



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

FACULTAD DE INGENIERÍA



TESIS

**PROPUESTA DE PIEZAS PREFABRICADAS DE
FERROCEMENTO CON CONEXIÓN MACHIHEMBRADA**

QUE PRESENTA

MARCO ANTONIO AYALA IBARRA

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA
INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

**OPCIÓN TERMINAL:
CONSTRUCCIÓN SISMO-RESISTENTE**

DIRECTOR DE TESIS

DR. ESTEBAN ROGELIO GUINTO HERRERA

CODIRECTOR DE TESIS

DR. ROBERTO ARROYO MATUS

CHILPANCINGO, GUERRERO, FEBRERO DE 2020

DEDICATORIAS

A mi esposa

Por tu apoyo constante e incondicional en todo momento, por creer en mi para lograr mis objetivos y por ser el motivo más grande que tengo para ser mejor cada día. Por el amor que me das y en el que me has enseñado a creer, te dedico este trabajo.

A mi familia

A mi madre, por educarme y formarme con todo su amor, sin rendirse a pesar de las adversidades que la vida puso en su camino, incluyendo mi carácter.

A mis hermanas, por su cariño interminable, paciencia y apoyo en todos los momentos de mi vida.

A toda mi familia por todos los momentos que me han regalado, toda la sabiduría y experiencia que me han enseñado.

Y a mi padre, que, a pesar de ya no estar presente, su sacrificio sigue haciendo todo esto posible.

A todos ustedes les dedico este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado a través la beca de manutención asignada durante el posgrado y durante la estancia académica.

A la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro), por darme la oportunidad de formarme profesionalmente y brindar las instalaciones adecuadas.

Al núcleo académico básico de la Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico, por su amistad y apoyo durante el posgrado.

A mi director y codirector de tesis, así como a los maestros de la opción terminal construcción sismo-resistente, por sus enseñanzas, comentarios, consejos y platicas que motivaron a la culminación de este trabajo.

A los investigadores y amigos del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca (CIIDIR), por los conocimientos y la amistad brindada.

A todos los revisores de este trabajo, por sus acertados comentarios y por el tiempo que se tomaron para darlos.

A mis compañeros del posgrado, por el tiempo compartido, las platicas y las risas regaladas.

A toda mi familia, amigos y conocidos, que me apoyaron y compartieron sus ideas.

Y a mi esposa, por ser esa gran persona que esta mi lado.

Gracias a todos.

Oficio núm. 030 / 19.

Noviembre 20 de 2019.

**C. MARCO ANTONIO AYALA IBARRA
CANDIDATO A OBTENER EL GRADO
DE MAestría EN INGENIERÍA PARA LA INNOVACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO (MIIDT).
P R E S E N T E**

Por el presente, me permito comunicar a usted que el coordinador de investigación y estudios de posgrados de la Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico (MIIDT), de esta Unidad Académica, ha tenido a bien fijarle como tema de Tesis: **“PROPUESTA DE PIEZAS PREFABRICADAS DE FERROCEMENTO CON CONEXIÓN MACHIHEMBRADA”** con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

- JUSTIFICACIÓN
- ALCANCES
- OBJETIVOS

CAPITULO I. MARCO TEORICO E HIPOTESIS.
CAPITULO II. DISEÑO DE PIEZAS PREFABRICADAS.
CAPITULO III. MODELACIÓN Y ANÁLISIS.

CONCLUSIONES
REFERENCIAS
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Así mismo, se le asigna como Director de Tesis al DR. ESTEBAN ROGELIO GUINTO HERRERA y codirector al DR. ROBERTO ARROYO MATUS.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO



UAGro
Unidad Académica
de Ingeniería

ATENTAMENTE.


Dr. Gustavo Adolfo Alonso Silverio
Coordinador.




Av. Lázaro Cárdenas, S/N.
Ciudad Universitaria, C. P. 39070
Tel: (747) 472 79 43, 471 93 10 Ext. 3635
E-mail: ingenieria@uagro.mx
<http://www.ingenieria.uagro.mx/>
Chilpancingo de los Bravo, Guerrero



ACTA DE APROBACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Chilpancingo, Guerrero, a los veintitrés días del mes de enero del año dos mil veinte, se reunieron los miembros del Comité Tutorial designado por la Academia de Posgrado de la **Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico (MIIDT)**, para examinar la tesis titulada: **"PROPUESTA DE PIEZAS PREFABRICADAS DE FERROCEMENTO CON CONEXIÓN MACHIHEMBRADA"** presentada por el alumno **Marco Antonio Ayala Ibarra**, de la **Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico**, opción terminal: **Construcción Sismo-Resistente**. Después del análisis correspondiente los miembros del comité manifestaron su aprobación de la tesis, autorizan la impresión final de la misma y aceptan que, cuando se satisfagan los requisitos señalados en el Reglamento General de Estudios de Posgrado e Investigación vigente, se proceda a la presentación de examen de grado.

El Comité Tutorial



Dr. Esteban Rogelio Guinto Herrera
Director de tesis




Dr. Roberto Arroyo Matus




Dr. Sulpicio Sánchez Tizapa



M. en C. Roman M. Isidro Alvarado



Dr. Gustavo Adolfo Alonso Silverio
Coordinador de la Maestría MIIDT



M. en C. Edgardo Solís Carmona
Director de la Facultad de Ingeniería

Oficio núm. 011/20

Enero 23 del 2020.

DR. JAIME KAHAN HERNANDEZ
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAGro.
P R E S E N T E

Con Atn: M.A. Rubén Darío Hernández Gonzáles
Jefe del Área de Educación Superior y Posgrado de la UAGro.

Por medio del presente lo saludo cordialmente y al mismo tiempo notifico a usted que el candidato a obtener grado de Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico (MIIDT), con opción terminal: **Construcción Sismo-Resistente**, el **C. MARCO ANTONIO AYALA IBARRA** ha cumplido con los trámites ante el H. Jurado de su Trabajo de Tesis denominado **"PROPUESTA DE PIEZAS PREFABRICADAS DE FERROCEMENTO CON CONEXIÓN MACHIHEMBRADA"**, por lo cual se le autoriza la impresión de su tesis y proceder a los trámites requeridos para presentar **EXAMEN RECEPCIONAL**.

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE,



DR. GUSTAVO ADOLFO ALONSO SILVERIO
COORDINADOR.

OFICIO No.: 8346.
17 DE FEBRERO 2020.

DR. GUSTAVO ADOLFO ALONSO SILVERIO.
COORDINADOR DEL POSGRADO, DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UAGro.
P R E S E N T E.

Por medio del presente, comunico a usted que esta Dirección autoriza (al) (a): LIC. MARCO ANTONIO AYALA IBARRA, del Periodo: 2017-2019, para que presente examen profesional DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO; OPCIÓN TERMINAL: CONSTRUCCIÓN SISMO-RESISTENTE, por medio del TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (TESIS): "PROPUESTA DE PIEZAS PREFABRICADAS DE FERROCEMENTO CON CONEXIÓN MACHIHEMBRADA".

Ya que cumplió con todos los requisitos exigidos por el Artículo 95 Fracción II inciso (A) del Reglamento General de Estudios de Posgrado.

Asimismo, le ruego se sirva señalar la fecha, hora, local y sinodales, para que se lleve a cabo dicho acto.

ATENTAMENTE.



UAGro
DAE | Departamento de
Educación Superior y Posgrado

ADMINISTRACIÓN 2017 - 2021

M. A. RUBÉN DARÍO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ.
JEFE DE DEPARTAMENTO.

RDHG/jasc.



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

Justificación.....	2
Alcances.....	4
Objetivos.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	5

Capítulo I. MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS

1.1 Generalidades.....	7
1.1.1 El derecho a la vivienda adecuada.....	7
1.1.2 Peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico.....	8
1.1.3 La ingeniería asistida por computadora.....	10
1.2 El ferrocemento.....	11
1.2.1 Definición.....	11
1.2.2 Antecedentes y estado del arte.....	12
1.2.3 Características y propiedades.....	14
1.3 Planteamiento de la hipótesis.....	17
1.4 Metodología.....	17

Capítulo II. DISEÑO DE PIEZAS PREFABRICADAS

2.1 Introducción.....	19
2.2 Diseño de piezas.....	19
2.2.1 Tipo de junta.....	20
2.2.2 Piezas rectangulares.....	28
2.2.3 Piezas esbeltas.....	30
2.3 Proceso de ensamblaje.....	33
2.4 Propuesta de aplicación.....	35

Capítulo III. MODELACIÓN Y ANÁLISIS

3.1 Introducción.....	41
3.2 El método del elemento finito.....	41
3.2.1 Esfuerzos y equilibrio.....	42
3.2.2 Condiciones de frontera.....	44
3.2.3 Relaciones deformación unitaria-desplazamiento.....	45
3.2.4 Relaciones esfuerzo-deformación unitaria.....	46
3.2.5 Preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento.....	47

3.3	Simulación de ensaye a compresión simple.	48
3.3.1	Configuraciones iniciales	49
3.3.2	Conexiones o contactos	51
3.3.3	Discretización o mallado	54
3.3.4	Condiciones de frontera	56
3.3.5	Solución del modelo	57
3.3.6	Interpretación de resultados	59
3.4	Simulación de ensaye de carga uniformemente repartida	63
3.4.1	Preprocesamiento	64
3.4.2	Procesamiento	66
3.4.3	Posprocesamiento	67
3.5	Modelo analítico de propuesta de vivienda	68
3.5.1	Determinación de las solicitaciones sísmicas	68
3.5.2	Preprocesamiento	70
3.5.3	Procesamiento	72
3.5.4	Posprocesamiento	72
	CONCLUSIONES	79
	REFERENCIAS	82
	LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	85

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La vivienda, como una de las necesidades básicas del ser humano, lo ha llevado a proyectar todo tipo de refugios, explorando una amplia variedad de materiales y formas que mejor se adapten a su medio. La industrialización del proceso de elaboración de muchos de los elementos empleados en la construcción hoy en día, permiten seguir explorando alternativas en los diseños que mejoren las condiciones de vida para los sectores más desfavorecidos de la población. Una de las maneras de reducir los costos de construcción consiste en acortar tiempos, y una forma de lograrlo es por medio de la implementación de elementos prefabricados, con los que además se tienen mejores condiciones de control de calidad durante su elaboración.

Sin embargo, los prefabricados requieren un alto grado de especialización desde su diseño, hasta su producción industrializada en masa. Debido a esto, las simulaciones asistidas por computadora, han adquirido gran importancia en el proceso de diseño de elementos innovadores prefabricados, ya que además de economizar es posible investigar una mayor variedad de alternativas que permiten mejorar dichos elementos.

Esta investigación propone una serie de diseños innovadores de piezas prefabricadas de ferrocemento con conexión machihembrada, que pueden ser implementadas en la construcción de muros para la edificación de viviendas. En el capítulo I, se tratan las generalidades respecto al tema del derecho a la vivienda, el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico, y la ingeniería asistida por computadora; posteriormente se presentan algunas definiciones del ferrocemento, así como sus características y propiedades.

En el capítulo II, se describe el proceso de diseño conceptual de las piezas y se define el tipo de conexión empleada, detallando los elementos mecánicos que la componen. Además, se propone una distribución arquitectónica empleando dicho diseño de piezas que será posteriormente analizado bajo condiciones de carga sísmica.

Por último, en el capítulo III, se detalla el proceso de modelado numérico empleado para simular las condiciones de los ensayos que establece la norma. De igual forma se describe el procedimiento para determinar las sollicitaciones sísmicas de la propuesta de vivienda para su análisis y revisión de resultados.

JUSTIFICACIÓN

En los últimos años el acelerado incremento de la población global, la desigualdad económica, el aumento de los desastres naturales y los conflictos armados en las zonas no desarrolladas ha llevado a los seres humanos a una migración poblacional masiva, provocando un crecimiento descontrolado de las ciudades, que en la mayoría de los casos produce una desigualdad social entre los ciudadanos (González Fraile, 2009). Más del 75% de la población en América Latina reside en áreas urbanas con una tasa de pobreza alrededor del 40% (Hábitat, 2000). Este crecimiento descontrolado genera

nuevos asentamientos humanos conocidos como barrios marginales, favelas, campamentos, barrios populares, tugurios, entre muchos otros; en estas zonas los hogares son construidos con materiales vulnerables a eventos naturales; por lo tanto, uno de los desafíos para la comunidad mundial es mejorar las condiciones en las que se vive en gran parte de los países en desarrollo.

La vivienda es una de las necesidades principales para los seres humanos, el incremento en la demanda de vivienda globalmente es simultáneo al de la población y la pobreza, por lo que en los últimos años se han promovido planes para mejorar el bienestar y las condiciones de vida de la población humana, entre los que se promueve el acceso a una vivienda justa y digna como un derecho fundamental de los ciudadanos (Hábitat, 2000); la vivienda digna es necesaria para el desarrollo de cualquier individuo y la sociedad en la que se desenvuelve.

El derecho de las personas a la vivienda es enunciado en la mayoría de las constituciones de los países y a nivel internacional diversos tratados protegen el derecho de las personas a adquirir una vivienda adecuada, la cual según la Estrategia Mundial de la Vivienda, preparada por la ONU, para que sea considerada como adecuada, debe cumplir como mínimo con los siguientes criterios: Seguridad jurídica, disponibilidad de servicios e infraestructura, asequibilidad, habitabilidad, accesibilidad y una ubicación adecuada (ONU-Hábitat, 2010).

Las políticas públicas de vivienda en México siempre se han orientado a resolver problemas de déficit de vivienda de la clase obrera, empleados de gobierno, militares, gremios e incluso campesinos; marginando otros estratos sociales económicos (Del Rivero & Romero Pérez, 2010). Para los mexicanos, la vivienda digna es un derecho constitucional, pero a causa de una urbanización acelerada de la población, la migración masiva de las zonas rurales a las zonas urbanas, una economía poco equitativa y además el creciente número de desastres naturales, el número de personas sin hogar ha aumentado en los últimos años, así como la práctica de la construcción informal regularmente sin el apoyo técnico y sin cumplir las normas y leyes correspondientes, aumentando la vulnerabilidad de la vivienda ante fenómenos naturales.

Actualmente existen diversas alternativas en la construcción de viviendas, pero debido a los altos costos de los materiales para la construcción en los países en desarrollo, como México, existe una creciente demanda, por lo que es necesario buscar técnicas y materiales que permitan construir las de manera rápida, económica y además sean estructuralmente seguras. Las viviendas populares en las zonas pobres del país generalmente utilizan los materiales más comunes en la región: Adobe, palma, carrizo, madera, bajareque, entre otros. Estos materiales presentan una baja resistencia ante eventos sísmicos, lo que aumenta el riesgo de catástrofes en las zonas con alta actividad sísmica, como es el caso del estado de Guerrero (Catalán Casiano, 2010).

Por otro lado, la búsqueda de materiales que se comporten de manera adecuada ante sollicitaciones sísmicas ha llevado a investigar el ferrocemento como un material estructural y sismo-resistente. En muchas partes del mundo, el ferrocemento se ha usado

como solución de vivienda de bajo costo. Piezas prefabricadas de ferrocemento, usadas en muros, han demostrado una alta resistencia estructural ante los esfuerzos ocasionados por un sismo (Bedoya, 2005).

Las propiedades y bajo costo de producción del ferrocemento lo ha vuelto un material alternativo para la construcción de diversos tipos de estructuras, como tanques de agua, piscinas, esculturas, canales de riego, perfiles estructurales, edificaciones, viviendas, entre otros. Además, estudios recientes han demostrado que es posible sustituir totalmente la arena por agregado fino reciclado (AFR) en la elaboración del mortero, usado en la fabricación de paneles de ferrocemento, lo que representa una alternativa sostenible en el aprovechamiento de este tipo de residuos (Mattey Centeno, Robayo-salazar, Torres Rico, Ramos Barragán, & Delvasto Arjona, 2015).

El uso del ferrocemento como material estructural para la construcción de viviendas ha sido investigado en diferentes países alrededor del mundo, se han ensayado paneles y muros sometidos a cargas estáticas, cuasi-estáticas y dinámicas, permitiendo conocer el comportamiento sísmico del material para proponer soluciones alternativas de vivienda económica y confiable.

ALCANCES

En el presente trabajo se busca una alternativa constructiva industrializable, haciendo uso del ferrocemento para diseñar piezas prefabricadas enfocadas en la construcción de viviendas de un nivel, dichas piezas serán empleadas como principal elemento estructural en la construcción de muros.

Por medio de simulaciones numéricas se analizará el comportamiento y desempeño del diseño de las piezas propuestas y la conexión entre las mismas. Dichas simulaciones replicarán las especificaciones y métodos de ensayo para paneles de uso estructural aplicados en sistemas constructivos, desarrollados por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE); así como el análisis de una propuesta de aplicación de las piezas en una vivienda. Los resultados permitirán determinar si es factible invertir en la elaboración de las piezas para realizar los ensayos necesarios para su producción e industrialización.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar y analizar una serie de piezas prefabricadas industrializables de ferrocemento, así como un sistema constructivo que permita un ensamblaje rápido entre las mismas, con el fin de proporcionar una alternativa para la construcción de muros de vivienda económica y segura.

Objetivos específicos

- Investigar las propiedades mecánicas del ferrocemento, así como sus fases de trabajo y los esfuerzos presentados durante las mismas.
- Diseñar piezas que faciliten y agilicen la construcción de viviendas en términos que resulten económicos.
- Definir el tipo de conexión que se empleará para el ensamblaje entre las piezas.
- Identificar el diseño de la distribución arquitectónica que mejor se adecue a la implementación de piezas en el proceso constructivo.
- Analizar el diseño de las piezas por medio de simulaciones de ensayos establecidos por la normatividad mexicana para la certificación de productos para la construcción.
- Analizar el diseño de las piezas implementándolas en una propuesta de vivienda de un nivel que con un sistema constructivo innovador permita agilizar tiempos de construcción.
- Revisar los resultados de las simulaciones para determinar si son necesarias modificaciones al diseño, o bien, es factible en una siguiente investigación, invertir en la elaboración de las piezas para someterlas a una serie de ensayos.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS

1.1 Generalidades

1.1.1 El derecho a la vivienda adecuada

La configuración reciente de los asentamientos humanos en América Latina se distingue por una urbanización acelerada, donde la migración entre los centros urbanos ha reemplazado a la migración campo-ciudad. En México, casi la mitad de los desplazamientos entre distintos estados se originaron y tuvieron por destino a otras ciudades; sin embargo, los índices de desigualdad económica se han mantenido en niveles altos, provocando una segmentación social al interior de las ciudades, donde los requerimientos de exclusividad residencial de los grupos con altos ingresos han llevado a la expulsión de los grupos pobres a las zonas periféricas o de alto riesgo en hogares precarios con carencias de servicios y equipamientos (Hábitat, 2000).

La falta de vivienda es un fenómeno que existe desde las primeras grandes civilizaciones, pero no es hasta hace algunas décadas que surge una conciencia social sobre el problema habitacional a nivel global, es por ello que diversos organismos internacionales han decidido promover objetivos y planes para mejorar el bienestar y las condiciones de vida de los ciudadanos (González Fraile, 2009). La acelerada urbanización actual eleva la demanda de viviendas, se estima que para el año 2030, alrededor del 40% de la población mundial necesitará tener acceso a una vivienda, infraestructura y servicios básicos (ONU-Hábitat, n.d.).

La Declaración Universal de Derechos Humanos de 1948 indica que toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado que le asegure, entre otras cosas, una vivienda adecuada para la persona y su familia (Naciones Unidas, 1948). Desde entonces, otros tratados internacionales de derechos humanos han reconocido el derecho a una vivienda adecuada como la protección del hogar y la privacidad. Dado que la mayoría de los países alrededor del mundo han confirmado al menos un tratado internacional, se han comprometido, mediante declaraciones y planes de acción, a proteger el derecho a una vivienda adecuada. En muchas de las constituciones se asegura el derecho a una vivienda en condiciones adecuadas para todos.

Para que una vivienda pueda considerarse como una “vivienda adecuada” debe cumplir con las siguientes condiciones: Seguridad de la tenencia, que garantice protección jurídica contra el desalojo forzoso. Disponibilidad de servicios e infraestructura, como agua potable, instalaciones sanitarias, alumbrado, etc. Asequibilidad, es decir, que tenga un costo accesible y no dificulte el disfrute de otros derechos humanos de sus ocupantes. Habitabilidad, la vivienda debe garantizar seguridad física ofreciendo protección contra frío, humedad, lluvia y otros riesgos para la salud o peligros estructurales. Accesibilidad, que se les conceda a los grupos vulnerables o desfavorecidos recursos que les permitan conseguir una vivienda adecuada. Ubicación, la vivienda debe permitir el acceso a las opciones de empleo, servicios de atención a la salud, escuelas y otros servicios sociales.

Y por último la adecuación cultural, la vivienda es adecuada cuando se toma en cuenta y se respeta la expresión de la identidad cultural (ONU-Hábitat, 2010).

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece, en su artículo 4o, que “toda familia tiene derecho a disfrutar de una vivienda digna y decorosa. La ley establecerá los instrumentos y apoyos necesarios a fin de alcanzar tal objetivo” (Secretaría de Gobernación, 2014). Este enunciado sugiere que no se requiere adquirir una vivienda para poder disfrutarla, pero por el sentido de seguridad, realización y pertenencia, la motivación y el objetivo fundamental están en la adquisición de la misma. En los últimos años se ha sugerido cambiar los conceptos de vivienda digna y decorosa por el de vivienda adecuada, ya que este se va enriqueciendo por las aportaciones de los organismos internacionales (Del Rivero & Romero Pérez, 2010).

1.1.2 Peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico

Una de las manifestaciones más impactantes de la naturaleza sin duda es el fenómeno sísmico, la destrucción de estructuras creadas por el hombre y las pérdidas humanas, demuestran lo devastador de este fenómeno (Dumova-Jovanoska, 2000). Las últimas catástrofes sísmicas ponen en evidencia la necesidad de que las nuevas filosofías de diseño, proporcionen estructuras resistentes que permitan preservar las vidas humanas y que se cumpla con las normativas de diseño que consideran los movimientos sísmicos, de esta forma se avanza en la prevención de catástrofes (Bonett Díaz, Pujades Beneit, & Hurtado Gómez, 2003).

Se denomina peligro sísmico a la probabilidad de que se produzcan determinadas aceleraciones del suelo en una región, dentro de un periodo específico de tiempo; mientras que la vulnerabilidad sísmica representa la predisposición de una estructura a ser afectada y sufrir daños ante la ocurrencia de un evento sísmico y está asociada con sus características físicas y estructurales de diseño. Entonces, el riesgo sísmico es definido como el grado esperado de pérdidas sufridas por una estructura vulnerable durante un sismo, por lo que también depende de su costo o valor, ya sea económico, social, humano, etc. (Barbat, Canas, & Yopez, 2010).

Más del 50% del territorio de México está sujeto a una alta actividad sísmica y es propenso a experimentar terremotos fuertes, debido a la interacción de cinco placas tectónicas y a fallas regionales importantes (Fig. 1.1). Cada año ocurren en promedio más de 90 sismos con magnitud mayor a 4 en la escala de Richter, y un análisis probabilístico indica que México puede esperar un sismo con magnitud mayor a 8 cada 33 años y mayor a 7 cada 10 años (Carpenter e IIASA, 2000). Un mapa sísmico de México lo divide en cuatro zonas clasificándolas por su grado de exposición al peligro sísmico (Fig. 1.2). Este mapa permite conocer de manera general el peligro sísmico que tiene un área determinada. Esta clasificación es empleada por los reglamentos de construcción para indicar los requisitos mínimos que deben seguir los proyectistas, diseñadores y constructores en las edificaciones.



Fig. 1.1 Mapa de placas tectónicas en México.



Fig. 1.2 Peligro sísmico en México (CFE, 2008).

De acuerdo al Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero (1994), esta entidad federativa se encuentra en las zonas sísmicas C y D, las cuales son catalogadas con peligro alto y severo, respectivamente. Alrededor del 85% de los municipios del estado están en una zona sísmica con peligro severo; en general, también se presenta una vulnerabilidad alta en las viviendas y edificaciones del estado. La vivienda popular en Guerrero es de adobe, se estima que aproximadamente 52% de la población habita en una construcción de este tipo, sin embargo, este material es uno de los más vulnerables ante el efecto de movimientos sísmicos. Algunas viviendas han colapsado de forma muy rápida ante sismos moderados, causando pérdidas económicas y, en el peor de los casos, la muerte de sus ocupantes (Arroyo Matus, Sanchez Tizapa, & Guinto Herrera, 2010)

La región costera de Guerrero se caracteriza por una brecha sísmica angosta y bien definida, abarcando una extensión de 230 km, en la que no se ha registrado actividad sísmica mayor a una magnitud a 7 desde 1911 (Fig. 1.3). Debido a las fuertes tensiones entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana, causadas por subducción, se espera que en un momento dado provoquen un terremoto fuerte (Nishenko y Singh, 1987). Investigaciones en los últimos años han detectado una anomalía en el movimiento habitual de la placa Norteamericana, su desplazamiento cambió de dirección durante un lapso de 6 meses (Kostoglodov et al., 2003), y aunque es cierto que este movimiento inusual podría implicar una reducción en la tensión acumulada, el riesgo sigue siendo latente.

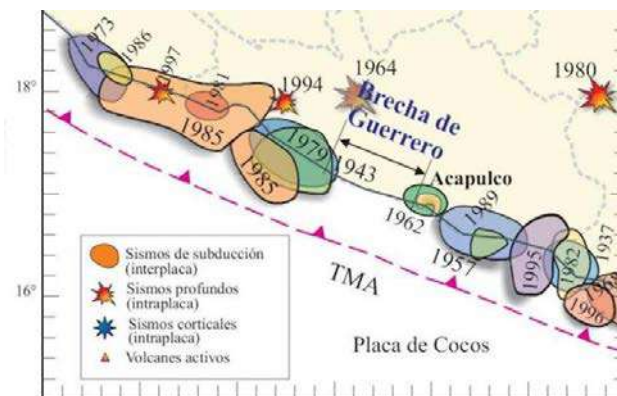


Fig. 1.3 Brecha sísmica en el estado de Guerrero.

1.1.3 La ingeniería asistida por computadora

La ingeniería asistida por computadora (CAE, por sus siglas en inglés) es el uso generalizado de software para ayudar en las tareas de análisis de ingeniería. Incluye análisis de elementos finitos (FEA), dinámica de fluidos computacional (CFD), dinámica de múltiples cuerpos (MBD), durabilidad y optimización. El término abarca la simulación, validación y optimización de productos y herramientas de fabricación. En el futuro, los sistemas CAE serán los principales proveedores de información para ayudar a apoyar a los equipos de diseño en la toma de decisiones.

Se puede definir a la simulación dentro del campo de las ciencias como la imitación aproximada de la operación de un proceso o sistema. (Johannes, 1976) Define a la simulación de la siguiente manera: "Es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias para el funcionamiento del sistema". Tradicionalmente, el modelado de sistemas ha sido a través de un modelo matemático, con el que se intenta encontrar soluciones analíticas.

El uso de la simulación en el proceso de diseño puede aportar muchos beneficios que permiten ahorrar tiempo y dinero en el desarrollo de productos innovadores. La fabricación y prueba de prototipos puede tomar una cantidad significativa de tiempo, sin embargo, debido a que la simulación permite que los diseños se prueben virtualmente. A través de la experimentación de diseño virtual, la innovación más rápida (diseño creativo de productos y el proceso de hacer mejoras a través de la introducción de nuevas ideas) puede hacerse realidad con la ayuda de la simulación.

El análisis y optimización tiene gran importancia dentro del diseño asistido por computadora. La mayoría de los componentes de ingeniería son de forma compleja para los métodos de análisis de esfuerzos clásicos. Tratar de determinar la solución para un problema complejo, requiere una simplificación, sin embargo, se pueden obtener resultados inexactos. Un enfoque numérico alternativo llamado método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés), usado en conjunto con software para el dibujo asistido por computadora (CAD, en inglés), permite obtener mejores aproximaciones de la solución. Este método considera que la región de la solución está compuesta por muchas subregiones pequeñas e interconectadas llamada elementos finitos. Los cálculos de deformación y esfuerzo en cualquier punto de ese elemento luego de que las propiedades de rigidez se derivan utilizando teorías de elasticidad. Las propiedades de los elementos se ensamblan para representar la rigidez de toda la región (Fig. 1.4).

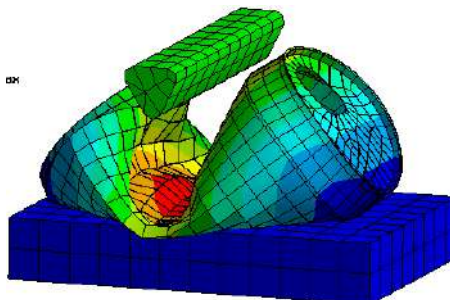


Fig. 1.4 Análisis de esfuerzos por el método del elemento finito en una lata.

1.2 El ferrocemento

En la actualidad, existe una permanente búsqueda de nuevas formas de reducir tiempos en la construcción. La innovación tecnológica puede traducirse en mejoras dentro de los procesos, los productos y en los servicios. La prefabricación de los elementos es una alternativa que ha ganado tendencia en los últimos años, se han comercializado a nivel industrial diversos elementos prefabricados, como losas compuestas por viguetas pretensadas, paneles para muros de vivienda, zapatas, etc.

La prefabricación es concebida como un método industrial de construcción en el que los elementos son fabricados en serie con técnicas de producción masiva, sin embargo, las técnicas de prefabricación, no sólo están enfocadas en la fabricación de los elementos, sino que también, la automatización de otras fases, como la colocación, el anclaje en el sitio y el transporte. Estas mejoras son posibles gracias a la construcción con precisión dimensional que resulta de la producción en serie con técnicas, máquinas y métodos industriales.

El ferrocemento es un material ideal para la prefabricación e industrialización gracias a sus características para fabricar elementos de pared delgada; es un material versátil, adaptable a una gran diversidad de formas y técnicas de construcción, ideal para explorar e innovar técnicas de producción en serie. En los procesos de construcción de elementos prefabricados, el control de calidad de los materiales y los procesos deben estar dirigido por una persona experimentada, aunque la mano de obra pueda no ser calificada (Bedoya, 2005).

1.2.1 Definición

Joseph-Louis Lambot, su inventor, lo define como un nuevo material que ayuda a remplazar a la madera ante el daño causado por humedad; en su patente, Lambot lo denomina “fer-ciment”, que se traduce literalmente como hierro-cemento (Fig. 1.5), y lo describe como “un nuevo producto que consta de una red de alambres metálicos o barras que son conectadas o formadas como un tejido flexible, a la cual se le da la forma del objeto que se desea construir. Este tejido es rellenado con una mezcla cementante, generalmente de cemento hidráulico” (Paul & Pama, 1981).

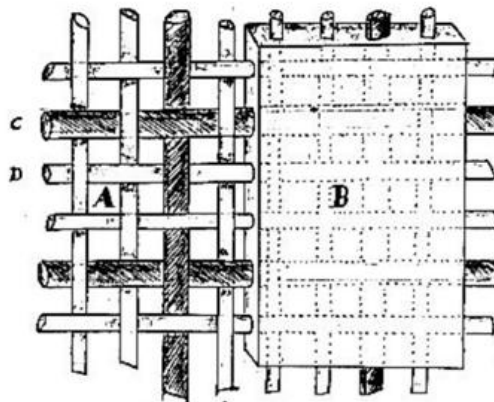


Fig. 1.5 Sección descrita en la patente del ferrocemento.

El Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) define al ferrocemento como un tipo de concreto armado de pared delgada, comúnmente utilizado con mortero de cemento portland y reforzado con capas de malla de alambre continuas y de diámetro relativamente pequeño (Standars ACI, 2013).

1.2.2 Antecedentes y estado del arte

Existe evidencia del uso de morteros reforzados con fibras desde los tiempos del imperio Romano y sumerio. Sin embargo, la invención del ferrocemento se le atribuye al francés Joseph Luis Lambot, quien desde 1848 comenzó a construir maceteros, asientos, entre otros artículos, pero fueron los botes con remos su producto más popular construido con ferrocemento, uno de ellos de 3.66 metros de longitud y 1.22 metros de ancho con una pared entre 2.5 a 3.8 cm de espesor, fue con el que dio a conocer su patente en la exhibición de París de 1855, este bote se encuentra actualmente en el museo Brignoles, Francia mostrado en la Fig. 1.6 (Naaman, 2000).

El ferrocemento es considerado como predecesor del concreto reforzado, sin embargo, debido a la incapacidad de la industria de la época para producir en masa las mallas metálicas, se desechó su uso por muchos años. Durante la Primera Guerra Mundial se usó el concreto reforzado para la construcción de embarcaciones, pero no es hasta los años 40 cuando el ingeniero – arquitecto Pier Luigi Nervi retomó la idea del ferrocemento. Observó que reforzando el concreto con capas de malla de alambre obtenía un material con las características mecánicas de un material homogéneo. Por medio de una serie de pruebas estableció las características preliminares del ferrocemento, determinó que el ferrocemento es un material altamente flexible, elástico y resistente a la tracción (Paul & Pama, 1981).

Nervi usó el ferrocemento para la construcción de la cubierta del salón principal del palacio de exposiciones de Turín, Italia, construido en 1948 y el cual cuenta con un claro de 96 metros de longitud (Fig. 1.7). Experimentó también usando el ferrocemento para la construcción de bodegas y sus propias embarcaciones. Las diversas e innovadoras aplicaciones que le dio al ferrocemento en la mayoría de sus proyectos le han dado el crédito como reinventor de este material (Chiorino, 2012).



Fig. 1.6 Bote de ferrocemento construido por Lambot.

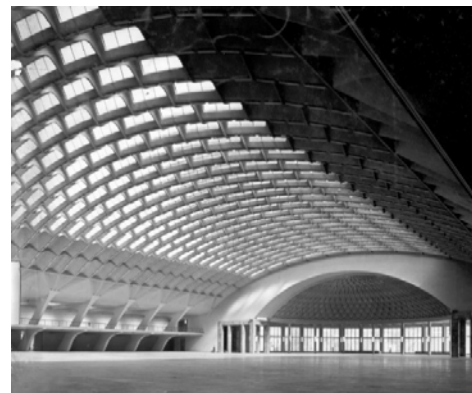


Fig. 1.7 Cubierta del salón de exposiciones del Palacio de Turín, Italia.

Desde entonces las aplicaciones del ferrocemento se han diversificado, algunas de las más importantes en Latinoamérica durante los años 70 han sido la construcción de botes de pesca, barcasas prefabricadas de gran tamaño, tanques de agua, esculturas, viviendas y albercas. A partir de los años 90, han surgido nuevas aplicaciones en México, desarrolladas por ingenieros del CIIDIR en Oaxaca, principalmente el uso del ferrocemento en la construcción de una pequeña presa. A su vez, el arquitecto ecologista Javier Senosiain ha diseñado y construido casas de un gran valor estético (Wainshtok Rivas, 2015).

En las últimas décadas, las aplicaciones del ferrocemento se han expandido gracias a las diversas investigaciones desarrolladas por fundaciones creadas en los años 70, como el Internacional Ferrocement Information Center (IFIC) en el Asian Institute of Technology, o el comité 549 del American Concrete Institute (ACI), dedicado al estudio del ferrocemento. En México, el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (IMCYC) ha realizado investigaciones relacionadas con el ferrocemento y sus aplicaciones en la construcción de viviendas como material prefabricado.

El ferrocemento ha sido usado de distintas formas en los procesos constructivos de viviendas, requiriendo diferentes niveles de tecnología; por un lado, los domos de ferrocemento han sido usados en procesos autoconstructivos como cubiertas, o para construir habitaciones o casas. Para la fabricación de paneles tipo sándwich con aislamiento integrado de poliestireno se requiere una tecnología de mayor nivel, por lo cual se obtiene una mejor calidad en estos productos. Las viviendas modulares integradas hechas principalmente de ferrocemento han sido sugeridas en varios estudios técnicos, pero la aplicación real de estos sistemas ha sido muy limitada. Por lo antes dicho, a mayor grado de integración y sofisticación, es posible un mayor nivel de industrialización (Naaman, 2000).

Se han identificado cuatro sistemas constructivos de vivienda con ferrocemento: construcción in situ, construcción con elementos modulares prefabricados, construcción con paneles prefabricados y construcción de casas móviles (González Fraile, 2009); como elemento común todos cuentan con muros de pared delgada, una de las características principales del ferrocemento. Los elementos prefabricados, sin embargo, requieren cierto nivel de tecnología más industrializado.

A mediados de los años 70, el Ing. Alfonso Olvera López, construyó casas con elementos prefabricados de ferrocemento (Fig. 1.8), desarrollando un sistema constructivo para edificaciones de uno y dos pisos con paneles ligeros de diferentes secciones y distintos tipos de conexiones, el sistema fue diseñado para permitir flexibilidad en los diseños arquitectónicos (Bedoya, 2005). En 1979, J. Castro construyó 350 viviendas de bajo costo utilizando paneles prefabricados de ferrocemento elaborados con barras de acero tradicional de 6 mm, formando una rejilla con aberturas cuadradas de 250 mm de lado, envuelta con dos capas de malla hexagonal. Los paneles fueron unidos por medio de tornillos y tuercas (Castro, 1979).

Investigadores del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), perteneciente al Instituto Politécnico Nacional, publicaron en el año 2006 un artículo en el que se estudia el comportamiento de un muro construido con

paneles prefabricados de mortero armado y sometido a compresión simple y diagonal. Los investigadores oaxaqueños elaboraron paneles prefabricados que se colocan de manera alterna con uniones atornilladas (Fig. 1.9). Elaboraron modelos con SAP2000 donde introdujeron las propiedades del material y aplicaron cargas a compresión simple y diagonal, detectando que la concentración de los esfuerzo mayores era circuncidante a los tornillos (López-Calvo, Jiménez-Quero, & Cano-Barrita, 2006).



Fig. 1.8 Vivienda construida en México con paneles de ferrocemento (Naaman, 2000).



Fig. 1.9 Paneles prefabricados de mortero armado (López-Calvo et al., 2006).

La Universidad Autónoma de Guerrero ha realizado investigaciones relacionadas con el ferrocemento. En el año 2010, se realizaron estudios a cascarones de ferrocemento, como una alternativa para la construcción de viviendas. En esta investigación se hizo la modelación y el análisis de los cascarones mediante SAP2000, considerando las características del ferrocemento aplicados a este tipo de estructura. Se le aplicó una carga horizontal al modelo y se pudo determinar los esfuerzos cortantes dentro del cascarón, lo que sirvió de referencia para comparar con los ensayos llevados a cabo en esta misma investigación (Catalán Casiano, 2010).

1.2.3 Características y propiedades

El ferrocemento es a menudo descrito en la bibliografía como un material asombroso que no se fractura y que tiene una variedad de propiedades sorprendentes. En efecto, el ferrocemento puede ser considerado como un modelo a pequeña escala de un súper concreto reforzado, que de hecho sí se fractura, pero estas fracturas son tan pequeñas que no son visibles a simple vista (Naaman, 2000).

Uno de los componentes esenciales del ferrocemento es la malla de alambre, sus características como refuerzo metálico son determinadas por su tipo y tamaño. La malla se forma con alambres delgados entretejidos o soldados, es necesario que sea fácil de manejar y lo suficientemente flexible para adaptarse al diseño deseado. Su función principal es actuar como marco para dar la forma deseada y para sostener el mortero en estado fresco; una vez endurecido el mortero, la malla absorbe los esfuerzos de tensión de la estructura, que el mortero por sí solo no puede soportar. El mortero es el material adhesivo o matriz en el ferrocemento, regularmente se obtiene al mezclar cemento Portland, arena común y agua. Las propiedades del mortero son dadas por el tipo y

calidad de los materiales que lo constituyen, la proporción en que están dados, sus condiciones de preparación y algunos factores ambientales. (Lezama Tirado, 1985).

Al igual que el concreto tradicional, la resistencia del ferrocemento es considerada como su propiedad más valiosa; su durabilidad y permeabilidad son otras de sus propiedades más valoradas en la práctica. La resistencia del ferrocemento da una idea general de la calidad del material compuesto, debido a su relación directa con las propiedades de la mezcla de mortero endurecida y el refuerzo. Se han observado tres niveles de comportamiento cuando se somete a esfuerzos de tensión crecientes una muestra de ferrocemento (Tabla 1.1). Estos niveles se clasifican de acuerdo al ancho de las grietas presentadas, estudios experimentales sobre el comportamiento de muestras de ferrocemento a tensión, muestran una curva típica de esfuerzo-deformación, como la mostrada en la Fig. 1.10. La curva idealizada de una sección de ferrocemento a tensión y compresión es mostrada en la Fig. 1.11. En el rango elástico el ferrocemento actúa como un material homogéneo, la curva de esfuerzo deformación es lineal y se forman microgrietas invisibles a simple vista; en el rango de agrietamiento, la curva de esfuerzo-deformación se aparta de la linealidad, y se observa un incremento del número de grietas, las cuales son muy finas y se ha observado que están en función de la superficie específica del refuerzo; en el rango de fluencia, ya se ha desarrollado el número máximo de grietas, las cuales sufren un ensanchamiento a velocidad uniforme hasta llegar aproximadamente a 100 micras, entonces el refuerzo soporta todas las fuerzas a tensión (Paul & Pama, 1981).

Tabla 1.1 Fases de trabajo, esfuerzos y alargamiento del ferrocemento bajo cargas de tensión (Paul & Pama, 1981).

Nivel	Nivel del material	Comportamiento	Ancho de grietas, en micras*	Esfuerzos s20, s50, s100 kg/cm ²	Alargamiento unitario ε20, ε50, ε100 x10 ⁻⁶
I	Linealmente elástico	Impermeable			
Ia	Casi elástico	Impermeable	0-20	33	200
Ib	No linealmente elástico	No corrosivo I	20-50	36	290
II	Elasto-plástico	No corrosivo II	50-100	43	645
III	Plástico	Corrosivo	> 100		

*1 micra = 1x10⁻⁶m

Para contenidos bajos de malla, la resistencia a compresión es inferior a la del mortero, pero aumenta para grandes cantidades de refuerzo. El tipo y la orientación de las mallas influyen y reducen la resistencia a compresión. Las mallas hexagonales, orientadas en la dirección de la carga, son menos efectivas que las mallas cuadradas soldadas en la misma dirección. Si las mallas se colocan de tal manera que proporcionen confinamiento a la matriz de mortero, las propiedades mejoran notablemente (Bedoya, 2005).

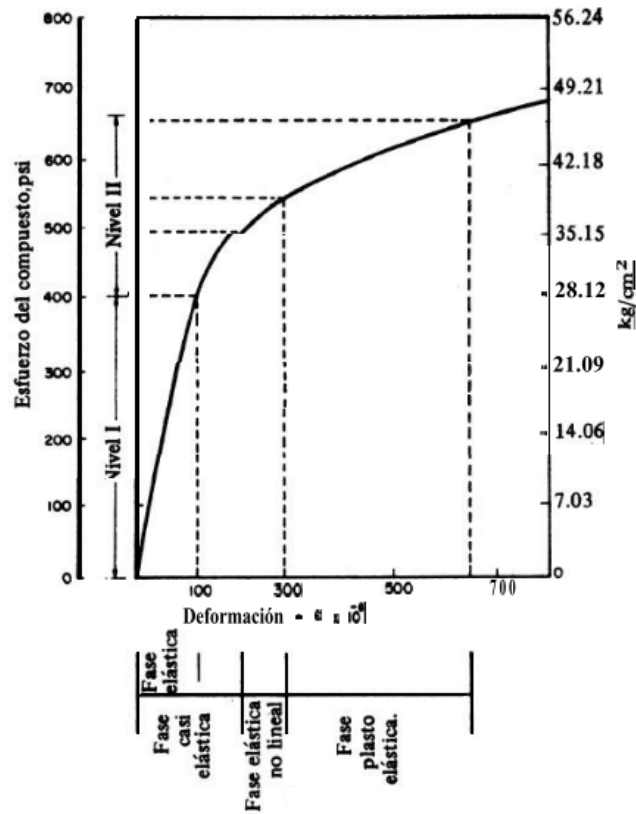


Fig. 1.10 Curva experimental de ferrocemento a tensión (Paul & Pama, 1981).

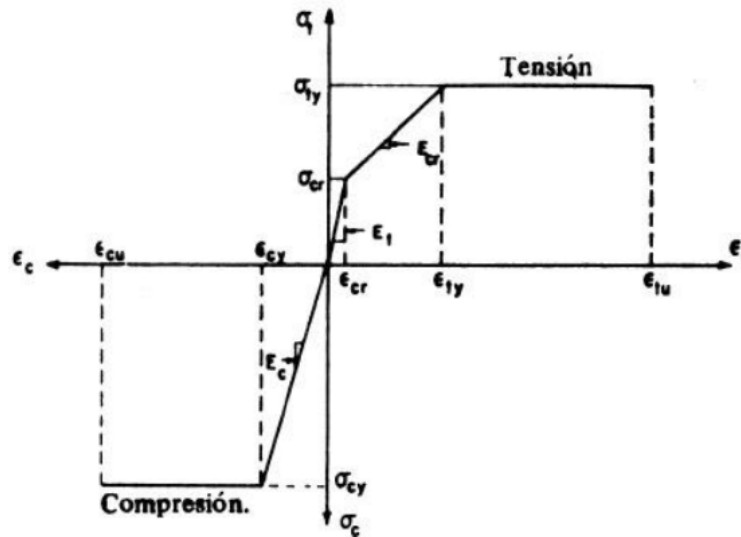


Fig. 1.11 Curva idealizada de ferrocemento a tensión y compresión (Paul & Pama, 1981).

Diversos estudios experimentales han demostrado que el módulo de elasticidad a compresión directa aumenta proporcionalmente con el aumento de acero. Se puede omitir la contribución del refuerzo para determinar la resistencia última a la compresión del ferrocemento. Se ha demostrado que bajo presión, la resistencia última a la compresión es menor que la del mortero puro equivalente hasta un 85% (Paul & Pama, 1981)

1.3 Planteamiento de la hipótesis

Las propiedades del ferrocemento, su bajo costo de producción, así como el uso de mano de obra no especializada, vuelven a este material una opción viable para experimentar con innovadores sistemas constructivos aplicados en viviendas sismo-resistentes. A través del diseño, la modelación y la simulación de los elementos y acciones que compongan al sistema se podrá conocer una estimación de los niveles de esfuerzos a los que se someterían dichos elementos. Estos resultados servirán para determinar si es necesario cambios en el diseño y si es factible invertir en un programa de pruebas experimentales.

1.4 Metodología

El estudio consiste en evaluar el comportamiento de una propuesta innovadora de piezas prefabricadas, con las que se pueda desarrollar un sistema constructivo en el que se aplica una unión machihembrada entre sus elementos y verificar si su implementación es viable dentro una propuesta de vivienda; para ello es necesario definir el diseño de los elementos que conformarán a dicho sistema y un diseño preciso de sus componentes, por lo que la primera etapa consiste en diseñar los elementos o piezas necesarias.

Una vez definidas las dimensiones y el diseño geométrico de las piezas, es necesario determinar que su ensamblaje será posible. Mediante simulaciones animadas de los modelos de las piezas se comprobará la factibilidad de ensamblaje entre sus elementos con las características geométricas de su diseño y se establecerá un procedimiento de ensamblaje para muros en intersecciones y esquinas.

Posteriormente se define una distribución arquitectónica que cumpla con los espacios mínimos establecidos por la norma y se procede a estudiar su comportamiento estructural con un análisis estático, de acuerdo a la norma, en un software especializado en el elemento finito.

De este análisis se obtendrá información que ayude a diseñar el refuerzo necesario para las piezas o mejorar, si es necesario, el diseño geométrico de las mismas. Los parámetros de análisis y diseño serán tomados considerando que las piezas serán fabricadas con materiales de zonas cercanas a la ciudad de Chilpancingo, Gro., y la vivienda se analizará en la condición más desfavorable, es decir, en un terreno tipo III de la zona sísmica D, considerando las especificaciones del Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero (1994).

CAPÍTULO II. DISEÑO DE PIEZAS PREFABRICADAS

CAPÍTULO II. DISEÑO DE PIEZAS PREFABRICADAS

2.1 Introducción

La prefabricación es el procedimiento mediante el cual se fabrican por piezas los elementos y componentes que luego serán llevados a su lugar de ensamblaje; dichas piezas se unirán a otros elementos para así ser parte de una estructura completa. Uno de los motivos principales de la prefabricación es contribuir a industrializar una actividad que durante siglos se ha desarrollado con técnicas artesanales. (Arandes Renu R., 1974). La industria es uno de los pilares de este desarrollo, aunque no necesariamente la prefabricación puede lograrse a partir de un proceso industrial, ya que tiene sus orígenes en métodos artesanales. Por ejemplo, el ladrillo puede ser elaborado de manera artesanal, pero en los últimos años la industrialización de su proceso de elaboración ha resultado en un control de calidad adecuado de sus propiedades.

En la construcción de viviendas la prefabricación ofrece la ventaja de ser económica, duradera y versátil. Además, estandarizar la construcción usando plantas modernas permanentes con procesos eficientes de fabricación, mano de obra calificada, incremento en los estándares de calidad, así como buscar a través de la investigación nuevos productos, sistemas y procesos, permite brindar seguridad en los diseños nuevos. El empleo de maquinarias de producción brinda una buena calidad probada y constante de los materiales que son determinados, dosificados y controlados. Las piezas prefabricadas poseen precisión geométrica garantizando ensamble con exactitud.

En la primera parte de este capítulo se presentan algunos antecedentes de las juntas y la conexión empleada para el diseño de las piezas estudiadas en esta investigación, así como los elementos mecánicos que la componen; posteriormente se describe el proceso de diseño de las piezas prefabricadas propuestas en el estudio, sus principales características geométricas y su implementación en un proceso constructivo basado en el ensamblaje rápido proporcionado por una junta seca. Por último, en este capítulo, se propone la aplicación de las piezas prefabricadas en un modelo de vivienda emergente con muros de carga y cubierta ligera.

2.2 Diseño de piezas

En esta investigación el enfoque del diseño de los elementos está orientado en minimizar los tiempos de ensamblaje de una vivienda a base de muros estructurales, construidos con piezas prefabricadas de ferrocemento; gracias a la versatilidad de este material se explora una conexión machihembrada entre sus elementos como una alternativa de junta seca, este tipo de conexión permitirá realizar ensamblajes en cortos periodos, además de brindar una versatilidad en la distribución de los espacios de la vivienda.

2.2.1 Tipo de junta

En la construcción, las juntas son aquellas zonas donde se da la unión entre los elementos, en ellas es necesario dar continuidad a dichos elementos para el mejor desempeño de la estructura en conjunto. La junta seca, o también conocida como unión de montaje, es usada en sistemas constructivos basados en la unión básica de sus elementos, esta técnica tiene sus orígenes en los métodos de construcción más antiguos, donde no se hacía uso de cementantes para unir los elementos, en cambio, era necesario dar una forma precisa a cada elemento para su correcto funcionamiento dentro del sistema (Carrión U., 2017); esto puede verse, por ejemplo, en los muros levantados por la civilización H inca en Sacsayhuaman (Fig. 2.1), donde se tienen bloques de piedra esculpidos con una alta precisión, todos con diferentes formas, que en conjunto conforman el ensamble mecánico del sistema. Otro ejemplo, son los muros con aparejo regular de sillares conectados con grapas de hierro en la arquitectura griega (Fig. 2.2).



Fig. 2.1 Junta seca en muro de piedra de Sacsayhuaman.



Fig. 2.2 Muro de sillares en la arquitectura griega.

En un sistema constructivo que emplea la junta seca, los elementos deben contar con una preparación exacta para formar parte de la construcción, específicamente la unión, lugar donde convergen varias piezas terminadas, íntegras, en su forma y dimensión, lo que hace posible su montaje y desmontaje de ser necesario (Carrión U., 2017). En la construcción moderna industrializada, las piezas prefabricadas pueden ser diseñadas y moldeadas prácticamente en cualquier forma, lo que ha permitido un resurgimiento de la junta seca como una alternativa económica.

Se ha mencionado anteriormente que en esta investigación se explora una conexión machihembrada, la cual está compuesta por dos partes importantes, denominadas como su nombre lo indica, macho y hembra. Existe una gran variedad de formas que se pueden dar a los materiales para poder lograr un ensamblaje de este tipo. Las más básicas han sido usadas en estructuras de madera desde hace mucho tiempo, por ejemplo, la conexión machihembrada caja y espiga (Fig. 2.3), es ampliamente usada alrededor del mundo para conectar marcos en viviendas; o las conexiones machihembradas cola de pato, que se emplean tradicionalmente en la unión de elementos horizontales para conformar muros en esquina (Fig. 2.4).



Fig. 2.3 Conexión machihembrada caja y espiga.



Fig. 2.4 Conexión machihembrada cola de pato.

La conexión machihembrada conocida como cola de pato o cola de milano, es ampliamente usada en la construcción de muebles y viviendas de madera. En este tipo de conexión (ver Fig. 2.5) se tiene una forma de trapecio (C) en un extremo del elemento (B), más ancha por la cabeza (apéndice) que por el arranque (cuello) y se puede ensamblar, ajustándose a un hueco igual de otra pieza (A), para que se abrace a ella apretadamente, sin que pueda salir ni moverse.

El diseño considerado en esta investigación hace uso de un tipo específico dentro de esta clasificación de unión, denominada conexión deslizante de cola de milano (Fig. 2.6). Con ella será posible integrar al diseño geométrico de las piezas la conexión misma, sin hacer uso de tornillos ni piezas extra.

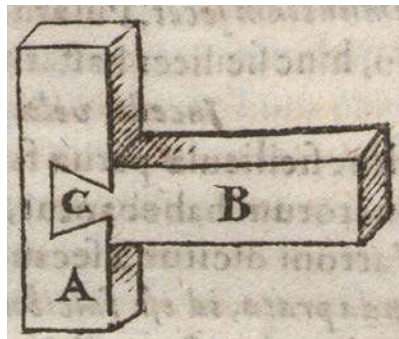


Fig. 2.5 Componentes de la conexión machihembrada cola de pato.

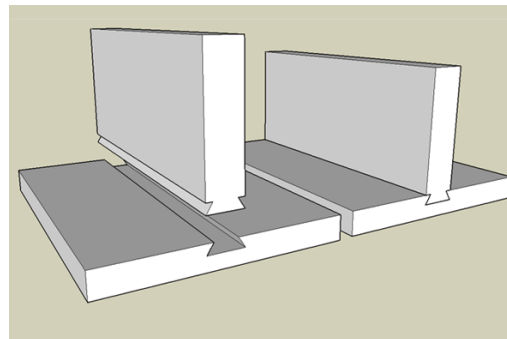


Fig. 2.6 Conexión deslizante cola de milano.

Investigaciones en las últimas décadas han estudiado los elementos mecánicos que componen a este tipo de conexión (Chen, Qiu, & Lu, 2016), en ellos se hace un estudio sobre su comportamiento flexible y las relaciones que existen entre el momento y la rotación que se presenta en marcos de madera, así como los modos de falla obtenidos mediante pruebas experimentales bajo cargas monotónicas. También llevaron a cabo una simulación numérica para examinar la distribución de los esfuerzos y las deformaciones.

Ma et al. (2019) estudiaron el desempeño sísmico de conexiones machihembradas con diferentes grados de daño, nuevamente en marcos de madera. Identificaron tres casos principales de daño: Tensión, compresión y daños mixtos. Usando un análisis teórico para el caso de falla a tensión, propusieron una ecuación para determinar los momentos

resistentes de la conexión. Mediante un análisis por elemento finito simularon cargas cíclicas; sus resultados indicaron que no hay cambios en la capacidad de disipación de energía de las juntas dañadas por tensión y se presenta un buen desempeño sísmico cuando dicho daño no excede 2/5 partes de la longitud de la junta.

Ambas investigaciones usaron un modelo analítico simplificado para calcular la relación momento-rotación de las juntas machihembradas cola de milano. En este modelo se consideran las siguientes suposiciones básicas:

- 1) La deformación por flexión a lo largo de la saliente (parte macho) es despreciada.
- 2) Cuando se produce el forzamiento de la junta, entre las áreas longitudinales y las áreas transversales, la deformación sólo ocurre en las áreas transversales.
- 3) Como ambas caras de la conexión entre la saliente y la ranura (parte hembra) están bajo compresión en la dirección transversal, la deformación por compresión en la saliente es igual a la deformación por expansión de la ranura en la misma posición.

Las deformaciones generales de la saliente relativas a la ranura pueden ser representadas por una rotación (θ) y por un desplazamiento (δ_0) causado por el efecto de jalar/retirar la conexión, ver (Fig. 2.7).

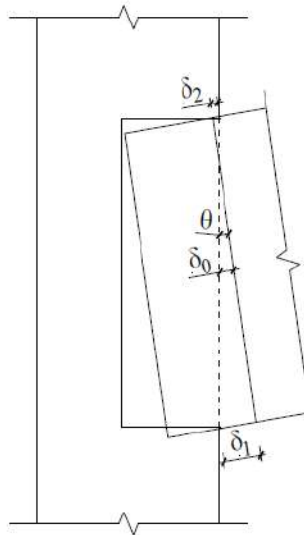


Fig. 2.7 Deformaciones características de la conexión machihembrada.

Es posible deducir los valores de θ y δ_0 a partir de los desplazamientos relativos medidos en la parte superior e inferior, δ_1 y δ_2 respectivamente, en pruebas experimentales, donde:

$$\theta = (\delta_1 - \delta_2)/l \quad (2.1)$$

$$\delta_0 = (\delta_1 + \delta_2)/2 \quad (2.2)$$

Donde l es la distancia entre las lecturas δ_1 y δ_2 (longitud de la conexión).

El momento flexionante ejercido en la junta machihembrada (M) puede ser calculado como:

$$M = Pl_2 \quad (2.3)$$

Donde P es la carga aplicada al otro extremo del elemento conectado ensayado, y l_2 es la distancia desde la carga aplicada hasta la conexión (Chen et al., 2016).

Las dimensiones y condiciones geométricas antes y después de la deformación de una conexión cola de milano son mostradas en la Fig. 2.8 y Fig. 2.9.

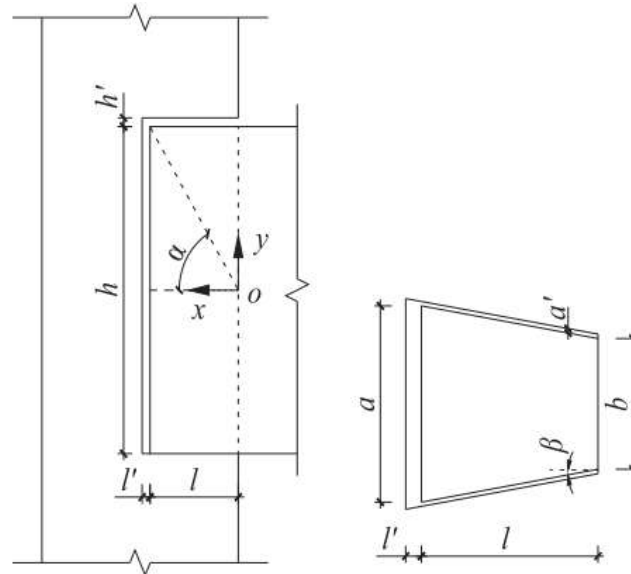


Fig. 2.8 Condiciones geométricas de la conexión cola de milano antes de los desplazamientos.

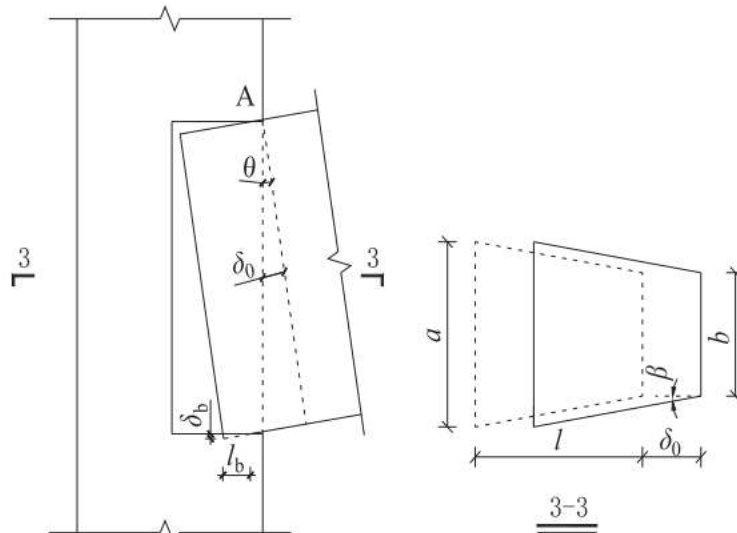


Fig. 2.9 Condiciones geométricas de la conexión cola de milano después de los desplazamientos.

La longitud y la altura de la saliente son denominados como l y h respectivamente, los espesores del apéndice (es decir, la parte final de la conexión) y el cuello de dicha saliente (la zona contigua al elemento), son denominados a y b respectivamente. La separación de las caras del apéndice, la parte superior y los lados, respecto a las caras de la ranura, son denominados como l' , a' y h' respectivamente. Debido a que el elemento conectado soportará cualquier movimiento hacia el interior en la parte superior del cuello de la saliente, la conexión rotará en un punto fijo "A" (Fig. 2.9), por lo que la cara del apéndice (la cara final) difícilmente entrará en contacto con la cara de la ranura, lo que representa que la cara del apéndice se encuentra efectivamente libre de esfuerzos. Se definen los ángulos α y β , como se muestra en la Fig. 2.8. Los subíndices "b", "t" y "s" significan inferior, superior y caras laterales de la saliente, respectivamente.

La intersección entre el cuello de la saliente y el centro del elemento es definida como el origen del sistema de coordenadas x-y (punto "o" en la Fig. 2.8). La dirección positiva del eje "x" (horizontal) es hacia la izquierda y la dirección positiva del eje "y" (vertical) es hacia arriba. Dadas estas condiciones geométricas la deformación por compresión en la parte inferior y la longitud de la superficie de contacto pueden ser estimadas.

Como se mencionó anteriormente, la relación entre la separación por extracción de la conexión δ_0 , la altura h y la rotación θ puede ser expresada como:

$$\delta_0 = 0.5h\theta \quad (2.4)$$

La máxima deformación vertical por compresión en la zona inferior de la saliente puede ser expresada como:

$$\delta_b = l \sin(\alpha + \theta) / \cos \alpha - 0.5h - \delta_0 \sin \theta - h' \quad (2.5)$$

La longitud de la superficie de contacto al fondo de la saliente puede ser escrita de la siguiente manera:

$$l_b = \delta_b \cos \theta \quad (2.6)$$

La deformación por compresión en las dos caras laterales de la saliente, puede ser idealizada como una variación lineal en ambos sentidos: Elevación y planta, como se muestra en la Fig. 2.10. Basándose en la geometría, las principales deformaciones por compresión en la parte inferior de la saliente, pueden ser expresadas como:

$$\delta_{s0} = \{[l - l \cos(\alpha + \theta) / \cos \alpha + \delta_0 \cos \theta] \tan \beta - a'\} / 2 \quad (2.7)$$

Con el objetivo de simplificar el cálculo, la deformación por compresión puede ser más aproximada con una distribución uniforme a lo largo de la saliente, como se muestra en la Fig. 2.11. Por lo tanto, la deformación por compresión lateral en la posición inferior, δ_s , resulta como:

$$\delta_s = \{[l - l \cos(\alpha + \theta) / \cos \alpha + \delta_0 \cos \theta] \tan \beta - a'\} / 4 \quad (2.8)$$

Tomando en cuenta la separación lateral a' , la altura del área de contacto, puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$h' = 4\delta_s h / (4\delta_s + a') \quad (2.9)$$

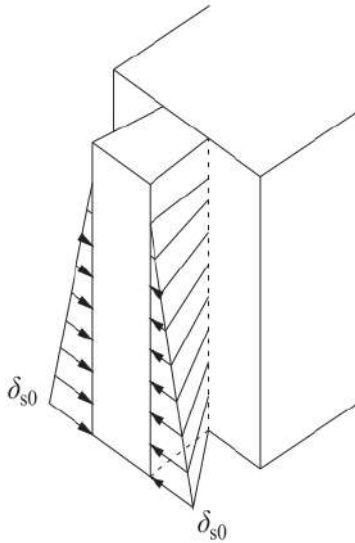


Fig. 2.10 Desplazamiento idealizado por compresión en las dos caras laterales de la saliente.

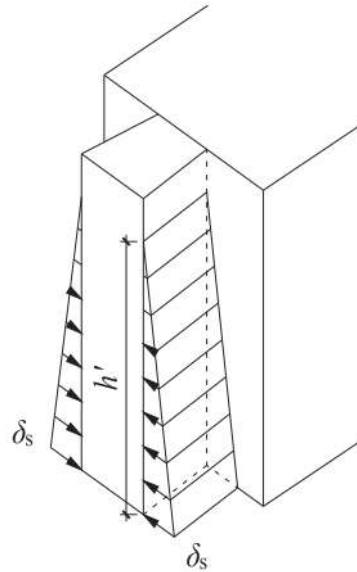


Fig. 2.11 Desplazamiento simplificado por compresión en las dos caras laterales de la saliente.

La Fig. 2.12 y la Fig. 2.13 ilustra la distribución de los esfuerzos normales y por fricción en las caras laterales en el rango elástico, y el diagrama general de esfuerzos actuando en la saliente de la conexión cola de pato. F_b y F_t representan la fuerza a compresión (normal) en las caras inferior y superior de la saliente, respectivamente. F_t está ubicada en el punto "A", el cual es el centro de rotación mencionado anteriormente; F_b está ubicado en el centroide del bloque de esfuerzos normales en la parte inferior. f_b es la fricción correspondiente a F_b , y f_t representa la fricción correspondiente a F_t , así como la fuerza de bloqueo mecánica producida por el hombro del elemento en el cuello de la saliente. La distancia horizontal desde F_t al punto "o" es muy pequeña, así que el momento producido por F_t respecto a "o" puede ser ignorado. El esfuerzo por fricción en las caras laterales es expresado como τ_s y su resultante es denominado como f_s . El momento producido por f_s respecto a "o" es M_s .

La variable f_t puede obtenerse por el equilibrio de fuerzas horizontales:

$$f_t = f_b + f_s \quad (2.10)$$

Tomando el momento respecto a "o", el momento total en el rango elástico producido por todos los componentes de las fuerzas ejercidas en la saliente (el cual podría ser igual al momento actuante en la conexión desde el elemento) se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$M = F_b x_b + f_b y_b + f_t y_t + M_s \quad (2.11)$$

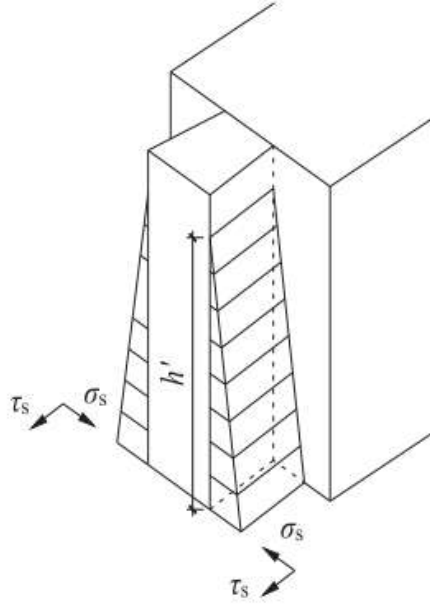


Fig. 2.12 Distribución de esfuerzos actuantes en dos caras laterales de la saliente.

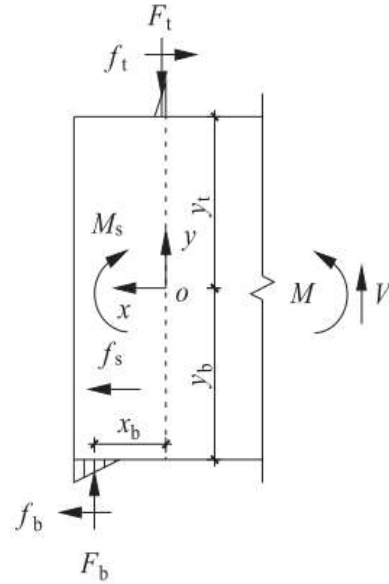


Fig. 2.13 Diagrama general de fuerzas en el rango elástico de la saliente.

Los esfuerzos normales actuando en la cara inferior de la saliente se relacionan con la deformación normal por compresión (vertical), la cual a su vez está relacionada con el desplazamiento vertical. Aproximando la deformación vertical en el apéndice de la saliente a lo largo de su altura de manera lineal, se puede relacionar la deformación principal vertical por compresión ε_b al desplazamiento vertical δ_b con la ecuación:

$$\delta_b = 0.5h\varepsilon_b \quad (2.12)$$

por lo tanto, el esfuerzo máximo a compresión en la parte inferior de la saliente es:

$$\sigma_b = E\varepsilon_b = 2E\delta_b/h \quad (2.13)$$

Y las fuerzas resultantes en la cara inferior de la saliente son:

$$F_b = 0.5al_b\sigma_b \quad (2.14)$$

$$f_b = \mu F_b \quad (2.15)$$

Los brazos de palanca de las respectivas fuerzas respecto al punto "o":

$$x_b = l - l_b/3 \quad (2.16)$$

$$y_b = y_t = 0.5h \quad (2.17)$$

Los esfuerzo normales y cortantes (por fricción) de las dos caras laterales pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$\sigma_s = \varepsilon_b E = \frac{2\delta_s}{0.5(a+b)} E = 4E\delta_s/(a+b) \quad (2.18)$$

$$\tau_s = \mu\sigma_s \quad (2.19)$$

La distribución del esfuerzo por fricción sobre las dos caras laterales en el rango elástico es mostrada en la Fig. 2.14. La fuerza horizontal resultante es:

$$f_s = 2 * 0.5 * \tau_s * h' * (l - \delta_0) = \tau_s h' (l - \delta_0) \quad (2.20)$$

El momento resistente producido por f_s respecto al punto "o" puede ser espresado como:

$$M_s = \tau_s h' (l - \delta_0) * \left(\frac{h}{2} - \frac{h'}{3} \right) = \tau_s h' \left(\frac{h}{2} - \frac{h'}{3} \right) (l - \delta_0) \quad (2.21)$$

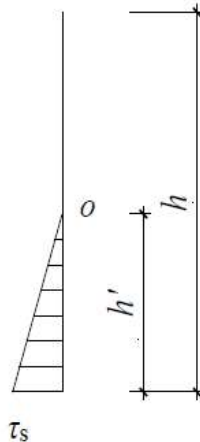


Fig. 2.14 Esfuerzo por fricción sobre las caras laterales a lo largo de la altura de la saliente.

Los diagramas presentados anteriormente, han sido propuestos para idealizar y simplificar la distribución de los esfuerzos generales en una conexión machihembrada en marcos de madera. Sin embargo, dichos análisis teóricos nos ayudan a comprender la distribución de los esfuerzos generales del tipo de conexión elegida para la investigación.

La propuesta aquí presentada pretende explorar el comportamiento de la conexión con otro material y otro sistema estructural, y existen variados ejemplos del uso de esta conexión con diversas formas y en otros materiales. Por ejemplo, en Latinoamérica se han desarrollado bloques para la construcción de muros de mampostería, con una forma particular para lograr un ensamblaje machihembrado en las tres direcciones del muro (Fig. 2.15). En otros casos se incorporan perfiles metálicos con la forma hembra de la conexión a piezas prefabricadas de concreto para anclar otros elementos (Fig. 2.16).

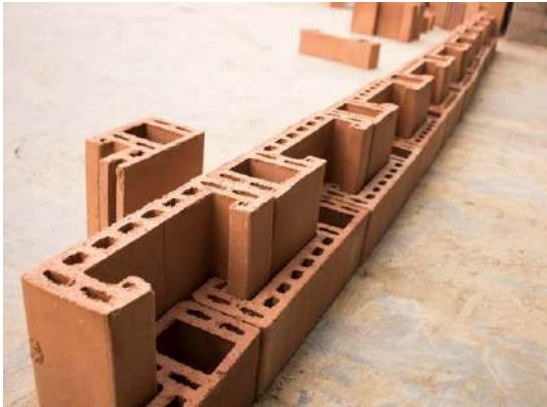


Fig. 2.15 Junta machihembrada en muros de mampostería.



Fig. 2.16 Conexión machihembrada metálica incrustada en prefabricado de concreto.

Las variaciones en los diseños y aplicaciones son ilimitadas, y con la finalidad de innovar en el campo de la construcción industrializada haciendo uso de esta conexión se propone el diseño de dos piezas prefabricadas básicas: Una en forma rectangular para cubrir más área en la construcción de muros; y otra, en forma de barra para ensamblar a las piezas rectangulares.

Para el modelado geométrico de las piezas, se hizo uso del programa AutoCAD 2018 con licencia de estudiante. Este programa de dibujo asistido por computadora permite modelar sólidos, es decir, cuerpos geométricos de 3 dimensiones que posteriormente podrán ser exportados y utilizados en otros programas para las simulaciones del procedimiento de ensamblaje y el análisis por el método del elemento finito.

2.2.2 Piezas rectangulares

Las piezas rectangulares fueron diseñadas para cubrir una mayor área en la construcción de muros, sin llegar a pesar demasiado para que se pueda maniobrar con ellas. Por esto, el diseño comienza con un panel de pared delgada de 3 cm de espesor, con 1 m de longitud en su lado corto (horizontal) y 1.20 m en su lado largo (vertical), ver Fig. 2.17. El objetivo es que, al colocar una pieza rectangular sobre otra, se alcance una altura de al menos 2.40 m, y al unir las lateralmente se cuente con una longitud de 1 m para dar versatilidad a los diseños de los espacios arquitectónicos (Fig. 2.18).

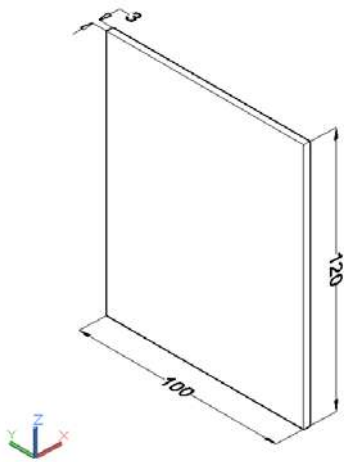


Fig. 2.17 Panel inicial de diseño de piezas rectangulares (cotas en cm).

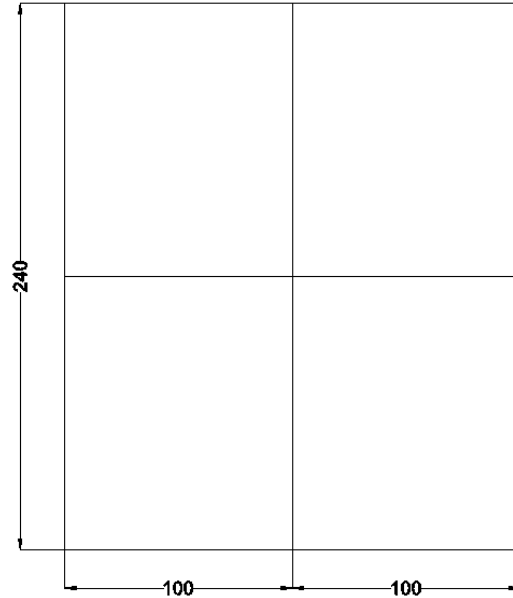


Fig. 2.18 Acomodo básico de paneles iniciales de diseño de piezas rectangulares (cotas en cm).

El siguiente paso es generar un ensanchamiento de los lados en una de las caras. Esto se realizó con un ángulo de 45° hasta alcanzar 8 cm de espesor en los últimos 6 cm de los lados (Fig. 2.19), con la finalidad de contar con el espesor necesario para moldear una ranura en tres de ellos. Las características geométricas de dichas ranuras se ilustran en la Fig. 2.20.

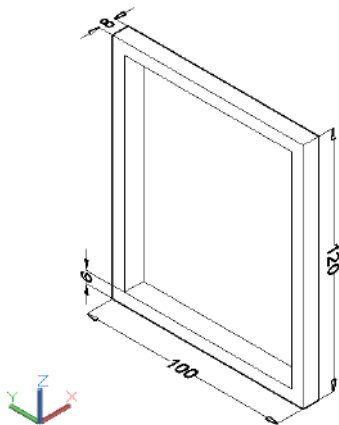


Fig. 2.19 Ensanchamiento en los lados de la pieza rectangular (cotas en cm).

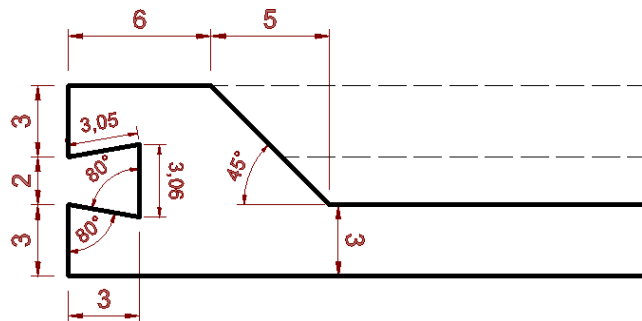


Fig. 2.20 Características geométricas de ranura en piezas rectangulares (cotas en cm).

La ranura moldeada en los lados se puede ver en un corte de la pieza en la Fig. 2.21. Sin embargo, se generó la necesidad de realizar un corte en las esquinas de la pieza, dichos cortes se diseñaron de 4 cm en ambas direcciones del plano de la pieza. Resultando la configuración mostrada en la Fig. 2.22. De esta forma fue posible desplazar piezas en ambas direcciones (horizontal y vertical) para conectarlas con otras piezas rectangulares.

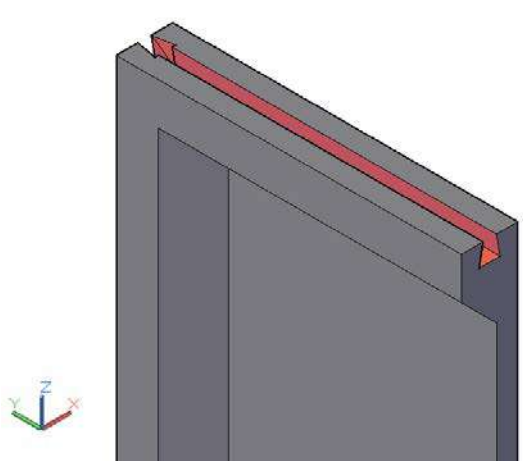


Fig. 2.21 Corte transversal de piezas rectangular con ranura en los lados.

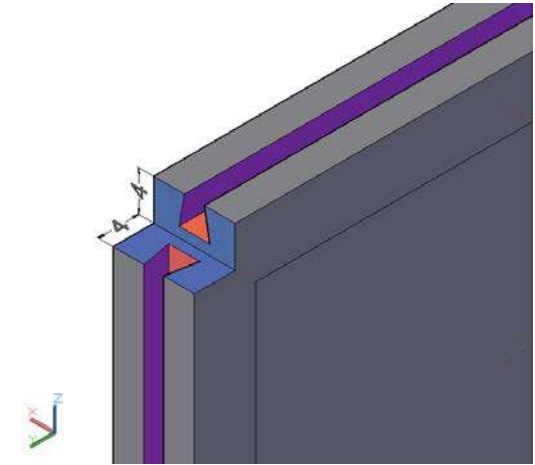


Fig. 2.22 Corte en esquinas de piezas rectangular (cotas en cm).

Una vista frontal y en perspectiva del modelo geométrico de la pieza rectangular es mostrada en la Fig. 2.23. Para fines prácticos esta pieza será denominada “Pieza A”.

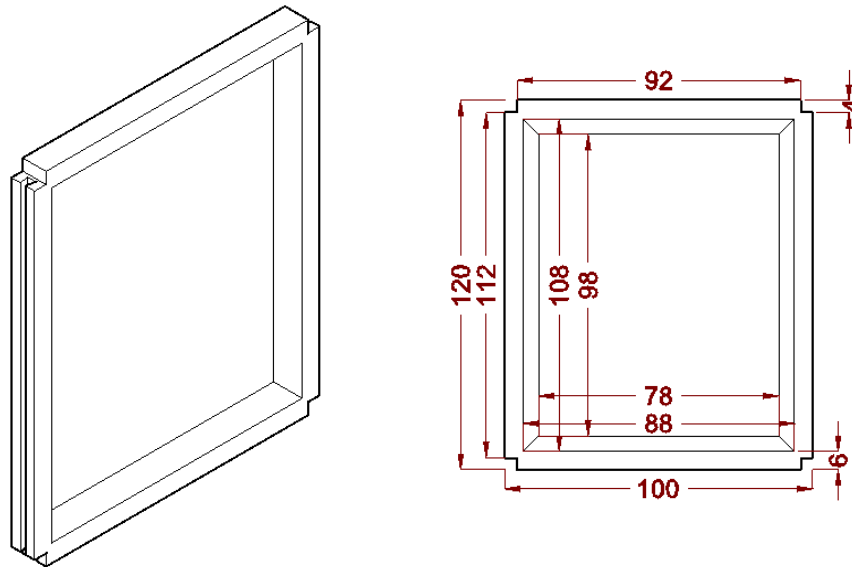


Fig. 2.23 Vista en perspectiva y frontal del diseño propuesto para pieza A (cotas en cm).

2.2.3 Piezas esbeltas

El diseño de las piezas esbeltas está enfocado en unir, vertical y horizontalmente, a las piezas rectangulares. Su diseño inicial comenzó como un elemento tipo barra de sección rectangular de 5 cm x 8 cm, la longitud dependerá de su ubicación, vertical u horizontal, 112 y 92 cm respectivamente (Fig. 2.24). Como es el elemento que une a las piezas A, es necesario que cuente con 2 salientes, que se ubicarán en el lado largo de la sección,

como se muestra en la Fig. 2.25. Las medidas coinciden con la ranura de la pieza rectangular, sin embargo, en la realidad estas medidas deberán ser reducidas por al menos 1 mm para facilitar el ensamblaje.



Fig. 2.24 Diseño inicial de pieza esbelta tipo barra (cotas en cm).

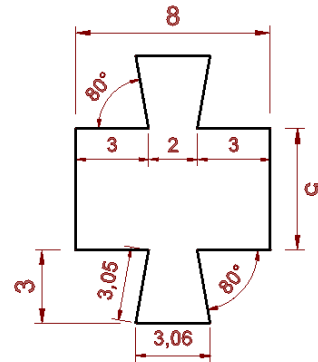


Fig. 2.25 Sección transversal diseñado para las piezas esbeltas (cotas en cm).

Se propusieron una serie de variaciones en el diseño de esta pieza, debido a causas explicadas más adelante en el proceso de ensamblaje, 4 variaciones fueron diseñadas para las piezas esbeltas. La pieza para uniones horizontales sin variaciones, con una longitud de 92 cm, se denominó “pieza B” (Fig. 2.26). A esta pieza se le diseñó una variación en la que se añadieron 13 cm en uno de sus extremos, con una sección transversal de 9 cm x 8 cm. Esta pieza se denominó “pieza D” (Fig. 2.27). Las piezas para uniones verticales de 112 cm, fueron sustituidas por una variación en la que se añadió en uno de sus extremos, 4 cm de una sección rectangular de 13 cm x 8 cm, denominadas “pieza C” (Fig. 2.27).

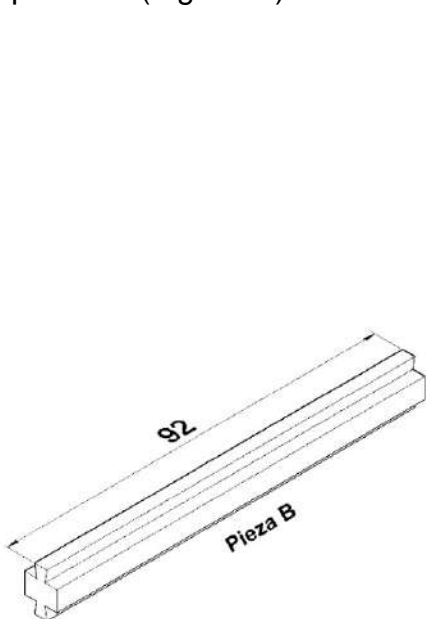


Fig. 2.26 Vista en perspectiva del diseño de la pieza B (cotas en cm).

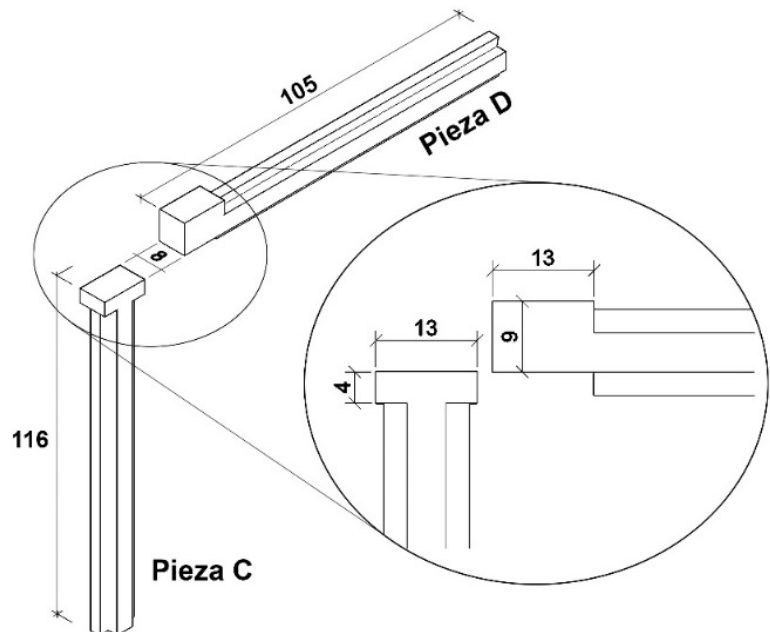


Fig. 2.27 Vista en perspectiva del diseño de las piezas C y D (cotas en cm).

Dos variaciones más fueron diseñadas para realizar conexiones en esquina e intersección de muros. La pieza en esquina tendrá una de las salientes a 90° respecto a

la otra, por lo que se modificó la sección transversal del elemento en todo su largo, además, se añadieron 13 cm en uno de sus extremos de una sección “L”, en la Fig. 2.28 se muestran las medidas finales del diseño para la pieza en esquina, denominada “pieza E”.

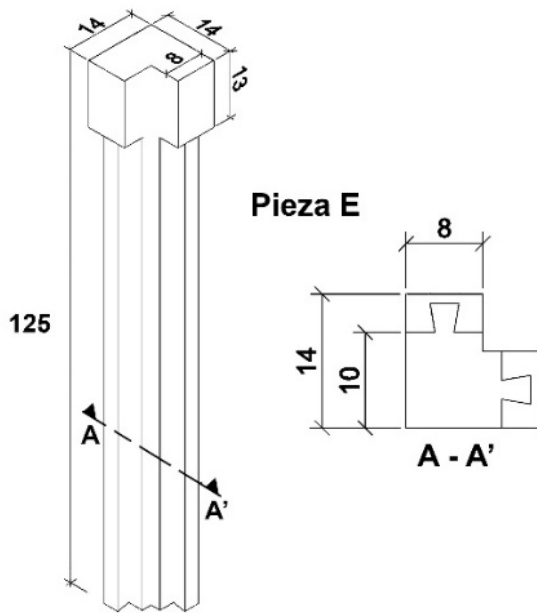


Fig. 2.28 Vista en perspectiva y corte transversal del diseño de la pieza E (cotas en cm).

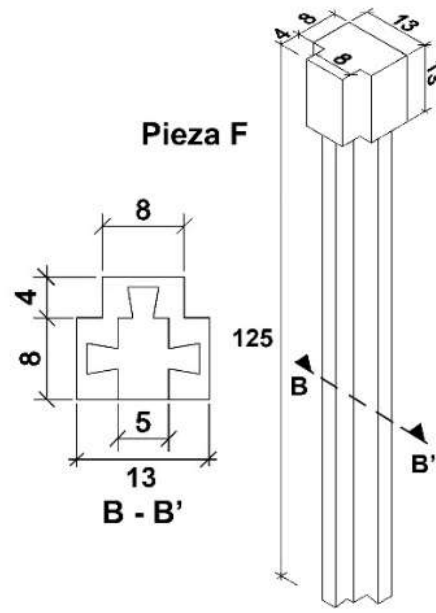


Fig. 2.29 Vista en perspectiva y corte transversal del diseño de la pieza F (cotas en cm).

La última variación de las piezas esbeltas fue diseñada para el ensamble de muros en intersección. En este caso es necesario que la pieza esbelta cuente con 3 salientes, para ello se retomó el diseño de la pieza C para uniones verticales y se añadió un tercer saliente en el lado corto de su sección transversal. En este caso el anexo en uno de sus extremos fue de 13 cm con una sección “T”. La medida y los detalles del diseño de esta pieza, denominada “pieza F”, son mostrados en la Fig. 2.29.

Los modelos geométricos elaborados para las piezas A y B, fueron posteriormente impresos con el equipo del laboratorio de computación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Guerrero. Las piezas impresas sirvieron para probar físicamente el agarre de la conexión machihembrada en el diseño propuesto (Fig. 2.30). Debido a un mal tratamiento del material usado para la impresión, se forzó la entrada de la conexión al intentar desplazarla por la ranura, provocando una falla en la pieza A (Fig. 2.31). Esto sirvió para identificar, de manera accidental, una zona de falla en la pieza A; aunque se trata de una falla entre las capas en las que el modelo fue impreso, mostró una distribución de los esfuerzos ocasionada al concentrarlos en la conexión. Esto resulta en un dato importante para ubicar el acero de refuerzo que se diseñe para las piezas.



Fig. 2.30 Impresión 3D del modelo geométrico de las piezas A y B.



Fig. 2.31 Falla identificada en la impresión 3D del modelo geométrico de la pieza A.

2.3 Proceso de ensamblaje

Una vez definido el diseño geométrico de las piezas básicas (A y B), se realizó el acomodo de acuerdo a lo planteado en la Fig. 2.18. Para lograr un ensamblaje entre las piezas fue necesario seguir el procedimiento descrito en la Fig. 2.32a: Dos piezas A se fijan a la base y se unen verticalmente al desplazar una pieza B entre ellas. De forma similar, dos piezas B se desplazan horizontalmente sobre las piezas A previamente unidas, seguidas de otras dos más de estas últimas; una cuarta pieza B une verticalmente al par de piezas A superiores.

De esta forma, cuatro piezas A unidas vertical y horizontalmente por cuatro piezas B generan un espacio vacío al centro del ensamblaje como se muestra en la Fig. 2.32b. Por esta razón se propusieron las variaciones descritas anteriormente de las piezas esbeltas.

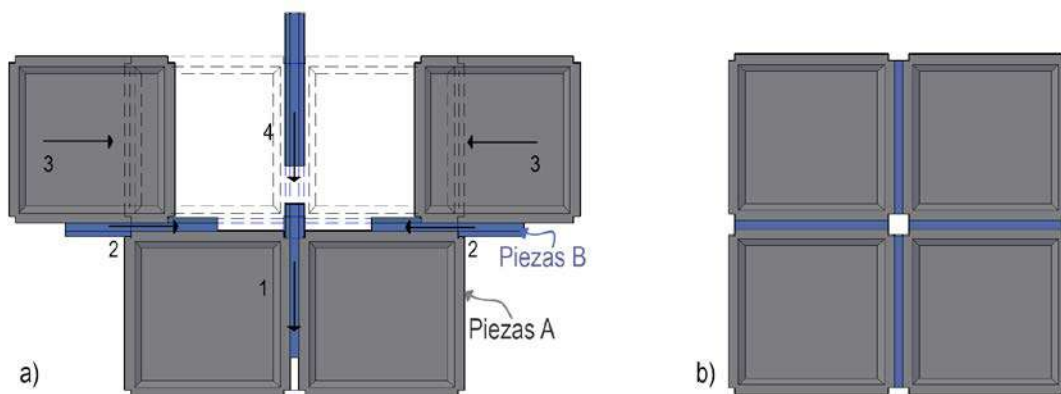


Fig. 2.32 Proceso de ensamblaje de 4 piezas A y 4 piezas B.

Sustituyendo a una de las piezas B horizontales por la variante pieza D, y a las verticales por las piezas C se logró el ensamblaje mostrado en la Fig. 2.33; este procedimiento también puede ser aplicado en el ensamblaje de muros en esquina con las piezas correspondientes: 4 piezas A, 2 piezas B y 2 piezas E (Fig. 2.34).

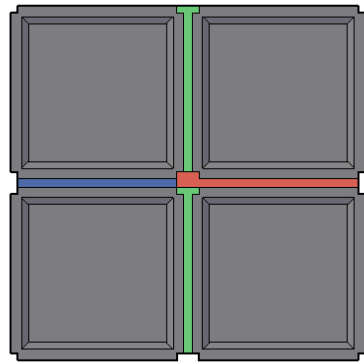


Fig. 2.33 Ensamble final de muro con piezas propuestas.

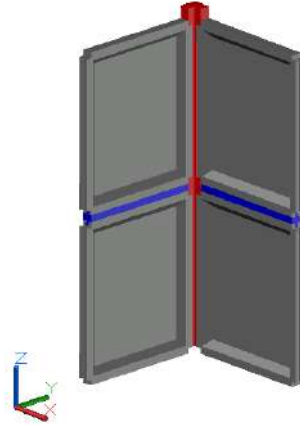


Fig. 2.34 Ensamble de muro en esquina con piezas propuestas.

Si el proceso de ensamblaje se inicia en una esquina, avanzando hacia dos direcciones perpendiculares, el ensamblaje de los muros contiguos se tiene que realizar desde una sola dirección. En la Fig. 2.35 se describe dicho procedimiento con 4 de las 6 piezas diseñadas: Una pieza B se desplaza horizontalmente sobre la pieza A; luego una pieza C una verticalmente una segunda pieza A, posteriormente se desplaza horizontalmente una pieza D y una pieza A como se muestra; y por último la cuarta pieza A es desplazada hasta la posición donde será unida verticalmente con una segunda pieza C.

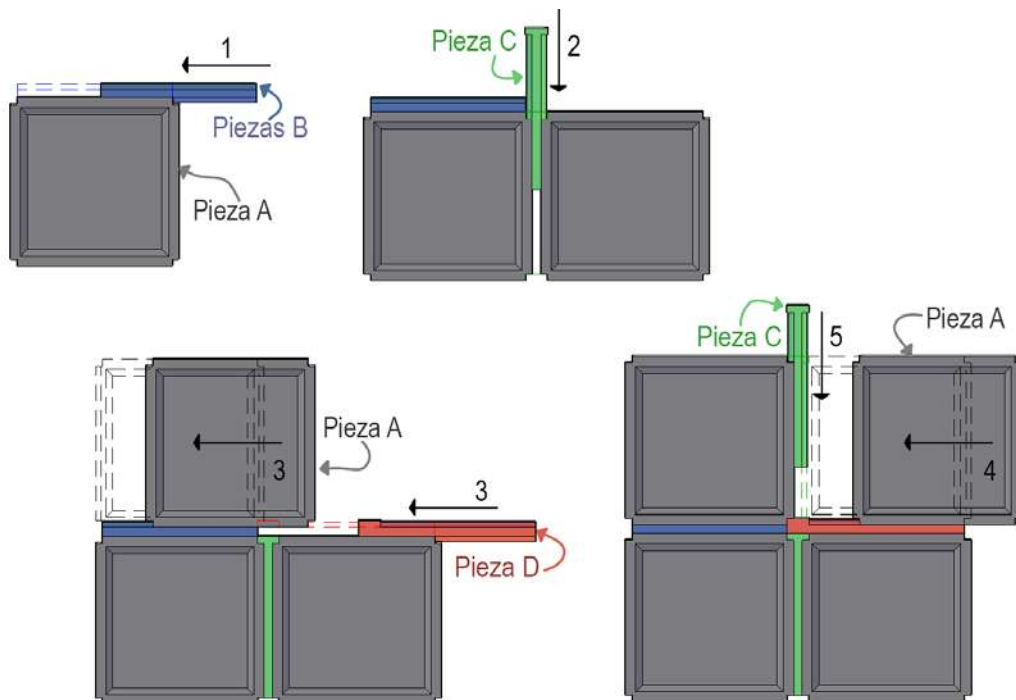


Fig. 2.35 Procedimiento de ensamblaje de muro en una dirección con piezas propuestas.

En los últimos años se ha dado una tendencia por el uso de simulaciones 4D como apoyo en la planeación de los procesos constructivos. Este desarrollo tecnológico ha sido considerado de gran potencial al permitir a los diseñadores añadir la dimensión del tiempo en los modelos geométricos 3D; además de que permite presentar ideas a los clientes, asistir en problemas asociados con logística, programación de tareas y planificaciones de sitio (Heesom & Mahdjoubi, 2004).

Los dos procedimientos antes presentados fueron simulados con ayuda del programa de uso libre Blender, en su versión 2.79, enfocado en el modelado, renderizado y animación de gráficos en 3D. El resultado permitió corroborar que el proceso de ensamblaje, al menos en un entorno virtual, funciona. Un video generado a partir de la simulación se cargó en la plataforma de videos Youtube (Ayala, 2018), en la Fig. 2.36 se muestran capturas de dicho video en las que se pueden ver el ensamble en esquina y el ensamble terminado.



Fig. 2.36 Capturas de video del proceso de ensamblaje de una esquina.

2.4 Propuesta de aplicación

El diseño de las piezas se enfocó en construir muros en cortos periodos de tiempo por medio de una propuesta de conexión machihembrada y un proceso de ensamble descritos en la sección anterior. Con un total de 6 diseños es posible construir muros continuos, en esquina e intersección, suficiente para ser implementadas en la construcción de una vivienda. Con el objetivo de estudiar el comportamiento estructural de las piezas diseñadas y su conexión, se propuso un prototipo de vivienda a base de piezas prefabricadas de ferrocemento con conexión machihembrada (VPPF). Esta propuesta no es la única implementación que se le puede dar a las piezas, la versatilidad que proporciona el diseño de las piezas a la planeación de los espacios, está limitada a construir muros a 90°, sin embargo, las posibilidades son muy amplias.

La distribución de los espacios arquitectónicos atiende a las necesidades básicas de una familia. En la Tabla 2.1, se indican las dimensiones mínimas requeridas por la Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico del Distrito Federal (2011), a partir de estas medidas se explora una distribución de los espacios haciendo uso de las piezas propuestas por investigaciones previas.

Tabla 2.1 Dimensiones mínimas para espacios habitacionales de una vivienda unifamiliar.

TIPO DE EDIFICACIÓN	LOCAL	ÁREA MÍNIMA (m ²)	LADO MÍNIMO (m)	ALTURA MÍNIMA (m)	Obs.
HABITACIONAL					
VIVIENDA UNIFAMILIAR VIVIENDA PLURIFAMILIAR	Recámara principal	7.00	2.40	2.30	
	Recámaras adicionales, alcoba, cuarto de servicio y otros espacios habitables	6.00	2.20	2.30	
	Sala o estancia	7.30	2.60	2.30	
	Comedor	6.30	2.40	2.30	
	Sala-comedor	13.00	2.60	2.30	
	Cocina	3.00	1.50	2.30	
	Cocineta integrada a estancia o a comedor	-	2.00	2.30	(a)
	Cuarto de lavado	1.68	1.40	2.10	
	Baños y sanitarios	-	-	2.10	(b)
	Estancia o espacio único habitable	25.00	2.60	2.30	

Naaman (2000), en un libro clásico sobre el ferrocemento, propuso una serie de paneles prefabricados conectados por medio de tornillos, abriendo un nuevo rango de posibilidades en la exploración de aplicaciones innovadoras, adoptando técnicas de construcción industrializada. Una de estas aplicaciones, es el sistema de construcción de viviendas (Fig. 2.38), con gran aceptación en países en desarrollo. Investigaciones en la última década (Mansur, Tan, & Naaman, 2010), se han enfocado en estudiar las conexiones de estos elementos y proponer soluciones alternas, como la propuesta de juntas para el sistema de edificaciones residenciales de ferrocemento (SERF), ver Fig. 2.37, implementado en Cuba (Alvarez, Julia R.; Wainshtok Rivas, Hugo; Acosta, 2015).

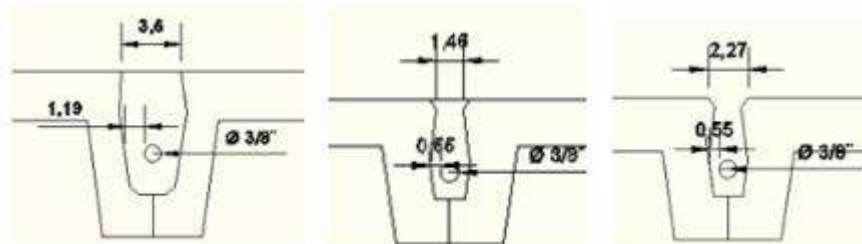


Fig. 2.37 Propuesta de juntas para el SERF, implementado en Cuba.

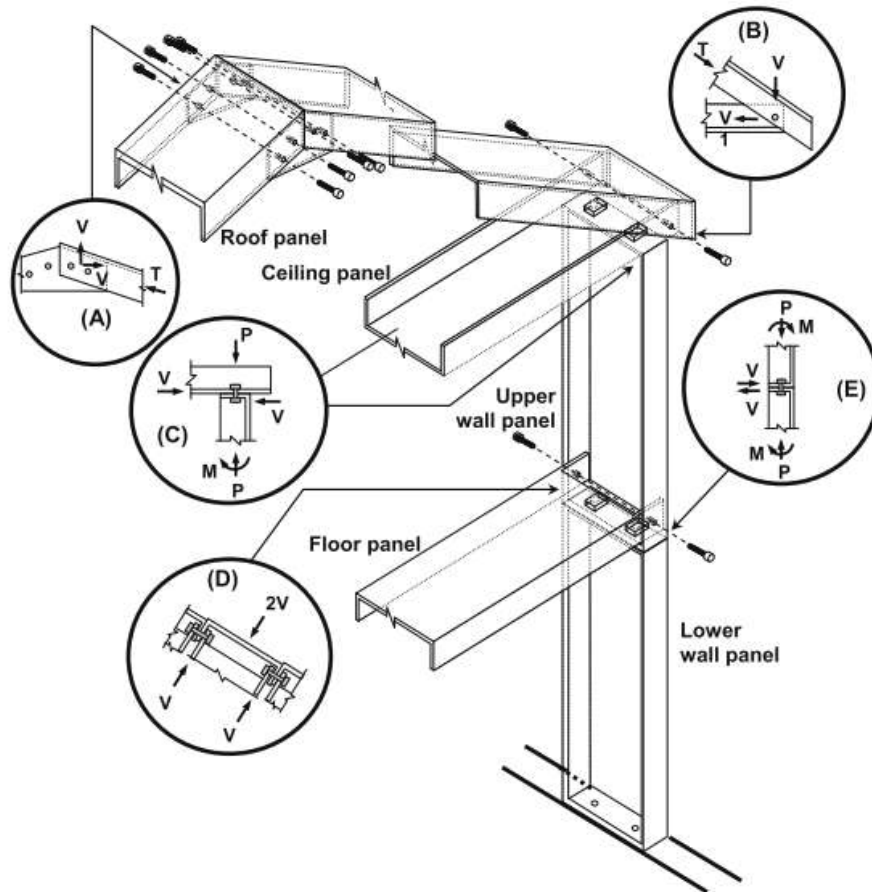


Fig. 2.38 Ensamble de paneles del sistema de propuesto por Naaman (2010).

El prototipo de vivienda propuesto en esta investigación, será diseñado para albergar de 3 a 5 habitantes, por lo que contará con un espacio común usado como sala-comedor, una cocina, un baño completo y dos recámaras. En su base se colará una cadena de desplante a la que se sujetarán las piezas; en la parte superior, una cadena de cerramiento será colada para dar rigidez al ensamble y la cubierta será del tipo ligera, con el objetivo de reducir las cargas.

En las Fig. 2.39a, b y c, se muestra la distribución de los espacios arquitectónicos propuestos, haciendo uso de los paneles diseñados por Naaman (2000), las piezas de mortero armado de los investigadores del CIIDIR (López-Calvo et al., 2006) y las piezas diseñadas en esta investigación, respectivamente. En la Tabla 2.2, de manera comparativa, se muestra el número de piezas o paneles necesarios para construir el prototipo de vivienda y el área construida. Cabe señalar, que para las primeras dos distribuciones, todas las conexiones son atornilladas y ninguna de sus piezas actúa como conexión. Mientras que la tercera, toma en cuenta todas las piezas que sirven como conectores, lo que da como resultado más piezas, pero con la diferencia de no usar tornillos para su conexión y aproximadamente un 35% más de área construida.

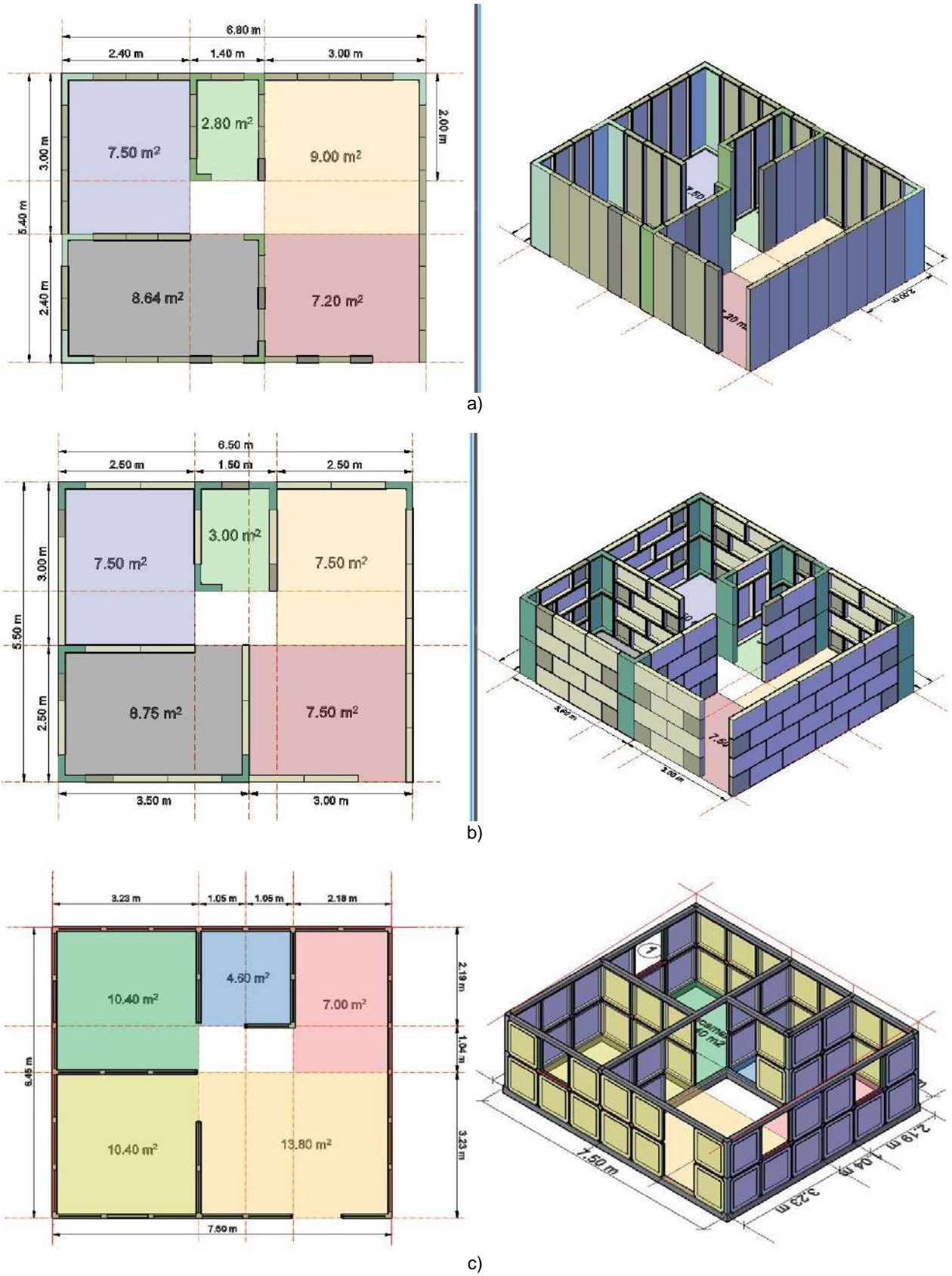


Fig. 2.39 Distribución espacio arquitectónico propuesto con diferentes diseños de piezas.

Tabla 2.2 Comparativa de número de piezas y área construida de misma distribución arquitectónica con diferente diseño de piezas.

Diseño de piezas	Número de piezas	Área construida (m ²)
a	51	36.72
b	135	35.75
c	161	55.15

En la Fig. 2.40 se muestra el resultado final del prototipo de vivienda a base de piezas prefabricadas de ferrocemento con conexión machihembrada (VPPF).

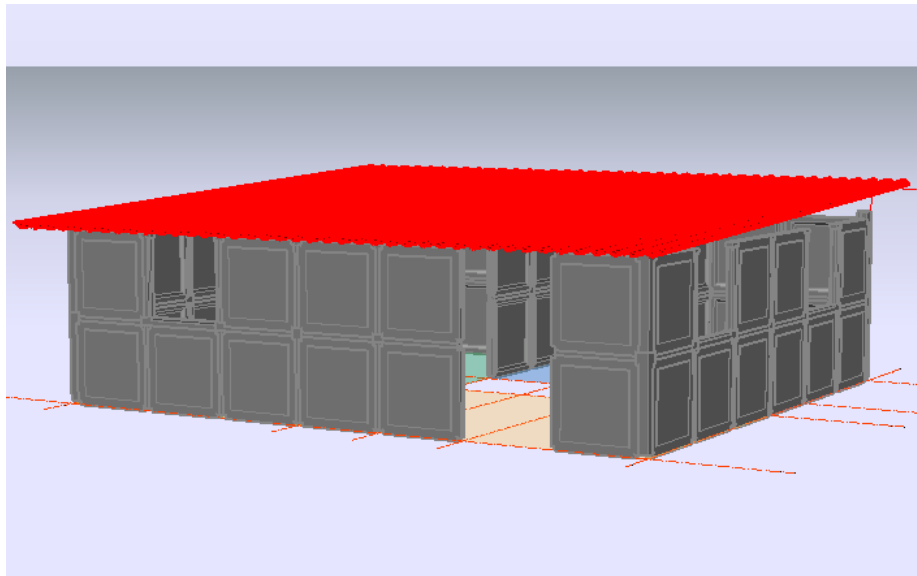


Fig. 2.40 Modelo conceptual de vivienda a base de piezas prefabricadas de ferrocemento.

CAPÍTULO III. MODELACIÓN Y ANÁLISIS

CAPÍTULO III. MODELACIÓN Y ANÁLISIS

3.1 Introducción

Una de las etapas más importantes en el proceso del diseño de productos innovadores es la simulación, la cual nos permite conocer el comportamiento y desempeño del producto por medio de análisis y métodos numéricos, que asistidos por la tecnología computacional han probado ser de gran eficacia, permitiendo optimizar los diseños incluso antes de invertir en pruebas y ensayos físicos en laboratorio, resultando en un gran ahorro en las etapas experimentales de la innovación en la industria.

En este capítulo se detallan los procesos del modelado numérico elaborado para el análisis de las piezas propuestas y su aplicación en una vivienda presentada en el capítulo anterior. En la primera parte se presentan los aspectos teóricos del método del elemento finito, así como sus etapas principales necesarias para llevar a cabo simulaciones asistidas por computadora. Posteriormente, se describe a detalle el procedimiento seguido para simular, con apoyo de un software especializado, un ensayo a compresión simple en la pieza A. Se abordan también, algunos temas relacionados con los principios teóricos en los que se basa dicho software para simular condiciones de contacto, mallado y resolución del problema. Los resultados son verificados por condiciones de equilibrio y presentados de manera gráfica para su análisis.

De manera similar a la simulación del ensayo a compresión simple, se realizaron un par más: en una se simula un ensayo a flexión, donde además de analizar los esfuerzos a los que se somete la pieza A bajo flexión, se analiza la conexión con la pieza B; y en la tercer y última simulación, el análisis de la vivienda propuesta bajo condiciones de carga presentadas durante un sismo, es simplificado en un análisis de la esquina sometida a las mayores cargas, en donde se obtienen resultados de los posibles esfuerzos a los que se someterían las piezas y sus conexiones durante un sismo.

3.2 El método del elemento finito

El método del elemento finito (MEF) se ha convertido en una poderosa herramienta en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería. Su aplicación va desde el análisis por deformaciones y esfuerzos de automóviles, aeronaves, edificios y estructuras de puentes, hasta el análisis de los campos de flujo de calor, fluidos, magnéticos y otros problemas de flujo. Los avances tecnológicos de las computadoras y los sistemas CAD han permitido aplicar este método en el modelado de problemas complejos con relativa facilidad. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. Considerando las cargas y restricciones que actúan, se obtiene un conjunto de ecuaciones, su solución nos da el comportamiento aproximado del continuo.

Los elementos están interconectados sólo en los nodos exteriores, y ellos completamente deberían cubrir el dominio entero tan preciso como sea posible. Los nodos tendrán desplazamiento nodal o grados de libertad, los cuales deben incluir traslaciones, rotaciones, y para aplicaciones especiales, derivadas de alto orden de desplazamientos.

El problema definido por ecuaciones diferenciales es expresado de manera matricial y la solución obtenida sólo será correcta para un conjunto de puntos denominados nodos, dicho conjunto de nodos forma una red, llamada malla. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada, estos pueden ser barras, superficies o volúmenes. Se dice que la solución obtenida por el MEF es aproximada ya que la solución de los puntos ubicados entre los nodos es obtenida por interpolación.

3.2.1 Esfuerzos y equilibrio

En la Fig. 3.1 se muestra un cuerpo tridimensional con un volumen V y una superficie S . Los puntos en el cuerpo están identificados por las coordenadas x, y, z . Sobre una parte de la frontera se aplica una fuerza distribuida por una unidad de área T . Debido a la acción de la fuerza el cuerpo se deforma.

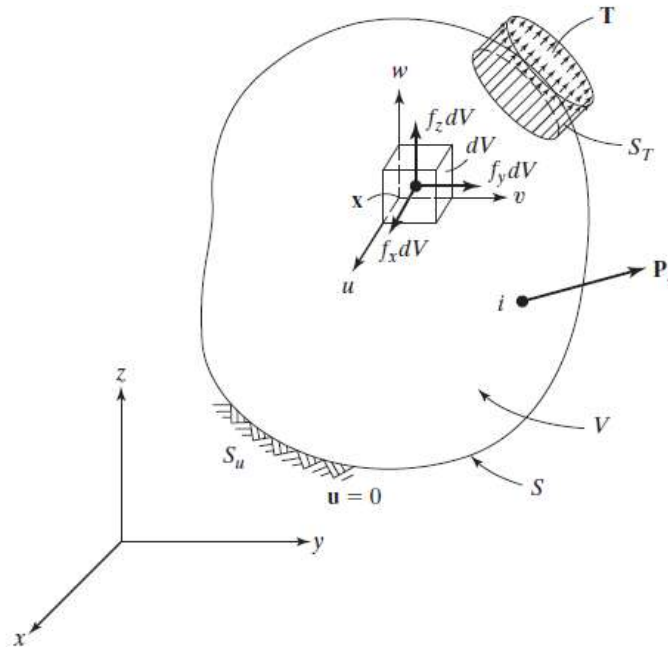


Fig. 3.1 Representación de un cuerpo tridimensional en el método del elemento finito.

La deformación en un punto $x (= [x, y, z]^T)$ está dada por las tres componentes de su desplazamiento:

$$u = [u, v, w]^T \tag{3.1}$$

La fuerza distribuida por unidad de volumen es el vector f :

$$f = [f_x, f_y, f_z]^T \quad (3.2)$$

La fuerza de cuerpo actuando sobre el volumen elemental dV , se muestra en la Fig. 3.1. La tensión superficial T puede darse por el valor de sus componentes en puntos sobre la superficie:

$$T = [T_x, T_y, T_z]^T \quad (3.3)$$

Una carga P actuando en un punto i se representa por sus tres componentes:

$$P = [P_x, P_y, P_z]_i^T \quad (3.4)$$

En la Fig. 3.2 se muestran los esfuerzos que actúan sobre el volumen elemental dV .

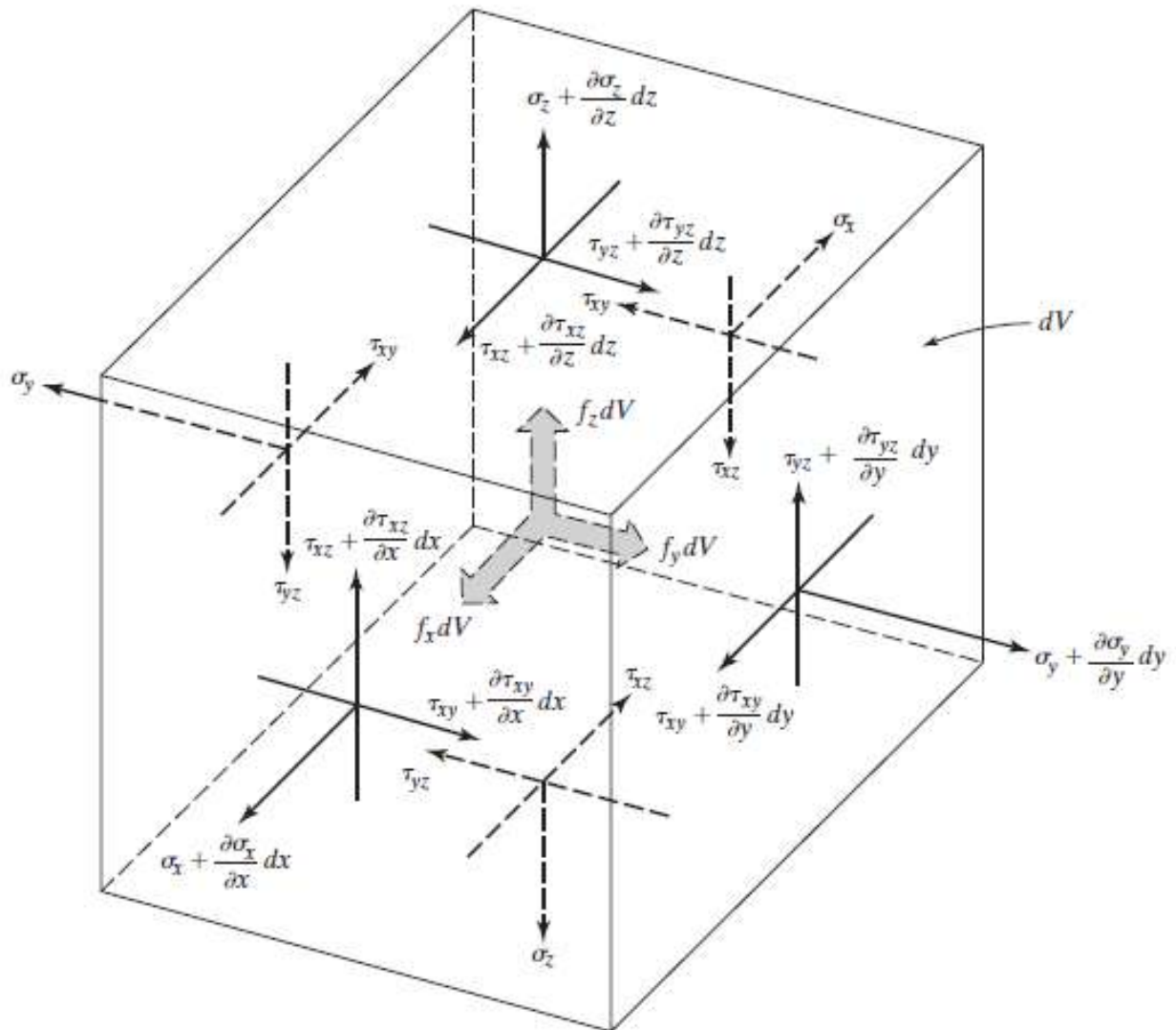


Fig. 3.2 Equilibrio del volumen elemental dV

Dichos esfuerzos se representan por medio de sus seis componentes independientes de la siguiente manera:

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \quad (3.5)$$

Donde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ son esfuerzos normales y $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ son esfuerzos cortantes. Considerando el equilibrio del volumen elemental dV , se obtienen las fuerzas sobre las caras multiplicando los esfuerzos por las áreas correspondientes. Haciendo $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$ y $\sum F_z = 0$, y como $dV = d_x d_y d_z$, se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{aligned} \frac{\delta \sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta z} + f_x &= 0 \\ \frac{\delta \tau_{xy}}{\delta x} + \frac{\delta \sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta \tau_{yz}}{\delta z} + f_y &= 0 \\ \frac{\delta \tau_{xz}}{\delta x} + \frac{\delta \tau_{yz}}{\delta y} + \frac{\delta \sigma_z}{\delta z} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.2.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de desplazamiento en la frontera y condiciones de carga en la superficie son mostradas en la Fig. 3.1. Si u se especifica sobre la parte denotada por S_u , se tiene:

$$u = 0 \quad \text{sobre } S_u \quad (3.7)$$

También se pueden considerar condiciones de frontera como $u = a$, donde a es un desplazamiento.

Si ahora se considera el equilibrio del tetraedro elemental $ABCD$, mostrado en la Fig. 3.3, donde DA , DB , y DC son paralelas a los ejes x , y y z , respectivamente, y dA es el área definida por los vértices ABC .

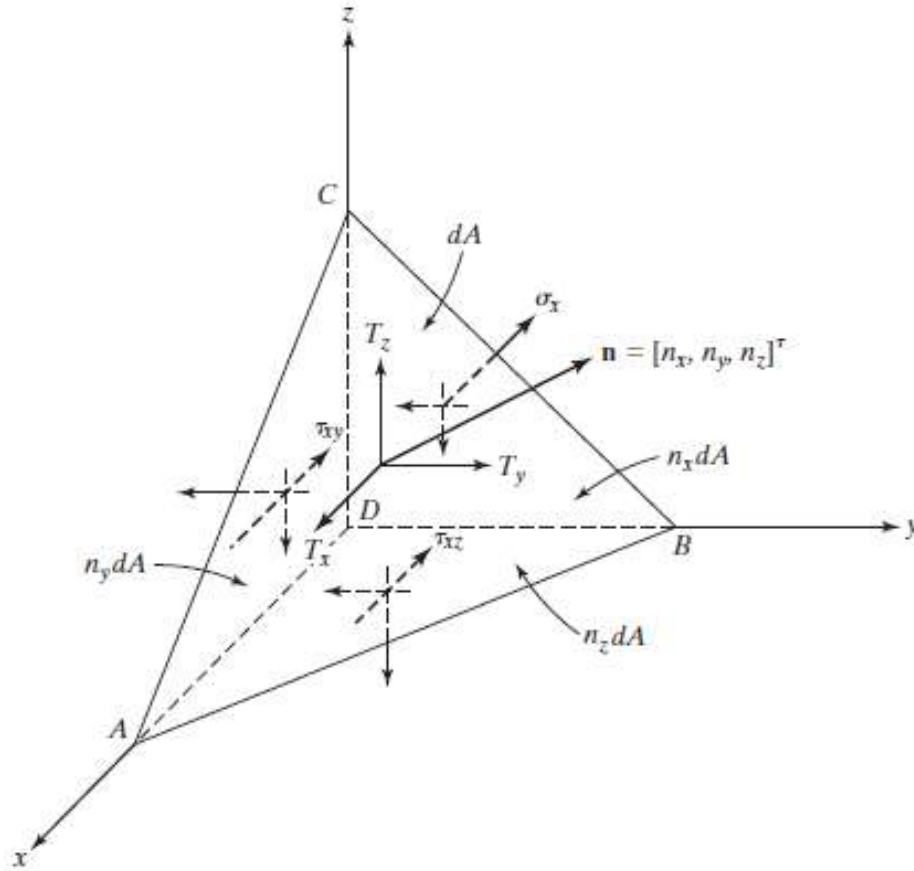


Fig. 3.3 Equilibrio del tetraedro elemental.

Si $n = [n_x, n_y, n_z]^T$ es la normal unitaria a dA , entonces el área $BCD = n_x dA$, el área $ADC = n_y dA$ y el área $ADB = n_z dA$. Considerando el equilibrio en los tres ejes coordenados:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z &= T_x \\
 \tau_{xy} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z &= T_y \\
 \tau_{xz} n_x + \tau_{yz} n_y + \sigma_z n_z &= T_z
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Estas condiciones deben satisfacerse sobre la frontera S_T , donde se aplica la fuerza de tensión.

3.2.3 Relaciones deformación unitaria-desplazamiento

Se representan las deformaciones unitarias en una forma vectorial correspondientes a los esfuerzos presentados en la ecuación 3.5:

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T
 \tag{3.9}$$

Donde $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ son las deformaciones unitarias normales y $\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$ son las deformaciones angulares unitarias cortantes.

La Fig. 3.4 muestra la deformación de la cara $dx-dy$ para pequeñas deformaciones. Tomando en cuenta también las otras caras:

$$\varepsilon = \left[\frac{\delta_u}{\delta_x}, \frac{\delta_v}{\delta_y}, \frac{\delta_w}{\delta_z}, \frac{\delta_v}{\delta_z} + \frac{\delta_w}{\delta_y}, \frac{\delta_u}{\delta_z} + \frac{\delta_w}{\delta_x}, \frac{\delta_u}{\delta_y} + \frac{\delta_v}{\delta_x} \right]^T \quad (3.10)$$

Estas relaciones entre deformaciones unitarias se cumplen para deformaciones pequeñas.

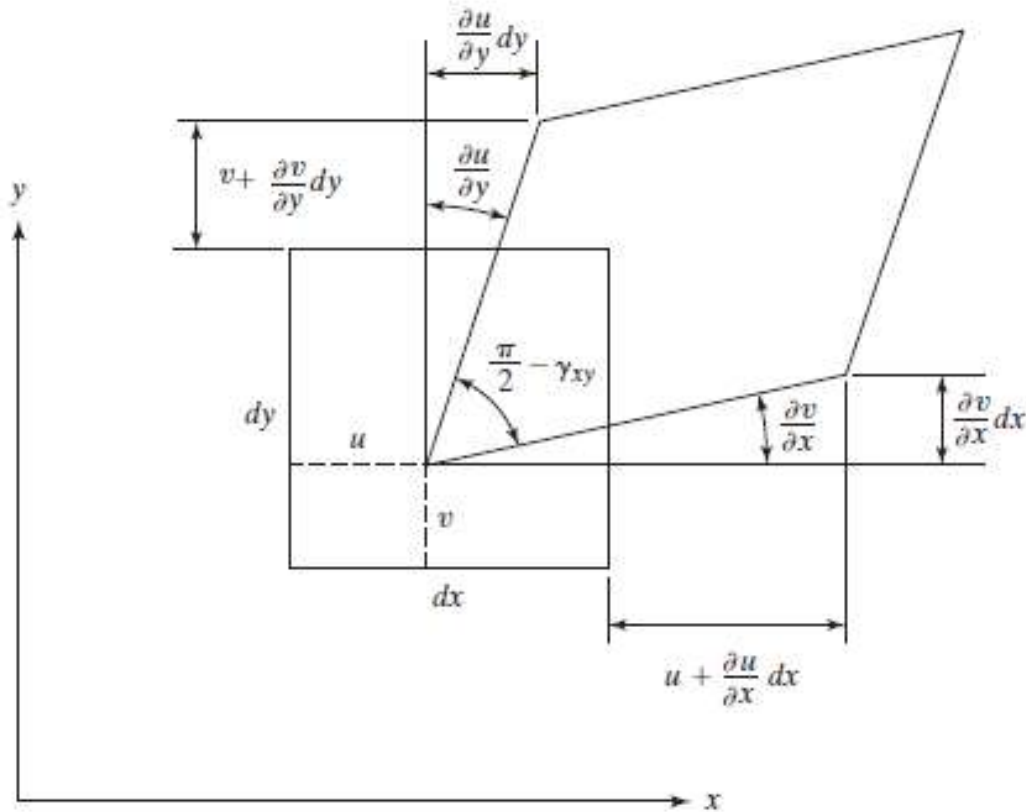


Fig. 3.4 Superficie elemental deformada.

3.2.4 Relaciones esfuerzo-deformación unitaria

La ley de Hooke generalizada, proporciona las relaciones esfuerzo-deformación unitaria para materiales elásticos. En materiales isotrópicos, las dos propiedades del material son el módulo de Young (o módulo de elasticidad) E y la relación de Poisson ν . Si se considera un cubo elemental dentro del cuerpo, la ley de Hooke da:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\
 \varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} & \gamma_{xz} &= \frac{\tau_{xz}}{G} \\
 \varepsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

El módulo de corte (o módulo de rigidez) G , está dado por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{3.12}$$

De las relaciones de la ley de Hooke (ecuación 3.11), se puede llegar a la siguiente expresión:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{(1 - 2\nu)}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \tag{3.13}$$

Sustituyendo $(\sigma_y + \sigma_z)$ y otras relaciones en la ecuación 3.11, obtenemos las relaciones inversas:

$$\sigma = D\varepsilon \tag{3.14}$$

D es la matriz simétrica de (6x6) del material dada por:

$$D = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 - \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 - \nu \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

3.2.5 Preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento

El análisis por elementos finitos asistido por computadora tiene tres etapas principales: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento. El preprocesamiento es la preparación de datos, como las coordenadas nodales, la conectividad, las condiciones de frontera y la información sobre cargas y material. La etapa del procesamiento implica la generación y la modificación de la rigidez, así como la solución de las ecuaciones que resultan de la evaluación de las variables nodales, el primer resultado del procesamiento serán los desplazamientos de los nodos. El siguiente paso, el posprocesamiento, será

calcular las deformaciones, los esfuerzos y las fuerzas nodales, así como la presentación de los resultados.

Paquetes de software comercial de gran escala usualmente proveen facilidades para generar la malla, presentaciones gráficas de datos de entradas y salidas, los cuales facilitan la verificación de ambos: Datos de entrada e interpretación de resultados. Es importante tomar en cuenta algunas consideraciones prácticas al modelar el sistema. Para reducir el tamaño del dominio, las condiciones de simetría o asimetría pueden ser aprovechadas. La continuidad y compatibilidad de desplazamiento de los nodos puede ser usualmente impuesta mediante relaciones de restricción. La malla de elementos es suficientemente fina en disposición de tener una precisión aceptable. Para mayor precisión, la relación de aspecto de los elementos debería ser tan cercana a la unidad como sea posible, pequeños elementos deben ser usados sobre las partes de grandes gradientes de esfuerzo. Restricciones adecuadas de soporte deben ser impuestas, con especial atención, a nodos en ejes de simetría.

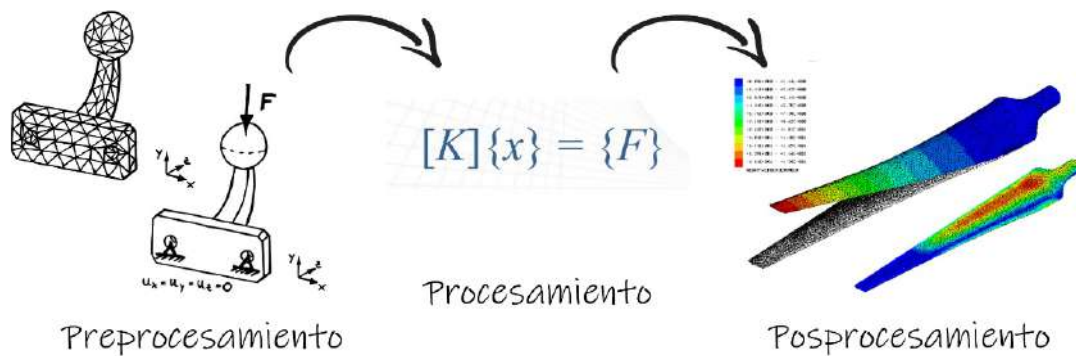


Fig. 3.5 Etapas principales del análisis por el método del elemento finito.

Se elaboraron 3 simulaciones para analizar la distribución y los niveles de esfuerzo que se presentan en el diseño de piezas prefabricadas propuestas en esta investigación. El programa de cómputo usado para elaborar y resolver los modelos numéricos fue ANSYS Workbench, en su versión 2019 R1, adquirido con una licencia de estudiante, la cual permite resolver modelos de hasta 32,000 nodos y la mayor parte de sus utilerías están disponibles. ANSYS es un programa especializado en el análisis por el método del elemento finito. En él, es posible modelar estructuras con geometrías complejas, asignar condiciones de contacto entre diferentes cuerpos y aplicar cargas y restricciones de manera gráfica; además, cuenta con diversas herramientas para elaborar el mallado y una presentación de resultados gráfica muy intuitiva.

3.3 Simulación de ensaye a compresión simple.

En el primer modelo se simuló el ensaye por compresión simple especificado en la norma mexicana NMX-C-405-ONNCCE-2014, para paneles de uso estructural aplicados en sistemas constructivos. Este ensaye consistió en aplicar una carga distribuida sobre el panel, tomando lecturas de la deformación que se presentaban desde su punto más alto hasta la base (Fig. 3.6), con el objetivo de determinar la resistencia a compresión del

panel. Para simplificar el modelo, la geometría de las piezas A y B fue dividida por la mitad en el sentido vertical (Fig. 3.7), donde se aplicó una condición de simetría.

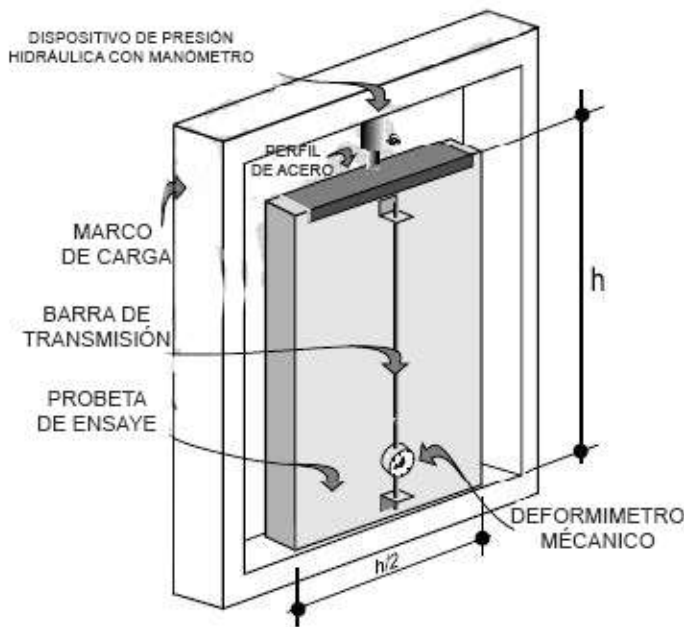


Fig. 3.6 Representación del ensayo de resistencia a la compresión simple.

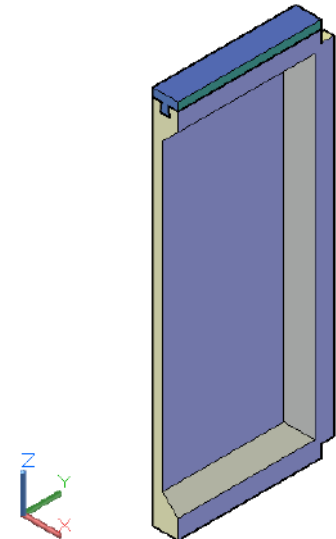


Fig. 3.7 Geometría exportada del diseño de piezas A y B.

3.3.1 Configuraciones iniciales

En la Fig. 3.8, se muestra el proceso de modelado desde la interfaz del programa ANSYS. Para comenzar el modelo, fue necesario definir el tipo de sistema de análisis que se llevaría a cabo, para las 3 simulaciones fue el caso de un análisis estructural estático lineal.

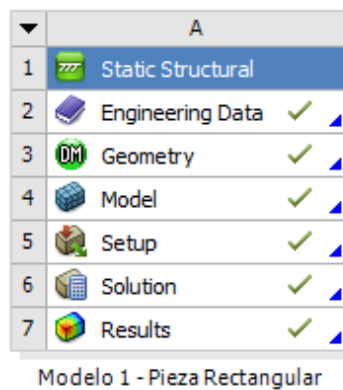


Fig. 3.8 Proceso de modelado desde el programa ANSYS

El siguiente paso fue definir las propiedades de los materiales. En la Tabla 3.1, se muestran las propiedades asignadas, estas fueron retomadas de los modelos anteriormente creados para estudiar el comportamiento de cascarones de ferrocemento

en la UAGro (Catalán Casiano, 2010). En la Fig. 3.9 se muestra la introducción de los datos dentro del programa.

Tabla 3.1 Propiedades del material utilizado para el modelo.

Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson	Peso volumétrico (kg/m ³)	Resistencia a la compresión promedio a 28 días, f_c' (MPa)
2.57x10 ⁴	0.18	2,200	31

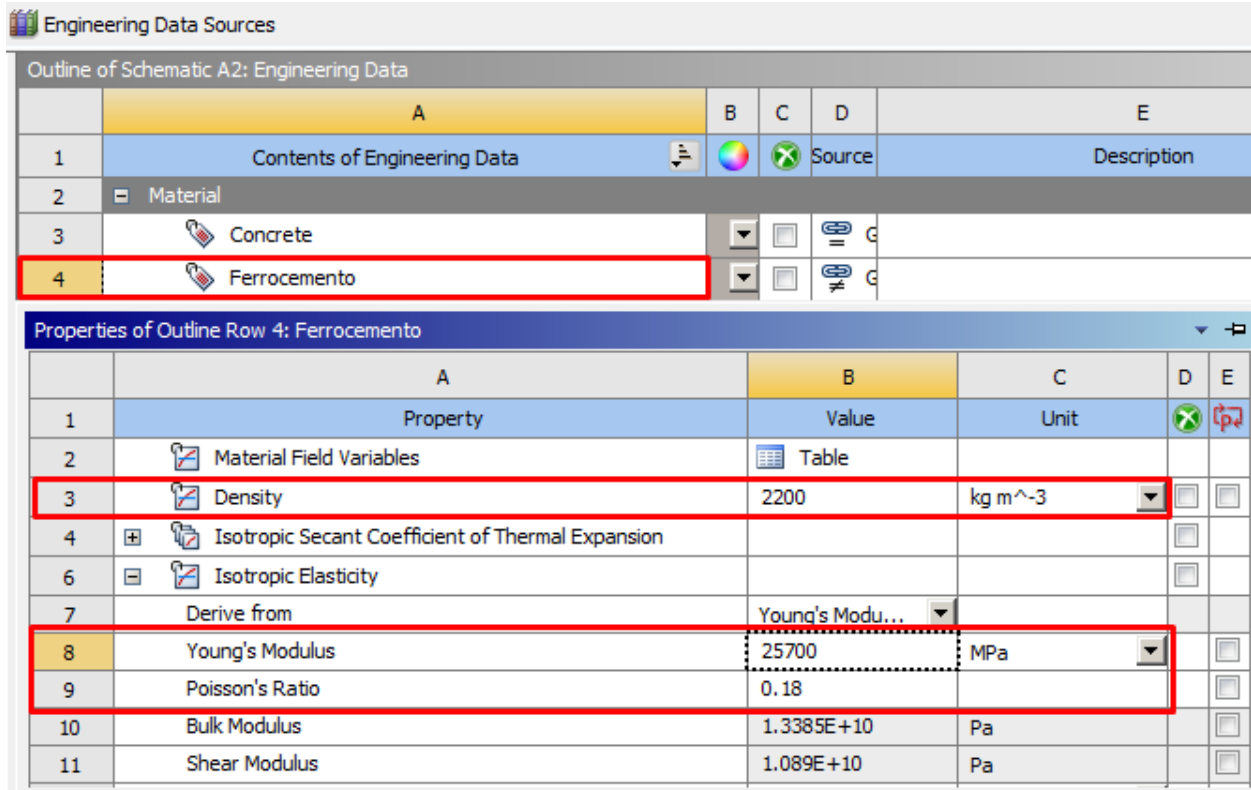


Fig. 3.9 Introducción de propiedades del material en el programa.

La geometría fue exportada desde AutoCAD a un archivo ACIS con formato ASCII (.sat) con la información geométrica 3D del sólido que representa el diseño propuesto, para posteriormente ser importado al programa ANSYS, dónde se continuó con el proceso de modelado.

El modelo constó de dos cuerpos que definieron su dominio (piezas A y B), a los que se les asignaron las propiedades del material definido anteriormente (Fig. 3.10). Con el objetivo de reducir el tamaño del dominio, a dichos cuerpos se les aplicó una condición de simetría normal al eje Y en la cara donde fue hecho el corte vertical (Fig. 3.11). La condición estructural simétrica significa que los desplazamientos fuera del plano y las rotaciones en el plano se establecen en cero.

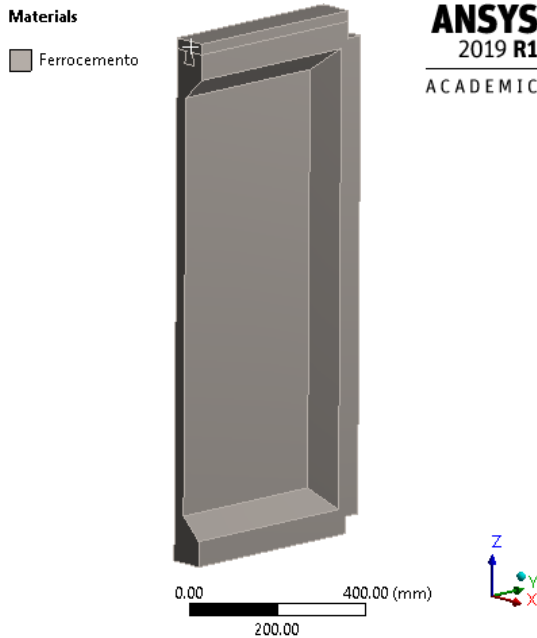


Fig. 3.10 Cuerpos que definen el dominio del modelo con la asignación de propiedades del material.

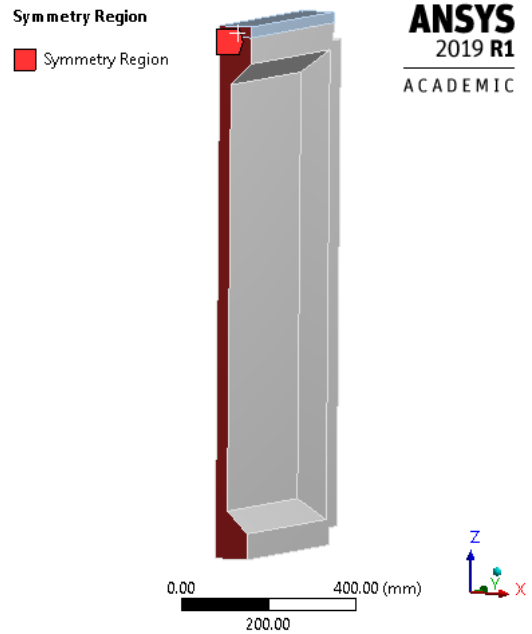


Fig. 3.11 Condición de simetría normal al eje Y.

3.3.2 Conexiones o contactos

Cuando dos superficies separadas se tocan entre sí de manera que se vuelven tangentes una a la otra, se dice que están en contacto. En el sentido físico común, las superficies que están en contacto tienen las siguientes características:

- No se interpenetran.
- Pueden transmitir fuerzas normales de compresión y fuerzas tangenciales de fricción.
- A menudo, no transmiten fuerzas normales de tensión, por lo que son libres de separarse y alejarse unos de otros.
- El contacto es una no-linealidad de estado cambiante. Es decir, la rigidez del sistema depende del estado del contacto si las partes se tocan o se separan.

El programa debe establecer una relación entre las dos superficies para evitar que se crucen entre sí en el análisis. Cuando el programa evita la interpenetración, se dice que impone la “compatibilidad de contacto” (Fig. 3.12). Se pueden usar las formulaciones “Penalización Pura” o “Lagrange Aumentado” para el contacto de cuerpos sólidos no lineales. Ambas son formulaciones de contacto basadas en un enfoque de penalizaciones.

$$F_{Normal} = k_{Normal}x_{penetración} \quad (3.16)$$

Para la fuerza de contacto F_{Normal} hay un concepto de rigidez de contacto k_{Normal} . A mayor rigidez de contacto, menor será la penetración $x_{penetración}$ como se muestra en la Fig. 3.12c. Idealmente, para un k_{Normal} infinito, se obtendría una penetración cero. Esto no es numéricamente posible con métodos basados en penalizaciones, pero mientras la penetración sea pequeña o insignificante, los resultados de la solución serán precisos.

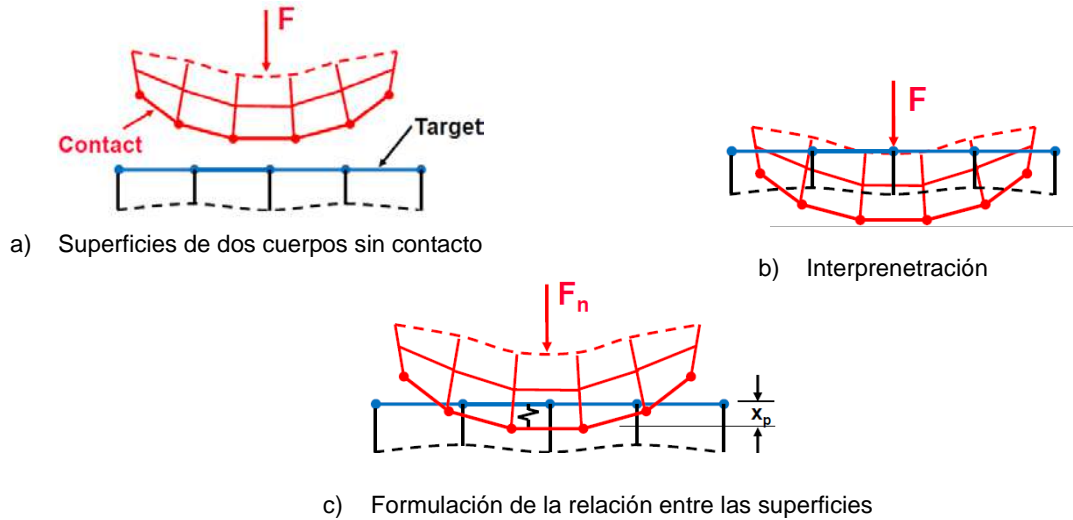


Fig. 3.12 Compatibilidad de contacto.

La principal diferencia entre los métodos de penalización pura y Lagrange aumentado, es que este último aumenta los cálculos de la fuerza de contacto (presión):

$$F_{Normal} = k_{Normal}x_{penetración} + \lambda \quad (2.17)$$

Debido a este término extra λ , el método de Lagrange aumentado es menos sensible a la magnitud de la rigidez de contacto k_{Normal} .

La rigidez normal de contacto k_{Normal} es el parámetro más importante, afecta tanto a la precisión como al comportamiento de convergencia. Un gran valor de rigidez proporciona una mayor precisión, pero el problema puede ser más difícil de converger. Si la rigidez de contacto es demasiado grande, el modelo puede oscilar, generando superficies de contacto que rebotan entre sí.

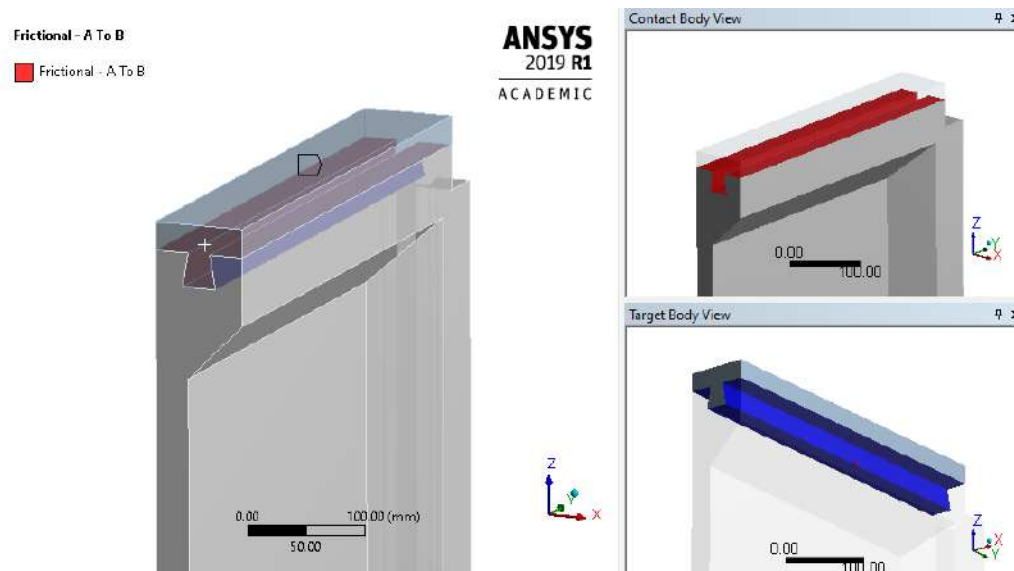
Además de lo anterior, en general, el comportamiento tangencial o deslizante de dos cuerpos en contacto puede ser sin fricción o implicar fricción. El comportamiento sin fricción permite que los cuerpos se deslicen entre sí sin ninguna resistencia. Cuando se incluye la fricción, se pueden desarrollar fuerzas de corte entre los dos cuerpos.

La fricción se explica con la Ley de Coulomb:

$$F_{tangencial} \leq \mu F_{normal} \quad (2.18)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción estática. Una vez que la fuerza tangencial $F_{tangencial}$ excede el valor anterior, ocurrirá un deslizamiento. Para el contacto por fricción, se debe ingresar un coeficiente de fricción, el cual, si se define como cero, resulta en el mismo comportamiento que el contacto sin fricción.

Para el primer modelo se definió una región de contacto del tipo friccionante entre las 5 caras que interactúan entre los dos cuerpos, como se muestra en la Fig. 3.13a. Se le asignó un coeficiente de fricción $\mu = 0.2$. El comportamiento del contacto fue simétrico, esto quiere decir que no hubo diferencia al considerar cual superficie es el contacto y cual el objetivo. Además, como formulación se eligió usar el método de Lagrange aumentado (Fig. 3.13b).



a) Caras en contacto

Details of "Frictional - A To B"	
<input type="checkbox"/> Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	5 Faces
Target	5 Faces
Contact Bodies	A
Target Bodies	B
Protected	No
<input type="checkbox"/> Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.2
Scope Mode	Automatic
Behavior	Symmetric
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	3.3138 mm
Suppressed	No
<input type="checkbox"/> Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled

b) Datos configurados

Fig. 3.13 Detalles del contacto friccionante entre los cuerpos del modelo 1.

3.3.3 Discretización o mallado

El mallado es una parte integral del proceso de simulación de ingeniería asistida por computadora. La malla influye en la precisión, la convergencia y la velocidad de la solución. El programa cuenta con una variedad de algoritmos para la generación de mallados de mejor calidad, desde mallas automáticas y fáciles de generar, hasta mallas altamente elaboradas con un buen nivel de detalle. Estas tecnologías de mallado brindan la flexibilidad para producir mallas que varían en complejidad con formas básicas hexadecimales o híbridos altamente detallados.

El método de mallado para los modelos de la investigación fue a partir de objetos con forma de tetraedros. En el programa el tipo de elemento elegido es llamado SOLID187 (Fig. 3.14), este es un elemento 3D de orden superior, es decir, su polinomio de interpolación es de segundo orden; tiene un comportamiento de desplazamiento cuadrático y es muy adecuado para modelar mallas irregulares. Está definido por 10 nodos con 3 grados de libertad cada uno: traslaciones en las direcciones nodales X, Y, Z. De manera adicional a los nodos, los datos de entrada del elemento incluyen las propiedades del material.

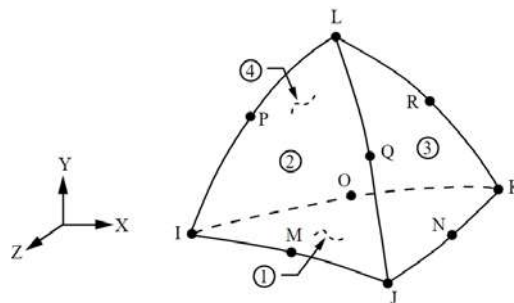


Fig. 3.14 Geometría del SOLID187.

El método usado para la generación de la malla con tetraedros usa un algoritmo llamado “Parche de conformación” (Patch conforming en inglés), el enfoque de este proceso de mallado es comenzar por los bordes y caras, todos límites en la frontera son respetados y mallados, luego se genera la malla en el interior del cuerpo. Este método es recomendado para geometrías CAD limpias, es decir, cuerpos sin bordes excesivos ni ángulos pronunciados.

Métodos de control de tamaño fueron usados para los elementos en el cuerpo de la pieza B y en las caras de las ranuras de la pieza A, definiendo el tamaño del elemento en 2 cm para lograr un refinamiento en esas zonas con dimensiones más pequeñas. Además, se le aplicó una edición al mallado con un algoritmo que hace coincidir los nodos en las regiones de contacto, llamado “Contact Match”; la Fig. 3.15 muestra los métodos de mallado aplicados al modelo 1. El resultado es un mallado con 13,258 elementos y 23,158 nodos (Fig. 3.16).

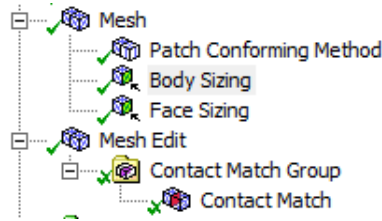


Fig. 3.15 Métodos de mallado aplicados al modelo 1.

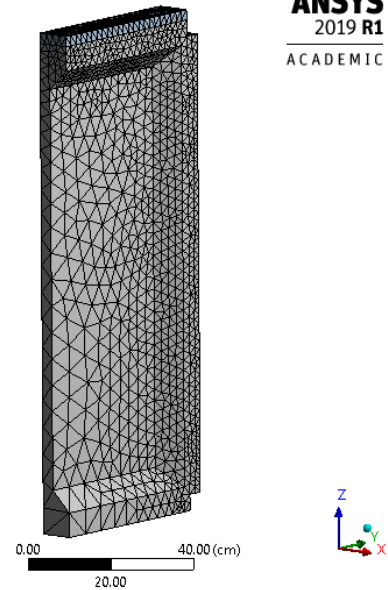


Fig. 3.16 Resultado del mallado del modelo 1.

La calidad del mallado es medida a partir de la relación de aspecto de los elementos y la oblicuidad entre sus bordes, entre otros parámetros. Para elementos 3D, la relación de aspecto es una medida de estiramiento de una celda, y se define como la relación entre el máximo y mínimo valor de cualquiera de las siguientes distancias: las distancias normales entre el centroide del elemento y los centroides de las caras y las distancias entre el centroide del elemento y los nodos. En la Fig. 3.17 se muestran los valores máximos y mínimos de la relación de aspecto obtenidos del mallado del modelo 1. Se obtuvo un promedio de 1.92, aunque se recomienda que este valor sea lo más cercano a 1, es lo más próximo que se pudo obtener tomando en cuenta la limitación de nodos que permite la licencia de estudiante. La figura también muestra de forma gráfica el porcentaje de elementos respecto a su relación de aspecto, se puede ver que más del 50% de los elementos tiene un valor cercano a 1.

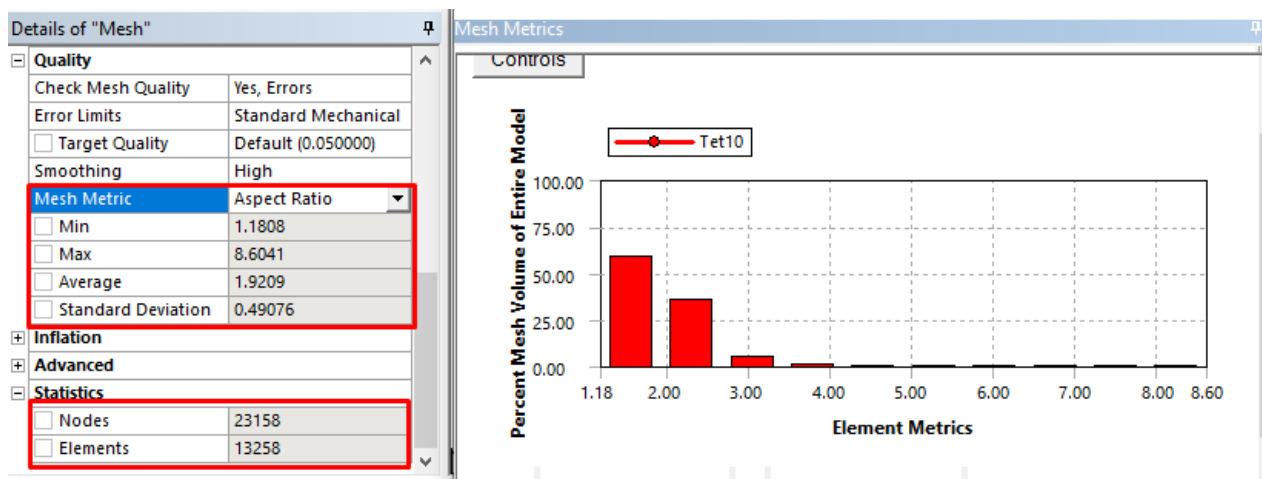


Fig. 3.17 Detalles de la relación de aspecto en los elementos del mallado del modelo 1.

La oblicuidad, por su parte, es la inclinación que aparta de la perpendicularidad la línea o el plano que se considera respecto de otra u otro, en el programa es medida de 0 a 1, cuando el valor es 0 se dice que el elemento tiene lados equiláteros y cuando es 1 indica un elemento completamente degenerado, por lo que se considera que entre más pequeño el valor, mejor calidad de mallado. La Fig. 3.18 muestra valores máximos y mínimos, así como un promedio obtenido de 0.26. Se puede ver también en la gráfica que prácticamente todos los elementos están debajo del valor de 0.75. Se recomienda para este tipo de elementos que su valor sea menor a 0.85. Por lo que el mallado se considera de buena calidad.

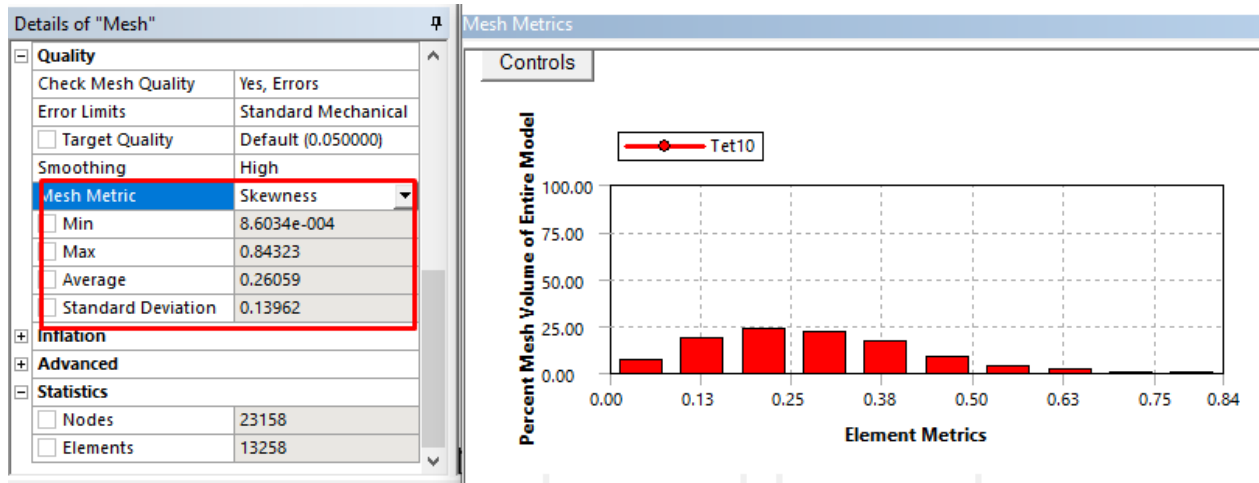


Fig. 3.18 Detalles de la oblicuidad en los elementos del mallado del modelo 1.

3.3.4 Condiciones de frontera

La aplicación de condiciones de frontera es el último paso en la preparación del modelo (preprocesamiento). Para evitar que los cuerpos se muevan, se necesita una restricción, es decir un punto donde los desplazamientos sean lo más próximos a 0. Otras condiciones de frontera definen las fuerzas externas en el componente, ya que sin ellas no se produciría la deformación. Como se vio anteriormente, estos valores introducidos en regiones específicas de la frontera son necesarios para realizar un cálculo exitoso, ya que forman parte de la formulación del sistema de ecuaciones que componen al modelo. En el modelo 1 se introdujeron 3 condiciones de frontera (Fig. 3.19): un soporte fijo en toda la cara inferior, simulando un empotre en su base; también se introdujo la aceleración de la gravedad en el sentido negativo del eje z para considerar su peso propio; y por último una presión sobre la cara superior que simule la carga vertical del ensayo a compresión simple.

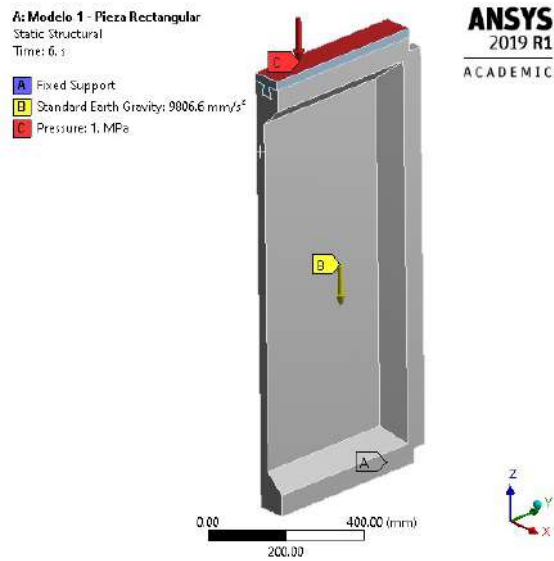


Fig. 3.19 Condiciones de frontera aplicada al modelo 1.

Con el objetivo de analizar los niveles de esfuerzo a diferentes condiciones de carga se configuró el análisis a realizarse en 6 pasos. En el primero se aplica la aceleración de la gravedad (Fig. 3.20a), de forma que al finalizar el primer paso se obtengan resultados sin aplicación de ninguna carga, solo deformaciones por peso propio; de los pasos 2 al 6 se aplica e incrementa de forma lineal la carga que va desde 0.2 MPa (2 kg/cm²) hasta 1 MPa (10 kg/cm²) (Fig. 3.20b).

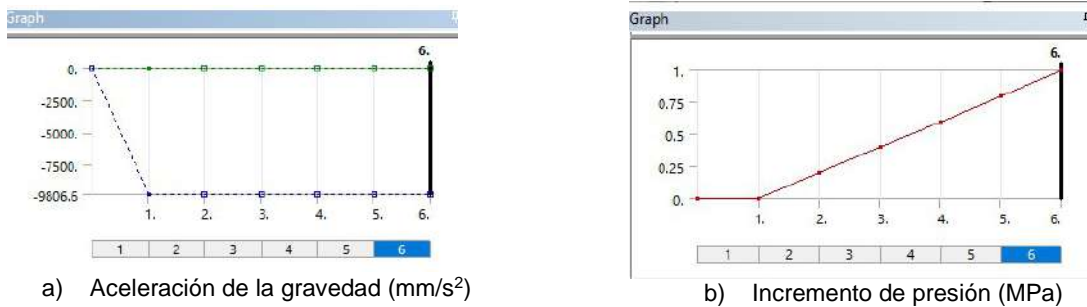


Fig. 3.20 Condiciones de frontera a través de los pasos del modelo.

Una vez definidos estos parámetros el preprocesamiento está completo, por lo que es posible buscar la solución del modelo.

3.3.5 Solución del modelo

La no linealidad del modelo, debido a la condición de contacto entre los cuerpos, no puede ser resuelta directamente, la solución debe ser encontrada por iteración. A pesar de que no se puede obtener una solución exacta, se considera aceptable cuando la energía introducida en el modelo a través de las cargas se aproxima lo suficiente a la energía de salida que se presenta en las reacciones.

La diferencia entre las cargas internas y externas es llamada residuo. El objetivo es iterar hasta que el residuo es aceptablemente pequeño, menor que el criterio, es ahí cuando se considera que ocurre la convergencia. Cuando esto ocurre, se dice que la solución está en equilibrio con una tolerancia aceptable. El criterio de convergencia de fuerzas es el valor de la tolerancia de error, a menudo esto es calculado como un porcentaje de todas las fuerzas externas aplicadas al modelo. Los valores típicos para el criterio de convergencia varían de 0.1 a 0.5% de la carga aplicada. El valor de la convergencia de la fuerza, o también llamado residuo, es el desequilibrio producido por la rigidez cambiante del modelo, causado por la no linealidad del contacto.

En la Fig. 3.21 se muestra el proceso de iteración de los pasos definidos en el modelo 1. Las líneas azules punteadas indican la convergencia de cada paso, la línea morada es el valor de la convergencia de la fuerza o residuo y la línea azul claro es el valor del criterio de convergencia de fuerzas. Se puede ver que en el primer paso el criterio y el residuo tienen valores menores al segundo paso, debido a que es en este segundo paso donde la presión es aplicada. En el primer paso son necesarias 4 iteraciones para lograr la convergencia, mientras que en el segundo se logró en 3 iteraciones. En los pasos restantes el criterio de convergencia sigue aumentando debido al aumento de la presión, mientras que el residuo se mantiene y se logra la convergencia en 2 iteraciones cada uno. Con un total de 15 iteraciones, el programa encuentra una solución aceptable para el modelo de 6 pasos.

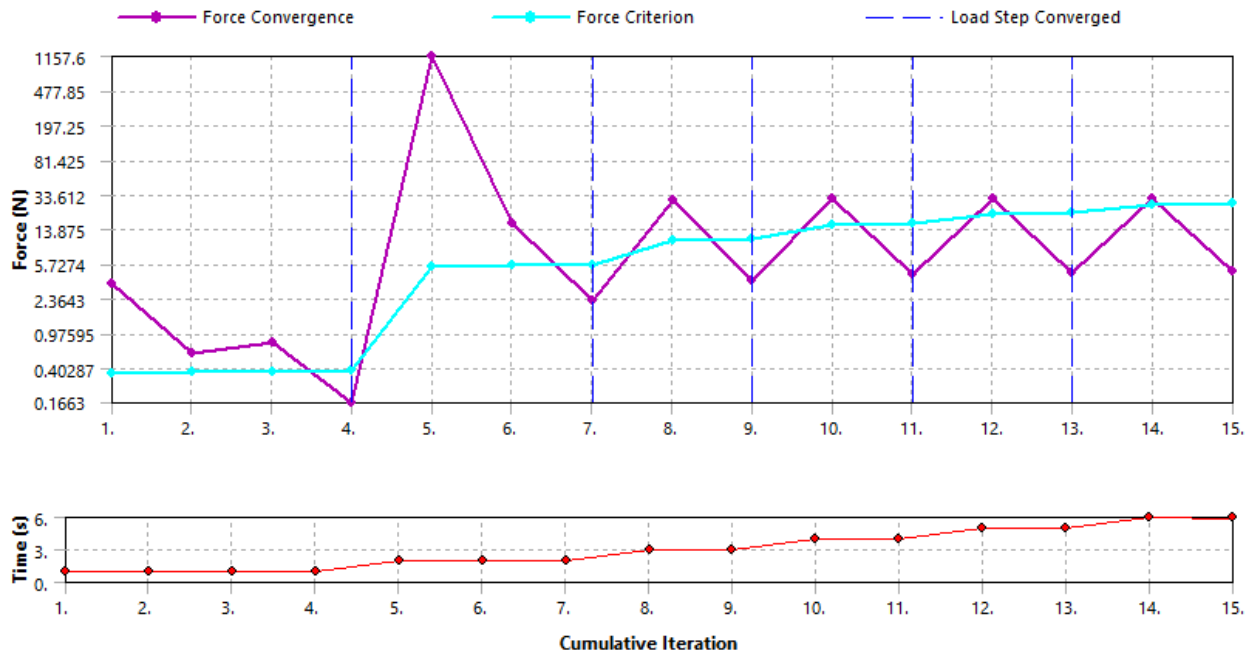


Fig. 3.21 Proceso de iteraciones necesaria para la convergencia de fuerzas del modelo 1.

El primer resultado obtenido siempre contiene los desplazamientos de los nodos individuales. En el siguiente paso se pueden calcular distorsiones, tensiones y fuerzas nodales. Al final de un cálculo, los resultados se envían al posprocesador del programa.

3.3.6 Interpretación de resultados

Una manera de verificar los resultados del modelo es comparando las acciones con las reacciones, dicho de otra manera, las fuerzas introducidas como cargas por medio de una presión en la parte superior de la pieza deben corresponder a las reacciones en su base (Fig. 3.22). En la Tabla 3.2 se muestra el peso necesario para producir la presión introducida en la parte superior de los cuerpos del modelo sumado al peso propio de los elementos, así como las reacciones obtenidas en el soporte fijo modelado en la base de los elementos. Se puede ver que coinciden, lo que significa una aproximación aceptable a la solución del modelo.

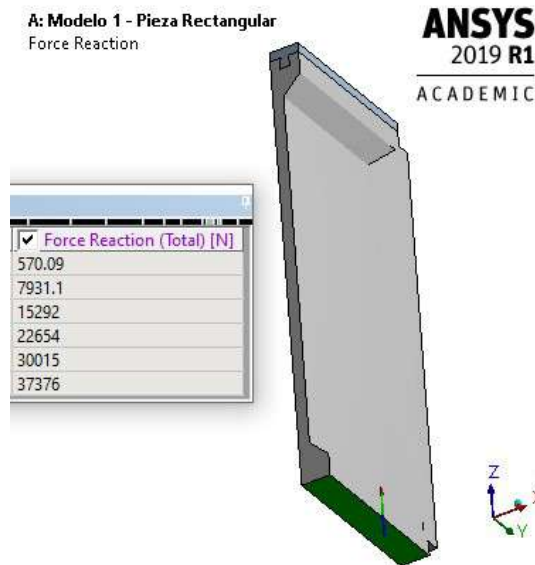


Fig. 3.22 Fuerzas de reacción en la base del modelo.

Tabla 3.2 Comparativa entre presión introducida al modelo y la fuerza de reacción.

Paso	Presión		Peso (t)	Peso Total (t)	Reacción en la base	
	Mpa	kg/cm ²			(N)	(t)
1	0	0.000	0.000	0.06	570.09	0.06
2	0.2	2.039	0.751	0.81	7931.1	0.81
3	0.4	4.079	1.501	1.56	15292	1.56
4	0.6	6.118	2.252	2.31	22654	2.31
5	0.8	8.158	3.002	3.06	30015	3.06
6	1	10.197	3.753	3.81	37376	3.81
Área: 368 cm ²						
Peso propio: 58 kg						

El programa permite revisar los resultados de manera gráfica a través de una escala de colores. Para comenzar se revisaron los desplazamientos totales mostrados en la Fig. 3.23a, el desplazamiento máximo de 3.3 mm ubicado en el centro de la parte superior de la pieza, se presentó en el paso 6 bajo la carga máxima, se puede ver también que un

desplazamiento mayor a 3 mm se produce en toda la cara superior, mientras que la base se mantiene en valores cercanos a 0. En la Tabla 3.3 se presentan los resultados de los desplazamientos normales a los ejes para cada paso. Los mayores desplazamientos se dieron en el eje X, lo que nos indica una deformación general de pandeo en el panel como se muestra en la Fig. 3.23b.

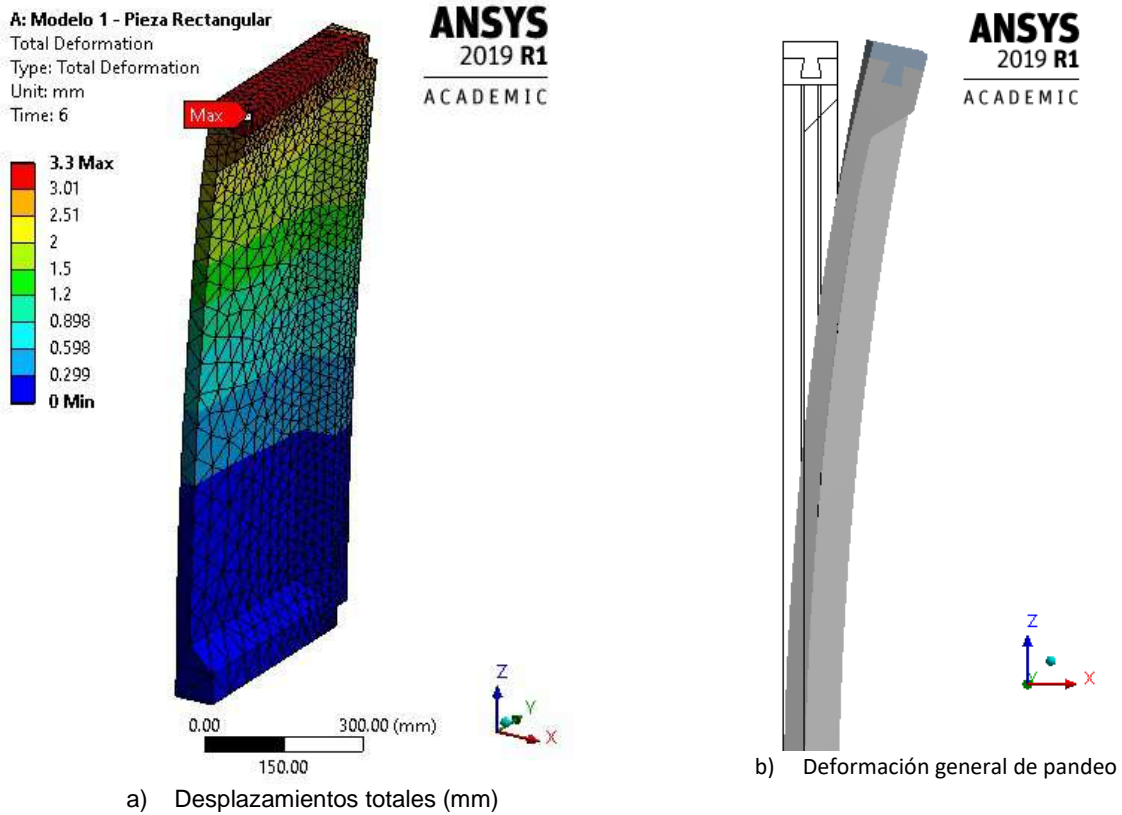


Fig. 3.23 Desplazamientos totales obtenidos de la solución del modelo 1.

Tabla 3.3 Desplazamientos máximos normales a los ejes X, Y y Z (mm).

Paso	X	Y	Z	Total
1	7.38E-03	9.65E-05	1.16E-05	7.57E-03
2	0.65915	6.13E-03	1.07E-02	0.66646
3	1.3111	1.22E-02	2.19E-02	1.3255
4	1.9629	1.82E-02	3.30E-02	1.9845
5	2.6146	2.43E-02	4.41E-02	2.6434
6	3.2664	3.04E-02	5.53E-02	3.3023

El pandeo en la pieza produce esfuerzos a tensión en una de sus caras y compresión en la otra, los esfuerzos principales máximos y mínimos nos ayudan a identificar las zonas que presentan mayores esfuerzos a tensión y compresión. Debido a que las características del material modelado solo consideran al mortero, es de mayor importancia identificar las zonas de falla a tensión para hacer las consideraciones

necesarias de un refuerzo. En la Fig. 3.24a se muestran los resultados obtenidos en la cara sometida a tensión, el esfuerzo máximo de 4.32 MPa (43 kg/cm²) se presentó en el extremo lateral distribuyéndose en una franja por lo ancho de la cara aproximadamente a unos 15 cm de la parte superior, de acuerdo con la Tabla 1.1 presentada en el capítulo 1, este esfuerzo corresponde a un comportamiento no corrosivo dentro de un estado elasto-plástico del material y presentaría grietas de hasta 100 micras. De acuerdo con la misma tabla para alcanzar un comportamiento impermeable en un estado casi elástico los esfuerzos deberían considerarse como límite hasta los 3.3 MPa (33 kg/cm²), los cuales son apenas rebasados en el paso 5 bajo una presión de 0.8 MPa (8 kg/cm²), como se muestra en la Tabla 3.4, donde se presentan los esfuerzos principales máximos obtenidos para cada paso.

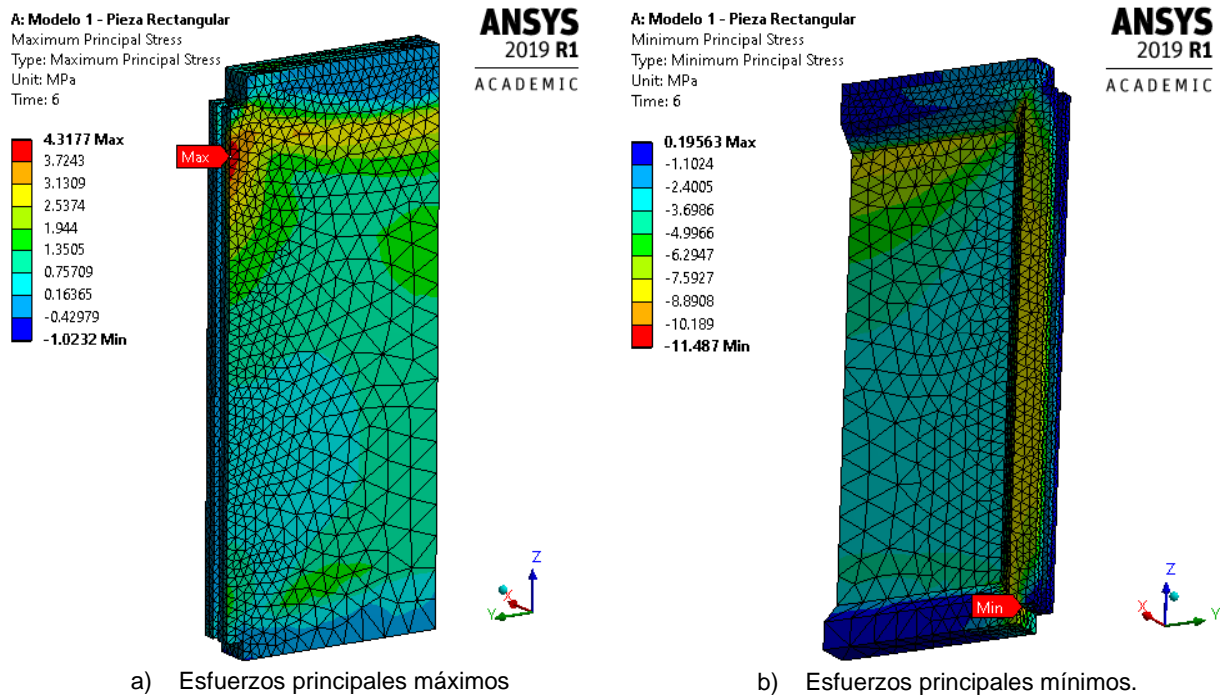


Fig. 3.24 Esfuerzos principales obtenidos en el modelo 1 para el paso 6.

Tabla 3.4 Esfuerzos principales máximos y mínimos en el modelo 1 para cada paso.

Pasos	Esfuerzos principales	
	Máximos (MPa)	Mínimos (MPa)
1	1.42E-02	-7.35E-02
2	0.86973	-2.356
3	1.732	-4.6388
4	2.594	-6.9215
5	3.4559	-9.2042
6	4.3177	-11.487

La Fig. 3.24b muestra la cara del elemento sometida a compresión, el valor mínimo obtenido es de 11.49 MPa (115 kg/cm²) en la esquina inferior. La figura también muestra

cómo se distribuyen los esfuerzos hacia los lados donde la sección se hace más ancha, resultando en una concentración de dichos esfuerzos en las esquinas inferiores, sin embargo, la resistencia a compresión del mortero suele diseñarse con valores mayores a los 150 kg/cm², casi un 30% más que el esfuerzo presentado.

Otra forma de identificar las zonas de falla es a través de los esfuerzos de Von Mises, el criterio de falla establece que el esfuerzo de Von Mises σ_{VM} debe ser menor que el esfuerzo de fluencia σ_Y del material. En forma de desigualdad: $\sigma_{VM} \leq \sigma_Y$. El esfuerzo de Von Mises está dado por:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{I_1^2 - 3I_2} \quad (3.19)$$

Donde I_1 e I_2 son las primeras dos invariantes del tensor de esfuerzos. Para el estado general de esfuerzo, dado en la ecuación 3.5, I_1 e I_2 están dados por:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

La expresión 3.19 puede expresarse en la forma:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2}} \quad (3.21)$$

Los esfuerzos están formulados para identificar las zonas de falla por tensión, debido a esto son ampliamente usados en materiales dúctiles, sin embargo, para materiales frágiles, como el mortero, los valores de los resultados pueden llegar a ser malinterpretados. En la Fig. 3.25a se muestran los esfuerzos de Von Mises obtenidos de la solución del modelo 1, se puede ver que el esfuerzo máximo presentado de 10 MPa (100 kg/cm²) está ubicado en la misma zona en la que se presentó el esfuerzo principal mínimo identificado como compresión con un valor similar; esto no quiere decir que no sean presentados los esfuerzos a tensión dentro de los resultados, como se puede ver en la misma figura, donde se mostró el resultado obtenido de 4.27 MPa (43 kg/cm²) en la zona identificada con los mayores esfuerzos a tensión por medio de los esfuerzos principales máximos.

Esto se debe principalmente a que los esfuerzos de Von Mises, calculan lo que se conoce como densidad de energía de distorsión en un punto particular del sistema, esto es útil para determinar fallas en materiales dúctiles ya que su módulo de elasticidad puede relacionarse con su esfuerzo de fluencia, mientras que, en el material frágil, el módulo de elasticidad se relaciona con su resistencia a la compresión, lo que provoca que se identifiquen zonas de falla donde se dan los esfuerzos máximos a compresión.

Una visualización de la cara donde se presentan los esfuerzos por tensión, muestra resultados de los esfuerzos de Von Mises (Fig. 3.25b) similares a los obtenidos por esfuerzos principales máximos.

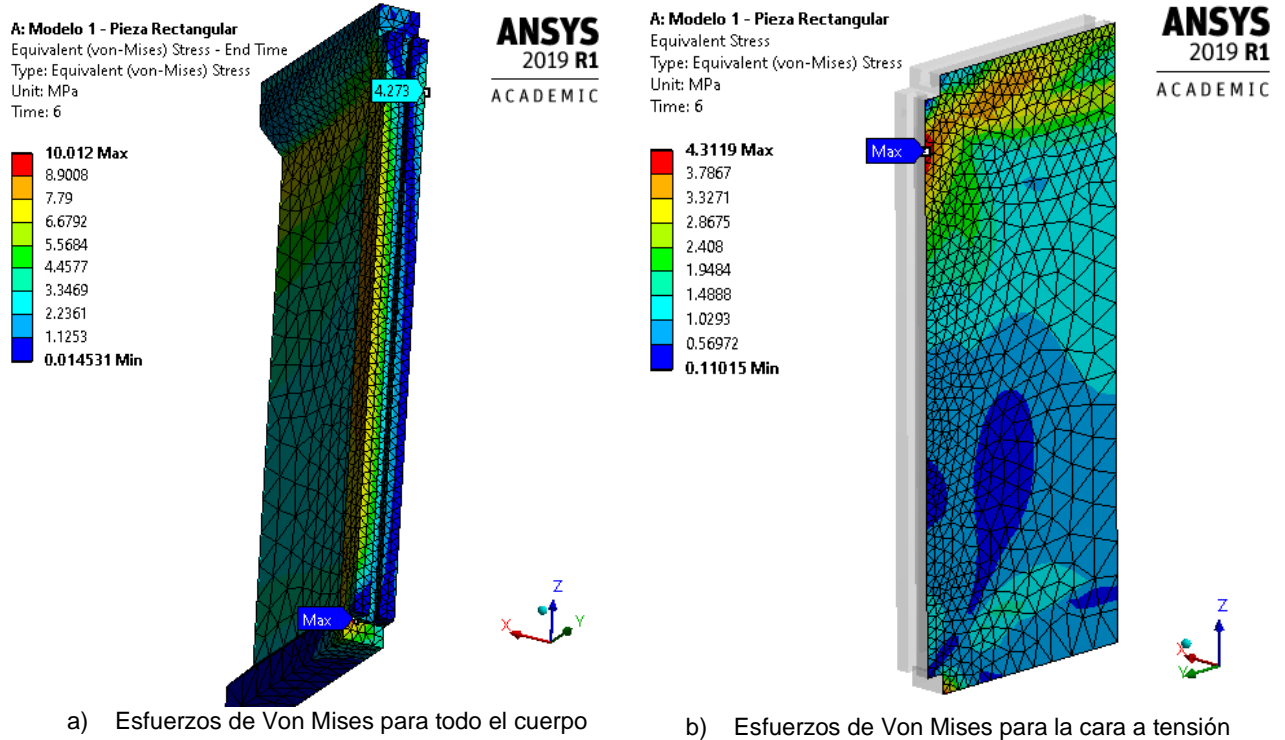


Fig. 3.25 Esfuerzos de Von Mises obtenidos en el modelo 1 para el paso 6.

3.4 Simulación de ensaye de carga uniformemente repartida

En el segundo modelo se simularon las condiciones del ensaye de carga uniformemente repartida actuando perpendicular al plano del panel, descrito en la NORMA ONNCCE. El ensaye consiste en colocar el panel sobre un marco en posición horizontal apoyado perimetralmente (Fig. 3.26), y posteriormente aplicar carga distribuida por medio de taras al centro del panel. El objetivo del ensaye es determinar la resistencia a carga aplicada sobre el plano del panel, mediante una relación entre la carga aplicada y la deformación medida por un deformímetro ubicado al centro del panel. Para simular estas condiciones, se consideró como un panel al conjunto de 2 piezas A unidas por una pieza B apoyadas por los lados en su conexión con las piezas C. Al dividir al panel por la mitad en sus ejes simétricos en el plano, resulta en la geometría mostrada en la Fig. 3.27.

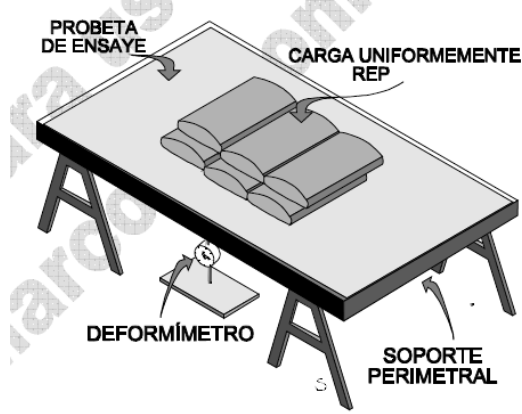


Fig. 3.26 Representación de ensaye de carga uniformemente repartida

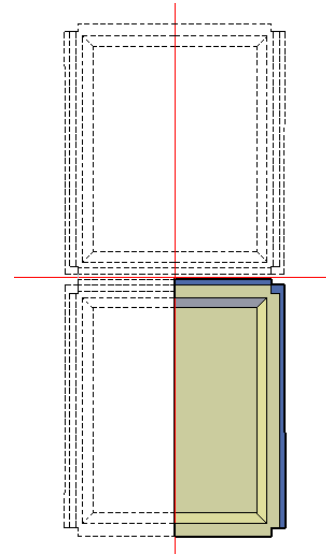


Fig. 3.27 Representación de panel para ensaye y sus ejes simétricos.

3.4.1 Preprocesamiento

Con el objetivo de reducir el tamaño del dominio del modelo se importaron 3 cuerpos con la geometría que representa la mitad de las piezas A, B y C. Se les asignaron las propiedades del material con los mismos valores que al modelo 1, mostrados en la Tabla 3.1; también se aplicaron 2 regiones de simetría en las direcciones X y Y, como se muestra en la Fig. 3.28. Al tratarse de 3 cuerpos que entran en contacto unos con otros en diferentes caras, se crearon 3 regiones de contacto del tipo friccionante con un coeficiente de fricción $\mu = 0.2$, un comportamiento simétrico y una formulación Lagrange Aumentada (Fig. 3.29).

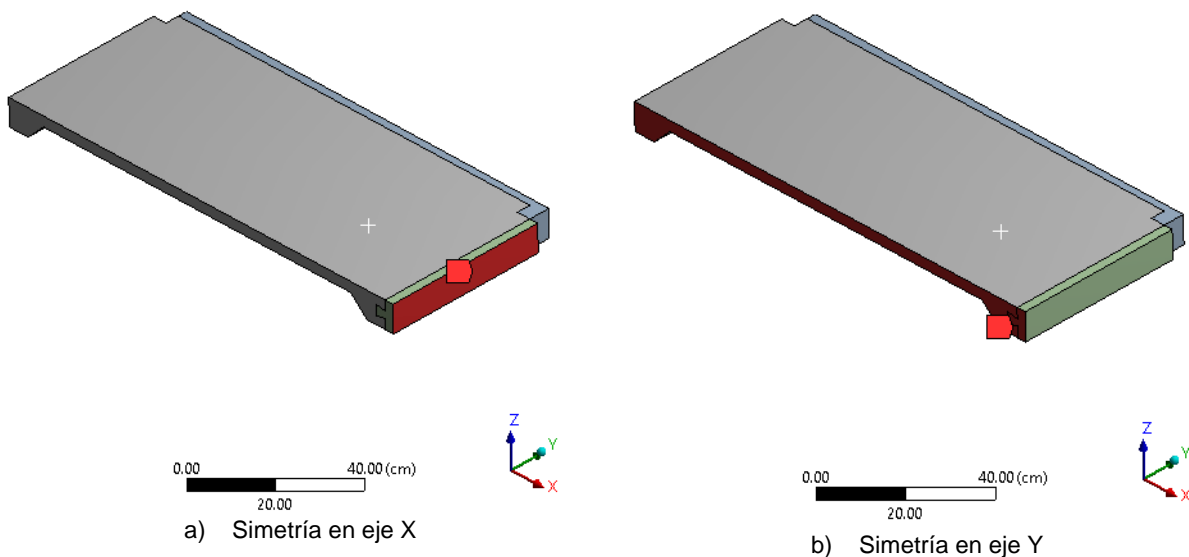


Fig. 3.28 Regiones de simetría aplicadas al modelo 2.

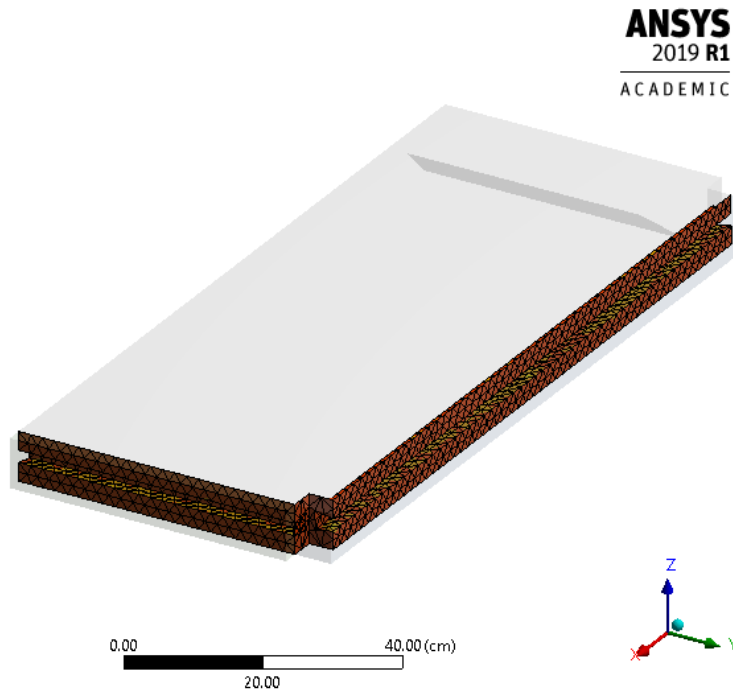


Fig. 3.29 Regiones de contacto aplicadas al modelo 2.

Métodos de generación de malla similares a los empleados en el modelo 1 fueron implementados, el parche de conformación con tetraedros y control de tamaño de 2 cm fue aplicado a las piezas B y C, mientras que en la pieza A se aplicó el control de tamaño, también de 2 cm a las 10 caras de las ranuras que están en contacto con las piezas B y C. De igual manera que al modelo 1, se le aplicó una edición al mallado para hacer coincidir los nodos en las regiones de contacto. El resultado fue un mallado de 27,954 nodos en 15,112 elementos (Fig. 3.30). La calidad del mallado fue medida con los parámetros de relación de aspecto y oblicuidad, obteniendo un valor promedio para el primero de 1.98 con un 85% de elementos cercanos a 1; y un valor promedio de oblicuidad de 0.28 con un 100% de elementos debajo del valor de 0.85, considerando al mallado de buena calidad.

En las condiciones de frontera se consideró como apoyo fijo a las aristas de las piezas B y C en la parte inferior del perímetro, simulando el apoyo perimetral que especifica la norma. El análisis se configuró en 6 pasos, en el primero se introdujo la aceleración de la gravedad para analizar las deformaciones y esfuerzos por peso propio. En los pasos siguientes se aplicó una presión en todas las caras superiores de manera incremental desde los 300 Pa (30 kg/m²) hasta los 1500 Pa (150 kg/m²) (Fig. 3.31).

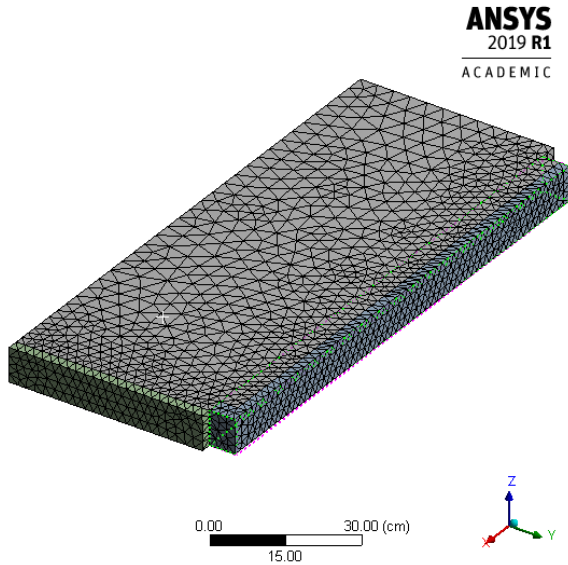


Fig. 3.30 Mallado generado para el modelo 2.

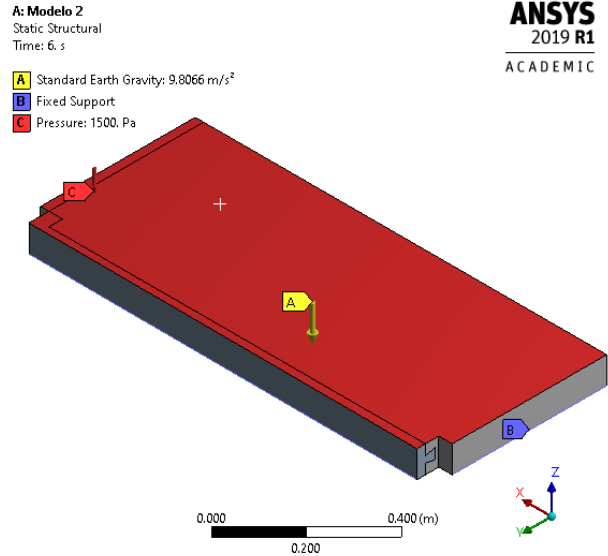


Fig. 3.31 Condiciones de frontera aplicadas al modelo 2.

3.4.2 Procesamiento

La solución del modelo implicó una serie de iteraciones debido a la no linealidad en los contactos, en la Fig. 3.32 se muestra una gráfica de dichas iteraciones, donde en el primer paso el valor del residuo toma 6 iteraciones para ser menor que el criterio, en este paso se resolvió la condición de peso propio. En el paso 2, en el que se aplica la presión, el criterio comienza a aumentar su valor, así como el residuo, que adquiere un valor similar al del comienzo, en este paso tomó 3 iteraciones para que se diera la convergencia de fuerzas. En los pasos siguientes, el criterio sigue aumentando debido al aumento del valor de la presión sobre la cara superior, sin embargo, el residuo es muy próximo al criterio en los pasos 3 y 4, llegando a ser menor desde la primera iteración de los pasos 5 y 6, resultando en 2 iteraciones por paso. En total se realizaron 17 iteraciones para encontrar la solución de los 6 pasos.

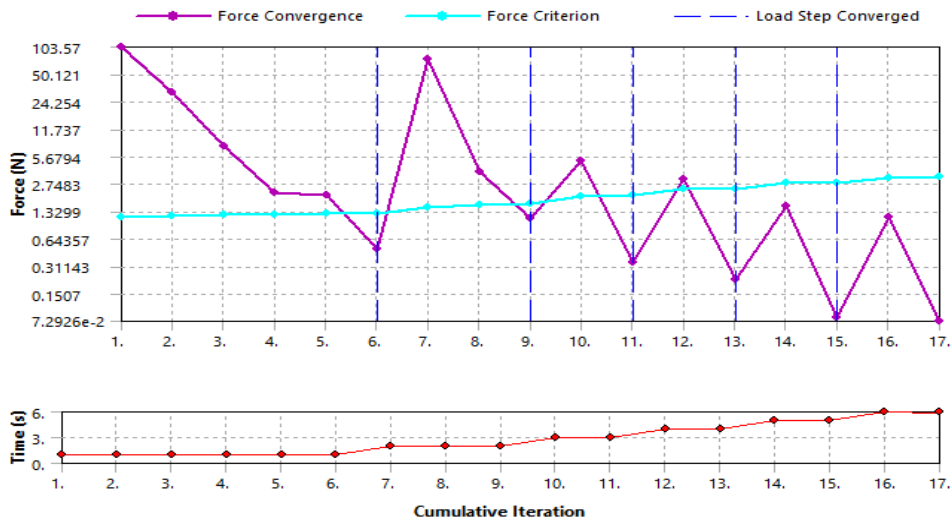


Fig. 3.32 Proceso de iteraciones necesaria para la convergencia de fuerzas del modelo 2.

3.4.3 Posprocesamiento

Los resultados muestran una deformación máxima que se presenta al centro de la pieza A en la dirección negativa del eje Z, con un valor de 0.043 mm; por su parte, la pieza B, alcanzó valores máximos de 0.029 mm ubicados al centro de la pieza en la cara del apéndice de la saliente (Fig. 3.33).

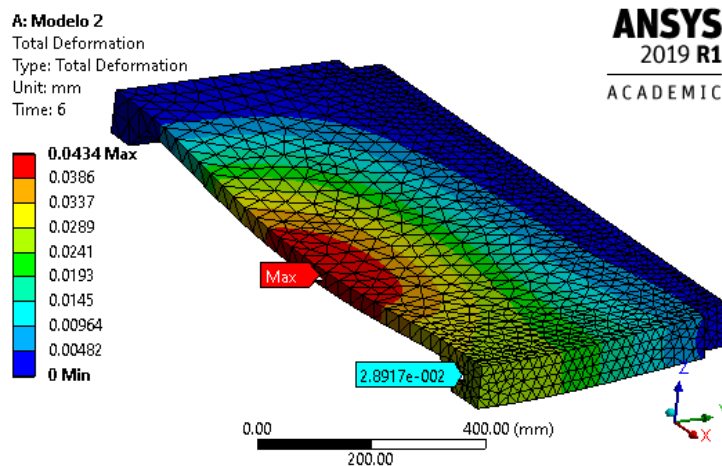


Fig. 3.33 Desplazamientos totales obtenidos para el modelo 2.

Por la configuración de la deformación general, se presentaron en este caso esfuerzos por tensión y compresión en ambas caras (superior e inferior) de las piezas. El esfuerzo principal máximo a tensión obtenido en el paso 6 para las piezas A y B, se ubicó en la cara inferior al centro de las piezas, con un valor de 0.35 MPa (3.57 kg/cm²) en la pieza A y 0.31 MPa (3.16 kg/cm²) en la pieza B (Fig. 3.34).

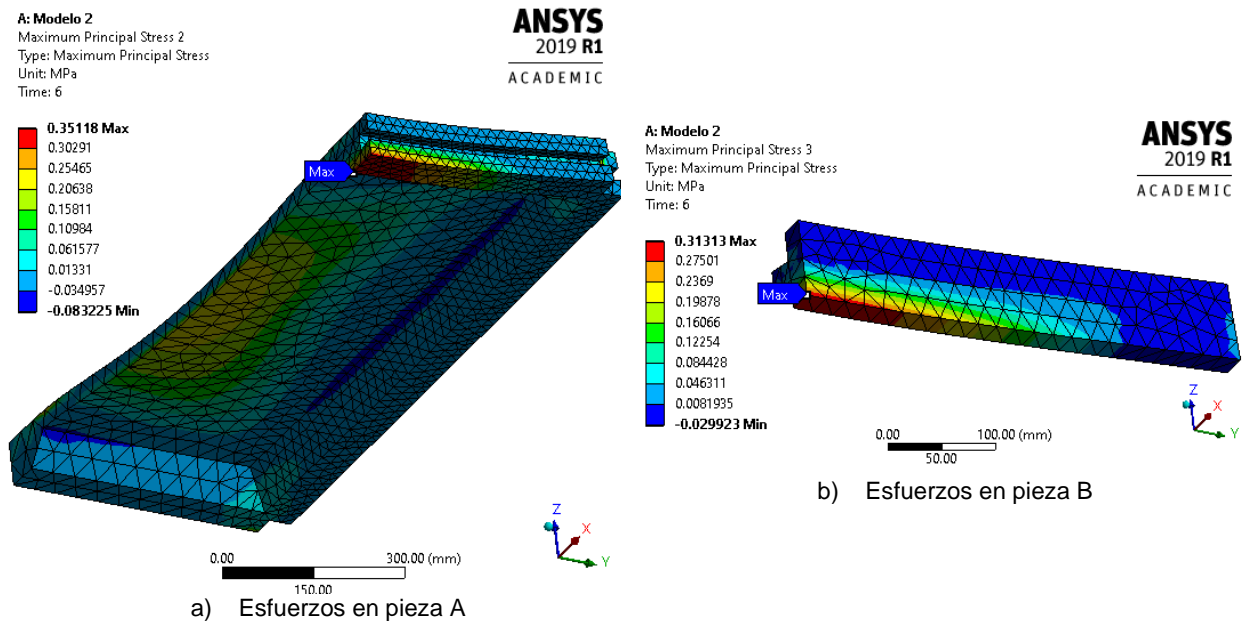


Fig. 3.34 Esfuerzos principales máximos obtenidos del modelo 2.

3.5 Modelo analítico de propuesta de vivienda

Como se mencionó en el capítulo 2, una propuesta de aplicación para el uso de piezas diseñadas en esta investigación, es una vivienda en la que se emplean 161 piezas en total (VPPF). Con el objetivo de analizar el desempeño estructural de este nuevo sistema constructivo y las piezas que lo conforman ante la presencia de fuerzas externas producidas por un sismo, se procedió a simular las condiciones en un tercer y último modelo. Para ello, primero es necesario determinar las solicitaciones sísmicas de la vivienda, considerando que las piezas serían fabricadas con materiales de zonas cercanas a la ciudad de Chilpancingo, Gro., y la vivienda se construiría en la condición más desfavorable, es decir, en un terreno tipo III de la zona sísmica D, según las especificaciones del Reglamento de Construcción para los Municipios del Estado de Guerrero (1994), posteriormente se simplificó el modelo en una esquina de la vivienda donde se presenten las mayores solicitaciones.

3.5.1 Determinación de las solicitaciones sísmicas

Para construir la propuesta de vivienda son necesarias 66 piezas A, 14 piezas B, 42 piezas C, 21 piezas D, 10 piezas E y 8 piezas F. En la Tabla 3.5 se presenta el peso de cada pieza a partir de su volumen, considerando un peso específico de $2\,200\text{ kg/m}^3$ para el ferrocemento (Catalán Casiano, 2010), resulta un peso de 8.8 toneladas, si a esto se le añade el peso de una dala de cerramiento de sección cuadrada con 10 cm de lado y una cubierta ligera de lámina de 5 kg/m^2 , se obtiene un peso total de la estructura de 10.10 t.

Tabla 3.5 Peso por pieza y total de la propuesta de vivienda (VPPF).

	Cantidad	Volumen (cm ³)	Peso pieza (kg)	Peso total (t)
Pieza A	66	50,304	110.67	7.304
Pieza B	14	5,076	11.17	0.156
Pieza C	42	6,595	14.51	0.609
Pieza D	21	6,012	13.23	0.278
Pieza E	10	14,531	31.97	0.320
Pieza F	8	8,797	19.35	0.155
SUB-TOTAL:				8.822

Según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la CDMX (2017), la fuerza lateral que actúa en el i -ésimo nivel, F_i , resulta de la ecuación 3.22, esta ha sido simplificada para el cálculo en un sólo nivel, como se propone en la vivienda; dado que se está usando un sistema estructural alternativo a base de piezas prefabricadas de ferrocemento, la resistencia a las fuerzas laterales será suministrada totalmente por elementos y materiales diferentes a los especificados en las tablas que determinan los valores del factor de comportamiento sísmico, Q , y el factor de sobre-resistencia R , por lo que para ambos se usará 1.

$$F_i = \frac{c}{QR} W \quad (3.22)$$

De acuerdo con el Reglamento de Construcción para el estado de Guerrero (1994) el coeficiente sísmico c para la zona D en un terreno tipo III es de 1.08, las fuerzas laterales se determinan de igual forma que en las NTCS 2017 de la CDMX, haciendo uso de la ecuación 3.22, por lo que la fuerza lateral calculada resulta de 10.91 t (107 kN). Una distribución de esta fuerza por medio de las áreas de los muros que dan rigidez a la vivienda en dos direcciones ortogonales es mostrada en la Fig. 3.35, considerando un ancho de 8 cm para los muros. Cabe comentar que, de acuerdo a las curvas histeréticas obtenidas por Bedoya y otros (2015), se puede tomar un valor de Q mayor al propuesto, con lo cual disminuirían las sollicitaciones sísmicas, sin embargo, para fines analíticos de esta investigación, se tomaron los valores más conservadores.

La esquina seleccionada para el análisis se encuentra en la intersección de los ejes A y 1. En la Fig. 3.36 se muestra la orientación del sistema de coordenadas definido para el modelo, en el cual los muros están orientados en los ejes X y Y. Se muestra también la distribución de las fuerzas laterales equivalentes actuantes en esos tramos de muro para el caso de la combinación de cargas más desfavorable por sismo (100% en el eje X y 33% en el eje Y). La Fig. 3.37 muestra la geometría 3D de las piezas necesarias para la construcción-ensamble de una esquina (4 piezas A, 2 piezas B y 2 piezas E), dicha geometría será importada en el programa ANSYS para continuar con el preprocesamiento del análisis por el método del elemento finito.

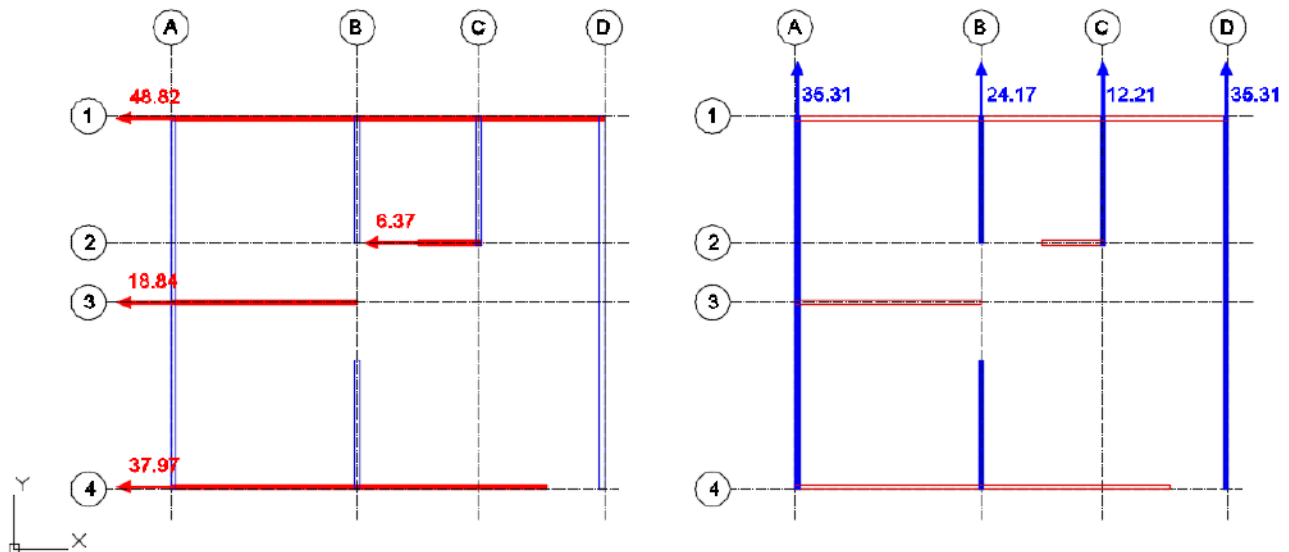


Fig. 3.35 Distribución del 100% de la fuerza horizontal sísmica en los muros en ambas direcciones (kN).

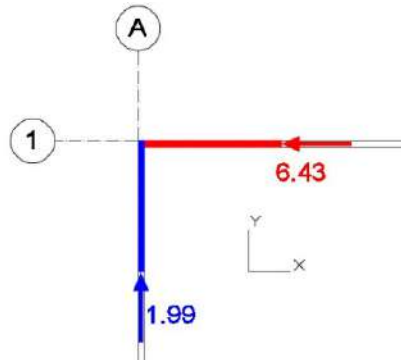


Fig. 3.36 Fuerzas laterales equivalentes al tramo de los muros en esquina.

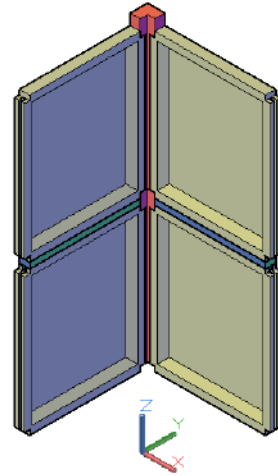


Fig. 3.37 Geometría 3D de las piezas que conforman los muros en esquina representativa.

3.5.2 Preprocesamiento

El modelo 3 cuenta con 8 cuerpos a los que se les asignaron las propiedades de la Tabla 3.1 (Fig. 3.38). Dichos cuerpos interactúan entre sí a través de las conexiones donde fueron definidas 13 regiones de contacto del tipo friccionante, con un coeficiente de fricción $\mu = 0.2$, comportamiento simétrico y una formulación Lagrange Aumentada (Fig. 3.39).

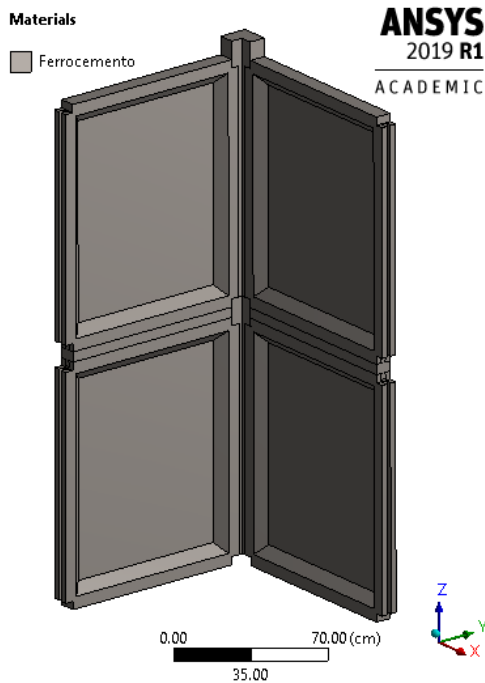


Fig. 3.38 Asignación de propiedades del material ferrocemento a los 8 cuerpos del modelo 3.

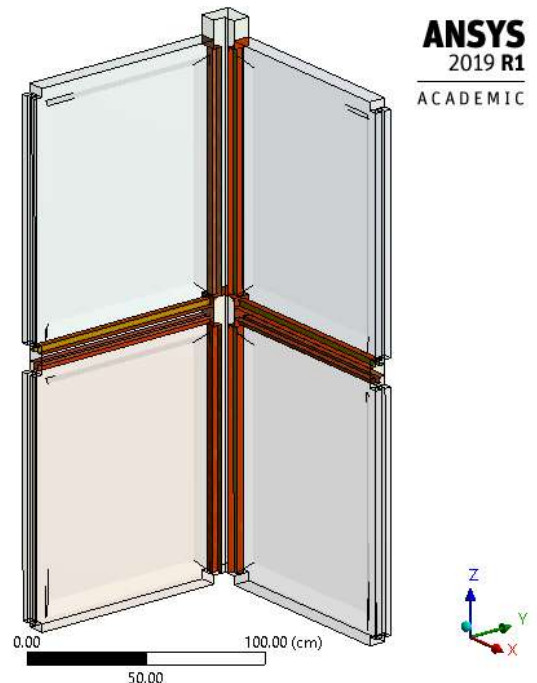


Fig. 3.39 Regiones de contacto definidas entre los 8 cuerpos del modelo 3.

Lo métodos empleados para la generación de la malla fueron el parche de conformación con tetraedros para los 4 cuerpos de las piezas esbeltas (2 piezas B y 2 piezas E), y un método de control de tamaño de 5 cm basado en las regiones de contacto, una herramienta muy útil del programa para reducir tiempos en la generación del mallado en modelos con un gran número de regiones de contactos. Así como en los modelos anteriores, se realizó una edición del mallado para hacer coincidir los nodos en todas las regiones de contactos. El resultado fue un mallado de 31,710 nodos en 15,833 elementos en forma de tetraedros con tamaños pequeños en las conexiones y a medida que se alejan de ellas los elementos aumentan de tamaño (Fig. 3.40). Las medidas empleadas para determinar del mallado fueron la relación de aspecto, con un valor promedio de 2.61 y un 60% de los elementos tienen un valor menor a 2. La oblicuidad presentó un valor promedio de 0.45 con casi el 90% de los elementos con valores por debajo de 0.85, lo que indica un buen mallado, con algunos elementos que presentan relación de aspecto regular.

Las condiciones de fronteras incluidas en el modelo fueron: un soporte fijo en las 11 caras que se encuentran en la base de las piezas inferiores, la aceleración de la gravedad que incluye el peso propio en un primer paso de la configuración del análisis, y las fuerzas laterales incluidas en el paso 2, ejercidas por la combinación de cargas por sismo más desfavorable, en la porción de los muros correspondientes a la esquina de la vivienda propuesta (VPPF) (Fig. 3.41).

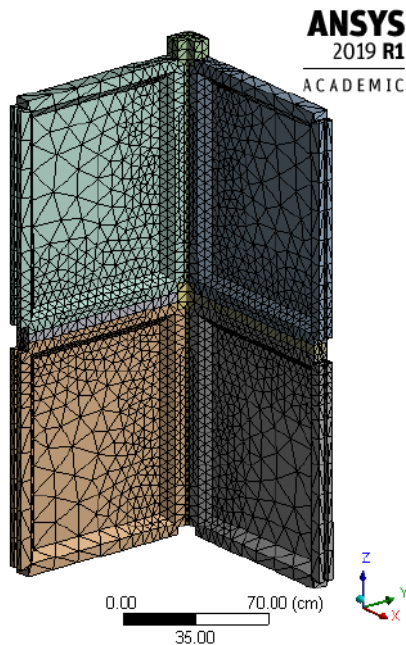


Fig. 3.40 Mallado generado para el modelo 3.

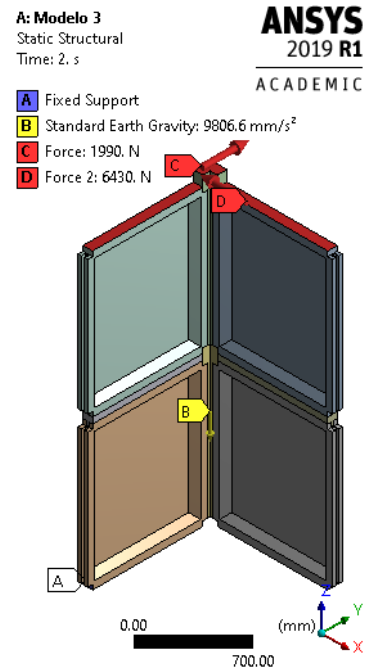


Fig. 3.41 Condiciones de frontera aplicadas al modelo 3.

3.5.3 Procesamiento

La solución del modelo 3 de 2 pasos fue nuevamente a través de un proceso iterativo debido a la no linealidad provocada por los contactos. La Fig. 3.42 muestra una gráfica de dicho proceso hasta alcanzar la convergencia entre el residuo y el criterio. Se puede ver en la Fig. 3.42 que para el paso 1 tomó un total de 7 iteraciones para encontrar la solución donde se analiza la condición de carga por peso propio; tras aplicar las cargas laterales se puede ver que para la primera iteración del paso 2, el residuo y el criterio incrementaron su valor, de forma que para encontrar la solución de este paso fueron necesarias 8 iteraciones más, dando un total de 15 iteraciones para encontrar la solución al modelo de 2 pasos.

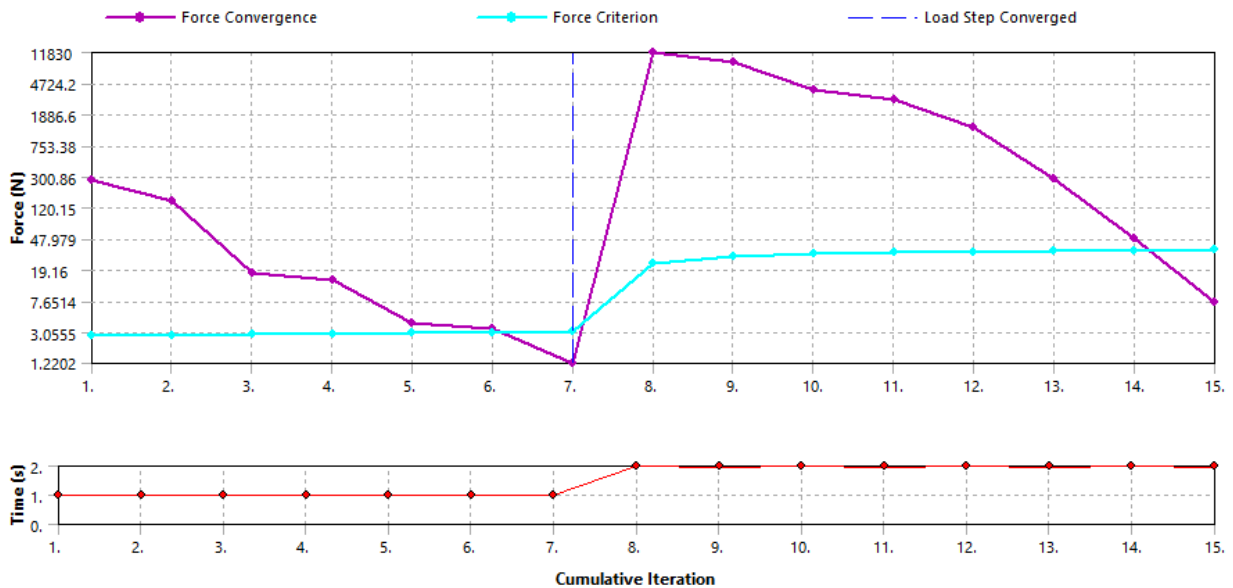


Fig. 3.42 Proceso iterativo de convergencia de fuerzas para el modelo 3.

3.5.4 Posprocesamiento

A diferencia de los modelos anteriores, en el modelo 3 se introdujeron fuerzas en dos direcciones ortogonales, por lo que se analizaron los desplazamientos en los 3 ejes X, Y y Z. En la dirección X los desplazamientos predominaron en el sentido negativo debido a que en esa dirección se aplicó la fuerza de mayor magnitud, en la Fig. 3.43 se puede ver en planta la ubicación del desplazamiento mínimo en la dirección X representado con color rojo, la cara superior de la pieza E en la esquina presentó desplazamientos menores a - 0.7 mm, mientras que en las caras superiores de las piezas A se presentaron desplazamientos de - 0.5 a - 0.7 mm. Los desplazamientos en el eje Y mostrados en la Fig. 3.44, se presentaron en ambas direcciones (positiva y negativa), los colores azules representan el desplazamiento positivo, con valores de 0.32 mm en las caras superiores de las piezas en el eje A; el resto de los colores, representan los desplazamientos negativos con valores mínimos de - 0.42 a - 0.52 mm en color rojo, presentados en la esquina superior derecha de la pieza A ubicada en el eje 1. Los desplazamientos en el eje Z son presentados desde una vista frontal del plano X-Z desde donde se pueden

analizar mejor (Fig. 3.45), los colores azules representan los desplazamientos negativos, obteniendo un desplazamiento mínimo de - 0.09 mm en la cara superior de la esquina y un desplazamiento máximo positivo en el lado derecho de la pieza superior A, con valores de 0.25 a 0.29 mm.

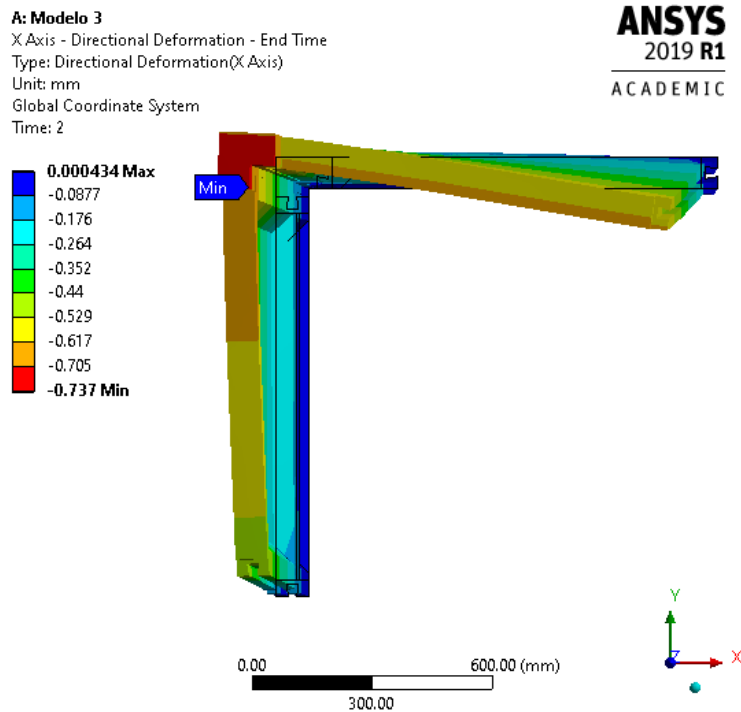


Fig. 3.43 Desplazamientos en la dirección X del modelo 3.

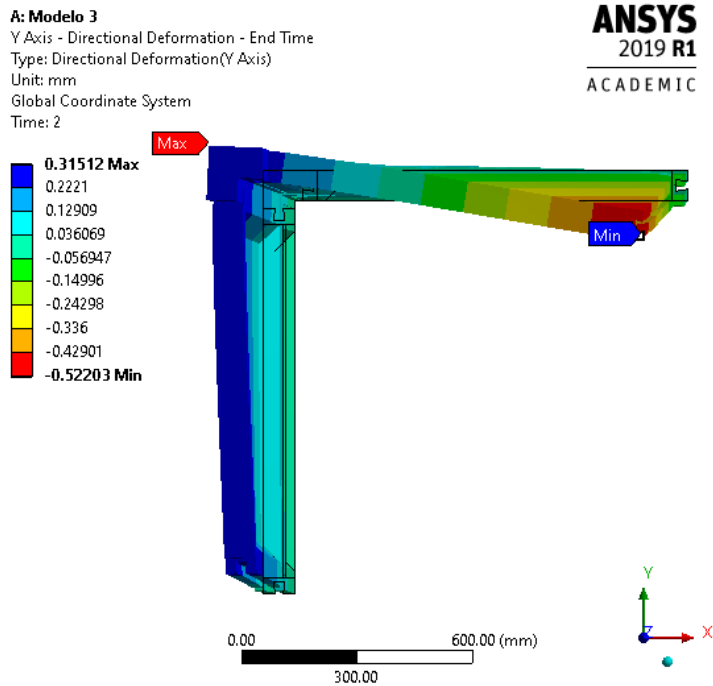


Fig. 3.44 Desplazamientos en la dirección Y del modelo 3.

Los desplazamientos direccionales antes mostrados y los desplazamientos totales mostrados en la Fig. 3.46, indican un comportamiento de pandeo en el panel del eje A y una torsión en el panel del eje 1, presentando los mayores desplazamientos en las piezas superiores de los paneles, lo que nos indica que ocurre un desplazamiento entre los nodos en las caras de las regiones de contacto para las conexiones con la pieza B, también llamado deslizamiento. Los desplazamientos totales máximos se presentaron en dos zonas: la primera en la esquina superior derecha del panel en el eje 1 con valores de 0.86 mm y la segunda en la parte superior de la pieza E ubicada en la esquina donde ocurre la intersección de los ejes con valores de 0.80 mm. Ambas presentaron un sentido opuesto en la dirección Y, lo que provoca el pandeo de la pieza A antes mencionado. Además, los valores positivos del eje Z se dan solo en el lado de la pieza superior A en eje 1, por lo que se puede deducir que hay una separación entre las caras de las regiones de contacto para las conexiones con la pieza B y la pieza inferior A.

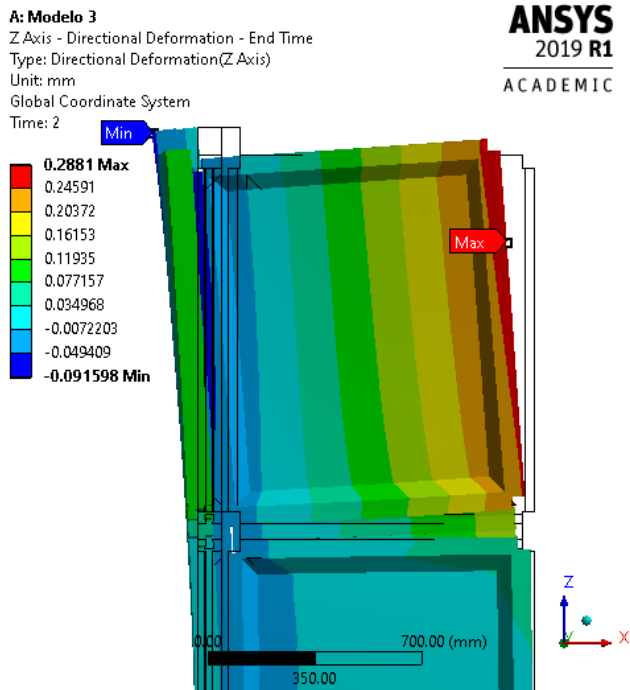


Fig. 3.45 Desplazamientos en la dirección Z del modelo 3

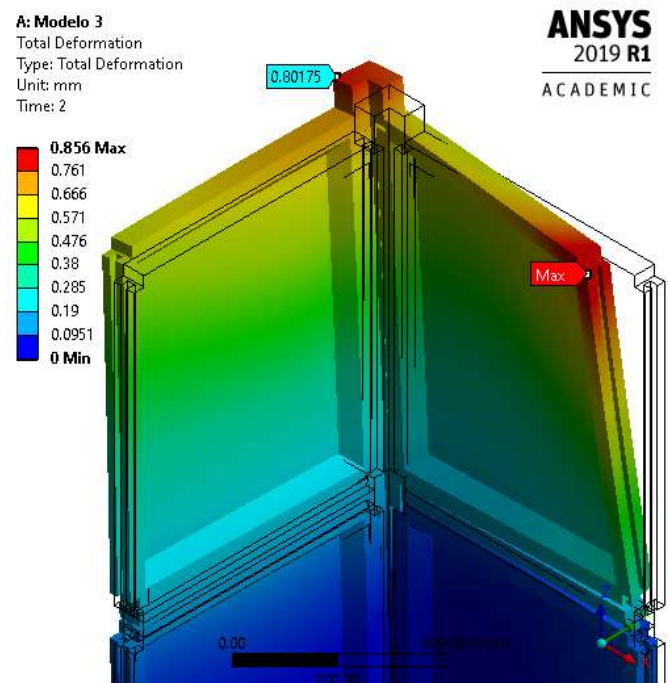


Fig. 3.46 Desplazamientos totales del modelo 3

En la Fig. 3.47 se puede ver que en la mayor parte de las piezas se presentan esfuerzos menores a los 2 MPa, mientras que en las conexiones es donde ocurre la concentración de esfuerzos, por lo que se analizaron con más detalle estas zonas. El rango de colores fue editado para el análisis de los esfuerzos máximos principales para que correspondan con los esfuerzos presentados en la Tabla 1.1, de manera que los colores azul y verde representan un comportamiento impermeable con un nivel del material linealmente elástico sin presentar grietas; el color amarillo representa las zonas donde el material presenta un comportamiento impermeable con un nivel del material casi elástico con la aparición de grietas de 0 a 20 micras; las zonas color naranja presentan un comportamiento no corrosivo I, en un nivel del material no linealmente elástico y la

presencia de grietas de 20 a 50 micras; el color rojo se designó para representar un nivel de material elasto-plástico de comportamiento no corrosivo II con grietas de 50 a 100 micras; por último el color morado para las zonas donde el nivel del material sea plástico con comportamiento corrosivo y grietas mayores a las 100 micras.

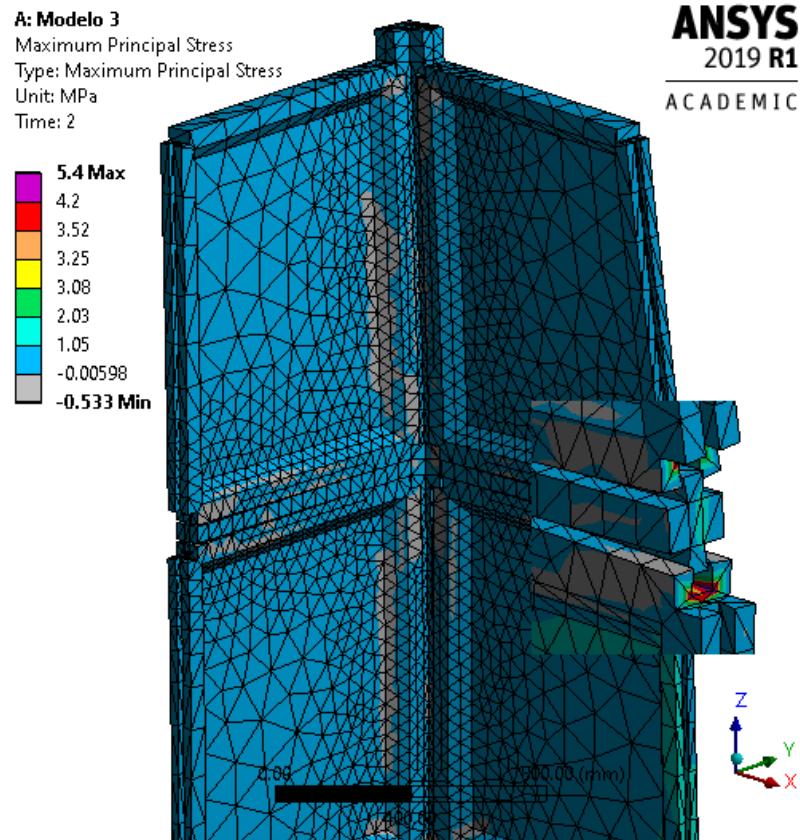


Fig. 3.47 Esfuerzos principales máximos del modelo 3.

En la Fig. 3.48a se muestra la distribución de los esfuerzos en la conexión entre las piezas A y B ubicadas en el eje 1, con la deformación a escala real, mientras que en la Fig. 3.48b se presentan los mismos esfuerzos con la deformación aumentada 100 veces, de esta manera se puede analizar el comportamiento de la conexión, donde se puede ver que al intentar separarse las piezas producen un estiramiento en las esquina de la ranura de las piezas A, ocasionando la concentración de esfuerzos a tensión a lo largo de la ranura, con valores máximos desde 3 hasta 5.4 MPa, que se prolongan unos 20 cm dentro de la ranura, como se ve en la Fig. 3.49, donde se aisló a la pieza superior A, para analizar a detalle los esfuerzos dentro de la conexión.

Las herramientas del programa nos permiten también analizar los esfuerzos por fricción, la presión y la separación, que ocurren en las regiones de contacto (Fig. 3.50). Para el modelo 3 se obtuvo un esfuerzo por fricción de 0.34 MPa en la misma zona donde se presentaron los esfuerzos principales máximos. La presión máxima entre contactos se produjo al centro de la esquina en el contacto entre la esquina de la pieza superior A del eje 1 y la parte superior de la pieza E con valores que alcanzan los 5 MPa. La separación

al ser lo opuesto al concepto de penetración antes descrito, es medida por el programa en números negativos, en la Fig. 3.50c se muestran los resultados obtenidos donde se identificó la separación máxima de -0.12 mm en la conexión donde se producen las tensiones máximas.

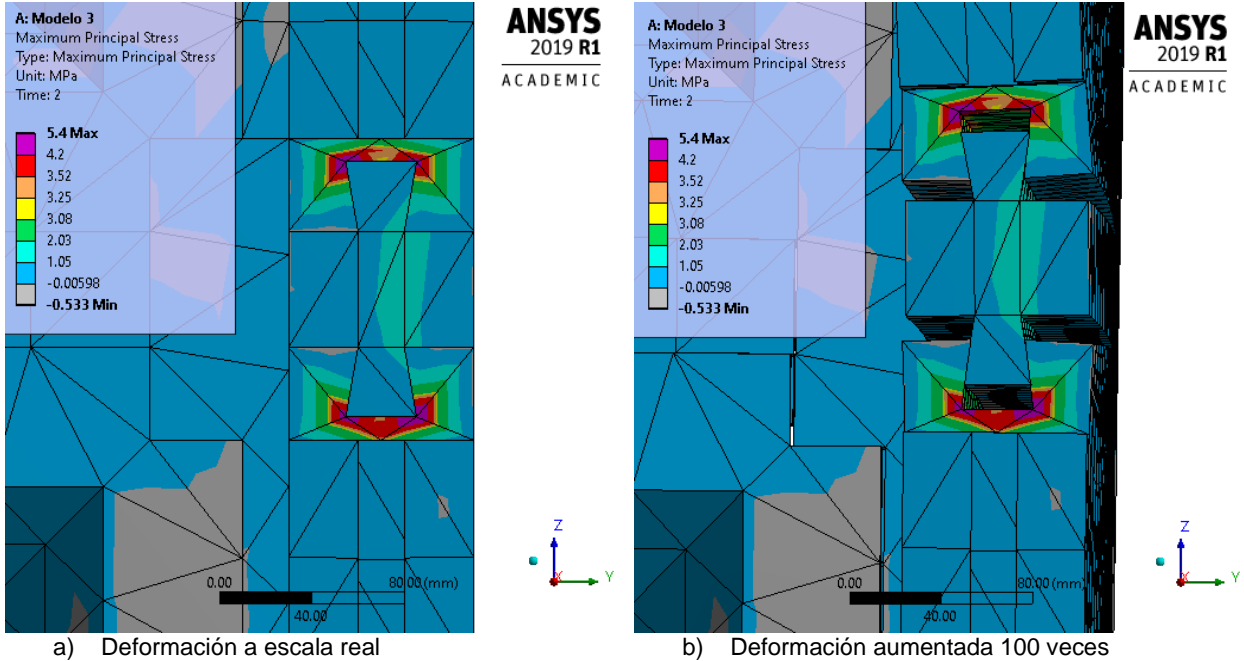


Fig. 3.48 Esfuerzos principales máximos en la conexión entre piezas A y B

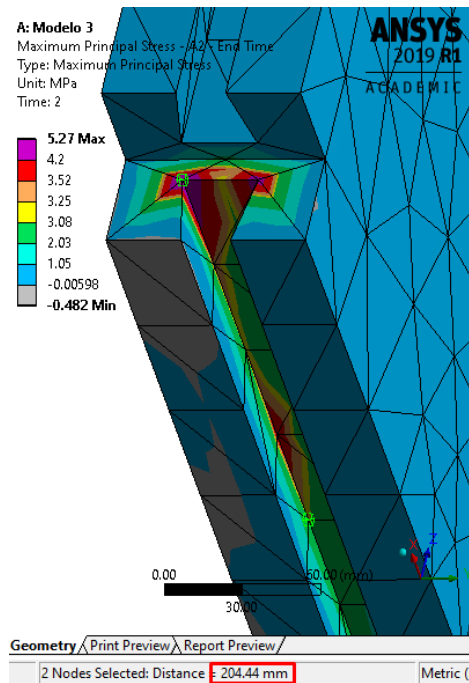
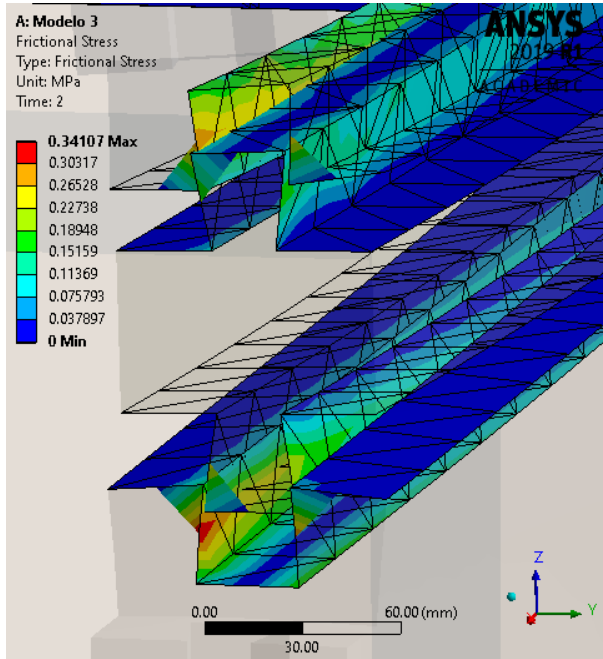
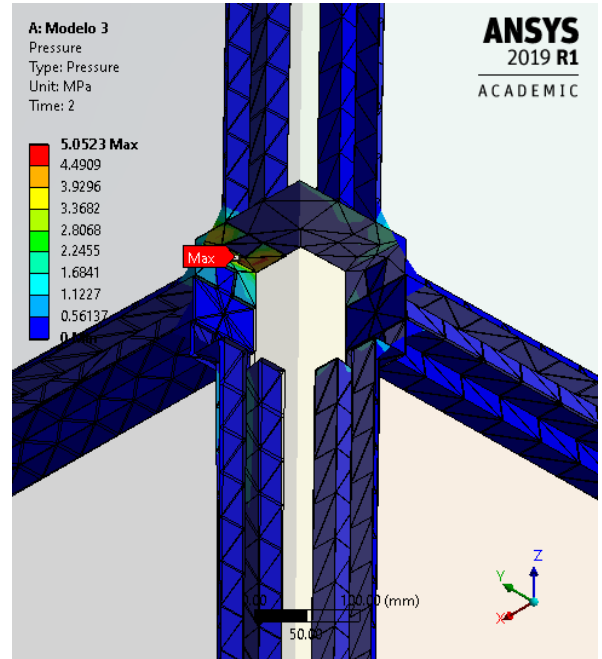


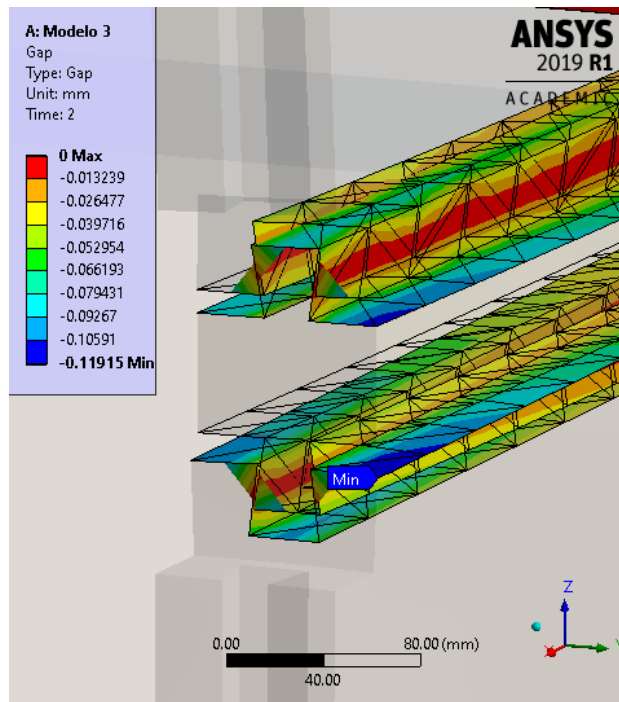
Fig. 3.49 Esfuerzos principales máximos dentro de la ranura de la pieza superior A.



a) Esfuerzo friccional



b) Presión



c) Separación

Fig. 3.50 Análisis de las regiones de contacto.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El diseño geométrico de los elementos propuestos en esta investigación estuvo enfocado en disminuir los tiempos de ensamblaje entre los elementos constructivos de una vivienda, la propuesta de piezas prefabricadas está ligada a procesos industrializables que requieren grandes inversiones, las simulaciones de ensayos y condiciones naturales de esta propuesta de producto nuevo permitieron estimar las zonas potenciales de falla, para ser consideradas en futuras investigaciones que realicen ensayos experimentales en las piezas propuestas.

La distribución arquitectónica permitió estimar las fuerzas sísmicas a las que podrían someterse las piezas propuestas aplicadas en una vivienda, sin embargo, dichas fuerzas están relacionadas con el peso total de la estructura, por lo que, al modificar distribución y número de piezas, las solicitaciones sísmicas también cambiarían. La variedad de fuerzas posibles, motivó a no considerar la disipación de energía presentada por el material. Cabe mencionar que, de acuerdo a las curvas histeréticas obtenidas por Bedoya y otros (2015), se puede tomar un valor de Q mayor para el cálculo de las solicitaciones sísmicas.

El uso de una simulación 4D como apoyo en el diseño geométrico de las piezas permitió identificar deficiencias que fueron corregidas durante el proceso de diseño. Además, se pudo corroborar que el ensamblaje entre las piezas era posible para conformar muros en esquina y continuos. Este tipo de herramientas aceleró considerablemente los tiempos de diseño conceptual de las piezas.

El modelado numérico basado en el método del elemento finito ha permitido a los diseñadores, simular condiciones físicas en sus productos. En esta investigación se simularon ensayos a compresión simple en la pieza A, y flexión bajo carga uniformemente repartida en las piezas A y B. De la simulación del ensayo a compresión simple se obtuvieron zonas de falla a tensión debido al pandeo de la pieza bajo una carga de 3 t, equivalente a una presión aplicada sobre la cara superior de 8 kg/cm^2 ; de la simulación del ensayo bajo carga uniformemente repartida, se obtuvieron esfuerzos en ambas piezas de alrededor de 3.3 kg/cm^2 bajo una carga de 150 kg/m^2 . Los resultados de dichas simulaciones sugieren que la pieza A, puede ser clasificada dentro de las especificaciones de la norma NMX-C-405-ONNCCE-2014, como TIPO I, para uso en muros, ya que cumple con la resistencia a compresión simple de 5 kg/cm^2 indicada por la norma y los 100 kg/m^2 , también indicados por la misma para la resistencia a carga uniformemente repartida.

La conexión presentó un buen comportamiento en la simulación del ensayo bajo carga uniformemente repartida, sin embargo, la simulación de las condiciones de carga bajo solicitaciones sísmicas expuso zonas de falla potencial presentadas en la conexión, específicamente en la parte interna de la ranura de la pieza A. Estos esfuerzos son provocados por un intento de separación entre las piezas lo que provoca una concentración de esfuerzos a tensión a lo largo de la ranura de hasta 5.4 MPa , en un tramo de casi 20 cm. De acuerdo con investigaciones recientes (Ma et al., 2019), se

presenta un buen desempeño sísmico de este tipo de configuración de conexiones cuando el daño no excede $2/5$ partes de la longitud, lo que significa que los 20 cm de daño obtenidos de la simulación representan $1/5$ de la longitud total de la conexión, presentando un buen desempeño.

Las simulaciones elaboradas para el presente trabajo de investigación sugieren un buen desempeño de las piezas, ante condiciones de carga similares a ensayos de laboratorio, futuras investigaciones pueden verificar dichos datos y calibrar los modelos numéricos para mejorar el análisis de proyectos implementando las piezas aquí propuestas. Así mismo, dichas investigaciones pueden determinar costos de producción y determinar la factibilidad de industrializar los procesos de elaboración.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19
- Alvarez, Julia R.; Wainshtok Rivas, Hugo; Acosta, D. (2015). Proposed Joints for a Ferrocement Building Resi- Dential System. *FERRO-11 – 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC - International Conference on Textile Reinforced Concrete*, (11901), 387–394.
- Arandes Renu, Ramón; AGUILÓ ALONSO, Miguel; et al.; “Prefabricación, teoría y práctica”; Editores Técnicos Asociados,. 1ª Ed. Barcelona 1974, p. 17
- Arroyo Matus, R., Sanchez Tizapa, S., & Guinto Herrera, E. R. (2010). Prevención y mitigación de un desastre sísmico en el Estado de Guerrero. *Revista Altamirano*, 17–28.
- Autocad [Software]. (2018). Recuperado de <https://www.autodesk.mx/education/freesoftware/autocad>
- Ayala, M. A. (2018, noviembre). Animación ensamblaje [Archivo de vídeo]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=wkcumWrSb4o>
- Barbat, A. H.-, Canas, J. A., & Yepez, F. (2010). Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería. *Monografías de Ingeniería Sísmica*.
- Bedoya, D. A. (2005). *Estudio de resistencia y vulnerabilidad sísmicas de viviendas de bajo costo estructuradas con ferrocemento*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Bedoya R.D., Ortiz G.A., Álvarez D.A., & Hurtado J.E. (2015), "Modelo dinámico no lineal para evaluar el comportamiento sísmico de viviendas de ferrocemento", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 31(3), pp. 139–145.
- Blender [Software]. (2017, septiembre). Recuperado de <https://download.blender.org/release/Blender2.79/>
- Bonett Díaz, R. L., Pujades Beneit, L. G., & Hurtado Gómez, J. E. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Carpenter, G. en asociación con IIASA (2000), *Managing the Financial Impacts of Natural Disaster Losses in Mexico: Government Options for Risk Financing and Risk Transfer*, Mexico Country Office, World Bank, Washington, DC.
- Carrión U., J. M. (2017). *La junta seca. El sistema constructivo como definidor de la forma*. Universidad de Cuenca.
- Castro, J. (1979). Applications of Ferrocement in Low-Cost Housing in México. *American Concrete Institute, SP 61*, 143–146.
- Catalán Casiano, E. E. (2010). *Cascarones de ferrocemento, una alternativa para la construcción de viviendas*. Universidad Autónoma de Guerrero.
- CFE (2008), *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo*.
- Chen, C., Qiu, H., & Lu, Y. (2016). Flexural behaviour of timber dovetail mortise-tenon joints. *Construction and Building Materials*, 112, 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.074>
- Chiorino, M. A. (2012). Art and Science of Building in Concrete: The Work of Pier Luigi Nervi. *Concrete International*, 34(3), 32–40.
- Del Rivero, J. A., & Romero Pérez, M. A. (2010). *La Vivienda como Derecho Constitucional*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Dumova-Jovanoska, E. (2000). Fragility curves for reinforced concrete structures in Skopje (Macedonia) region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(6), 455–466. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00017-8)
- Gobierno del Distrito Federal, (2011), "Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico", *Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, D.F.*, 111 pp.

- González Fraile, D. (2009). Las viviendas de ferrocemento: una oportunidad para la vivienda social. *Estudio sísmico*.
- Hábitat. (2000). *De la urbanización acelerada a la consolidación de los asentamientos humanos en América Latina y el Caribe: El Espacio Regional*.
- Heesom, D., & Mahdjoubi, L. (2004). Trends of 4D CAD applications for construction planning. *Construction Management and Economics*, 22(2), 171–182. <https://doi.org/10.1080/0144619042000201376>
- Johannes, J. D. (1976). Systems simulation: the art and science. In *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. (pp. 723–724).
- Kostoglodov, V., Singh, S. K., Santiago, J. A., Franco, S. I., Larson, K. M., Lowry, A. R., & Bilham, R. (2003). A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 30(15). <https://doi.org/10.1029/2003GL017219>
- Lantigua De La Cruz, S. (2014). Prefabricación ligera por paneles enfocados en la vivienda. <http://hdl.handle.net/10251/49728>.
- Lezama Tirado, J. (1985). El Ferrocemento en México. *Revista IMCYC*, 23(170), 19–29.
- López-Calvo, H. Z., Jiménez-Quero, V. G., & Cano-Barrita, P. F. J. (2006). Comportamiento de un muro construido con paneles prefabricados de mortero armado sometido a compresión simple y diagonal. *Naturaleza y Desarrollo*, 4(1), 55–63.
- Ma, H., Luan, X., Li, Z., Cui, H., Wang, W., & Song, J. (2019). Seismic Performance of Damaged Dovetail Joints with Different Damaged Degrees in Timber Frames. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7238217>
- Mansur, M. A., Tan, K. L., & Naaman, A. E. (2010). Strength of bolted moment connections in ferrocement construction. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 532–543. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.04.001>
- Mattey Centeno, P. E., Robayo-salazar, R. A., Torres Rico, J. A., Ramos Barragán, P. A., & Delvasto Arjona, S. (2015). Evaluación de las propiedades mecánicas de paneles de ferrocemento con agregado fino reciclado. *Informador Técnico (Colombia)*, 79(2)(November), 146–155.
- Naaman, A. E. (2000). *Ferrocement and laminated cementitious composites. Materials and Structures*. Techno Press 3000. <https://doi.org/10.1007/BF02484171>
- Naciones Unidas. (1948). Declaración Universal de Derechos Humanos. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- ONU-Hábitat. (n.d.). Viviendas y mejoramiento de asentamientos precarios. Retrieved from <http://onuhabitat.org.mx/index.php/viviendas-y-mejoramiento-de-asentamientos-precarios>
- ONU-Hábitat. (2010). El derecho a una vivienda adecuada. *Folleto Informativo No 21*, 103–129.
- Paul, B. K., & Pama, R. P. (1981). *Ferrocemento*. IMCYC.
- Saracoglu, B. O. (2006). "Identification of Technology Performance Criteria for CAD/CAM/CAE/CIM/CAL in Shipbuilding Industry". 2006 Technology Management for the Global Future - PICMET 2006 Conference. pp. 1635–1646. doi:10.1109/PICMET.2006.296739. ISBN 1-890843-14-8.
- Secretaría de Gobernación. (2014). CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS SEPTIEMBRE. <https://doi.org/ISBN 968-805-77-0>
- Standars ACI. (2013). *ACI Concrete Terminology*.
- Wainshtok Rivas, H. (2015). Ferrocement in Civil Construction: Its Use in Latin America and the Caribbean. *11th International Symposium on Ferrocement and Textile Reinforced Concrete*, 35–44.

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

TABLA 1.1 FASES DE TRABAJO, ESFUERZOS Y ALARGAMIENTO DEL FERROCEMENTO BAJO CARGAS DE TENSIÓN (PAUL & PAMA, 1981).	15
TABLA 2.1 DIMENSIONES MÍNIMAS PARA ESPACIOS HABITACIONALES DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR.	36
TABLA 2.2 COMPARATIVA DE NÚMERO DE PIEZAS Y ÁREA CONSTRUIDA DE MISMA DISTRIBUCIÓN ARQUITECTÓNICA CON DIFERENTE DISEÑO DE PIEZAS.	39
TABLA 3.1 PROPIEDADES DEL MATERIAL UTILIZADO PARA EL MODELO.	50
TABLA 3.2 COMPARATIVA ENTRE PRESIÓN INTRODUCIDA AL MODELO Y LA FUERZA DE REACCIÓN.	59
TABLA 3.3 DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS NORMALES A LOS EJES X, Y Y Z (MM).	60
TABLA 3.4 ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN EL MODELO 1 PARA CADA PASO.	61
TABLA 3.5 PESO POR PIEZA Y TOTAL DE LA PROPUESTA DE VIVIENDA (VPPF).	68

FIGURAS

FIG. 1.1 MAPA DE PLACAS TECTÓNICAS EN MÉXICO.	9
FIG. 1.2 PELIGRO SÍSMICO EN MÉXICO.	9
FIG. 1.3 BRECHA SÍSMICA EN EL ESTADO DE GUERRERO.	9
FIG. 1.4 ANÁLISIS DE ESFUERZOS POR EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO EN UNA LATA.	10
FIG. 1.5 SECCIÓN DESCRITA EN LA PATENTE DEL FERROCEMENTO.	11
FIG. 1.6 BOTE DE FERROCEMENTO CONSTRUIDO POR LAMBOT.	12
FIG. 1.7 CUBIERTA DEL SALÓN DE EXPOSICIONES DEL PALACIO DE TURÍN, ITALIA.	12
FIG. 1.8 VIVIENDA CONSTRUIDA EN MÉXICO CON PANELES DE FERROCEMENTO (NAAMAN, 2000).	14
FIG. 1.9 PANELES PREFABRICADOS DE MORTERO ARMADO (LÓPEZ-CALVO ET AL., 2006).	14
FIG. 1.10 CURVA EXPERIMENTAL DE FERROCEMENTO A TENSIÓN.	16
FIG. 1.11 CURVA IDEALIZADA DE FERROCEMENTO A TENSIÓN Y COMPRESIÓN.	16
FIG. 2.1 JUNTA SECA EN MURO DE PIEDRA DE SACSAYHUAMAN.	20
FIG. 2.2 MURO DE SILLARES EN LA ARQUITECTURA GRIEGA.	20
FIG. 2.3 CONEXIÓN MACHIHEMBRADA CAJA Y ESPIGA.	21
FIG. 2.4 CONEXIÓN MACHIHEMBRADA COLA DE PATO.	21
FIG. 2.5 COMPONENTES DE LA CONEXIÓN MACHIHEMBRADA COLA DE PATO.	21
FIG. 2.6 CONEXIÓN DESLIZANTE COLA DE MILANO.	21
FIG. 2.7 DEFORMACIONES CARACTERÍSTICAS DE LA CONEXIÓN MACHIHEMBRADA.	22
FIG. 2.8 CONDICIONES GEOMÉTRICAS DE LA CONEXIÓN COLA DE MILANO ANTES DE LOS DESPLAZAMIENTOS.	23
FIG. 2.9 CONDICIONES GEOMÉTRICAS DE LA CONEXIÓN COLA DE MILANO DESPUÉS DE LOS DESPLAZAMIENTOS.	23
FIG. 2.10 DESPLAZAMIENTO IDEALIZADO POR COMPRESIÓN EN LAS DOS CARAS LATERALES DE LA SALIENTE.	25
FIG. 2.11 DESPLAZAMIENTO SIMPLIFICADO POR COMPRESIÓN EN LAS DOS CARAS LATERALES DE LA SALIENTE.	25
FIG. 2.12 DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS ACTUANTES EN DOS CARAS LATERALES DE LA SALIENTE.	26
FIG. 2.13 DIAGRAMA GENERAL DE FUERZAS EN EL RANGO ELÁSTICO DE LA SALIENTE.	26
FIG. 2.14 ESFUERZO POR FRICCIÓN SOBRE LAS CARAS LATERALES A LO LARGO DE LA ALTURA DE LA SALIENTE.	27
FIG. 2.15 JUNTA MACHIHEMBRADA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA.	28
FIG. 2.16 CONEXIÓN MACHIHEMBRADA METÁLICA INCRUSTADA EN PREFABRICADO DE CONCRETO.	28
FIG. 2.17 PANEL INICIAL DE DISEÑO DE PIEZAS RECTANGULARES (COTAS EN CM).	29
FIG. 2.18 ACOMODO BÁSICO DE PANELES INICIALES DE DISEÑO DE PIEZAS RECTANGULARES- (COTAS EN CM).	29
FIG. 2.19 ENSANCHAMIENTO EN LOS LADOS DE LA PIEZA RECTANGULAR (COTAS EN CM).	29
FIG. 2.20 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE RANURA EN PIEZAS RECTANGULARES (COTAS EN CM).	29
FIG. 2.21 CORTE TRANSVERSAL DE PIEZAS RECTANGULAR CON RANURA EN LOS LADOS.	30
FIG. 2.22 CORTE EN ESQUINAS DE PIEZAS RECTANGULAR (COTAS EN CM).	30
FIG. 2.23 VISTA EN PERSPECTIVA Y FRONTAL DEL DISEÑO PROPUESTO PARA PIEZA A (COTAS EN CM).	30
FIG. 2.24 DISEÑO INICIAL DE PIEZA ESBELTA TIPO BARRA (COTAS EN CM).	31
FIG. 2.25 SECCIÓN TRANSVERSAL DISEÑADO PARA LAS PIEZAS ESBELTAS (COTAS EN CM).	31
FIG. 2.26 VISTA EN PERSPECTIVA DEL DISEÑO DE LA PIEZA B (COTAS EN CM).	31
FIG. 2.27 VISTA EN PERSPECTIVA DEL DISEÑO DE LAS PIEZAS C Y D (COTAS EN CM).	31
FIG. 2.28 VISTA EN PERSPECTIVA Y CORTE TRANSVERSAL DEL DISEÑO DE LA PIEZA E (COTAS EN CM).	32
FIG. 2.29 VISTA EN PERSPECTIVA Y CORTE TRANSVERSAL DEL DISEÑO DE LA PIEZA F (COTAS EN CM).	32
FIG. 2.30 IMPRESIÓN 3D DEL MODELO GEOMÉTRICO DE LAS PIEZAS A Y B.	33

FIG. 2.31 FALLA IDENTIFICADA EN LA IMPRESIÓN 3D DEL MODELO GEOMÉTRICO DE LA PIEZA A.....	33
FIG. 2.32 PROCESO DE ENSAMBLAJE DE 4 PIEZAS A Y 4 PIEZAS B.....	33
FIG. 2.33 ENSAMBLE FINAL DE MURO CON PIEZAS PROPUESTAS.....	34
FIG. 2.34 ENSAMBLE DE MURO EN ESQUINA CON PIEZAS PROPUESTAS.....	34
FIG. 2.35 PROCEDIMIENTO DE ENSAMBLAJE DE MURO EN UNA DIRECCIÓN CON PIEZAS PROPUESTAS.....	34
FIG. 2.36 CAPTURAS DE VIDEO DEL PROCESO DE ENSAMBLAJE DE UNA ESQUINA.....	35
FIG. 2.37 PROPUESTA DE JUNTAS PARA EL SERF, IMPLEMENTADO EN CUBA.....	36
FIG. 2.38 ENSAMBLE DE PANELES DEL SISTEMA DE PROPUESTO POR NAAMAN (2010).....	37
FIG. 2.39 DISTRIBUCIÓN ESPACIO ARQUITECTÓNICO PROPUESTO CON DIFERENTES DISEÑOS DE PIEZAS.....	38
FIG. 2.40 MODELO CONCEPTUAL DE VIVIENDA A BASE DE PIEZAS PREFABRICADAS DE FERROCEMENTO.....	39
FIG. 3.1 REPRESENTACIÓN DE UN CUERPO TRIDIMENSIONAL EN EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO.....	42
FIG. 3.2 EQUILIBRIO DEL VOLUMEN ELEMENTAL dV	43
FIG. 3.3 EQUILIBRIO DEL TETRAEDRO ELEMENTAL.....	45
FIG. 3.4 SUPERFICIE ELEMENTAL DEFORMADA.....	46
FIG. 3.5 ETAPAS PRINCIPALES DEL ANÁLISIS POR EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO.....	48
FIG. 3.6 REPRESENTACIÓN DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....	49
FIG. 3.7 GEOMETRÍA EXPORTADA DEL DISEÑO DE PIEZAS A Y B.....	49
FIG. 3.8 PROCESO DE MODELADO DESDE EL PROGRAMA ANSYS.....	49
FIG. 3.9 INTRODUCCIÓN DE PROPIEDADES DEL MATERIAL EN EL PROGRAMA.....	50
FIG. 3.10 CUERPOS QUE DEFINEN EL DOMINIO DEL MODELO CON LA ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES DEL MATERIAL.....	51
FIG. 3.11 CONDICIÓN DE SIMETRÍA NORMAL AL EJE Y.....	51
FIG. 3.12 COMPATIBILIDAD DE CONTACTO.....	52
FIG. 3.13 DETALLES DEL CONTACTO FRICCIONANTE ENTRE LOS CUERPOS DEL MODELO 1.....	53
FIG. 3.14 GEOMETRÍA DEL SOLID187.....	54
FIG. 3.15 MÉTODOS DE MALLADO APLICADOS AL MODELO 1.....	55
FIG. 3.16 RESULTADO DEL MALLADO DEL MODELO 1.....	55
FIG. 3.17 DETALLES DE LA RELACIÓN DE ASPECTO EN LOS ELEMENTOS DEL MALLADO DEL MODELO 1.....	55
FIG. 3.18 DETALLES DE LA OBLICUIDAD EN LOS ELEMENTOS DEL MALLADO DEL MODELO 1.....	56
FIG. 3.19 CONDICIONES DE FRONTERA APLICADA AL MODELO 1.....	57
FIG. 3.20 CONDICIONES DE FRONTERA A TRAVÉS DE LOS PASOS DEL MODELO.....	57
FIG. 3.21 PROCESO DE ITERACIONES NECESARIA PARA LA CONVERGENCIA DE FUERZAS DEL MODELO 1.....	58
FIG. 3.22 FUERZAS DE REACCIÓN EN LA BASE DEL MODELO.....	59
FIG. 3.23 DESPLAZAMIENTOS TOTALES OBTENIDOS DE LA SOLUCIÓN DEL MODELO 1.....	60
FIG. 3.24 ESFUERZOS PRINCIPALES OBTENIDOS EN EL MODELO 1 PARA EL PASO 6.....	61
FIG. 3.25 ESFUERZOS DE VON MISES OBTENIDOS EN EL MODELO 1 PARA EL PASO 6.....	63
FIG. 3.26 REPRESENTACIÓN DE ENSAYE DE CARGA UNIFORMEMENTE REPARTIDA.....	64
FIG. 3.27 REPRESENTACIÓN DE PANEL PARA ENSAYE Y SUS EJES SIMÉTRICOS.....	64
FIG. 3.28 REGIONES DE SIMETRÍA APLICADAS AL MODELO 2.....	64
FIG. 3.29 REGIONES DE CONTACTO APLICADAS AL MODELO 2.....	65
FIG. 3.30 MALLADO GENERADO PARA EL MODELO 2.....	66
FIG. 3.31 CONDICIONES DE FRONTERA APLICADAS AL MODELO 2.....	66
FIG. 3.32 PROCESO DE ITERACIONES NECESARIA PARA LA CONVERGENCIA DE FUERZAS DEL MODELO 2.....	66
FIG. 3.33 DESPLAZAMIENTOS TOTALES OBTENIDOS PARA EL MODELO 2.....	67
FIG. 3.34 ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS OBTENIDOS DEL MODELO 2.....	67
FIG. 35 DISTRIBUCIÓN DEL 100% DE LA FUERZA HORIZONTAL SÍSMICA EN LOS MUROS EN AMBAS DIRECCIONES (kN).....	69
FIG. 3.36 FUERZAS LATERALES EQUIVALENTES AL TRAMO DE LOS MUROS EN ESQUINA.....	70
FIG. 3.37 GEOMETRÍA 3D DE LAS PIEZAS QUE CONFORMAN LOS MUROS EN ESQUINA REPRESENTATIVA.....	70
FIG. 3.38 ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES DEL MATERIAL FERROCEMENTO A LOS 8 CUERPOS DEL MODELO 3.....	70
FIG. 3.39 REGIONES DE CONTACTO DEFINIDAS ENTRE LOS 8 CUERPOS DEL MODELO 3.....	70
FIG. 3.40 MALLADO GENERADO PARA EL MODELO 3.....	71
FIG. 3.41 CONDICIONES DE FRONTERA APLICADAS AL MODELO 3.....	71
FIG. 3.42 PROCESO ITERATIVO DE CONVERGENCIA DE FUERZAS PARA EL MODELO 3.....	72
FIG. 3.43 DESPLAZAMIENTOS EN LA DIRECCIÓN X DEL MODELO 3.....	73
FIG. 3.44 DESPLAZAMIENTOS EN LA DIRECCIÓN Y DEL MODELO 3.....	73
FIG. 3.45 DESPLAZAMIENTOS EN LA DIRECCIÓN Z DEL MODELO 3.....	74
FIG. 3.46 DESPLAZAMIENTOS TOTALES DEL MODELO 3.....	74
FIG. 3.47 ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS DEL MODELO 3.....	75

FIG. 3.48 ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS EN LA CONEXIÓN ENTRE PIEZAS A Y B.....	76
FIG. 3.49 ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS DENTRO DE LA RANURA DE LA PIEZA SUPERIOR A.	76
FIG. 3.50 ANÁLISIS DE LAS REGIONES DE CONTACTO.	77