DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE COMPONENTES CONSTRUCTIVOS CON TIERRA CRUDA

Lucía Elizabeth Arias* - Carlos Eduardo Alderete - Rafael Francisco Mellace
Stella Maris Latina - Mirta Eufemia Sosa - Irene Cecilia Ferreyra
Centro Regional de Investigaciones de Arquitectura de Tierra Cruda (CRIATiC)
Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional de Tucumán
Av. Roca Nº 1900 - Tucumán - Tel. 0381-4364093 - int. 7912/19
arias-alderete@arnet.com.ar, luciaearias@gmail.com

Palabras clave: estructura - sismorresistencia - tierra estabilizada

Resumen

El edificio sede del CRIATiC, prototipo experimental, en el que se aplican y monitorean innovaciones tecnológicas, representa en la actualidad una de las construcciones de tierra cruda de mayor importancia en la región. Está integrado por cinco cuerpos independientes en los que se aplican técnicas tradicionales y evolucionadas correspondientes a los tres principales sistemas constructivos: sistema monolítico (tapial); sistema de mampostería (BTC y BaTc) y sistema mixto (quincha y entortado). El diseño arquitectónico responde a requerimientos de uso en función de su destino, por lo cuál los cinco módulos se resuelven con volumetrías diferentes y distintos sistemas constructivos

Desde el punto de vista estructural, dado que la obra se encuentra emplazada en zona de riesgo sísmico (zona II-riesgo moderado), se planteó un diseño particular para cada módulo, afín a la resolución constructiva adoptada.

Si bien en el diseño arquitectónico del conjunto se tuvieron en cuenta las recomendaciones generales de sismorresistencia respecto de, por ejemplo, regularidad de formas, distribución de masas y rigideces, tamaño y ubicación de aberturas etc., en particular cada módulo responde en función del sistema estructural propuesto. En el trabajo se describen los criterios adoptados en cada caso.

La determinación de las solicitaciones por acciones dinámicas se basó en el método de la fuerza estática equivalente, descripta en el Reglamento INPRES-CIRSOC 103, norma que se usó como referencia, tanto para el dimensionado como para los ensayos físico-mecánicos de sus componentes, por analogía a lo establecido para otros materiales.
La determinación previa de solicitaciones por acciones estáticas y dinámicas permitió optimizar las dosificaciones de las mezclas a fin de obtener máxima economía en bloques, morteros de asiento, tapial, etc., lo que en la práctica resultó muy importante ya que permanentemente se debió reformularlas conforme al tipo de tierra disponible.

Las conclusiones del trabajo confirman la validez de aplicar la normativa existente, dado el similar comportamiento estructural de los elementos constructivos empleados respecto de los resueltos con materiales convencionales. La ocurrencia de tres sismos de mediana intensidad ocurridos durante la ejecución de la obra, sin consecuencia alguna, ratifican la hipótesis sustentada.

Introducción

La estabilidad de las construcciones afronta su momento de mayor riesgo, cuando es solicitada por la acción dinámica que ejercen los movimientos sísmicos. La energía liberada se transmite por el suelo afectando todo lo que en él se encuentra adherido; es precisamente en ese instante cuando deben responder apropiadamente, tanto por su diseño arquitectónico, estructural y constructivo como por su calidad de ejecución para brindar la seguridad requerida.

En la actualidad el diseño y construcciones de edificios realizados con materiales "convencionales" (ladrillos cerámicos macizos, bloques de hormigón, hormigón armado, etc.), se rigen por normas que determinan formas, dimensiones, disposiciones constructivas, propiedades características del material, componentes y elementos constructivos y procedimientos operativos, atendiendo requisitos de estabilidad y resistencia.

Contrariamente a lo que ocurre en el campo de la construcción convencional, en general no existen normas técnicas que establezcan las exigencias a que deben ajustarse las construcciones que utilizan la tierra cruda como material principal, en cualquiera de sus formas.

Se carece de una herramienta reglamentaria que especifique, por ejemplo, las reales posibilidades de carga y sobrecarga de las estructuras en función del material utilizado y su adecuado comportamiento frente a diversas solicitaciones a que pudieran ser sometidas; de esta forma las obras que corrientemente se ejecutan resultan sísmicamente vulnerables.

Esta realidad cobra importancia cuando se trata de construir con tierra en zonas de riesgo sísmico como lo es Tucumán y la región del NOA, generando gran resistencia su aceptación por parte de la población y en especial por organismos oficiales.

Al decir "construcciones de tierra", se dispara automáticamente la idea de "barro - adobe", socialmente ligada con "precariedad, insalubridad, pobreza"; si además se dice "sismo" es inevitable relacionarlas con "tragedia". Estos prejuicios, basados en verdades a medias, constituyen el argumento indiscutido de los detractores de la tecnología de tierra.

Desde el CRIATiC, se trabaja para revertir esta idea tan arraigada en nuestra sociedad y demostrar que la tierra cruda es un material natural abundante que ofrece alternativas ciertas para ser utilizado en la construcción de edificios; estudiado con métodos científicos de análisis físicos, químicos, mecánicos, estructurales, etc., permite obtener con técnicas apropiadas un producto final de alto desempeño.

Sus líneas de trabajo buscan profundizar sobre ello y, paralelamente, sobre conceptos de diseño sismorresistente, para obtener la necesaria confiabilidad estructural. Con tal propósito, en la edificación del CRIATiC se utilizan diversas técnicas en la construcción de muros y techos con sistemas de mampostería (bloques comprimidos BTC y BaTc) y de tapial (muros monolíticos de tierra encofrada).

(Fig.1) BTC, BaTc y Tapial

Las investigaciones realizadas desde hace años, han posibilitado el diseño y ejecución de componentes y elementos constructivos con propiedades físicas y mecánicas reguladas, mediante el adecuado manejo de mezclas y técnicas de producción. Así se pudo definir texturas, colores, formas, dimensiones, pesos, estabilidad volumétrica, absorción, compacidad, resistencias mecánicas, etc., según requerimientos de diseño arquitectónico, estructural y constructivo; de confort higrotérmico y economía, etc.

Esto fue particularmente importante ya que, dada la envergadura de la obra se tuvo que trabajar con distintos tipos de suelo, por lo cuál se debió rediseñar permanentemente las mezclas para mantener las propiedades características preestablecidas. Estas propiedades se ajustaron a las resistencias a compresión mínima exigida por las normas para los distintos componentes, morteros y mamposterías determinadas mediante normalizados según especificaciones CIRSOC 103, Tomo III (Cap. 5 y 6). En el caso del tapial de adoptaron los mismos valores considerando un comportamiento elástico del mismo.

Los ensayos realizados dieron los siguientes valores:

a- Mampuestos

Tipo de mampuesto	f'_u	f_{um}	$f_{m\ máx}$	Nº de muestras	Aplicación
BTC	5,0 MPa	7,0 MPa	0,12	30 u	Mampostería c/junta de asiento
BaTc	5,0 MPa	7,0 MPa	0,12	30 u	Mampostería s/junta de asiento

(Tab.1) Resistencias características mampuestos

Donde:

f'_u: resistencia característica del BTC y BaTc
f_{um}: valor promedio de las resistencias medidas
f_m: coeficiente de variación

b- Morteros

Tipo de mortero	Calidad de resistencia	Resistencia mín a compresión a 28 días	Dosificación	Aplicación
N	Normal	5,0 MPa	1: cemento – 2: suelo 1: arena	Mampostería
I	Intermedia	10,0 MPa	1: cemento – 3: arena	Bóveda de cañón corrido

(Tab.2) Resistencias mínima a compresión de morteros

c- Muro resistente

Sistema constructivo	f'_u	Tipo de mortero	Resistencia mín a compresión 28 d	f_1	f'_m
Mampostería	5,0 MPa	N	5,0 MPa	0,35	1,75 MPa
Tapial	10,0 MPa	-	10,0 MPa	0,35	3,50 MPa

(Tab.3) Resistencia a compresión sistemas constructivos (mampostería y tapial)

Donde:

$\mathbf{f'_u}$: resistencia a compresión de los mampuestos
$\mathbf{f'_m}$: resistencia a compresión de la mampostería
$\mathbf{f_1}$: factor de correlación

Diseño Sismorresistente
En cada uno de los cuatro módulos que integran la obra se definió un planteo estructural diferente, acorde a su volumetría y tipo de sistema constructivo adoptado, fundado en los conceptos generales del diseño sismorresistente aplicable, a saber:

- *Regularidad de forma*
  Se diseñó cada volumen siguiendo una distribución modular que se repite obteniendo formas cuadradas o rectangulares, con simetría según las direcciones principales consideradas ortogonales.

- *Densidad de muros*
  En ambas direcciones se dispuso aproximadamente la misma distribución a fin de distribuir la fuerza sísmica en forma proporcional en cada uno de ellos.

- *Distribución de masas y rigideces*
  Los muros se distribuyeron simétricamente en planta para disminuir los efectos torsionales a valores mínimos. Se determinaron sus dimensiones (altura, espesor, largo) y la disposición y tamaño de aberturas de forma de tal que se evitaran excentricidades adicionales entre el centro de masa y el centro de rigidez de cada volumen y consecuentemente la fuerza sísmica actuante en cada uno de ellos.

- *Desplazamiento relativo*
  Para controlar el desplazamiento relativo de los muros se los vinculó con arriostramientos horizontales (inferiores y superiores) a nivel de cimientos y coronamiento a fin de disminuir las solicitaciones por flexión y corte en cada paño y en la unión entre éstos.
- *Ductilidad*
  Dada la notable rigidez, característica de este tipo de construcciones, fue necesario dotarla de la ductilidad apropiada para disipar, en su caso, la energía transmitida por la aceleración del suelo. Para ello se consideraron distintas alternativas como disposiciones constructivas, elementos y materiales que verificaran la hipótesis de cálculo (ver punto 2 de Soluciones Propuestas).

- *Valoración de esfuerzos*
  Se adoptó para evaluar la acción sísmica, el método de la fuerza estática equivalente, recomendado en el reglamento CIRSOC 103 – Parte I.
  La distribución de esfuerzos se realizó mediante el método de las áreas de influencia por las características del diseño. Los distintos elementos constructivos fueron diseñados para absorber la tensión básica de corte y verificados de acuerdo a las recomendaciones del reglamento CIRSOC 103 – Parte III, siempre que fuera posible.

Análisis de soluciones alternativas
Al analizar las soluciones factibles de aplicar en cada volumen, se planteó inicialmente la posibilidad de evitar el uso de hormigón armado como estructura sismorresistente. Para ello se consideraron aspectos relacionados con la compatibilidad de materiales, el impacto ambiental (ecología), economía y antecedentes históricos de construcciones que hoy perduran en áreas sísmicas, etc. al explorar soluciones alternativas que absorbieran las fuerzas de corte coplanar en los muros de BTC. En todos los casos se planteó arriostrar los muros horizontalmente a fin de controlar los desplazamientos relativos a causa de las aceleraciones del suelo. Algunas alternativas se exponen a continuación con el propósito de explicar cómo se llegó a la solución finalmente adoptada.

1- Variación de masas

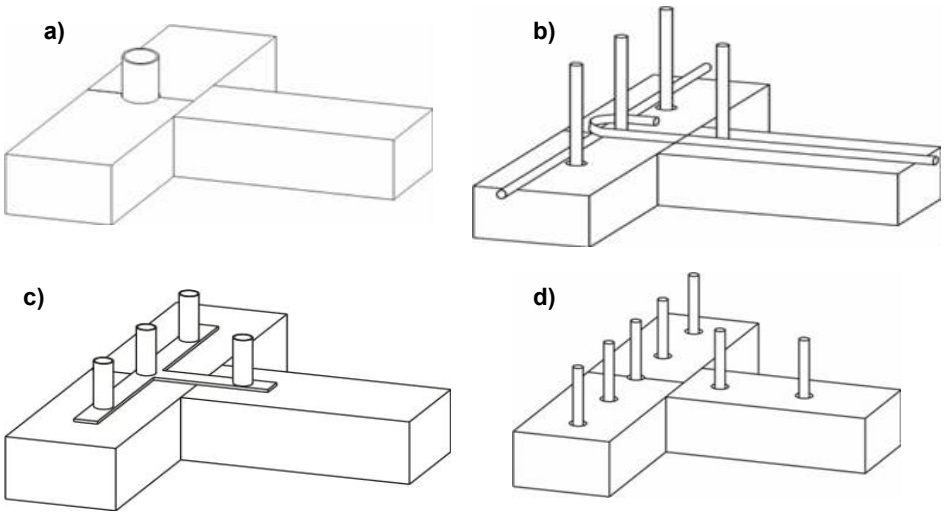
Esta solución requería aumentar el espesor de los muros conforme a la distribución en altura de las fuerzas de corte o bien incrementar considerablemente las secciones en nudos con lo cual se aumentaba la rigidez en perjuicio de la ductilidad. Por otra parte, al generar variaciones bruscas de rigidez se favorecía la posibilidad de corte en la unión vertical entre muros y por otra, significaba un incremento de costos no despreciable. Sumado a ello la escasa resistencia a tracción por corte diagonal de la mampostería, resulta claro por qué se desechó esta alternativa.

2- Refuerzos metálicos

Se analizó la posibilidad de utilizar bloques perforados para alojar en ellos refuerzos verticales metálicos (tubos o barras de acero) en:

- encuentros de muros (Fig. 2a- 2b y 2c)
  Esta solución aparentemente factible desde el punto de vista técnico, resultó extremadamente complicada de ejecutar en la práctica. Además de requerir de intervención de mano de obra calificada para la confección de grapas, anclajes, uniones, etc, se incrementaba considerablemente el tiempo y costo de obra.

- Distribuidos verticalmente en la longitud del muro (Fig. 2d)
  La incorporación de barras de acero de ϕ 8mm ó ϕ 10 mm distribuidas a lo largo de los muros, resolvía en principio el aspecto técnico - estructural pero complicaba la ejecución de los trabajos en obra y obligaba a reforzar el sector de nudos, significando por otra parte una importante cantidad de armadura y consecuentemente mayores costos.



(Fig. 2) Refuerzos metálicos

3- Refuerzos de madera

Se consideró el uso de refuerzos de madera en formas de escuadrías (secciones macizas o compuestas), inclusive el empleo de cañas bambúceas, conforme a los antecedentes bibliográficos. La generalizada tendencia de combinar estos materiales de origen vegetal con la tierra cruda por razones de compatibilidad, disponibilidad, etc., contrasta con las condiciones particulares del medio local, donde la excesiva humedad ambiente exige un tratamiento de protección y mantenimiento permanente para evitar la aparición de fisuras en las zonas de contacto por efecto de las variaciones volumétricas que dificultan la apropiada adherencia con los componentes básicos de los muros y el trabajo solidario ante la acción de un sismo.

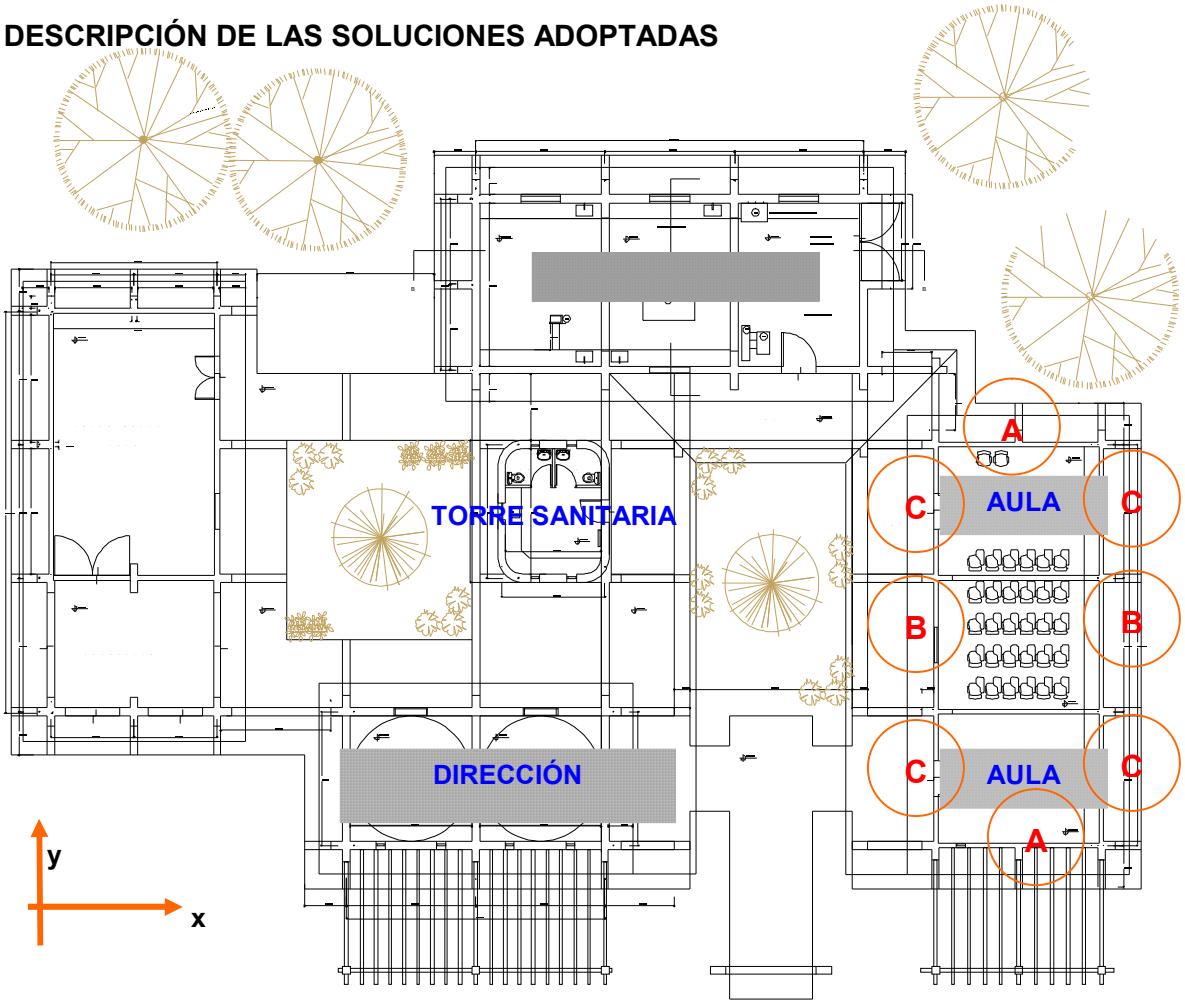
4- Refuerzos de hormigón armado

Como resultado de lo antedicho, se decidió finalmente el uso de de refuerzos (encadenados verticales y horizontales) de hormigón armado, por las siguientes razones:

- Estructuralmente cumplen con los reglamentos vigentes y con los criterios usuales de ingeniería sismorresistente. Los encadenados verticales colaboran para mantener la integridad del muro anclándolo a los encadenados horizontales y a los cimientos, restringiendo la flexión perpendicular y el corte coplanar.

- Constructivamente responden a una modalidad ampliamente conocida por lo que su ejecución resultó sencilla para la mano de obra disponible, debiéndose sólo verificar el cumplimiento de las recomendaciones de normas existentes, Del análisis de costo efectuado, considerando todas los factores involucrados (materiales, mano de obra y tiempos de ejecución) resultó el más recomendable para lograr el fin buscado (eficacia constructiva-estructural y economía).

DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES ADOPTADAS



(Fig. 3) Planta general CRIATiC

1. Modulo-Laboratorio

El cuerpo destinado al laboratorio se desarrolla en tres módulos de 4,95 m de ancho y 7,00 m de largo, cubriendo una superficie total de 104 m^2. Su diseño arquitectónico-funcional responde a la necesidad de espacios libres importantes en su interior. Su volumetría se define con cerramientos verticales (CV) de 3,60 metros de altura realizados con sistema de mampostería. El techo resuelto con tres bóvedas de cañón corrido, respeta la expresión formal de las construcciones existentes, cubriendo una superficie total de 140 m^2 aproximadamente, en proyección horizontal en planta.

Con el objeto de verificar la aplicabilidad de la normativa se diseñaron los distintos elementos constructivos, respetando las exigencias del CIRSOC 103, Parte III y los Proyectos de reglamento CIRSOC 501 y CIRSOC 501-E, (discusión), todos referidos a las construcciones de mamposterías.

Los CV se diseñaron como muros resistentes (mampostería encadenada simple s/clasificación CIRSOC 103, Parte III, cap. 7). Estos se confinan con encadenados horizontales y verticales de hormigón armado, vinculados entre sí. Los mampuestos de BTC unidos con mezcla de asiento se disponen según aparejo francés; fueron ensayados en laboratorio, de acuerdo a lo establecido en los cap. 5 y 6 del CIRSOC 103, Parte III.

En el diseño de los muros se verificó el cumplimiento de la norma, respecto de:

Altura muro:	H = 3,30 m.	(entre encadenados horizontales I-S)
Longitud muro:	L = 4,65 m.	($L_{máx}$ = 6 m)
Espesor:	e = 300 mm.	
Relación H/L	E = 0,71	(< 2,6 $L_{máxima}$)
Superficie muro:	A = 15,30 m^2	($A_{máx}$ = 25 m^2);
Área Ventanas:	A_{abv}= 2,25 m^2	(<35 % A pared);
Área puertas:	A_{abp}= 3,8 m^2	

Las aberturas se ubicaron centradas respetándose las recomendaciones respecto a distancias mínimas a los bordes y la relación vacío/lleno en cada paño.

La vinculación de los paños de muro con los encadenados verticales se logró con dos barras de acero de 6 mm de diámetro y 0,60 m. de longitud, colocados horizontalmente en juntas de mortero cementicio cada cuatro hiladas (aproximadamente 0,50 m).

Los encadenados se calcularon considerando el comportamiento anelástico de la mampostería, como condición de máximo riesgo. Las armaduras se determinaron en función de las solicitaciones actuantes reforzando las zonas críticas de cada elemento con la densidad de estribos requeridas por las tensiones de corte.

En todos los casos se trabajó con acero tipo III DN y hormigón H13 ($\sigma`_{bk}$= 13 MPa resistencia última).

El diseño del techo en cuanto a forma, responde al estilo arquitectónico del entorno en el cual fue emplazada la obra y a la intención de difundir y extender el uso del BTC a otro tipo de soluciones constructivas. Para ello, se apropió un sistema conocido, bóvedas de cañón corrido, que mediante una técnica de ejecución sencilla, rápida y económica, posibilitó su construcción con el auxilio de cimbras deslizantes desarrolladas en el CRIATiC.

El adecuado comportamiento estructural de este tipo de solución fue verificado para cargas estáticas y dinámicas en techos (bóvedas cerámicas) existentes hace más de 30 años en la FAU.

El fundamento estructural es simple: por un lado, el perfil de la generatriz asegura el trabajo del BTC a compresión pura; por otro, una capa de hormigón armada colada in situ absorbe las solicitaciones eventuales de tracción que pudieran generar acciones dinámicas (viento, sismo etc.).

Las bóvedas tienen una luz de 4,65 m., 1,40 m. de flecha y un largo total de 8,30 m. El diseño de la traza más conveniente se estudió y verificó mediante ensayos previos, para adecuar formas y estados tensionales.
En su diseño, se intentó con una traza circular, pero trabajar dentro de los valores recomendables de luz, flecha, radio, etc., implicaba aceptar flechas demasiado bajas que no daban el perfil buscado. Se planteó también una traza elíptica, pero el estado de solicitaciones generaba esfuerzos de flexión en el arranque.
La solución en ambos casos requería un incremento de altura de las vigas en el arranque de las bóvedas, lo que no resultaba posible debido a que, en un caso no se podía perder la altura libre interior y en otro, no se podía aumentar la altura de los CV por estar al límite de los valores exigidos por normas para muros resistentes de mampostería.
Finalmente se decidió trabajar con una traza parabólica (inicialmente resistida desde el punto de vista formal) por responder adecuadamente a la línea de presiones.

Las características de los bloques y morteros se ajustaron a los valores exigidos por las normas para su uso como muros resistentes de mampostería simple.

Tipo de mampuesto	f'_u	Tipo de mortero	Resistencia mín a compresión 28 días	f_1	f'_m
BTC	5,0 MPa	I	10,0 MPa	0,5	2,25 MPa

(Tab.4) Resistencias para mampostería de BTC
Donde:

- f'_m: resistencia a compresión de la mampostería
- f'_u: resistencia a compresión de los mampuestos
- f_1 : factor de correlación
- **I** : resistencia intermedia. Se utilizó mortero cementicio MC 1:3 (cemento: arena)

Dado que el eventual efecto de fuerzas dinámicas actuando lateralmente sobre las bóvedas provocaría el desplazamiento de la línea de presiones fuera del tercio medio de la sección, generando esfuerzos de tracción por flexión en los bordes, se resolvió disponer una cáscara de hormigón armado de 4,00 cm. de espesor con malla electro soldada de acero ø 4,20 mm. y 15,00 cm. x 150,00 cm. de abertura.

2. Modulo-Aulas

El diseño arquitectónico formal y el planteo estructural mantienen idénticos criterios a los expuestos para el módulo- laboratorio. La diferencia radica en el tipo de CV adoptado, que responden a sistemas constructivos distintos.
En este caso se dispusieron paños laterales en la dirección del eje x-x, (paños A) construidos con tierra estabilizada compactada in situ (tapial de 0,30 cm. de espesor). En la dirección y-y, se construyeron muros resistentes de mampostería armadas encadenada (BTC) del mismo espesor, con juntas de asiento y refuerzos horizontales (paños B) y muros de mampostería encadenada armada de 0,18 cm. de espesor, sin juntas de asiento (BaTc-I sistema LAMARS) en los extremos (paños C), tal como se indica en (Fig. 3).

No obstante no ajustarse estrictamente a algunas de las recomendaciones establecidas en proyecto de Reglamento CIRSOC 501 y 501-E (en discusión) para estructuras de mampostería, referente a la variación del tipo de materiales, el comportamiento global de la estructura a partir del análisis particular de sus componentes permite prever una respuesta eficiente ante solicitaciones sísmicas; en efecto:

- El edificio en su totalidad está dotado de un reticulado espacial materializado por encadenados horizontales y verticales de hº aº que confinan cada paño de muro. Este reticulado, sin

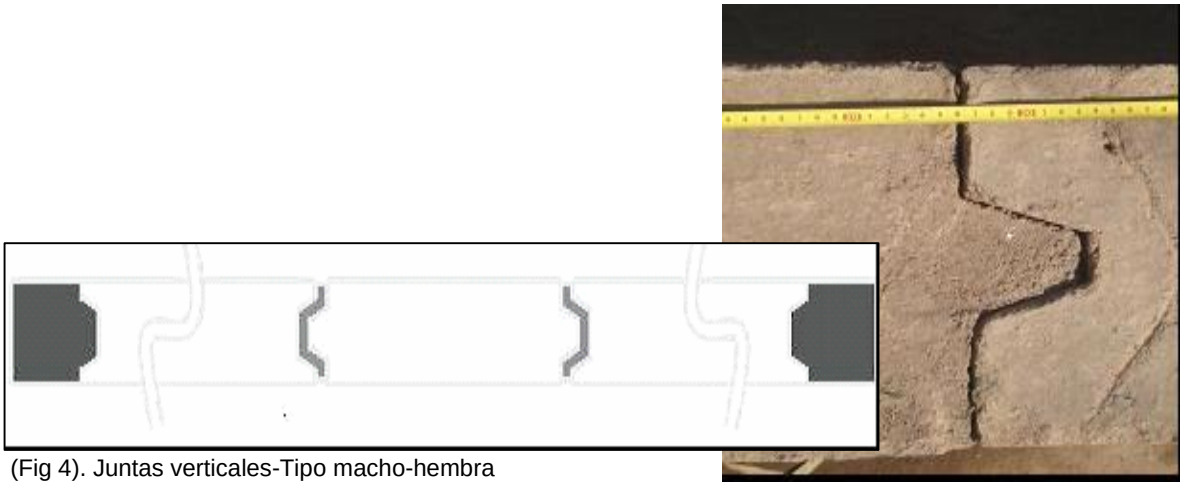
barras de extremo libre, fue diseñado y calculado para absorber el 100 % de la fuerza dinámica, suponiendo para los muros un comportamiento no lineal durante la excitación sísmica.

- Cada muro se dispuso conforme a las características de sus componentes, de modo de conservar la simetría de formas y la regularidad de masas y rigideces a fin de evitar excentricidades relativas entre el centro de acción de la fuerza sísmica y el centro de reacción de la estructura. De esta manera se evita la ocurrencia de efectos torsionales que incrementarían el valor absoluto de la fuerza sísmica solicitante sobre cada elemento.

- Los muros de mamposterías con juntas de asiento (paños B), presentan las mismas características constructivas de los del módulo-laboratorio; se agregan en este caso, refuerzos longitudinales para mejorar la ductilidad y mantener la integridad del conjunto. Esto responde a lo establecido en el reglamento CIRSOC 103 Parte III, art.7.8. Esta armadura absorbe las fuerzas de tracción que se producen en los muros por acción de corte diagonal, cuando el muro se plastifica por figuración.

- Los muros de mampostería sin juntas de asiento (paños C), se dispusieron en forma colineal con los muros con juntas y en la determinación de su espesor (180mm.) se tuvo en cuenta todas las disposiciones reglamentarias respecto de longitudes, alturas y áreas de paño; áreas máximas de aberturas; relación vacíos/lleno etc. Con ello se satisface además los requisitos para un adecuado comportamiento higrotérmico. El hecho de que los componentes básicos (BaTc-I) se articulan entre sí mecánicamente sin junta de asiento, le otorga mayor ductilidad a la mampostería, favoreciendo la disipación de energía en caso de sismos. La inclusión de armadura longitudinal, contribuye a la resistencia a compresión y flexión, al tiempo de mantener la integridad del muro si éste abandonara su comportamiento elástico.

- Los muros monolíticos (tapial) se dispusieron en los planos laterales o cabeceras del módulo-aulas (paños A). Al carecer de las juntas de asiento propias del sistema de mampostería (generadoras de eventuales planos de falla) ofrece mejores respuestas frente a las solicitaciones de compresión y de corte paralelo y diagonal al eje del paño. Dado que su comportamiento se puede asimilar a la de un tabique de baja ductilidad con escasa respuesta a tracción y flexión, se diseñaron soluciones constructivas para mejorar su comportamiento estructural, resolviendo juntas verticales (tipo macho-hembra) (Fig. 4) dispuestas en los bordes del tercio medio de la longitud del muro, lugar donde las fuerzas de corte perpendicular son aún más reducidas. La idea fue incorporar, como una especie de rótula plástica, un disipador de energía en esos planos transversales.



(Fig 4). Juntas verticales-Tipo macho-hembra

3. Modulo-Torre servicios

En su resolución se aplicó la técnica de muros monolíticos, dispuestos según una distribución modular en planta que permite la utilización de sólo un par de moldes (tapialeras) de idéntico diseño. Estructuralmente se comporta como un tubo rígido de paredes portantes y de espesor constante (0,30 cm.), donde las aberturas fueron dispuestas de tal manera de lograr simetría de formas, masas y rigideces.

Se aplicaron los principios generales de composición estructural especificados en el capítulo 8 del reglamento CIRSOC 103 Parte III. Los muros se encuentran encadenados horizontalmente a nivel inferior, medio y superior, para controlar los desplazamientos relativos de cada paño durante posibles efectos sísmicos. A mitad de su altura (entrepiso de servicio) y vinculada al encadenado, se colocó una placa rígida conformada por una losa de viguetas premoldeadas con capa de compresión de hormigón de 4,00 cm, que estáticamente colabora para soportar cargas gravitatorias, respetando lo indicado en el CIRSOC 103 Parte III, párrafo b, art. 4.1.1.2. Considerado como un diafragma resistente, la distribución de las solicitaciones a ese nivel se distribuirá proporcionalmente a la rigidez de cada muro, que al ser aproximadamente iguales asegura el trabajo solidario de los cuatro módulos del tapial.

Los encadenados se vinculan en el sentido vertical con barras de acero tipo III de ø10, 00 mm. espaciados cada 60,00 cm, que, inmersos en la masa del tapial, arrancan desde el cimiento y finalizan en el encadenado a nivel del coronamiento. Esta armadura colabora además en la absorción de las solicitaciones por corte en la dirección del muro; su sección se determinó considerando un comportamiento inelástico de los muros, como situación de máximo riesgo.

La resolución constructiva responde a idénticos criterios aplicados en los muros cabeceros del módulo-aula, adoptándose el mismo tipo de juntas de construcción para absorber eventuales movimientos por retracción de secado y a la vez incorporar un mecanismo disipador de energía a modo de rótula plástica para mejorar la ductilidad global de la construcción.

En el diseño de los muros, se aplicaron las pautas del CIRSOC 103 Parte III y sus proyectos 501 y 501-E en lo referente a espesor, altura y longitud de paño, tomando para éste la distancia entre dos juntas constructivas verticales (se las considera como dispositivos de ductilidad).

Las dimensiones de las aberturas son inferiores al 10 % de cada paño y están reforzadas por una estructura resistente de hormigón armado premoldeado a modo de reja y marco rígido. En antepechos y dinteles se colocaron armaduras horizontales pasantes cada 60 cm a cada lado de los mismos.

Con respecto al material, se realizaron pruebas de laboratorio para determinar las dosificaciones adecuadas en función del tipo de tierra disponible, a fin de asegurar a los muros la capacidad de responder a solicitaciones estáticas y dinámicas bajo comportamiento elástico.

Los datos obtenidos se sintetizan a continuación:

Composición tierra (%)				**Dosif Tierra/cemento**	$f_u = 0{,}65\ f'_{um}$	f'_{um}	f_u	σ_f	$\tau_\perp$	τ_d
L	**Arc**	**Ar**	**IP**		**(MPa)**					**MPa**
60	30	10	8-10	1:8	6,5	10,7	0,12	0,10		4

(Tab 5) Dosificaciones y resistencias para tapial

4. Modulo-Dirección

Se adoptó una volumetría dada por dos módulos idénticos en superficie y forma a los del conjunto; pero con una altura más baja, acorde a su destino.

Los CV se ejecutaron con mampostería de BTC con juntas de asiento, mientras que el techo se resuelve con cúpulas cilíndricas sustentadas sobre una losa de hormigón armado (acero tipo III y hormigón de 13,00 MPa) que vuela hacia los laterales de los muros 0,60 m.; en el centro una viga anular de igual diámetro recibe las cargas de cada cúpula.

Estructuralmente, el techo se considera como cerramiento horizontal con capacidad resistente a cargas estáticas y dinámicas, sin llegar a conformar un diafragma resistente para la distribución de esfuerzos y solicitaciones. A nivel de coronamiento las deformaciones se controlan con los encadenados superiores de hormigón armado. A diferencia de los casos anteriores se distribuye el peso del techo en todos los muros perimetrales uniformando de esta manera, el estado de solicitaciones en cada uno.

Las cúpulas, se resolvieron con ladrillos cerámicos macizos de 15,00 cm. de espesor, alternando cada cuatro hiladas, una de BTC asentados con mortero aéreo reforzado (MAR), en proporciones ¼:1:3 (cemento: cal: arena). Tienen un diámetro de 4,00 m. y 1,40 m. de flecha, con generatriz circular. Para su ejecución se utilizó un compás diseñado para asegurar la horizontalidad de las hiladas y una curvatura circular y constante. Exteriormente están revestidas con una capa de hormigón de 4,00 cm. de espesor y malla electro soldada de acero ø 4,20 mm. y 15,00 cm. x 150,00 cm. de abertura para absorber las posibles tracciones que pudieran surgir por efectos de las acciones sísmicas.

Las cargas generadas son transmitidas al suelo de fundación a través de muros resistentes de mampostería encadenada armada dispuestos, con el mismo concepto que en los módulos laboratorio y aula, en forma horizontal y vertical, vinculados entre sí espacialmente y confinando los muros; la diferencia en este caso radica en que se adoptó un espesor de 15,00 cm., como una alternativa acorde a la menor altura de estos CV (2,80 metros).

Ajustado al planteo arquitectónico modular como objeto formal de diseño, los muros del módulo-dirección no se ajustaban estrictamente por sus dimensiones a los valores exigidos en las normas. La longitud de diseño de 4,65 m. supera en 15% la recomendada por el CIRSOC 103 Parte III (art. 9, párrafo 9.2, tabla 13) y proyecto CIRSOC 501-E (cap. 7, art. 7.2.2 y tabla 4) para muros resistentes de mampostería de 150 mm. de espesor; ello hubiera permitido importantes esfuerzos de tracción producidos por excentricidad de las cargas verticales durante la acción sísmica, cuando ésta actúa perpendicular al plano del muro.

Para salvar tal situación, se ejecutó un contrafuerte de hº aº 1,00 m. de longitud y 15,00 cm. de espesor en el centro de cada paño en correspondencia con las aberturas, hasta la altura del antepecho. Este tabique inserta verticalmente sus armaduras al encadenado inferior y a las armaduras horizontales del muro y por los laterales de las aberturas al encadenado superior. Horizontalmente se dispusieron armaduras pasantes ancladas en los muros 60,00 cm a cada lado.

En el marco cajón de las carpinterías se coló un hormigón de granza fina para que trabajara con las armaduras pasantes como un enmarcado de hormigón armado, reforzándose de esta forma la zona más solicitada por los esfuerzos de corte en el plano del muro en sentido vertical. Esa solución posibilitó considerar dos paños de menor longitud enmarcados a ambos lados de las aberturas, conforme a las pautas de diseño recomendados por la norma.

Conclusiones

Los resultados obtenidos, aún cuando restan analizar futuros datos del monitoreo a que se someterán todos los elementos constructivos de la obra, confirman la validez de aplicar la normativa existente para materiales convencionales, dado el similar comportamiento estructural verificados al presente. La ocurrencia de tres sismos de mediana intensidad durante la ejecución sin consecuencia alguna, ratifican hasta aquí la hipótesis sustentada.

Se confirma la convicción de que la tierra cruda estudiada con rigor técnico-científico mediante análisis físicos, químicos, mecánicos, estructurales, y aplicada con técnicas y sistemas constructivos apropiados es un material que ofrece posibilidades ciertas de obtener un producto final -el edificio- estructuralmente confiable.

Por otra parte el modelo de gestión, interactuando el CRIATiC con organismos oficiales y la participación durante todo el proceso de mano de obra no calificada (desempleados beneficiarios de programas asistenciales), sumados a la facilidad de transferir la experiencia a otros campos de la comunidad, alientan la posibilidad de generar emprendimientos productivos en los sectores socialmente más vulnerables de la región.

Los autores agradecen la colaboración al Arq. Maximiliano Rapisarda

Bibliografía

*PROYECTO DE REGLAMENTO CIRSOC 501. *Reglamento argentino de estructuras de mamposterías.* INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Buenos Aires, Argentina.2005. (Proyecto en discusión pública).

*PROYECTO DE REGLAMENTO CIRSOC 501-E. *Reglamento empírico para construcciones de mamposterías de bajo compromiso estructural.* INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Buenos Aires, Argentina.2005. (Proyecto en discusión pública).

*ARIAS, Lucía E; ALDERETE, Carlos E; MELLACE, Rafael F. "Variación de la resistencia del BTC según distintos estados hídricos". En: Libro de Memorias III Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (II SIACOT). Tucumán, Argentina. 2004. págs: 235-244.

*ALDERETE, Carlos E; ARIAS, Lucía E; MELLACE, Rafael F. "Optimización de mezclas de suelo-cemento". En: CD de Memorias III Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (II SIACOT). Tucumán, Argentina. 2004.

*MELLACE, Rafael; ROTONDARO, Rodolfo; SOSA, Mirta; LATINA, Stella; ARIAS, Lucía; ALDERETE, Carlos. *Mejoras de bajo costo para muros de tierra cruda – Tucumán-Argentina – Etapa II: Construcción y monitoreo de prototipos.* Edición LEME – FAU/UNT. Serie: Arquitectura de Tierra Cruda. Tucumán, Argentina. 2003.

*MELLACE, Rafael; ROTONDARO, Rodolfo; SOSA, Mirta; LATINA, Stella; ARIAS, Lucía; ALDERETE, Carlos. *Mejoras de bajo costo para muros de tierra cruda – Tucumán-Argentina -Etapa I: diseño y ensayos previos.* Edición LEME – FAU/UNT. Serie: Arquitectura de Tierra Cruda. Tucumán, Argentina. 2003.

*ARIAS, Lucía E; ALDERETE, Carlos E; MELLACE, Rafael F. *Mampostería de bloque comprimidos de tierra-cemento con junta de asiento.* Edición LEME. Serie: "Componentes constructivos de la envolvente" (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina. 2002.

*ALDERETE, Carlos E; ARIAS, Lucía E; MELLACE, Rafael F. *Control de la absorción en bloques comprimidos de suelo-cemento.* Edición LEME. Serie: "Componentes constructivos de la envolvente" (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina. 2002.

*MELLACE, Rafael F; ALDERETE, Carlos E.; ARIAS, Lucía E. *Centro Regional de Investigaciones de Tierra Cruda: Sistema Constructivo "LAMARS.* I Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (I SIACOT). Salvador- Bahía- Brasil, 2002.

*ARIAS, Lucía E; ALDERETE, Carlos E; MELLACE, Rafael F. *Análisis sismorresistente - Proyecto CRITIC (Parte I): Mampostería de bloque comprimido de tierra-cemento*. Edición LEME – FAU/UNT. Serie: Componentes constructivos de la envolvente (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina.2001.

*REGLAMENTO INPRES-CIRSOC 103. *Normas Argentinas para construcciones sismorresistentes, Parte III- Construcciones de mamposterías.* INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Buenos Aires, Argentina.1998

*MELLACE, Rafael F; ALDERETE, Carlos E. *Ensayos físico-mecánicos de suelo y componentes constructivos de tierra cruda. Salón de Fiestas K-Sama - Santa María*, *Catamarca.* Edición LEME. Serie: "Componentes constructivos de la envolvente" (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina. 1996.

*GALLEGOS, Héctor. *Albañilería Estructural.* Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial. 2ª Edición corregida y aumentada.1989