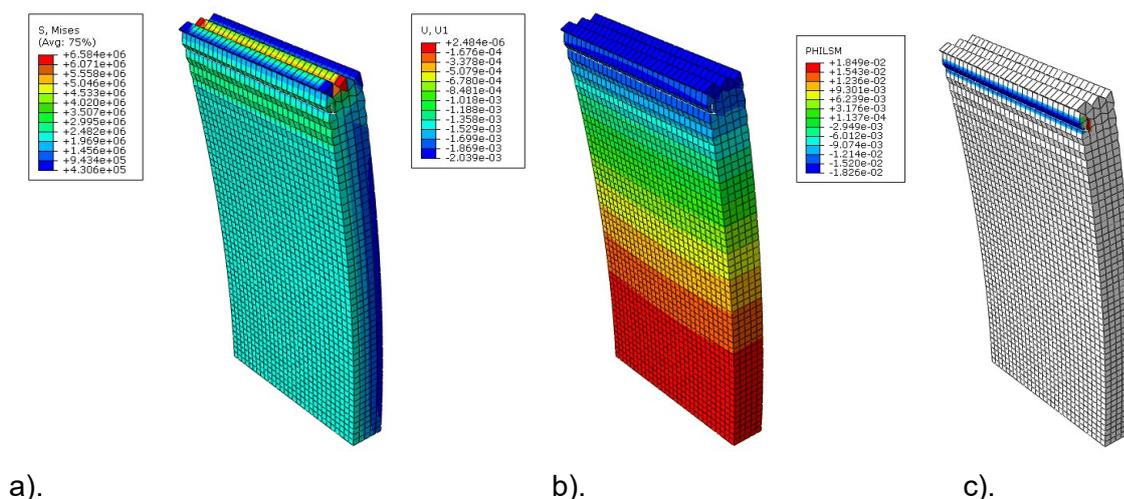


Figura 8.28. Modelo 7.1: a). Tensión equivalente (Von Mises), b). Desplazamiento horizontal en la cima, c) zona de propagación de grieta. (XFEM).

Modelo 7.2: Ensayo CCBF y procedimiento numérico.

La figura 8.28 brinda una representación del segundo modo de falla estudiado: curvatura longitudinal por asentamiento diferencial la cual se asocia al caso de contar con niveles de densidad diferentes en el terreno de emplazamiento de la vivienda lo que posiblemente dé lugar a la aparición de patrones de agrietamiento en los muros afectados.

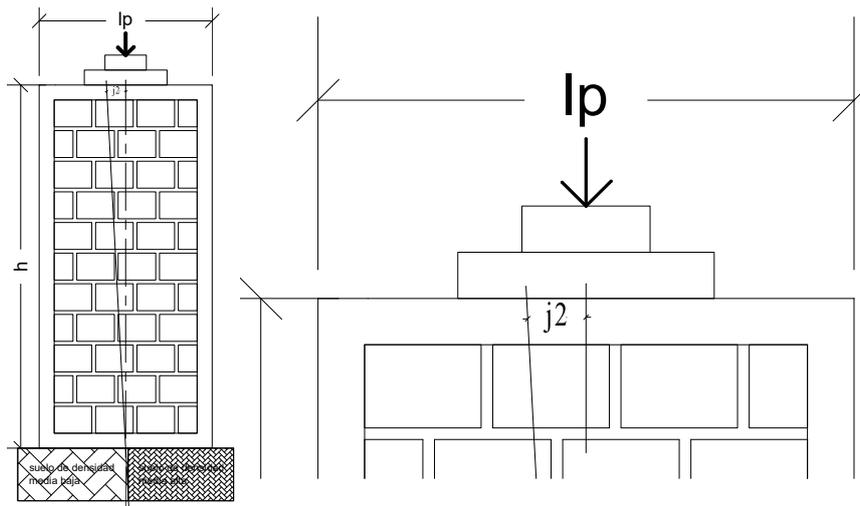


Figura 8.29. Modos de falla CCBF: Curvatura Longitudinal por asentamiento diferencial.

Pensando en evaluar el problema desde un enfoque probabilístico es inalcanzable realizar una cantidad de ensayos destructivos para generar los resultados suficientes a efectos de elaborar una superficie de respuesta de los modos de fallas propuestos. Por ello se propuso como opción elaborar modelos numéricos del problema estructural definido que permitan obtener una cantidad considerable de datos que den la base de información adecuada para optimizar el sistema estructural desde un enfoque de confiabilidad estructural y probabilidad de falla.

La metodología adoptada para implementar rutinas de simulación numérica para replicar el comportamiento mecánico de estos sistemas considerando su resistencia estructural se basa en el método de los elementos finitos el cual fue descrito en el capítulo 2 de la presente tesis doctoral.

La figura 8.30 muestra una descripción del modelo MEF adoptado para el presente problema. La rigidez de los resortes lineales dispuesto en la parte inferior del panel siguen el

criterio expuesto en el capítulo 7 en donde se expuso que los métodos de compactación aplicados a cada sector de la cama de suelo fueron diferentes a efectos de inducir un asentamiento diferencial.

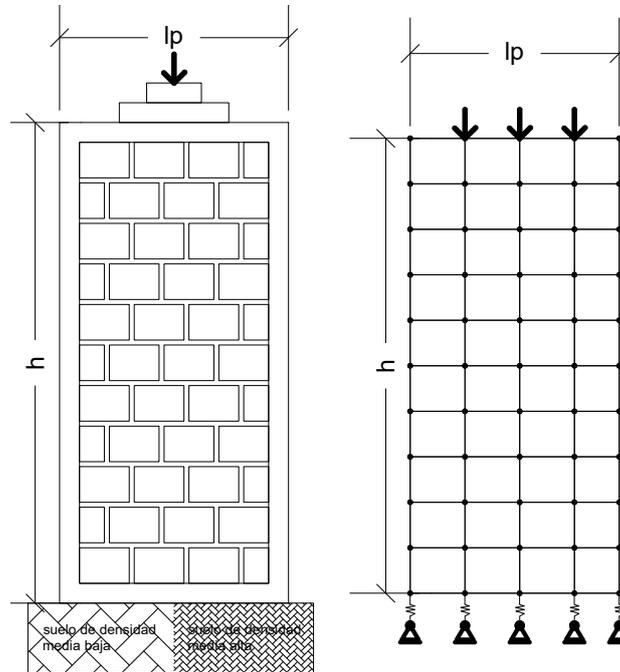


Figura 8.30. Esquema conceptual de formulación de un modelo EF para ensayos de paneles.

La figura 8.31 muestra la organización de los nodos para cada elemento y la secuencia de numeración de los mismos atendiendo a reducir el ancho de banda de la matriz de rigidez ensamblada del modelo numérico. Se adopta para el elemento de 4 nodos cuadrilátero como origen de las coordenadas locales el centro del elemento. La secuencia de numeración de los nodos del modelo sigue el mismo criterio de la secuencia adoptada para los elementos cuadriláteros.

Las funciones de forma se obtuvieron aplicando el metodo de interpolación de Lagrange considerando variación lineal entre nodos (no tiene puntos intermedios) así como la convención de signos estipuladas por considerar el origen de las coordenadas locales en el centro del elemento.

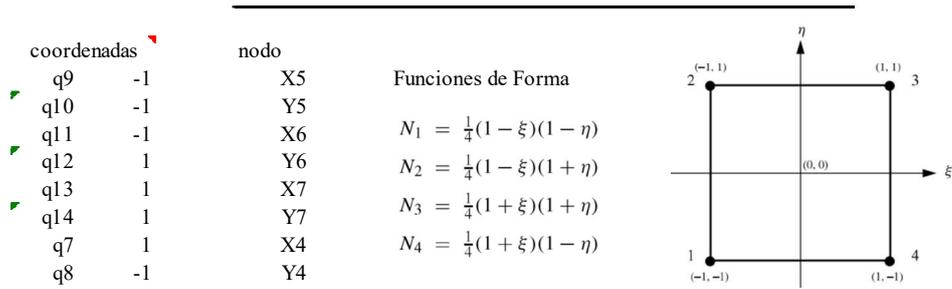


Figura 8.31. Esquema conceptual de formulación de un modelo EF para ensayos de paneles.

	q9	q10	q11	q12	q13	q14	q7	q8	
Ke =	2054.8278	1548.5707	-704.8088	1211.0659	-2054.828	-1548.571	704.80881	-1211.066	q9
	2299.6971	5011.0262	-459.9394	-2251.39	-2299.697	-5011.026	459.93943	2251.3896	q10
	-704.8088	-1211.066	2054.8278	-1548.571	704.80881	1211.0659	-2054.828	1548.5707	q11
	459.93943	-2251.39	-2299.697	5011.0262	-459.9394	2251.3896	2299.6971	-5011.026	q12
	-2054.828	-1548.571	704.80881	-1211.066	2054.8278	1548.5707	-704.8088	1211.0659	q13
	-2299.697	-5011.026	459.93943	2251.3896	2299.6971	5011.0262	-459.9394	-2251.39	q14
	704.80881	1211.0659	-2054.828	1548.5707	-704.8088	-1211.066	2054.8278	-1548.571	q7
	-459.9394	2251.3896	2299.6971	-5011.026	459.93943	-2251.39	-2299.697	5011.0262	q8

Figura 8.32. Matriz de Rigidez elemental para Modelo LCHEQ3 correspondiente a ensayo CCBF [N/mm].

Las unidades utilizadas para confeccionar la matriz de rigidez elemental fueron de Fuerza en Newton [N] y de longitud en milímetros [mm] (Fig. 8.32). Luego se ensambla en la matriz de rigidez global que para el caso analizado cuenta con 110 grados de libertad y se muestra en la figura 8.33 a continuación.

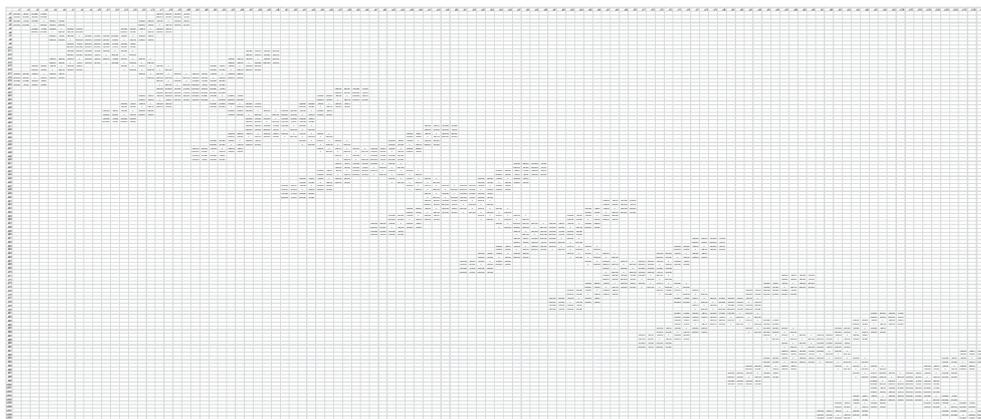


Figura 8.33. Matriz de Rigidez Global ensamblada del modelo LCHEQ3.

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el modelo LCHEQ3 donde se contrastan con los obtenidos en laboratorio en el ensayo CCBF. La tabla 8.33 corresponde a esta comparación de resultados y se puede observar que la diferencia media entre los mismos es aceptable si bien cabe aclarar que influye en esta cuestiones de la forma de adquirir los datos como también la aproximación establecida para calcular los desplazamientos verticales en función de las lecturas registradas en los comparadores horizontales colocados en el ensayo mencionado.

Panel	fuerza aplicada en el Panel [KN]	ΔL experimental [mm]	ΔL simulado [mm]	diferencia %
3 7	20.30	-0.28383	-0.25494	10%
3 7	24.95	-0.35411	-0.31270	12%
3 7	30.46	-0.38812	-0.38105	2%
3 7	34.84	-0.42141	-0.43551	3%
3 7	45.11	-0.55032	-0.56314	2%
4 C	15.36	-0.16959	-0.19348	12%
4 C	20.89	-0.23792	-0.26224	9%
4 C	25.74	-0.32240	-0.32240	0%
4 C	30.55	-0.39396	-0.38219	3%
4 C	35.44	-0.48599	-0.44296	9%

diferencia media	6%
------------------	----

CCBF: ensayo de carga centrada sobre base flexible

LCHEQ3: Modelo de elementos finitos de Area equivalente al panel

Tabla 8.16. Comparación de resultados: Modelo LCHEQ3 vs. Ensayo CCBF.

El signo negativo que presentan los resultados presentados en la tabla anterior corresponde a acortamientos globales medidos en el ámbito de acción de los comparadores utilizados en el ensayo CCBF como puede verse en el capítulo 7 en las figuras correspondientes.

Con respecto a la gráfica de la figura 8.34 se muestran los resultados de cargas en función de los desplazamientos experimentados en laboratorio comparados con los desplazamientos simulados para la misma franja de esfuerzos de compresión aplicados a los paneles analizados.

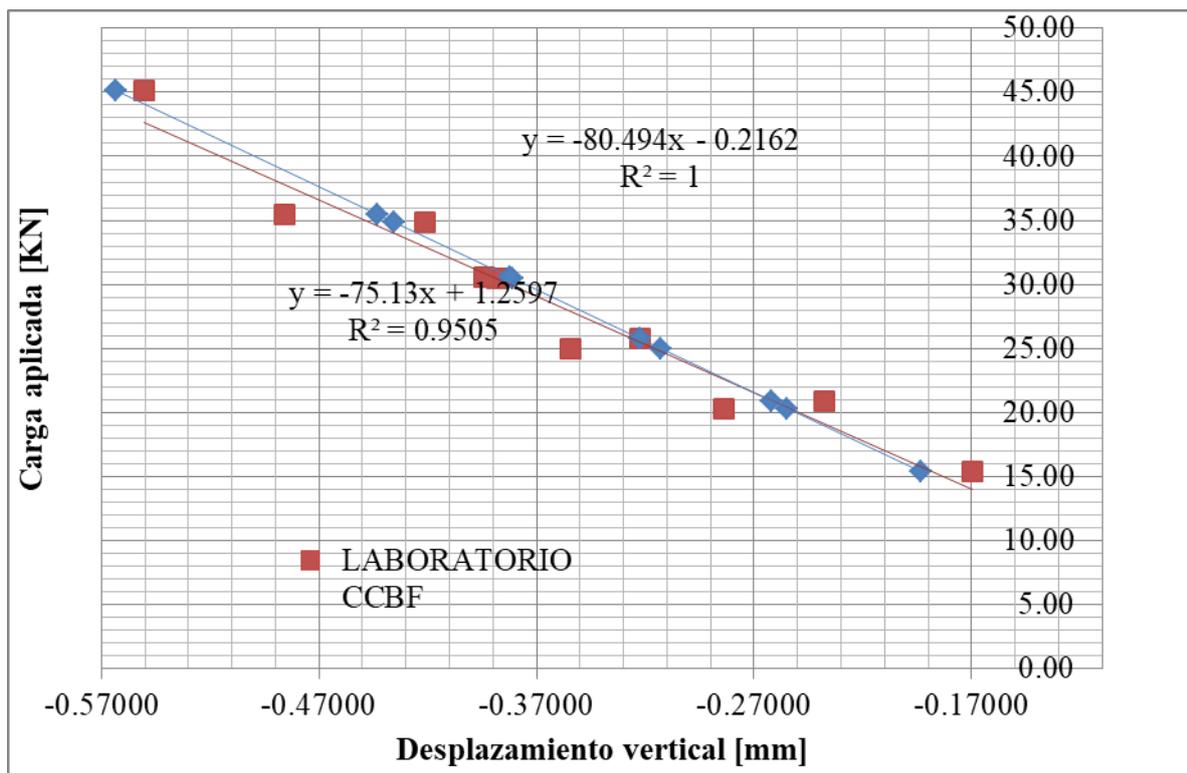


Figura 8.34. Gráficas de Modelo LCHEQ3 vs. Ensayo CCBF.

Como resultado de la observación se puede apreciar que la diferencia entre datos experimentales y simulados numéricamente es aceptable y las pendientes de carga/desplazamiento de ambas gráficas son similares con lo cual el modelo LCHEQ3 reproduce el comportamiento a compresión de manera aceptable.

Con estos y los resultados anteriormente comparados se cuenta con una serie de herramientas numéricas que pueden utilizarse para poder estudiar en detalle materiales de carácter frágil en régimen elástico (para estudios en el campo plásticos debe poder reproducirse la propagación de fisuras mediante XFEM o métodos similares). En el siguiente

capítulo se pretende analizar aplicaciones de los resultados obtenidos hasta aquí en el presente trabajo de tesis. Respecto de los criterios de modelización mostrados en el presente capítulo se ponen en consideración las siguientes conclusiones al respecto de los modelos numéricos implementados.

En términos generales se ha logrado comprobar un modelo numérico de estabilidad adecuada y costo computacional razonable para cada instancia de análisis en donde si bien las dispersiones analizadas en forma puntual fueron considerables, al promediar los resultados se obtiene un aproximación que sirve para concretar objetivos concernientes a aspectos de diseño de los sistemas constructivos.

Cabe destacar con respecto al modelo LCHEQ3 que al ser una aplicación en hoja de cálculo electrónica su implementación es inicialmente extensa y engorrosa aunque al estar el modelo numérico en funcionamiento los resultados son compatibles con los datos experimentales lo cual representa un avance en el campo de la simulación numérica aplicada a estos sistemas constructivos.

Con respecto al modelo numérico implementado para el ensayo CEBR se puede ver que los resultados son aceptables y próximos con un nivel de precisión adecuado a pesar de ser una ecuación diferencial enfocada en obtener valores de sección crítica de diseño. A futuro es adecuado pensar en que este tipo de efecto se modelen en códigos abiertos que incluyan el efecto de flexión que introduce la carga aplicada en forma excéntrica, siendo necesario para ello recurrir a códigos de programación que permitan ampliar los resultados manteniendo la calidad de los mismos.

Luego respecto de los modelos implementados en mampuesto aislados y en celdas de mampostería se puede afirmar que se logró aproximar de manera aceptable la respuesta experimental obtenida en ensayos de laboratorio. Esto ocurrió específicamente en los modelos equivalentes conformados mediante elementos de Área, lo cual implica un costo computacional conveniente a la hora de implementar su aplicación en la resolución de problemas de diseño de complejidad considerable. En general los resultados obtenidos hasta el presente capítulo permiten establecer bases para la siguiente etapa la cual consiste en poner en marcha aplicaciones numéricas con relaciones constitutivas que parten de la formulación de materiales configurados con base experimental obtenida en laboratorios del LIC. Estas aplicaciones son presentadas en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 9

APLICACIONES NUMERICAS AL DISEÑO DE MAMPOSTERÍAS.

El presente capítulo muestra una síntesis de los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis doctoral a efectos de proponer metodologías y algoritmos de uso de los parámetros concluidos como más incidentes en el comportamiento mecánico global en el campo elástico de las mamposterías de ladrillo LCH interactuando con elementos de hormigón armado que actúen como transmisores de carga del sistema resistente combinado.

Parámetros de diseño globales.

Según las pautas de simulación numérica que han resultado aceptables en forma separada para cada instancia del proceso de caracterización experimental de la presente tesis se buscó generar aplicaciones que permitan de cierta forma percibir en forma abstracta el fenómeno de la interacción entre mamposterías y hormigón armado para el caso de viviendas sociales en el ámbito de la provincia de Misiones y alrededores.

Se han probado modos diferentes de simular el uso de ladrillos LCH en distintas situaciones que involucran diferentes escalas de análisis, desde la cerámica componente de los mismos hasta su interacción en un panel confinado por refuerzos de hormigón armado.

De todos estos análisis se buscó una situación problemática que pudiera ser base de pruebas de estos modelos analizados tomando como referencia el análisis estructural convencional tradicionalmente utilizado en el diseño de sistemas resistentes aplicados a viviendas de mampostería.

La interacción entre mamposterías y hormigón como así también los efectos de la interface entre ladrillo y mortero son considerados en los resultados experimentales de esta tesis, dado que las mediciones de cargas y desplazamientos se efectuaron en el caso de las celdas y los paneles de forma global en la probetas ensayadas. El análisis en escala específica de lo que ocurre en dichas interfaces ha sido ampliamente estudiado por referentes de esta tesis, por lo tanto el presente trabajo se enfoca en la formulación de herramientas de diseño basada en datos experimentales con el objetivo de formular macro modelos de aplicación en procedimientos de diseño estructural.

Los parámetros adoptados para la simulación numérica fueron seleccionados tomando en cuenta los resultados obtenidos en laboratorio. A su vez quedaron planteadas líneas futuras de trabajo para completar cuestiones referentes a la interacción de manera generalizada entre las propiedades mecánicas en distintas direcciones como ser la formulación de coeficientes de interacción y compatibilidad de deformaciones que permitan aplicar en este material la idea generalizada de la Ley de Hooke, la propagación de fisuras luego de haber sobrepasado el límite de resistencia a tracción del material, entre otras posibles líneas de acción.

El origen de esta inquietud surge de lo captado en diferentes procesos de modelación numérica efectuados en el campo del análisis estructural, de los cuales se extrae un ejemplo sencillo para poder apreciar y efectuar las diferentes comparativas entre análisis estructural de estructura independiente, o de cuerpos edilicios acoplados con elementos estructurales tradicionales

Modelos numéricos utilizados.

En el análisis clásico surgen simplificaciones que permiten representar diferentes componentes de las construcciones en función de la magnitud de sus pesos, sin contemplar su actuar como medio continuo con posibilidad de transmitir cargas a través del espacio. Esta simplificación es usual en los algoritmos desarrollados para análisis plano de estructuras.

En este trabajo se propone una metodología a partir de modelos numéricos que permiten simular el comportamiento acoplado que experimenta la estructura resistente de hormigón armado, junto a los diafragmas que conforman el cerramiento en una construcción típica, dado que es de esperar que haya cambios en el tratamiento tradicional de solicitaciones, es decir, exista la posibilidad de aprovechar todos los elementos con la rigidez suficiente para transmitir cargas, dentro del esquema de diseño estructural de una determinada construcción.

Prototipo seleccionado para el análisis comparativo.

En la figura 9.1 se realiza una descripción gráfica del prototipo edilicio adoptado para el análisis del presente artículo, el mismo se compone de una vivienda mono-ambiente de dos plantas, la cual acusa una superficie de 24 m² en planta, y sus cerramientos son de ladrillo LCH confinado por elementos horizontales y verticales de Hormigón Armado.

El entrepiso de planta alta está diseñado en losa maciza en hormigón armado de espesor 0.12 m de espesor, apoyada en un sistema de vigas, columnas y zapatas del mismo material.

Respecto de las fundaciones se tienen dos elementos a considerar en el análisis estructural: por un lado las fundaciones aisladas que soportan las cargas provenientes de la planta alta, y por otro un sistema de vigas de encadenado inferior que arriostran las columnas y sirven de apoyo a los cerramientos de planta baja.

Los cerramientos de planta alta están apoyados en forma directa sobre las vigas del entrepiso. Finalmente la edificación tiene como cerramiento en su parte superior, techo de chapa de cinc apoyado sobre sistema de correas y cabios, previstos en perfil de chapa doblada en frío, sección "C" de dimensiones 120 mm x 50 mm con rigidizador de 15 mm, y espesor de 1.6 mm; de tipo simple para las correas y de tipo doble para los cabios.

Modelo Clásico de análisis Estructural

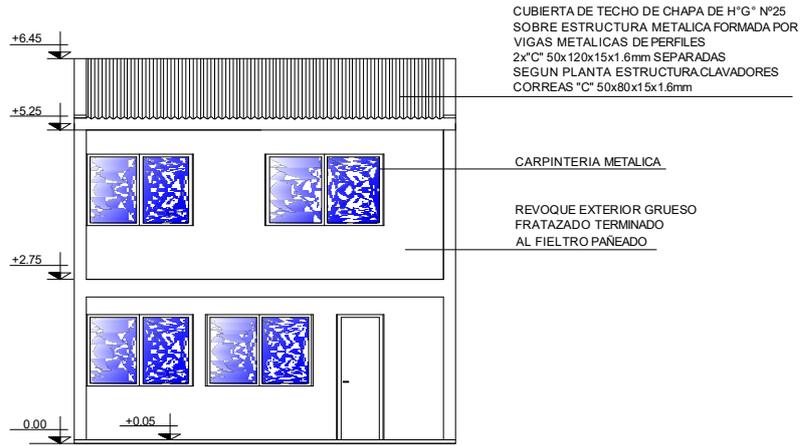
Los modelos planteados responden a las características que se han de detallar en cada caso, sin embargo, una simplificación común a ambos modelos es la de no considerar las paredes internas como se puede observar en la figura 9.2 en donde se aprecia que el modelo es de elementos de Hormigón armado (losas vigas y columnas).

Respecto a la escalera, se incorpora como carga externa en el modelo del caso I, mientras que se modela como elemento área para el caso II. Estas simplificaciones se realizaron a fin de facilitar en análisis propuesto como objeto de estudio de este trabajo.

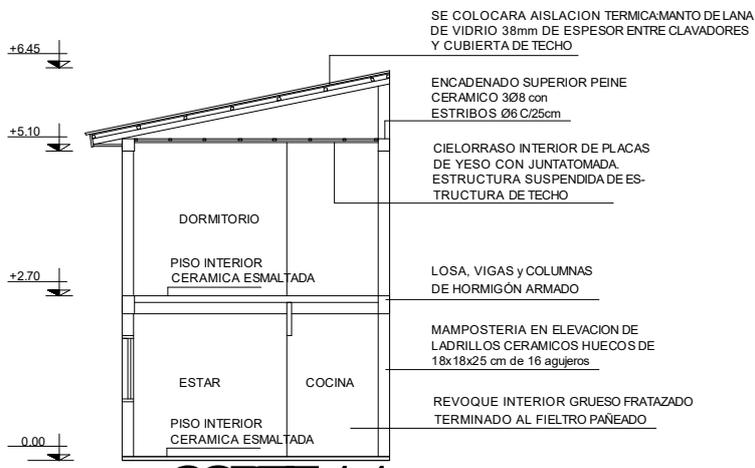
Este es el modelo simplificado empleado tradicionalmente para la determinación de solicitaciones de dimensionado y/o verificación estructural de vigas, columnas y bases de hormigón armado.

El modelo evalúa por si solo el peso propio de las vigas y columnas, los demás efectos de carga (losa, mamposterías, cubierta y estructura de techo, pisos y sobrecarga de uso en entrepiso) son modelados como carga externa, empleándose para ello cargas puntuales en nudos y distribuidas (uniformes y no uniformes) en vigas.

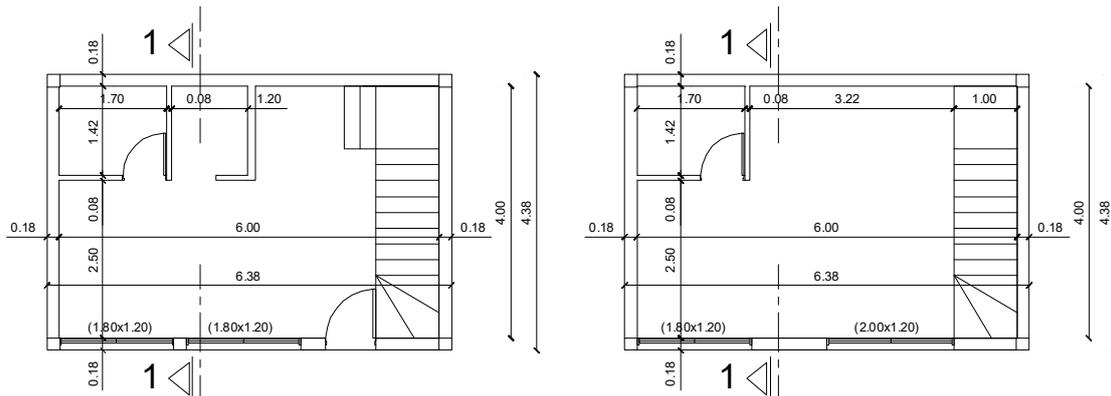
Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.



Fachada



Corte 1-1



Planta Baja

Planta Alta

Figura 9.1. Prototipo de Sistema Constructivo seleccionado para ejecutar las aplicaciones.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

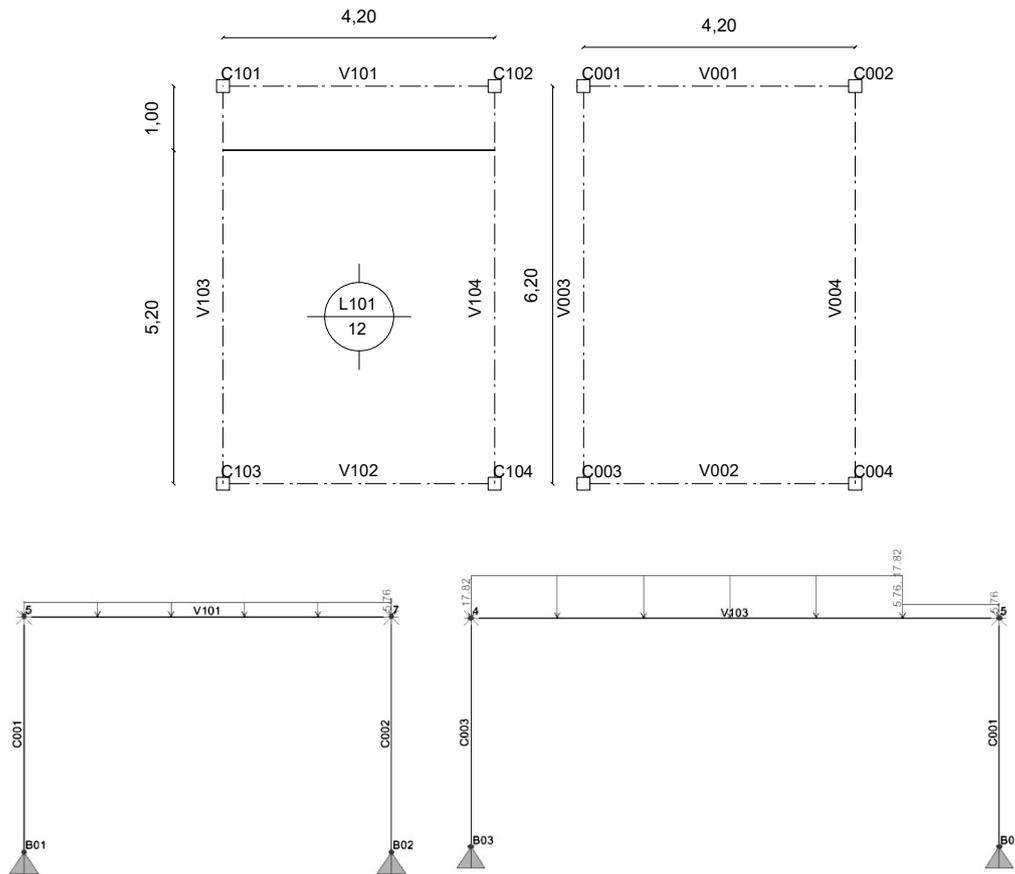


Figura 9.2. Esquema conceptual de análisis Estructural Modelo 9.1 (análisis convencional).

Modelo de elementos Finitos.

En este modelo, se incorpora al análisis de la estructura la losa de entepiso, la estructura y cubierta de techo, y las mamposteras mediante la incorporación de elementos de área interactuando con los elementos barra que conforman las vigas y columnas de hormigón Armado del sistema constructivo.

Esto permite la interacción de las vigas y columnas de hormigón armado con los diafragmas propios de las mamposterías de cerramiento de la vivienda para cual se han previsto en el modelo las herramientas de configuración que permiten asegurar que exista compatibilidad de deformaciones como también concordancia geométrica en el mallado de elementos.

En consecuencia, el modelo evalúa por sí mismo el peso propio de los diferentes elementos componentes (piso, losa de entepiso, mamposterías, cubierta y estructura de techo), incorporándose solamente como carga externa la sobrecarga de uso en los elementos área que conforman la losa de entepiso como también la acción del viento en los techos la

genera un efecto de succión por la reducida pendiente de los mismos. En la figura 9.3 se dan imágenes del modelo planteado en este caso. En ambos modelos se adoptó como espesor de muro 0.18 m (el cual es un valor nominal en el mercado) a efectos de representar el espesor de pared usual en este tipo sistemas constructivos.

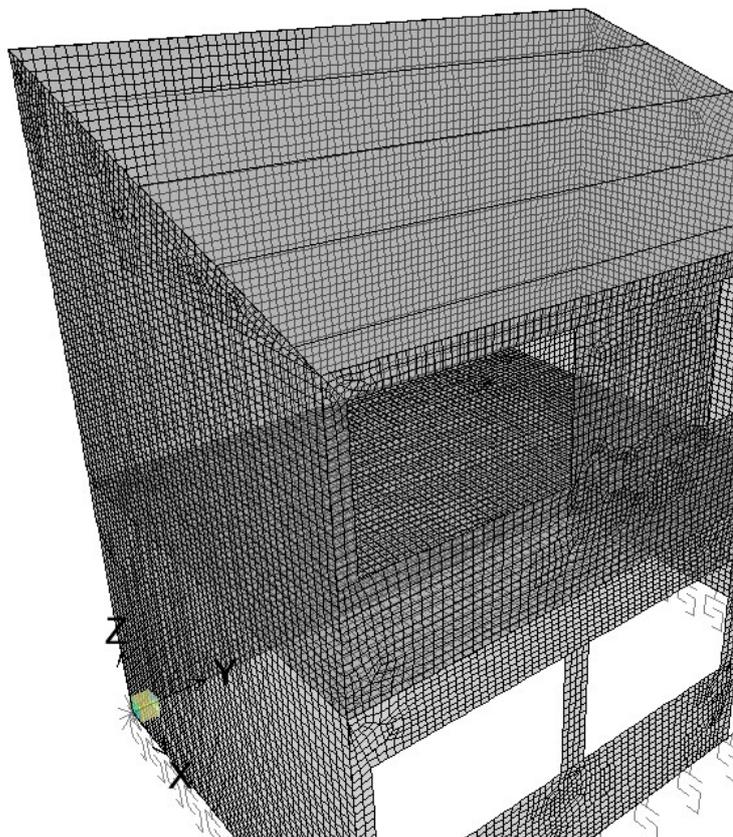


Figura 9.3. Esquema conceptual de análisis Estructural Modelos 9.2 y 9.3 (análisis MEF).

Materiales considerados.

En el presente apartado se detallan las características mecánicas de los diferentes materiales considerados destacando valores de los parámetros de referencia empleados en ambos modelos numéricos. Se da una breve descripción de los siguientes materiales: suelo, hormigón armado. Los parámetros seleccionados para la mampostería fueron desarrollados en capítulos anteriores y serán considerados para cada modelo numérico MEF en particular.

Parámetros del Suelo de Fundaciones.

Los parámetros geo mecánicos de los suelos empleados en el presente trabajo, corresponden a ensayos realizados en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la UNaM. En el período 2007-2012 y las muestras empleadas para los ensayos fueron

obtenidas de la zona centro de la Provincia de Misiones, y corresponden a suelos residuales de coloración rojiza, siendo los mismos los de mayor desarrollo en la región.

Sobre una base de análisis de treinta muestras de diferentes sitios, con las que se realizaron los ensayos específicos, se obtuvieron los valores medios de propiedades índice y geo mecánicas indicados en la Tabla 9.1.

Parámetros	w	γ_n	γ_d	e_i	n	S_i	ϕ	c	E
	%	kN/m ³	kN/m ³	-	%	%	°	kN/m ²	kN/m ²
Valores medios	30,9	17,1	13,2	1,19	54,0	71,6	12	75,0	18.700

Tabla 9.1. Valores medios de parámetros índice y geo mecánicos.

Atendiendo a que los valores detallados (w: Contenido de humedad; γ_n : Peso unitario húmedo; γ_d : Peso unitario Seco; e_i : Relación de vacíos; n: Porosidad; S_i : Grado de saturación) corresponden a los resultados directos de ensayos, en el caso de los parámetros que aportan a la resistencia del suelo, se han aplicado factores de reducción a fin de considerar la importante variación de los parámetros mecánicos (cohesión, fricción y módulo elástico) con el cambio o variación del contenido de humedad del suelo [De Salvo, 1990].

En consecuencia, los valores de referencia asumidos para las modelaciones de la interacción suelo-estructura, con base en los resultados de ensayos citados y la experiencia en el ámbito profesional de la región (en especial valores de coeficiente de balasto y de Poisson) se detallan en la Tabla 9.2.

Parámetros	Ángulo de fricción ϕ (°)	Cohesión c kN/m ²	Módulo de Elasticidad E kN/m ²	Coefficiente de Balasto C_b kN/m ³	Coefficiente de Poisson μ -
Valores asumidos	10	50	15.000	20.000	0,30

Tabla 9.2. Parámetros geo mecánicos empleados en el modelo.

En el Software el suelo se modela mediante el empleo de resortes de comportamiento elástico lineal, a través del módulo “resorte lineal” (lineal spring), donde se da el valor de la resistencia por unidad de longitud a incorporar en las vigas de encadenado de nivel 0.00, y para el caso de las cuatro columnas se indica mediante el comando “Resorte nodal” (Joint spring). En ambos casos con la opción de trabajo solo a compresión de los resortes representativos de la rigidez del suelo.

Parámetros del Hormigón Armado.

El hormigón armado empleado comúnmente en este tipo de obras se corresponde con el denominado H-20, con base en la nomenclatura reglamentaria oficial (CIRSOC 201, 2005). En el Software se definen las características del hormigón y del acero mediante el módulo “Section Designer”, del software SAP 2000 nonlinear versión 14.1.0.

En el mismo se define la sección, la resistencia especificada y el módulo de elasticidad. Para este hormigón se ha establecido que la descripción constitutiva del material en el campo plástico se efectúa con el modelo histerético de Takeda (Takeda et al., 1974).

La definición de la curva tensión-deformación sigue el modelo de Mander et al. (1984), que desarrolla una relación constitutiva para hormigones confinados. La curva tensión deformación del hormigón ($f_c - \varepsilon_c$) envolvente en compresión está dado por la ecuación de Popovics (1973), (ver Figura 9.4):

$$f_c = \frac{f'_{cc} \times r}{r - 1 + x^r} \quad (9-1)$$

$$x = \varepsilon_c / \varepsilon_{cc} \quad (9-2)$$

$$r = E_c / (E_c - E_{sec}) \quad (9-3)$$

$$E_{sec} = f'_{cc} / \varepsilon_{cc} \quad (9-4)$$

En términos conceptuales, "x" representa una corrección a la deformación longitudinal del hormigón producto de un incremento de la energía interna de deformación la cual ocurre a partir de la presión de confinamiento proporcionada por la armadura transversal del elemento. El factor "r" proporciona la corrección en la deformación del hormigón a través de considerar el incremento de ductilidad brindado por la antes mencionada armadura transversal.

Llamando a:

f'_c : Resistencia a compresión en probeta cilíndrica.

$E_c = 5000 \sqrt{f'_c}$: Módulo de elasticidad tangente inicial, expresando f'_c en Mpa.

$\varepsilon_{c0} = -0.002$: Deformación a la resistencia no confinada, donde el signo (-) indica compresión.

Se establecen las siguientes relaciones:

$$f'_{c0} = 0.85 f'_c \quad (9-5)$$

$$f'_{cc} = K_{cc} f'_{c0} \quad (9-6)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} (1 + R(K_{cc} - 1)) \quad (9-7)$$

Con f'_{c0} : resistencia in-situ del hormigón no confinado y f'_{cc} , ε_{cc} : tensión y deformación a la resistencia máxima.

En la ecuación (7) es $1 < R < 5$: un parámetro calibrado con resultados experimentales y K_{cc} factor que depende de la presión de confinamiento f_{rx} , f_{ry} dado por la armadura transversal.

$$\forall \quad f_r = \frac{1}{2} (f_{rx} + f_{ry}) \quad ; \quad 0.40 \leq f_{rx} / f_{ry} \leq 2.50 \quad (9-8)$$

Resulta:

$$K_{cc} = \frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f'_{c0}}} - 2 \frac{f_r}{f'_{c0}} - 1.254 \quad (9-9)$$

Las presiones de confinamiento se calculan con:

$$f_{rx} = \frac{A_{sx}}{s h_c} f_{yh} k_e \quad ; \quad f_{ry} = \frac{A_{sy}}{s b_c} f_{yh} k_e \quad (9-10)$$

Dónde:

A_{sx} , A_{sy} : Áreas de la armadura transversal en la dirección x e y.

s: separación entre capas de armadura transversal.

h_c , b_c : Dimensiones del núcleo de hormigón perpendicular a las direcciones x e y respectivamente.

f_{yh} : Tensión de fluencia de la armadura transversal.

k_e : Factor de efectividad de confinamiento que depende de la forma y disposición de la armadura transversal.

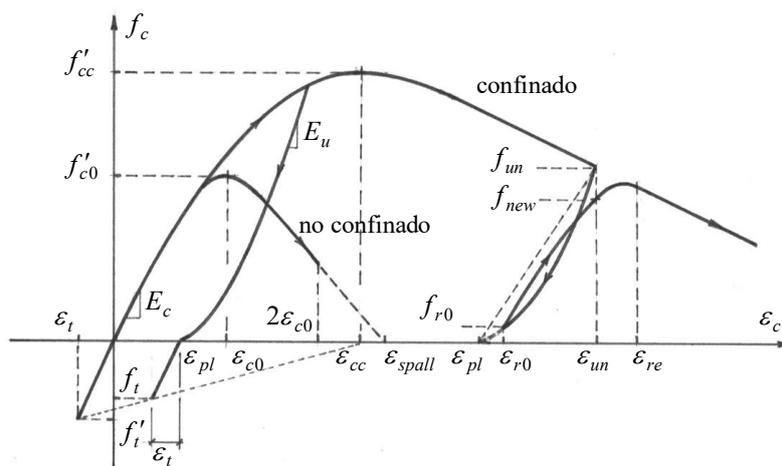


Figura 9.4. Relación tensión deformación del hormigón.

Acero para hormigón estructural.

Para representar el comportamiento mecánico del acero, se utiliza el modelo propuesto por Park (1974), el cual discrimina tres zonas en el mismo: la primera de carácter lineal conocido "Es" como el módulo de Elasticidad longitudinal del material.

La segunda zona es una meseta conocida como zócalo de fluencia, en la cual la deformación aumenta a tensión constante; la tercera zona comienza cuando el material adquiere posibilidad de incremento de tensiones a consecuencia del reordenamiento de su estructura interna, ocurrido en el segmento de fluencia, conforme se detalla en la figura 9.5.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad ; \quad 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (9.11)$$

$$f_s = f_y \quad ; \quad \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \quad (9.12)$$

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left| \frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right|^p \quad ; \quad \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \quad (9.13)$$

Dónde:
$$p = E_{sh} (\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}) / (f_{su} - f_y) \quad (9.14)$$

Siendo:

E_s : Módulo de elasticidad del acero ADN.

E_{sh} : Módulo tangente al inicio del endurecimiento.

f_y : Tensión de fluencia.

f_{su} : Tensión última;

ε_{sh} : Deformación al final del plafón de fluencia.

ε_{su} : Deformación última a f_{su} .

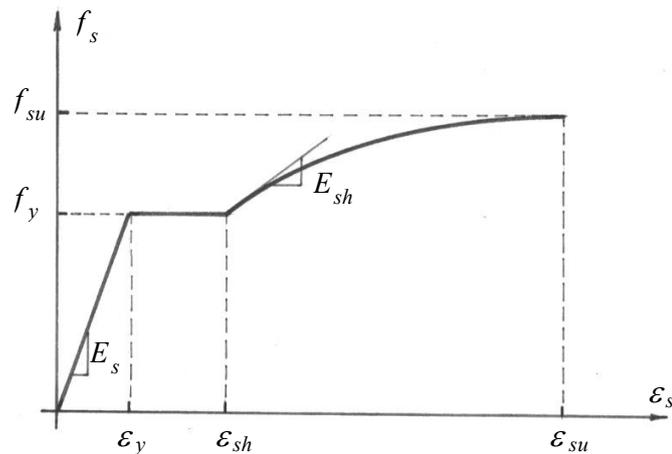


Figura 9.5: Modelo constitutivo para acero de hormigón estructural.

Modelos materiales considerados para la mampostería.

A continuación se presenta una descripción de los modelos propuestos para la configuración de las propiedades materiales de los elementos utilizados para simular los paneles de mampostería en el prototipo analizado.

En términos generales se prueban dos categorías de disposición material: un material isotrópico que incluye propiedades de plastificación sobre la base de las especificaciones de Drucker y Prager para materiales elastoplásticos con ley de distribución de tensiones y deformaciones obtenidas de manera experimental.

Luego se propone un material ortotrópico lineal de matriz constitutiva experimental con idénticas consideraciones tensionales y elastoplásticas definidas para el primer material.

Modelo isotrópico lineal elastoplástico experimental.

Se asume un modelo de material que muestra idénticas propiedades mecánicas en todas las direcciones de análisis y tiene una ley constitutiva no lineal dado que su resistencia a tracción es un porcentaje de su resistencia a compresión como se puede apreciar en la figura 9.6. (ver también Tabla 3).

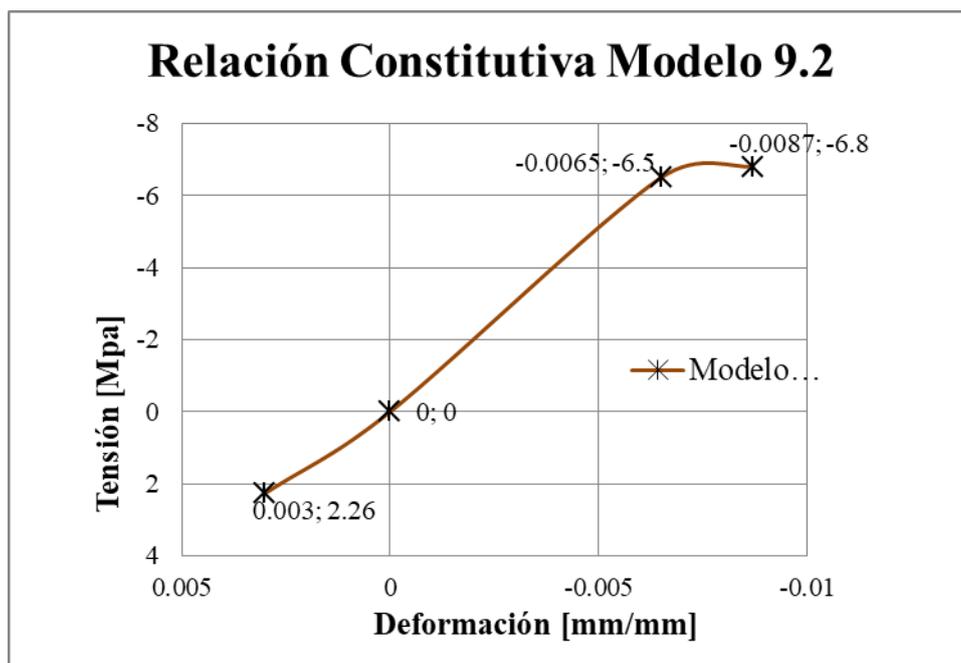


Figura 9.6: Modelo constitutivo para Mampostería de modelo 9.2.

Los valores de Modulo Elástico longitudinal y transversal como también los valores de relación entre deformabilidad transversal y longitudinal se han procesado en base a los resultados obtenidos en el capítulo 5 correspondiente a ensayos realizados en el capítulo 8. Estos resultados se compararon entre LCH, Celdas y Paneles dando parámetros aceptablemente cercanos. Luego el planteo de un modelo isotrópico y uno ortotrópico pretende establecer cual es más acertado.

Todos los resultados de ensayos fueron cotejados y utilizados para la formulación de los materiales empleados en la presente modelación aplicada al caso de una vivienda de dos plantas. La propuesta en términos de los modelos elegidos para los materiales que se adoptan para los elementos de mampostería ha cubierto la totalidad de los datos experimentales, cada uno de estos siendo utilizados en diferentes instancias.

Es importante aclarar esto último ya que la esencia de analizar el material mampostería con un carácter de compuesto estructural resistente busca cumplir el objetivo de probar la hipótesis de la presente tesis: comprobar la posibilidad de utilizar la resistencia de las mamposterías para reducir consumos de hormigón armado en las viviendas sociales.

Parámetros configurados

Parámetro	LCH
E1:[Mpa]	No
E2: [Mpa]	No
E3: [Mpa]	685
idc12:	No
idc13:	No
idc23:	0.2001
G12: [Mpa]	No
G13: [Mpa]	No
G23: [Mpa]	285.4

Ley Constitutiva usada

Deformación [mm/mm]	Tensión [Mpa]
-0.0087	-6.8
-0.0065	-6.5
0	0
0.003	2.26

Tabla 9.3. Parámetros mecánicos empleados en LCH – Modelo 9.2.

Modelo ortotrópico lineal elastoplástico experimental.

El segundo modelo elaborado para aplicaciones corresponde a un material ortotrópico con parámetros obtenidos en ensayos mecánicos de laboratorio a partir de ladrillos LCH comprimidos en tres direcciones y probetas extraídas luego de la rotura para su preparación y ensayo a tracción. La tabla 9.4 muestra los valores adoptados cuales son característicos tomando un intervalo de confianza de 95%.

En la figura 9.6 se observa la gráfica obtenida para la relación constitutiva del material LCH correspondiente al modelo 9.3 del presente capítulo el cual consta de una aplicación para resolver esfuerzos y deformaciones en un sistema constructivo de dos plantas descrito en párrafos anteriores.

Parámetros configurados

Parámetro	LCH
E1:[Mpa]	1525.9
E2: [Mpa]	296.4
E3: [Mpa]	279.92
idc12:	0.25
idc13:	0.25
idc23:	0.2001
G12: [Mpa]	610.34
G13: [Mpa]	610.34
G23: [Mpa]	123.49

Ley Constitutiva

Deformación	Tensión
2.00E-03	0.5952
0	0
-0.001	-0.28
-0.002	-0.56
-0.003	-0.84
-0.004	-0.899
-0.006	-1.124

Tabla 9.4. Parámetros mecánicos empleados en LCH – Modelo 9.3.

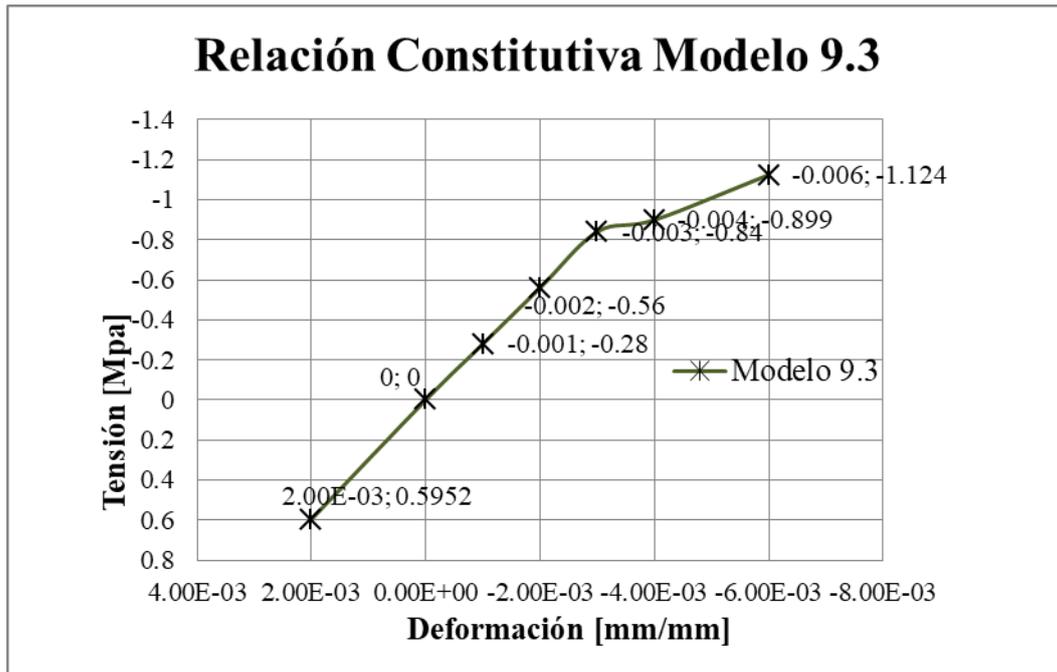


Figura 9.7: Modelo constitutivo para Mampostería de modelo 9.3.

Respecto al software utilizado es un código de elementos finitos llamado SAP2000nonlinear en su versión 14.1.0 con licencia autorizada para la facultad de Ingeniería de UNaM.

Con respecto a los patrones de carga adoptados para los modelos analizados en el presente capítulo se adoptaron: estado de carga correspondiente al peso propio (D) considerando no linealidad física sin incluir efectos de segundo orden por cuestiones de costo computacional.

Luego se concatena este con el estado de carga variable (L) correspondiente a sobrecarga de uso reglamentaria para el sistema constructivo adoptado. Por último se agrega el estado de Carga correspondiente a la acción del viento, el cual no ha generado grandes cambios en los resultados por las características de peso propio global de la construcción analizada.

Para las hipótesis combinatorias se adoptó como primera hipótesis la acción del peso propio sin sobrecarga. Como segunda hipótesis la acción conjunta del peso propio y la sobrecarga de uso. No se aplicaron polinomios de carga combinados con la acción del viento por ser sus efectos para este tipo de construcciones de magnitud despreciable y por considerar sus factores un aspecto de líneas futuras de trabajo de investigación que puedan partir del presente trabajo.

Luego de analizar los tres modelos planteados se propuso comparar en forma tabular las solicitaciones ocurridas en los elementos de hormigón armado a efectos de poder desde este lugar obtener parte de las conclusiones de la presente tesis, las cuales abarcan además de lo procesado en los capítulos dedicados a ensayos materiales y caracterización experimental una serie de propuestas en el campo de la simulación numérica.

A futuro estas utilidades se estima que permitan lograr un proceso de optimización de los parámetros de diseño incidentes en sistemas constructivos en donde interactúen mamposterías junto con refuerzos de hormigón armado.

Análisis y discusión de resultados obtenidos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el análisis estructural de los modelos adoptados. A modo descriptivo se muestran características particulares de cada modelo para luego efectuar una comparativa entre estos a efectos de poder avanzar hacia la etapa de conclusiones y líneas de trabajo futuras para el presente tópico.

Modelo 9.1: Análisis estructural de elementos finitos sin considerar colaboración de mamposterías.

El presente modelo correspondiente a un formato convencional de análisis estructural en donde solo se consideraron los elementos lineales de hormigón armado para el soporte de los entrepisos del mismo material (entendiendo por elementos lineales a las vigas y columnas de soporte del piso superior). La resolución se efectuó aplicando el método MEF utilizando elementos de barra (frame) para representar la estructura resistente del sistema constructivo analizado tal cual se muestra en la figura 9.8.

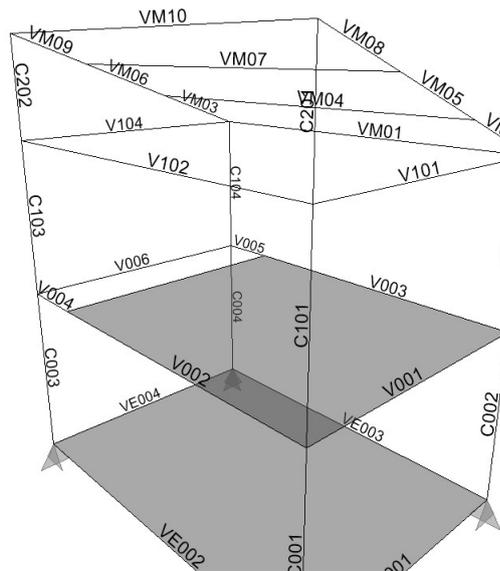


Figura 9.8: Modelo geométrico 9.1 – Análisis Convencional de barras.

Con respecto a los materiales y la geometría de los elementos estructurales se adoptaron idénticas medidas que en los modelos posteriores que incluyen a las mamposterías para poder efectuar comparaciones de valor. Dichas comparaciones atienden los estados de sollicitaciones que combinan cargas permanentes y de uso.

El tiempo de análisis de este modelo ha promediado los 58 segundos resolviendo 48966 ecuaciones de equilibrio con un ancho de banda efectivo de 699 incógnitas adoptando los Estados de carga como lineales elásticos.

Respecto a los resultados obtenidos ha predominado las sollicitaciones usuales según el tipo de elemento observando en columnas esfuerzos axiales mientras que en vigas ha predominado la flexión y el corte según lo esperable.

Modelo 9.2: Análisis estructural de Elementos Finitos considerando mamposterías como material isotrópico.

Este modelo correspondiente a un formato propuesto de análisis estructural en donde además de los elementos lineales de hormigón armado para el soporte de los entrepisos del mismo material (entendiendo por elementos lineales a las vigas y columnas de soporte del piso superior) se han considerado los diafragmas de mamposterías como elementos de área tal cual se muestra en la figura 9.9.

Este modelo ha requerido un tiempo de análisis que promedió los 3957 segundos (alrededor de una hora y 6 minutos) resolviendo 249594 ecuaciones de equilibrio con un ancho de

banda efectivo de 2212 incógnitas. Los estados de carga fueron adoptados de la siguiente manera: Carga permanente no lineal, Carga de Uso lineal concatenada con el estado de carga permanente.

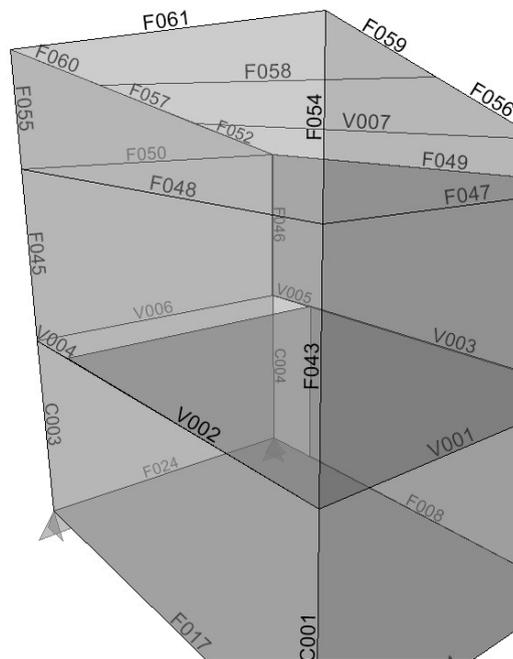


Figura 9.9: Modelo geométrico 9.2 – Análisis incluyendo Mampostería isotrópica no lineal.

En los resultados obtenidos para el modelo 9.2 se pudo observar un decremento lineal del esfuerzo axial en columnas lo cual demuestra que el modelo reproduce la interacción entre mamposterías y columnas de $H^0 A^0$ a través de su desarrollo longitudinal. Con respecto a los demás esfuerzos en columnas han mostrado un incremento respecto al caso anterior, a saber: disminución de los esfuerzos de corte, incremento de los esfuerzos de torsión en extremos y considerable reducción de los momentos flectores en ambas direcciones.

Modelo 9.3: Análisis estructural de Elementos Finitos considerando mamposterías como material ortotrópico.

En este modelo con respecto a los anteriores se ha modificado la concepción del material correspondiente a los diafragmas de mamposterías el cual se configuró como material ortotrópico no lineal. Las demás configuraciones así como la geometría del modelo se mantuvo idéntica (ver figura 9.9).

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

Este modelo ha requerido un tiempo de análisis que promedió los 6662 segundos (alrededor de una hora y 51 minutos) resolviendo 249594 ecuaciones de equilibrio con un ancho de banda efectivo de 2212 incógnitas.

Con respecto a los resultados obtenidos en solicitaciones, se pueden observar que los mismo han mostrado leves diferencias con respecto al modelo 9.2 siendo destacablemente diferente al modelo 9.1 con lo cual se pueden establecer las discusiones relatadas a continuación.

La tabla 9.5 muestra a continuación una comparación entre modelos en las solicitaciones de los elementos más representativos del sistema estudiado.

En la tabla comparativa se puede observar que el comportamiento de los modelos que consideran a la mampostería como elemento estructural los esfuerzos sobre elementos de hormigón amado disminuye de manera considerable.

Además de lo mencionado antes los esfuerzos que usualmente no se suelen considerar (corte y flexión lateral, torsión) han incrementado su valor estos no son significativos lo que explica si bien pueden explicar algunas patologías usuales que suelen aparecer en este tipo de sistemas constructivos.

Por otro lado es necesario señalar que dichos esfuerzos al cambiar han de producir una interacción con los diafragmas de mamposterías con lo cual se deben estudiar sus estados tensionales con lo cual la presentación de resultados sigue el siguiente proceso.

A continuación se muestran las gráficas más significativas obtenidas en la comparativa de modelos centrandó la atención en los tipos de solicitaciones que son predominantes en cada tipo de elemento longitudinal.

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

		MODELO 9.1						MODELO 9.2						MODELO 9.3					
TABLA DE SOLICITACIONES																			
ELEM.	No-Nj	N	V2	V3	T	M2	M3	N	V2	V3	T	M2	M3	N	V2	V3	T	M2	M3
[Texto]	[m]	[KN]	[KN]	[KN]	[KN-m]	[KN-m]	[KN-m]	[KN]	[KN]	[KN]	[KN-m]	[KN-m]	[KN-m]	[KN]	[KN]	[KN]	[KN-m]	[KN-m]	[KN-m]
C001	0.00	-150.63	-6.12	-12.49	0.06	-15.25	-6.87	-189.70	-0.49	-9.06	-0.92	-6.17	-0.29	-205.36	2.45	-10.62	-0.92	-5.51	1.40
C001	1.08	-149.55	-6.12	-12.49	0.06	-1.76	-0.25	-151.20	0.00	-0.60	0.05	-0.11	-0.12	-158.21	0.02	-1.37	0.10	0.05	-0.09
C001	2.70	-147.93	-6.12	-12.49	0.06	18.47	9.67	-94.17	-5.38	-5.14	-0.55	3.68	2.66	-98.27	0.39	-0.67	-0.22	1.76	1.14
C002	0.00	-144.95	6.35	-13.29	-0.09	-17.09	8.88	-183.01	19.69	-11.35	-1.16	-6.53	11.33	-208.95	26.57	-10.92	-1.00	-5.62	12.63
C002	1.35	-143.60	6.35	-13.29	-0.09	0.85	0.31	-140.65	-0.81	-0.54	0.04	-0.06	-0.25	-151.71	-0.58	-0.55	0.04	-0.04	-0.43
C002	2.70	-142.25	6.35	-13.29	-0.09	18.79	-8.25	-100.26	2.83	-6.34	-0.44	3.63	-2.91	-104.47	-1.36	-4.34	-0.17	2.18	-1.48
C003	0.00	-135.23	-5.27	12.80	-0.53	15.40	-6.20	-193.63	-2.02	11.50	0.72	7.11	-0.77	-216.35	-0.73	13.42	0.86	6.48	0.57
C003	1.08	-134.15	-5.27	12.80	-0.53	1.58	-0.51	-151.85	0.02	3.16	-0.24	0.00	-0.15	-162.97	0.08	3.62	-0.27	-0.16	-0.16
C003	2.70	-132.53	-5.27	12.80	-0.53	-19.16	8.02	-92.02	-5.67	5.96	0.59	-3.40	2.51	-95.69	-0.95	2.32	0.35	-1.54	1.37
C004	0.00	-125.33	5.04	12.98	0.55	16.71	7.62	-144.72	17.47	2.37	0.01	4.24	8.51	-150.77	23.38	1.81	-0.06	3.46	8.86
C004	1.35	-123.98	5.04	12.98	0.55	-0.81	0.81	-127.81	-0.11	2.81	0.08	0.38	-0.17	-129.55	-0.03	2.38	0.08	0.29	-0.26
C004	2.70	-122.63	5.04	12.98	0.55	-18.33	-6.00	-112.14	2.42	3.61	0.01	-3.89	-1.86	-117.02	-1.16	2.76	-0.13	-3.26	-0.60
V001	0.00	22.28	-39.04	25.26	-8.47	2.19	-4.06	19.82	3.23	30.44	-3.46	2.00	1.79	27.90	4.80	37.30	-3.35	2.32	2.57
V001	2.10	195.59	1.15	-0.70	0.04	-0.12	13.55	25.70	0.02	4.84	-0.34	-0.30	1.78	22.57	0.02	4.98	-0.35	-0.31	1.09
V001	4.20	-18.74	43.89	-47.28	10.22	1.80	-14.42	12.85	9.16	-19.90	3.38	3.06	-1.63	23.27	4.62	-26.49	3.43	3.38	-0.05
V002	0.00	46.55	-65.77	-8.68	-9.36	-8.04	-23.31	2.73	-4.82	33.67	-9.03	-4.92	1.41	7.95	-2.92	43.17	-9.02	-4.80	1.02
V002	3.00	253.26	-61.41	-30.84	-8.50	0.31	21.95	19.55	-0.16	-39.91	-7.42	0.37	1.60	11.61	-0.19	-41.12	-7.19	0.39	0.85
V002	6.00	-2.48	46.80	11.89	4.99	-9.17	-20.85	-4.19	-8.17	17.65	3.78	-5.65	2.16	2.61	-6.31	28.43	4.01	-6.02	1.48
V003	0.00	-22.68	-49.67	13.36	-6.47	2.87	-22.06	7.33	-5.54	35.30	-5.56	4.47	-2.39	17.00	-1.79	42.42	-5.48	4.54	-0.65
V003	3.13	279.68	3.06	2.27	-1.47	0.04	22.61	35.02	-1.04	12.61	-0.87	0.33	2.08	26.65	0.31	13.95	-0.96	0.37	1.20
V003	6.00	2.68	65.62	-11.70	10.59	3.56	-38.48	14.92	20.62	-2.97	8.25	2.06	-12.29	13.37	15.91	-1.81	8.68	1.56	-9.15
V004	0.00	12.31	-17.31	-0.04	-0.43	1.44	-9.52	5.56	-2.92	0.59	1.89	0.06	0.77	12.30	-0.93	0.25	1.19	-0.16	1.80
V004	2.10	12.31	-2.06	-0.04	-0.43	1.52	10.82	5.57	-0.13	-0.56	0.05	-0.09	0.82	14.93	-0.18	-0.76	0.11	-0.11	-0.07
V004	4.20	12.31	13.18	-0.04	-0.43	1.59	-0.85	12.78	-6.23	-0.15	-1.41	2.05	3.07	22.68	-6.64	-0.39	-0.81	2.21	3.89

Tabla 9.5. Comparación entre modelos y sus solicitaciones.

La figura 9.10 muestra los esfuerzos axiales en columnas en de donde se compararon las 4 columnas de planta baja y en donde se pudo observar el primer cambio de comportamiento respecto del análisis convencional.

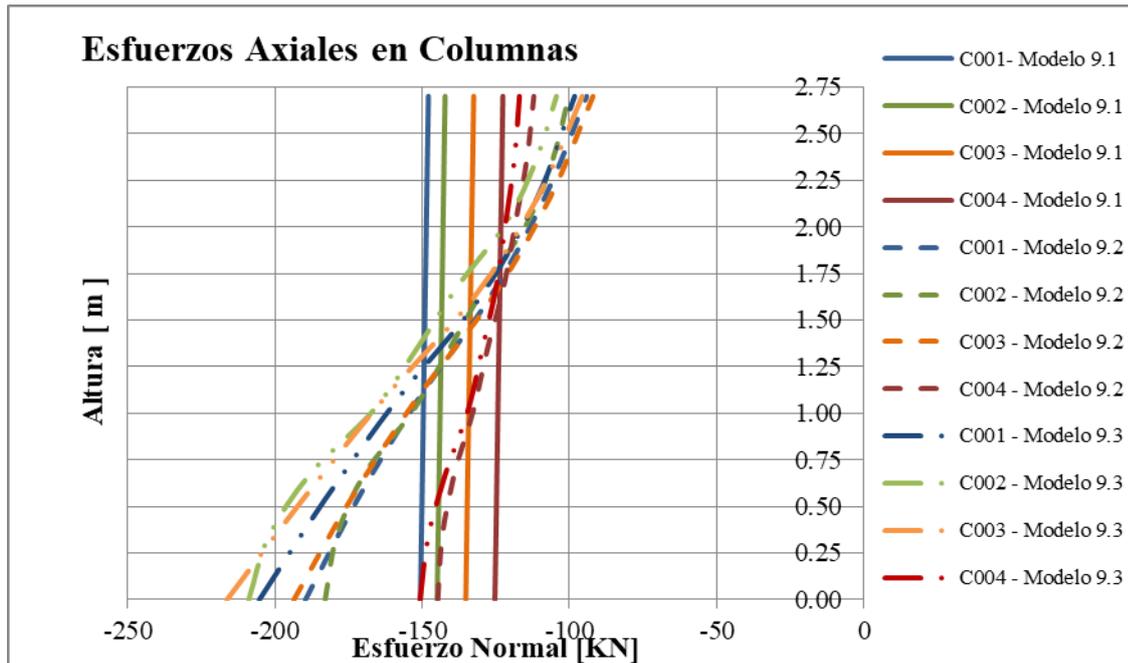


Figura 9.10: Comparativa de Modelos – Esfuerzo axial en Columnas.

En la misma se puede observar que el valor de esfuerzo axial en el caso del modelo 9.1 (Análisis Convencional) se ve con leve aumento hacia la parte inferior. En el caso de los modelos 9.2 y 9.3 el incremento considerable es representativo respecto a pensar que existe compatibilidad de deformaciones entre columnas y diafragmas de mamposterías lo cual tiene como consecuencia el incremento visto en dicha sollicitación.

En la figura 9.11 se analiza la comparativa de esfuerzos de flexión en columnas en donde se aprecia el cambio de signo producto de la restricción al giro ocurrida en extremos de las barras (modelo 9.1). Respecto a los modelos 9.2 y 9.3 la forma de los diagramas de flexión se mantiene disminuyendo su magnitud.

Este hecho tiene sentido en el aspecto de arrojamiento que promueven los diafragmas de mamposterías con los cual los giros son menores sin necesidad de un aumento en los momentos flectores de los extremos. No obstante la curvatura mostrada es doble con lo cual la manera en que se desarrolla la flexión en columnas es la misma.

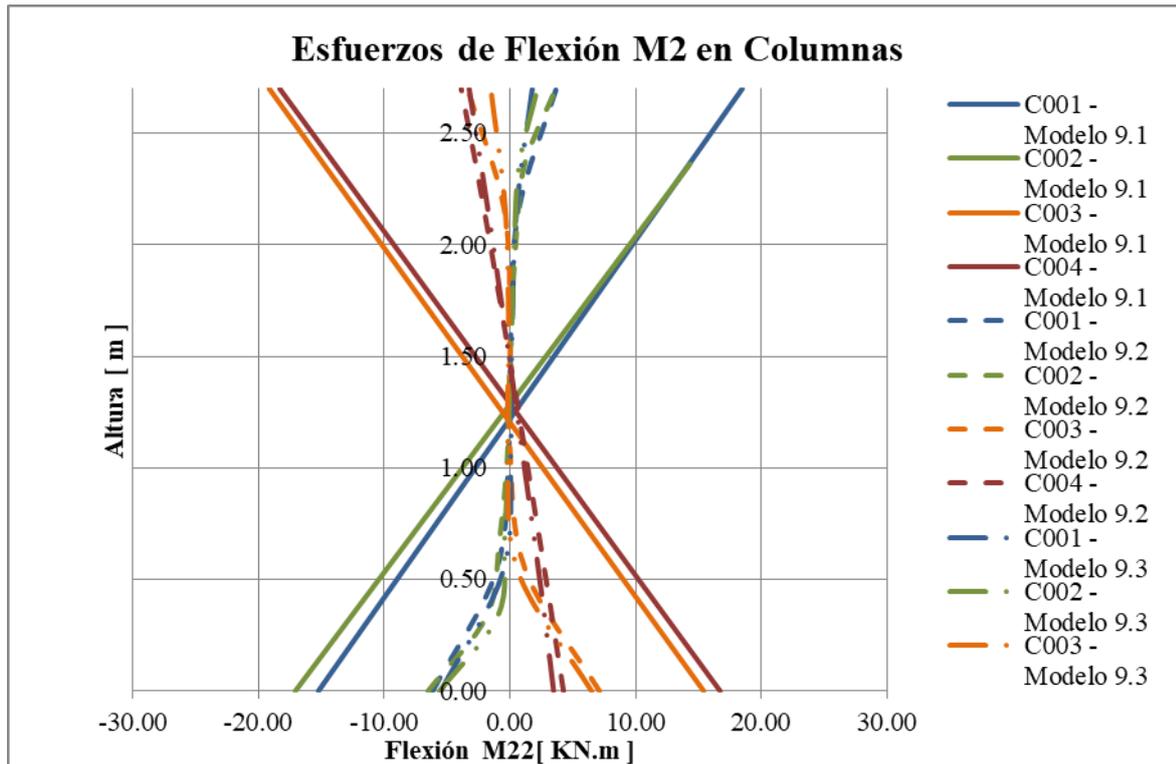


Figura 9.11: Comparativa de Modelos – Flexión en Columnas.

Siguiendo con el estudio de las graficas de solicitaciones la figura 9.12 muestra las solicitaciones de Corte Vertical en Vigas de planta baja.

En ellas se puede observar una reduccion considerable en el orden de magnitud de los esfuerzos de corte ocurridos en las vigas apoyadas sobre las mamposterías ahora consideradas como elementos interactuando con los elementos de hormigon Armado.

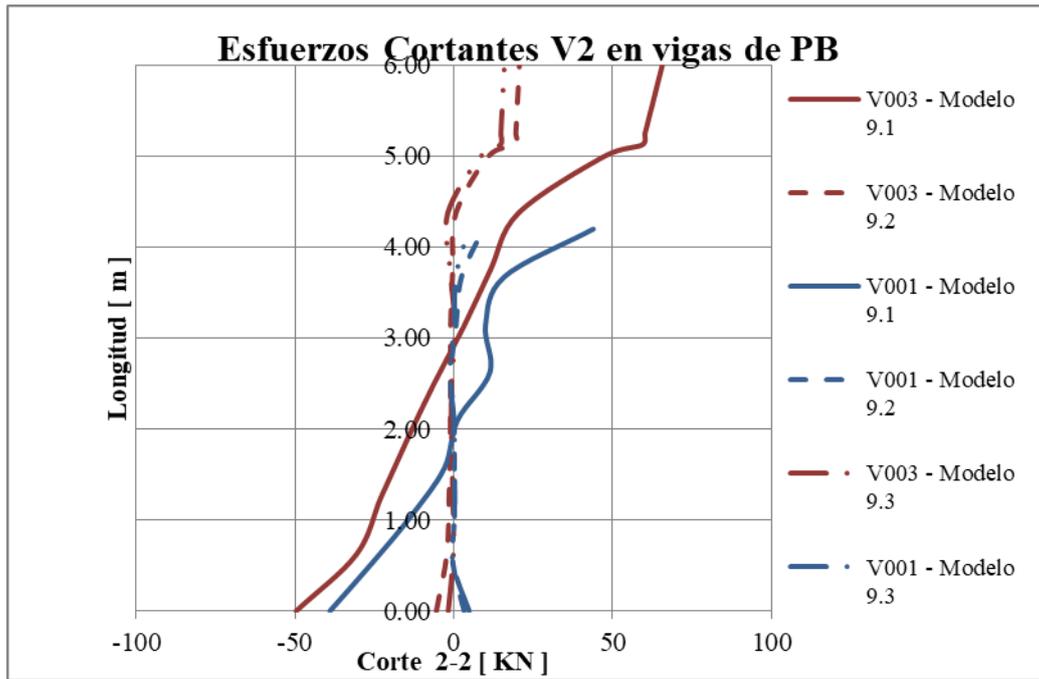


Figura 9.12: Comparativa de Modelos – Corte en Vigas de PB.

Cons respecto a la lflexion en vigas la figura 9.13 muestra la compartiva de resultados entre los modelos analizados para el sistema constructivo en cuestión.

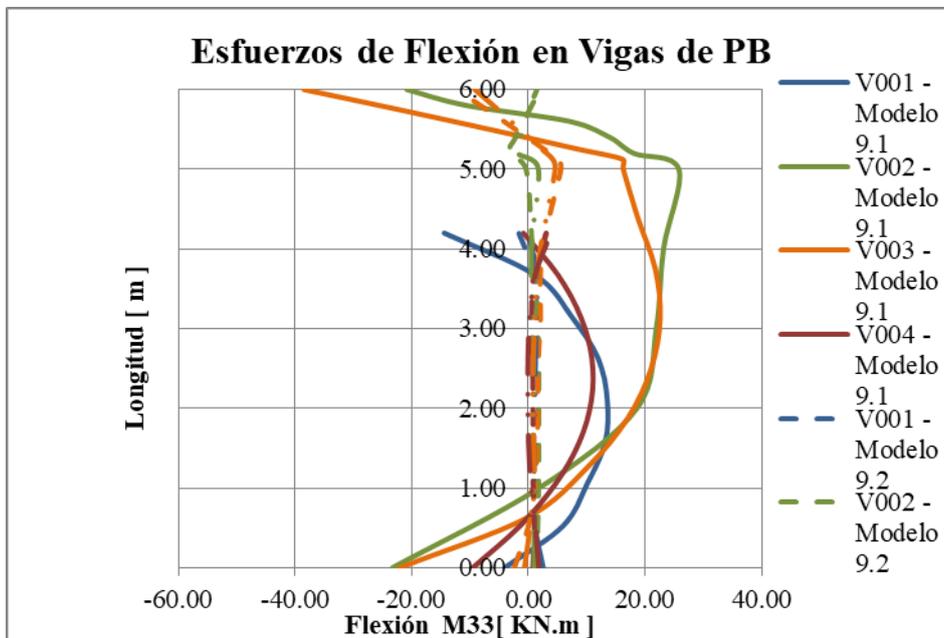


Figura 9.13: Comparativa de Modelos – Flexión en Vigas de PB.

Entre los resultados comparados respresentan la mayor disminución al comparar el análisis

convencional con la incorporación de mamposterías como elemento resistente.

Este hecho junto a los demás observados en las gráficas anteriores demuestra la importancia que tiene en el diseño estructural la decisión de considerar a las mamposterías como elementos colaborantes en la resistencia mecánica de los diferentes sistemas constructivos.

Otro hecho importante de señalar es que basado en los métodos de análisis disponibles en la actualidad sumado a la posibilidad de modelar los muros según diferentes opciones de materiales no lineales permite obtener una herramienta de diseño de considerable utilidad a un costo computacional aceptable.

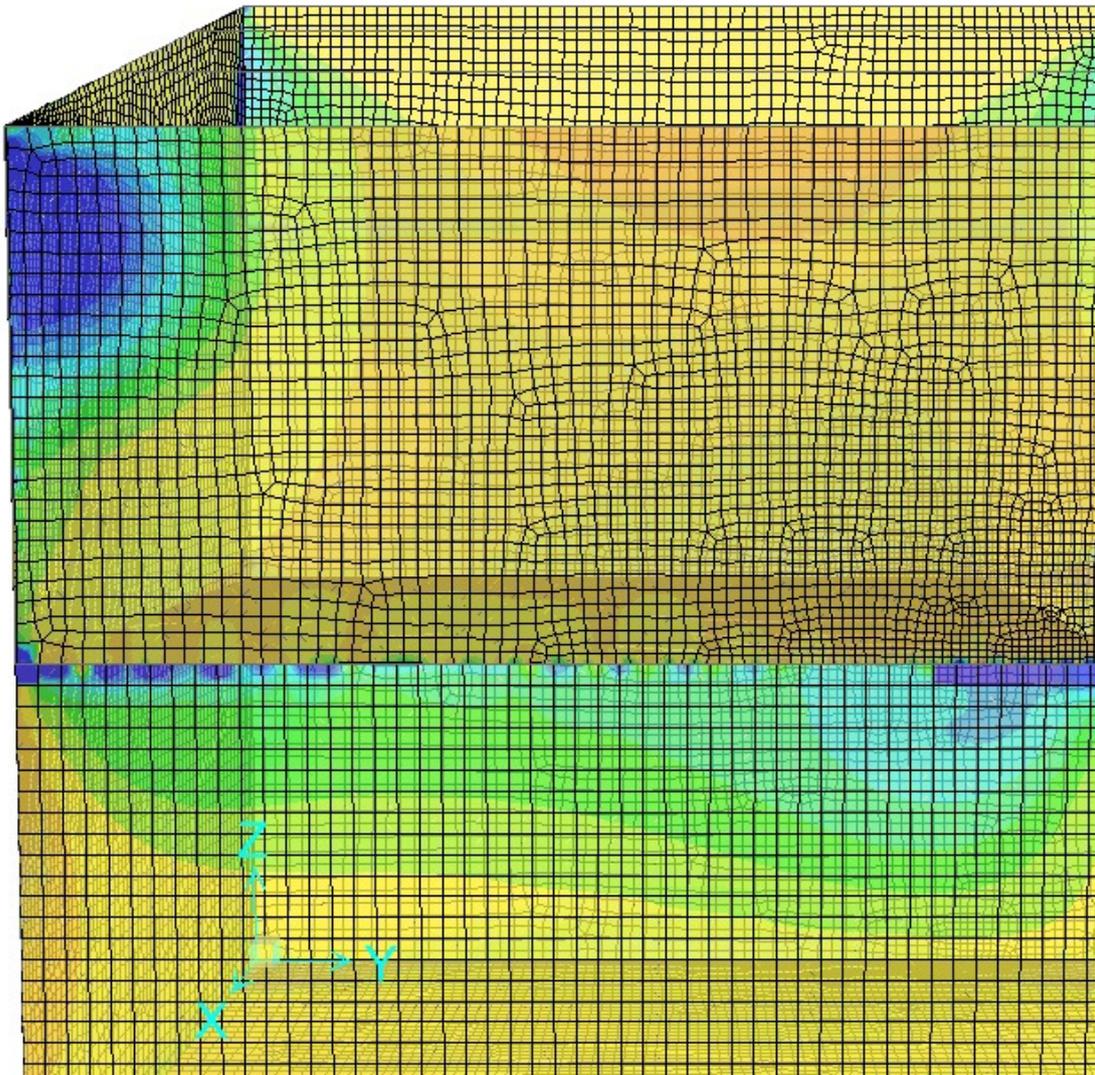


Figura 9.14: Estados tensionales S11 [Mpa.10⁻³] – Plano YZ – Modelo 9.2.

En la figura 9.14 vemos un mapa de esfuerzos normales en dirección horizontal (S11) en el cual se puede apreciar que los esfuerzos a los que esta sometido el sistema edilicio son valores reducidos (valores que oscilan entre (-) 0.6Mpa y (+) 0.6Mpa) . La resistencia minima especificada por [CIRSOC 501E, 2013] es del orden de 5 Mpa para esfuerzos de Compresión mientras que para esfuerzos de tracción no se mencionan comentarios a respecto.

En la figura 9.15 se observa la distribución de esfuerzos normales para la dirección vertical (S22) y se puede deducir una situación similar en terminos del orden de magnitud de las tensiones mientras que se ven diferencias logicas en la forma de las distribuciones de tracción y compresion para cada direccion de esfuerzos.

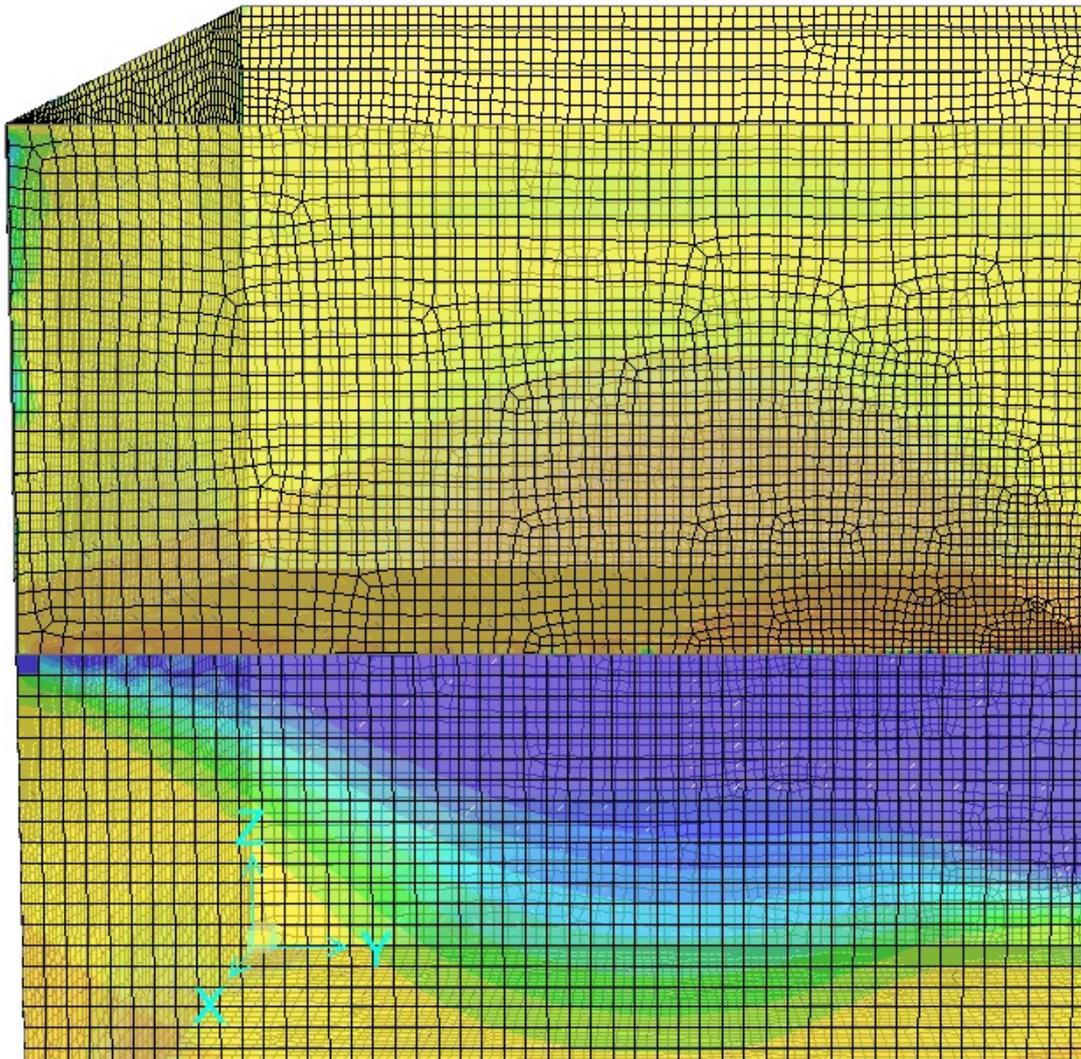


Figura 9.15: Estados tensionales S22 [Mpa.10⁻³] – Plano YZ para el Modelo 9.2.

Respecto a los vertices del sistema constructivo, se puede apreciar que existe concentración

de tensiones en los mismos. La causa se debe a los cambios de seccion de los muros en la zona donde se ubican la aberturas lo cual refuerza la validez del modelo numérico respecto de su carácter representativo del problema mecánico analizado.

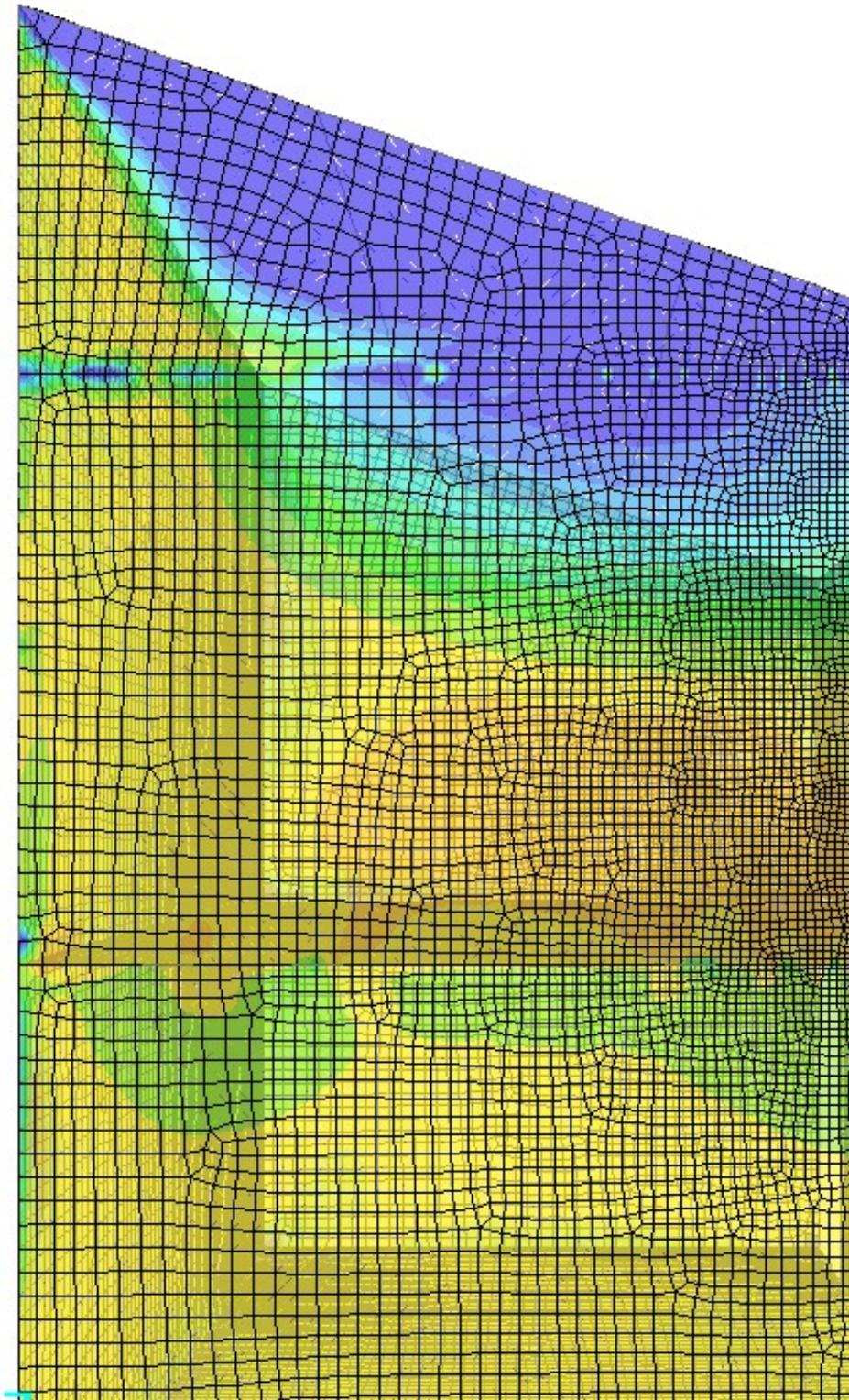


Figura 9.16: Estados tensionales S11 [Mpa.10⁻³] – Plano XZ – para el Modelo 9.2.

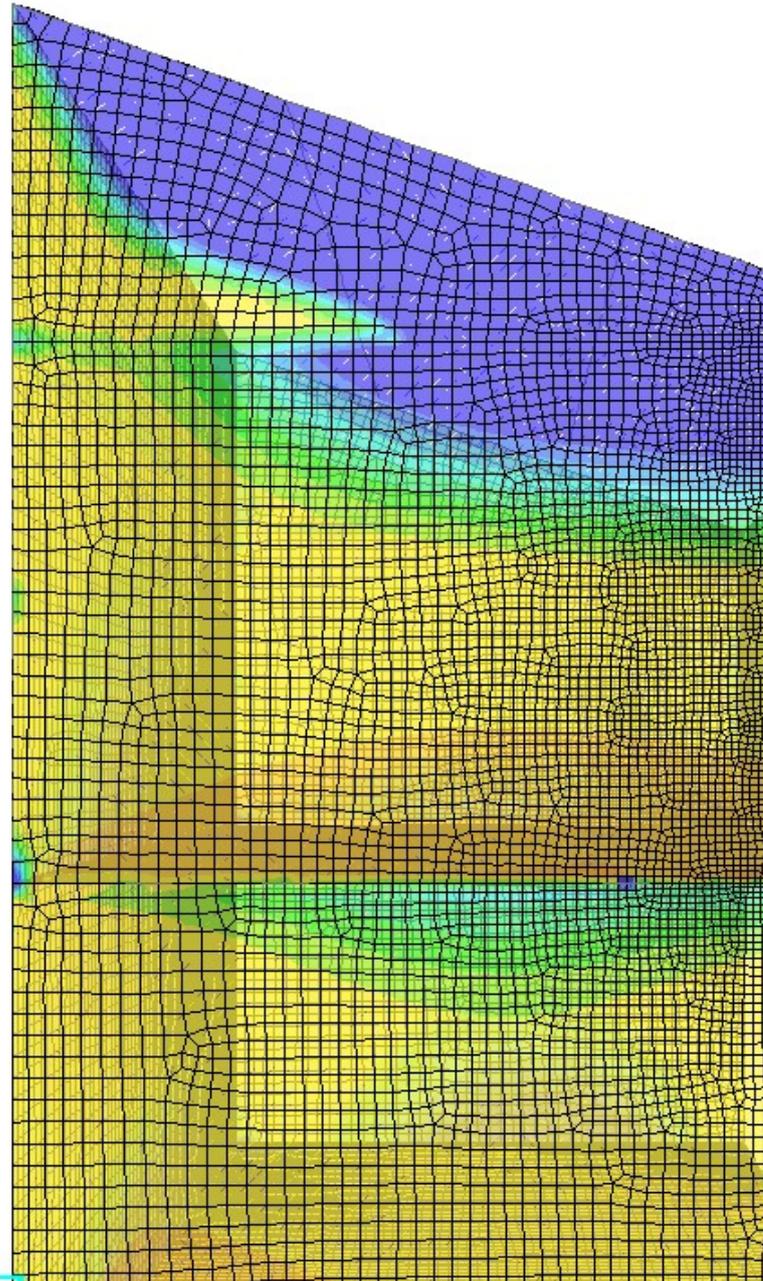


Figura 9.17: Estados tensionales S22 [$\text{Mpa} \cdot 10^{-3}$] – Plano XZ – para el Modelo 9.2.

En las figuras 9.16 y 9.17 se observan tensiones de tracción concentradas en los vértices y aristas superiores del modelo que demuestran el efecto que tiene la succión en la cubierta de techo por la acción del viento. A pesar de esto la magnitud de los esfuerzos se encuentran en sintonía con los valores admisibles establecidos por [CIRSOC 501E, 2013] (ver tabla 6.3 del reglamento, página 19).

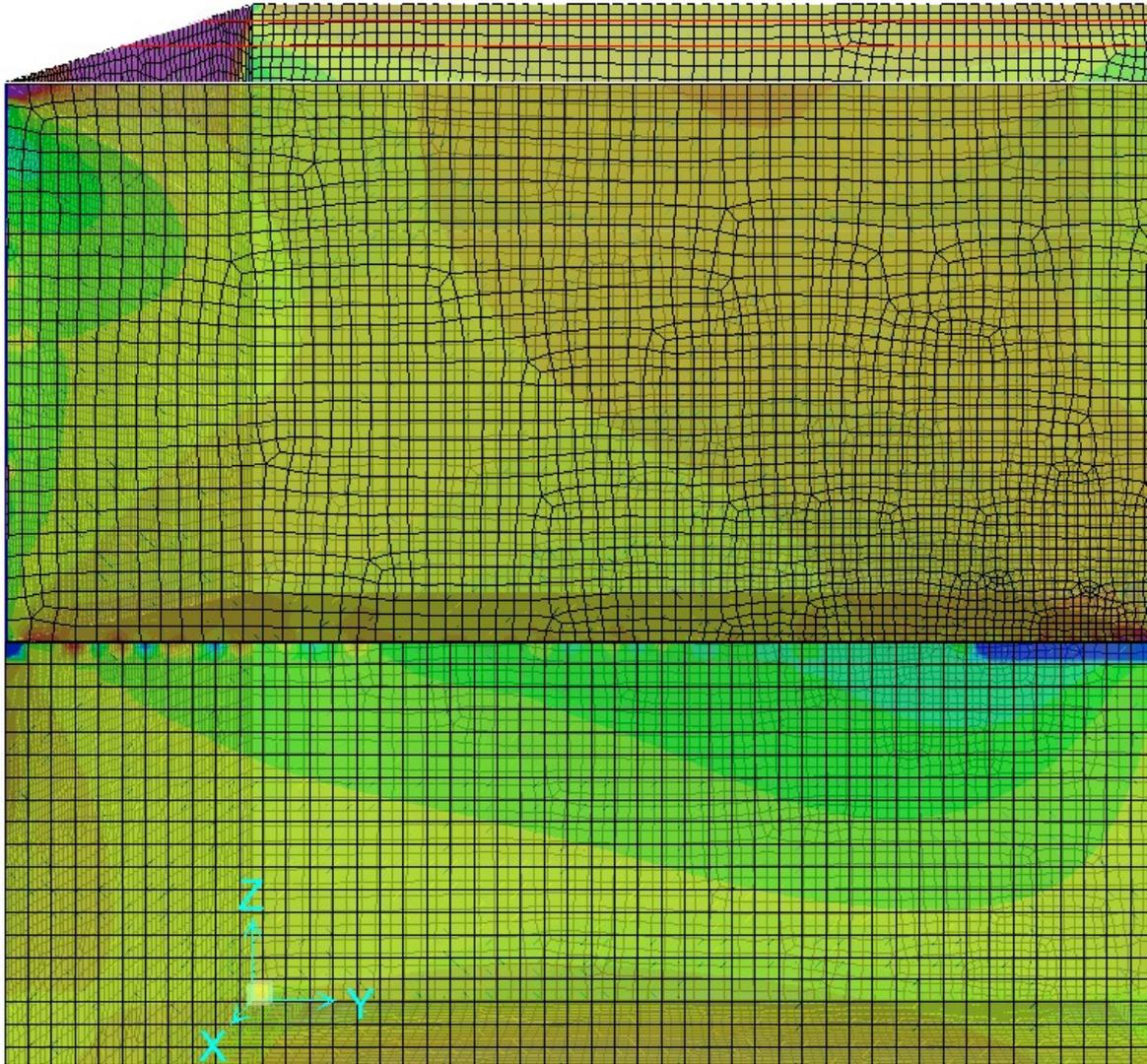


Figura 9.18: Estados tensionales S11 [Mpa.10⁻³] – Plano YZ – para el Modelo 9.3.

A través de las diferentes distribuciones de esfuerzos normales (desde la figura 9.16 a la figura 9.20) se puede observar la recurrencia de los fenomenos observados anteriormente en terminos de: Distribución tensional, concentración, capacidad de representacion del modelo numérico frente al comportamiento real del prototipo estudiado.

Con respecto a los resultados de los modelos numericos y su contraste con los resultados experimentales obtenidos en laboratorios de LIC se puede concluir que los esfuerzos generados en el sistema estructural edilicio por las acciones que son típicas de un problema usual de viviendas sociales, específicamente la respuesta estructural del sistema, muestra un margen de seguridad suficientemente aceptable para establecer la comprobación de la hipótesis del presente trabajo de tesis doctoral.

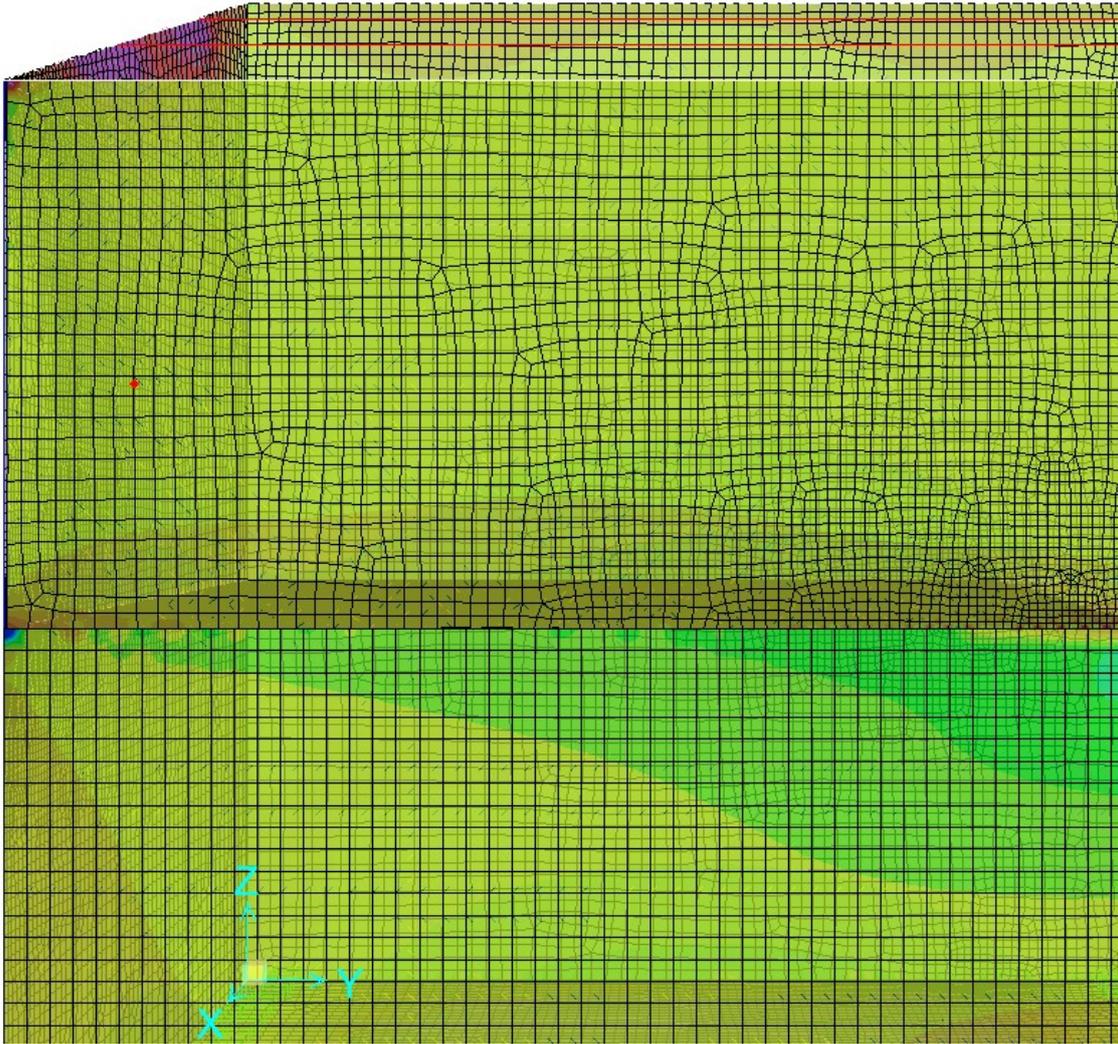


Figura 9.19: Estados tensionales S22 [$\text{Mpa} \cdot 10^{-3}$] – Plano YZ – para el Modelo 9.3.

A continuación se presenta la tabla 9.6 en donde se comparan valores de ensayos a rotura frente a los resultados obtenidos en los modelos numéricos 9.2 y 9.3. la dirección de las tension normal analizada es vertical en ambos casos. En Particular en el caso del ensayo CCBF se calcularon en base a desplazamientos horizontales (ver Capítulo 7) medidos en ensayo cuyos desplazamientos verticales se calcularon utilizando el coeficiente de dilatación (cd). El area considerada es el area neta de las paredes verticales de los ladrillos LCH y en terminos del momento de inercia considerado en el ensayo CEBR no se consideraron las las secciones perimetrales de hormigon armado.

	CELDAS		PANEL CEBR		PANEL CCBF		MODELO 9.2		MODELO 9.3	
	f_c [Mpa]	E_f [Mpa]	f_c [Mpa]	E_f [Mpa]	f_c [Mpa]	E_f [Mpa]	f_c [Mpa]	f_s [Mpa]	f_c [Mpa]	f_s [Mpa]
PROMEDIO	4.661	1673.18	4.49	5791.66	1.89	12101.7	1.94	2.12	1.91	2.59

Tabla 9.6: Comparacion de tensiones limite entre laboratorio y simulación numerica.

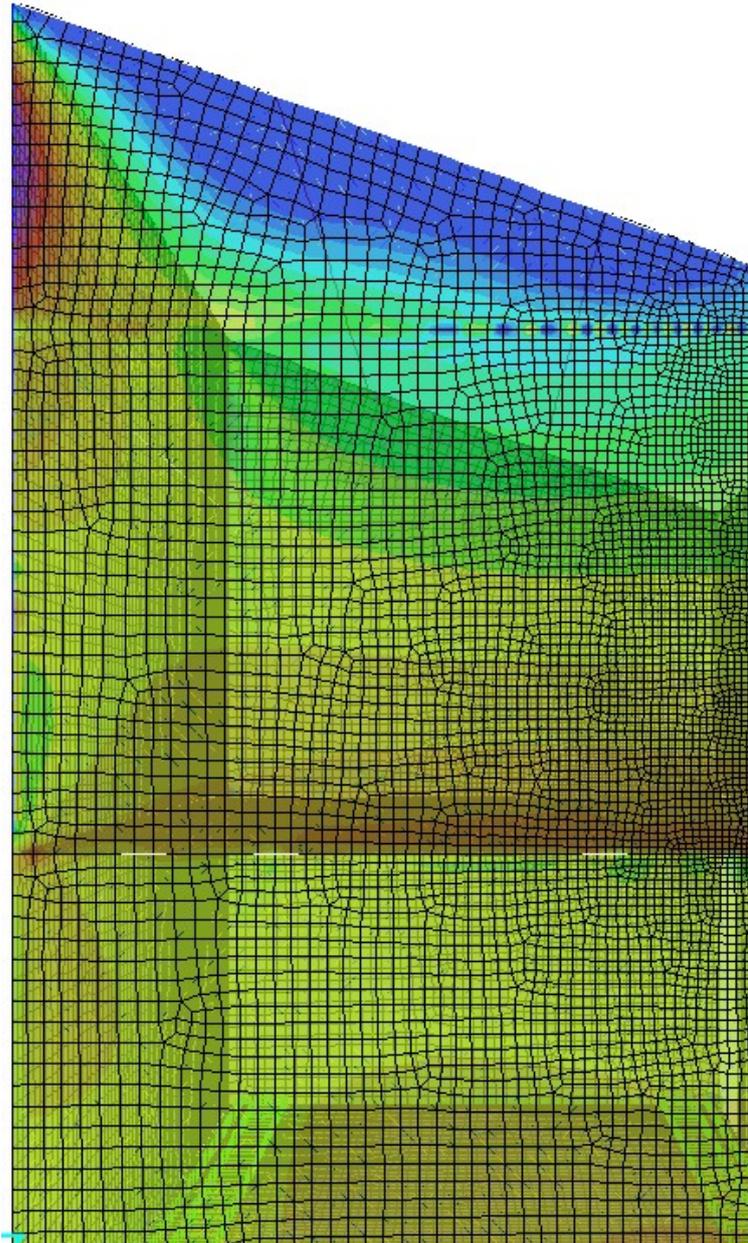


Figura 9.20: Estados tensionales S11 [Mpa.10⁻³] – Plano XZ – para el Modelo 9.3.

En dicha tabla se presentan valores de resistencia a compresión (f_c), resistencia a tracción (f_s) y modulo de Elasticidad previo a la fisuración (E_f).



Figura 9.19: Estados tensionales S22 [$\text{Mpa} \cdot 10^{-3}$] – Plano XZ – para el Modelo 9.3.

Desde el punto de vista de diseño de muros considerando su compartamiento ortotrópico se ha demostrado que es posible obtener resultados utiles en su verificación reglamentaria así como el estudio de sus estados tensionales para avanzar en el campo de la optimización de

estos sistemas.

Respecto a los valores de tensión de tracción se puede comparar con tabla 4.6 en donde se aprecia que los valores de resistencia a tracción medidos en forma experimental son muy cercanos a los valores obtenidos en la simulación numérica. Esto requiere de funciones de forma específicas basadas en XFEM para poder reproducir patrones de agrietamiento en dicha simulación.

Por otra parte queda en evidencia la posibilidad de revisar parámetros límites reglamentarios establecidos en [CIRSOC 501E,2013] dado que los mismos muestran ser considerablemente conservadores, lo cual a la vista de los resultados presentados puede ser objeto de rectificación. Por lo tanto se puede asumir como adecuado al menos la formulación de límites específicos para el caso de ladrillos LCH y a mediano plazo sugerir estudios más detallados en el campo de los demás tipos de mampuestos (ladrillos LM y ladrillos LPM entre otros).

Caba aclarar que las tensiones anlizadas en los ensayos CEBR y CCBF ocurren en presencia de tensiones tangenciales. Para el cálculo de las tensiones principales se deben medir las tensiones tangenciales lo cual no se previó en este trabajo de tesis.

A futuro es importante conjugar los siguientes aspectos: en primer lugar el cambio de consideración de los esfuerzos interactuantes entre elementos de mampostería y Hormigón Armado que permite visualizar un campo de situaciones patológicas que pueden observarse a menudo en los sistemas constructivos que involucran ladrillos LCH y pueden estudiarse desde un enfoque preventivo a efectos de actualizar las disposiciones reglamentarias al respecto.

Esto último además permite establecer la posibilidad de generar diseños sobre la base de un mejor aprovechamiento de los materiales empleados, a partir de herramientas de simulación que permiten abordar el problema de manera más económica en términos de los recursos necesarios (simulaciones numéricas confiables que reducen la necesidad de ensayos destructivos).

Por otra parte queda abierta una línea de trabajo a futuro que consiste en estudiar que sucede en los sistemas de mamposterías al ocurrir patrones de fisuración y cómo impacta el efecto de apertamiento de las paredes internas de los ladrillos en la estabilidad general de la estructura.

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES SOBRE LA INTERACION DE CUERPOS EDILICIOS.

Se ha analizado el problema estructural del comportamiento acoplado de elementos en las construcciones pertenecientes al ámbito de viviendas sociales en la Provincia de Misiones logrando establecer aportes al conocimiento en materia de caracterización de sus materiales componentes.

Es factible establecer además líneas de trabajo a futuro donde seguir obteniendo resultados que permitan optimizar estos sistemas constructivos, importantes para el desarrollo de la comunidad en términos de satisfacer la demanda. Por lo tanto, del presente trabajo de Tesis Doctoral se procede a describir sus conclusiones finales.

Conclusiones del trabajo de Tesis Doctoral.

Respecto a la caracterización de los sistemas constructivos relevados en varias ciudades de la Provincia de Misiones se pudo constatar que las construcciones de viviendas sociales utilizan en gran parte ladrillos LCH para su ejecución y/o ampliación lo cual encuentra justificativo en una cuestión de disponibilidad dado su proceso de fabricación industrializado.

En los mapas obtenidos caracterizando por tópicos los sistemas constructivos en ciertos municipios de la provincia se ha recopilado información importante además de tener la posibilidad de ser un insumo ampliable que permite estudiar datos característicos de los métodos constructivos utilizados en la región en forma geo referenciada que puede servir para iniciar estudios de diversos objetivos no solo inherentes a investigaciones en el campo de la ingeniería estructural sino también en otras áreas científicas.

Con respecto a la caracterización experimental desarrollada se obtuvieron parámetros relevantes (ver Tabla 4.1) para definir el comportamiento mecánico del material analizado (ladrillos LCH) obteniendo: su resistencia a compresión, su resistencia a tracción, su energía de fractura y una estimación de su relación de compatibilidad de deformaciones en direcciones longitudinal y transversal respecto de la dirección de aplicación de la carga.

Se confirmó que el modo de falla de la cerámica como material homogéneo obedece a la forma de respuesta de materiales frágiles como el hormigón o el vidrio con las diferencias lógicas en términos del orden de magnitud de sus parámetros principales.

Respecto a la respuesta de la cerámica como material estructural se confirmó que la resistencia a tracción muestra valores del orden del 15% en promedio de su resistencia a compresión lo cual refuerza el carácter de material frágil como medio homogéneo sometido a acciones mecánicas.

Se concluyó que el material cerámico sometido a compresión en el instante de la primer fisura, reacomoda para continuar absorbiendo esfuerzos de compresión hasta el instante de la rotura. Este comportamiento se vuelve a observar en las etapas subsiguientes cuando se analizó el ladrillo LCH, las celdas y los paneles de Mampostería. Esto permite establecer dos etapas de respuesta estructural en los sistemas resistentes conformados por ladrillos LCH que da lugar a explicar porque el sistema presenta en forma global rasgos de ductilidad al conjunto cuando interactúan mamposterías y elementos de Hormigón Armado.

Los parámetros mecánicos presentados en el Capítulo 4 permitieron formular el material isotrópico utilizado en el capítulo 9 dentro del modelo numérico aplicado a un sistema constructivo de dos pisos, logrando resultados aceptables desde el punto de vista computacional.

En el capítulo 5 se analizó la respuesta estructural del ladrillo LCH sometido a esfuerzos de compresión en forma aislada y se realizaron procedimientos de caracterización entre los cuales se encontraba la geometría de ladrillos LCH. Esta caracterización mostro valores de dispersión bajos en magnitud y la mayoría de sus dimensiones aproximaron aceptablemente a una distribución normal.

Se pudo establecer una correlación entre el modo de falla y el grado de restricción al giro en la intersección (parte interna) entre paredes horizontales y verticales de cada ladrillo. Los indicios registrados en la secuencia de falla captada en los ensayos a rotura por compresión indican la incidencia que tiene esta rigidez nodal interna del ladrillo LCH en la resistencia final de cada mampuesto, dado que el ladrillo falla en sus paredes laterales y continua absorbiendo energía potencial mediante las paredes internas que se encargan de resistir luego de estas fallas.

En los ensayos mostrados en el capítulo 5 se observó el mismo escalón de resistencia al producirse las primeras fisuras tal cual se viera en el capítulo 4. Este comportamiento mecánico en forma potencial puede reproducirse a diferentes escalas lo que permite

elaborar simplificaciones y equivalencias a efectos de establecer procedimientos de simulación numérica.

Respecto al Índice de Deformación Combinado obtenido en el capítulo 5 el mismo arrojó valores que son propios de materiales frágiles como el hormigón con la salvedad de mostrar un ligero incremento que puede argumentarse en la estructura "aportada" que presenta el ladrillo en forma interna dada su estructura.

En los resultados del capítulo 6 se pudo comprobar como la incorporación del mortero de junta produce un efecto de reducir la resistencia a compresión del sistema. A pesar de esto los modos de falla que involucran giros y roturas por flexo tracción en la zona de intersección entre paredes horizontales y verticales persisten. Este hecho refuerza la idea de comportamiento similar a distintas escalas (ladrillo, celda, panel).

A Los modos de falla se agregan en esta parte la falla en el mortero y el deslizamiento en la interface mortero-ladrillo dado según lo observado en la mayoría de los ensayos en los cuales se evidenciaron daños en zonas específicas (juntas verticales y horizontales) en la mayoría de las probetas.

En cada etapa se mantiene cierta correlación entre dos segmentos de carga: un primer segmento correspondiente al periodo elástico en donde no ocurrieron fallas y/o fisuras en el material mampostería y un segmento final de comportamiento elastoplástico que dura hasta el instante de la rotura. Los valores de rotura a compresión en los ensayos realizados en celdas son menores a los correspondientes en ladrillos LCH, se asume que esto se debe a la incorporación del material de junta al material mampostería.

El comportamiento en general mostrado en las celdas ensayadas a compresión mostró pendientes de tipo lineal en las graficas de Tensión-Deformación que se mantuvieron en un orden de magnitud aceptablemente similar entre probetas.

En la etapa experimental correspondiente a paneles de mamposterías se ensayaron dos tipos de situaciones (CEBR: Carga Excéntrica sobre Base Rígida - CCBF: Carga Centrada sobre Base Flexible) en los cuales se manifestaron los modos de falla mencionados con antelación: Rotura en el ladrillo, Rotura en el mortero y deslizamiento en la interface L-M. este hecho sugiere que es necesario atender no solo a mejorar las características de cada material en términos de lograr un adecuado balance entre ductilidad y resistencia sino

además pensar en soluciones que permitan incrementar la resistencia al deslizamiento en dicha interface.

Se comprobó mediante el ensayo CEBR que la respuesta a flexión del panel es limitada en comparación con la resistencia que muestra a esfuerzos de compresión axial centrada lo cual lleva a la conclusión que el papel que juegan los encadenados verticales en los sistemas constructivos de estas características es importante en términos de asegurar un correcto desempeño al soportar acciones en los bordes de las construcciones (cargas producidas por el apoyo de estructuras y cubiertas de techo).

En ensayos de carga centrada y base flexible se volvieron a observar los modos de falla mencionados en ensayos anteriores. Además se comprobó que los sistemas de mamposterías dependen en gran medida de los elementos de hormigón armado por el confinamiento que ocasionan al muro mejorando su respuesta estructural. Los efectos y fallas ocasionadas por asentamientos diferenciales inducidos por cambios en las propiedades físicas y mecánicas del suelo de fundación constituye otro factor de importancia para la opción de combinar estos materiales.

En ambos ensayos en paneles se observó la incidencia que tiene el hormigón armado en el módulo Elástico global (del orden de los 10000 Mpa). En este detalle se comprueba la interacción entre mampostería y hormigón para este caso, que ha sido comprobada con anterioridad en otros tipos de análisis como el desarrollado para diseño sismo-resistente. En conclusión el hormigón y la mampostería LCH colaboran entre sí dando paso a la posibilidad de formular con estos un material compuesto.

Al observar las imágenes tomadas en los ensayos CCBF se observó que el punto clave en la determinación de la respuesta estructural en sistemas constructivos de mamposterías se basa en las intersecciones entre paredes internas (horizontales y verticales) y como esta podrían mejorar la resistencia del material.

Con respecto a la compatibilidad de deformaciones en sentido longitudinal y transversal del sistema se pudo concluir que la respuesta es típica de una material frágil.

Con respecto a las características mecánicas en diferentes direcciones se puede establecer que la resistencia a compresión en dirección paralela a los tubos horizontales es mayor. Por otra parte es importante estudiar a futuro que incidencias en la rigidez global tendrán en este material compuesto los encuentros entre muros.

En el campo de simulación numérica de estos sistemas se obtuvieron metodologías para diversas instancias en donde poder analizar desde el material en su composición primaria para luego entender la respuesta mecánica a diferentes escalas, con la consideración de materiales como el mortero de junta del cual se pudo concluir que incide en el comportamiento global del sistema por sus propiedades mecánicas, y en especial por la geometría de sus espesores, el cual debe ser estudiado en profundidad.

Respecto a la comparación de datos numéricos y experimentales se logró un ajuste aceptable en los modelos abordados a pesar que la aleatoriedad entre experimentos llegó a valores de dispersión considerables. Por lo tanto se debe hacer hincapié en revisar las técnicas de ensayo y proponer intervenciones que colaboren a reducir estas dispersiones.

En términos generales el análisis por simulación numérica brindó resultados esperados y aceptables. Respecto a los estados de fisuración del material en donde se apreció un cambio en el comportamiento, se validó la técnica XFEM como herramienta para analizar este tipo de problemas con mayor profundidad en un futuro cercano.

El esfuerzo de tracción y la energía de fractura del material LCH representan parámetros importantes en las líneas de trabajo a futuro. Se debe apuntar a una recolección de datos estricta y exhaustiva a efectos de poder caracterizar estos factores de manera adecuada en estos materiales de la región.

Los resultados obtenidos al modelar los ensayos de la etapa 2 correspondiente al ladrillo LCH en forma aislada fueron satisfactorios y permitieron validar los modelos propuestos para el campo elástico con aproximación aceptable y suficiente en términos de utilizar la información en un proceso de diseño. Para un análisis orientado a cuestiones de diseño y dimensionamiento es adecuado pensar en elementos de área equivalente alimentados con un material ortotrópico de espesor equivalente. Para analizar problemas de fallas y concentración de tensiones el modelo XFEM equivalente presenta aspectos convenientes y suficientemente adecuados.

El procedimiento planteado para modelar el ensayo CCBF fue implementado en hoja de cálculo electrónica de manera sencilla y ha dado resultados aceptablemente próximos a los experimentales. A futuro se agregarán a sus funciones de forma las expresiones correspondientes al enriquecimiento de nodos que plantea la técnica XFEM (funciones psi y phi – LSM) logrando esto el sistema propuesto podrá arrojar resultados de desplazamientos

compatibles con un sistema de mampostería en situación posterior a la aparición de fisuras y deslizamientos.

En la etapa de modelación correspondiente a la simulación de celdas y paneles de mamposterías en función de los datos obtenidos en laboratorio se pudo concluir que los elementos finitos de área de 4 nodos pueden presentarse como opción válida a la hora de simular el comportamiento mecánico de los sistemas de mampostería combinada con elementos de hormigón armado. Este hecho es importante porque permite una considerable reducción del costo computacional como también la posibilidad de acceder a metodologías de determinación de los esfuerzos en un formato simple el cual puede implementarse en una hoja de cálculo digital siguiendo métodos conocidos (MEF). Para analizar problemas de fallas y concentración de tensiones el modelo XFEM equivalente presenta aspectos convenientes y suficientemente adecuados.

En cuanto a las aplicaciones generadas a partir del presente trabajo de tesis se pudo confirmar que los diafragmas de mamposterías promueven una variación lógica en el tránsito de los estados tensionales que usualmente se consideran exclusivamente a través de elementos lineales de hormigón armado. Al considerar las mamposterías como elemento resistente se produce una reducción de las tensiones sobre elementos de hormigón armado con lo cual se aprovecha la energía potencial disponible en las mamposterías consideradas no portantes hasta esta parte por su alta relación de vacíos, lo cual se ha demostrado que carece de validez a partir de aquí. Un muro de ladrillos LCH con R.V < 60 % puede utilizarse como parte de un sistema estructural. Con esto se valida la hipótesis de la presente Tesis.

Líneas de investigación a futuro.

La interacción entre el suelo de fundación y la estructura merece atención desde el punto de vista siguiente: se debe considerar la importancia de los efectos de segundo orden ocasionados por la deformabilidad presente en el suelo a efectos de contar con parámetros de diseño robustos que permitan obtener sistemas resistentes seguros y optimizados en términos de una solución técnico – económica.

La compatibilidad de deformaciones estudiada mediante técnicas de Correlación de Imágenes Digitales muestra un campo de desarrollo interesante dada las dificultades para montar sobre espesores relativamente reducidos (el espesor de la pared promedia los 175 mm) dispositivos de medición de desplazamientos por lo cual la mencionada técnica digital

de análisis se presenta como una opción válida desde el punto de vista operativo en laboratorio.

Las intersecciones internas entre paredes horizontales y verticales de los ladrillos LCH constituyen un aspecto a evaluar en un futuro próximo a efectos de avanzar en la mejora de las prestaciones del material considerado como estructural el cual presenta características positivas al soportar esfuerzos de compresión, no así en su respuesta a flexión por acción de cargas excéntricas en donde se ven límites que sobre la base de un trabajo de investigación adecuado son posibles de extenderse hacia valores que mejoren la respuesta del sistema mampostería.

A futuro la propagación de fisuras puede analizarse partiendo de modelos basados en técnicas XFEM ampliando lo desarrollado en la presente Tesis. Se sugiere combinar y analizar el material compuesto LCH-H^oA^o basado en modelos numéricos elaborado mediante técnica XFEM.

En el campo de los paneles sometidos a Flexión por carga Excéntrica queda pendiente estudiar la manera de implementar un código de elementos finitos que permita reproducir este efecto en un esquema de modelo de Área con espesor equivalente con fines de plantear un esquema de diseño robusto de bajo costo computacional. sin embargo el módulo equivalente obtenido con los resultados experimentales puede pensarse como un parámetro constitutivo de aproximación suficiente.

Comentarios finales.

A continuación se describen comentarios finales del presente trabajo de tesis doctoral el cual se pone a consideración para la prueba de veracidad de la hipótesis inicial que da origen al mismo y sobre la cual se ha desarrollado el amplio trabajo tanto en lo experimental como en el campo de la simulación numérica con el propósito de brindar un aporte original al campo del conocimiento de la ingeniería estructural orientada a la tecnología de materiales y aplicada a los sistemas constructivos de mamposterías utilizados en emplazamientos habitacionales de viviendas de tipo social.

Por otra parte habiendo validado la posibilidad de plantear métodos numéricos de resolución del problema en los sistemas estructurales que incluyan elementos de mamposterías de manera accesible sin tener que recurrir a modelos de elevado orden de complejidad o de un elevado costo computacional, se abren alternativas para orientar el diseño de estos

sistemas constructivos a un enfoque que considere la probabilidad de falla y la confiabilidad estructural como condiciones de restricción del problema.

La posibilidad de implementar mejoras de este punto de vista permitirá lograr sistemas constructivos igual de seguros a un costo final mejorado para el usuario promedio en términos de recursos económicos lo cual representa un aporte a mejorar la calidad de vida de los integrantes de la comunidad.

Con respecto a las alternativas de diseño propuestas estas permiten proponer como se planteara al principio, son válidas y constituyen el punto de partida para proponer una actualización del marco reglamentario correspondiente a las viviendas de mampostería que involucren compromiso estructural a efectos de proponer instancias y condiciones reglamentarias acordes con lo estudiado para este material en el presente trabajo de tesis.

Con respecto a la matriz de variables de principales para el proceso de optimización del sistema constructivo se puede establecer que las características constitutivas de la cerámica como ser su resistencia a compresión y su energía de fractura son parámetros determinantes en el comportamiento global del sistemas constructivo mientras que la consideración de adoptar un material ortotrópico equivalente basado en la morfología que parte del proceso de extrusión en la fabricación de los ladrillos da una lista de propiedades a tener presentes en un potencial procedimiento de optimización con restricciones de confiabilidad.

A la vista de todos los antecedentes y registros obtenidos y a la vista de los resultados observados tanto en las etapas experimentales como también en las rutinas de simulación numéricas propuestas se llega a la conclusión final de establecer como verdadera la hipótesis del presente trabajo de tesis doctoral en donde se asume que la inclusión de las mamposterías consideradas no portantes por motivos arbitrarios brinda la alternativa de acceder a nuevos paradigmas del análisis estructural en donde poder optimizar las metodologías de diseño impuestas por los métodos convencionales utilizados en la actualidad.

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN RELACIONADOS CON LA PRESENTE TESIS DOCTORAL.

Se presenta a continuación una tabla Resumen a referencia (datos verificables en SASPI).

Código	Proyecto	Inicio	Fin	participación	Situación
16/1128	ANÁLISIS DE SISTEMAS ESTRUCTURALES REGIONALES POR CORRELACION DE IMAGENES DIGITALES	01/07/2015	30/06/2017	DIRECTOR DE AREA TEMATICA	Proyecto investigacion Acreditado
16/11147	IDP CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS ALTERNATIVOS DE MAMPOSTERÍAS REGIONALES	01/01/2020	01/12/2023	DIRECTOR	Proyecto investigacion Acreditado
16/1131	OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS ESTRUCTURALES PARA VIVIENDAS SOCIALES REGIONALES	01/01/2015	31/12/2018	INVESTIGADOR	Proyecto investigacion Acreditado

PUBLICACIONES EN EL MARCO DE LA PRESENTE TESIS.

Asociación Argentina

de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XXXIII, págs. 985-995 (artículo Graciela Bertolino, Mariano Cantero, Mario Storti y Federico T San Carlos de Bariloche, 23-26 Seti

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ENSAYOS MECÁNICOS I MAMPUESTOS REGIONALES DE MISIONES, ARGENTINA

Javier A. Duarte^a, Hugo O. Reinert^a, Fabio D. Gattelli^a, Alicia E. Ares^b, Oscar

^aDepartamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Manuel de Rosas 325, 3360 Oberá, Argentina, duartej@fio.unam.edu.ar

^bCIC-CONICET, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones, Félix de Azara 3200 Posadas, Argentina

Asociación Argentina

de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 2075-2089 (artículo Martín I. Idiart, Ana E. Scarabino y Mario A. La Plata, 7-10 Nov

APROXIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LADRILLOS CERÁMICOS HUECOS MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS

**Javier A. Duarte^a, Fernando R. Detke^a, Hugo O. Reinert^a, Diego A. García
Alicia E. Ares^b y Oscar Möller^c**

^a Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Argentina, jaduarte66ar@yahoo.com

^b IMAM, UNaM, CONICET, FCEQyN, Félix de Azara 1552, Posadas, Argentina

^c Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Consejo de Investigaciones (CONICET), Universidad Nacional de Rosario, Biskamha y Benutti 2000 Rosario, Argentina

Asociación Argentina

de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XXXIV, págs. 3451-345
Sebastián Giusti, Martín Pucheta y Mario
Córdoba, 8-11 Nov

TECNICAS DE CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITAL APLICACION EN SIMULACIÓN DE MAMPOSTERÍAS

Javier A. Duarte^a, Fernando R. Detke^a, Hugo O. Reinert^a, Oscar Möll

^a*Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mis
Manuel de Rosas 325, Oberá, Argentina.*

^b*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Consejo de Investigaciones (C
Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina*

Asociación Argentina

de Mecánica Computacional

Mecánica Computacional Vol XXXVI, págs. 1369-1378 (artículo)
José G. Etse, Bibiana M. Luccioni, Martín A. Pucheta, Mario A.
San Miguel de Tucumán, 6-9 Nov

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CELDAS DE MAMPOSTERÍA MEDIANTE APLICACIÓN DE TÉCNICAS BASADAS EN XFEM

STRUCTURAL ANALYSIS OF MASONRY CELLS BY APPLYING
TECHNIQUES BASED ON XFEM

**Javier A. Duarte^a, Matias Boni^a, Cinthia L. Ferreyra^a, Ariana Seufert^a, Alicia
Oscar Möller^c**

^a*Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de
(UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Argentina, duartej@fio.unam.edu.*

^b*IMAM. UNaM. CONICET. FCEOVN. Félix de Azara 1552. N3300I.OD. Posadas. Ar*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Bakalakos S.; The Extended Finite Element Method for crack propagation problems, National Technical University of Athens, School of Civil Engineering, Department of Structural Engineering, Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research, Athens, Greece, 2017.
- Bakeer T.; “Assessment the stability of masonry walls by the transfer-matrix method”, Engineering Structures 110 (2016) 1–20.-
- Baldan A.; “Adhesion phenomena in bonded joints”; International Journal of Adhesion & Adhesives; 38 (2012) 95–116.-
- Berrios, David R. ; Análisis Experimental y Numérico de la Trayectoria de Propagación de Fisuras por Fatiga Utilizando XFEM - Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú (e-mail: dberrios@pucp.edu.pe, rofranco@pucp.edu.pe) Oct. 2018.-
- Bonifaz E.A. et. Al., Simulación del comportamiento elastoplástico de estructuras bifásicas poli cristalinas de aceros “Dual-phase”. boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio, 341-343. Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT) y Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián (Universidad de Navarra).-
- Brozovsky, J., Maluchova, M., “Estimation of initial elastic properties of 2D homogenized masonry model based on tensor scale indices”. Perspectives in Science (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.032>.-
- Bustos J.L. et al, “Estudio del comportamiento dinámico de un modelo de mampostería encadenada mediante un ensayo en una mesa vibratoria”, Instituto nacional de investigaciones antisísmicas, San Juan, XXIX jornadas sudamericanas de Ingeniería Estructural, noviembre de 2000.-
- Camara Argentina de la construccion, Estimación de la evolución del Déficit Habitacional en la Argentina, Area de pensamiento Estrategico. 2015.-

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

- Chandrupatla T. et Al., Introducción al Metodo de los Elementos Finitos en Ingeniería, Rowan College, New jersey, Versión traducida de Universidad Autónoma de México, segunda edición, ISBN 970-17-0260-3, 1999.-
- CIRSOC 101. “Reglamento Argentino de acciones sobre las construcciones”. Buenos Aires, 2005.
- CIRSOC 201. Parte III. Ejemplos de Aplicación del “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”. Buenos Aires, 2005.-
- Corcuera Sakamoto M., Estudio de investigación para el desarrollo de viviendas sociales de bajo coste en la ciudad de lima – Perú, Universitat politècnica de Catalunya.- <http://es.scribd.com/doc/62623064/till-app> - Noviembre de 2012.-
- Crisafulli F. J., Seismic behaviour of reinforced concrete structures whit masonry infills, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1997.-
- Diasity E. Mosaad, Hassanein, I; Using of XFEM with Meshing Type-T3 for Orthotropic FGM Plate with A Center Crack Parallel to the Material Gradation Under Fixed Grip Loading; Mechanical Engineering Department College of Engineering University of Basrah / IraqAl-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences, Vol. 8; No. 3; 2015.-
- Fogeler M. R.; etnografía y red de parentesco de los colonos escandinavos en las sierras centrales de misiones, tesis de maestría, Programa de Posgrado en Antropología Social, SIP, FHyCS, UNaM, 2007.
- Gallero M.C.; Proceso de poblamiento y migraciones en la Provincia de Misiones-Argentina (1881-1970), Avá N°16 | Diciembre 2009 • Pág. 245, 2010.
- HILLERBORG A., “A model for fracture analysis”, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1978, TVBM-3005.-
- Huynh, H.D., Tran, P., Zhuang, X., Nguyen-Xuan, H., An extended polygonal finite element method for large deformation fracture analysis, Engineering Fracture Mechanics (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.01.024>.-
- IProDHa. Pliego de Especificaciones Técnicas Generales, Prototipo "D/10". Instituto Provincial de Desarrollo Habitacional de la Provincia de Misiones, p.20, 2010.-

- J.J. Brooks, 3 - Composite Models, Concrete and Masonry Movements, Butterworth-Heinemann, 2015, Pages 17-59, ISBN 9780128015254, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801525-4.00003-0>.
- Konstantinos, N.; A novel traction–separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints; International Journal of Solids and Structures journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijsolstr; Shipbuilding Technology Laboratory, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, Greece; 2011.-
- Levington N.; La influencia de la retórica clásica en la arquitectura misional, épocas - revista de la escuela de historia - USAL - NÚM. 1, DIC. ISSN 1851-443X. 2007.
- Lizárraga J.F. et Al.; Modelación no lineal de muros de mampostería elementos de contacto, Revista de ingeniería Sísmica N° 93 41-59, ISSN 0185-092X, Sociedad mexicana de ingeniería sísmica, 2016.
- Lombillo I., “Evaluación no destructiva del patrimonio construido: inspección visual, técnicas acústicas, electromagnéticas y tomográficas”, Universidad de Cantabria. E.T.S. de ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander – grupos.unican.es/gted/archivos/otros/ponencias/aend.pdf - Noviembre de 2012.-
- Martínez Martínez J.L., Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas, Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., “Theoretical Stress Strain Model for confined concrete”. Journal of Structural Engineering, vol. 14, nº 8, pp. 1804-1825, 1984.-
- MOHAMADI S., “XFEM fracture Analysis of composites”, University of Teheran, Iran, 2012, art 3.9, page. 103, ISBN 978-1-119-97406-2, Aptara Inc., New Delhi, India.-
- Mohamed, A.; Hughes, T.G.; Mustapha, A.; “The effect of scale on the structural behavior of masonry under compression”-Construction and building materials 25 (2011) 303-307.-
- Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Quiroz, L. “Confiabilidad de estructuras sismo resistentes utilizando diferentes aproximaciones de la respuesta dinámica no lineal”

Memorias del Séptimo Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción VII EIPAC 2007, CD E08-01. ISBN 978-987-9381-84-7.-

- Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Quiroz, L. "Vulnerabilidad sísmica de estructuras: una aproximación probabilística usando redes neuronales" Memorias XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, CD, 050, AIE. 2006.-
- Moreno Cichela, C. A., Diseño e implementación de un prototipo para la obtención de un punto geográfico y detección de distancias de un punto a otro mediante la tecnología synthetic aperture radar, Escuela de Ingeniería Electrónica y telecomunicaciones, Facultad de ingeniería, Universidad de Riobamba, Riobamba, Ecuador, <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/2777/1/UNACH-EC-IET-2016-0016.pdf> - 2016.-
- Nor-E-Kuda S., Dhanasekar M., Thambiratnam D.; "An explicit Finite Element modelling method for masonry walls under out-of-plane loads", 0141-0296/© - 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.026>.-
- Oller S., Numerical simulation of mechanical behavior of composite materials, Centre Internacional de mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), School of Civil Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain, Springer. (2014).-
- Park, R., Paulay, T. Estructuras de concreto reforzado, Primera Edición, México, Editorial Limusa, 1979.-
- Prone, P. A., Interacción suelo-estructura en construcciones de la Región Pampeana Argentina, VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y X Congreso de Control de Calidad en la Construcción, Asunción, Paraguay, p. 17-25, 2005.-
- Reglamento CIRSOC 501, Estructuras de mampostería, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.-
- Reglamento CIRSOC 501-E Viviendas de mampostería bajo compromiso estructural, Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.-
- Reinert H.O.; evaluación de solicitudes por elementos finitos aplicada a medios continuos, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, mecánica computacional, Volumen XXXII. Number 42. Structural Analysis, ISSN 2591-3522, 2013.

- Takeda, T., Sozen, M. and Nielsen, N. Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, ST12, pp. 2557-2573, 1970.-
- Uarac P., Bidirectional topological optimization with material penalization scheme and displacement constraints, Ingeniare- Revista chilena de ingeniería, vol. 23 N° 1, 2015, pp. 75-84, 2014.-
- Ural A., Firat F.K., Tugrulelçi, M.E., “Experimental and numerical study on effectiveness of various tie-rod, systems in brick arches.- 0141-0296/© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.038>.-
- Velázquez Rangel, A. J., “Indicadores de evaluación de la sustentabilidad de proyectos de viviendas”, Universidad Central de Las Villas, CUBA - <http://www.monografias.com/trabajos15/sustentabilidad/sustentabilidad.shtml> - octubre de 2012.-
- Velázquez Rangel, A. J., Experiencias en la evaluación de proyectos de viviendas con criterios de sustentabilidad, Departamento: Ingeniería Civil Universidad Central de Las Villas. CUBA - <http://www.monografias.com/trabajos44/proyectos-vivienda/proyectos-vivienda2.shtml> - octubre de 2012.-
- Vercher M., A., Mejora de los elementos de transición en XFEM aplicado a Mecánica de la Fractura Elástica Lineal, 2010, Tesis doctoral. Departamento de Mecánica y materiales. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España.-
- Villegas L., “Evaluación no destructiva del patrimonio construido: técnicas basadas en aspectos tensionales”, Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander. - http://grupos.unican.es/.../otros/ponencias/aend_tensionales.pdf – noviembre de 2012.-
- Zahra T., Dhanasekar M., “Prediction of masonry compressive behaviour using a damage mechanics inspired modelling method “, 0950-0618/ 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.048> .-
- Zhang, J. Performance-based seismic design using designed experiments and neural networks, PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada, 2003.-

Interacción estructural de cuerpos edilicios en misiones, argentina.

- Zhang, J., Foschi, R.O. Performance-based design and seismic reliability analysis using designed experiments and neural networks. Probabilistic Engineering Mechanics, 19, 259-267, 2004.
- Zienkiewicz, O.; El metodo de los elementos finitos, editorial Reverte, 1981, ISBN 8429148949, 9788429148947, traducción de Eugenio Oñate Ibañez de Navarra.-