



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA.**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE
RECURSOS NATURALES.**

**CONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL CON ELEMENTOS
PREFABRICADOS Y AISLANTES TÉRMICOS PARA EDIFICACIONES
DE BAJO COSTO.**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

P R E S E N T A:

HERNÁNDEZ RUIZ JOEL

DIRECTOR:

ALONSO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ

CO-DIRECTOR

PEDRO MONTES GARCÍA

SANTA CRUZ XOXOCOTLÁN, OAX.

DICIEMBRE 2006



SIP-14

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca siendo las 13:00 horas del día 29 del mes de noviembre de 2006 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA), para examinar la tesis de grado titulada: "Construcción experimental con elementos prefabricados y aislantes térmicos para edificaciones de bajo costo"

Presentada por el alumno (a):

Hernández
Apellido paterno

Ruiz
materno

Joel
nombre(s)

Con registro:

B	0	4	0	8	3	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRO EN CIENCIAS EN CONSERVACION Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. Alonso Fernández González

Co-Director

Dr. Pedro Montes García

Dr. Jose de la Paz Hernández Girón

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Dr. Andrés Pech Pérez

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dra. María del Rosario Arnaud Viñas



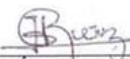
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez., Oaxaca, el 29 de noviembre de 2006, el que suscribe **HERNÁNDEZ RUIZ JOEL**, alumno del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B040836**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor del trabajo de Tesis: "**Construcción experimental con elementos prefabricados y aislantes térmicos para edificaciones de bajo costo**", realizado bajo la dirección del Dr. Alonso Fernández González, por lo cual cede los derechos de dicho trabajo, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: **Calle Hornos No. 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca** o e-mail ciidirox@ipn.mx o huaxtlajhr22@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIDIR-UNIDAD-OAXACA


HERNÁNDEZ RUIZ JOEL

Resumen

En el presente estudio, se propone un nuevo sistema de construcción semi-fabricado, el cual se denominó Ferro-prefab. Este es un sistema híbrido de ferrocemento y estructura metálica que puede usarse para la construcción de edificios y consiste en elementos modulares de tipo C para muros, y ferrocemento soportado por una estructura metálica para la cubierta. El mortero auto-compactable fue usado para fabricar muros y contenedores de huevo como material aislante. Se evaluaron las propiedades del mortero en estado fresco y endurecido, y se determinó la conductividad térmica de especímenes multi-compuestos que simulaban muros y cubiertas usando el método del estado térmico estable, de acuerdo a la norma NMX-C-181-1984. Se revisó la integridad estructural del edificio usando el método de análisis sísmico simplificado recomendado por las normas mexicanas y el reglamento de construcción de Oaxaca. Finalmente, se construyó un prototipo de tamaño real, denominado Sala de Juntas-Aula, usando el sistema Ferro-prefab y el costo de la construcción se comparó con aquel de un sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto reforzado.

Los valores de extensibilidad obtenidos en los morteros estuvieron comprendidos en el rango de 63 y 68 cm, indicando que el producto final puede ser considerado como un mortero auto-compactable. Las pruebas llevadas a cabo en cubos de 5x5 cm muestran una resistencia a la compresión de 34.5 MPa a los 28 días. Tal resistencia es adecuada tanto para el diseño de elementos delgados, como para su aplicación en zonas sísmicas. Los resultados de las pruebas de conductividad térmica muestran que con los materiales propuestos se logra una reducción de 54% y 86% en muros y cubiertas respectivamente, esto es, cuando se comparan con muros de mampostería y cubierta de concreto reforzado. Finalmente, el análisis comparativo de costos muestra que usando el nuevo sistema de construcción semi-fabricado se logra un ahorro económico del 18%.

Abstract

In the present study, a new semi-prefabricated construction system denominated Ferro-prefab is proposed. It is a hybrid system of ferrocement and metal structure which can be used for building construction and consists of modular type C elements for walls, and ferrocement supported by metal structure for the roof. Self-leveling mortar was used to fabricate the walls and egg containers as a thermal insulating material. The properties of the mortar in both fresh and hardened state were evaluated, and the thermal conductivity of multi-layered specimens simulating walls and roof were determined by using the thermal steady- state method, according to the NMX-C-181-1984 standard. The structural integrity of the building was revised by using the simplified seismic analysis method recommended by the Mexican standards and the local construction code. Finally, a full-size prototype, denominated Sala de Juntas-Aula, was built using Ferro-prefab and the construction cost was compared to that of the traditional brick and reinforced concrete construction system.

Extensibility values of mortars obtained ranged between 63 and 68 cm, indicating that they can be considered as a self-leveling mortar. Compressive tests carried out on cubes show a 28 day compressive strength of 34.5 MPa. Such strength is suitable for the design thin elements and can also be used for seismic applications. Thermal conductivity test results show reductions of 54% and 86% when the proposed materials for walls and roof respectively are compared to the traditional mortar and brick and reinforced concrete. Finally, the cost evaluation reveals that by using the new semi-prefabricated construction system savings of up to 18% can be achieved.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos por todo el apoyo incondicional que me han brindado.

A Miriam por toda su paciencia y comprensión.

A todos mis amigos.

Al Eterno por la oportunidad de tener vida.

Agradecimientos

Agradezco a:

- *El Dr. Alonso Fernández González, investigador nivel III del Sistema Nacional de Investigadores por su apoyo en la elaboración de mi tesis, además, por permitirme participar en su proyecto de investigación y otorgarme la postulación para ser becado por el Sistema Nacional de investigadores como ayudante de investigador.*
- *El Dr. Pedro Montes García por su apoyo, orientación y dirección en la escritura de mi tesis.*
- *A los Maestros Rafael Alavéz Ramírez, José Luis Caballero Montes y Herwing Zeth López Calvo por todo el apoyo que brindaron a mi persona durante el tiempo de elaboración de esta tesis.*

*Agradezco al IPN por proveer los fondos para la realización del proyecto de investigación: “**Una construcción experimental que utilice poca mano de obra y resiste temblores y vientos huracanados**”, clave CGPI 20040352 y CGPI 20050429.*

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional por otorgarme el apoyo económico durante el primer semestre de estudios de maestría.

Agradezco al CONACyT por el apoyo económico que me otorgó para la realización de mis estudios de maestría.

*Agradezco al Programa Institucional de Formación de Investigadores por la beca que me otorgó por la participación en los proyectos de investigación “**Una construcción experimental que utilice poca mano de obra y resiste temblores y vientos huracanados**”, clave CGPI 20040352 y CGPI 20050429 y “**Estudio de las propiedades termofísicas de materiales naturales y reciclados para su aplicación como aislante térmico en viviendas de bajo costo**” Claves SIP: 20060952.*

Agradezco la Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral regional- IPN, Unidad Oaxaca por permitirme cursar mis estudios de maestría en el programa que ahí se imparte.

ÍNDICE

Relación de tablas	10
Relación de figuras	10
Introducción	13
<i>CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....</i>	<i>15</i>
1.1 Planteamiento del problema	16
1.2 Antecedentes.....	18
1.2.1 La construcción prefabricada	18
1.2.2 El Ferrocemento.....	20
1.2.2.1 Procedimientos constructivos con ferrocemento, ventajas y desventajas.....	22
1.2.2.2 El ferrocemento en México y Oaxaca	25
1.3 Justificación.....	28
1.4 Objetivos	30
1.5 Formulación de hipótesis.....	31
<i>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL</i>	<i>32</i>
2.1 Construcción prefabricada	33
2.2 El ferrocemento.....	34
2.2.1 Propiedades del ferrocemento.....	34
2.2.2 Relaciones agua-cemento, y cemento-arena	35
2.2.3 Resistencia a la tensión	35
2.2.4 Resistencia a la compresión	36
2.2.5 Resistencia a la flexión	36
2.2.6 Módulo de elasticidad y de Poisson.....	37
2.2.7 Durabilidad	37
2.3 Mortero auto-compactable.....	37
2.3.1 Aditivos del mortero auto- compactable.....	38
2.3.2 Propiedades del mortero auto-compactable	40
2.4 Aislantes térmicos	41
2.5 Conductividad térmica	43
2.6 Edificaciones de bajo costo.....	45
<i>CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA.....</i>	<i>46</i>
3.1 Diseño del proyecto.....	47
3.2 Programa experimental para la determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos	48
3.3 Construcción del prototipo y evaluación económica	49
<i>CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL PROYECTO</i>	<i>50</i>
4.1. Proyecto Arquitectónico.....	51
4.2. Proyecto de ingeniería	55
4.2.1. Diseño del sistema constructivo.....	55
4.2.1.1 Modulación de planta arquitectónica.....	56
4.2.1.2 Diseño de elementos muro y construcción de cimbra	56

4.2.1.3 Propuesta del proceso constructivo para el sistema <i>Ferro-prefab</i>	58
4.2.2 Diseño de mezclas.....	64
4.2.2.1 Proporcionamiento de mezcla para mortero auto-compactable.....	64
4.2.2.2 Ensayos en estado fresco del mortero auto-compactable	65
4.2.2.3 Ensayos en estado endurecido para determinar la resistencia a la compresión del mortero auto-compactable	67
4.2.3 Revisión estructural por sismo.....	68
4.2.3.1 Análisis de carga del edificio	69
4.2.3.2 Aplicación de método simplificado para revisión por sismo.....	70
4.3 Discusión de resultados	75
<i>CAPÍTULO 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA</i>	<i>78</i>
5.1 Selección de material aislante y diseño de componentes multicompuestos.	79
5.2 Construcción de los componentes multicompuestos	80
5.3 Etapa experimental de evaluación de componentes multicompuestos.....	82
5.3.1 Equipo e instrumentación para determinar la conductividad térmica	82
5.3.2 Prueba operativa para calibrar el conductivímetro.....	84
5.3.3 Determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos.....	86
5.3.3.1 Acondicionamiento e instalación de componentes multicompuestos.....	86
5.3.3.2 Establecimiento del estado térmico estable en componentes multicompuestos CMa y CMb.....	87
5.3.3.3 Adquisición de datos y determinación de conductividad térmica	89
5.4 Discusión de resultados	90
<i>CAPÍTULO 6. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA</i>	<i>93</i>
6.1 Cimbra y construcción de elementos prefabricados.....	94
6.1.1 Fabricación de elementos prefabricados para muros	94
6.1.2 Preparación y colocación del mortero auto-compactable.....	95
6.1.3 Descimbrado de elementos prefabricados.....	97
6.2 Descripción del proceso constructivo de la sala de juntas-aula	97
6.2.1 Partida: Trabajos preliminares	97
6.2.2 Partida: Cimentación.....	98
6.2.3 Partida: Estructura.....	100
6.2.4 Partida: Albañilería	108
6.3 Comparación económica entre el sistema <i>Ferro-prefab</i> y el sistema de construcción tradicional.....	109
6.4 Discusión de resultados	113
Resumen de resultados	115
<i>Conclusiones.....</i>	<i>116</i>
<i>Recomendaciones</i>	<i>117</i>
<i>Bibliografía.....</i>	<i>118</i>
<i>Anexos.....</i>	<i>125</i>

Relación de tablas

Tabla 1.	Clasificación de viviendas según área de construcción y número de salarios mínimos percibidos por sus usuarios (SEDESOL 2002) citado por López (2005).	45
Tabla 2.	Proporcionamiento de materiales para la fabricación de 1 m ³ de mortero auto-compactable.	65
Tabla 3.	Extensibilidad y resistencia a la compresión de morteros a los 28 y 56 días.	68
Tabla 4.	Peso por metro cuadrado de la cubierta.	69
Tabla 5.	Peso por metro cuadrado de muros.	70
Tabla 6.	Aplicación del factor de reducción de resistencia para muros cortos en el sentido “x”	73
Tabla 7.	Aplicación del factor de reducción de resistencia para muros cortos en el sentido “y”	73
Tabla 8.	Establecimiento del estado térmico estable.	85
Tabla 9.	Determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos CMA.	89
Tabla 10.	Determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos CMB.	90
Tabla 11.	Dosificación de materiales para fabricar concretos y morteros (Suárez 2004).	99
Tabla 12.	Análisis comparativo económico entre el sistema de construcción Ferro-prefab y el sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado.	110

Relación de figuras

Figura 1.	Apariencia del ferrocemento.	21
Figura 2.	Diagrama de flujo de la metodología de investigación planteada.	47
Figura 3.	Planta arquitectónica de la sala de juntas-aula.	52
Figura 4.	Corte longitudinal A –A’	53
Figura 5.	Fachada principal (Norte).	53
Figura 6.	Apunte Perspectiva vista Noreste.	54
Figura 7.	Apunte Perspectiva vista Sureste.	54
Figura 8.	Planta arquitectónica modulada.	56
Figura 9.	Diferentes alturas de elementos muro empleados en el diseño del proyecto.	57
Figura 10.	Cimbra empleada en la fabricación de elementos muro.	58
Figura 11.	Excavación y compactación de cepa para la base del cimiento.	59
Figura 12.	Construcción de la plantilla de concreto.	59
Figura 13.	Habilitado de acero para la cimentación.	60
Figura 14.	Habilitado de acero, montaje de PTR, cimbrado y colado de zapata corrida.	61
Figura 15.	a) Montaje de elementos muro, b) colado de la base de elementos muros.	61
Figura 16.	Habilitado de acero y cimbra encadena de cerramiento.	62
Figura 17.	a) Montaje de estructura metálica a base de viga doble monten para recibir la cubierta, b) detalle del anclaje de placa de asiento para recibir estructura de la cubierta.	63
Figura 18.	Instalación de aislante térmico, habilitado de acero y colado de la cubierta.	63
Figura 19.	Procedimiento para verter el mortero en cono de Abram’s	66
Figura 20.	Determinación de extensibilidad de flujo del mortero fluido	66

Figura 21.	<i>Materiales empleados en la construcción de la cubierta del edificio en estudio.....</i>	69
Figura 22.	<i>Planta esquemática del edificio en estudio.....</i>	71
Figura 23.	<i>Diseño del componente multicompuesto con cartón (Conos de Huevo).....</i>	80
Figura 24.	<i>Disposición de casilleros de huevo utilizado como material aislante a) para muros, b) para cubierta. 81</i>	81
Figura 25.	<i>Construcción de CM a) Construcción y curado de placas de ferrocemento, b) colocación de material aislante y malla de metal desplegado y c) aplicación de mortero hidráulico sobre el aislante térmico. 82</i>	82
Figura 26.	<i>Equipo de medición de temperaturas y adquisición de datos para determinar la conductividad térmica de CM.....</i>	84
Figura 27.	<i>Colocación de termopares en la fibra de vidrio para la prueba operativa.....</i>	84
Figura 28.	<i>Establecimiento del estado térmico estable para la fibra de vidrio.....</i>	85
Figura 29.	<i>a) Arreglo e instalación de CM dentro en el conductivímetro, b) esquema de instalación de los termopares en el CM.....</i>	87
Figura 30.	<i>Establecimiento del estado térmico estable en los CMA.....</i>	88
Figura 31.	<i>Establecimiento del estado térmico estable en CMB.....</i>	88
Figura 32.	<i>Cimbra empleada para la fabricación de elementos prefabricados que consiste en una base metálica en forma de “U” invertida y dos retenedores laterales.....</i>	94
Figura 33.	<i>Habilitado de acero para estructura de los elementos prefabricados.....</i>	95
Figura 34.	<i>Doblado del esqueleto metálico para la construcción de elementos muro.....</i>	95
Figura 35.	<i>Fabricación de mortero fluido para muros prefabricados.....</i>	96
Figura 36.	<i>Curado de piezas prefabricadas para evitar pérdida de humedad y prevenir agrietamiento por contracción. 96</i>	96
Figura 37.	<i>a) Descimbrado de piezas prefabricadas, b) Estibación de piezas prefabricadas para continuar con su proceso de curado.....</i>	97
Figura 38.	<i>Trazo y nivelación de terreno.....</i>	98
Figura 39.	<i>Excavación de terreno y colado de plantilla de concreto simple.....</i>	99
Figura 40.	<i>Habilitado de acero de refuerzo para la cimentación.....</i>	100
Figura 41.	<i>Montaje de perfiles metálicos (PTR).....</i>	101
Figura 42.	<i>Montaje de muros prefabricados de ferrocemento (Placa T1).....</i>	102
Figura 43.	<i>a).- Anclaje del acero de refuerzo de las placas prefabricadas al acero de refuerzo de la cadena de desplante, b). Colado de la base de elementos prefabricados.....</i>	102
Figura 44.	<i>Cimbrado y colado de la cadena de cerramiento.....</i>	103
Figura 45.	<i>Mejoramiento de los elementos prefabricados para muros a) antes y b) nueva propuesta.....</i>	104
Figura 46.	<i>Cimbrado de cubierta con conos de huevo.....</i>	105
Figura 47.	<i>Colocación de cartón asfáltico sobre conos de huevo.....</i>	106
Figura 48.	<i>Acero de refuerzo a base de malla electrosoldada y varillas de 3/8” a cada 90 cm en el claro corto. 106</i>	106
Figura 49.	<i>Colado de la cubierta con mortero armado de 5 cm de espesor.....</i>	107

<i>Figura 50.</i>	<i>Curado de losa con membrana y rociado de agua.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 51.</i>	<i>a) Colocación de conos de huevo en muros prefabricados, b) Colocación de conos de huevo más cartón liso.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 52.</i>	<i>Consumo de cemento en Ton en las partidas de cimentación, albañilería y estructuras de los sistemas constructivos analizados.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 53.</i>	<i>Montos por consumo de acero en miles de pesos en el sistema de construcción tradicional y el sistema Ferro-prefab.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 54.</i>	<i>Volúmenes de agregado fino (arena) y grueso (grava) en m³ del sistema constructivo Ferro-prefab y el sistema tradicional.</i>	<i>112</i>

Introducción

El surgimiento y proliferación de asentamientos irregulares alrededor de las grandes ciudades, ha propiciado el crecimiento desordenado de los centros urbanos, aumentando cada día los rezagos en infraestructura urbana y de servicios. En las últimas décadas, se han desarrollado sistemas constructivos para mitigar este problema; sin embargo, los elevados costos de los materiales y procedimientos constructivos, han favorecido a que hoy en día no se cuente con la infraestructura necesaria para satisfacer las necesidades actuales. Lo anterior obliga la búsqueda de nuevos materiales y sistemas constructivos económicos y fáciles de aplicar.

El ferrocemento es un material que se desarrolló en 1848 por Louis Lambot, hoy en día es considerado un material versátil para la construcción de edificaciones de bajo costo, esto debido a la reducción en la cantidad de materiales empleados bajo éste sistema constructivo (Wainshtok, 1994; Mathews y col., 1994). También el ferrocemento es considerado un material altamente resistente a esfuerzos mecánicos (resistencia a la compresión, tensión, agrietamiento y flexión). En palabras de Nervi, quien fue el primero en utilizar el término ferrocemento, su principal característica de gran elasticidad y resistencia al agrietamiento, dada por el mortero y la gran cantidad y distribución del acero de refuerzo utilizado en él (Nervi, 1956).

Por otra parte, el ferrocemento es considerado un material apropiado para su aplicación en regiones sísmicas, esto debido principalmente al reducido peso de los edificios dado por el pequeño espesor de los elementos estructurales y también porque permite una construcción monolítica (Fernández y Cano, 2001). Sin embargo, el reducido espesor del ferrocemento (2.5 cm), tiene desventaja al presentar escasa resistencia al flujo de calor y frío del exterior, ocasionando la falta de confort térmico en las edificaciones. Esto favorece el desarrollo de enfermedades tales como: resfriados, hipotermia e hipertermia, que afectan principalmente a niños y ancianos (Martínez, 2003). Existen medios eficientes para lograr el confort térmico en edificaciones, uno de ellos es el medio mecánico, utilizado ampliamente en la arquitectura moderna, el cual ha ocasionado un intensivo consumo de energía. Por

otro lado, se pueden lograr mejores condiciones de confort térmico, mediante el uso de materiales aislantes existentes en el mercado, tales como: poliuretano, poliestireno, fibra de vidrio, corcho y otros. Sin embargo, éstos son altamente contaminantes desde su proceso de producción y posterior eliminación (Papadopoulos, 2004), además de ser costosos. Por tanto, el objetivo principal de éste trabajo es “Diseñar un sistema constructivo con perfiles de acero y elementos prefabricados de ferrocemento para la construcción de edificios públicos y viviendas seguras, térmicamente confortable y de bajo costo.”.

Este trabajo de investigación se desarrolla en 6 capítulos. El primer capítulo corresponde al planteamiento de la investigación. En el capítulo 2, se describe el marco teórico y conceptual que sustenta a este trabajo de investigación. En el capítulo 3, se presenta brevemente la metodología utilizada para llevar a cabo esta investigación. En el capítulo 4, se diseña el sistema constructivo a base de muros de ferrocemento prefabricado y cubiertas del mismo material soportada por estructuras metálicas. También se realiza la revisión estructural por sismo, además se diseña una mezcla de mortero auto-compactable, se le realizan pruebas en estado fresco y en estado endurecido. En el capítulo 5, se determinan las conductividades térmicas de muros y cubiertas de ferrocemento aisladas térmicamente con DSU (conos de huevo), y se realiza una comparación de los datos obtenidos con aquellos materiales utilizados comúnmente en la región para la construcción de muros y cubiertas. En el capítulo 6 se describe el proceso constructivo de una sala de juntas-aula. Al mismo tiempo, se realiza un presupuesto de obra con los costos reales de construcción y se comparan con aquellos costos de un sistema de construcción tradicional; de esta manera, se determinó la ventaja económica ofrecida por el sistema constructivo *Ferro-prefab*. Al final de los capítulos 4, 5, y 6 se pueden leer la discusión de resultados, y al finalizar el capítulo 6 se presenta un resumen de los mismos. Por último, el lector podrá examinar las conclusiones y recomendaciones de esta investigación que se encuentran inmediatamente después del resumen de resultados.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El crecimiento acelerado de las ciudades actuales, ha permitido que prolifere un sinnúmero de sistemas constructivos. Al mismo tiempo, los avances tecnológicos en todos los órdenes, exigen cada día construcciones de más complejidad y con mayores requerimientos dimensionales, además de una construcción acelerada. Exigencias que no son posibles de lograr con el nivel de desarrollo de la técnica de construcción de los elementos *in situ* (sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado).

Según Capote (1996) el método tradicional de construcción *in situ*, tiene la gran desventaja de la dependencia lineal en su proceso de construcción. A la ejecución de las cimentaciones le sigue la construcción de cadenas de desplante, muros, castillos, cadenas de cerramiento, columnas y traveses, y en seguida la construcción de la cubierta, de tal forma, que no es posible realizar simultáneamente las distintas tareas que componen dichas construcciones.

Sumado a este rígido principio de organización de obra, existen factores tales como el uso intensivo del acero y cemento, base fundamental del sistema de construcción tradicional, que aumenta no solamente el costo de construcción; sino también provoca un desequilibrio ecológico por la alta cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera en su proceso de su fabricación. De acuerdo a Malhotra y Mehta (2002) para la producción de cada tonelada de cemento se emite al medio ambiente aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono y se consume aproximadamente 4 GJ de energía.

Otros factores que afectan de igual manera al sobre-costo en la edificación bajo el sistema tradicional es la escasez y la sobre explotación de los bancos de arena y grava, ocasionando además impactos sobre el medio ambiente, tales como erosión de suelos y pérdida de áreas naturales y/o deterioro del paisaje. Esto ocurre debido a la gran cantidad de estos materiales utilizados para la fabricación del concreto, pues de acuerdo a Concrete Basics (2002), los agregados ocupan entre un 65% a un 80%

de todo el volumen de concreto; sin embargo el consumo de estos materiales no se puede detener debido a la gran demanda de infraestructura requerida en el país.

En la búsqueda de nuevos sistemas de construcción que permitan obtener mayores ventajas que el sistema de construcción tradicional, se retomó el uso del ferrocemento como material de construcción desde la década de los 40's. El uso del ferrocemento ha favorecido la reducción de los costos de construcción, esto como consecuencia de la reducción en el espesor de los muros y cubiertas. Esta misma reducción de los elementos de construcción permite minimizar el uso de materiales tales como el acero y el cemento, la grava y la arena. Sin embargo; al utilizar espesores delgados (2.5 a 5 cm) afecta directamente al confort térmico, pues presenta escasa resistencia al flujo de calor y frío.

Hoy en día el acondicionamiento climático de espacios y edificios, es uno de los factores más relevantes que contribuyen al incremento de la demanda energética por parte de la sociedad actual. Martínez (2005) declara que la industria de la construcción consume el 40% de los recursos y energía mundial, la mitad de la energía que se usa en los edificios se gasta en calefacción, refrigeración, ventilación e iluminación, esto se debe al manejo inadecuado de los materiales y sistemas de construcción actuales.

Lo anterior ha llevado a que se realicen estudios para aislar las habitaciones y lograr mejores condiciones de confort dentro de las mismas, de acuerdo a Desjarlais (2002) una vivienda unifamiliar bien aislada puede ahorrar un 50% en gastos de calefacción. Sin embargo, se debe de tomar con reserva esta información, pues este estudio se realizó en un clima donde las condiciones climáticas son extremas.

Otro estudio sobre el tema tratado en el párrafo anterior realizado por Bojorquez y col. (2003), demuestra que con un sistema alternativo de construcción, con materiales adecuados se puede lograr la reducción de gasto energético en la

utilización de aire acondicionado hasta en un 12.52% comparado con un sistema de construcción tradicional.

1.2 Antecedentes

1.2.1 La construcción prefabricada

El sedentarismo en el hombre, trajo como consecuencia la necesidad de construir espacios para morar y protegerse de las inclemencias del medio ambiente; inicialmente, estos refugios se hicieron colocando ramas de árboles inclinadas y con esto logró satisfacer sus necesidades. Desde entonces, el hombre ha desarrollado una diversidad de formas de construir su refugio, pasando de los materiales poco duraderos a la piedra y los ladrillos de barro recocido. La forma de construcción ha variado según la época, mejorando y adaptándose para cubrir las necesidades más apremiantes de la sociedad. Uno de los casos que reviste más importancia en la evolución de los sistemas constructivos, es el desarrollado posterior a la segunda guerra mundial. Este hecho se dio con la finalidad de reconstruir la mayor parte de los países europeos devastados por la guerra; así, da comienzo una nueva era en la construcción llamada: prefabricación (Vilagut, 1975).

La prefabricación en la construcción aparece desde la antigüedad, la utilizaron los egipcios, al igual que los romanos y los mayas. Pero hubo que esperar hasta 1867 para que un jardinero francés, de nombre J. Monier, patentara lo que posteriormente sería el concreto armado y con ello se inicia de manera importante la prefabricación (Vilagut, 1975).

Estas nuevas formas de construir ya mostraban ventajas y en 1902, Christopher, quien fue uno de los primeros arquitectos en emplear este tipo de construcciones expresó: "el procedimiento de fabricación de vigas en un taller puede ser más económico que el colado en obra. También afirmó que esto permitía la posibilidad de ensayar todas las piezas antes de su colocación; además, que la construcción de un entrepiso se hace más fácil y rápidamente, y que este trabajo puede ejecutarse aun cuando haya mal tiempo sin que resulten retrasos. En fin, el entrepiso al ser capaz

de soportar las cargas inmediatamente después de su colocación, permite que los trabajos puedan continuarse sin interrupción" (Rosmalen, 1984).

En la década los 60's la prefabricación tuvo su mayor impulso con la creación de un nuevo estilo arquitectónico y universal denominado, Prefabismo o *prefab style* en inglés (Salamanca, 1997) que por sí mismo, evoca y sugiere la idea de prefabricación, madre del estilo. Este estilo difiere del estilo tradicional por las siguientes características:

- 1.- Una modulación arquitectónica unida a una prefabricación industrial.
- 2.- Rapidez de ejecución (por primera vez en la historia, la velocidad constructiva es una variable clave en un estilo).
- 3.- Exactitud (la posibilidad de error es mínima en esta arquitectura. Tanto las mediciones como los costos finales son muy aproximados al de los proyectos. Aquí no se improvisa nada; el proceso constructivo se cumple con asombrosa exactitud en presupuesto, en calidades y en plazos. La intervención del hombre a pie de obra es mínima, en vez de trabajar en la intemperie lo hace en una fábrica aumentando la seguridad personal).
- 4.- Repetición sistemática de elementos iguales.
- 5.- Aparición de elementos estructurales en las fachadas.

Salamanca (1997) también comenta que al utilizar el prefabismo en la construcción, no se pierde ni perderá la libertad de creación, aún cuando el constructor dice que tiene las manos atadas y sin poder utilizar otro sistema constructivo más que el que domina; menciona que no son las manos las que están atadas, sino la imaginación es la que tiene enjaulada. Finalmente sugiere que los grandes arquitectos del futuro no serán los que hagan las viviendas más bellas sino los que proyecten las máquinas para fabricar las viviendas más bellas.

Lo que hoy se presenta como prefabismo parece ser una utopía; sin embargo, basta recordar lo que Le Corbusier dijo en el siglo pasado: es conveniente saber que la

utopía no es más que la realidad del mañana y que la realidad de hoy fue la utopía del ayer.

En México, las nuevas técnicas se empezaron a utilizar en 1927, con el empleo de vigas prefabricadas de concreto armado en la construcción del hotel Regis en la ciudad de México. De esa fecha a la actualidad, la prefabricación se fue consolidando poco a poco; en un inicio las técnicas eran copiadas de otros países, pero con el tiempo empezaron a surgir empresas especializadas en prefabricación. Esta consolidación ocurrió en los años sesenta y principios de los setenta (Martínez, 1998).

El progreso tecnológico es sin duda, un factor importante en el avance de la construcción industrializada, pero no el único, ya que éste tiene también una relación directa con aspectos socioeconómicos, científicos, culturales e ideológicos. En los países en desarrollo como México, los problemas económicos constantes, el alto índice de desempleo, la desigualdad en la distribución de la riqueza, la fuerte dependencia económica y técnica del exterior, y la falta de mano de obra especializada, aparecen como algunas de las causas que han frenado el desarrollo de esta industria. El resultado es que en la década de los 90's, sólo 2% de lo que se construía en México se realizaba con prefabricados, mientras que en Europa, este tipo de construcción llegó casi a 50% (Martínez, 1998). Sin embargo; en los últimos años se ha tenido un ligero repunte y se puede decir que la prefabricación puede representar un 15% del total de la edificación (Ramírez y Valdez, 2006).

1.2.2 El Ferrocemento

El ferrocemento es un término usado para describir un tipo de concreto armado, que difiere del concreto reforzado convencional o concreto presforzado, primeramente, por la manera en la cual los elementos de refuerzo están dispersos y arreglados. El acero en el ferrocemento está formado por varias capas de alambre de diámetro pequeño y continuo. El ferrocemento puede estar formado por paneles delgados o

secciones tan delgadas como 1 pulgada de espesor, con solo una cubierta delgada de mortero sobre las capas de refuerzo (Committee ACI 549, 1994).

El ferrocemento está conformado de una matriz de cemento pórtland, agregado pétreo fino (arena), acero de refuerzo, agua y aditivos (químicos y minerales) (Ver figura 1). La mezcla del cemento pórtland, el agregado fino y el agua producen una pasta endurecida que puede representar aproximadamente un 95% del volumen del ferrocemento y el 5% restante lo representa el acero (Committee ACI 549, 1994).



Figura 1. Apariencia del ferrocemento.

La historia del ferrocemento se remonta a 1848, cuando el francés Jean Louis Lambot construyó pequeños botes, recipientes para agua y otros objetos con un material que él llamó Ferciment, patentado en 1852 (Abang, 1995). Aunque el ferrocemento nace junto con el concreto armado hace más de un siglo, fue relegado durante mucho tiempo. En 1943 el material fue retomado para la construcción de cascos de barcos; a partir de esa fecha, la ingeniería ha sido testigo de los resultados y la enorme versatilidad al emplear el ferrocemento en diversas edificaciones de distintos países (Olvera, 1994).

En los inicios de 1940, Pier Luigi Nervi, popularizó el uso del ferrocemento al observar que este material presentaba características mecánicas apropiadas, al resistir alto impacto y ser un material aproximadamente homogéneo (Cabahug y Robles, 1998). Después de la segunda guerra mundial, Nervi, demostró la utilidad del ferrocemento como material para la construcción de botes. La búsqueda de nuevos

materiales y procedimientos constructivos más rápidos y económicos hizo posible que se retomara el uso del ferrocemento como material de construcción hasta la fecha.

1.2.2.1 Procedimientos constructivos con ferrocemento, ventajas y desventajas

Un método para construir estructuras de ferrocemento puede ser *in situ*, se hace colocando primero un esqueleto de acero, utilizando alambrones y varillas de poco diámetro para darle la forma deseada. Sobre el esqueleto formado por varillas se colocan las capas de mallas (principalmente de gallinero y metal desplegado) en ambos lados del esqueleto. La aplicación del mortero lo pueden hacer dos personas, una coloca el mortero por la parte superior y otra con una pequeña tabla impide que el mortero caiga (Robles, 1992). Después de la aplicación del mortero, se espera alrededor de tres horas o el tiempo necesario para que el mortero fragüe, y en seguida se le aplica una o más capas de mortero dándole el acabado deseado. Después de este proceso, es necesario cubrir la estructura ya sea con plástico o con otro material adecuado, con el objeto de que el mortero no pierda humedad, y de esta forma, se desarrolle adecuadamente el proceso de hidratación del cemento. El procedimiento constructivo "*in situ*", ha favorecido en gran medida la construcción monolítica de los edificios y al mismo tiempo es aprovechado para restringir efectos causados por sismos (Fernández y Cano, 2001); sin embargo, se ve afectado principalmente por un intenso uso de la mano de obra.

Existe otro método de construcción con ferrocemento, el cual consiste en utilizar moldes y construir piezas prefabricadas, los moldes pueden ser de madera, concreto, fibra de vidrio, metal u otro material adecuado. Sobre los moldes, se coloca el acero de refuerzo de manera firme y abarcando todo el molde. La aplicación del mortero se lleva acabo colocando el material (mortero) sobre el molde, en seguida se presiona o se vibra con equipo especializado, de tal forma que el mortero atraviese las capas de malla y proporcione el recubrimiento al lado contrario en el que se aplica el mortero. El desarrollo de este sistema fue favorecido por la necesidad de ahorrar tiempo en el

proceso de construcción. Se han reportado varios sistemas constructivos prefabricados que se describen brevemente a continuación.

Sandowicz (1985) propone cuatro sistemas constructivos utilizando tres tipos básicos de elementos de ferrocemento en forma de canal; él los llamó: ELSA, CEE, ELWO y el cuarto sistema fue una mezcla de los sistemas anteriores. El sistema de paneles ELSA, sirve para ser utilizado como muro divisorio o como cimbra permanente para el colado de vigas y columnas. El principal objetivo de este sistema constructivo es una combinación entre el ferrocemento y concreto reforzado para hacer una estructura monolítica. El CEE, es un sistema constructivo integral, incluye paneles de ferrocemento unidos con tornillos para muros y cubiertas. Las edificaciones con este sistema constructivo no requieren de cimentación y por ello se recomienda para construcciones de un solo nivel. En el sistema ELWO, los canales son unidos con tornillos y sellados con espuma.

Tatsa (1988) describe un sistema constructivo a base de paneles de ferrocemento, unidos con concreto reforzado hecho en sitio. La principal característica de estos paneles es que ellos incorporaron una espuma como aislante térmico permanente. Las placas de ferrocemento fueron unidos con tornillos.

Wainshtok (1994), describe un sistema constructivo que tuvo mucho auge en las provincias de Cuba, con dicho sistema, se construyeron más de 400 casas de hasta cuatro niveles. El sistema constructivo fue completamente prefabricado, desde la cimentación, los muros y la cubierta. Se utilizó una combinación de diferentes paneles, principalmente en forma de canal "C". En este sistema constructivo, debido al peso de los elementos empleados, el montaje de los muros, cimentación o cubierta se puede hacer manualmente o con equipo. Una comparación económica realizada, muestra que el sistema de construcción con ferrocemento es más económico que un sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado. La reducción de costos se debe principalmente a la reducción en las cantidades de materiales utilizados como: cemento, acero, arena y grava.

Mathews y col. (1994) propusieron un sistema constructivo de ferrocemento a base de paneles en forma de canales, a los cuales denominaron elementos Doble "T" y Triple "T", estos elementos tuvieron 90 cm de ancho con diferentes longitudes. Para muros de carga, la longitud de las placas fue 3 m, y 90 cm para muros bajos, utilizados para construir vanos de ventanas. Para las cubiertas, la longitud fue de 2.70 m y 3.60 m. La cimentación de edificaciones bajo este sistema constructivo puede ser superficial, esto debido al poco peso del edificio; pues de acuerdo a estos investigadores, el peso del edificio se reduce de un 60% a un 80% con respecto a la construcción tradicional de ladrillo y concreto armado utilizado en la India. Lo anterior afecta directamente al costo de los edificios, por lo cual la conclusión de los investigadores es, la construcción de edificios con ferrocemento prefabricado es económicamente competitivo con respecto a la construcción tradicional.

Waliuddin e Ismail (1995) describe un sistema prefabricado de ferrocemento económico y ligero para techos. El sistema constructivo es a base de placas en forma de "L", con dimensiones de 65 cm x 65 cm, y un espesor de 19 mm, con un patín de 17.5 cm (para formar la L). Estos elementos fueron soportados por vigas de sección rectangular, con una longitud de 3.2 m. En el proceso de prefabricación, tanto en las placas como en las vigas se dejó parte del acero de refuerzo descubierto, esto sirvió para unir las placas con las vigas y placas con placas. Con esta técnica constructiva para techos, se logró reducir el peso propio de la cubierta en un 60%, también hubo un ahorro de 40% de cemento y 30% de acero de refuerzo, comparado con una losa de concreto armado de 10 cm de espesor.

Mattone (1996), desarrolló un sistema prefabricado de cubiertas con placas de ferrocemento, con una sección transversal de forma de "Z", estos elementos tuvieron una longitud de 3.50 m, un ancho de 90 cm y un espesor de 16 mm. El autor no presenta un análisis de costos; sin embargo, por el espesor de las placas se puede aseverar que es más económico y ligero que una losa de concreto armado, pero a su vez permite con mayor facilidad el paso del calor y el frío.

1.2.2.2 El ferrocemento en México y Oaxaca

La técnica constructiva a base de ferrocemento, ha sido empleada en México desde mediados de los años 70's, Castro (1979) reportó el uso de paneles prefabricados de ferrocemento para la construcción de más de 350 casas de bajo costo en México. Estos paneles fueron reforzados con dos a tres capas de mallas de gallinero. Los paneles fueron unidos usando tornillos y pernos. Se observó que el comportamiento de las uniones fue adecuado para la zona sísmica de la ciudad de México.

Olvera (1994) reportó la construcción de diferentes tipos de edificaciones tales como locales comerciales y casas habitación. El sistema constructivo propuesto por Olvera, fue a base de tableros prefabricados de ferrocemento con un espesor de 2.5 a 3 cm. El ancho de los tableros fue de 1.20 m y alturas variables hasta de 3.6 m, los tableros para las cubiertas tuvieron longitudes de hasta 6 m. En todos los tableros se emplearon 3 capas de tela de gallinero y armazón de alambón de ¼" y en algunos casos malla electrosoldada del tipo 6"x 6"-6/6.

Olvera desarrolló un sistema constructivo para construcciones de varios niveles, usando paneles prefabricados de ferrocemento en forma de canal "C" de diferentes secciones; y experimentó también con diferentes tipos de conexiones. Este sistema constructivo está diseñado para proporcionar un alto grado de flexibilidad arquitectónica, además de tener un bajo costo. Sin embargo, Olvera no aborda el tema de la conductividad térmica del ferrocemento y al ser éste un material de poco espesor, afecta directamente al confort térmico. Además, poco se ha estudiado la aplicación de morteros auto-compactables para obtener mayor calidad en los elementos prefabricados evitando el uso de maquinaria especializada para vibrar o compactar adecuadamente el mortero.

En la ciudad de Oaxaca, también se ha desarrollado un sistema constructivo a base de ferrocemento. Numerosas obras experimentales se realizaron en el CIIDIR, Unidad Oaxaca, Centro de Investigación Dependiente del Instituto Politécnico Nacional. Se

llevaron acabo proyectos de prototipo de casas habitación hasta edificios públicos tales como: escuelas, bibliotecas, auditorios y cafeterías.

Uno de los primeros prototipos reportados por los investigadores del CIIDIR, fue la construcción de una casa de 16 m² denominada: “casa gota”. En este proyecto experimental, se realizaron pruebas mecánicas a muestras de ferrocemento; además, se evaluó su resistencia a altas temperaturas. Los resultados indican que este material es resistente al fuego, y a esfuerzos mecánicos (López y Díaz, 1991).

Con el paso del tiempo y bajo una intensa investigación, se construyó un auditorio con la capacidad para albergar a 110 personas en un área de 97 m² de construcción. Se construye adyacente al auditorio una biblioteca, ambos espacios se vincularon mediante un vestíbulo. El costo de construcción de este proyecto resultó en una tercera parte más económico que el sistema tradicional de ladrillo y concreto armado (Fernández y Caballero, 1993).

Dentro de los experimentos realizados en el CIIDIR – Oaxaca, se construyó una casa habitación con ferrocemento (casa muestra), bajo el método de construcción monolítica, en este proyecto se evaluó el costo de edificación resultando 40% más económico que el sistema tradicional de construcción a base de ladrillo y concreto armado (Fernández, 1996).

Además de edificios para vivienda, se han diseñado y construido edificios públicos con ferrocemento, este es el caso de la construcción de aulas de nivel básico para el estado de Oaxaca. En este proyecto se construyeron dos salones de clases, con una capacidad para albergar a 40 estudiantes. Se cuenta con servicios sanitarios para hombres y mujeres además de un área para la administración. La superficie total del edificio fue de 192 m² de construcción. De acuerdo a los resultados obtenidos por los investigadores, este tipo de construcción monolítica es económica, resistente a efectos ocasionados por sismos y a aquellos ocasionados por huracanes (Fernández y col., 1998).

Debido a que la ciudad de Oaxaca se localiza en una zona altamente sísmica, el interés de los investigadores del CIIDIR, se enfocó a realizar estudios sobre construcciones sismo-resistentes; las pruebas se llevaron a cabo en dos edificios. El primero fue un edificio de un nivel cuya planta arquitectónica es de forma hexagonal con 16 m² de construcción, el segundo edificio fue de dos niveles con un total de 46 m² de construcción. Los resultados de esta investigación indican que las construcciones monolíticas a base de ferrocemento son altamente resistentes a los efectos causados por sismos (Fernández y Cano, 2001).

Uno de los edificios más significativos por su tamaño, y por los estudios realizados sobre él, es un auditorio con una capacidad de albergar 250 personas. Este edificio tiene forma semiesférica, con un diámetro de 24 m y una altura de 12 m. Es un edificio formado por un domo o cascarón de ferrocemento que en su base tiene un espesor de 10 cm hasta la altura de 3 m, a partir de ahí, el espesor del cascarón se reduce a 4 cm. El domo está reforzado por 16 nervaduras hechas de ferrocemento y concreto reforzado con una sección de 36 x 21 cm a cada 4.5 m de separación en la base. Esta estructura fue diseñada para resistir cargas producidas por sismos y vientos (Montes, 1996).

El trabajo de investigación hecho por el grupo de Materiales y Construcción ya mencionado, ha hecho posible la implementación de nuevas alternativas dentro del sistema constructivo con ferrocemento. Bajo esta expectativa, se realizó un edificio utilizando ferrocemento y estructuras metálicas. El objetivo de este proyecto fue construir con un método no convencional un edificio seguro, confortable y económico, capaz de reducir el uso de materiales y mano de obra en el proceso de construcción (Ávila, 2004). Se empleó en esta construcción perfil tubular rectangular (PTR). Como aislante térmico se utilizaron placas de poliestireno para mejorar el confort del edificio. Los resultados de esta investigación indican que el costo de construcción se reduce en un 25% comparado con el sistema de construcción tradicional, además de mejorar considerablemente el confort térmico.

Aunque en la mayoría de los prototipos construidos en el CIIDIR Unidad Oaxaca con el sistema a base de ferrocemento, intentan resolver el problema de la conductividad térmica de este material utilizando algún tipo de aislante térmico, no se han reportados estudios experimentales para comprobar el grado de mejoramiento que se tiene con dichos aislantes. Por otra parte, no se ha incursionado de manera trascendental en la aplicación de sistemas constructivos con ferrocemento prefabricado aprovechando las ventajas que éste ofrece. A su vez no se han llevado a cabo estudios para incorporar aditivos químicos y minerales para mejorar las propiedades de éste material.

1.3 Justificación

Uno de los factores que favorecen al déficit en infraestructura pública y privada en los sectores marginados de la nación, es el alto costo de los materiales y procesos de construcción utilizados en la actualidad. Se puede entender que los altos costos de una construcción tradicional, se deben principalmente al uso intensivo del acero, el cemento y los agregados pétreos. Este uso intensivo conlleva no solamente problemas financieros, sino problemas ambientales tales como la emisión de contaminantes al ambiente como resultado del procesamiento del acero y el cemento; además existe el problema actual del deterioro del paisaje natural resultado la extracción de materia prima utilizada en la fabricación de dichos materiales y aquellos utilizados durante el proceso de construcción.

Este proyecto de investigación se justifica primeramente desde el punto de vista económico, pues a través de la técnica constructiva con **ferrocemento prefabricado**, se puede reducir el costo de edificación. Esto debido a que el método de construcción permite reducir el uso de materiales tales como: cemento, acero, y agregados pétreos. La reducción de los materiales de construcción es posible debido al reducido espesor de muros y cubiertas utilizados en esta técnica constructiva.

Al disminuir la cantidad de materiales utilizados durante el desarrollo de un sistema constructivo, en donde el cemento y el acero forman parte fundamental, no solamente tiene impacto sobre los costos de edificación, sino también una repercusión directa sobre el medio ambiente. Con la reducción en el uso de cemento y acero se minimiza la emisión de los contaminantes a la atmósfera y el consumo energético. También con la reducción de materiales pétreos se puede perturbar menos al paisaje natural donde se extraen dichos materiales, evitando la escasez de los mismos en el futuro. Por otra parte, el consumo del cemento no solamente se puede reducir mediante la implementación de la técnica constructiva del ferrocemento, sino también al utilizar materiales complementarios como la ceniza volante, que tiene beneficios tanto en la resistencia como durabilidad de los productos.

Por otro lado, con la técnica de construcción a base de ferrocemento, al reducirse el uso de los materiales también se reduce el peso del edificio; de esta forma se contribuye a la seguridad estructural, pues se reduce el riesgo sísmico que juega un papel relevante en la zona de estudio. Esto cobra importancia ya que de acuerdo con el Reglamento de Construcción vigente en el Estado de Oaxaca, el lugar donde se emplazará la edificación propuesta, pertenece a la zona "C" siendo ésta la segunda zona de mayor riesgo sísmico en México.

De acuerdo a Bruce (s/f), con la aplicación de nuevos sistemas constructivos a base de elementos prefabricados y mediante la modulación, se pueden lograr la reducción de la mano de obra y la cantidad de materiales utilizados; así mismo, se puede obtener una mejor calidad del producto final, pues se tendría mayor control en su producción. Adicionalmente se pueden hacer más construcciones sustituyendo los métodos tradicionales de construcción (Shri, 2003).

Planteando nuevos sistemas constructivos más económicos que el sistema de construcción tradicional, se puede contribuir a la solución del problema de la falta de infraestructura que demanda el país, pues se tienen noticias en aspecto educativo, que los niños de los estados más vulnerables de la república mexicana, reciben

clases improvisadamente a la sombra de árboles, o en el mejor de los casos, en aulas donde no impera ni el confort térmico, ni la seguridad estructural necesaria (Diario de México, Nov. 2003). Por otra parte, de acuerdo con proyecciones del CONAPO (Consejo Nacional de Población), se estima que para el año 2010 se demandará a escala nacional un total de 30.2 millones de viviendas. Considerando que actualmente se tiene un parque habitacional de aproximadamente 22 millones, por lo tanto, es necesario que durante los próximos 11 años el país edifique 8.2 millones de viviendas, esto es, poco más de 700 mil viviendas nuevas por año.

Por otra parte, es importante hacer énfasis en la implementación de sistemas constructivos, que demande no solamente consideraciones estéticas, estructurales o económicas, sino también de condiciones térmicas, que puedan generar un grado de confort aceptable en los espacios interiores. De esta manera disminuir las cargas térmicas, logrando así, el ahorro energético y la productividad en el usuario, y evitando enfermedades causadas por los cambios bruscos de temperatura.

La disminución de la carga térmica en las edificaciones, puede ser posible utilizando materiales aislantes existentes en el mercado; sin embargo, estos son altamente contaminantes desde su proceso de producción y eliminación (Papadopoulos, 2004). Por lo tanto, se propone la utilización de desechos sólidos urbanos (DSU) como una opción poco agresiva al medio ambiente.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema constructivo con perfiles de acero y elementos prefabricados de ferrocemento para la construcción de edificios públicos y viviendas seguras, térmicamente confortable y de bajo costo.

Objetivos particulares.

- Diseñar un sistema constructivo con perfiles de acero y elementos prefabricados de ferrocemento para la construcción de edificios públicos y viviendas.

- Determinar la factibilidad estructural del sistema constructivo propuesto ante efectos causados por fuerzas sísmicas, a través del método simplificado de análisis sísmico.
- Emplear aditivos químicos y minerales para mejorar las propiedades en estado fresco y en estado endurecido de morteros utilizados en la construcción de elementos prefabricados de ferrocemento.
- Determinar mediante pruebas de conductividad térmica la factibilidad de uso de desechos sólidos urbanos (DSU), como aislantes térmicos de bajo costo en muros y cubiertas de ferrocemento.
- Construir un prototipo de edificio con el sistema constructivo propuesto, para determinar su ventaja económica con respecto al sistema de construcción tradicional mediante el análisis de precios unitarios con datos reales de la obra.

1.5 Formulación de hipótesis.

- Al utilizar un sistema constructivo híbrido a base de ferrocemento y materiales aislantes producto de desechos sólidos urbanos, se reduce el peso de la edificación favoreciendo la reducción del riesgo sísmico.
- El uso de materiales aislantes a base de desechos sólidos urbanos permite reducir la conductividad térmica en muros y cubiertas de ferrocemento cuando se compara con la construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado.
- La aplicación de un sistema constructivo a base de perfiles de acero y ferrocemento prefabricado, tiene ventaja económica sobre el sistema de construcción tradicional, principalmente por reducir el uso de materiales empleados.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Construcción prefabricada

La evolución de la prefabricación en la industria de la construcción, a pesar de ser continua, se manifestó relativamente lenta durante el siglo pasado, fue hasta después de la segunda guerra mundial en el que se marcó su evolución, impulsada por las necesidades creadas al final de dicha guerra y por los perfeccionamientos maquinales de ese momento. En términos generales la prefabricación puede referirse a la construcción total o parcial de los elementos que conforman una edificación fuera de su destino final.

La Unión sindical francesa de la prefabricación de edificios estableció la siguiente definición, “Una construcción prefabricada es aquella cuyas partes constitutivas son, en su mayoría ejecutadas en serie, en taller, con la precisión de los métodos industriales modernos, para formar un sistema constructivo coherente que satisfaga las condiciones normales de resistencia, aspecto, habitabilidad, confort y duración, con el mínimo de los gastos” (Vilagut, 1975).

Un ingeniero francés de nombre M. Baretts, definió la prefabricación diciendo, “prefabricar un edificio consiste en construir fuera del mismo un gran número de elementos iguales y montarlo en obra, de modo tal, que venga a restituir a la estructura su monolitismo, buscando obtener en el conjunto de tal operación la máxima economía, la máxima rapidez de ejecución y el mejor control de calidad” (Vilagut, 1975).

Por las dos definiciones dadas anteriormente, se puede decir que la construcción prefabricada es la resultante de la fabricación previa de los elementos o piezas de construcción hechas en serie organizada y cíclica, para que con su montaje y ensamble se obtengan estructuras funcionales y modulares, satisfaciendo primordialmente una finalidad económica, rapidez de trabajo, así como de la calidad y control estricto de la edificación.

2.2 El ferrocemento

El ferrocemento, material que se comenzó a utilizar a finales de la década de los 40's, hoy en día es considerado un material versátil para la construcción de edificaciones de bajo costo, esto debido principalmente a la reducción en la cantidad de materiales empleados bajo este sistema. También el ferrocemento ha sido considerado un material altamente resistente a esfuerzos mecánicos (resistencia a la compresión, tensión agrietamiento y flexión). De acuerdo a Nervi (1956), su principal característica es su gran elasticidad y resistencia al agrietamiento, dada por el mortero y la gran cantidad y distribución del acero de refuerzo utilizado en él.

El Instituto Americano del Concreto (ACI), define al ferrocemento, como un tipo de concreto armado en forma de lámina delgada, comúnmente construido con mortero de cemento hidráulico, y reforzado con capas de telas de mallas poco separadas entre sí, y formadas por alambres continuos de diámetro relativamente pequeño (Comité ACI 549, 1994).

2.2.1 Propiedades del ferrocemento

La resistencia excepcional del ferrocemento a esfuerzos mecánicos se debe a que su refuerzo está compuesto por varias capas de mallas de poco espesor, superpuestas y ligeramente desplazadas entre sí, debido a que el mortero soporta considerable deformación en la proximidad inmediata del refuerzo, condición que se aprovecha al máximo con la distribución del acero de refuerzo descrito.

Para la fabricación del ferrocemento se puede emplear casi cualquier tipo de cemento pórtland, dependiendo de la aplicación que se le quiera dar al elemento construido; además, se recomienda que toda la arena pase por la malla No. 4. El acero de refuerzo empleado es frecuentemente de telas de gallinero de calibres No. 20 y 22 y metal desplegado. Para el esqueleto de la estructura de ferrocemento, se ha empleado alambón de ¼", varillas de 3/8" y mallas electrosoldadas que tienen un límite elástico del orden de 50 Mpa (Olvera, 1994).

Una de las más notables características del ferrocemento es su gran elasticidad y resistencia al agrietamiento dada por el mortero y por la subdivisión y distribución del acero de refuerzo. El estudio de parámetros especificando la subdivisión y distribución del acero de refuerzo es fundamental para entender muchas de las propiedades del ferrocemento. Estos parámetros son la fracción de volumen y superficie específica del acero de refuerzo (Nervi, 1956). La fracción de volumen es el volumen de acero de refuerzo por unidad de volumen de ferrocemento y la superficie específica es el área superficial del refuerzo por unidad de volumen del compuesto. Característicamente los valores de estos parámetros es: una concentración de acero de refuerzo por lo menos de 400 a 500 kg/m³ (una fracción de volumen de 5.1 a 6.3%), un espaciamiento medio entre elementos de refuerzo del orden de 5 mm a 10 mm y una superficie específica de al menos 0.2 mm⁻¹ (mm²/mm³) (Walkus y Mackiewicz, 1977).

2.2.2 Relaciones agua-cemento, y cemento-arena

La relación agua cemento admitida para la fabricación de ferrocemento va de 0.35 a 0.55 en peso, y el agua utilizada debe de ser potable. Esta relación está estrechamente vinculada con la resistencia a la compresión del ferrocemento, esto es a menor relación a/c mayor resistencia. La relación cemento-arena puede ser de 400 a 800 kg de cemento por m³ de arena (Olvera, 1994).

2.2.3 Resistencia a la tensión

El mortero así como el concreto tienen poca resistencia a la tensión, esta puede considerarse entre 1/10 de la resistencia a la compresión de los mismos. Se considera que el ferrocemento tiene mayor resistencia a la tensión debido a que tiene mayor acero de refuerzo distribuido en toda la superficie; por otro lado, esto es comprensible debido a que el mortero utilizado para su fabricación es de resistencia elevada. La resistencia a la tensión del ferrocemento se ve afectada por la orientación del acero de refuerzo, por lo tanto, la orientación más adecuada

dependerá si la carga que recibirá el elemento es esencialmente uniaxial o biaxial (Johnston y Mattar, 1976).

2.2.4 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del ferrocemento está dada principalmente por la resistencia de la matriz de mortero en proporción directa al área de su sección transversal, obviamente esto tiene una correlación estrecha con la relación a/c utilizada en la fabricación del mortero. Las variaciones de la superficie específica y el factor de refuerzo no ejercen influencia significativa, pero la orientación y colocación del refuerzo si, al igual que en el caso de la resistencia a la tensión ya mencionada (Johnston y Mattar, 1976).

2.2.5 Resistencia a la flexión

La curva carga-desplazamiento de un elemento sometido a flexión simple se comporta aproximadamente de una manera trilineal, en donde existen tres zonas de comportamiento: elástico, elasto-plástico y plástico (Kameswararao y Kamasundararo, 1991). El material se comporta como elástico hasta la primera grieta, en donde ocurre una sensible disminución de rigidez del elemento. En la siguiente zona, el material pasa a ser elasto-plástico, aumentando el número de grietas, con un ligero aumento de las aberturas de las mismas. En la tercera zona ocurre un aumento en el número de grietas así como de su abertura hasta que se presenta la falla. La resistencia del ferrocemento a flexión depende de la superficie específica, el tipo de malla empleada, su orientación y geometría (Comité ACI 549, 1994).

De acuerdo a Permalsamy y col. (1977), debido a que el acero de refuerzo en el ferrocemento es de diámetro pequeño, tiene un área de adherencia considerable, es decir, tiene mayor superficie específica que si se empleara refuerzo convencional. Esta parece ser la razón principal por la cual es posible emplear refuerzo de alta resistencia y alcanzar mayor resistencia a tracción del mismo orden de la resistencia a compresión de la matriz y al mismo tiempo obtener grietas de anchos pequeños.

2.2.6 Módulo de elasticidad y de Poisson

En ferrocemento el módulo de elasticidad crece en la misma proporción en que se incrementa el número de mallas. En el rango de agrietamiento, el mortero contribuye relativamente poco en el valor del módulo del compuesto. En el rango de no agrietamiento la relación Poisson puede calcularse con el módulo de elasticidad y el módulo de rigidez al cortante (Olvera, 1994).

2.2.7 Durabilidad

La durabilidad de ferrocemento al igual que la del concreto, está regida por el grado de penetrabilidad que pueden tener de los agentes agresivos del medio ambiente (cloruros) a la matriz de mortero para dañar el acero de refuerzo. La matriz de mortero ejerce doble acción protectora sobre el acero de refuerzo del ferrocemento. Por una parte, el mortero representa una barrera física entre el acero de refuerzo y el medio ambiente; y por otra, la alta alcalinidad ofrecida por el cemento desarrollada sobre el acero de refuerzo una capa de óxido que lo protege de la corrosión, esto es posible cuando la pasta de cemento se encuentra entre los 12.5 a 14 PH.

Se puede lograr una baja penetrabilidad en el ferrocemento, si se logra trabajar el mortero con una relación a/c baja, un consumo elevado de cemento y una granulometría adecuada de los agregados. Así también, es importante la colocación y compactado del mortero pero sobre todo, el intenso curado favoreciendo a la hidratación de la pasta de cemento evitándola conectividad de los poros de la pasta endurecida de cemento (Comité ACI 549, 1994).

2.3 Mortero auto-compactable

El mortero auto-compactable es un término relacionado estrechamente con el concreto auto-compactable originado en Japón en la década de los 80's. El concreto auto-compactable se puede definir como aquel concreto que es capaz de fluir en el interior de la cimbra rellenándola de forma natural, pasando entre el acero de refuerzo y consolidándose únicamente bajo la acción de su peso propio sin

compactación interna o externa. La alta fluidez proporciona la facilidad en la colocación de este tipo de concretos dentro de la cimbra. La viscosidad y cohesión moderadas son las que evitan la segregación de sus componentes garantizando una homogeneidad del concreto en el proceso de colocación (Okamura, 1997).

De lo anterior se desprende el término utilizado en este trabajo como mortero auto-compactable, que es aquel que puede fluir por su propio peso y llenar completamente la cimbra, incluso en presencia de un armado denso, sin necesidad de vibración, al tiempo que mantiene su homogeneidad.

2.3.1 Aditivos del mortero auto- compactable

Ceniza volante

La ceniza volante es comúnmente utilizada como puzolana en la fabricación de concretos a base de cemento portland. La puzolana es un material silíceo o sílico-aluminoso, que por si mismo puede tener poca o ninguna actividad hidráulica pero que, finamente dividido y en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (ASTM C 618 – 05).

La ceniza volante es producto de la quema de carbón mineral principalmente en las plantas termoeléctricas, que por años ha provocado severos daños al medio ambiente. Sin embargo; lo que anteriormente (en la década de los 40's) era un desperdicio o un contaminante para la atmósfera, hoy en día es un material benigno para el mortero y el concreto, mejorando sus propiedades en estado fresco y endurecido (Thomas y col., 1999). Éste material por sus características de tamaño, forma y composición química, ha sido usado como aditivo mineral en la fabricación de morteros y concretos, ésta práctica se ha hecho ya en muchos países con resultados muy satisfactorios.

La norma americana de concreto ASTM C 618 – 05 clasifica las puzolanas en tres tipos, dentro de las cuales se encuentra la ceniza volante.

Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tales como las diatomitas; tufos y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias.

Clase F: Producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Estas cenizas poseen propiedades puzolánicas y su contenido de calcio es menor al 10%.

Clase C: Producidas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de cenizas, además de tener propiedades puzolánicas, también poseen propiedades cementantes, ya que su contenido de calcio es típicamente mayor al 20%.

Las cenizas volantes son generalmente más finas que el cemento y la cal. Las partículas de las cenizas son comúnmente esféricas, en un rango de tamaño entre 10 a 100 micrones. Estas pequeñas esferas mejoran la fluidez y trabajabilidad del concreto en estado fresco. La fineza es una de las propiedades más importantes que contribuyen a la actividad puzolánica de las cenizas. El reemplazo de cemento con la misma cantidad de ceniza puede reducir el calor de hidratación del concreto; sin embargo, esta reducción de calor de hidratación no afecta la ganancia de resistencia a largo plazo ni su durabilidad. La formación de cementantes debido a la reacción de las cenizas con la cal libre en el concreto, permite continuar ganando resistencia con el tiempo. La disminución en el contenido de agua combinada con la producción de materiales cementantes adicionales, reduce la interconectividad entre los poros del concreto, de esta manera se disminuye la permeabilidad, este efecto mejora la durabilidad del mismo (Malhotra y Mehta, 2002).

Superplastificante

El superplastificante es un material distinto del agua, los agregados o el cemento hidráulico, que se utiliza como ingrediente del mortero o concreto, y que se añade a la revoltura inmediatamente antes o después del mezclado.

Los superplastificantes son ingredientes que se utilizan en la fabricación de concretos o morteros con el propósito de reducir la cantidad de agua en la mezcla y por lo tanto la porosidad capilar de la pasta de cemento. También se utiliza para mantener una trabajabilidad específica del concreto fresco por un periodo razonable

con una baja relación a/c. Los superplastificantes de alto rango por su siglas en Ingles HRWR están compuestos por varias familias de polímeros sintéticos y orgánicos mayormente sulfonatos y policarboxilatos.

Los principales componentes activos de los reductores de agua, son agentes de superficie activos que están concentrados en la superficie de contacto entre dos fases inmiscibles, y que alteran las fuerzas físico-químicas de esta interfase. Los agentes de superficie activos son absorbidos por las partículas de cemento, dándoles una carga negativa, que conduce a la repulsión entre las partículas y da como resultado la estabilización de su dispersión. También se repelen las burbujas de aire, que no pueden adherirse en las partículas de cemento. Además la carga negativa provoca el desarrollo de vainas de moléculas de agua orientadas alrededor de cada partícula, que separan las partículas. En consecuencia existe una movilidad mayor de las partículas, y el agua, libre de la influencia restringida del sistema de condensación, se presta para lubricar la mezcla y aumentar la trabajabilidad (Spiratos y col., 2003).

2.3.2 Propiedades del mortero auto-compactable

El adecuado comportamiento del mortero en estado fresco requiere de sus mezclas una alta fluidez con suficiente viscosidad y cohesión entre sus componentes, a fin de garantizar un flujo continuo y uniforme en toda la masa sin que exista segregación, y a su vez, que no se produzca un bloqueo del mortero entre el acero de refuerzo. Para ello, es importante tener una adecuada trabajabilidad y evitar de la segregación del mortero fresco.

Trabajabilidad

Es la facilidad con la que el mortero fresco puede colocarse y autocompactarse, se trata de una compleja combinación de aspectos de fluidez, cohesividad, compactabilidad y viscosidad.

El nivel de trabajabilidad del mortero auto-compactable se rige básicamente mediante la dosificación del superplastificante. No obstante, una dosis excesiva puede producir un riesgo de segregación y bloqueo. Se acepta como adecuada trabajabilidad, que el mortero tenga una fluidez de 60 a 80 cm de diámetro mediante la prueba del cono de Abram's (Hayakawa y col., 1993; Taniguchi y col., 1994 y Gomes y col., 2002).

Segregación

Debido a la elevada fluidez del mortero auto-compactable, el riesgo de segregación es muy elevado. Por consiguiente, evitar o prevenir la segregación será un aspecto importante en el control de la calidad de los morteros. La tendencia a la segregación en concretos y morteros puede reducirse mediante el uso de una cantidad suficiente de finos (< 0.125 mm), o bien mediante un aditivo modificador de la viscosidad (Poulson 2003). También puede reducirse el efecto de la segregación por medio de una gradación adecuada de los agregados (Neville y Brooks, 1998).

2.4 Aislantes térmicos

Aislante térmico es un material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia al flujo de calor, los materiales más comunes utilizados como aislantes tienen una conductividad promedio de $0,027$ kcal/h.m.°C a $0,056$ kcal/h.m.°C. El aislante térmico establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura.

El objetivo de un aislante térmico es impedir en alguna medida la transferencia de calor desde o hacia el cuerpo aislado. Los materiales de aislación térmica aprovechan en general el hecho de que el aire encapsulado es un excelente aislante, por esta razón, la gran mayoría de los materiales usados como aislantes son porosos, manteniendo el aire atrapado en su interior. Esto sugiere la idea de que los poros no deben estar conectados entre sí.

El aire encerrado en los poros queda casi inerte en los materiales con poros cerrados (como Poliuretano y poliestireno expandido) o con muy poca movilidad en aislantes con poros abiertos (por ejemplo: lana mineral y lana de vidrio), por esta razón el coeficiente de conductividad térmica será en general, tanto más pequeño como sea su masa por unidad de volumen (densidad). Sin embargo, existe una masa por unidad de volumen determinada para cada material poroso de aislación térmica, que por debajo de ella aumentará nuevamente la conductividad térmica. Esto se debe a que los poros son lo suficientemente grandes para permitir en su interior, una transferencia de calor por convección.

Uno de los papeles más importantes de los edificios, es proporcionar al hombre protección y abrigo de las condiciones climáticas extremas del exterior. Sin embargo, mucha de las construcciones actuales ignoran estos factores, la falta de adecuación de las edificaciones en relación a las demandas climáticas del sitio donde se ubican, ha provocado una serie de distorsiones y anomalías que afectan a los usuarios en los aspectos tales como: confort térmico, productividad y eficiencia, salud y economía.

Actualmente existe una diversidad de materiales aislantes industriales; sin embargo, poco se ha hecho para conocer más sobre aislantes naturales que ofrezcan las mismas características pero a un costo más bajo y que deterioren lo menos posible al medio ambiente. Un estudio realizado por Sandoval y Pineda (2004) en tres salones de clases de la Facultad de ciencias de la Universidad de Colima, refleja que en el interior estos edificios solamente existe un determinado tiempo de confort. El estudio mostró que tres aulas con condiciones confortables son en un 18% de tiempo de ocupación en el mejor de los casos y del 10% en el peor de los casos. Lo cual sugiere que la mayor parte del tiempo se da en el rango de incomodidad.

Según estudios realizados por Megri y col. (1997) el utilizar materiales que de alguna manera se consideran como un desecho podría ser una alternativa para mejorar la calidad del confort térmico de los edificios. En dicho trabajo estudios experimentales y teóricos fueron desarrollados para investigar la posibilidad de sustituir los

materiales tradicionales de aislante térmico poliuretano por desechos plásticos. El plástico analizado no tuvo una conductividad térmica similar a la de un aislante usado tradicionalmente en las construcciones; sin embargo, su desarrollo resulta interesante si considera que es relativamente económico y contribuye a la protección del medio ambiente.

2.5 Conductividad térmica

Entre dos cuerpos con temperaturas diferentes, inevitablemente se produce un flujo calorífico, el calor se desplaza del cuerpo caliente al cuerpo frío hasta que se produce el equilibrio de temperatura. Ningún medio impide el cambio de calor, sólo puede modificarse su intensidad. El cambio de calor se produce de tres formas diferentes: por conducción radiación y convección.

Por conducción. Es el flujo de calor a través de medios sólidos por la vibración interna de las moléculas y de los electrones libres y por choques entre ellas. Las moléculas y los electrones libres de la fracción de un sistema con temperatura alta vibran con más intensidad que las moléculas de otras regiones del mismo sistema o de otros sistemas en contacto con temperaturas más bajas. Las moléculas con una velocidad más alta chocan con las moléculas menos activadas y transfieren parte de su energía a las moléculas con menos energía en las regiones más frías del sistema. Las moléculas que absorben el excedente de energía también adquirirán una mayor velocidad vibratoria y generarán más calor.

La conducción es la transferencia que se da solamente en un cuerpo sólido llamado conductor. Los metales son buenos conductores de calor, siendo llamados aislantes los malos conductores (corcho, por ejemplo).

Por convección. Es el flujo de calor mediante corrientes dentro de un fluido (líquido o gaseoso). La convección es el desplazamiento de masas de algún líquido o gas. Cuando una masa de un fluido se calienta al estar en contacto con una superficie caliente, sus moléculas se separan y se dispersan, causando que la masa del fluido llegue a ser menos densa. Cuando llega a ser menos denso se desplazará hacia

arriba u horizontalmente hacia una región fría, mientras que las masas menos calientes, pero más densas, del fluido descenderán o se moverán en un sentido opuesto al del movimiento de la masa más caliente (el volumen de fluido menos caliente es desplazado por el volumen más caliente). Mediante este mecanismo los volúmenes más calientes transfieren calor a los volúmenes menos calientes de ese fluido (un líquido o un gas). La convección es la forma de propagación propia de los fluidos (gases o líquidos), las moléculas que están directamente en contacto con un cuerpo de temperatura más alta "A" se calientan y tienden a desplazarse por gravedad.

Por radiación. La transmisión de calor por radiación se produce aún para las bajas temperaturas siempre que dos cuerpos de temperatura diferente estén en presencia uno del otro, estando separado por un medio permeable a la radiación. El calor se transforma en energía radiante, atraviesa el medio permeable y alcanza al otro cuerpo. Una parte de la energía se transforma en calor y es absorbida por este segundo cuerpo. El resto de la energía se refleja bajo la forma de calor radiante. El transporte de calor por radiación no necesita material alguno: se produce, igualmente en el vacío. Ejemplo: La tierra es calentada por el sol por radiación.

Generalmente, los tres casos mencionados de transferencia de calor se producen simultáneamente. La conducción pura tiene lugar únicamente en los cuerpos sólidos, y no siempre es cierto que sea sólo conducción. Muchas veces es imposible disociar las tres formas de transmisión y es por simplificar por lo que se agrupa el conjunto de fenómenos bajo el nombre de conductividad térmica.

La conductividad térmica de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NMX-C-181-1984, es la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de extensión infinita y caras plano - paralelas y de espesor la unidad, cuando se establece una diferencia de temperaturas entre sus caras de 1 K (1 °c).

La conductividad térmica se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\dot{Q}}{A(\Delta T/L)}, \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

K= conductividad térmica de la muestra en $\frac{W}{m^{\circ}C}$,

Q= corriente suministrada en Watts

ΔT = diferencia de temperatura a través de la muestra en K o $^{\circ}C$,

L= espesor de la muestra en m y,

A= área expuesta en m^2 .

2.6 Edificaciones de bajo costo

En México, las edificaciones de bajo costo o económicas están estrechamente relacionadas con la percepción económica de los usuarios; la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) distingue 6 tipos de viviendas, que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de viviendas según área de construcción y número de salarios mínimos percibidos por sus usuarios (SEDESOL 2002) citado por López (2005).

Tipo de vivienda	Salario diario de los usuarios	Promedio de construcción. m^2
Básica	Hasta 3	Hasta 30
Social	De menos de 3 a 5	De 31 a 45
Económica	De 5 a 10	De 46 a 55
Media	Más de 10	De 56 a 100
Media alta	Más de 10	De 101 a 200
Residencial	Más de 10	Más de 200

De acuerdo a la Tabla 2.1 una construcción económica o de bajo costo es aquella que tiene de 46 a 55 m^2 de construcción y que puede ser adquirida por una persona que tiene como pago de 5 a 10 salarios mínimos diarios. En la evaluación económica se retomará esta tabla para determinar el prototipo de edificio aquí planteado puede considerarse dentro de uno de los rangos planteados en dicha tabla.

CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO DE LA METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este trabajo de investigación se plantea un diagrama de flujo que proporciona información de cada una de las etapas de la metodología, éste se divide en tres etapas (figura 2), las cuales se describen con detalle en los capítulos posteriores.

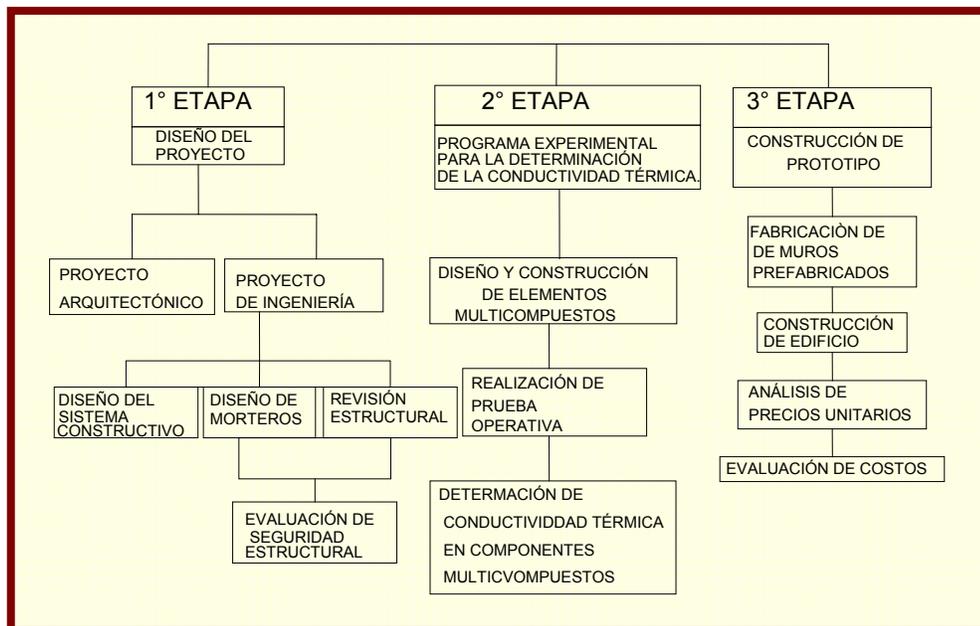


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología de investigación planteada.

3.1 Diseño del proyecto

Esta etapa se divide en dos segmentos principales; en el primero se llevó a cabo el proyecto arquitectónico, tomando en cuenta criterios de diseño bioclimático y la modulación de la planta arquitectónica. Por otra parte, se realizó el proyecto de ingeniería, en el cual se efectuó el diseño del sistema constructivo a base de paneles de ferrocemento prefabricado. Además, se utilizó un diseño de mezclas de mortero auto-compactable previamente realizado por Cano y col. (2006) y López col. (2006). También se realizaron pruebas en estado fresco y en estado endurecido del mortero. En estado fresco, se determinó el grado de fluidez (trabajabilidad) del mortero, mediante la prueba del cono de Abram's. En estado endurecido se determinó la resistencia a la compresión a los 28 y 56 días de cubos de 5 cm x 5 cm de acuerdo al procedimiento sugerido por la Norma Oficial Mexicana NOM C-061-1976. En esta misma etapa, se llevó a cabo una revisión estructural por sismo del edificio

propuestos, dicha revisión se regió bajo las recomendaciones y parámetros dictados en el Reglamento de Construcción y Seguridad Estructural para el Estado de Oaxaca 1999 y las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal en su sección de diseño por sismo, esto con el objeto de determinar su factibilidad estructural.

3.2 Programa experimental para la determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos

Para determinar la conductividad térmica, se diseñaron y construyeron componentes multicompuestos, dichos componentes estuvieron constituidos por una placa de ferrocemento, como aislante térmico se utilizaron desechos sólidos urbanos (DSU), y un aplanado de mortero cemento-arena. Por cada componente multicompuesto se construyeron 3 réplicas similares y fueron probados simulando condiciones de operación semejantes a las que se tendría en el edificio en estudio.

Las pruebas de conductividad térmica se realizaron tomando como referencia las recomendaciones de Norma Oficial Mexicana NMX-C-181-1984 y para determinar la conductividad de los componentes multicompuestos, se empleó la Ecuación 1 citada en la sección 2.5.

Antes de realizar las pruebas de conductividad térmica de los componentes multicompuestos, se llevó a cabo en primer lugar una prueba operativa para determinar la efectividad del conductivímetro a utilizar. Para tal efecto, se utilizó un material que ha sido previamente estudiado y cuyos datos se pueden encontrar en la literatura o proporcionados por un proveedor.

La medición de las propiedades de conductividad térmica de los diferentes componentes multicompuestos, se llevó a cabo utilizando un conductivímetro de 1 x 1 m. El conductivímetro utiliza la técnica del estado térmico estable; esto quiere decir, que una vez que los componentes multicompuestos hayan alcanzado la estabilidad térmica se lleva a cabo la toma de lecturas.

3.3 Construcción del prototipo y evaluación económica

La construcción del prototipo se realizó en dos fases; en la primera, se fabricaron los elementos prefabricados para muros, de acuerdo a la propuesta del sistema constructivo planteado en la primera etapa del diseño. Una vez fabricados dichos elementos se procedió a la construcción del prototipo que fue la segunda fase. En las dos fases mencionadas, fue imperativo registrar el rendimiento de mano de obra y consumo de materiales, con el objeto de obtener un catálogo de conceptos propios ó específicos de la propuesta en estudio.

Con los datos obtenidos de rendimiento de mano de obra y consumo de materiales, se elaboró el análisis de precios unitarios del prototipo, esto para obtener el presupuesto real de obra. Paralela a esta actividad, se calculó el presupuesto de un proyecto similar en forma y dimensiones pero bajo los requerimientos del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPCE), que es una institución que rige la construcción de infraestructura educativa. Una vez contando con ambos presupuestos, éstos se compararon en partidas de trabajo, y de esta manera se llevó acabo la evaluación económica para determinar la ventaja que ofrece la propuesta en estudio. Para calcular los presupuestos, se utilizó el programa de Análisis de Precios Unitarios NEODATA.

CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL PROYECTO

4.1. Proyecto Arquitectónico

El proyecto en estudio se ubica en la parte centro-oriente de las instalaciones del CIIDIR-IPN, Unidad Oaxaca y su orientación principal es norte-sur. El recinto tiene una superficie de construcción de 72 m², y se destinará a uso de sala de juntas-aula en donde se podrán realizar reuniones y actividades académicas. Tiene una capacidad para albergar a 30 personas cómodamente; además de contar con servicios sanitarios para hombres y mujeres.

El proyecto arquitectónico se desarrolló bajo las expectativas de diseño bioclimático (Sol, 2006), y cumpliendo con las dimensiones mínimas de espacio previstos en el Reglamento de Construcción y Seguridad Estructural para el Estado de Oaxaca vigente. La forma en planta que rige el diseño arquitectónico es ortogonal con una tendencia simétrica. En la parte norte del edificio se localizan las entradas, que al mismo tiempo sirven de salidas. La orientación de los muros en el lado sur se desplaza del eje ortogonal mencionado a 45° (ver figura 3), esto con el objeto de permitir que la radiación solar incida directamente en las ventanas durante las mañanas, y lograr así un calentamiento solar pasivo durante los meses de invierno.

El mismo desplazamiento de los muros evita la radiación solar en los horarios de la tarde, cuando ya no se requiere de calentamiento. Las ventanas del lado oriente del edificio permiten la radiación solar en los meses de invierno y verano por las mañanas. La entrada de aire en el interior del edificio es norte-sur y viceversa logrando una ventilación cruzada, que permite mantener el espacio ventilado (Sol, 2006).

En la figura 4 se muestra el corte A – A', en dicha figura es posible apreciar la cimentación de la edificación, el nivel de piso terminado, así como la altura que la cubierta y la pendiente de la misma. También se muestra la posible altura de las ventanas y la altura de los pretilos, igualmente se puede ver el acomodo de los muebles.

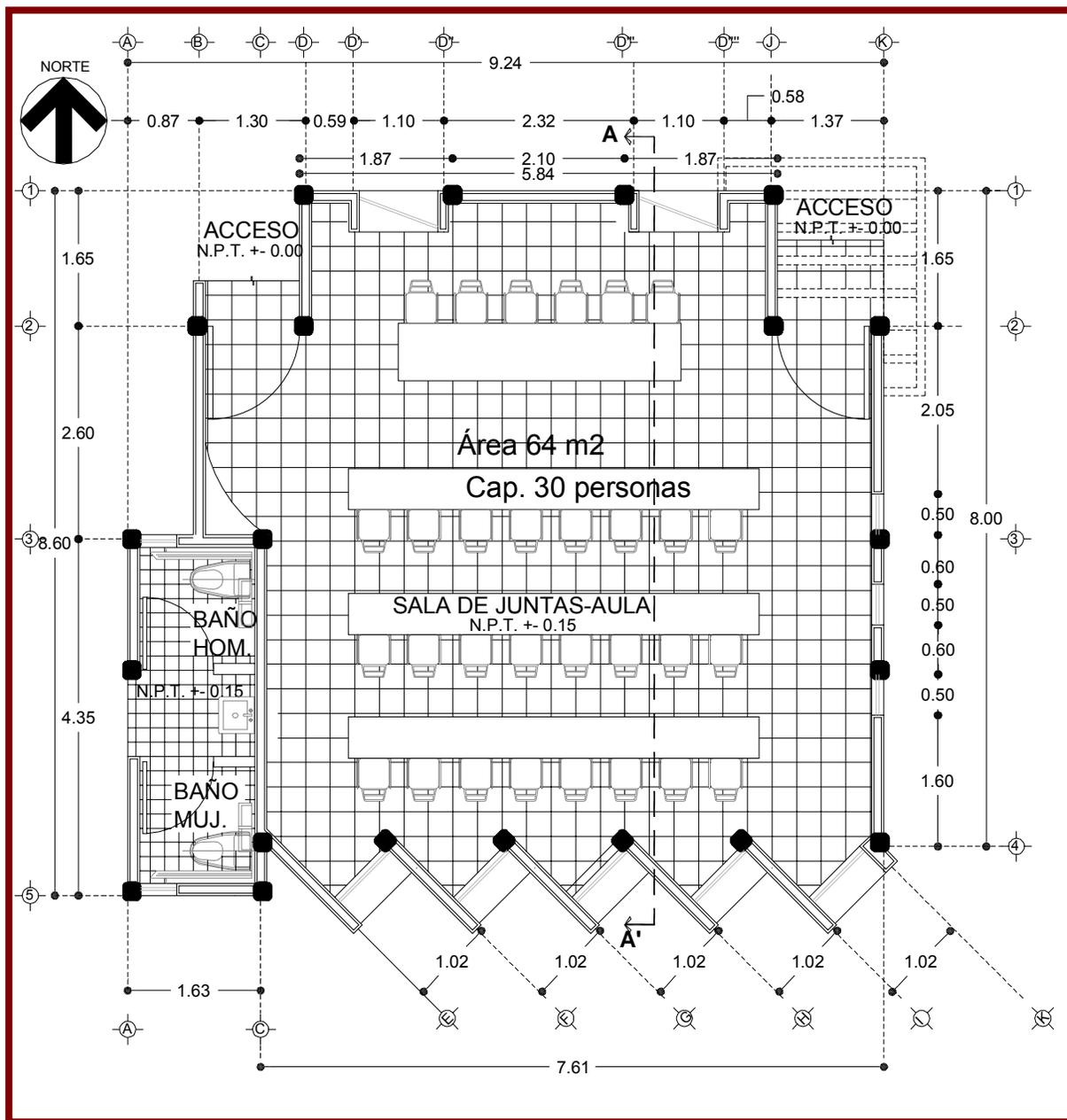


Figura 3. Planta arquitectónica de la sala de juntas-aula.

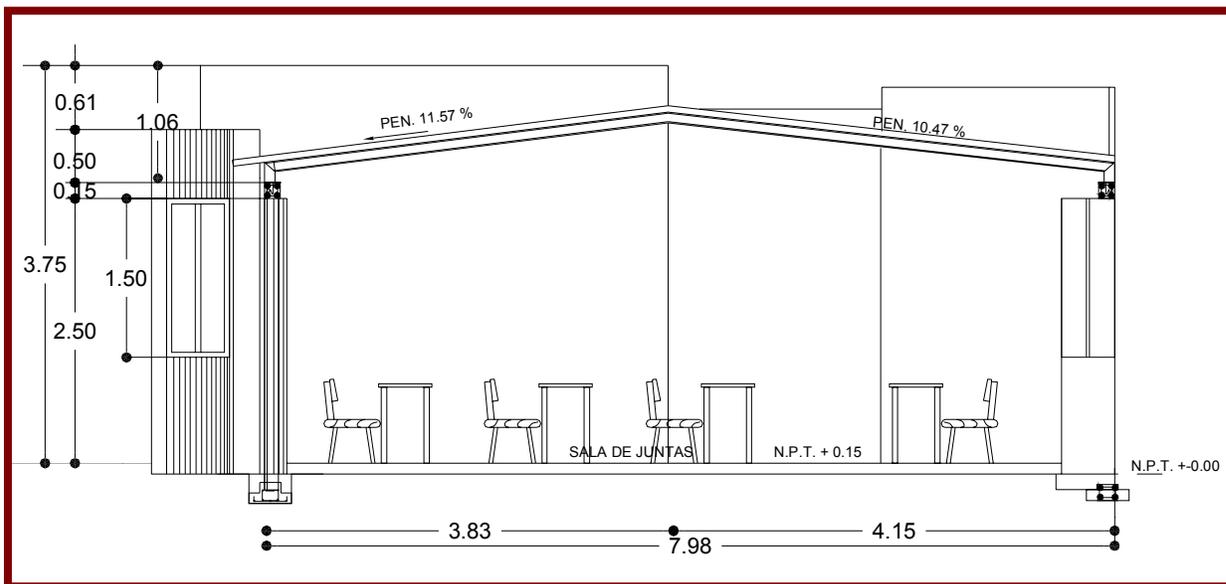


Figura 4. Corte longitudinal A –A'

En la figura 5, se muestra la fachada principal de edificio (fachada norte) en donde se ve el juego de volúmenes que se logra con las diferentes alturas de los pretilos. En dicha figura, también se puede apreciar la entrada principal al recinto educativo que se ve jerarquizada con la construcción de una pérgola; dicha pérgola, además de jerarquizar la puerta principal, tiene la función de evitar la incidencia solar sobre los cristales de la puerta en los meses de verano.

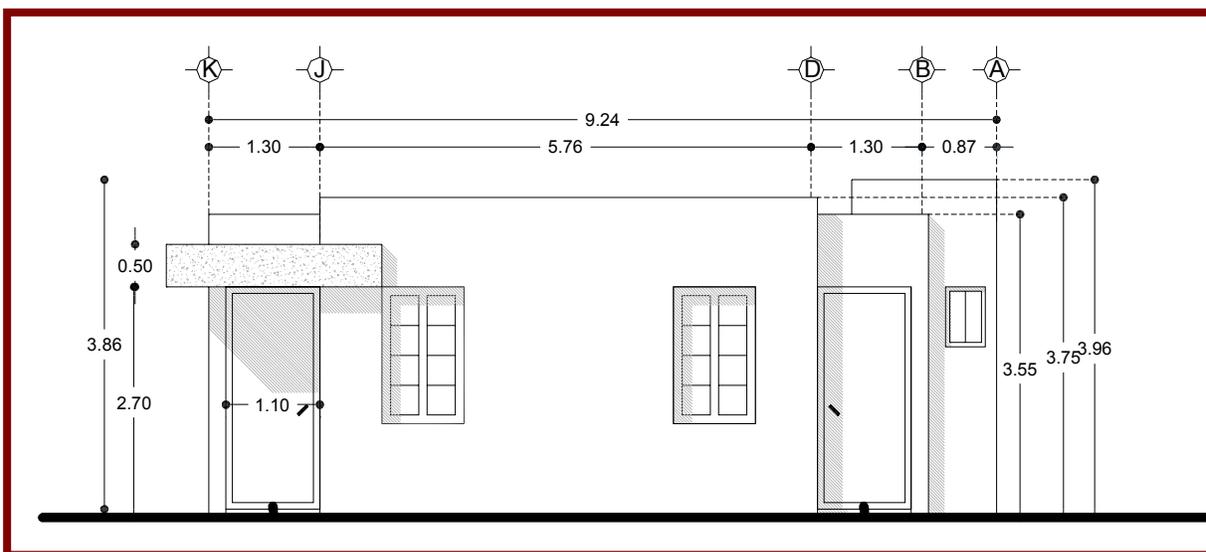


Figura 5. Fachada principal (Norte)

En este apartado de diseño del proyecto, se realizaron dibujos en tercera dimensión del edificio para tener una concepción más clara de él. La figura 6 muestra la vista en perspectiva del lado noreste del recinto educativo. Al igual que en la fachada principal, en esta perspectiva se aprecia el acceso principal al edificio, las ventanas en los lados Norte y Este, además del diseño exterior de edificio. La figura 7 es una vista en perspectiva del lado Sureste, a través de esta imagen, se puede ver la inclinación los muros con respecto al eje ortogonal que tiene la planta arquitectónica.



Figura 6. Apunte Perspectiva vista Noreste.



Figura 7. Apunte Perspectiva vista Sureste.

4.2. Proyecto de ingeniería

En este apartado, se aborda el diseño y la descripción del sistema constructivo propuesto, el diseño de mezclas para la fabricación de elementos prefabricados para muros de ferrocemento y la revisión estructural del proyecto.

4.2.1. Diseño del sistema constructivo

Se propone un sistema constructivo híbrido, al cual se le ha denominado *Ferro-prefab*, que está formado a base de muros prefabricados de ferrocemento y estructura de acero como elementos de confinamiento para dichos muros. Este sistema constructivo emplea para la cubierta, ferrocemento fabricado y colocado en sitio, que es soportado por una estructura metálica y reforzada con malla electrosoldada. La esencia de este sistema radica en la fabricación de elementos prefabricados de ferrocemento para muros con un espesor de 2.5 cm. No se utiliza la cubierta prefabricada en este sistema constructivo, debido a que la zona en estudio es altamente sísmica y el análisis estructural de las edificaciones requiere de conocimientos específicos y complejos lo cual no es el objetivo de esta tesis. Además, el procedimiento constructivo es otro de los inconvenientes, debido a que no se cuenta con maquinaria ni equipo adecuado para el izar de las piezas.

Otro aspecto importante de este sistema constructivo es la implementación de un material aislante para el mejoramiento térmico tanto para muros como para cubiertas, lo cual lo hace diferente al sistema utilizado por Olvera (1994). La colocación del material aislante se hace en sitio, creando muros y cubiertas en forma de “sandwich”. La apariencia que adquieren los muros una vez terminados es similar a la de los muros de un sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado.

El uso de elementos de poco espesor en este sistema constructivo es primordial, pues no se requiere de maquinaria especializada para el montaje de muros; además, permite reducir el peso propio de la edificación y en consecuencia se disminuye la fuerza lateral causada por sismo.

4.2.1.1 Modulación de planta arquitectónica

Según Mathews (1994), para un sistema de construcción con ferrocemento prefabricado, la modulación de la planta arquitectónica juega un papel muy importante, y su principal objetivo es proveer una solución coherente y práctica para la coordinación de la posición y dimensiones de los elementos, aspecto que se cuidó al diseñar el proyecto arquitectónico (ver figura 8).

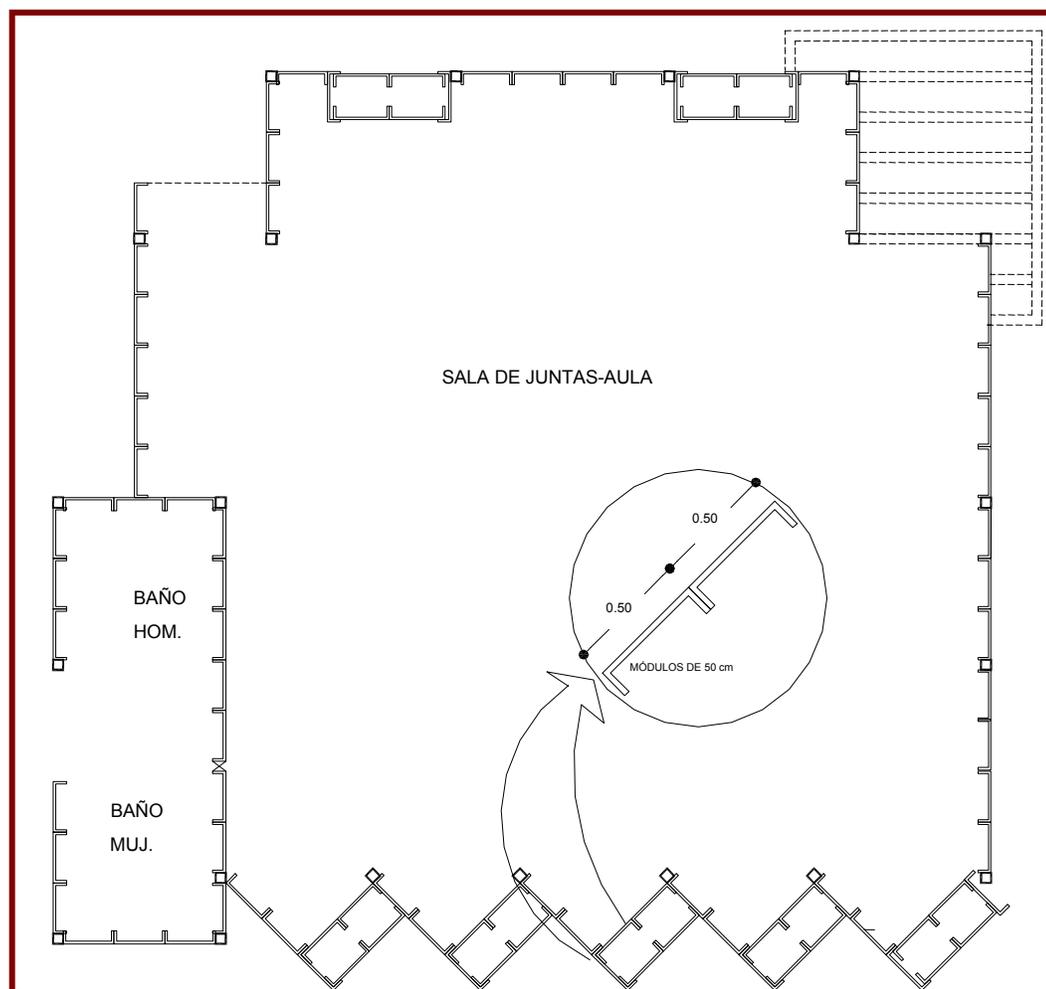


Figura 8. Planta arquitectónica modularizada.

4.2.1.2 Diseño de elementos muro y construcción de cimbra

Los elementos muros (con una modulación de 50 cm) utilizados en este sistema de construcción son similares, a los planteados por Olvera (1994). Se seleccionó éste

módulo, pues permite tener mayor flexibilidad de dimensionamiento en el diseño arquitectónico, y de esta manera no se estuvo sujeto a formas tan rígidas. Además, puede permite su fácil manejo en obra debido por el poco peso de los elementos los cuales pueden colocarse en sitio sin el uso de maquinaria o equipo especializado (peso aproximado de las 100 kg/pza de 270 cm de altura)

En el sistema constructivo *Ferro-prefab*, se manejan tres alturas de elementos prefabricados para muros. La primera es de 270 cm (T-1), los elementos con estas dimensiones se emplean en la construcción de muros donde no se requiere crear vanos para ventanas (muros de carga). Se elige dicha longitud de muro, considerando principalmente el promedio de altura de las edificaciones en la región. La segunda altura es de 150 cm (T-2) y se utiliza en donde se requiere de un antepecho elevado, como el caso de vanos para baños. Finalmente se tienen los muros de 100 cm (T-3) que son útiles en la creación de vanos para las ventanas (ver figura 9). Durante el proceso de fabricación de los elementos prefabricados para muros, se debe dejar descubierto parte del acero de refuerzo en los extremos de los elementos, esto con el propósito de que sean embebidos tanto a la cadena de desplante como en la cadena de cerramiento.

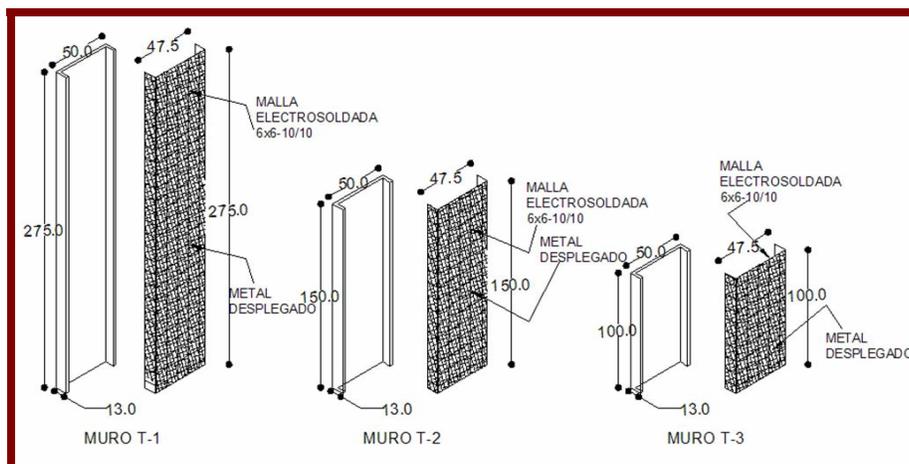


Figura 9. Diferentes alturas de elementos muro empleados en el diseño del proyecto.

La cimbra empleada para la fabricación de los elementos muro está formada por una base metálica en forma de “U” invertida, que sirve para contener el mortero y por montenes de 2” x 6” que sirven para controlar las dimensiones de los elementos. La

base en forma de “U” tiene una longitud de 3 m y los montenes tienen 3.50 m, éstos son más largos, debido a que en sus extremos se sujetan con tornillos para mantenerlos fijos y controlar las dimensiones de los elementos prefabricados. El mortero se deposita en el contenedor formado por los elementos de la cimbra, como se muestra en la figura 10.



Figura 10. Cimbra empleada en la fabricación de elementos muro.

4.2.1.3 Propuesta del proceso constructivo para el sistema *Ferro-prefab*

El proceso constructivo comienza con la ejecución de los trabajos preliminares como son: identificación y ubicación de un banco de nivel, trazo y nivelación del terreno, en seguida, se lleva acabo la excavación de las cepas para la cimentación que en este caso puede ser de 55 cm de ancho y 30 cm de profundidad, de acuerdo con las dimensiones de la cimentación. Después de nivelar y perfilar las cepas se compacta el terreno ya sea con pisón metálico o de madera, esto sirve para evitar futuros asentamientos del edificio (ver figura 11).

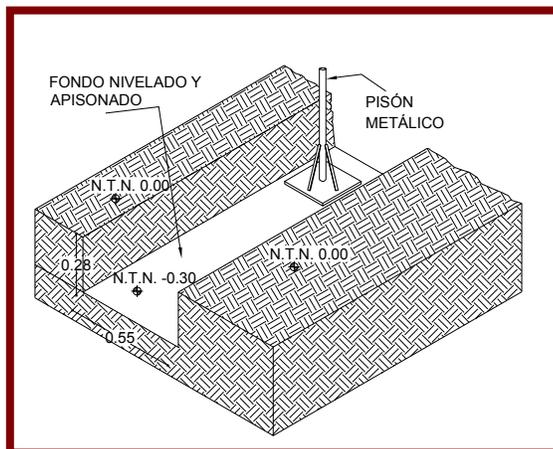


Figura 11. Excavación y compactación de cepa para la base del cimiento

La construcción de la plantilla es la siguiente actividad a efectuar, ésta debe ser de concreto no estructural y debe ser colocada en toda el área perimetral de las cepas. El espesor de la plantilla puede variar de 3 a 5 cm ya que su finalidad es solamente evitar el contacto directo de la estructura con cualquier contaminante de la tierra. En este caso se propone que sea de 3 cm (ver figura 12).

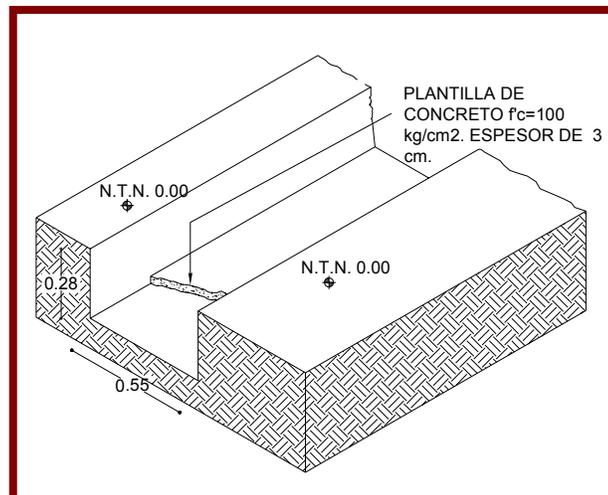


Figura 12. Construcción de la plantilla de concreto.

Después de la ejecución de la plantilla, la siguiente actividad a realizar es la construcción de la cimentación. Se plantea que sea una cimentación superficial de debido al tamaño del edificio propuesto, al poco peso de los materiales empleados para su construcción, además de tomar en cuenta las especificaciones estructurales

que se encuentran en el anexo 1. La propuesta de cimentación es a base de zapata corrida, cuyas dimensiones son de 40 cm de ancho y un peralte de 10 cm, hecha con concreto $f'c= 20$ Mpa. El acero de refuerzo en la cimentación es a base de malla electrosoldada para la zapata corrida, y armex estructural como cadena de desplante (ver figura 13). Antes de colar la zapata corrida, se debe realizar el montaje de los perfiles tubulares rectangulares (PTR) para que éste sea embebido dentro del concreto de la zapata. Los PTR funcionan como los castillos de una construcción tradicional confinando los muros.

Para el colado de la cimentación, se deben habilitar primeramente el acero de refuerzo de la zapata corrida y en seguida el de la cadena de desplante (ver figura 13).

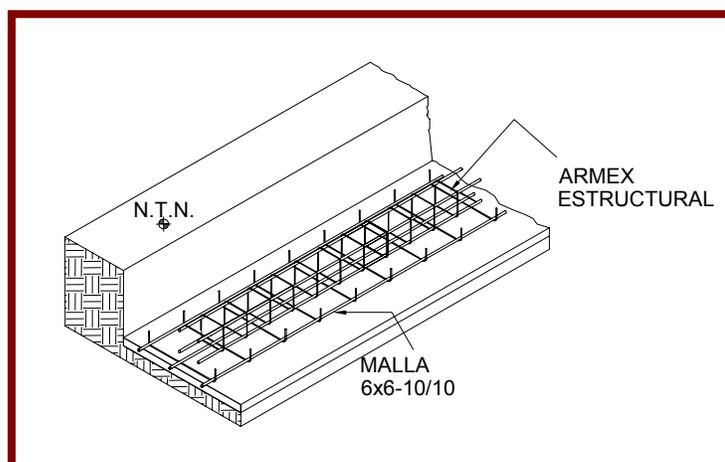


Figura 13. .Habilitado de acero para la cimentación.

Después del habilitado del acero de refuerzo, se deben cimbrar los extremos de la zapata, delimitándola con madera u otra material apropiado para tal finalidad. Durante el proceso de la colocación del concreto en la cimentación, se debe dejar descubierto la parte superior del acero de la cadena de desplante, esto con la finalidad de sujetarlo con el acero de refuerzo de los elementos prefabricados para muros (ver figura 14).

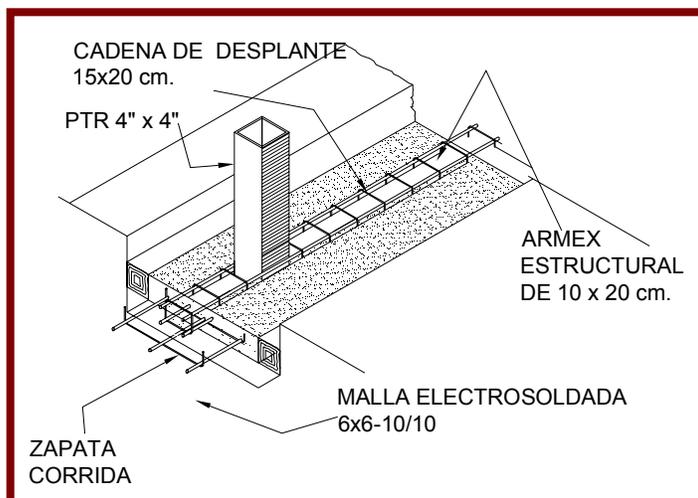


Figura 14. Habilitado de acero, montaje de PTR, cimbrado y colado de zapata corrida.

Una vez construida la zapata corrida, se lleva a cabo el montaje de los elementos prefabricados (ver figura 15a). Como ya se mencionó con anterioridad, estos elementos prefabricados tienen parte de su acero de refuerzo descubierto, el cual se debe sujetar al acero de la cadena de desplante, previamente descubierto. Después de haber realizado el trabajo anterior, los elementos muro son alineados tanto vertical como horizontalmente y en seguida se cuela la base de estos elementos con concreto $f'c = 20$ Mpa y un espesor de 8 cm (ver figura 15b). Durante el montaje de los elementos muro se deben sujetar unos con otros mediante tornillos.

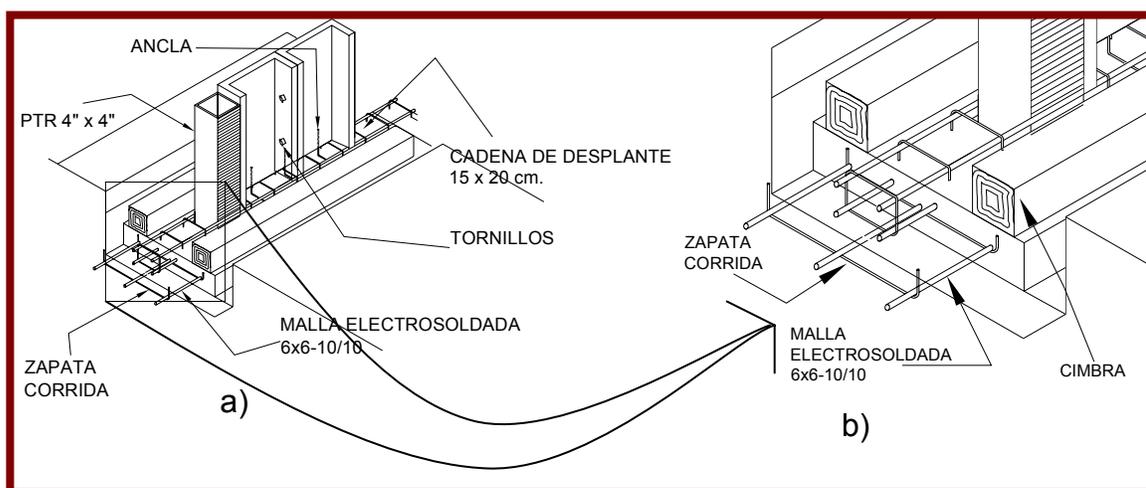


Figura 15. a) Montaje de elementos muro, b) colado de la base de elementos muros.

Para confinar la parte superior de los elementos muros, se debe construir una cadena de cerramiento, esta cadena puede ser habilitada con armex estructural con dimensiones de 10 x 10 cm y colada con concreto con una resistencia a la compresión de 20 Mpa a los 28 días. En la cadena de cerramiento se embeberán varillas con un diámetro de 3/8" para construir el pretil del edificio (ver figura 16). Durante la construcción de la cadena de cerramiento, se colocaran placas de acero como bases para recibir las estructuras metálicas que deben soportar el peso del mortero de la cubierta (ver figura 17 b).

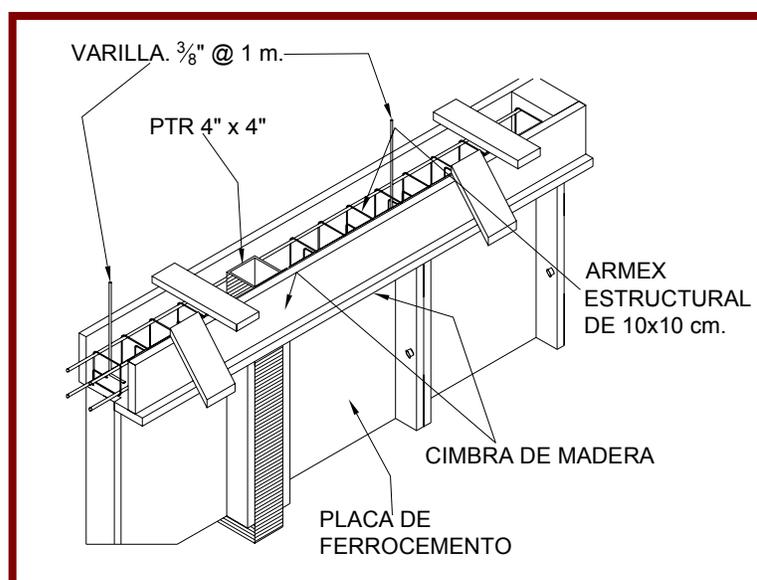


Figura 16. Habilitado de acero y cimbra encadena de cerramiento.

Después de la construcción de la cadena de cerramiento le sigue la construcción de la cubierta de la edificación. La cubierta de este tipo de edificaciones puede ser construida con mortero fabricado en sitio, con un espesor de 5 cm de acuerdo con los cálculos estructurales que se muestran en el anexo 1. Dicho mortero debe ser soportado por estructuras hechas a base de doble viga monten, con una sección de 2" x 4" (ver figura 17 a), dependiendo del claro a cubrir, las dimensiones de dichas vigas pueden aumentar o disminuir. Por otra parte, para mejorar las condiciones térmicas de la cubierta, se propone la utilización de conos de huevo que sirvan como aislantes térmicos, pudiéndose utilizar cualquier tipo de desecho sólido urbano

adecuado para reducir la conductividad térmica de dicha cubierta. La colocación del material aislante se debe llevar a cabo antes del habilitado del acero de refuerzo de la cubierta, esto con la finalidad de que dicho aislante sea útil como parte de la cimbra de la cubierta (ver figura 18).

Para finalizar con la descripción del sistema constructivo propuesto *Ferro-prefab*, solamente hace falta mencionar la ejecución de los pretilos del edificio. Dichos pretilos pueden ser construidos en sitio con el mismo sistema de ferrocemento, o bien ser prefabricados al igual que los elementos muro.

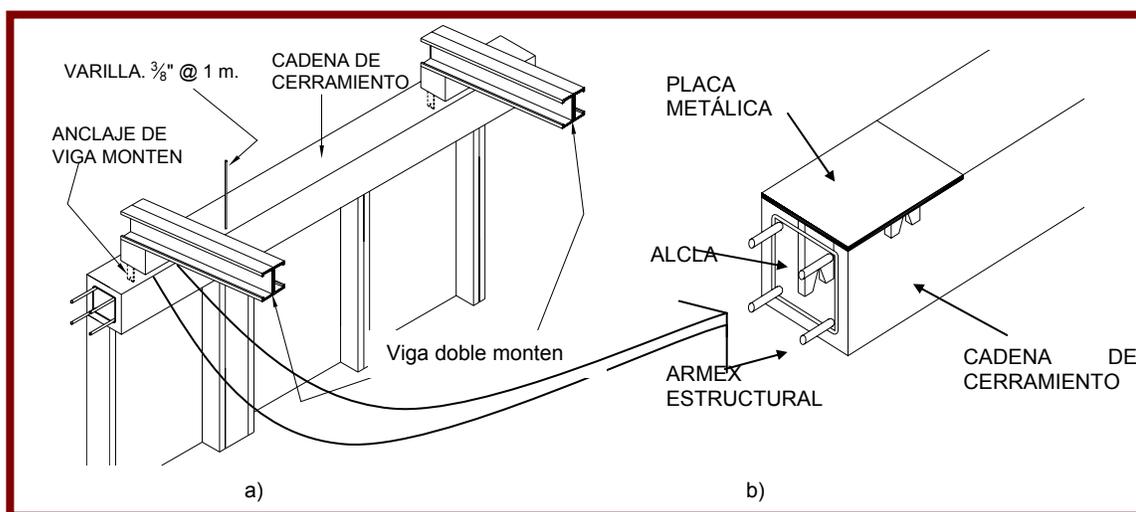


Figura 17. a) Montaje de estructura metálica a base de viga doble monten para recibir la cubierta, b) detalle del anclaje de placa de asiento para recibir estructura de la cubierta.

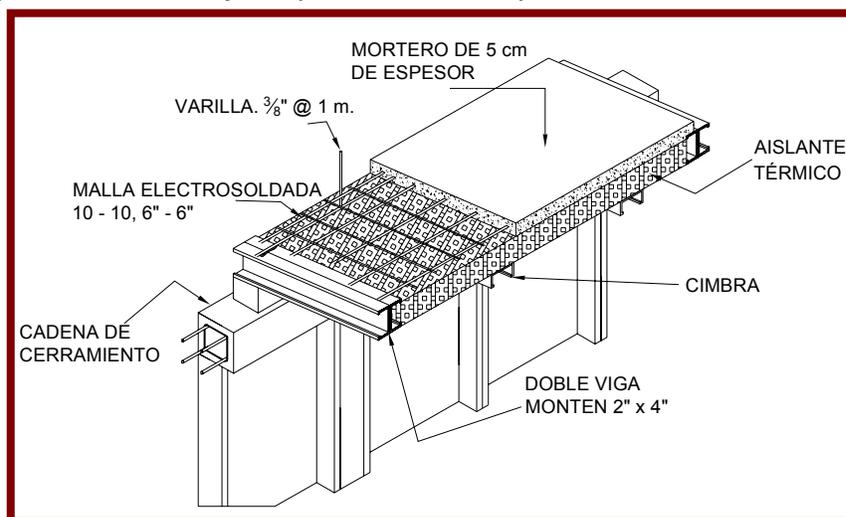


Figura 18. Instalación de aislante térmico, habilitado de acero y colado de la cubierta.

4.2.2 Diseño de mezclas

Al pretender construir piezas prefabricadas con un espesor de 2.5 cm, se requiere de un material con características especiales que permita su fácil colocación dentro la cimbra, evitando la formación de oquedades en la pieza terminada, además de prescindir de maquinaria especializada para compactarlo adecuadamente. Por tal motivo, en este trabajo se pretende la fabricación de morteros auto-compactables a base de cemento y arena, adicionando ceniza volante y aditivo superplastificante de alto rango para obtener un mortero altamente trabajable, dicha mezcla fue previamente diseñada por Cano y col. (2006) y Lopez y col. (2006).

4.2.2.1 Proporcionamiento de mezcla para mortero auto-compactable

En la fabricación del mortero auto-compactable empleado en este trabajo para la construcción de elementos prefabricados para muros, se utilizó 20% de ceniza volante clase F. De acuerdo al Comité ACI 226 (1987), el porcentaje adecuado para la sustitución de ceniza volante por cemento es de 25% a 35% del peso del cemento. Sin embargo, algunos investigadores como Ganesh y col. (1993) y Arif y col. (2001) declaran que el utilizar un 20% de ceniza volante es adecuado, y que se tienen ventaja significativa en la resistencia del mortero mejorando su durabilidad, y por esta razón se decide emplear la cantidad de ceniza volante mencionada. El aditivo superplastificante reductor de agua de alto rango utilizado es de la marca PLC 1040 que está hecho a base de policarboxilatos, de la tercera generación de este tipo de aditivos.

Las cantidades y porcentajes de materiales para fabricar un m³ de mortero auto-compactable se muestran en la tabla 2. La proporción usada de cemento arena es de 1:3 en peso, y la arena utilizada debe ser cribada por la malla No. 4. Después de algunas mezclas de prueba (5 pruebas), se eligió usar una relación agua cemento de 0.55 y 600 ml de superplastificante por cada 100 kg de material cementante.

Tabla 2. *Proporcionamiento de materiales para la fabricación de 1 m³ de mortero auto-compactable.*

Proporcionamiento de materiales para fabricar 1 m ³ de mortero fluido		
Materiales	Peso kg	Volumen
Cemento 80%	392.18	0.127 ton
Ceniza volante 20%	98.04	0.042 ton
arena	1520.47	0.561 m ³
Superplastificante PLC 1040	3.92	
Agua	249.78	270 lt

4.2.2.2 Ensayos en estado fresco del mortero auto-compactable

En este apartado se evaluó principalmente en índice de trabajabilidad del mortero auto-compactable mediante la prueba del cono de Abram's. El grado de segregación y sangrado se evalúan visualmente. La prueba se llevó acabo en 7 mezclas, utilizando el proporcionamiento de la tabla 2.

Para determinar la extensión de flujo y así evaluar la auto-compactabilidad (grado de trabajabilidad) del mortero, se utilizó el ensayo del cono de Abram's. El ensayo de extensión de flujo tiene por objeto, evaluar la facilidad del fluir del concreto o mortero, bajo efecto de su propio peso, sin restricción al flujo.

El instrumento básico para este ensayo, es el cono de Abram's que tiene diámetros inferior y superior de 200 y 100 mm respectivamente, y altura de 300 mm. Se requirió de una base plana de metal (pudiendo ser esta de madera), colocada horizontalmente y un cucharón para verter el mortero en el cono, además de una cinta métrica para medir la extensión diametral del mortero.

Procedimiento

Antes de verter el mortero en el cono, fue necesario humedecer la base sin dejar agua libre. Se humedeció de igual manera el interior del cono y el cucharón.

El procedimiento consistió en colocar de manera firme el cono sobre la placa metálica, (la placa se debe encontrar en posición horizontal) y verter el mortero en él sin ningún tipo de compactación (ver figura 19). Una vez llenado de mortero el cono y nivelado, de inmediato se levantó éste de manera vertical, de forma cuidadosa y continua (en 2 a 3 segundos), permitiendo que el mortero se colapse por gravedad formando casi un círculo, el siguiente paso fue determinar la extensibilidad del mortero con una cinta métrica (ver figura 20). Los resultados se muestran en la segunda columna de la tabla 3.



Figura 19. Procedimiento para verter el mortero en cono de Abram's



Figura 20. Determinación de extensibilidad de flujo del mortero fluido

Un signo de segregación de la mezcla de mortero se puede apreciar cuando los agregados (arena) se acumulan en el centro de la circunferencia de la muestra

durante la prueba, o bien cuando existe irregularidad en la distribución de éstos. En las 7 mezclas realizadas no se encontró signos de segregación.

4.2.2.3 Ensayos en estado endurecido para determinar la resistencia a la compresión del mortero auto-compactable

En estado endurecido, se evaluó la resistencia a la compresión de los morteros de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-C-061-1976 a los 28 y 56 días; para ello, se realizaron 7 mezclas utilizando el proporcionamiento de mezclas de la tabla 2, se fabricaron 6 cubos de 5 x 5 cm para cada mezcla. Se utilizaron tres cubos para ser ensayados a los 28 días, los tres restantes para ser ensayados a los 56 días. Todas estas muestras tuvieron un curado en hidróxido de calcio (agua de cal) en un periodo de tres días, con el propósito de que no pierdan calcio por el efecto de lixiviación. El tiempo de curado obedece a que las piezas que se fabricaron con este tipo de mortero tuvieron consideraciones similares.

El proceso de llenado de los cubos ya mencionados, fue verter el mortero en ellos sin compactarlo, solo se dieron ligeros golpes para liberar el aire atrapado, una vez colocado el mortero en los moldes, éstos se cubrieron con plástico para evitar la pérdida de humedad. Después de 24 horas de haberse realizado el colado, se desmoldaron las muestras para iniciar su proceso de curado. Después del curado, las muestras fueron colocadas a la sombra hasta los 28 y 56 días programados para su ensayo a compresión. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

La tabla 3 muestra en su segunda columna las dimensiones de extensibilidad de las mezclas de mortero auto-compactable, las dos siguientes columnas, muestran la resistencia a la compresión a los 28 y 56 días respectivamente.

Tabla 3. Extensibilidad y resistencia a la compresión de morteros a los 28 y 56 días.

Extensibilidad y resistencia a la compresión de morteros.			
No. de mezcla	Extensión de la muestra en cm	Resistencia a la compresión a los 28 días en Mpa	Resistencia a la compresión a los 56 días en Mpa
1*	41	39.39	42.85
2	63	33.39	34.33
3	65	33.98	35.34
4	69	35.95	40.67
5	66	34.43	34.83
6	68	30.86	41.20
7	68	34.90	35.51
		Promedio = 34.51Mpa	Promedio.= 37.29Mpa

* Primer mezcla realizada

4.2.3 Revisión estructural por sismo

En el estado de Oaxaca, construir edificaciones sismorresistentes reviste importancia significativa, debido a la continuidad de los sismos registrados en la región. De acuerdo a la Comisión Federal de Electricidad (1993), el territorio ocupado por la república mexicana se divide en 4 zonas sísmicas, de las cuales, el territorio oaxaqueño está ocupado prácticamente por dos de ellas, la zona sísmica C y D (SEDUCOP, 1998).

Para llevar acabo el análisis sísmico de edificios se pueden utilizar tres métodos: el método simplificado, método de análisis estático y el método de análisis dinámico. Para este caso, se utilizó el método simplificado, ya que el edificio en estudio cumple con los requisitos para la aplicación de dicho método, requisitos dados por las Normas Técnicas complementarias del D. F. en su sección de análisis sísmico (Gaceta Oficial del D. F., 2004).

4.2.3.1 Análisis de carga del edificio

Para desarrollar la revisión estructural del edificio en estudio, se analizó primeramente el peso propio de la cubierta y de los muros, dichos datos son útiles durante la aplicación del método de análisis sísmico.

Peso de la cubierta

En la realización del análisis del peso de la cubierta, se utilizaron los pesos los materiales de la propuesta constructiva *Ferro-prefab* descrita en el apartado 4.2.1.3 de este trabajo. Una sección transversal de la cubierta propuesta se muestra en la figura 21.

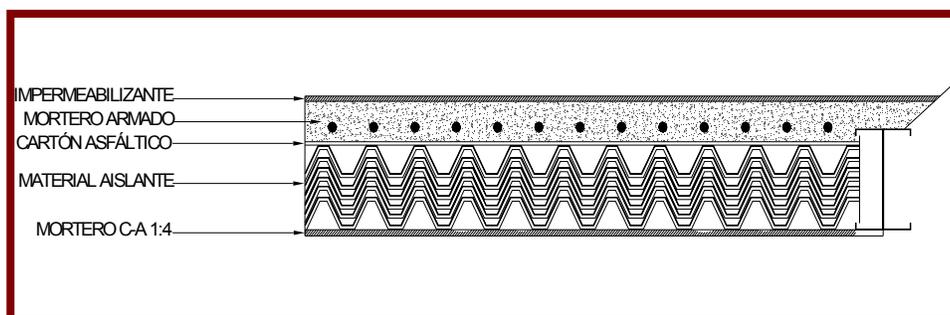


Figura 21. Materiales empleados en la construcción de la cubierta del edificio en estudio

En la tabla 4 se muestra el peso calculado de la carga muerta por metro cuadrado de la cubierta, así como el peso de la carga viva y el factor de seguridad de acuerdo al Reglamento de Construcción vigente para el Estado de Oaxaca (SEDUCOP, 1998).

Tabla 4. Peso por metro cuadrado de la cubierta.

Impermeabilizante	0.48 kg/m ²
Mortero armado de 5 cm de peralte.	120.00 kg/m ²
Material aislante	4.87 kg/m ²
Cartón asfáltico	0.30 kg/m ²
Viga Montén Cal. 14	7.70 kg/m ²
Carga adicional	20.00 kg/m ²
Carga muerta	138.48 kg/m²
Carga instantánea	20.00 kg/m ²
carga debida a granizo	30.00 kg/m ²
Carga viva	20.00 kg/m ²
Total de cargas	208.48 kg/m²
Factor de seguridad	1.4 kg/m ²
Total de cargas	305.87 kg/m²

Peso de los muros

De igual forma que en el análisis del peso de la cubierta, en el cálculo del peso de los muros se considera el peso de los materiales de la propuesta constructiva *Ferroprefab*. En la tabla 5 se muestra el cálculo del peso de un metro cuadrado de muro.

Considerando que se tienen 99 m² de muros multiplicado por 113.40 kg/m², tomado de la tabla 5 se obtiene lo siguiente:

$$\text{Peso total de muros} = (99.00 \times 113.40) = \mathbf{11226.6 \text{ kg.}}$$

Por otra parte, se tienen 26 m² de pretilas, el peso de dichos pretilas hechos con ferrocemento de 4 cm espesor, se puede aproximar de la siguiente manera:

$$\text{Total de pretilas} = (0.04 \times 26.00 \times 2400) = \mathbf{2496.00 \text{ kg.}}$$

Tabla 5. Peso por metro cuadrado de muros.

Muro de ferrocemento de 2.5 cm de espesor	60.00 kg/m ²
Material aislante	2.21 kg/m ²
Aplanado de mortero	51.19 kg/m ²
Total	113.40 kg/m²

4.2.3.2 Aplicación de método simplificado para revisión por sismo

Datos generales:

Se realiza el análisis sísmico con el método simplificado en una construcción de un nivel, cuya planta se presenta en forma esquemática en la figura 22. La cubierta de éste edificio se supone está hecho de mortero armado y soportado por medio de estructuras metálicas (doble viga monten). Los muros son de paneles de ferrocemento de 2.5 cm de espesor, confinados con estructuras metálicas (PTR). La ubicación de la obra corresponde a la zona sísmica “**C**” de la república mexicana de acuerdo con el Reglamento de Construcción vigente en Oaxaca (SEDUCOP, 1998) y a un suelo **tipo III**. Se considera que es un suelo tipo III, debido a que la zona en estudio, con anterioridad era ocupada para la agricultura, seguramente por su alto contenido de arcillas altamente compresibles y limos, lo que ocasiona que se tengan

muy bajas resistencias. La altura máxima bajo losa es de 3.10 m y el área total de la cubierta es de 72.00 m².

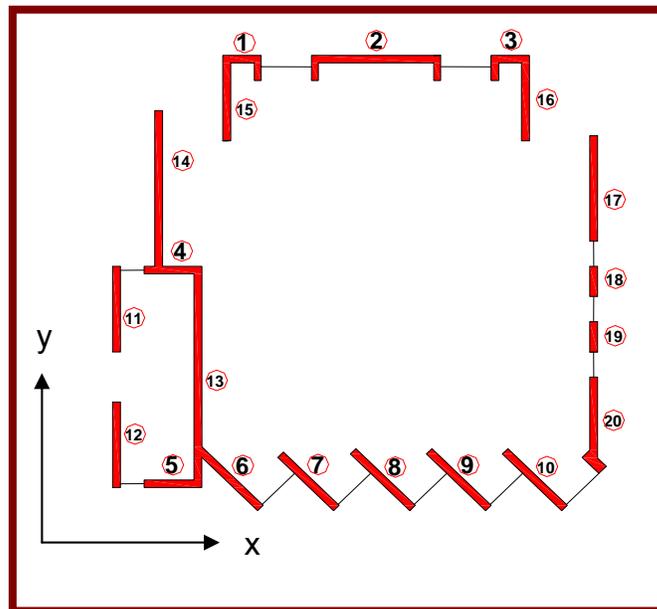


Figura 22. Planta esquemática del edificio en estudio.

Los requerimientos para la aplicación del método simplificado para revisión por sismo se cumplen, ya que las cargas verticales están soportadas en más del 75% por muros, la altura total del edificio es menor de 13 m, la relación de ésta con el lado menor no excede de 1.5; y la relación longitud a ancho de la planta no excede 2.

Al aplicar el método simplificado, se hará caso omiso de los desplazamientos horizontales, torsiones y momentos de volteo. Se verifica únicamente que la suma de las resistencias al corte de los muros de carga, proyectados en la dirección en que se considera la aceleración, sea cuando menos igual a la fuerza cortante total que obre en ellos.

Desarrollo de la revisión

Con base en el tipo de terreno, la zona sísmica en la que se emplaza el edificio y el tipo de muros (ferrocemento), se seleccionó el coeficiente sísmico. Según el

Reglamento de Construcción y Seguridad Estructural para el Estado, para un terreno tipo III en la zona sísmica C el coeficiente sísmico es:

$$C_s = 0.64.$$

Sin embargo, este factor es muy general, por lo cual en el análisis hecho en este trabajo se tomó el coeficiente sísmico propuesto por la Comisión Federal de Electricidad (1993). Este coeficiente sísmico considera ya la altura del edificio y la ordenada espectral reducida por ductilidad. Por lo tanto, el coeficiente sísmico es de:

$$C_s = 0.32.$$

Para determinar la fuerza cortante debida por sismo en los muros de la estructura se necesitan las cargas por m² analizadas previamente.

Carga por m² de cubierta multiplicada por los metros cuadrados de construcción:

$$(305.87 \times 72 \text{ m}^2) = 22022.78 = \mathbf{22.02 \text{ ton}},$$

carga de pretilas más la carga de cubierta:

$$(2496 + 22022.78) = 24518.78 = \mathbf{24.51 \text{ ton}},$$

peso total de cubierta más muros.

$$\text{Azotea} + \text{muros} = 24.51 + 5.61 = \mathbf{30.13 \text{ ton}}.$$

El análisis sísmico por este método requiere que al nivel de la cubierta debe asignarse la mitad del peso de los muros, es decir 5.61 ton, porque se considera que la otra mitad no produce fuerzas de inercia en la estructura.

Como se mencionó con anterioridad para un terreno tipo III y una zona sísmica C el coeficiente sísmico es de:

$$C = 0.32,$$

el cortante en la base en ambas direcciones se calcula con la siguiente expresión

$$V_x = V_y = 0.32 \times 30.13 = \mathbf{9.64 \text{ ton}}.$$

Según el método simplificado, esta fuerza se distribuye entre los muros ocasionando un esfuerzo cortante promedio de:

$$v = \frac{V}{(\sum t F_i L_i)}, \quad (\text{Ec. 2})$$

donde t es el espesor del muro (2.5 cm), L_i es la longitud de los muros alineados en la dirección en estudio, y F_i es un factor reductivo que vale:

$$F_i = (1.33 \frac{L}{h})^2 \leq 1, \quad (\text{Ec. 3})$$

donde L es la longitud del muro y h la altura.

Se aplica esta fórmula cuando la relación L/h es menor a 1.33, esto se debe a que los muros de muy poca longitud resultan poco rígidos y contribuyen en menor medida a la resistencia sísmica.

Si se observa la planta arquitectónica esquemática (figura 22), ésta indica que la dirección en "x" es más crítica que en "y"; la longitud de muros en "x" es de 14.11 m y en "y" de 19.25 m.

En las tablas 6 y 7, se aplica del factor de reducción para los muros cuya relación L/h es menor de 1.33, tanto en el sentido "x" como en el "y" respectivamente.

Tabla 6. Aplicación del factor de reducción de resistencia para muros cortos en el sentido "x"

No. Muro en X	Longitud	altura	$F_i = (1.33 \times L/h)^2 \leq 1$	
1	0.73	2.70	0.13	9.44
2	2.45	2.70	1.46	356.84
3	0.73	2.70	0.13	9.44
4	1.10	2.70	0.29	32.30
5	1.10	2.70	0.29	32.30
6	1.60	2.70	0.62	99.39
7	1.60	2.70	0.62	99.39
8	1.60	2.70	0.62	99.39
9	1.60	2.70	0.62	99.39
10	1.60	2.70	0.62	99.39
			$\Sigma F_i L_i$	937.25

Tabla 7. Aplicación del factor de reducción de resistencia para muros cortos en el sentido "y"

No. Muro en Y	Longitud		$F_i = (1.33 \times L/h)^2 \leq 1$	
11	1.70	2.70	0.70	119.21
12	1.70	2.70	0.70	119.21
13	4.40	2.70	4.70	2066.97
14	3.25	2.70	2.56	832.96
15	1.70	2.70	0.70	119.21
16	1.70	2.70	0.70	119.21
17	2.10	2.70	1.07	224.72
18	0.50	2.70	0.06	3.03
19	0.60	2.70	0.09	5.24
20	1.60	2.70	0.62	99.39
				3709.16

Por lo tanto se tiene en el sentido “x”:

$$\Sigma t F_i L_i = 2343.13 \text{ m}^2,$$

en el sentido “y” es:

$$\Sigma t F_i L_i = 9272.90 \text{ m}^2.$$

Determinación de esfuerzo cortante que actúa en los muros del sentido “x”

$$v = \frac{v}{(\Sigma t F_i L_i)}, \quad (\text{Ec. 2})$$

$$v = 9640/2342.23 = 4.11 \text{ kg/cm}^2.$$

Determinación de esfuerzo cortante que actúa en los muros del sentido “y”

$$v = \frac{v}{(\Sigma t F_i L_i)}, \quad (\text{Ec. 2})$$

$$v = 9640/9272.90 = 1.04 \text{ kg/cm}^2.$$

Para determinar si los muros pueden resistir la fuerza cortante que actúa en ellos, se deberá comparar el esfuerzo cortante obtenido anteriormente con la resistencia a la compresión diagonal del material empleado para los muros.

De acuerdo a lo que establece Tena y Miranda (2002) el esfuerzo cortante resistente de un muro hecho de mampostería, cuando la falla es por tensión diagonal, ésta es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión de sus piezas. Por lo tanto el esfuerzo cortante se puede aproximar bajo la siguiente expresión.

$$V_m = \sqrt{f_m} \quad (\text{Ec. 4})$$

Esto sugiere, que un material que tiene una resistencia a la compresión de $f_p = 372 \text{ kg/cm}^2$ como en el caso de estudio, su resistencia a la compresión (f_m) como muro sería aproximadamente de:

$$f_m = (372 \times 0.6) = 223.2 \text{ kg/cm}^2,$$

donde:

f_m = Resistencia a la compresión del muro. $f_m = 0.45 * p_f$ para piezas de barro y $f_m = 0.60 * p_f$ para piezas de concreto.

f_p = Resistencia a la compresión de la pieza en estudio,

y su resistencia a esfuerzo cortante sería aproximadamente de:

$$V_m = \sqrt{223.2} = 14.93 \text{ kg/cm}^2.$$

Los resultados de la revisión estructural por el método simplificado indican que hay una fuerza cortante causada por sismo en los muros en el sentido “x” de 4.11 kg/ m^2 , para los muros en el sentido “y” de 1.04 kg/ m^2 . Comparándolo con el esfuerzo cortante resistente aproximado para un material hecho a base de ferrocemento que es de 14.93 kg/ m^2 , se puede decir que la estructura es capaz de soportar efectos causados por sismos.

4.3 Discusión de resultados

Se diseñó un sistema constructivo modular para muros con placas de ferrocemento prefabricado y perfiles de acero. Para la cubierta se propuso un sistema de techumbre de mortero armado hecho en sitio y soportado por perfiles metálicos (viga doble monten). Este sistema constructivo fue aplicado en la elaboración de un proyecto arquitectónico de una sala de juntas-aula para el CIIDIR, IPN, Unidad Oaxaca. En el proyecto arquitectónico cobraron importancia dos factores. El primero fue la modulación de la planta arquitectónica que permitió darle una solución práctica y coherente a la posición y dimensiones de los muros en el diseño arquitectónico, que de acuerdo con Mathews (1994), es el objetivo principal al diseñar un sistema constructivo modular. El segundo factor fue la incorporación de la tendencia actual de diseño bioclimático, cuya forma de diseño hace posible el aprovechamiento directo de la energía solar en la calefacción de los espacios interiores, además de permitir la ventilación de forma natural. La arquitectura bioclimática cobró gran importancia desde la crisis ecológica de los años ochenta, obligando a un enfoque más amplio, viendo la arquitectura no sólo como una vía para la eficiencia y ahorro energético, sino como una importante forma de contribuir a la preservación del medio ambiente, además del bienestar humano (Fernández y Carella, 2005).

En cuanto a la forma del edificio tanto en planta como en alzado, y al utilizar formas regulares y ortogonales, se logró una apariencia similar a los edificios construidos bajo el sistema constructivo tradicional. Esto puede favorecer y ser aprovechado de manera positiva e influir en la idiosincrasia de las personas, de tal forma, que puedan aceptar nuevos sistemas constructivos, pues de acuerdo a Salamanca (1997) y

Martínez (1998), el aspecto ideológico ha sido uno de los problemas por los cuales la construcción prefabricada en México, no ha sido desarrollada de manera masiva como en los países europeos y Estados Unidos. Sin embargo, el estudio de este aspecto es motivo de otra tesis.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de 7 mezclas realizadas para determinar la extensibilidad del mortero auto-compactable utilizado. En esta tabla se aprecia que 6 de las mezclas presentan una extensibilidad alrededor de 63 a 68 cm de diámetro, las cuales están dentro de rango de trabajabilidad o extensibilidad de 60 a 80 cm establecidas para morteros y concretos auto-compactables mencionados por Hayakawa y col. (1993), Taniguchi y col. (1994) y Gomes y col. (2002). La mezcla que varió en cuanto a su extensibilidad y que no alcanzó el rango establecido por los autores ya mencionados, pudo deberse a la temperatura ambiente bajo el cual se fabricó, ó a un error humano debido a que fue la primera mezcla realizada, o bien a la variación en la granulometría de la arena utilizada. Sin embargo se puede apreciar que ésta mezcla, es la que mayor resistencia a la compresión alcanza a los 56 días. Durante la elaboración de las pruebas no se observó segregación ni sangrado en las mezclas, esto quiere decir que el contenido de finos fue suficiente para mantener la cohesividad entre el agregado y el material cementante.

De acuerdo a la Tabla 3, el promedio de la resistencia a la compresión de los morteros ensayados a los 28 días fue de 31.51 Mpa, y para aquellos que se ensayaron a los 56 días fue de 37.2 Mpa, resistencia que es apropiada para su aplicación en edificaciones de zonas sísmicas. Los resultados obtenidos en este trabajo son similares a aquellos obtenidos por Gutiérrez y col. (2005), aunque estos autores utilizaron 15% de ceniza volante para remplazar al cemento obtuvieron resistencias a los 28 días de 33 Mpa y a los 56 días de 37 Mpa. Otros investigadores como Sahmaran y col. (2006), utilizaron el mismo contenido de ceniza volante que en el caso anterior y muestran resultados de resistencia a la compresión en morteros auto-compactables de 51.5 Mpa y 59.4 Mpa a los 28 y 56 días respectivamente. Estos resultados varían respecto a los obtenidos en este trabajo; sin embargo, se

puede explicar ya que las muestras hechas por Sahmaran tuvieron una relación agua-materiales cementantes de 0.4 y la relación utilizada en el presente trabajo fue de 0.55. Otra razón por la cual Sahmaran haya alcanzado resistencias mayores en sus morteros pudo ser el tiempo de curado de 28 días a los que fueron sometidos, en cambio en este trabajo los especímenes solamente tuvieron un tiempo de curado de 3 días.

En el análisis de cargas realizado para la revisión estructural por sismo mostrado en la tabla 4, el peso por metro cuadrado de la cubierta fue de 305.87 kg/m^2 , mientras que para las cubiertas del sistema tradicional de construcción, el peso de la cubierta puede ser hasta de 600 kg/m^2 (Gallo y col. 2005), esto indica que existe una disminución en el peso del 50% con la cubierta propuesta. Por otro lado, el peso de los muros hechos con ferrocemento asilados térmicamente con conos de huevo fue de 113.40 kg/m^2 y para los muros de ladrillo es de 225 kg/m^2 ; esto quiere decir, que hay una reducción en el peso de aproximadamente 50% con los muros del sistema *Ferro-preb*. Lo anterior tiene relación con un estudio realizado por Mathews y col. (1994), en donde los investigadores indican que una de las ventajas al utilizar el ferrocemento en las construcciones es su bajo peso, el cual puede ser hasta un 60 a un 80% más ligero que el peso de las construcciones realizadas bajo el sistema de construcción tradicional.

El bajo peso en las edificaciones construidas en lugares con un alto riesgo sísmico como lo es la zona de estudio, cobra relevancia significativa ya que la fuerza cortante causada por los sismos está en función del peso de los edificios, a menor peso la fuerza cortante también se reduce causando menos efectos al edificio. Independientemente del peso de las estructuras a base de ferrocemento, otra de las cualidades de este material que favorecen para resistir el efecto causado por sismos es su alta resistencia a la compresión dado principalmente por la matriz de cemento arena y la relación agua-cemento utilizada en su fabricación.

**CAPÍTULO 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL
PARA LA DETERMINACIÓN DE LA
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA**

5.1 Selección de material aislante y diseño de componentes multicompuestos.

La vida moderna ha dado muchos beneficios a la sociedad actual, a su vez, la ha convertido en una sociedad llena de desperdicios, se genera tanta basura diaria para satisfacer las necesidades humanas, que la naturaleza con toda su capacidad de degradación, no ha podido minimizar la enorme cantidad de desperdicios que día a día se arroja al medio ambiente. Todo tipo de objeto que parece no ser útil, automáticamente lo que se hace es desecharlo y mezclarlo con otros de distinta especie, sin pensar en el costo ambiental y socioeconómico que esto representa. En muchas ocasiones, aunque el objeto desechado no es basura se convierte en ella al deshacerse de él en forma inadecuada; sin embargo, si en lugar de excluirlo y mezclarlo con otros materiales que pueden ser dañinos o contaminantes, se pensara sobre su destino final y se hiciera una selección adecuada de los productos que se pueden aprovechar de nuevo, se transformaría la basura en materiales reutilizables.

Debido a lo anterior, y con el afán de reutilizar desperdicios para ser utilizados como aislantes térmicos, se seleccionaron contenedores de huevo, llamados comúnmente conos de huevo o casilleros de huevo. Se selecciona este material ya que es considerado un desecho sólido urbano, que para muchos no tiene valor, además hay en abundancia y es de costo bajo.

Posteriormente, se definieron las dimensiones de los componentes multicompuestos (CM), estas dimensiones estuvieron regidas por las del conductivímetro empleado para la experimentación. Se diseñaron los CM para simular condiciones de operación de muros y cubiertas, los CM están constituidos por una placa de ferrocemento que representa la parte exterior de la construcción y la que recibe directamente la radiación solar, en la parte intermedia o núcleo, se colocaron los casilleros de huevo que sirvieron como aislante térmico, y finalmente un aplanado de mortero hidráulico (ver figura 23).

El utilizar materiales aislantes en las construcciones actuales tiene gran importancia, y esto principalmente para compensar facultades perdidas en los materiales al emplear nuevas técnicas de construcción. Debido a que en las técnicas de construcción actuales se ha perdido la función que tenían los materiales antiguos, que por sus dimensiones, la inercia térmica era aprovechada para el confort térmico. Por otro lado, en los últimos años se ha tomado una mayor conciencia en la necesidad de ahorrar energía y de proporcionar confort a las edificaciones, lo que ha generado una demanda del conocimiento de datos de materiales propios de cada región.

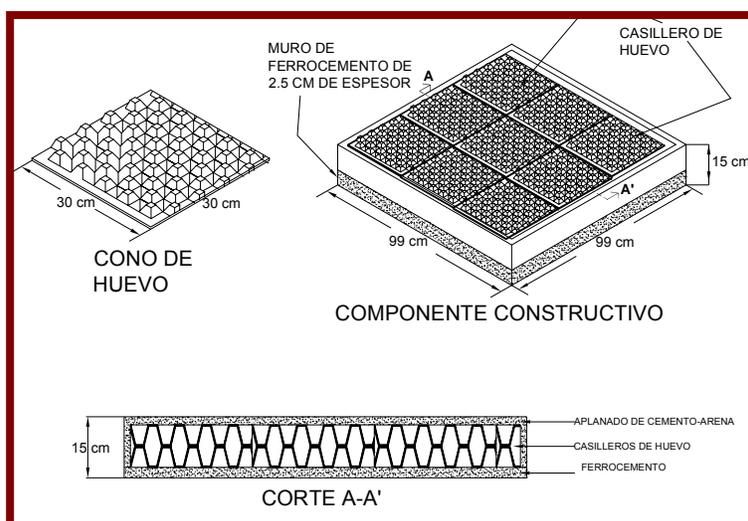


Figura 23. Diseño del componente multicompuesto con cartón (Conos de Huevo)

5.2 Construcción de los componentes multicompuestos

Se propuso la construcción de dos tipos de componentes multicompuestos CMA y CMB con un mismo material aislante pero con diferentes cantidades y disposiciones. En el primero caso, se utilizaron 4 casilleros de huevo contrapuestos, generando así un vacío entre ellos (ver figura 24 a) que posiblemente puede servir como una cámara de aire. En el segundo caso se utilizaron 6 casilleros de huevo pero en forma confinada (ver figura 24 b). En total se construyeron 6 componentes multicompuestos tres CMA y tres CMB.

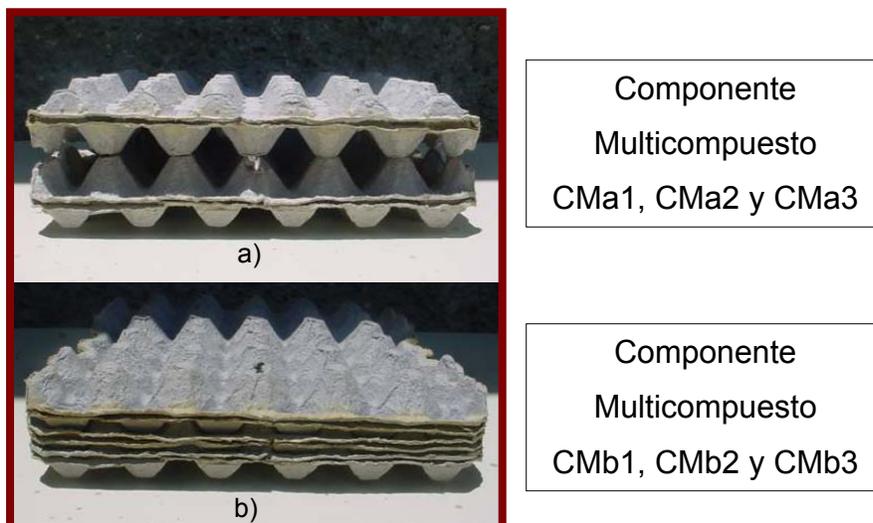


Figura 24. Disposición de casilleros de huevo utilizado como material aislante a) para muros, b) para cubierta.

La construcción de los CMA y CMb se llevó a cabo en dos etapas, en la primera, se construyeron placas de ferrocemento de 1x1 m (largo por ancho), dichas placas fueron hechas de mortero cemento-arena con una proporción 1:3 en volumen (ver figura 25a). El espesor de las placas de ferrocemento para los CMA fue de 2.5 cm, mientras que para los CMb el espesor fue de 5 cm de acuerdo a su función estructural y al procedimiento constructivo. Una vez que las placas de ferrocemento alcanzaron la edad de 28 días, se comenzó la segunda etapa, la cual consistió en la colocación del material aislante sobre las placas de ferrocemento. El material aislante fue sujetado con malla de metal desplegado y en seguida se le aplicó un aplanado de mortero hidráulico, hecho de mortero cemento-arena con una proporción 1:3 en volumen (ver figura 25 b y c). El espesor del aplanado fue de 2.5 cm así para los CMA como para los CMb, teniendo un espesor total de 15 cm en ambos componentes. Tanto las placas de ferrocemento como el aplanado de los CM, fueron curados mediante el rociado con agua por un periodo de 7 días (ver figura 25 a).



Figura 25. Construcción de CM a) Construcción y curado de placas de ferrocemento, b) colocación de material aislante y malla de metal desplegado y c) aplicación de mortero hidráulico sobre el aislante térmico.

5.3 Etapa experimental de evaluación de componentes multicompuestos

En las siguientes secciones se describe el procedimiento para determinar la conductividad térmica de los diferentes componentes multicompuestos descritos con anterioridad, de acuerdo con las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana NMX-C-181-1984.

5.3.1 Equipo e instrumentación para determinar la conductividad térmica

Las pruebas de conductividad térmica se realizaron en una cámara de ambiente controlado aproximadamente a +17°C. Para llevar a cabo estas pruebas, se requirió de un conductímetro, el cual fue diseñado y construido en el CIIDIR, IPN, Unidad Oaxaca, México (Ramírez y col. 2005). El conductímetro permite determinar la conductividad térmica de los materiales mediante el método del estado térmico estable con la siguiente relación:

$$k = \frac{\dot{Q}}{A(\Delta T/L)}, \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

k= conductividad térmica de la muestra en $\frac{W}{m^{\circ}C}$,

Q= corriente suministrada en Watts,

ΔT = la diferencia de temperaturas a través de la muestra en °K o °C,

L= espesor de la muestra en m,

A= área expuesta de la muestra en m^2 .

El conductivímetro está construido de madera y aislado térmicamente en la parte inferior y en los lados, utilizando poliestireno con un espesor de 15 cm. En su interior se encuentra instalada una resistencia eléctrica con una capacidad de 500 watts, esta resistencia sirve para suministrar el calor en una de las caras de los CM. Sobre la resistencia eléctrica es colocada una placa de lámina metálica que tiene la función de distribuir de manera uniforme el calor producido por la resistencia.

Para llevar acabo las mediciones en los CM, se requirió de un dimmer, la función de este instrumento fue regular la intensidad de corriente eléctrica que se suministró a la resistencia eléctrica, la cual puede fue de aproximadamente de 100 watts. Ésta intensidad de corriente eléctrica, está dentro del rango de -50 a 550 °C recomendado por la Norma Oficial Mexicana NMX-C-181-1984 para la determinación de la conductividad térmica en materiales termoaislantes. Las temperaturas de los CM fueron registrados mediante termopares, con un rango de temperaturas de -40 °C a +100 °C. Estos dispositivos se conectaron a un sistema de adquisición de datos, HOBO U12, con una memoria de 43,000 mediciones de 12 bits. La función de este dispositivo fue almacenar la información de temperaturas registradas por los termopares, y posteriormente ésta información fue extraída mediante el uso de una computadora personal para su análisis. La figura 26 muestra una imagen del equipo de medición y adquisición de datos.



Figura 26. Equipo de medición de temperaturas y adquisición de datos para determinar la conductividad térmica de CM.

5.3.2 Prueba operativa para calibrar el conductímetro.

La prueba consistió en determinar la conductividad térmica de un material existente en el mercado, y cuya conductividad térmica es conocida. El material seleccionado fue una placa de fibra de vidrio de 2.5 cm de espesor y 1m^2 de superficie. Para realizar la prueba, se instalaron 2 termopares en la superficie inferior de la fibra de vidrio, éstos tuvieron contacto directo con la placa caliente (T1), dos termopares se instalaron en la superficie superior de la fibra (T2) (ver figura 27). Los termopares fueron conectados al sistema de adquisición de datos, HOBO U12, posteriormente dichos datos fueron analizados en el programa HoboWare®.



Figura 27. Colocación de termopares en la fibra de vidrio para la prueba operativa.

Para determinar la conductividad térmica se esperó a que se estableciera el estado térmico estable del material analizado, esto se logró cuando ya no existieron variaciones significativas en las temperaturas registradas por los termopares. Como se puede apreciar en la figura 28, en esta prueba operativa el estado térmico estable comenzó aproximadamente a las 10 hr y se extendió hasta las 24 hr (ver figura 28). Una vez que los termopares no registren diferencias significativas en las temperaturas el experimento se puede detener.

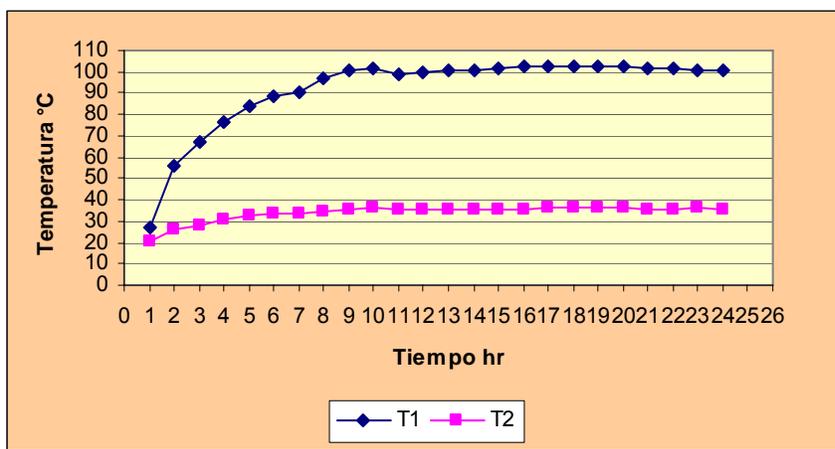


Figura 28. Establecimiento del estado térmico estable para la fibra de vidrio

Una vez que se alcanzó el estado térmico estable, los datos requeridos para determinar la conductividad térmica fueron: la potencia eléctrica suministrada, las temperaturas en T1 y T2, el área y el espesor de la placa. Mediante la ecuación fundamental que rige el estado estable de flujo de calor (ecuación 1) se calcularon la conductividad térmica y el resultado se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Establecimiento del estado térmico estable

Muestra	Q watts	A m ²	ΔT °C	L M	K $\frac{w}{m^{\circ}c}$
Fibra de vidrio	103	1	66.00	0.025	0.039

El fabricante de la fibra de vidrio reporta una conductividad térmica de 0.03 a 0.05

$\frac{w}{m^{\circ}c}$ para este material (Glassfiber ®), y el valor obtenido de conductividad térmica

en esta prueba operativa fue de $0.039 \frac{w}{m^{\circ}c}$. Esto quiere decir que dicho valor se encuentra dentro del rango establecido por el proveedor. Con base al resultado obtenido de la prueba operativa, se puede concluir que el dispositivo para llevar a cabo las pruebas de conductividad térmica en CM es confiable.

5.3.3 Determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos

El procedimiento de prueba utilizado para determinar la conductividad térmica en los CM, fue el recomendado por la Norma Oficial Mexicana NMX-C-181-1984; se evaluaron tres CMA y tres CMB mencionados con anterioridad.

5.3.3.1 Acondicionamiento e instalación de componentes multicompuestos

El acondicionamiento de los CM consistió en trazar una línea diagonal en dos de los vértices de los componentes, esta línea se dividió en tres segmentos iguales, en los puntos intermedios se colocaron los termopares, esto con el objeto de promediar el comportamiento térmico de los CM. Una vez localizados los puntos, se preparó la superficie de los CM en dichos puntos para que los termopares tuvieran el mayor contacto posible. Para evitar el desplazamiento de los termopares, éstos fueron adheridos a los CM con silicón. Después de colocar los componentes dentro del conductivímetro y para evitar pérdidas de calor, se selló el perímetro de la muestra con espuma de poliuretano como se muestra en la figura 29a.

En total, se instalaron 4 termopares en cada componente multicompuesto. Los termopares fueron conectados al sistema de adquisición de datos, en donde las mediciones de temperatura fueron almacenadas, para su posterior análisis mediante el uso de una computadora personal.

De acuerdo con la figura 29b, T1 representa el promedio de temperaturas registradas por los dos termopares conectados en la superficie del ferrocemento que está en contacto directo con la placa metálica, y T2 es el promedio de temperaturas

registradas por los dos termopares conectados en la superficie de los CM aplanado con mortero hidráulico.

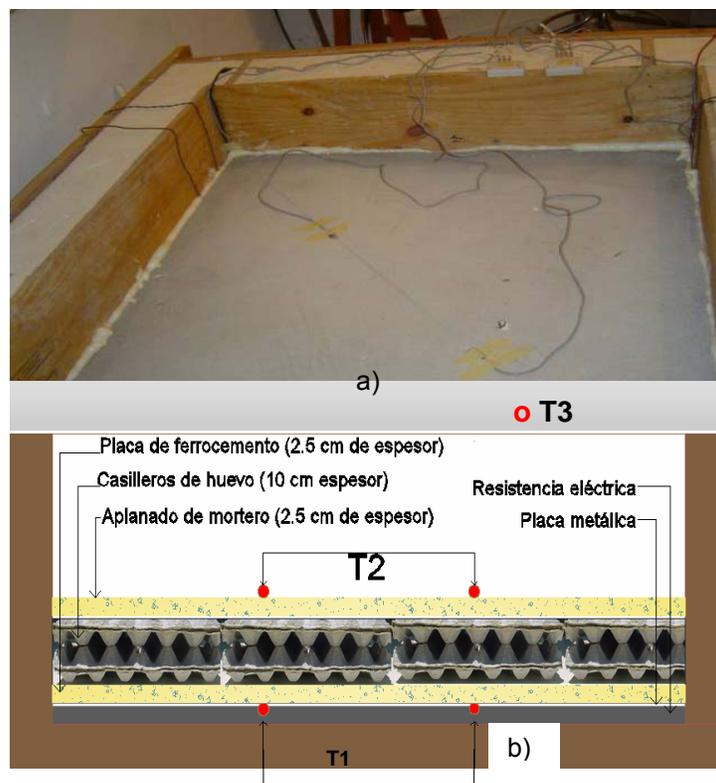


Figura 29. a) Arreglo e instalación de CM dentro en el conductivímetro, b) esquema de instalación de los termopares en el CM.

5.3.3.2 Establecimiento del estado térmico estable en componentes multicompuestos CMA y CMB

El estado térmico estable se logró cuando ya no existieron variaciones significativas en el tiempo de las temperaturas T1 y T2.

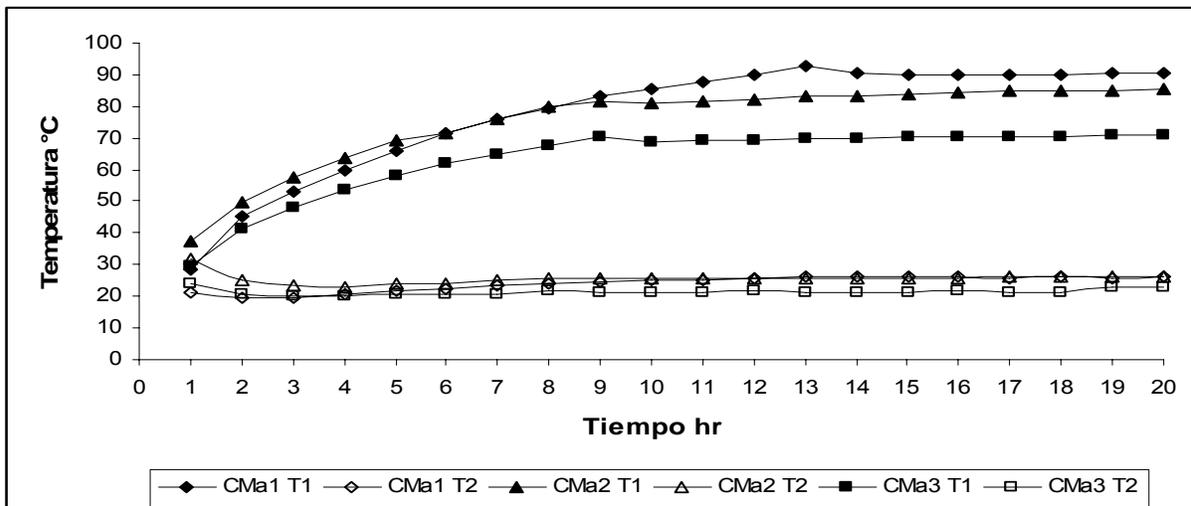


Figura 30. Establecimiento del estado térmico estable en los CMA.

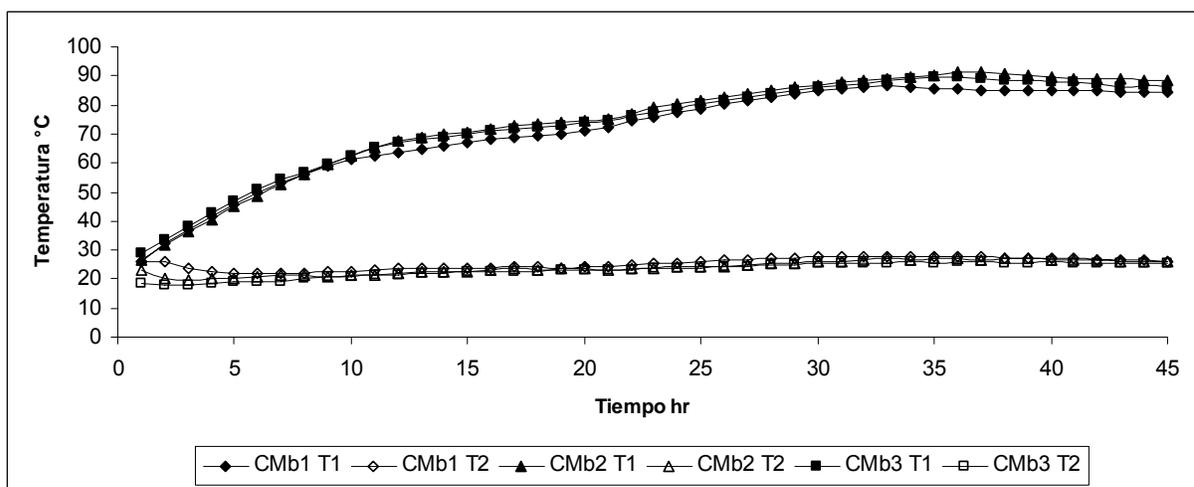


Figura 31. Establecimiento del estado térmico estable en CMB

La figura 30, muestra la gráfica del estado térmico estable de las tres muestras empleadas para determinar la conductividad térmica de los CMA1, CMA2 y CMA3. Se aprecia claramente que se logra el estado térmico estable en los tres casos, aunque existe variación en el tiempo de estabilización de las temperaturas. En esta gráfica, la estabilización de las temperaturas para los componentes CMA2 y CMA3 comenzó aproximadamente a las 10 horas de haberse iniciado el experimento, mientras que para el componente CMA1 se observa el inicio de la estabilidad térmica aproximadamente a las 13 horas. La diferencia en °C de temperaturas alcanzadas en los CMA, puede deberse a la diferencia de corriente eléctrica suministrada a las

muestras, pues como se observa en la tabla 8, a mayor corriente eléctrica mayor la temperatura alcanzada en las muestras. Sin embargo, el valor de la conductividad térmica no tiene variación significativa.

En la figura 31, se observa la gráfica del estado estable térmico de los tres CMb, la estabilidad térmica en los tres CMb, comienza aproximadamente a las 37 horas de haber iniciado la experimentación y se prolonga hasta las 45 horas cuando se detiene el experimento.

5.3.3.3 Adquisición de datos y determinación de conductividad térmica

Los datos requeridos para determinar la conductividad térmica de los CM fueron: el área expuesta a la fuente de calor, el espesor de los CM, el promedio de las temperaturas alcanzadas en T1 y T2 y la potencia eléctrica. Con las temperaturas registradas en T1 y T2 se determinó la diferencia de temperaturas; la potencia eléctrica suministrada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q = V I, \quad (6)$$

donde V = es el voltaje, en volts,

I = es la intensidad de corriente eléctrica en amperes suministrada a la muestra.

Mediante la ecuación fundamental que rige el estado estable de flujo de calor, se calculó la conductividad térmica. En las tablas 9 y 10, se presentan los resultados obtenidos tanto de los CMa, como los CMb.

Tabla 9. Determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos CMa.

CMa	Q watts	A m ²	ΔT °C	L m	K W/m°C
1	141.6	1	64.2	0.15	0.33
2	123.2	1	57.7	0.15	0.32
3	109.2	1	48.4	0.15	0.34
Promedio de conductividad térmica en componentes para muros					0.32 (± 0.01 D.E.)

Tabla 10. Determinación de la conductividad térmica en componentes multicompuestos CMb.

CMb	Q watts	A m ²	ΔT °C	L m	K W/m°C
1	105.6	1	57.8	0.15	0.27
2	109.2	1	62.9	0.15	0.26
3	107.9	1	70.5	0.15	0.23
Promedio de conductividad térmica en componentes para cubiertas					0.25 D.E.(± 0.02)

5.4 Discusión de resultados

Se diseñaron y construyeron dos tipos de componentes multicompuestos (CMA y CMb), dichos componentes estuvieron integrados por una placa de ferrocemento, un núcleo de casilleros de huevo que sirvió como aislante térmico y una capa de mortero hidráulico a manera de acabado.

Se obtuvieron las conductividades térmicas de los CM, mediante pruebas de conductividad térmica llevadas a cabo bajo las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana NMX-C-181-1984. Los resultados obtenidos indicaron que para los CMA la

conductividad térmica fue de $0.32 \frac{w}{m^{\circ}c}$, mientras que para los componentes CMb la

conductividad térmica fue de $0.25 \frac{w}{m^{\circ}c}$.

Se han realizado otros casos de estudio como el abordado en este trabajo, en donde se utilizaron materiales propios de cada región, para mejorar las condiciones térmicas y mecánicas de materiales de construcción. Por ejemplo Samir (1997) utilizaron ramas de palmera como aislante térmico y refuerzo estructural en estructuras de concreto. Ellos encontraron que la conductividad térmica de las

muestras fue del rango de 0.123 a $0.221 \frac{w}{m^{\circ}c}$. Khedari y col. (2002) utilizaron fibras de coco mezcladas en mortero y encontraron que la incorporación de estas fibras al mortero redujo un 85% el flujo de calor que el mortero normal, teniendo una

conductividad térmica de 0.3 a $0.6 \frac{W}{m^{\circ}C}$. Comparando los resultados obtenidos en este trabajo con aquellos obtenidos por los autores citados, se puede notar que la conductividad de los CMb fue similar a los obtenidos por Samir y col. Mientras que los resultados de los CMa, están de acuerdo con los presentados por Khedari y col. Como se puede observar, los materiales utilizados en los estudios anteriores y el utilizado en este trabajo, pueden ser útiles como aislantes térmicos, mejorando las propiedades térmicas de los materiales de construcción. Pero, como comenta Megri (1997) no se le pueden comparar con un aislante térmico como el poliuretano, ya que éste tiene un valor de conductividad muy bajo (0.016 a $0.025 \frac{W}{m^{\circ}C}$). Sin embargo, si se ve desde el punto de vista ambiental, utilizar materiales alternativos como fibras naturales y principalmente desechos sólidos urbanos (DSU), contribuye a reducir el deterioro ambiental, además de ser económico. Por otro lado, mejorar las condiciones de confort interior de las edificaciones, es favorable para evitar enfermedades ocasionadas por los cambios de temperatura.

Con base en los resultados de conductividad térmica obtenidos en este trabajo, se decidió que el componente con menor conductividad térmica, es decir el CMb, sea propuesto para la construcción de cubiertas, y el CMa para la construcción de muros. Se propuso el componente de menor conductividad térmica para la cubierta, debido a que ésta tiene mayores ganancias de calor ocasionado por el ángulo de incidencia solar (Serra, 1985).

Una vez decidido qué componente utilizar como muro y cual como cubierta se compararon con aquellos materiales empleados en la construcción tradicional. De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2002, la conductividad térmica del material más común para la construcción de muros de mampostería, utilizados en el sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado, es de $0.87 \frac{W}{m^{\circ}C}$ (tabique rojo), y para las cubiertas de concreto armado es de $1.74 \frac{W}{m^{\circ}C}$.

Comparando éstos datos con aquellos obtenidos en las pruebas de conductividad térmica en los CM se tiene lo siguiente:

Para el componente multicompuesto de ferrocemento y DSU (CMA) propuesto para ser utilizada como muro se obtuvo una conductividad térmica de $0.32 \frac{W}{m^{\circ}C}$, ésta comparada con la conductividad del tabique rojo, $0.87 \frac{W}{m^{\circ}C}$, indica que con su implementación se puede mejorar en un 54% la resistencia al flujo de calor. Por otro lado, la conductividad térmica de los componentes propuestos para la construcción de cubiertas (CMB) fue de $0.25 \frac{W}{m^{\circ}C}$, este valor comparado con $1.74 \frac{W}{m^{\circ}C}$ de una cubierta de concreto armado, indica como en el caso anterior, que su implementación para la construcción de cubiertas se mejorará la resistencia al flujo de calor hasta en un 86%.

Es importante hacer notar que aunque los componentes multicompuestos tuvieron el mismo espesor de 15 cm, las conductividades térmicas tanto para los CMA como para los CMB fueron diferentes. Se esperaba que la resistencia al flujo de calor ofrecida por los CMA fuera mayor, debido a la cámara de aire generado por la disposición del material aislante (ver figura 24a). Sin embargo, los resultados muestran lo contrario, esto puede deberse a que el aire no estuvo encapsulado y por lo tanto provocó la transferencia de calor mediante un fenómeno más complejo denominado convección.

De los resultados obtenidos se observa que se mejoran las condiciones térmicas de muros y cubiertas de ferrocemento utilizando casilleros de huevo; sin embargo, será necesario realizar más pruebas para comprobar la durabilidad del componente multicompuesto al medio ambiente y a problemas causados por incendios, debido a que los casilleros son materiales altamente flamables.

CAPÍTULO 6. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

Al tener la posibilidad de construir un prototipo bajo el sistema constructivo planteado en el Capítulo 4 de este trabajo, permitió generar conocimientos propios del procedimiento constructivo. Paralelamente al proceso constructivo se obtuvo un catálogo de costos reales de cada uno de los trabajos realizados, con dicho catálogo, se llevó a cabo una comparación económica con el sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado, de esta manera se determinó la ventaja económica que ofrece el sistema de construcción *Ferro-prefab*.

6.1 Cimbra y construcción de elementos prefabricados

Se utilizó una cimbra metálica con dimensiones de 50 cm x 280 cm, la cimbra se construyó con lámina galvanizada calibre 20, y 2 retenedores laterales de perfiles metálicos tipo canal monten calibre 14 de 4"x6". Aunque se requirió de diferentes alturas de muros, se utilizó la misma cimbra para su fabricación delimitando adecuadamente dichas alturas con madera (ver figura 32).



Figura 32. Cimbra empleada para la fabricación de elementos prefabricados que consiste en una base metálica en forma de "U" invertida y dos retenedores laterales.

6.1.1 Fabricación de elementos prefabricados para muros

Los materiales empleados para la construcción de muros fueron: malla electrosoldada calibre 6"x6"-10/10, malla de metal desplegado calibre 26 y mortero auto-compactable, preparado de acuerdo a el proporcionamiento propuesto en la

sección 4.2.2 de este trabajo. Para el habilitado del acero de refuerzo en los muros prefabricados, se utilizaron dos capas de malla electrosoldada. Las mallas electrosoldadas se desfasaron una de la otra para permitir una mejor distribución del acero de refuerzo, encima de éstas, se colocó malla de metal desplegado, esto con el objeto de proveer una distribución uniforme del acero de refuerzo y prevenir agrietamiento de las piezas. Las mallas fueron sujetadas entre ellas con alambre recocado para mantenerlas fijas y sin deslizamiento. Después del habilitado de acero de refuerzo como se ve en la figura 33, el armazón de acero fue doblado en forma de canal “C” utilizando una dobladora de lámina como se muestra en la figuras 34.



Figura 33. Habilidad de acero para estructura de los elementos prefabricados.



Figura 34. Doblado del esqueleto metálico para la construcción de elementos muro.

6.1.2 Preparación y colocación del mortero auto-compactable

El proporcionamiento para la mezcla de mortero auto-compactable, fue hecho por peso de los materiales y de acuerdo al diseño de mezclas propuesto en la sección 4.2.2. El mezclado de los materiales se hizo con una revolvedora eléctrica con una capacidad de $\frac{1}{2}$ bulto de cemento (ver figura 35), una vez preparada la mezcla se

vertió en la cimbra. Mediante ligeros golpes se liberó el aire atrapado, no se requirió de equipo especializado para vibrar ó compactar el mortero, ya que el mortero fluyó sin problemas dentro la cimbra, esto se corroboró con el excelente acabado que tuvieron las piezas, pues no se presentaron oquedades.



Figura 35. Fabricación de mortero fluido para muros prefabricados.

Después de colocar el mortero en la cimbra, se le dió el acabado en la superficie expuesta de los elementos. Posteriormente dichos elementos fueron cubiertos con plástico para evitar la pérdida de humedad en el mortero y así permitir la adecuada hidratación del cemento, además de evitar el agrietamiento por contracción (ver figura 36). El proceso de curado se realizó mediante rociado de agua por un periodo de 7 días.



Figura 36. Curado de piezas prefabricadas para evitar pérdida de humedad y prevenir agrietamiento por contracción.

6.1.3 Descimbrado de elementos prefabricados

Esta actividad se realizó sin mayores requerimientos, solamente se volteó la pieza con la cimbra incluida, con un poco de presión se liberó ésta, enseguida las piezas fueron estibadas en un lugar adecuado para seguir su proceso de curado (ver figura 37a y 37b).



Figura 37. a) Descimbrado de piezas prefabricadas, b) Estibación de piezas prefabricadas para continuar con su proceso de curado.

6.2 Descripción del proceso constructivo de la sala de juntas-aula

Proceso constructivo se refiere a los pasos sistemáticos necesarios para lograr la construcción del prototipo. La descripción de éste proceso se divide en partidas y sub-partidas de trabajo, se hace especial énfasis en las partidas de cimentación, albañilería y estructura, ya que son éstas las que más impacto económico tienen en la construcción tradicional, debido al alto consumo de materiales empleados.

6.2.1 Partida: Trabajos preliminares

En esta partida como su nombre lo refiere, son actividades preliminares, y consistió en preparar y acondicionar el terreno para la edificación de la sala de juntas-aula.

Estas actividades se describen en seguida de acuerdo al sistema constructivo propuesto.

Limpieza de terreno

Consistió en eliminar toda la capa vegetal del terreno, quitando todo tipo de hierba o basura que obstruyera el proceso de construcción evitando que en el futuro pudiera ser causa de hundimientos diferenciales.

Trazo y nivelación

El trazo consistió en identificar en el terreno los ejes y dimensiones de los muros de acuerdo al proyecto arquitectónico y marcar además las referencias para la excavación de las cepas. La nivelación consistió en acondicionar el terreno para que éste tenga una superficie lo más horizontalmente posible para facilitar futuras actividades. La nivelación también se refiere a ubicar un banco de nivel, y tomar éste como referencia en futuras actividades (ver figura 38).



Figura 38. Trazo y nivelación de terreno.

6.2.2 Partida: Cimentación

La cimentación del prototipo fue una cimentación prácticamente superficial, basada en elementos de concreto armado (zapata corrida y cadena de desplante), armada con malla electrosoldada y castillos prefabricados (armex).

Después de la excavación de cepas que tuvo una profundidad de 30 cm y 40 cm de ancho, se procedió al colado de una plantilla empleando concreto tipo 1 dosificado de acuerdo con la tabla 11. El concreto para la plantilla se colocó en toda la superficie

de las cepas con un de espesor de 3, la función de la plantilla fue evitar el contacto directo de la zapata corrida con el suelo (ver figura 39).



Figura 39. Excavación de terreno y colado de plantilla de concreto simple.

La tabla 11 muestra la dosificación de materiales empleados para la fabricación de concretos y morteros utilizados en este trabajo.

Tabla 11. Dosificación de materiales para fabricar concretos y morteros (Suárez 2004).

Clasificación	Resistencia Mpa	Agregado máximo	Cemento Ton	Grava M ³	Arena m ³	Agua m ³
Concreto Tipo 1	10	¾"	0.260	0.680	0.500	0.195
Concreto Tipo 2	20	¾"	0.355	0.650	0.470	0.195
Motero Tipo 1		0.510	1.100		0.272	0.272
Motero Tipo 2		0.430	1.120		0.266	0.272

Después del colado de la plantilla, se habilitó el acero de refuerzo para la cimentación, que fue hecho a base de malla electrosoldada calibre 6"x6"-10/10 con una resistencia a la fluencia $f_y=60$ Mpa y armex estructural (para la cadena de desplante) de 4 varillas con una resistencia a la fluencia $f_y=60$ Mpa. La zapata

corrida se fabricó con concreto Tipo 2 (ver tabla 11) con un espesor de 12 cm y 40 cm de ancho. Los 12 cm de espesor de la zapata corrida incluyó 8 cm de la cadena de desplante (ver figura 40). Se dejó descubierto parte del acero de la contratrabe para anclar el acero de los muros.

La reducción en las dimensiones de la cimentación de ésta propuesta constructiva, se debe principalmente al peso del edificio, ya que la dimensión de la zapata es directamente proporcional al peso del edificio.



Figura 40. Habilitado de acero de refuerzo para la cimentación.

6.2.3 Partida: Estructura

Montaje de perfil tubular rectangular (PTR's)

Los perfiles metálicos (PTR) utilizados en la edificación del prototipo funcionan como los castillos de una construcción tradicional confinando los muros. Dichos perfiles tienen una sección transversal de 4" x 4", de calibre y pared delgada.

El montaje de los PTR's consistió en hincarlos en el acero de refuerzo de la cimentación y sujetarlos con alambre recocado. Una vez alineados y plomeados, se le colocó concreto a la zapata corrida, de esta manera, parte de los perfiles fueron cubiertos por el concreto, el montaje de los PTR's se puede apreciar en la figura 41.



Figura 41. Montaje de perfiles metálicos (PTR).

Montaje de elementos muros.

El montaje de los elementos muro consistió en colocarlos sobre la cadena de desplante, nivelarlo verticalmente y alinearlos longitudinalmente (ver figura 42). Una vez montadas las piezas en el lugar correspondiente, se sujetó parte del acero de refuerzo dejando en los extremos de las placas prefabricadas al acero de refuerzo de la cadena de desplante (ver figura 43a); además las placas prefabricadas fueron unidas unas con otras utilizando 2 tornillos de $\frac{1}{4}$ " por cada placa. Enseguida; se delimitó con cimbra de madera con un ancho de 20 cm a los lados de las piezas prefabricadas y éstas fueron coladas con concreto Tipo 2 de acuerdo a la tabla 11, con un espesor de 8 cm, de esta manera se confinaron los muros en la parte inferior (ver figura 43b)



Figura 42. Montaje de muros prefabricados de ferrocemento (Placa T1)

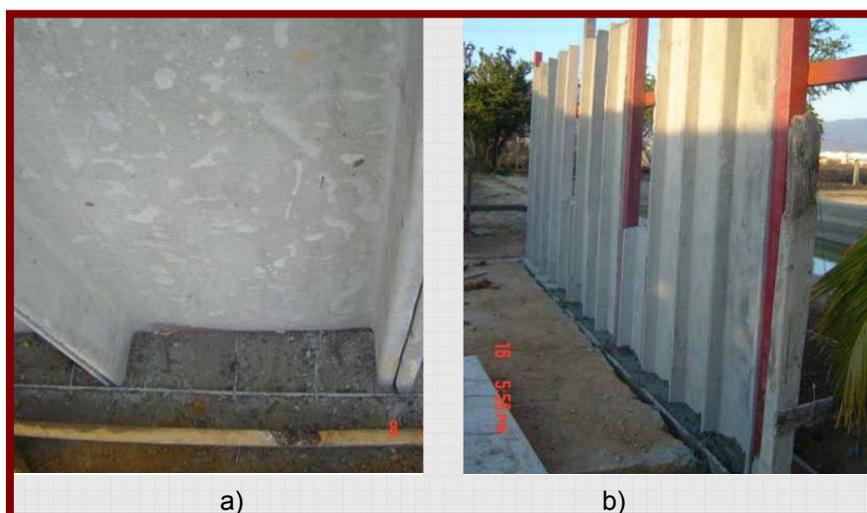


Figura 43. a).- Anclaje del acero de refuerzo de las placas prefabricadas al acero de refuerzo de la cadena de desplante, b). Colado de la base de elementos prefabricados.

El montaje de los elementos prefabricados (muros) fue una de las partes fundamentales en la construcción del prototipo, no se requirió de maquinaria especializada para esta actividad, debido a que las placas tuvieron un peso aproximado de 100 kg. Sin embargo, se requirió de la fuerza de cuatro personas para dicho montaje (ver figura 40).

El emplear una cantidad significativa de mano de obra en este sistema constructivo, es favorable por la situación económica del país, pues su aplicación puede ser una fuente de empleos. Al mismo tiempo, al no utilizar equipo o maquinaria especializada

para el montaje de los muros y otras actividades llevadas a cabo bajo este sistema constructivo, permite que la aplicación de éste sistema pueda ser de autoconstrucción y lo pueden realizar las personas con cierto grado de conocimiento en el oficio de la construcción. Con todo, al considerar este sistema constructivo como sistema prefabricado, por sí mismo evoca el uso de la tecnología y la minimización de la mano de obra para llevar a cabo con rapidez y mayor precisión cada una de las actividades a realizar, y de esta manera reducir los costos de construcción. Por lo tanto, se puede recomendar este sistema constructivo como un sistema de autoconstrucción para su aplicación en comunidades marginadas del país. Sin embargo, si alguna empresa quisiera retomarlo, la recomendación sería utilizar equipo o maquinaria especializada para aumentar el rendimiento en el montaje de los muros y en todo el proceso de construcción.

Construcción de la cadena de cerramiento

Después del montaje de los elementos muro, para confinar la parte superior de los mismos, se construyó una cadena de cerramiento con castillos prefabricados (armex) cuya resistencia a la fluencia $f'y= 60$ Mpa, el acero de la cadena fue soldada a los perfiles PTR. Por otra parte, el acero de refuerzo de los elementos prefabricados muro, fue sujetado con alambre recocido al acero de la cadena de cerramiento. Posteriormente se cimbró y se coló la cadena con concreto Tipo 2 de acuerdo a la tabla 11 (ver figura 44).



Figura 44. Cimbrado y colado de la cadena de cerramiento.

Por las dimensiones de la cadena de cerramiento con una sección transversal de 15 x 15 cm, ésta no tuvo significancia económica en cuanto al uso de acero y concreto en su construcción. Sin embargo, al cimbrar dicha cadena hubo un desperdicio considerable de madera. Esto tomando en cuenta que la madera para cimbra de cadenas puede ser utilizada normalmente 8 veces, y en este caso solamente se pudo utilizar 4. La reducción en el factor de uso de la madera, se debió principalmente a la forma que adquirieron los muros prefabricados, ya que su forma en canal “C”, requirió que la cimbra se recortara para ser adaptada a dicha forma (ver figura 45a).

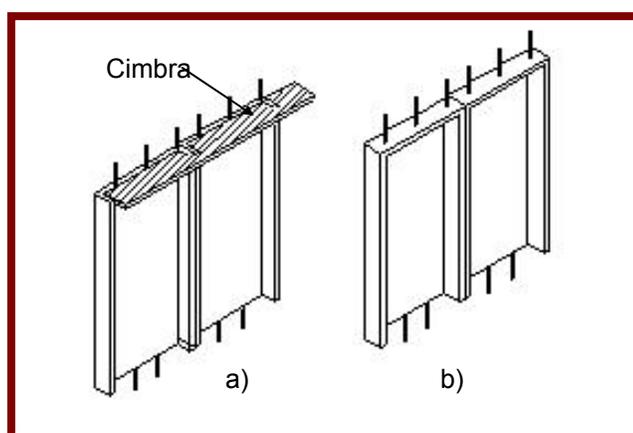


Figura 45. Mejoramiento de los elementos prefabricados para muros a) antes y b) nueva propuesta.

Por lo expuesto anteriormente, se recomienda que en futuros trabajos, se evite en la parte superior de los elementos prefabricados la forma de canal “C”,. Esta figura se puede cancelar con el propio mortero de la pieza desde el momento de la fabricación, resultando un nuevo elemento prefabricado similar al que se muestra en la figura 45b, de esta manera se evitará el uso de madera para cimbrar dicha forma.

Cimbrado y construcción de cubierta

La cubierta de este prototipo fue construida como una trabe-losa, con perfiles metálicos (vigas doble monten) que soportó la carga del mortero armado el cual tuvo un espesor de 5 cm. Las vigas descasaron directamente sobre la cadena de cerramiento y fueron soldadas al acero de refuerzo de la misma. El acero de refuerzo

en la losa fue de malla electrosoldada 6"-6", 10/10 y varillas de 3/8" a cada 90 cm en el sentido corto de la losa.

Durante el cimbrado de la cubierta, no se utilizó la cimbra de madera empleada comúnmente en la construcción de losas de concreto armado; en este caso, el aislante térmico a base de conos de huevo reemplazó la madera. La disposición de los conos de huevo fue similar a los componentes multicompuestos CMB analizados en el capítulo 5 de este trabajo. Para hacer posible esto, se sujetó alambra de 1/4" en la parte inferior de las vigas doble monten a cada 50 cm de distancia. Sobre estos alambres, se colocaron 6 capas de conos de huevo unidas lateralmente hasta tener una longitud aproximada de 2 m y llenar el espacio entre viga y viga. Después de la colocación de los conos de huevo, con vigas de acero canal monten (pudiendo ser madera), se rigidizó la cimbra a base de conos, enseguida se apuntalaron dichas vigas como se muestra en la figura 46. Sobre la cimbra formada por los conos, se colocó una capa de cartón asfáltico, éste tuvo una doble función, por un lado, mantener un espesor uniforme del mortero al ser colocado y por el otro impermeabilizar el área entre el mortero y los conos de huevo (ver figura 47).



Figura 46. Cimbrado de cubierta con conos de huevo.

Con la aplicación de este tipo de cimbra para la cubierta, se reduce el uso de madera hasta en un 75% comparado con el sistema de construcción tradicional de losas de concreto armado; sin embargo, se recomienda que al rigidizar la cimbra hecha a base de conos de huevo, se haga adecuadamente para evitar que esta se flexione

causando problemas a la resistencia mecánica de la losa. Se recomienda también que los elementos rigidizantes de la cimbra no se coloquen a más de 1 m de separación.



Figura 47. Colocación de cartón asfáltico sobre conos de huevo.

Después de la colocación de la cimbra se habilitó el acero de refuerzo de la cubierta, dicho acero fue a base de malla electrosoldada 6"-6", 10/10 y varillas de 3/8" a cada 90 cm en el sentido corto de la losa. Las varillas fueron soldadas a las vigas y la malla electrosoldada fue sujeta a las varillas mediante alambre recocido (ver figura 48).



Figura 48. Acero de refuerzo a base de malla electrosoldada y varillas de 3/8" a cada 90 cm en el claro corto.

Posterior al habilitado del acero de refuerzo, se llevó acabo el colado de la losa con mortero de cemento, arena y con un espesor de 5 cm. El mortero empleado fue

hecho en sitio con revolvedora cuya capacidad es de un bulto de cemento. El tipo de mortero utilizado para la losa fue mortero Tipo 1 cuya dosificación se puede encontrar en la tabla 11. El proceso de colado de la losa se puede ver en la figura 49.



Figura 49. Colado de la cubierta con mortero armado de 5 cm de espesor.

Después de 3 horas de terminada la colocación del mortero en la cubierta y que éste adquirió cierta resistencia, se colocó una membrana sobre dicha cubierta para evitar la pérdida de agua de la mezcla por el gradiente de temperaturas entre la pasta de mortero y el medio ambiente; inmediatamente después de la colocación de la membrana, se roció agua a la cubierta y de esta manera se inició el proceso de curado el cual duró 7 días (ver figura 50).



Figura 50. Curado de losa con membrana y rociado de agua.

6.2.4 Partida: Albañilería

En este apartado se describe solamente el aplanado en muros, ya que las demás actividades que corresponden a esta partida, aún no se han llevado a cabo. El trabajo principal de esta partida fue el aplanado interior de los muros, no se aplanó el exterior ya que el acabado de los elementos prefabricados fue adecuado. Para llevar a cabo este trabajo, fue necesario colocar primeramente conos de huevo como aislantes térmicos en los muros, estos conos se sujetaron a las placas de ferrocemento con alambre recocido y sobre ellos se colocó malla de metal desplegado. Los conos de huevo tuvieron un espesor de 10 cm y su disposición fue similar al de los componentes multicompuestos CMA analizados en el capítulo 5 de este trabajo. En un principio, se colocaban los conos como se muestra en la figura 51a, y se le aplicaba el mortero (mortero Tipo 2, ver tabla 11); sin embargo, se consumía una cantidad considerable de mortero, ya que éste penetraba en los espacios de los conos, por tal motivo, se le colocó un cartón liso sobre la superficie, (ver figura 48b) y de esta manera se redujo el consumo del mortero hasta en un 50%.

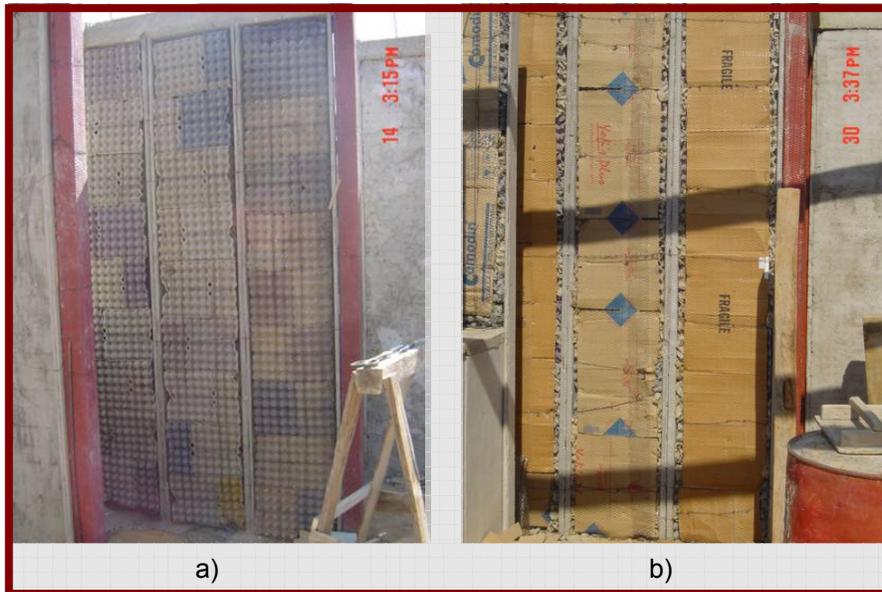


Figura 51. a) Colocación de conos de huevo en muros prefabricados, b) Colocación de conos de huevo más cartón liso.

El empleo de muros prefabricados en el sistema constructivo *Ferro-prefab* tiene cierta ventaja con respecto al sistema de construcción tradicional, esto porque no hay necesidad del aplanado exterior, ya que las piezas prefabricadas pueden incluir el acabado. Sin embargo, para el aplanado interior se requiere de dos capas de mortero, la primera es un escamado y sirve para preparar la superficie de los muros, después de ésta le sigue el aplanado con el acabado fino, por lo tanto se está realizando un doble aplanado. Será necesario entonces evitar este doble aplanado en el interior, esto se puede solucionar fabricando elementos que incluyan el aislante térmico desde la prefabricación. Aunque el peso los elementos aumentaría; no obstante, aumentaría su rigidez.

6.3 Comparación económica entre el sistema *Ferro-prefab* y el sistema de construcción tradicional

A la fecha de entrega de este trabajo, no ha sido posible culminar con la construcción del prototipo; sin embargo, el avance actual no ha sido un impedimento para evaluar económicamente este proyecto, ya que se cuenta con la construcción de tres de las principales partidas de trabajo, cimentación, albañilería y estructura. Se analizan estas tres partidas ya que en ellas radica la diferencia constructiva entre uno y otro sistema.

La comparación económica consistió en realizar un presupuesto total del proyecto de la sala de juntas-aula, bajo el sistema constructivo propuesto, *Ferro-prefab*, tomando datos reales de rendimiento de mano de obra y consumo de materiales registrados durante la construcción del prototipo. Paralelamente, se realizó un presupuesto con el mismo proyecto, sala de juntas-aula, pero considerando que éste tendría que construirse bajo el sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado, y bajo las recomendaciones del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPCE). La comparación económica se presenta en la tabla 12, y los presupuestos se encuentran en el anexo 2 y 3 de este trabajo.

Tabla 12. Análisis comparativo económico entre el sistema de construcción *Ferro-prefab* y el sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado.

Partidas	Sistema <i>Ferro-prefab</i> Importe	Sistema tradicional Importe
TRABAJOS PRELIMINARES.	952.12	952.12
CIMENTACIÓN	26,288.52	53,491.98
ALBAÑILERÍA	36,006.35	39,302.91
ESTRUCTURA	79,973.95	95,009.46
HERRERÍA Y ALUMINIO	16,999.60	16,999.60
INSTALACIÓN HIDRO-SANITARIA	5,630.00	5,630.00
ACABADOS	3,3619.37	3,3619.37
INSTALACIÓN ELÉCTRICA	15,000.00	15,000.00
LIMPIEZA	1963.00	1963.00
TOTAL	216,432.91	261,968.44
COSTO POR m²	3006.03	3638.45

De acuerdo a la tabla 12, el costo total de una construcción de 72 m² de superficie bajo el sistema constructivo *Ferro-prefab* es de \$ **216,432.91**, mientras que el mismo edificio construido con el sistema tradicional, el costo sería de \$ **261,968.44**. Esto indica que existe una diferencia de \$ **45,535.53**, lo que representa un ahorro de aproximadamente 18%. Como se puede ver, las partidas que más influencia económica tienen en los dos sistemas constructivos son: cimentación, albañilería y estructura, y es precisamente en éstas en donde se tiene la ventaja económica del sistema constructivo propuesto.

Como parte del análisis comparativo entre el sistema de construcción *Ferro-prefab* y el tradicional, se presenta a continuación un análisis de los materiales que más influencia económica tienen en ambos sistemas. Este análisis se llevó a cabo en las tres partidas ya identificadas anteriormente, esto con el objeto de conocer la diferencia del consumo de cemento, acero de refuerzo y agregados pétreos, debido a que los materiales mencionados son los más costosos.

Con base en lo anterior, en la figura 52 se muestra la cantidad de cemento utilizado en los sistemas constructivos aquí estudiados. De acuerdo a esta figura, en un sistema de construcción tradicional se ocupa 18.69 ton de cemento, mientras que con el sistema de construcción *Ferro-prefab* el uso del cemento se reduce a 12.74 ton; es decir, que se tiene un ahorro hasta 5.95 ton de cemento empleando el sistema constructivo *Ferro-prefab*, esto es aproximadamente un 32%.

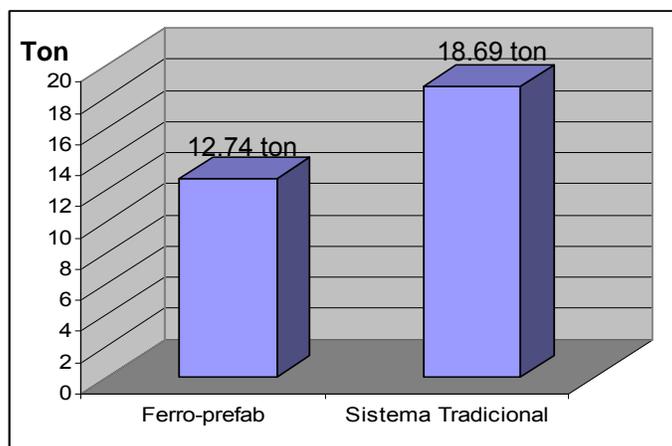


Figura 52. Consumo de cemento en Ton en las partidas de cimentación, albañilería y estructuras de los sistemas constructivos analizados.

Siguiendo con el análisis comparativo entre los sistemas constructivos estudiados, la figura 53 muestra el monto en miles de pesos del acero de refuerzo utilizado en ambos sistemas. En este caso, el monto más elevado le corresponde al sistema constructivo *Ferro-prefab*, esto se debe principalmente al elevado costo de los perfiles metálicos utilizados en la construcción del prototipo de sala de juntas-aula; no obstante, se utilizaron dichos perfiles debido a su disponibilidad en el mercado. Con el fin de optimizar el uso de los perfiles metálicos en la propuesta se podría modelar el comportamiento estructural del edificio con el uso de programas de cómputo especializados; sin embargo, dicho análisis se encuentra fuera del alcance de esta tesis.

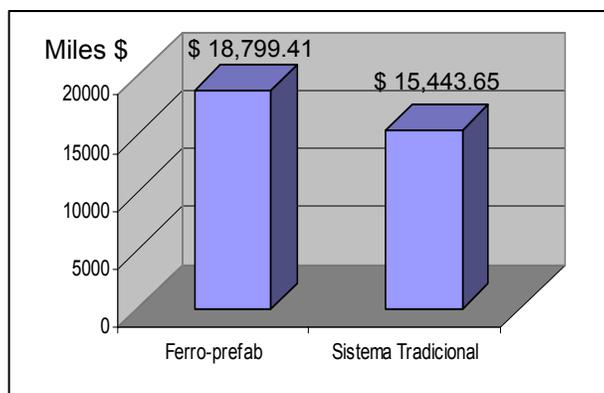


Figura 53. Montos por consumo de acero en miles de pesos en el sistema de construcción tradicional y el sistema Ferro-prefab.

La figura 54, muestra el consumo de los materiales pétreos utilizados en los dos sistemas constructivos analizados, se nota con claridad que empleando el sistema constructivo *Ferro-prefab*, se reduce considerablemente el consumo de grava y arena. Utilizando el sistema constructivo tradicional a base de ladrillo y concreto armado se consume 20.46 m^3 de grava y 31.37 m^3 de arena, mientras que con la aplicación del sistema constructivo *Ferro-prefab*, el consumo de grava se reduce a 9.65 m^3 y la arena a 20.89 m^3 . Esto indica que empleando el sistema constructivo propuesto en este trabajo, se tiene un ahorro aproximado del 52% en el consumo de grava y un 33% de ahorro de la arena.

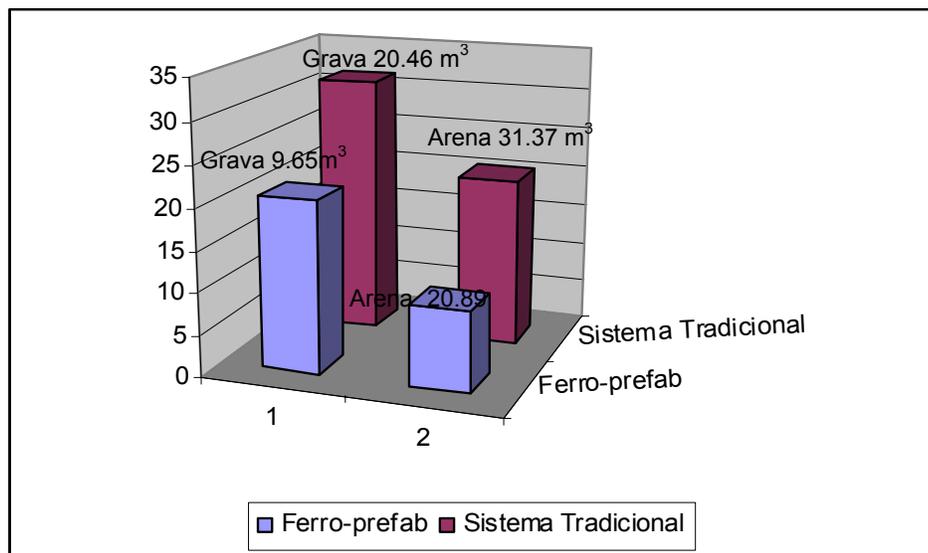


Figura 54. Volúmenes de agregado fino (arena) y grueso (grava) en m^3 del sistema constructivo Ferro-prefab y el sistema tradicional.

6.4 Discusión de resultados

Los resultados más relevantes en este capítulo, fueron la construcción del prototipo de una sala de juntas-aula para el CIIDIR-Unidad Oaxaca, México, y el análisis del costo de dicho prototipo.

De acuerdo a lo anterior, la Tabla 12 muestra un resumen del costo por partida de trabajo, tanto del sistema constructivo *Ferro-prefab* como del sistema tradicional a base de ladrillo y concreto armado. Mediante dicha tabla, se pudo ver que las partidas que más impactan económicamente fueron: Cimentación, Estructura y Albañilería. La misma Tabla indica que con un sistema de construcción con ferrocemento, se logró reducir el costo total de edificación aproximadamente en un 18% comparado con el sistema tradicional de construcción. El ahorro económico se debió principalmente por la reducción del consumo de cemento, arena y grava. De acuerdo a la figura 52, con la implantación del sistema constructivo *Ferro-prefab*, se logró economizar hasta 5.95 ton de cemento. Lo anterior indica que por cada metro cuadrado de construcción se puede ahorrar aproximadamente 83 kg de cemento, y esto es aproximadamente 83 kg de dióxido de carbono por cada metro cuadrado de construcción (Malhotra y Mehta, 2002).

Como ya se mencionó en su momento, no fue posible reducir el costo del acero de refuerzo empleando el sistema de construcción *Ferro-prefab*; sin embargo, utilizar este tipo de perfiles puede ser ventajoso para edificaciones de más de un nivel. Por otra parte, se recomienda que para futuras aplicaciones, se realice un modelado estructural del edificio mediante un programa especializado, basado en el método del elemento finito (SAP 2000) que permita identificar el uso óptimo de acero de refuerzo.

Con respecto al consumo de agregados pétreos, la figura 54 muestra que se obtuvo un ahorro del 52% de grava aplicando el sistema constructivo propuesto. En el caso de la arena el ahorro de dicho material fue un 33%. La reducción en el uso de los materiales, es conveniente no sólo por el aspecto económico, sino también por el ambiental, puesto que la arena y la grava son los materiales que más volumen representan en la fabricación del concreto, entre un 65 a 80% del total de un metro

cúbico de concreto (Concrete Basics, 2002). Provocando cada día un desequilibrio ambiental y el deterioro del paisaje natural, además de acelerar la escasez de estos materiales en un futuro no lejano.

Comparando el porcentaje de ahorro económico obtenido en este trabajo, con aquellos obtenidos por otros investigadores que han aplicado la técnica constructiva con ferrocemento, se tiene lo siguiente. Rubio y Robles (1994) señalan que la aplicación de la técnica constructiva a base de ferrocemento prefabricado, permite reducir el costo de construcción en un 29%. Otros autores como Mahyuddin e Ibrahim (1994), encontraron que se puede tener un ahorro económico del orden de 35%. Ávila (2004) reportó que con un sistema constructivo mixto a base de ferrocemento y perfiles metálicos, se puede reducir el costo de construcción en un 25%, finalmente López (2005), reportó los resultados de una propuesta constructiva modular con mortero armado, en el cual, el costo de construcción puede ser aproximadamente de 25% y 30% más económico. Todos los autores citados han realizado el análisis económico tomando como parámetro el sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado.

Con base a lo anterior se puede decir que con la aplicación de la técnica constructiva con ferrocemento, se puede tener un ahorro económico que oscila entre los 25% a 35% comparado con el sistema de construcción tradicional. El costo económico del sistema constructivo *Ferro-prefab*, analizado en este trabajo indica que se obtuvo un 18% de ahorro económico, el cual varía con el reportado. Sin embargo el sistema *Ferro-prefab* ofrece ventajas en ahorro energético resultado del calentamiento solar pasivo y la iluminación natural al aplicar estrategias de diseño bioclimático al proyecto arquitectónico (Sol, 2006). Además, la incorporación de desechos sólidos urbanos como material aislante, reduce la conductividad térmica del ferrocemento y mediante lo cual se puede mejorar el confort térmico. El confort al interior del recinto juega un papel muy importante en la preservación de la salud, principalmente de niños y ancianos, quienes son los más susceptibles a contraer enfermedades respiratorias debido a los cambios bruscos de temperatura.

Resumen de resultados

Las pruebas realizadas en estado fresco del mortero auto-compactable presentaron una extensibilidad alrededor de 63 a 68 cm de diámetro, las cuales están dentro de rango de trabajabilidad o extensibilidad de 60 a 80 cm establecidas para morteros y concretos auto-compactables sugeridos por Hayakawa y col. (1993), Taniguchi y col. (1994) y Gomes y col. (2002). Con respecto a la prueba en estado endurecido llevada a cabo en especímenes, la resistencia a la compresión a los 28 días fue de 31.51 Mpa, y para aquellos que se ensayaron a los 56 días fue de 37.2 Mpa, la cual es apropiada para su aplicación en zonas sísmicas.

Continuando con este resumen, con base en los resultados de conductividades térmicas obtenidas, se decidió que el componente de menor conductividad térmica, es decir el CMb, sea propuesto para la construcción de cubiertas, y el CMa para la construcción de muros. Se propuso el componente de menor conductividad para la cubierta, debido a que ésta tiene mayores ganancias de calor ocasionada por el ángulo de incidencia solar (Serra, 1985). Se comparó la conductividad térmica tanto de los CMa como los CMb con aquellos elementos del sistema de construcción tradicional, y el resultado indica que se puede mejorar un 54% la resistencia al flujo de calor utilizando los CMa para muros, esto comparado con un muro de mampostería hecho de tabique rojo. Así mismo, se puede reducir hasta en un 86% la resistencia al flujo utilizando los CMb para la construcción de cubiertas, comparado con una losa de concreto armado.

Por otra parte, con la aplicación de la técnica constructiva *Ferro-prafab* se pudo reducir el costo total de edificación aproximadamente en un 18% comparado con el sistema tradicional de construcción. El ahorro económico se debió principalmente a la reducción del consumo de cemento, arena y grava. En el caso del cemento, se tuvo un ahorro de 5.95 ton, asimismo se ahorró un 52% de grava y 33% de arena.

Conclusiones

Con base en el análisis de resultados, se puede concluir lo siguiente:

- ◆ Utilizando el sistema constructivo híbrido a base de muros y cubiertas de ferrocemento aisladas térmicamente con conos de huevo se redujo el peso propio de la edificación en un 50%, reduciendo las fuerzas causadas por sismos y favoreciendo a la seguridad estructural.

- ◆ El uso de DSU en estructuras de ferrocemento permite reducir la conductividad térmica en componentes multicompuestos hasta en un 54% en muros y hasta en un 86% en cubiertas comparados con muros de mampostería y cubiertas de concreto armado utilizados comúnmente en el sistema de construcción tradicional en México.

- ◆ Con la aplicación de un sistema constructivo a base de perfiles de acero y ferrocemento prefabricado denominado *ferro-prefab*, se reduce el costo de construcción en un 18% con respecto al sistema de construcción tradicional a base de ladrillo y concreto armado. Tal reducción, se ve favorecida principalmente al minimizarse los materiales utilizados como el cemento, que tuvo una reducción aproximada del 32%, la grava un 52% y la arena un 33%; sin embargo, con este sistema constructivo no se redujo el uso del acero con respecto al sistema de construcción tradicional.

Recomendaciones

Las principales recomendaciones que surgen del presente trabajo son:

- En cuanto al aspecto estructural del sistema constructivo implementado en esta tesis (*Ferro-prefab*), será necesario profundizar más en su estudio, debido a su importancia y complejidad, quedando abierta la oportunidad para las personas interesadas en la materia en abordar este estudio como posible tema de tesis.
- Como se registró en el capítulo 5 de esta tesis, el uso de desechos sólido urbanos (conos de huevo) como aislante térmico, redujo la conductividad térmica de muros y cubiertas de ferrocemento; sin embargo será necesario determinar la resistencia al fuego de componentes multicompuestos, esto debido a que los conos de huevo son altamente flamables.
- Se debe cuidar que la cimbra empleada para la construcción de los elementos prefabricados no se flexione al momento de la colocación del mortero, ya que dicha deformación afecta directamente en el ensamble de los elementos muro en el proceso constructivo.
- Asimismo se recomienda realizar mediciones en el prototipo sala de juntas-aula para comprobar la efectividad de los conos de huevo como aislante térmico.
- Se sugiere que en futuras investigaciones se analice esta propuesta constructiva para su aplicación a edificaciones de más de un nivel. También es importante proponer una cubierta integral prefabricada, que incluya desde la prefabricación el aislante térmico.

Bibliografía

- Abang A.** (1995) Applications of ferrocement as a low cost construction material in Malaysia. *Journal of ferrocement*. 25, p 123-128.
- ACI Committee 549.** (1994) State of-the-art report on Ferrocement, *American concrete institute*, p. 1-20.
- ACI Committee 226.** (1987). Use fly ash in concrete. *American concrete institute*. p. 381-409.
- Arfi M., Akhtar S., Masood A., Basit F., Garg M.** (2001). Flexural behavior of fly ash mortar ferrocement panels for low-cost housing. *Journal of Ferrocement*. 31, p. 125-135
- ASTM C 618** (2005). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolana for use in concrete. *American Society Testing and Materials*. p. 1-3.
- Ávila L. E.** (2004). Alternativa constructiva empleando estructura metálica y ferrocemento para la construcción de vivienda de interés social en el Municipio de Oaxaca de Juárez. *Tesis de licenciatura*. Facultad de Arquitectura 5 de Mayo, Oaxaca, México
- Bruce E.** (s/f) Interlocking cement and concrete components for low-cost house construction: the building together experience in Thailand, Asian Institute of Technology University of Hawaii.
- Bojorquez G., Luna A., Gallegos R., Hotta A.** (2003). Estimación de Costo por Climatización Artificial de un Prototipo de Vivienda con el Sistema Constructivo LB, para Muros. *XXVII Semana Nacional de Energía Solar*. Chihuahua, México.
- Cabahug R., Robles R.** (1998). Ferrocement – construction material for urban housing. *Journal of ferrocement*. 28, p. 41-46.
- Cano J., López E., Jiménez V., Alavez R.** (2006). Informe final del proyecto CGPI 20050141: Construcción de vivienda sismorresistente utilizando bloques de ferrocemento con uniones atornilladas. Financiado por el Instituto Politécnico Nacional.
- Capote J.** (1996). *Construcción y edificación industrial*. Santander, España.

- Castro J.** (197). Application of ferrocement in low-cost housing in Mexico. *American concrete institute*. 143, p. 143-146.
- Concrete Basics** (2002). A guide to concrete practice. Fifth Edicion. Cement and Concrete Association of Australia. p. 3.
- Desjarlais A.** (2002). Insulation fact sheel. *Assistant Secretary Energy Efficiency and Renewable Energy*. Department of Energy. DOE/CE-0180
- Fernández A., Caballero T.** (1993). Unidad de congresos con estructura de cascarón versátil y económica. *Acta Mexicana de Ciencia y Tecnología*. 11, p. 41-50.
- Fernández A.** (1996). Ferrocement research and development in Oaxaca, México. *Journal of Ferrocement*. 26, p. 259-266.
- Fernández A., Juárez L., Cano F.** (1998). An economical earthquake/hurricane resistant ferrocement school building. *Journal of Ferrocement*. 28, p. 351-357.
- Fernández A., Cano F.** (2001). Seismic characteristics of low-cost ferrocement monolithic housing. *Journal of Ferrocement*. 31, p. 137-142.
- Fernández R., Carella A.** (2005). Conservación de energía en viviendas y edificios. Buenos Aires Argentina.
- Gaceta Oficial del D. F** (2004). Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Sección: Diseño por Sismo. Tomo I. México D. F.
- Ganesh K., Nawesgara S.** (1993). Efficiency of fly ash in concrete. *Cement & Concrete composites*. 25, p. 223-229.
- Gallo G., Espino L., Olvera A.** (2005). Diseño de estructuras de casa habitación. Edit. McGraw Hill. México. p. 114.
- Gomes P., Gettu R., Agulló L., Bernad C.** (2002), "Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia, Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización", *Cemento – Hormigón*. 832, p. 30-42
- Gutiérrez M., Díaz L., Delvasto S.** (2005) Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars. *Cement & Concrete composites*. 27, p. 593-598.

- Hayakawa**, M., Matsuoka Y., Shindoh, T. (1993), "Development and Application of Super-Workable Concrete". Special Concretes: Workability and Mixing. Ed. P.J.M.Bartos, E& FN Spon, Londres, p. 183-190.
- Johnston** C., Mattar S. (1976). Ferrocement in tension and compression. Proceedings ASCE. 102. p. 875-899.
- Kameswararao** C. B., Kamasundararo A. K. (1991). Generalized stress-strain curve for ferrocement and axial compression. Proceedings IV reunion Internacional de ferrocemento. Ciudad de la Habana, Cuba.
- Khedari** J., Suttisonk B., Pratinthong N, and Hirunlabh J. (2002). New lightweight composite construction material with low thermal conductivity, *Cement & Concrete composites*. 23, p. 65-70.
- López** E., Díaz A. (1991). 'Casa gota' construcción de ferrocemento reforzada con fibra natural. Tesis de ingeniería, CIIDIR-IPN., Oaxaca, México.
- López** E. (2005). Desarrollo de un sistema constructivo modular de mortero armado para vivienda de interés social. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.
- López** E., Jiménez, V., Cano J. (2006). Comportamiento de un muro construido con paneles prefabricados de mortero armado sometido a compresión simple y diagonal, *Naturaleza y Desarrollo*, En prensa.
- Mahyuddin** R., Ibrahim W. (1994). Ferrocement in affordable housing construction the Malaysian experience. *Journal of Ferrocement*. 24, p. 17-21.
- Malhotra** M. V., Mehta P. K. (2002). High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories. Publisher by Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc; Ottawa, Canada. p. 1-9
- Manual** de diseño de obras civiles. Sección C. Estructuras. Diseño por sismo. Comisión federal de electricidad. Instituto de investigaciones eléctricas. 1993.
- Mathews** M., Syam V., y Shaji T. (1994). Ribbed ferrocement elements for low-cost housing. *Journal of Ferrocement*. 24, p. 35-49.

- Mattone R.** (1996). Ferrocement: Experiments and application potential. *Journal of Ferrocement*. 26, p. 275-279.
- Martínez J.** (1998). México y la construcción industrializada. *Instituto Mexicano de Cemento y Concreto*.
- Martínez J.** (2005). 3ra. Conferencia Internacional de Vivienda de las Américas. Instituto Nacional de Ecología.
- Martínez R.** (2003). *Pediatría, la salud del niño y del adolescente*. 5nd Ed., Manual Moderno, México D. F, p. 738
- Megri A., Achard G. and Haghghat F.** (1997). Using plastic waste as thermal isolation for the slab-on-grade floor and basement of a building, *Building and Environment*. 33, p. 97-104.
- Montes P.** (1996). Análisis y diseño de una cubierta semiesférica de ferrocemento sometida a viento y sismo. Tesis de maestría. . Facultad de ingeniería, UNAM. México D. F.
- Nervi P.** (1956). Ferrocement: its characteristics and potentialities. *Cement and Concrete Association*. 60. p. 17.
- Neville A. M., Brooks J.J.** (1998). Tecnología del concreto. Edit. Trillas. México D. F. p. 30-31, 121-124, 67-68.
- Norma** Oficial Mexicana NOM-C-061-1976. Determinación de la resistencia a la compresión de cementos hidráulicos.
- Norma** Oficial Mexicana NMX-C-181-1984, "Industria de la construcción – materiales termoaislantes - transmisión térmica en estado estacionario (medidor del flujo del calor) - método de prueba"
- Norma** Oficial Mexicana NMX-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones, envolventes de edificios no residenciales.
- Okamura H.** (1997). Self-Compacting High- Performance Concrete. *Concrete International*. 19, p. 50 -54.
- Olvera A.** (1994). El ferrocemento y sus aplicaciones. Edit. *Instituto Politécnico Nacional*. México D.F.
- Papadopoulos A.** (2004). State of art in thermal isolation material and aims for future developments, *Energy and Buildings*. 37, p. 77-86.

- Permalsamy** N., Balagaru A. Naaman E, Surendra P. (1977). Analysis and behavior of ferrocement in flexure. A.S.C.E. 103.
- Poulson** B. (2003). Especificaciones y Directrices para el hormigón autocompactable – HAC. *EFNARC*. p. 11.
- Ramírez** R., Caballero J., Morales V. (2005). Diseño de una cámara de ambiente controlado y conductivímetro para realizar pruebas termofísicas de elementos multicompuestos para materiales de construcción. Jornadas politécnicas de Investigación. Oaxaca, México. p. 39.
- Ramírez** de Alba H., Valdez E. (2006). La necesidad de la enseñanza de la prefabricación y el presfuerzo en México. 2do encuentro latinoamericano y 1er. congreso internacional de estructuras prefabricadas. Veracruz, México.
- Robles** A. (1992). Ferrocement Primer. *Internacional Ferrocement Information Center*. p. 1-62.
- Rosmalen** J. V. (1984) La prefabricación y su aplicación al diseño arquitectónico. Tesis de maestría. Facultad de Arquitectura, UNAM. México D. F.
- Rubio** N., Robles A. (1994). Research ferrocement housing - global perspective. *Journal of Ferrocement*. 24, p. 1-6.
- Sahmaran** M., Ari H., Ozgur I. (2006) The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement & Concrete composites*. 28, p. 432-440.
- Salamanca** J. (1997). Prefabricación y producción de vivienda en México. Edit Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Primera Edición. p. 32-34.
- Samir** M. (1997). Development of prototype structure for low-cost and energy-efficient house by utilizing palm tree fronds, *Building and Environment*. 32, p. 375-380.
- Sandoval** L., Pineda R. (2004). Aplicación del índice humidex para el estudio de las condiciones de confort térmico en un edificio dedicado a la edificación. *XXVII Semana nacional de Energía Solar*. Oaxaca, México. p. 159-163.
- Sandowicz** M. (1985). Application of ferrocement channel elements housing. *In*

proceedings of second international symposium of ferrocemento. p. 493-505. Bangkok: Internacional Ferrocement Information Center.

SEDUCOP (1998). Reglamento de construcción y seguridad estructural para el estado de Oaxaca. Oaxaca de Juárez, Oaxaca.

Serra R. (1985). El libro de la energía solar pasiva, 2nd Ed., G. Gili, México D. F., p. 17-32.

Shri P K Adlakha, Shri H C Puri. (2003). Prefabrication Building Methodologies for Low Cost Housign. *le(i) Journal-AR.*

Spiratos N., Pagé M., Mailvaganam., Malhotra V., Jolicuer C. (2003). Superplasticizers for concrete. Fundamental, Technology, and practice. Edit. AGMV Marquis Québec, Canada. p. 29-36

Sol F. (2006). Criterios de diseño bioclimático para la ciudad de Oaxaca y su zona conurbada. Tesis de maestría. CIIDIR, Unidad Oaxaca México

Suárez C. (2004). Costos y tiempo en edificación. 3 Ed. Edit. Limusa. México. p.136

Taniguchi, H., Harada, K. Y Ushijima, S. (1994), Study on Properties of fluidity of Mortar and concrete for Super Workable Concrete, Proc. *Japan Cement Asociation*, 48, p. 750 - 755.

Tatsa E. Z. (1988). Construction of ferrocement panels. *Journal of Ferrocement.* 18, p. 17-33.

Tena, A., E. Miranda (2002), "Capítulo 4: Comportamiento mecánico de la mampostería", *Edificaciones de Mampostería para la Vivienda*, Sergio Alcocer. Edit. Fundación ICA, Segunda Edición, p. 107-116.

Thomas M., Shejata, M., Shashiprakash S. (1999). The use of fly ash in concrete: classification by composition. *Cement, concrete, and aggregates*, CCAGDP. 21, p. 105-110.

Vilagut, F., (1975). Prefabricado de hormigón. Tomo 1. Edit. Gustavo Gili. Barcelona, España. p. 628-645.

Wainshtok H. (1994). Low-cost housing built with ferrocement precast elements. *Journal of Ferrocement.* 24, p 29-34.

Waliuddin A., Ismail M. (1995). An economical and lightweight ferrocement

roofing system. *Journal of Ferrocement*. 25, p 129-135.

Walkus B. Mackiewicz A. (1977). Composites as applied to the thin walled structures in Poland. *Bulletin international association for shell and spatial structures*. 18, p. 3-13.

Anexos

Anexos 1. Cálculos estructurales

Revisión de cimentación a base de zapata corrida.

Datos generales

Se analizó la cimentación del eje 1 en el tramo D a J. (ver figura 3)

Se considera que la cimentación será de concreto reforzado $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$

y acero de refuerzo con un $f'y = 6000 \text{ kg/cm}^2$ (malla electrosoldada cal. 6"x6"-10/10)

$f_s = 3000 \text{ kg/cm}^2$,

$j = 0.90$,

$Q = 13.25$,

Peso de 1 m^2 muro = 113.40 kg/m^2 ,

Peso de 1 m^2 de cubierta = 305.87 kg/m^2 ,

Para un área tributaria de $18.24 \text{ m}^2 \times 305.87 \text{ kg/m}^2 = 5579.0 \text{ kg/m}$,

así:

$5579.0 \text{ kg/m} / 5.70 \text{ m} = 978.78 \text{ kg/m}$.

Bajada de cargas hacia la cimentación

W (cubierta) = $978.78 \times 1.10 = 1076.66 \text{ kg/m}$,

W (muros) = $306.18 \times 1.1 = 336.79 \text{ kg/m}$,

W (cimentación) = $124.8 \times 1.1 = 137.28 \text{ kg/m}$,

Carga total $W_t = 1550.73 \text{ kg/m}$.

Capacidad de carga del terreno.

Se considerará una carga de 5000 kg/m^2 por el anterior uso del terreno (agrícola)

Cálculo del ancho de la zapata,

$A_z = 1550.73 / 5000 = 0.31 \text{ m}$. Sí pasa, pero se considerará un ancho de 40 cm.

Peralte por momento flexionante

Reacción neta:

$$R_n = \frac{1550.73}{0.40} = 3876 \text{ kg/m}^2,$$

$$M_{\text{máx}} = \frac{R_n x^2}{2} = \frac{3876 \times 0.13^2}{2} = 33 \text{ kgm},$$

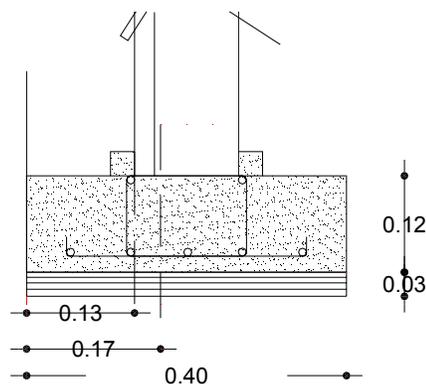


Figura 1.1 Detalle de Zapata corrida

$$d = \sqrt{\frac{M_{\text{máx}}}{Q b}} = \sqrt{\frac{3300}{13.25 \times 100}} = 2.5 \text{ cm,}$$

$$d = 3 \text{ cm}$$

El peralte propuesto es de 12 cm por lo tanto el sí pasa.

Peralte por esfuerzo cortante

$$V = 3876 \text{ kg/m}^2 \times 0.13 \text{ m} = 503.98 \text{ kg,}$$

$$v = \frac{V}{b d},$$

$$d = \frac{503.98}{100 \times 1.25} = 4.0 \text{ cm. Si pasa}$$

Cálculo del área de acero

$$A_s = \frac{M_{\text{máx}}}{F_s j d} = \frac{3300}{3000 \times 0.90 \times 12} = 0.10 \text{ cm}^2,$$

Con malla electrosoldada con un cal. 6"x6"-10/10 se tiene.

$$N^\circ = \frac{0.10}{0.25} = 0.4 \text{ barras.}$$

Acero por temperatura,

$$A_{st} = 0.002 \times 100 \times 12 = 2.4 \text{ cm}^2,$$

$$\text{Separación } S_p = \frac{100 \times 0.25}{2.4} = 10 \text{ cm, Sí pasa.}$$

Revisión de losa empotrada en dos lados opuestos.

Este tipo de losa se calcula en forma semejante a las vigas rectangulares, considerando para mayor facilidad en el cálculo, un ancho de losa de 1.00 m.

Perpendicular a los apoyos, se coloca el armado principal que absorberá los esfuerzos de tensión producidos por la flexión de la pieza. Formando un ángulo de 90° con la armadura principal, se coloca otra armadura llamada de temperatura y unida a la armadura principal con alambre recocido, cuya función es la de tomar esfuerzos originados por el fraguado, contracciones o dilataciones y permitir que el acero permanezcan en su posición mientras se hace el vaciado del concreto.

Dimensiones de la losa.

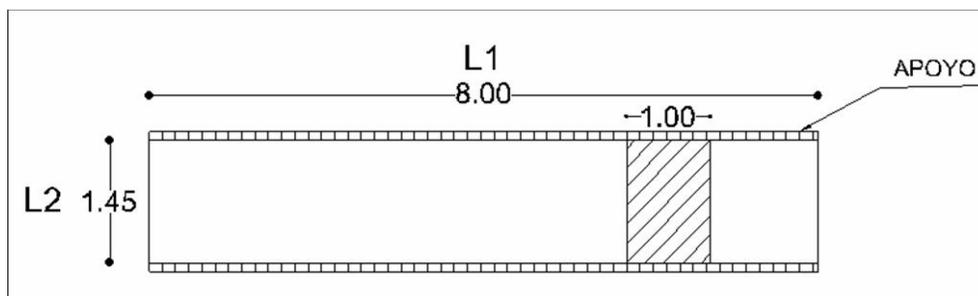


Figura 1.2 Dimensiones de losa empotrada en dos extremos opuestos.

DATOS GENERALES:

$d = ?$

$f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, $fc = 95 \text{ kg/cm}^2$, $fy = 6000 \text{ kg/cm}^2$,

$fs = 3000 \text{ kg/cm}^2$, $n = 14$, $Q = 13.25$,

$b = 100 \text{ cm}$, $j = 0.90$, $r = 2 \text{ cm de recubrimiento}$,

$h = \text{Peralte total} = ?$

De acuerdo al análisis de carga realizado el peso total de la losa, incluida la carga muerta y viva es de **305 kg/m²**.

Cálculo del Momento máximo:

$$M = (W \cdot L_2^2) / 24,$$

$$M = (305 \cdot (1.45)^2) / 24 = \mathbf{26.71 \text{ kgm}},$$

$$d = (M / Q \cdot b)^{0.5} = \mathbf{1.41 \text{ cm}},$$

$h = d + r = 1.41 + 2 = \mathbf{3.41 \text{ cm}}$; sin embargo, se propondrá una losa de 5.0 cm por cuestiones del proceso constructivo.

Cálculo del área de acero principal:

$$A_s = M / (fs \cdot j \cdot d) = 2671 / (3000 \cdot 0.90 \cdot 1.6) = \mathbf{0.61 \text{ cm}^2}.$$

Considerando que la losa será armada con malla electrosoldada calibre 10/10 6/6 y una varilla del No. 3 @ 95 cm tendremos:

No. de piezas. = $0.79 / 0.25 = \mathbf{3.16}$ piezas de malla. Si pasa.

Cálculo de área de acero por temperatura.

$$A_{st} = (0.002 \cdot b \cdot h),$$

$$A_{st} = (0.002 \cdot 100 \cdot 5) = \mathbf{1.00 \text{ cm}^2}.$$

Tomando en cuenta que se usará malla electrosoldada cal. 10/10 - 6/6 se tiene:

No. de piezas = $1/0.025 = 4$ Pzas. Considerando que la malla en un metro lineal tiene 6.66 piezas es suficiente para cubrir este requerimiento.

Revisión por cortante:

$$V = (W*L)/2,$$

$$V = (388.57*1.45)/2 = \mathbf{281.71 \text{ kg.}}$$

Por lo tanto se tiene:

$$v = V/(b*d),$$

$$v = 281.17/(100*5) = \mathbf{0.56 \text{ kg/cm}^2}.$$

El mortero entonces toma:

$$v_c = 0.05*(f_c)^{0.5} = 7.25 \text{ cm}^2 > 0.56 \text{ kg/cm}^2,$$

La losa no fallará por cortante.

Revisión de viga de acero “doble monte” cal. 14 de 2” x 4”.

RAM Advanse

Diseño de Acero

Resumen Diseño AISC

Norma de diseño L R F D

Relaciones de esfuerzos para cada miembro y estado de carga

Rel.f = Relación de esfuerzos para flexión

Rel.v = Relación de esfuerzos para corte

Estac.f = Estación a la cual ocurre Rel. f

Estac.v = Estación a la cual ocurre Rel.v

NOTA.- Los elementos no metálicos no son impresos

Combinación de cargas que intervienen en el diseño:

CM=CARGA MUERTA

CV=CARGA VIVA

SX=SISMO EN X

SZ=SISMO EN Z

C1=0.9CM+SX

C2=0.9CM+SZ

C3=0.9CM-SX

C4=0.9CM-SZ

C5=1.2CM+0.5CV+SX

C6=1.2CM+0.5CV+SZ

C7=1.2CM+0.5CV-SX

$$C8=1.2CM+0.5CV-SZ$$

$$C9=1.2CM+1.6CV$$

$$C10=1.2CM+SX$$

$$C11=1.2CM+SZ$$

$$C12=1.2CM-SX$$

$$C13=1.2CM-SZ$$

$$C14=1.4CM$$

Resultado de los momentos y cortantes actuantes debidas a la combinación de cargas

Miembro	Combinación de cargas	Rel.f	Estac.f[M]	Rel.v	Estac.v[M]	Estatus
						Diseño
32	CM	0.35	0	0.13	0	Bien
32	CV	0.18	0	0.03	0	Bien
32	SX	0.09	0	0.01	0	Bien
32	SZ	0.02	0	0.03	0	Bien
32	C1	0.23	0	0.06	0	Bien
32	C2	0.3	0	0.13	0	Bien
32	C3	0.41	0	0.18	0	Bien
32	C4	0.34	0	0.15	0	Bien
32	C5	0.42	0	0.19	0	Bien
32	C6	0.5	0	0.29	0	Bien
32	C7	0.61	0	0.39	0	Bien
32	C8	0.53	0	0.33	0	Bien
32	C9	0.72	0	0.53	0	Bien
32	C10	0.33	0	0.12	0	Bien
32	C11	0.41	0	0.21	0	Bien
32	C12	0.52	0	0.28	0	Bien
32	C13	0.44	0	0.24	0	Bien
32	C14	0.5	0	0.26	0	Bien

Los resultados indican que la viga canal monten no va a fallar a cortante ni a flexión ante fuerzas causadas por sismos, carga viva y las cargas muertas.

Anexos 2. Presupuesto del sistema constructivo *Ferro-prefab*

PRESUPUESTO DE OBRA (*Ferro-prefab.*)

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
A	EDIFICIO "A"					
A01	TRABAJOS PRELIMINARES.					
TZOM	Trazo y nivelación manual para establecer ejes, banco de nivel y referencias, incluye: materiales, mano de obra y herramienta.	M2	84.0000	2.68	225.12	0.11%
LIMYD	Limpia y desyerbe del terreno, incluye: quema de yerba, y acopio de basura, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	100.0000	7.27	727.00	0.36%
	Total TRABAJOS PRELIMINARES				952.12	0.47%
A02	CIMENTACIÓN					
ECM02IA	Excavación de cepa, por medios manuales de 0 a -2.00 m, en material tipo I, zona A, incluye: mano de obra, equipo y herramienta	M3	18.7800	137.33	2,579.06	1.28%
REMPEB	Relleno con material producto de la excavación, mejorado con cemento-tierra prop. 1:10 compactado con pisón metálico, adicionando agua, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M3	12.8900	375.67	4,842.39	2.40%
ZAPATA 1	Zapata de concreto armado $f_c = 200$ kg/cm ² , de 40 cm de base por 10 cm de peralte, armada con malla electrosoldada cal. 6" x 6" - 10/10. Incluye materiales, mano de obra y herramientas.	ML	49.8900	198.64	9,910.15	4.91%
PLANH5	Plantilla de 3 cm. de espesor de concreto hecho en obra de $F_c = 100$ kg/cm ² .	M2	19.9500	44.18	881.39	0.44%
RETB	Relleno con tepetate, compactado con bailarina al 90% proctor, adicionando agua, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M2	98.4200	81.34	8,005.48	3.97%
REMPEV	Relleno a volteo de material producto de la excavación para en cimentación	M3	0.5990	116.94	70.05	0.03%
	Total CIMENTACIÓN				26,288.52	13.04%
A03	ALBAÑILERÍA					
RS468	Registro de 0.40x0.60x0.80 m. de muros de tabique rojo recocido, asentado con mezcla cemento arena 1:5, con aplanado pulido en el interior, con tapa de 5 cm. de espesor de concreto de $F_c = 150$ kg/cm ² , con marco y contramarco comercial, piso de 8 cm. de espesor de concreto de $F_c = 150$ kg/cm ² , incluye: materiales, acarreos, excavación, mano de obra, equipo y herramienta	PZA	1.0000	728.11	728.11	0.36%
APLF14PB	Aplanado acabado fino en muros de planta baja, con mezcla cemento arena 1:4, incluye: materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	98.4300	64.26	6,325.11	3.14%

PRESUPUESTO DE OBRA (Ferro-prefab.) CONTINUACIÓN

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
FCS08	Firme de 8 cm. de concreto F'c=100 kg/cm2, acabado común, incluye: materiales, acarreo, preparación de la superficie, nivelación, cimbrado, colado, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	90.5100	84.90	7,684.30	3.81%
MAT-AIS	Colocación de material aislante	PZA	70.0000	53.07	3,714.90	1.84%
PRETEL	Pretil de mortero armado	M2	26.4700	288.10	7,626.01	3.78%
JUNTEO	Junteo de piezas prefabricadas	PZA	70.0000	45.83	3,208.10	1.59%
APLR14PB	Aplanado acabado repellido sobre muros, con mezcla cemento arena 1:3, en planta baja, incluye: materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	98.4300	68.27	6,719.82	3.33%
Total ALBAÑILERÍA					36,006.35	17.86%
A04	ESTRUCTURA					
D151543	Cadena de 15x15 cm. de concreto hecho en obra de F'c=200 kg/cm2, acabado común, armado con 4 varillas de 3/8" y estribos del No.2 a cada 20 cm., incluye: materiales, acarreo, cortes, desperdicios, traslapes, amarres, cimbrado, coldado, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	ML	46.3400	169.42	7,850.92	3.89%
MUR-T1	Muro prefabricado tipo 1, de 0.50 m x 2.75 m. Incluye habilitado de acero, colado de pieza, curado, traslado y herramienta.	PZA	67.0000	185.90	12,455.30	6.18%
MUR-T2	Muro prefabricado tipo 1, de 0.50 m x 1 m. Incluye habilitado de acero, colado de pieza, curado, traslado y herramienta.	PZA	25.0000	129.31	3,232.75	1.60%
MON-MUT-T1	Montaje de muro prefabricado tipo 1 de 0.50 m x 2.75 m. Incluye acarreo a una distancia no mayor de 20 m, andamios, materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	67.0000	77.75	5,209.25	2.58%
MON-MOR-T2	Montaje de muro prefabricado tipo 1 de 0.50 m x 1 m. Incluye acarreo a una distancia no mayor de 20 m, andamios, materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	25.0000	55.83	1,395.75	0.69%
HABI-PTR	PTR de 4" x 4" x 3.10 m; cal. 14. Incluye corte, pulido pintado, soldado, materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	21.0000	194.19	4,077.99	2.02%
MON-PTR	Montaje de perfil metálico PTR de 4" x 4" x 3.10 m, Cal. 14. Colado de la base de 40 cm x 40 cm x 10 cm de peralte, con concreto f'c 200kg/cm2. Incluye madera para apuntalamiento, materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	21.0000	103.12	2,165.52	1.07%
ESTMETCUR	Suministro e instalación de estructura metálica a base de vigas monten de 2" x 4", cal. 14. Incluye base para recibir las vigas, materiales y mano de obra.	LOTE	1.0000	14,000.00	14,000.00	6.94%

PRESUPUESTO DE OBRA (Ferro-prefab.) CONTINUACIÓN

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
CUBIERTA	Cubierta de mortero armado prop. 1:3, armada con malla electrosoldada y varillas de 3/8" @ 90 cm en el sentido corto. Incluye aislante térmico, materiales, mano de obra y herramienta.	M2	73.0000	416.44	30,400.12	15.08%
Total ESTRUCTURA					79,973.95	39.66%
A05	HERRERÍA Y ALUMINIO					
SU-CO-VEN1	Suministro y colocación de ventana tipo 1 a base de perfil de aluminio, con dimensiones de 0.90 m x 1.60 m, colocación de vidrio transparente de 6 mm. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	7.0000	1,200.00	8,400.00	4.17%
SU-CO-VEN2	Suministro y colocación de ventana tipo 2 a base de perfil de aluminio, con dimensiones de 0.50 m x 1.60 m, colocación de vidrio transparente de 6 mm. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	3.0000	600.00	1,800.00	0.89%
SU-CO-VEN3	Suministro y colocación de ventana tipo 1 a base de perfil de aluminio, con dimensiones de 0.50 m x 0.80 m, colocación de vidrio transparente de 6 mm. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	2.0000	300.00	600.00	0.30%
SUYCOLPUE R	Suministro y colocación de puerta de puerta abatible de 1m x 2.40 m a base de perfil de aluminio. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	2.0000	1,800.00	3,600.00	1.79%
CAA14180	Cancel para baño de 1.40 x 1.80 m. en dos hojas corredizas a base de perfiles de aluminio anodizado natural, con acrílico opalino de 3 mm, incluye: materiales, herrajes, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta.	PZA	2.0000	1,299.80	2,599.60	1.29%
Total HERRERÍA Y ALUMINIO					16,999.60	8.43%
A06	INSTALACIÓN HIDRO-SANITARIA					
SUYCOLWC	Suministro y colocación de wc	PZA	2.0000	1,950.00	3,900.00	1.93%
SUYCOLAV	Suministro y colocación de Lav.	PZA	1.0000	1,350.00	1,350.00	0.67%
SUYCOLCC	Suministro y colocación de Cespól.	PZA	1.0000	380.00	380.00	0.19%
Total INSTALACIÓN HIDRO-SANITARIA					5,630.00	2.79%
A07	ACABADOS					
PS7901	Piso de loseta Santa Julia de 33.3x33.3 cm. modelo tradicional, color blanco gota, asentado con pegazulejo y juntas de 1/4" en color negro, incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta	M2	66.0000	183.49	12,110.34	6.01%

PRESUPUESTO DE OBRA (Ferro-prefab.) CONTINUACIÓN

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
PS0205	Piso de loseta Santa Julia de 20x20 cm. klinker, color trigo, asentado con pegazulejo y juntas de 1/4" en color negro, incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta	M2	7.5000	212.89	1,596.68	0.79%
PVMDUR	Pintura vinílica en muros marca Comex Du	M2	325.5300	22.46	7,311.40	3.63%
IMPMIP4	Impermeabilizante a base de termofusión.	M2	73.0000	113.99	8,321.27	4.13%
TIROLR	Tirol rústico en plafond a base de cemento blanco-cal-cero fino, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M2	72.0000	59.44	4,279.68	2.12%
Total ACABADOS					33,619.37	16.67%
A08	LIMPIEZA					
LGRUESA	Limpieza gruesa durante la obra. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	M2	100.0000	3.43	343.00	0.17%
LFINA	Limpieza fina de la obra para entrega, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M2	100.0000	16.20	1,620.00	0.17%
Total LIMPIEZA					1,963.00	0.34%
A09	INSTALACIÓN ELÉCTRICA					
INSTA-ELECTRI	Instalación eléctrica	LOTE	1.0000	1,500.00	15,000.00	0.74%
Total INSTALACIÓN ELÉCTRICA					15,000.00	0.74%
Total de Costo directo de obra					216,432.91	100.00%

Anexo 3. Presupuesto del sistema constructivo tradicional.

PRESUPUESTO DE OBRA (Sistema Tradicional)

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
TZOM	Trazo y nivelación manual para establecer ejes, banco de nivel y referencias, incluye: materiales, mano de obra y herramienta.	M2	84.0000	2.68	225.12	0.09%
LIMYD	Limpia y desyerbe del terreno, incluye: quema de hierba, y acopio de basura, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	100.0000	7.27	727.00	0.28%
Total TRABAJOS PRELIMINARES.					952.12	0.36%
A02	CIMENTACIÓN					
EAM02IA	Excavación a cielo abierto, por medios manuales de 0 a -2.00 m, en material tipo I, zona A, incluye: mano de obra, equipo y herramienta	M3	32.2700	94.12	3,037.25	1.16%
D152543	Cadena de 15x25 cm. de concreto hecho en obra de F'c=200 kg/cm2, acabado común, armado con 4 varillas de 3/8" y estribos del No.2 a cada 20 cm., incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, traslapes, amarres, cimbrado, colado, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	M	46.3400	186.41	8,638.24	3.30%
PLANH5	Plantilla de 5 cm. de espesor de concreto hecho en obra de F'c= 100 kg/cm2.	M2	35.6000	85.69	3,050.56	1.16%
REMPEV	Relleno a volteo con material producto de la excavación, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M3	9.4500	47.07	444.81	0.17%
RETB	Relleno con tepetate, compactado con bailarina al 90% proctor, adicionando agua, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M3			8,005.48	3.06%
			98.42	81.34		
CCA671515	Cimiento de concreto F'c= 200 kg/cm2, construido a base de zapata corrida de 70 cm. de ancho por 15 cm. de peralte armado con varillas de 3/8" a cada 15 cm. en ambos sentidos con contrabe de 15 cm. de ancho por 60 cm. de peralte armada con 4 varillas de 1/2" y dos de 3/8", con estribos de varilla de 3/8" a cada 20 cm., incluye: materiales, acarreos, habilitado, cimbrado, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	M	52.2300	587.27	30,673.11	11.71%
MURO-ENR	Muro de enrase con tabicón pesado de 10x14x28 cm asentado con mezcla de cemento arena 1:5, acabado común. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	M2	20.2000	187.68	3,791.14	1.45%
Total CIMENTACIÓN					53,491.98	20.42%
A03	ALBAÑILERÍA					

PRESUPUESTO DE OBRA (Sistema Tradicional) CONTINUACIÓN

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
RS468	Registro de 0.40x0.60x0.80 m. de muros de tabique rojo recocido, asentado con mezcla cemento arena 1:5, con aplanado pulido en el interior, con tapa de 5 cm. de espesor de concreto de F'c=150 kg/cm2, con marco y contramarco comercial, piso de 8 cm. de	PZA	1.0000	961.83	961.83	0.37%
APLF14PB	Aplanado acabado fino en muros de planta baja, con mezcla cemento arena 1:4, incluye: materiales, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	239.5300	97.62	23,382.92	12.45%
FCS08	Firme de 8 cm. de concreto F'c=150 kg/cm2, acabado común, incluye: materiales, acarreos, preparación de la superficie, nivelación, cimbrado, colado, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	90.5100	144.07	13,039.78	4.98%
PRETIL	Pretel con tabicón pesado de 10x14x28 cm asentado con mezcla de cemento arena 1:5, acabado común. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	M2	33.0900	0.00	0.00	
BOQF1:4	Boquilla de aplanado fino a base de mezcla cemento-arena 1:4, incluye: materiales, mano de obra y herramienta	M	31.3000	61.29	1,918.38	0.73%
	Total ALBAÑILERÍA				39,302.91	15.00%
A04	ESTRUCTURA					
MUR-CAR	Muro de carga	M2	102.0000	187.68	19,143.36	7.31%
C151543	Castillo de 15x15 cm. de concreto hecho en obra de F'c=200 kg/cm2, acabado común, armado con 4 varillas de 3/8" y estribos del No.2 a cada 20 cm., incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, traslapes, amarres, cimbrado, colado, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	M	73.9500	127.72	9,444.89	3.61%
C152543	Castillo de 15x25 cm. de concreto hecho en obra de F'c=200 kg/cm2, acabado común, armado con 4 varillas de 3/8" y estribos del No.2 a cada 20 cm., incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, traslapes, amarres, cimbrado, colado, descimbrado, mano de obra, equipo y herramienta.	M	43.5000	167.89	7,303.22	2.79%
T003	Trabe de 15x30 cms. de concreto premezclado de F'c= 250 kg/cm2, armado con 3 varillas del No.5, 4 varillas del No. 4 y estribos del No. 2 a cada 10 cms. acabado común, incluye: cimbrado, descimbra, mano de obra, equipo y herramienta.	M	62.3400	370.28	23,083.26	8.81%
T001	Trabe de 15x45 cms. de concreto premezclado de F'c= 250 kg/cm2, armado con 8 varillas del No. 3 y estribos y grapas del No. 2 a cada 15 cms. acabado comun, incluye: cimbrado, descimbra, mano de obra, equipo y herramienta.	M	7.8000	416.46	3,248.39	1.24%

PRESUPUESTO DE OBRA (Sistema Tradicional) CONTINUACIÓN

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
LOS10320	Losa de 10 cm. de espesor de concreto F'c=200 kg/cm2, armada con varilla del No. 3 a cada 20 cm. en ambos sentidos, incluye: cimbrado acabado comun, armado, colado, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	71.0000	423.26	30,051.46	11.47%
COLUM	Columna de 30 x 30 cm de concreto premezclado de F'c=250 kg/cm2, armado con 8 varillas del No. 4 y estribos del No. 2 a cada 15 cms. acabado común, incluye: cimbrado, descimbra, mano de obra, equipo y herramienta.	M2	8.5000	321.75	2,734.88	1.04%
	Total ESTRUCTURA				95,009.46	36.27%
A05	HERRERÍA Y ALUMINIO					
SU-CO- VEN1	Suministro y colocación de ventana tipo 1 a base de perfil de aluminio, con dimensiones de 0.90 m x 1.60 m, colocación de vidrio transparente de 6 mm. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	7.0000	1,200.00	8,400.00	3.21%
SU-CO- VEN2	Suministro y colocación de ventana tipo 2 a base de perfil de aluminio, con dimensiones de 0.50 m x 1.60 m, colocación de vidrio transparente de 6 mm. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	3.0000	600.00	1,800.00	0.69%
SU-CO- VEN3	Suministro y colocación de ventana tipo 1 a base de perfil de aluminio, con dimensiones de 0.50 m x 0.80 m, colocación de vidrio transparente de 6 mm. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	2.0000	300.00	600.00	0.23%
SUYCOLPU ER	Suministro y colocación de puerta de puerta abatible de 1m x 2.40 m a base de perfil de aluminio. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	PZA	2.0000	1,800.00	3,600.00	1.37%
CAA14180	Cancel para baño de 1.40 x 1.80 m. en dos hojas corredizas a base de perfiles de aluminio anodizado natural, con acrílico opalino de 3 mm, incluye: materiales, herrajes, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta.	PZA	2.0000	1,299.80	2,599.60	0.99%
	Total HERRERÍA Y ALUMINIO				16,999.60	6.49%
A06	INSTALACIÓN HIDROSANITARIA					
SUYCOLWC	Suministro y colocación de wc económico color blanco, incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta	PZA	2.0000	1,950.00	3,900.00	1.49%
SUYCOLAV	Suministro y colocación de Lav. Económico, color blanco, incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta	PZA	1.0000	1,350.00	1,350.00	0.52%
SUYCOLCC	Suministro y colocación de Cespól, incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta	PZA	1.0000	380.00	380.00	0.15%
	Total INSTALACIÓN HIDROSANITARIA				5,630.00	2.15%

PRESUPUESTO DE OBRA (Sistema Tradicional) CONTINUACIÓN

Código	Concepto	Unidad	Cantidad	P. U.	Importe	%
A07	ACABADOS					
PS7901	Piso de loseta Santa Julia de 33.3x33.3 cm. modelo tradicional, color blanco gota, asentado con pegazulejo y juntas de 1/4" en color negro, incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta	M2	66.0000	183.49	12,110.34	4.62%
PS0205	Piso de loseta Santa Julia de 20x20 cm. klinker, color trigo, asentado con pegazulejo y juntas de 1/4" en color negro, incluye: materiales, acarreos, cortes, desperdicios, mano de obra, equipo y herramienta	M2	7.5000	212.89	1,596.68	0.61%
PVMDUR	Pintura vinílica en muros marca Comex Du, a dos manos, incluye: aplicación de sellador, materiales, preparación de la superficie, mano de obra equipo y herramienta.	M2	325.5300	22.46	7,311.40	2.79%
IMPPIP4	Impermeabilizante a base de termofusión.	M2	73.0000	113.99	8,321.27	3.18%
TIROLR	Tirol rústico en plafond a base de cemento blanco-cal-cero fino, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M2	72.0000	59.44	4,279.68	1.63%
	Total ACABADOS				33,619.37	12.83%
A08	LIMPIEZA					
ACA-VEN	Limpieza gruesa durante la obra. Incluye materiales, mano de obra y herramienta.	M2	100.0000	3.43	343.00	0.13%
LGRUESA	Limpieza fina de la obra para entrega, incluye: mano de obra, equipo y herramienta.	M2	100.0000	16.20	1,620.00	0.62%
	Total LIMPIEZA				1,963.00	0.75%
A09	INSTALACIÓN ELÉCTRICA					
INSTA-ELECTRI	Instalación eléctrica	LOTE	1.0000	15,000.00	15,000.00	5.73%

Total de Costo directo de obra 261,968.44 100.00%