

UNIVERSIDAD DE CUENCA

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIONES
PRIMERA EDICIÓN

**MAMPOSTERÍA POST-TENSADA: Una alternativa
constructiva para Ecuador**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAGISTER EN CONSTRUCCIONES (MSc)**

AUTOR: ESTEBAN FELIPE ZALAMEA LEÓN. ARQ.

DIRECTOR: FERNANDO ZALAMEA LEÓN. ING. PHD
ASESOR: VLADIMIR CARRASCO CASTRO. ING. MSC.

Cuenca, Junio, 2012

DECLARACIÓN

Yo, ESTEBAN FELIPE ZALAMEA LEÓN declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad de Cuenca, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Autor: ESTEBAN FELIPE ZALAMEA LEÓN

C.I.: 0102125952

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por AUTOR, bajo mi supervisión.

FERNANDO ZALAMEA LEÓN
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A la empresa RFV de Cuenca y al Ing. Mst. Vladimir Carrasco Castro por facilitar instrumental y material; por su invaluable colaboración intelectual en el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

La intención de abordar este trabajo surge de una preocupación latente y concerniente a quienes de uno u otro modo estamos trabajando en el ámbito de la construcción en Cuenca, es suficiente con observar el modo constructivo con el que se está edificando cotidianamente y contraponerlo con lo dispuesto por las normativas que rigen en países con condiciones sísmicas similares, para reconocer que no estamos dentro de los márgenes normativos correspondientes.

A partir de esto, la labor fue revisar la posibilidad de construir muros de mampostería post-tensada con lo disponible tanto material, instrumental y técnico, básicamente por que la tecnología constructiva propuesta y adaptada para mamposterías es ya una respuesta en otras sociedades bajo los mismos riesgos latentes.

Para obtener las respuestas a las preguntas planteadas se realizan una serie de ensayos tanto instrumentales como materiales que, bajo un método planteado, nos arrojó una serie de respuestas respecto a barreras a solventar como también potencialidades, para en el futuro utilizar el sistema constructivo propuesto de modo competitivo.

Esta investigación es una puerta que plantea una alternativa conciderando un vacío detectado, esto es la partida, el desarrollo de la investigación tendrá que profundizarse en el futuro para mejorar herramientas y materiales y así en el futuro quizás post-tensar paredes en la edificación cotidiana.

ABSTRACT

This thesis has been worked with the intention to address the problems, difficulties and preoccupations related to constructive methods used on the daily basis in Cuenca - Ecuador, based on a preliminary analysis, our built environment is not prepared to face the geological conditions, even more as we compare the constructive methods used locally to the technics used in countries facing similar geological circumstances and high probabilities of seismic events.

Therefore, the main focus of this work was to review the possibilities to build post-tensed masonry with the materials, instruments, and hand labor available in Cuenca, specially knowing that similar methods and technics are being used in other places, as stated before.

The studies were based on several tests, instrumentally and materially, to find answers for the limits and the potential of this technic, and also to know the real possibilities for considering this constructive system as a competitive and reliable one.

This investigation is thought as an entrance door, an alternative, considering the void we have faced to develop reliable methods and technics for the build environment, taking in to account the local conditions. As said, this first step will require more emphasis on investigation, tools, materials, etc. for us to see post-tensed masonry used on a daily basis locally.

Tabla de contenido

1 LINEAMIENTOS	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4 JUSTIFICACIÓN	5
2 MARCO TEÓRICO	10
2.1 MAMPOSTERÍA POST-TENSADA. RESEÑA HISTÓRICA	10
2.2 ESTADO DEL ARTE.....	11
2.3 CONCEPTOS BÁSICOS.	17
2.4 PRESFORZADOS Y POST-TENSADOS EN EL ECUADOR.....	20
3 HIPÓTESIS	21
4 METODOLOGÍA	22
5 DISEÑO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA POST-TENSAR MUROS	25
5.1 DISEÑO DE POST-TENSADO ACORDE A DESEMPEÑO DE MURO.	25
5.1.1 MUROS PORTANTES ESTRUCTURALES POST-TENSADOS.	25
5.1.2 MAMPOSTERÍA NO PORTANTES O MUROS DIVISORIOS POST-TENSADOS.....	29
5.1.3 TENSADO DESDE PLACA INFERIOR.....	31
5.1.4 TENSADO A TRAVÉS DE SOLERA.....	33
6 EXPERIMENTACIÓN	41
6.1 SELECCIÓN DE MATERIALES.....	41
6.1.1 SELECCIÓN DE MATERIALES PARA APLICAR POST-TENSIÓN.....	42
6.1.2 SELECCIÓN DE MATERIALES DE MAMPOSTERÍA	43

6.2 DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA Y CAPACIDAD DE MATERIALES DE PRESFUERZO	46
6.2.1 CAPACIDAD DE TENSIÓN DE CABLES ACORDE A SU DIÁMETRO.....	46
6.2.2 COMPORTAMIENTO ESPERADO DE DIFERENTES MAMPUESTOS FRENTE A DIFERENTES SECCIONES DE CABLES O TORONES	48
6.2.3 ELABORACIÓN DE MURETES, ENSAYO Y CÁLCULO DE CARGA ADMISIBLE ($f'm$).	51
6.3 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE MUROS CONSTRUIDOS DE MODO TRADICIONAL	57
6.3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS ELABORADOS DE MODO TRADICIONAL	58
6.3.2 PRUEBA ANTE CARGA LATERAL DE MURO TRADICIONALMENTE CONSTRUIDOS.	63
6.4 ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE MUROS POST-TENSADOS ANTE CARGA LATERAL	65
6.4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS PARA POST-TENSAR	65
6.4.2 Diseño de ensayo de comportamiento de muros post-tensados ante carga lateral	72
6.4.3 CARGA DE POST-TENSIÓN A MUROS PROBETAS	73
6.4.4 APLICACIÓN DE POST-TENSADO A MUROS PROBETAS ..	74
6.5 ENSAYO, COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS Y DETERMINACIÓN DE FACTIBILIDAD.....	78
6.5.1 ENSAYO, COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO Y COSTO DE MAMPOSTERÍA DE BLOQUE TRADICIONALMENTE CONSTRUIDO VERSUS EL POST-TENSADO	78
6.5.2 COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO Y COSTO DE MAMPOSTERÍA DE LADRILLO ARTESANAL TRADICIONALMENTE CONSTRUIDO VERSUS EL POST-TENSADO	80
6.5.3 COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO Y COSTO DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL CON LADRILLO INDUSTRIAL VERSUS EL POST-TENSADO	82

7 CONCLUSIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	90
ANEXOS.....	92



Foto 1.- Catedral de Cuenca, Mampostería simplemente trabada y portante en edificio emblemático de la ciudad, La Catedral. Fuente: www.cepes.org.pe

Foto 2.- Cuenca nueva, Mampostería como tabiquería divisoria sin refuerzo en estructura aporticada, en edificios en altura. Fuente: www.skyscraperlife.co



MAMPOSTERÍA POST-TENSADA: Una alternativa constructiva para Ecuador.

1 LINEAMIENTOS

...” parecería que el concepto de evolución empleado en todos los ámbitos pierde velocidad particularmente en la construcción en nuestro medio. Los métodos utilizados hoy, toman tal fuerza de hábito que en lugar de ser una alternativa fundamentada para su uso, se hacen solo una costumbre por la ausencia de conocimiento o temor al cambio.”¹

1.1 INTRODUCCIÓN

Este es un planteamiento de investigación que surge de una situación local en donde el tipo de construcción no corresponde a la realidad sísmica, en un entorno con exigencias constructivas que en otros sitios de similares características ya están desarrollados y normados. Consecuentemente proponemos una mejora en el sistema constructivo tradicional y su mampostería, para mejorar su comportamiento frente a cualquier carga lateral o acciones de distinta índole que sometan a trabajar un muro de bloque o ladrillo de manera distinta que ha compresión.

Para tal efecto hemos considerado la actualidad constructiva de naciones sísmicas como México, Nueva Zelanda, Colombia, Estados Unidos, etc. países en los que ya se emplea como alternativa, entre otras, los muros post-tensados de mampostería. Planteamos este sistema porque surge del principio fundamental del ahorro, en el que un material tradicional y abundante que presenta una deficiencia ante un tipo de cargas (tracción),

¹ Serna Pulgarín y Stuart Contreras. *Análisis Económico de Mampostería Post-tensada en seco versus actuales soluciones de vivienda de interés social en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2010

trabaja constantemente acorde a sus posibilidades naturales (compresión) a través de la aplicación de una tecnología constructiva.

El marco teórico que manejamos son referentes de zonas sísmicas similares a las nuestra. Encontramos investigaciones y documentos en donde diferentes autores plantean soluciones con mampostería post-tensada desde distintas perspectivas, es destacable que en dichos estudios, en prácticamente todos, se establece de una u otra manera la factibilidad y posibilidad de aplicarse masivamente.

Se buscará entonces desarrollar este modo constructivo en Ecuador con recursos locales, de manera viable y que signifique una mejora con respecto a lo que se está haciendo, por esto se propone una serie de experimentos prácticos para determinar su factibilidad utilizando nuestros materiales y técnicas.

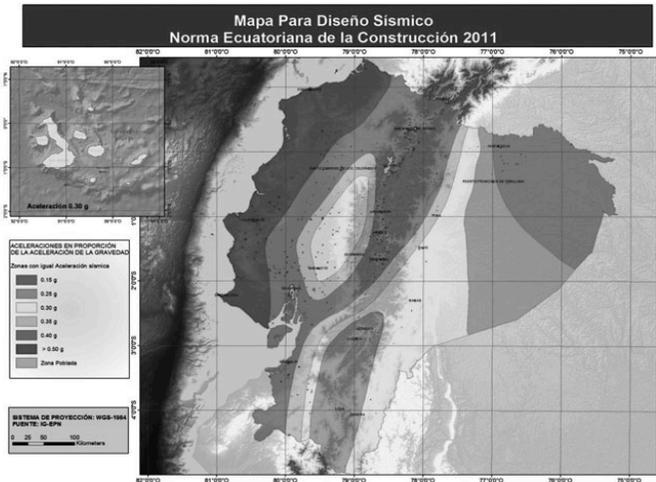
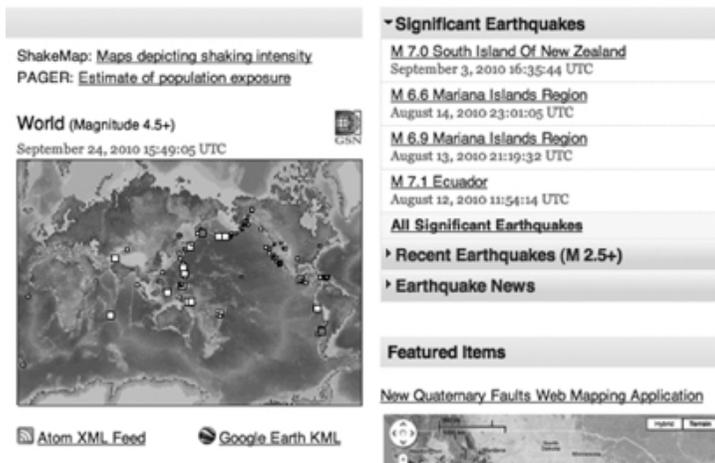


Tabla 2.1. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización de la amenaza sísmica	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Plano 1.- Zonificación acorde a riesgo sísmico del zonas del Ecuador. *Código Ecuatoriano de la Construcción, 2010*

Plano 2.- Reporte USGC de Agosto a Septiembre 2010 con los sismos de mayor magnitud a nivel mundial.



1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe un vacío reglamentario de requisitos antisísmicos para el diseño y construcción de muros, *El Código Ecuatoriano de la Construcción*, nuestra normativa, en su capítulo de "Normas sismoresistentes" sin embargo no tienen el carácter de ley a diferencia de otros países bajo el mismo riesgo. La mampostería es el método constructivos más común en Cuenca, el 81% de las edificaciones presentan en su fachada mampostería de acuerdo a la Cámara de la Construcción, sin embargo, es la mampostería sin refuerzo el sistema que peor desempeño presenta frente a un terremoto, después de la construcción en tierra.

En el país se suscitó uno de los diez terremotos más fuertes mundialmente registrados en la historia, frente a las costas de Esmeraldas el 31 de enero de 1906 con una magnitud estimada entre los 8,6 y 8,9 grados en la escala de Richter. En la página de la *U.S. Geological Survey Earthquake Hazards Program* encontramos que entre Agosto y Septiembre del 2010 está registrado el sismo más fuerte a nivel mundial en el lapso de los dos meses mencionados, el día 12 de Agosto, con una magnitud de 7,1 grados en la escala Richter, afortunadamente con epicentro a gran profundidad, de lo contrario probablemente estaríamos hablando hoy de un desastre humano y económico. (*Plano 2*)

MAPA INTEGRADO DE DAÑO ESTRUCTURAL (0.25g)

MAMPOSTERÍA NO REFORZADA - HORMIGÓN ARMADO



Plano 3.- En rojo el daño esperado en estructuras de concreto y mampostería en sismo con aceleración estimada de 0,25 g, magnitud considerada como posible en la zona. Fuente: Red sísmica del austro, Universidad de Cuenca.

No se han encontrado estudios o estadísticas que muestren análisis de capacidad de nuestra mampostería por lo que no se ha podido establecer su comportamiento ni como elemento material unitario con respecto a su resistencia a compresión ni en conjunto formando paredes, sin embargo por la nula preocupación existente, se presume que su desempeño será no adecuado, así lo muestran estudios realizados por la Red Sísmica del Austro que en planos de la ciudad expone el daño potencial ante un sismo de magnitud esperada (*Plano 3*). Frente a la problemática constructiva descrita, tenemos un Ecuador inmerso en una área activa tectónica conocida como “Cinturón de fuego”, en donde suceden y se esperan eventos telúricos importantes y constantes (*Plano 1*), en contrapunto, desde el punto de vista del análisis estructural, el modo en que elaboramos nuestras paredes resulta en elementos con capacidad muy baja, frágiles, riesgosos y potencialmente letales para la vida por su masa volumen y potencial falla brusca.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Investigar de modo práctico nuestra mampostería y su capacidad para post-tensarse con tecnología, recursos materiales y mano de obra acorde al marco tecnológico-constructivo local con el fin de analizar su posible aplicación en la construcción cotidiana, buscando de este modo una respuesta constructiva frente al riesgo sísmico, carga lateral o tracción eventual. A partir de esto se propone fundamentalmente establecer cual es la mejora resistente que se puede lograr en nuestra mampostería post-tensándola, luego comparar la construcción actual frente a lo propuesto en términos económicos para descifrar su factibilidad.

El esfuerzo admisible de la mampostería es suficiente para aplicar post-tensado en ensayos hechos en materiales de otros países. Si bien es cierto, por su alto grado de elaboración artesanal, existe una alta posibilidad de que los materiales disponibles no sean aptos para mampostería estructural presforzada, sin embargo para muros divisorios los requerimientos son menores, por lo tanto potencialmente factible también para reforzar divisiones ambientales no estructurales.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-Analizar recursos locales: Identificar las mayores fábricas de unidades de mampostería de los tres tipos empleados masivamente en Cuenca: Ladrillos *panelón* e industrial y bloque de concreto; se seleccionan mampuestos, tres de cada tipo para someterlos a ensayos a través de ensayos unitarios individuales para encontrar los de mejor desempeño ante compresión. Seleccionados los de mejores características, se elaboran muretes para averiguar su capacidad admisible de modo que nos permita conocer su potencialidad ante presfuerzo. En algunos casos observaremos su utilidad para muros estructurales post-tensados, en otros menos resistentes, tendremos quizá material útil para muros divisorios. En el mismo orden investigar los sistemas de tensado y anclajes existentes comercialmente, determinar su aplicabilidad en mampostería o en su defecto, adecuaciones necesarias para utilizarse en ella.

-Diseñar muros post-tensados: A partir de los resultados del estudio de recursos locales se diseñará el sistema de post-tensado. Será importante resolver detalles de trabado de mampostería, ubicación y pasado de tensores, modo de anclaje y fijación. Será importante establecer el método exacto de ensayo a los muros para definir el emplazamiento más adecuado para la construcción de los muros.

-Presfuerzo: Encontrar el esfuerzo de post-tensado acorde a la capacidad admisible del material, a la fuerza horizontal a disiparse, al diámetro del cable y a las posibilidades de la herramienta de tensado.

-Elaborar muros probetas: Construir muros simplemente trabados reforzados a través de integrarlos con columnas de hormigón armado a través de "chicotes" como sucede normalmente en la construcción tradicional para, a través de ellos, analizar la acción -construcción cotidiana- como fuente comparativa y así inferir su costo acorde a recursos y mano de obra empleados. Simultáneamente elaborar muros post-tensionados que al igual que los anteriores son analizados en su proceso constructivo; en base a las dos experiencias establecer una comparación para a la poste descifrar su diferencia en términos económicos: mampostería post- tensada vs. mampostería tradicionalmente elaborada.

-Encontrar el esfuerzo necesario para provocar su ruptura o falla. Con los datos obtenidos de los muros, normales contrapuestos a los post-tensados podremos establecer en que grado se logra mejorar ante esfuerzo lateral y porcentualmente unos con respecto a otros. Se procederá al análisis de los resultados para sistematizarlos y finalmente publicarlos.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Se requiere investigación de sistemas constructivos para descifrar la adaptabilidad potencial de recursos existentes, o en su defecto, el sentar requisitos y transformaciones tecnológicas para poder adoptar alternativas constructivas y potencialmente normarlas en el futuro.

La pregunta que nos planteamos es: ¿Por qué utilizar mampostería si esta es negativa para una región sísmica como la nuestra? Pues bien, encontramos los siguientes factores determinantes:

-Es tecnología existente: La mampostería tiene amplia vigencia y supremacía como método constructivo desde el siglo pasado, actualmente es el más utilizado en el Ecuador.

-Contamos con los materiales y sus fábricas en producción, la implementación de otro tipo de industria con otros materiales significaría un alto costo y se dejaría de lado una gran empresa ya montada. En el país se ha adoptado las estructuras en pórticos con diseño sismoresistente, entonces es necesario elaborar normativas y modos constructivos para las mamposterías divisorias para complementar el sistema.

-La mano de obra de construcción tiene conocimiento del arte.

-Es estética y arquitectónicamente aceptado.

-En las zonas frías de la región Sierra se requiere de su masa térmica, también es buen aislante acústico. Los muros pueden proveer de estructura, subdivisión de espacio, resistencia al fuego.

- La mampostería armada utilizada en países latinoamericanos sísmicos como Colombia, México o Chile han tenido excelente comportamiento y es usada masivamente.

- Tal como sucede con el hormigón cuyas características mejoran con la inclusión de refuerzo de acero, lo que posteriormente se ha optimizado mediante sistemas de precompresión, es natural suponer que del mismo modo el comportamiento de la mampostería mediante aplicación de presfuerzo.



Foto 3: Estructura de elementos prefabricados de hormigón presforzado.

Foto 4: Construcción de mampostería de ladrillo panelón confinada entre vigas y columnas de hormigón armado.



Entre los métodos de precompresión conocidos está el pretensado y post-tensado. Se plantea la utilización del post-tensado por:

- Facilidad constructiva, una vez endurecida la pared esta presenta la posibilidad de ser base y soporte de la herramienta de tensado.
- Por otra parte con el post-tensado no es necesaria la transmisión del esfuerzo a través de fricción entre el material de muro con el cable o barra de preesfuerzo para lo cual se necesitaría una columna de concreto o *grout* de mayor sección en el entorno del tensor que absorba y transmita el presfuerzo; al contrario por medio del post-tensado los anclajes y transmisión se da en los extremos y de estos a toda la sección y masa del muro. El mortero o *grout* alrededor de los tensores es requerido únicamente para la conservación de los mismos como protección.
- El post-tensado es una técnica constructiva utilizada en el país. Aunque este método se emplea para reforzar concreto e incluso madera, es adaptable a mampostería con similares herramientas, materiales y conocimientos.
- El post-tensado es una alternativa de refuerzo, y tiene la cualidad de procurarle al material un desempeño constante acorde a su capacidad natural de carga.
- El incremento en carga axial vertical por preesfuerzo conduce a un incremento de resistencia en el muro ante efectos de cortante y flexión. El post-tensado ofrece la posibilidad de dotar una carga medida y necesaria para mejorar la capacidad soportante ante empujes transversales, mejorando así el desempeño y durabilidad de estructuras de mampostería.

Relevancia social:

El principio del presforzado tiene en su esencia la economía. El presforzado provoca un efecto en el que los materiales adquieren capacidad ante esfuerzos para los cuales presenta deficiencias logrando que trabajen constantemente acorde a su capacidad natural y en toda su sección (*Foto 3*), a diferencia del material sin presfuerzo en donde parte de él no trabaja, que además de inútil es peso innecesario. En cuanto a tensores, si bien por kilo representan en costos aproximadamente el doble con respecto al hierro tradicional, su resistencia a tracción es cuatro veces mayor; por otra parte los anclajes, que ahora son importados, paulatinamente van alcanzado valores relativamente accesible.

La investigación contempla un análisis de precios comparativo del sistema constructivo. De encontrarse una equivalencia en precios, tendremos una alternativa mejorada a costo similar.

Impacto social:

Esperamos determinar la factibilidad de uso de mampostería post-tensada y demostrar la necesidad de investigar y normar la construcción en mampostería. Es inaceptable que el sistema constructivo más empleado en el Ecuador no esté en desarrollo y correctamente reglamentado. Esperamos sentar bases para iniciar este tipo de experiencias para que continúen y se generalicen. Nuestra mampostería en general está mal elaborada, es imperativo impulsar y concienciar la necesidad de aplicar refuerzo con post-tensado o con cualquier otro método.

Como sucede con el hormigón presforzado frente al simplemente reforzado, es factible que la mampostería post-tensada frente a la estructural logre optimizar costos por que el sistema constructivo propuesto implica la utilización de los materiales de una manera mejorada y más eficiente.

La utilización de la precompresión sin duda implica colaborar con la seguridad y vida de las personas rodeadas de mampostería amenazada sísmicamente.

Utilidad metodológica:

Localmente se han hecho pruebas de resistencia de unidades individuales de bloque o ladrillo pero no de muros o muretes². Esto es preocupante y será una limitación a afrontarse, al parecer el presente trabajo será pionero en este tipo de ensayos en Cuenca, se requiere probar muretes y muros para lo cual se toma como referente normativa extranjera.

Usuarios potenciales:

En edificaciones pequeñas de nuestro país de hasta dos plantas la mampostería se la usa como portante, confinada por pequeñas cadenas y columnas de concreto armado. En construcción doméstica unifamiliar se está empleando en número creciente pórticos estructurales para edificaciones de dos o tres pisos, en inmuebles altos como multifamiliares u oficinas generalmente se emplea tipología constructiva con pórticos de

² Consultados el Dr. Fernando Zalamea y el Ing. Iván Cañizares jefe de laboratorio de la Universidad de Cuenca, bajo el conocimiento de ellos no ha existido pruebas de laboratorio en muretes ni muros en Cuenca.



Foto 5: Cuenca nueva. Edificio en altura en estructura aporticada de hormigón armado con divisiones interiores de mampostería no reforzada

concreto o esqueleto de acero con divisiones que por lo general son en mampostería sin refuerzo. (Foto 5.)

En la cotidianidad de la construcción los muros se “sujetan” tradicionalmente a la estructura vertical o cadenas a través de varillas de seis hasta ocho milímetros de diámetro con una longitud aproximada de sesenta centímetros espaciadas verticalmente entre ellas alrededor de cuarenta o cincuenta centímetros; estos elementos son conocidos comúnmente como “chicotes”, para su colocación no existe ninguna normativa, especificación o cuantía reglamentada, procede mas bien de una costumbre o intención de sujetar los muros con la estructura soportante. Por lo demás no existe en el muro ningún armado, estamos entonces frente a *mampostería no reforzada*³ que según normativa extranjera tampoco debería utilizarse en ningún lugar del Ecuador. El post-tensado, pensamos, es una alternativa para este tipo de muros, los cuales pueden ser sometidos a preesfuerzo tensionándolos o anclándolos desde su base para procurarles mayor resistencia sísmica o para mejorar frente a cargas de uso.

Finalmente están abiertas opciones para otros tipos de usos futuros, el *Dr. H. R. Ganz.* considera que:

“El post-tensado ofrece un nuevo potencial a ingenieros y arquitectos para revivir a la mampostería como sistema estructural; muchos tipos de construcción son factibles y con costos competitivos...en edificios residenciales, los muros principalmente los de los pisos altos pueden beneficiarse por el post-tensionado tanto por resistencia como por funcionamiento de servicio. Para los pisos bajos, las cargas gravitacionales reducirá el requerimiento de post-tensionado. Mampostería post-tensionada puede ser útil para cubrir muros altos de edificios industriales. La aplicación en muros sometidos a cargas laterales constantes como muros de contención es otra opción valida. Aparte de la construcción insitu, el post-tensionado ofrece el beneficio de muros prefabricados, los cuales podrán ser transportados y colocados, incluso elaborar muros inclinados.... Es una herramienta útil para afirmar estructuras afectadas por el tiempo o por

³ La mampostería no reforzada sólo puede ser utilizada como sistema de resistencia sísmica en aquellas regiones de las zonas de amenaza telúrica donde el valor de aceleración sísmica sea menor a igual a 0,05. En el Ecuador no existe lugar alguno con factor de aceleración tan bajo (*Plano 1*). Fuente: Comisión Asesora permanente para el régimen de construcciones sismorresistentes: *Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10*, Bogotá, Colombia, 2010. *Pág. D-51.*

sismos a través de post-tensionado con elementos externos... para ambos, para reforzar o para edificación nueva, el mismo comentario final aplica: El dispositivo está listo, las aplicaciones están únicamente limitadas por la imaginación de los expertos, ingenieros y arquitectos⁴.

⁴ GANZ H.R., Dr. sc. techn., Civil Engineer ETH: *Post-tensioned Masonry Structures*, VSL Internacional Ltd., Berne Switzerland, 1990. Pág. 31.

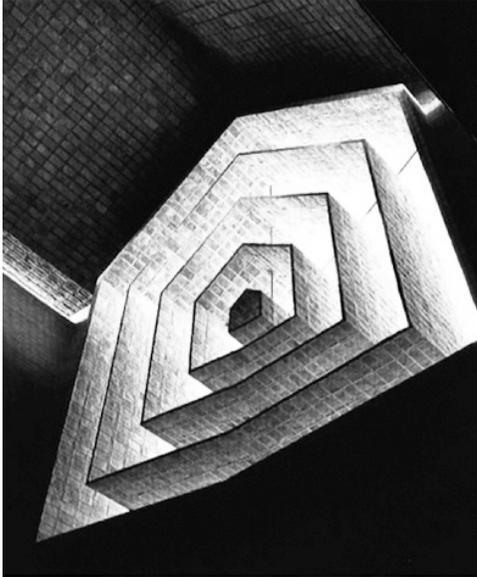


Foto 6: Iglesia San Pedro, Durazno, Uruguay. Fuente: www.mtop.gub.uy/salasaez/fotosdieste.htm

Foto 7: Estructura de mampostería armada, Torre para almacenamiento de agua, Uruguay de Eladio Dieste. Fuente: *Braj Sinha, Development and Potencial of Structural Masonry*; Ponencia, Porto 2002.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 MAMPOSTERÍA POST-TENSADA. RESEÑA HISTÓRICA

La mampostería presforzada aparece en el Reino Unido en respuesta a la deficiencia que presenta la mampostería sin refuerzo frente a efectos de cortante generados por empujes laterales, los ingleses descubrieron que la carencia del sistema constructivo ante este efecto se puede subsanar al aplicar un presfuerzo.

La primera normativa en reglamentar esta tecnología es el *Código Británico de Mampostería* en el año de 1985. Durante los noventa, la ingeniería enfocada en la prevención sísmica centró su atención no solo en diseñar estructuras para la preservación de la vida, sino que tengan un desempeño con un mínimo desplazamiento residual y daño, situación que devino de considerar el costo que significa la reparación estructural y del contenido de una edificación a tomarse en cuenta en el diseño. Otros códigos en implementar normativas al respecto fueron el Australiano en 1998 y el estadounidense en 1999 en su documento oficial *Building Code Requirements for Masonry Structures*.

En Latinoamérica el *Ing. Dr. Eladio Dieste* (1946-2000), uruguayo, empleó el ladrillo de manera innovadora y audaz. El *Dr. Braj Sinha* menciona que Dieste "...usó ladrillos sustentables con bajo costo de energía de producción, para diseñar y construir estructuras reforzadas y presforzadas de gran escala y con calidad estética y carácter, sin considerar ni importar conocimientos ni tecnología de naciones desarrolladas. Estas estructuras van desde torres para agua y TV, hasta almacenes, iglesias, centros comerciales, paradas de bus, etc. La creatividad de Dieste fue por lejos avanzada y superior a cualquier cosa conocida en mampostería estructural hasta entonces... su trabajo es reconocido, apreciado incluso duplicado y adaptado en Europa después de 1990"⁵.

⁵ SINHA Braj P., Professor of Structural Engineering University of Edinburgh: *Development and Potencial of Structural Masonry*; Ponencia. Seminario sobre paredes de albañilería, Lourenco y Souza; Porto/Portugal, 2002. Pág.13

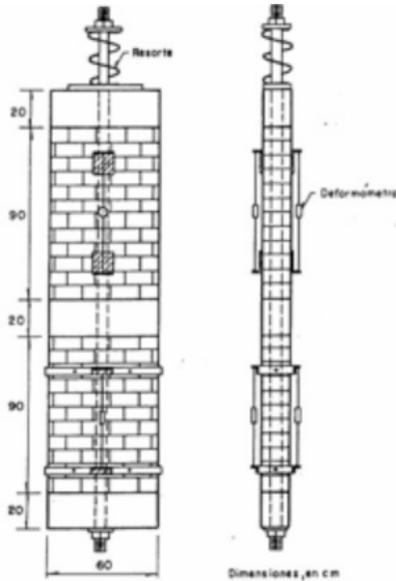


Fig 3.3 Sistema de carga y medición (carga sostenida)

Detalle 1 : Esquema de muretes de ensayo a post-compresión para determinar deformaciones diferidas. Fuente Hernández Basilio Oscar y Aguilar Heriberto: *Deformaciones Diferidas en Mampostería Posttensada; Recomendaciones de diseño; Series Instituto de Ingeniería UNAM, 1983. Pág. 42*

Por otra parte y en la misma línea de consideración de la importancia de la figura de *Dieste* en la aplicación a la arquitectura de la mampostería post-tensada, tenemos al *Dr. Arq. Antonio J. Mas Guindal* y al *Dr. Arq. Joseph M. Adell*, profesores de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Politécnica de Madrid quienes se refieren a la obra del uruguayo bajo los siguientes términos: "... *Los anteriores constructores citados* (refiriéndose a los principales precursores de la obra en mampostería históricamente) *usaron la cerámica como elemento siempre comprimido, ayudado por tirantes, zunchos o no. Dieste da un salto cualitativo importante en la medida de prescindir del problema de la fisuración al pretensar. La cerámica post-tensada, después de un aqulitado estudio analítico puede usarse en grandes dimensiones, ya que las tensiones a que se llegan no son grandes y el acero envainado por las isóbaras a tracción en la lámina resuelve el tradicional problema de las tracciones no deseadas*"⁶.

Por lo expuesto podemos considerar que esta tecnología constructiva también tiene raíces latinoamericanas.

Ya con un enfoque sísmico, se analiza el post-tensado como método válido para utilizarse como disipador de los efectos de un terremoto, encontramos investigaciones en México, Nueva Zelanda y Suiza orientadas a adoptar este sistema constructivo adaptándolo a la construcción cotidiana al tiempo que se comprueba su correcto desempeño.

Cuadro 1: Deformaciones en muretes de prueba sometidos a compresión constante a lo largo del tiempo. Fuente. *Ibíd. Figura 1, Pág. 43.*

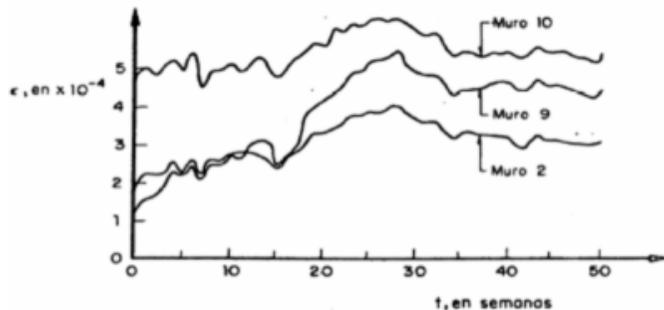


Fig 3.5 Deformación diferida bajo carga constante sostenida (incluye efectos de humedad y temperatura)

2.2 ESTADO DEL ARTE.

En Julio de 1983, se emite una publicación académica latinoamericana de mampostería post-tensada, un reporte de investigación de la UNAM de México cuyos autores son Oscar Hernández y Heriberto Aguilar⁷. En base al comportamiento del post-tensado en el concreto, ellos buscan encontrar la deformación diferida de la mampostería sometida constantemente a compresión y de tensión continua en el caso de los cables. Para la investigación ellos construyen muretes de prueba de 90 cm de altura

⁶ GUINDAL Antonio J. Mas y ADELL Joseph M., Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura: *Eladio Dieste y la Cerámica Estructural en Uruguay.*

⁷ HERNÁNDEZ Basilio Oscar y AGUILAR Heriberto: *Deformaciones Diferidas en Mampostería Postensada; Recomendaciones de diseño; Series Instituto de Ingeniería UNAM, 1983.*

Elevation of east wall showing steel layout.

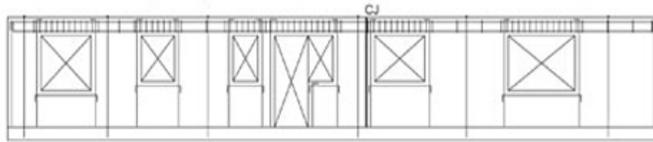


Table 1. Design base shear.

Plano 4: Alzado de casa con sistemas de muros post-tensados con trazado de tensores. Fuente Gavin D. Wight, Jason M. Ingham, and Andrew R. Wilton: *Innovative seismic design of a post-tensioned concrete masonry house*; Universidad de Auckland, Nueva Zelanda. Publicado en The NRC Research Press Web, 2007. Pág. 1396

sometidos a post-tensado (*Detalle 1*). Para observar las deformaciones suscitadas realizan mediciones de acortamiento a través del tiempo con su respectivo registro por medio de un deformómetro. Los resultados que ellos obtienen son:

- Las pérdidas diferidas de presfuerzo están alrededor de un 25% por lo que coinciden razonablemente con otras investigaciones previas. Este margen es similar al registrado con el concreto presforzado que se contempla alrededor de un 20%. Este aspecto es importante, por que una de las principales preocupaciones fue la posibilidad de pérdidas diferidas significantes lo cual implicaría la no aplicabilidad del sistema (*Cuadro 1*).

- La pérdida de presfuerzo resultó de casi la mitad en el ladrillo con respecto al bloque de concreto, por lo tanto este primero presenta un mejor desempeño.

- Las pérdidas por relajamiento de los cables y anclajes fueron prácticamente nulas y se pueden considerar como despreciables con respecto a las pérdidas en el material comprimido.

- Con las características de los materiales empleados en el ensayo se determinó que el acortamiento se da en mayor proporción en las juntas de mortero. Como consecuencia se recomienda la utilización de el menor espesor posible de junta y de buena calidad.

- Finalmente concluyen que la técnica de post-tensar muros no presenta dificultades graves y puede resultar incluso eficiente en términos económicos con respecto a otros tipos de refuerzo.

Plano 5: Planta de casa con sistemas de muros post-tensados. Fuente Gavin D. Wight, Jason M. Ingham, and Andrew R. Wilton: *Innovative seismic design of a post-tensioned concrete masonry house*; Universidad de Auckland, Nueva Zelanda. Publicado en The NRC Research Press Web, 2007. Pág. 1396



Otra investigación es la realizada por Gavin D. Wight, Jason M. Ingham, y Andrew R. Wilton en Nueva Zelanda, ellos desarrollaron y construyeron una casa con exigencia de resistencia antisísmica con bloque de concreto post-tensado. Ejecutan el diseño desde la concepción arquitectónica, hasta el diseño estructural finalizando con la materialización de la vivienda. La peculiaridad de su sistema constructivo es que se utilizan únicamente las paredes exteriores como sistema portante, estas son post-tensadas y el bloque que las constituye se coloca con un mínimo de mortero, de hecho llaman a sus muros *Mampostería sin ligante*. Como conclusiones de este trabajo destacamos:

- La construcción se logró con materiales comunes del medio y es la primera



Fotos 8 y 9: Fotos del proceso constructivo de vivienda con bloque de concreto post-tensado en Nueva Zelanda. Fuente: *Ibid.* Planos 4 y 5. Pág. 1400

experiencia de bloque sin junta en Nueva Zelanda.

- Se consigue con el post-tensado una estructura que cumpla las demandas antisísmicas de normativa local.
- Se establece la necesidad de considerar el refuerzo en el contorno de puertas, ventanas y vanos en general, estos deben tener dimensiones mínimas. Lo ideal en muros estructurales post-tensados es la no presencia de aberturas en ellos.

La firma de presforzados suiza *VSL* emitió un documento⁸ tratando específicamente el tema de la mampostería post-tensada, si bien se trata de un documento de propaganda llamando a la aplicación de sus productos, realiza una serie sugerencias importantes para nuestra investigación:

- Las barras de acero para presfuerzo tienen mayor relajación y un mal comportamiento con respecto a cables de presfuerzo por lo que se recomienda la utilización de cables de acero de baja relajación.
- Sugieren que, si bien es cierto se han emitido fórmulas para determinar la resistencia de la mampostería en base a resistencia individual de la materia prima, es recomendable ensayar muros probetas a compresión. La mampostería tiene un comportamiento anisotrópico.
- El uso de unidades perforadas reduce la mejora del post-tensado con respecto a unidades sólidas.
- Las propiedades inherentes a la mampostería y del sistema estático de la mayoría de muros favorecen al eje vertical como la dirección recomendada para colocar y ubicar tendones para someter el presfuerzo.

- Los tendones introducidos en oquedades de bloques muchas veces no están continuamente guiados, lo que puede causar desplazamiento transversal por alguna razón no considerada. Estos desplazamientos pueden reducir la fuerza efectiva del post-tensionado e introducir efectos de segundo orden. Esto se puede controlar limitando el diámetro de los ductos

Detalle 2: Conexión entre losas o vigas con muros a través de tendones. Fuente *H.R. Ganz, Dr. sc. techn., Civil Engineer ETH: Post-tensioned Masonry Structures, VSL Internacional ltd., Berne Switzerland, 1990.*Pág. 27

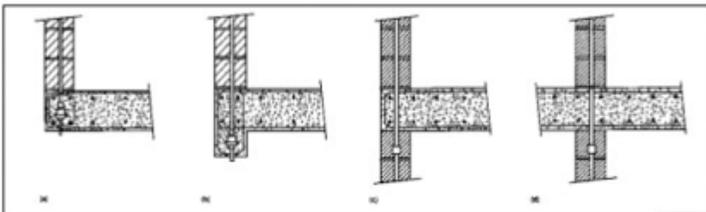


Fig. 48: Wall-Slab Connections
a) Without moment transfer; b), c), d) With moment transfer

⁸ GANZ H.R., Dr. sc. techn., Civil Engineer ETH: *Post-tensioned Masonry Structures*, VSL International ltd., Berne Switzerland, 1990.

o introduciendo *grout* en ellos.

- Para niveles de carga axial resultante del efecto combinado de cargas de gravedad más presforzado no deben exceder el 25 % de resistencia de diseño, con esta carga la pared se comportará de manera dúctil y la posibilidad de una falla frágil del material disminuye.

- La mayor presencia de cargas gravitacionales en paredes soportantes reducen la necesidad de post-tensado, y puede aumentarse el espaciamiento entre tendones (aplica a construcciones de varios pisos). (*Plano 6*).

- Las cargas de cortante actúan típicamente en cualquier dirección acorde a viento o sismo, por lo tanto los tendones serán requeridos simétricamente con respecto al eje central de la pared. (*Plano 6*)

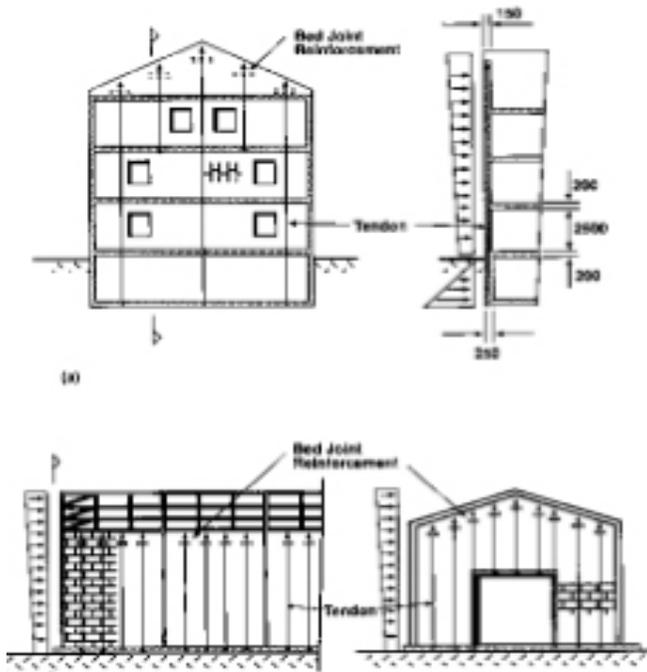
- La utilización de refuerzos horizontales es recomendado, ellos colaboran para evitar retracciones y resquebrajamientos en juntas.

Gavin D. Wight quién también fue autor de la vivienda en mampostería post-tensada en bloque sin junta en Nueva Zelanda previamente mencionada, elabora posteriormente su tesis doctoral investigando la mampostería de concreto post-tensada y su desempeño sísmico⁹.

Wight logra demostrar por medio del ensayo de dos muros con mampostería de bloque parcialmente inyectados, la idoneidad de este sistema como respuesta sísmica. Subsecuentemente realiza algunos ensayos en mesa vibratoria con muros con distintas disposiciones de aberturas e incluye extremos trabados y habitaciones pequeñas en algunos pruebas. Se demostró que el balanceo desde la base es el componente de deformación predominante, con desplazamiento residual mínimo; se observó daño sobre todo en las esquinas inferiores de los muros y en el contorno de los vanos. (*Foto 10*)

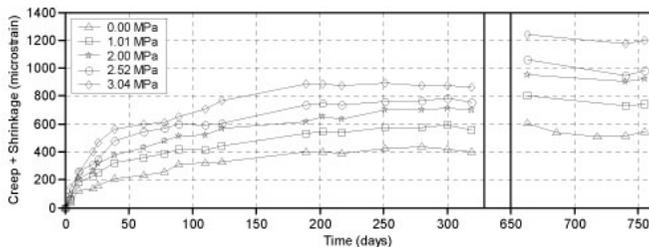
Por otra parte Wight refuta los modelos matemáticos existentes para el cálculo de la intensidad del post-tensado, él sostiene que las ecuaciones de códigos internacionales de mampostería muestran ser inapropiadas, él

⁹ Gavin D. Wight, University of Auckland Department of Civil and Environmental Engineering: *Seismic Performance of a Post-tensioned Concrete Masonry Wall System*; Nueva Zelanda, Junio del 2010



Plano 6: Disposición de tendones. Fuente H.R. Ganz, Dr. sc. techn., Civil Engineer ETH: *Post-tensioned Masonry Structures*, VSL Internacional Ltd., Berne Switzerland, 1990. Pág. 27

Cuadro 2: Deformación diferida durante el tiempo y pérdida de preesfuerzo, gráfico similar al mostrado por Hernández y Aguilar (figura 2). Gavin D. Wight, University of Auckland Department of Civil and Environmental Engineering: *Seismic Performance of a Post-tensioned Concrete Masonry Wall System*; Nueva Zelanda., Junio del 2010. Pág. 43



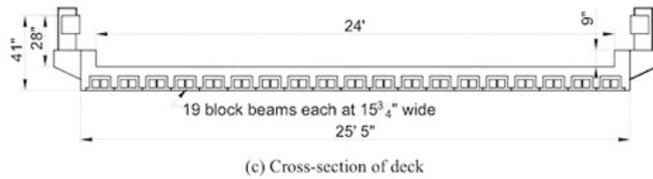


Figure 2.3: Prestressed concrete masonry bridge

Detalle 3: Puente de mampostería post-tensada. Gavin D. Wight, University of Auckland Department of Civil and Environmental Engineering: *Seismic Performance of a Post-tensioned Concrete Masonry Wall System*; Nueva Zelanda, Junio del 2010. Pág. 20

presenta nuevas expresiones basadas en su experimentación y el modelado con elementos finitos.

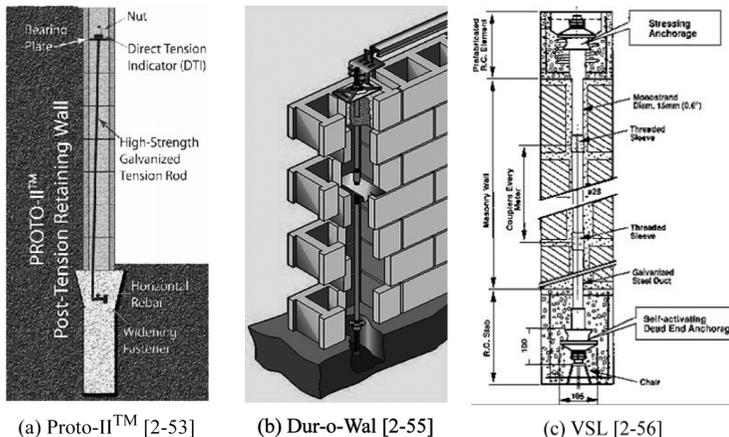
En el documento de reporte de la tesis consideramos referentes para nuestra investigación los siguientes capítulos:

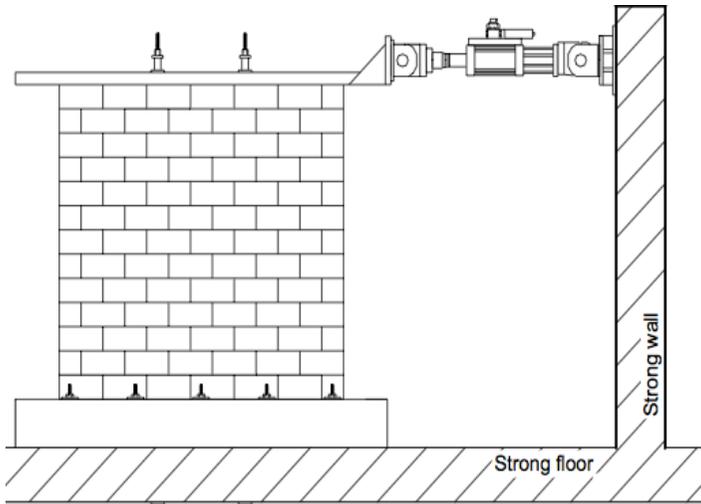
Capítulo 2. Revisión Literaria, Bases Teóricas: Wight realiza un recorrido histórico por distintas experiencias a nivel mundial en Gran Bretaña, Nueva Zelanda, USA e Irlanda, estudia silos de gran capacidad construidos por *Dublin City Milling Company*, un puente en Carolina del Norte carrosable (*Detalle 3*), un complejo de apartamentos Christchurch, Nueva Zelanda en 1970, un fuerte de armas en Warrington England en 1980; en los 90s, en Estados Unidos la empresa suiza VSL construye en Springfield USA un complejo con dos tanques con capacidad de 4 y 2,7 millones de galones; una vivienda de dimensiones medianas realizada experimentalmente por la *National Concrete Masonry Association* en Maryland, USA, y reparaciones. A continuación hace una descripción de las marcas de post-tensado y sus propiedades: *Proto II Wall systems*, *Integra Wall System*, *Dur-O-Wal Sure-Stress* y *VSL Wall System* (*Detalles 4,5 y 6*).

Capítulo 3: Contracción en mampostería post-tensada: Wight analiza las pérdidas que experimenta el post-tensado por *creep* y contracción: Determina que existen seis causas para estas contracciones: retracción en mortero y contracción de mampuestos, relajación de los cables, acortamiento elástico de la mampostería, hundimiento y pérdida en el anclaje, fricción debido a ondulación de tendones y efectos termales (contracción y expansión), (*Cuadro 2*).

Capítulo 4: Ensayo cíclico en muro: Se trata de someter al muro a carga lateral en dirección paralela a su plano. Es factible su implementación con nuestros recursos y a la postre será el método de prueba en esta investigación. Wight menciona que es importante construir muros con dimensión vertical similar a la utilizada típicamente en el medio, en el caso de Nueva Zelanda es 2.60 m, por lo tanto es la altura que utiliza en sus ensayos. Por otra parte usa el bloque de concreto cotidiano existente en el mercado para sus probetas (*Detalle 7*).

Detalle 4,5 y 6: Detalle de sistemas de post-tensado Proto II, Dur-O-Wal y VSL. *Ibid.* Detalle 3 Pág.29





Detalle 7: Esquema de ensayo cíclico de muro ante carga lateral. Fuente: *Ibíd. Detalle 3. Pág. 58.*

Foto 10: Desplazamiento residual después de ensayo cíclico. Fuente: *Ibíd. Detalle 4. Pág. 47. APÉNDICE A*



De La Norma Sismorresistente Colombiana¹⁰ versión 2010 que a su vez está basada en las normas ACTM E447 y NTC 3495, se adopta el sistema de ensayo de muretes para obtener la resistencia de la mampostería a compresión. Este reglamento sostiene que para encontrar la carga admisible en mampostería se debe:

- Realizarse 3 muestras o prismas para obtener su promedio.
- Los muretes deben construirse en similares condiciones a los que se elaboran en obra considerando materiales, mano de obra y condiciones ambientales. Requieren curado 28 días de fraguado previo a la realización de ensayos.
- La resistencia de los muretes será el promedio de las 3 pruebas, y no debe exceder el 125 % del menor valor.
- Deben tener por lo menos 300 mm de largo y una relación altura-ancho mayor o igual a 1,5 y menor a 5, con una posterior corrección matemática por esbeltez (*cuadro 8*).

En una realidad más cercana a la nuestra, recientemente en el año 2010, *Serna Pulgarín y Stuart Contreras* de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, realizaron una tesis de especialización enfocada en análisis económico de mampostería post-tensada para soluciones de vivienda de interés social.

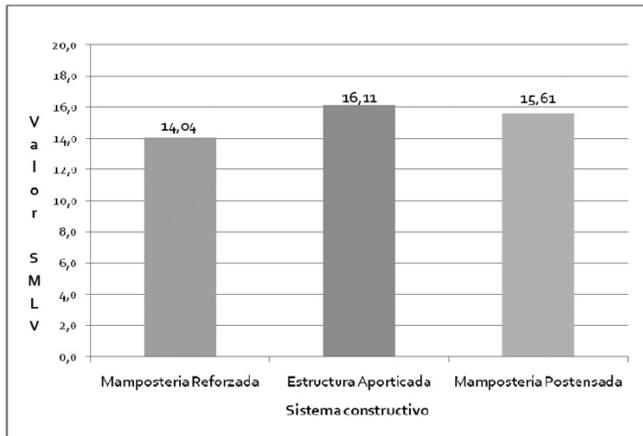
Ellos aseguran que la mampostería post-tensada surge de la articulación de los dos sistemas constructivos que dan como resultado una alternativa muy eficiente para el manejo de estructuras y gran economía por su reducción en cantidad de material y tiempo de ejecución. Se fundamentan en su reacción ante la inercia actual de los métodos constructivos cotidianos por separado, atados a sus parámetros conocidos de espacios y costo, negando e ignorando la incursión de nuevas tecnologías, a la postre se mejoran únicamente las variables que en el modo tradicional están enmarcados.

¹⁰ Comisión Asesora permanente para el régimen de construcciones sismorresistentes: *Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10*, Bogotá, Colombia, 2010.

Tabla 6. Valor del sistema estructural según sistema constructivo.

SISTEMA CONSTRUCTIVO	Área (m ²)	VALOR TOTAL (SMLV)
Mampostería Reforzada	58,00	14,04
Estructura Aportricada	58,00	16,11
Mampostería Postensada	58,00	15,61

Figura 12. Valor en SMLV de la estructura según sistema constructivo.



Cuadro 3: Cuadro comparativo de costos de sistemas constructivos en Salarios Mínimos Vitales en Colombia de acuerdo a Pulgarín y Contreras. Fuente: Análisis económico de la mampostería post-tensada en seco versus actuales soluciones de vivienda de Interés social en Colombia. Pulgarín y Contreras. Medellín 2010. Pág. 53

Este trabajo concluye en la necesidad de adaptar los materiales, concretamente bloques para la optimización del sistema. Se sugiere que es un sistema constructivo que debe ser manejado con un carácter industrial.

Por otra parte la investigación recomienda utilizar bloque de concreto por costo y logística (capacidad de fabricación a pie de obra fundamental para obtener un mayor ahorro), material que se sugiere se elabore en formaleta metálica por su gran durabilidad y por que se obtienen unidades con geometría muy precisa con un buen acoplamiento de unos con otros. Se estipula la necesidad de elaborar un manual de uso de la vivienda por la presencia de tensores y el riesgo que implica el que se los corte, los propietarios deben estar conscientes de como conservar y lo que no se admite al intervenir en muros presforzados por el riesgo existente de daño severo.

La conclusión fundamental de este estudio es que la mampostería post-tensada bajo las condiciones supuestas, es aproximadamente un 11% más costosa que la mampostería estructural y un 3 % más económica frente al sistema aportricado de concreto armado, este resultado se atribuye en gran medida a la gran difusión, capacidad y volumen existente de construcción en mampostería estructural en Colombia (Cuadro 3).

2.3 CONCEPTOS BÁSICOS.

- **Anclaje:** Dispositivo de sujeción de un elemento con otro frente a empujes que provoquen su separación. (Foto 11)

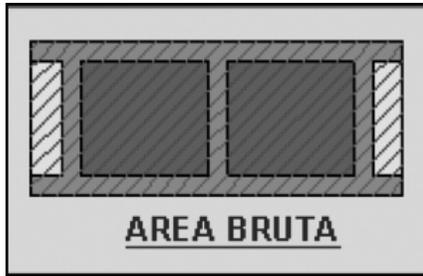
- **Área bruta de la sección de mampuesto:** Área delimitada por los bordes externos de la mampostería en el plano bajo consideración, sin tomar en cuenta perforaciones verticales. (Esquema 1)

- **Área neta de la sección de mampuesto:** Es el área de la unidad de mampostería incluyendo los morteros de relleno y excluyendo las cavidades medida bajo el plano de consideración, desde los bordes externos de el elemento. (Esquema 2)

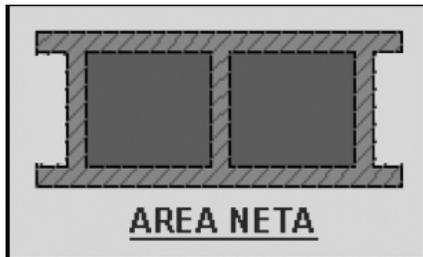
- **Bloque:** Unidad de mampostería cuyas dimensiones y peso la hacen manejable con dos manos.



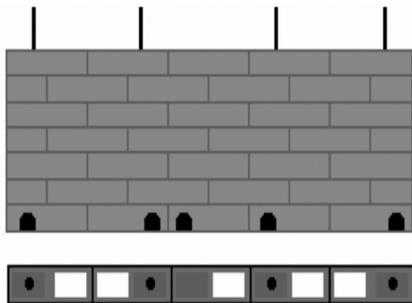
Foto11: Anclaje para post-tensado, extremo pasivo. Fuente: www.edingaps.com



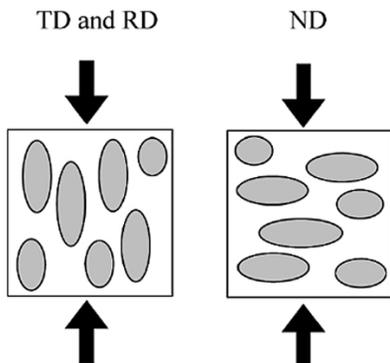
Esquema 1: Área Bruta de unidad de mampostería. Fuente: Rojas Daniel Ing.MSC. Cartilla 1, Maestría de Construcciones Cuenca 2010. Pág.20



Esquema 2: Área Neta de unidad de mampostería. Fuente: Rojas Daniel Ing.MSC. Cartilla 1, Maestría de Construcciones Cuenca 2010. Pág.19



Esquema 3: Celdas verticales para mampostería estructural. Fuente: Rojas Daniel Ing.MSC. Cartilla 3, Maestría de Construcciones Cuenca 2010. Pág.11



Esquema 4: Graficación representativa de comportamiento anisotrópico o direccional dependiente. Fuente: www.lm-foundation.or.jp/english/abstract-vol40/abstract/36

- **Bloque de perforación vertical:** Es un bloque de concreto o arcilla cocida que tiene perforaciones verticales, que en una pared conforman continuidades conocidas como *celdas* donde se coloca refuerzo (en mampostería post-tensada tensores) o no. En las celdas donde existen tensores o refuerzo vertical se coloca mortero de relleno con características estructurales o de protección.

- **Carga de presfuerzo (en mampostería):** Se define como el esfuerzo de compresión que se somete a la mampostería convirtiéndolo en un elemento precomprimido.

- **Celda:** Cavidad vertical continua en el interior de la mampostería. (*Esquema 3*)

- **Chicote:** Término del lenguaje coloquial de la construcción cuencana para nombrar a pedazos de varilla generalmente en forma de "L", empleados para enlazar columnas de hormigón armado o acero con paredes de mampostería. Estas son embebidas entre las hiladas y fundidas o soldadas a las estructuras verticales (*Foto 35*).

- **Comportamiento anisotrópico:** Característica de comportamiento que depende de la dirección de la solicitación. Es decir, material que presenta distinto comportamiento cuando proviene un estímulo desde una dirección que cuando proviene de otra. (*Esquema 4*)

- **Creep:** Incremento de deformación en el tiempo mientras el material está sometido a carga constante.

- **Grout:** Mortero que se utiliza para rellenar y reforzar celdas en las unidades de mampostería o en los ductos para conducción de cables de presfuerzo como protección, conocido también como *Mortero de relleno*.

- **Ladrillo:** Unidad de tierra cocida a temperatura de sinterizado, que tiene dimensiones y peso que lo hace manejable con una mano.

- **Mampostería:** Puesto a mano. Ensamblaje de pequeñas unidades pegadas con mortero.

- **Mortero:** Típicamente es una mezcla de cemento port-land, cal hidráulica, arena y agua. Las proporciones de la mezcla influyen en la resistencia final



Foto12: Ensayo a compresión de prisma de mampostería.
Fuente: Conferencia Colciencias 26/8/2006. Rojas Daniel Ing. MSC

y trabajabilidad.

- Mortero de relleno: Mortero que se utiliza para rellenar y reforzar celdas en las unidades de mampostería o en los ductos para conducción de cables de presfuerzo como protección.

- Murete o prisma: Ensamble de piezas de mampostería con mortero de pega, usado como espécimen de ensayo para determinar las propiedades de la mampostería. (Foto 12)

- Muro estructural: Elemento resistente de longitud considerable con relación a su espesor, que sostiene cargas adicionales a su peso propio.

- Muro no estructural: Elemento dispuesto como separación espacial que soporta únicamente la carga de su peso propio.

- Muros post-tensados: Son aquellos que ganan resistencia ante cargas laterales y propiedades de estabilidad ante cargas horizontales a través de la utilización de tensores incluidos en el muro, sometidos a post-tensión.

- Elemento Presforzado: Elemento estructural sometido intencionadamente a esfuerzos de compresión de modo que dicho elemento trabaja constantemente comprimido. Los presforzados a su vez pueden ser pre-tensados y post-tensados.

- Post-tensado: Método de presfuerzo de elemento constructivo. Resulta un elemento estructural post-tensado cuando se coloca el tensor o la tensión de presfuerzo luego del fraguado o endurecimiento del concreto o mortero que lo componen y la transmisión del esfuerzo se da por anclajes o elementos transmisores en los extremos mas no por fricción a lo largo de los tensores y material.

- Resistencia a compresión de la mampostería (f_m): Mínima resistencia nominal de la mampostería a compresión, medida sobre su área neta y sobre la cual se basa su diseño.

- Unidades de Mampostería: Son piezas de forma paralelepípeda elaboradas principalmente en arcilla cocida, concreto o sílice-cal que cumplen requisitos dimensionales y de resistencia para ser utilizadas como componentes de un elemento de mampostería.

Foto 13: Bóveda de mampostería lista para post-tensarse, Challuabamba-Cuenca. 2007





Foto 14: Alambre para presfuerzo Bekaert. Fuente:
www.bekaert.com

2.4 PRESFORZADOS Y POST-TENSADOS EN EL ECUADOR.

En un breve recorrido encontramos que el presfuerzo es aplicado en contadas fábricas de elementos de hormigón prefabricados en el Ecuador: *Precreto*, *Mavisa* y *Ciport* en Guayaquil, *RFV* en Cuenca.

Estas plantas están dedicadas específicamente a la fabricación de piezas como postes, vigas y columnas, en raras ocasiones la tecnología del presfuerzo es utilizada en construcciones en sitio aplicada a elementos que no sean de carácter prefabricado (*Foto 13*). Para mampostería no existe ni material ni sistema adecuado para post-tensar muros en el mercado local, por lo que es necesaria la implementación de un sistema de post-tensión (un sistema de tensado) así como la importación de material concretamente cable con sección necesaria, mucho menor a la requerida por las plantas industriales que producen elementos estructurales anteriormente mencionados.

Las empresas que son proveedoras de material para esta tecnología constructiva son: Ingecables de Quito, la multinacional Bekaert a través de Ideal Alambrec, y la importadora León Cables. Ninguno de estos comercios tienen como prioridad esta línea, son más bien importadores y comercializadoras de elementos metálicos y de acero en general que ofrecen la posibilidad de importación de material y herramientas de presfuerzo.

3 HIPÓTESIS

Los supuestos a esclarecerse en la etapa experimental, a continuación algunos:

Los materiales componentes de la mampostería tienen capacidad portante necesaria como para ser presforzada en una u otra medida.

Es posible implementar un sistema de aplicar presfuerzo a muros de mampostería con herramientas, tensores y anclajes disponibles en Ecuador.

Las unidades de mampostería disponibles admiten, acaso con alguna modificación, utilizarse para elaborar muros en los que se pueda aplicar presfuerzo. Los mampuestos más resistentes tienen potencial para ser utilizados en muros estructurales portantes post-tensados, otras unidades menos resistentes quizás son útiles para elaborar paredes divisorias que soportan su peso propio, cohesionadas a través del presfuerzo.

Los muros construidos con el sistema de post-tensado no son excesivamente más costosos frente a los elaborados del modo tradicional.

Los muros de mampostería post-tensada tienen mejor desempeño frente a carga lateral respecto a los muros construidos de modo tradicional.

4 METODOLOGÍA

Para obtener los resultados planteados en los objetivos específicos y tomando las experiencias de los referentes analizados, consideramos básicas las siguientes acciones:

En primera instancia se propone una etapa de diseño, en la que se genere un método de post-tensado de paredes con potencial de aplicarse con nuestros materiales típicos, implementos y sistemas de anclaje disponibles.

En una segunda instancia pero en la misma línea, se procede a plantear una serie de sistemas constructivos acorde al tipo de muro a post-tensarse. Se consideran los siguientes casos: muros soportantes presforzados, muros divisorios no portante presforzados, muros presforzados no portantes en entrepisos para edificaciones en altura, muros presforzados a través de solera, etc.

En una tercera etapa se propone un estudio de realidad de recursos locales para descifrar la capacidad de los materiales de mampostería existentes además de analizar sistemas y herramientas de presfuerzo disponibles. Para esto se procederá a:

-Descifrar sistemas y materiales de presfuerzo presentes en el ámbito local. Proponer utilización y alternativas en base a lo encontrado.

-Detectar la aplicabilidad del post-tensado en todos los tipos de mamposterías locales. Se escogerán 3 tipos de mampuestos: ladrillo artesanal macizo de tamaño comercial: 27 cm X 14 cm X 8 cm, de bloque de concreto de 40 cm X 20 cm X 15 cm y el ladrillo industrial perforado con extrusión vertical (perforado horizontal y con perforaciones verticales sin dimensiones estipuladas en la normativa de mampostería estructural no son aplicables) de dimensión variable. Se escogerán entre varias casas productoras acorde a capacidad de producción. No podremos hacer un muestreo más amplio por la cantidad de probetas y ensayos que se necesitarían.

-Se somete a ensayo a los especímenes de cada casa productora para encontrar los materiales de mejor resistencia a compresión. Con los materiales escogidos se elaboran muretes para descifrar la capacidad

admisible en muros hechos con los mampuestos seleccionados y así obtener la capacidad de diseño $f'm$ de cada tipo de pared. De cada una de las muestras necesitamos tres muretes acorde a la *NSR 10* (de las tres fabricas y tres muretes, requeriremos realizar 9 ensayos como mínimo).

-En base a estas pruebas de laboratorio se encontrará el desempeño de cada uno de los materiales para ser sometidos a post-tensado. Existe una alta probabilidad de gran variación de comportamiento en los ensayos aquí especificados por la característica artesanal de muchos de los mampuestos a probarse.

-Al conocer la capacidad portante a compresión se podrá realizar el cálculo de post-tensado adecuado para cada uno de los materiales. Acorde a Hernández y Aguilar *"la cantidad de presfuerzo adecuado puede definirse por el incremento necesario de resistencia del muro ante cortante, debe ser el 30% de la carga vertical actuante en el muro sin considerarse factor de seguridad e incluyendo la carga de presfuerzo sin exceder la mitad de la carga vertical resistente de diseño"*¹¹.

-Para determinar el esfuerzo tensor es necesario establecer el tamaño de los muros a examinarse. Para esto se ha tomado como referencia la tesis de *Gavin D. Wight (referencia 9)* quien considera la altura de muro probeta adecuada aquella que se usa normalmente en altura de entrepiso. Así y considerando que para el Ecuador la altura tradicional de entrepiso es 2,40m, tomamos esta como dimensión típica.

-Para colocar los tendones en el ladrillo macizo se requiere el uso de piezas especiales con perforación. Es imprescindible adquirir las piezas necesarias perforadas y con adecuada ubicación de la cavidad. El diámetro y la ubicación de la cavidad es fundamental para un correcto trabado. Es necesario averiguar si la cavidad en este tipo de mampuesto afecta su capacidad portante y en que magnitud.

-Se procede a la elaboración de los muros sin presfuerzo. El lugar para la construcción de estos es próximo a un elemento vertical suficientemente rígido y reforzado. Para realizar el ensayo colabora la empresa *RFV* de

¹¹ HERNÁNDEZ Basilio Oscar y AGUILAR Heriberto: *Deformaciones Diferidas en Mampostería Postensada; Recomendaciones de diseño*; Series Instituto de Ingeniería UNAM, 1983. Pág.30.

Cuenca que tiene los dispositivos de medición y tensado necesarios además de bancadas de apoyo de gatos presfuerzo que permiten aplicar grandes presiones. El modo de construcción de estas probetas se busca sea lo más semejante al utilizado tradicionalmente en la construcción local para tener un parámetro base que tienda a representar nuestra realidad en parámetros de resistencia de mampostería.

- Se construyen los muros para ser precomprimidos en similares condiciones a los anteriores, en ellos se aplica el presfuerzo con una magnitud determinada por los capacidad tanto de los materiales a utilizarse como también de la instrumentación disponible.

- Se ensayan los muros ante carga lateral. Para esto se utiliza un empuje en dirección del plano del muro. El resultado comparativo de mejora se obtiene al contraponer la capacidad de resistencia de los muros construidos de modo tradicional frente a los post-tensados.

- Se estima el costo de construcción de los muros construidos del modo tradicional y de los muros post-tensados, se contraponen sus precios y se comparan.

- Finalmente se realiza la comparación de las capacidades de los muros post-tensados frente a los muros construidos del modo tradicional, a esto se suma la comparación en costo. Se espera conseguir una contraposición de datos de mejora alcanzada con la mampostería post-tensada respecto a la tradicionalmente construida en resistencia y analizar la variación de costo para descifrar así la factibilidad y potencialidad del empleo de la tecnología propuesta en muros de mampostería en la construcción cotidiana.

5 DISEÑO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA POST-TENSAR MUROS.

Los métodos y sistemas de precompresión empleados en Ecuador son aplicados únicamente a elementos de hormigón presforzado, no se encontró experiencias en muros de mampostería. Estos dispositivos están sobredimensionados para las solicitaciones cuyo objetivo es mejorar mampostería, son costosos y de difícil aplicación. Por esta razón se plantea una herramienta nueva para realizar el trabajo (*Detalle 8*).

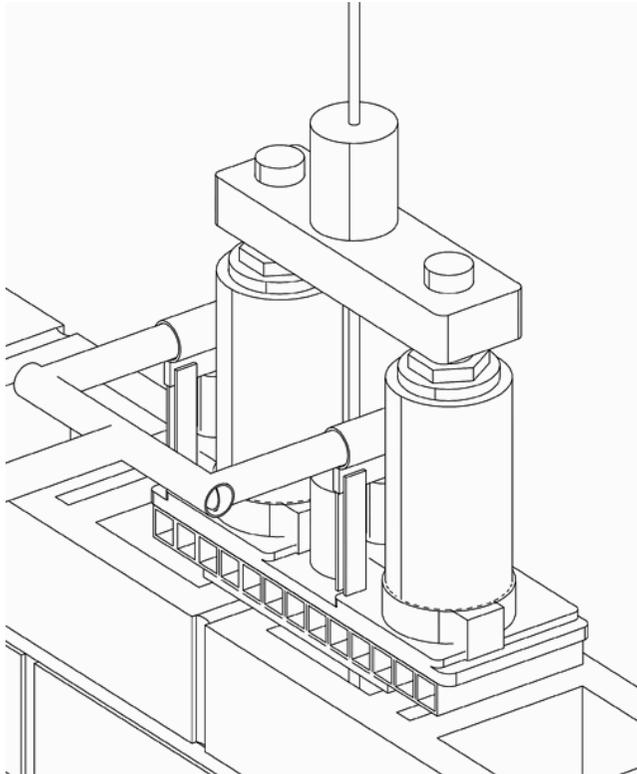
Por otra parte es necesario adaptar en cierta medida los materiales locales tanto en geometría como quizás en su resistencia, esto último a considerar dependiendo de la aplicación que el muro tenga dentro de una estructura.

5.1 DISEÑO DE POST-TENSADO ACORDE A DESEMPEÑO DE MURO.

Acorde a la función que va a desempeñar el elemento arquitectónico, este debe cumplir distintos papeles estructurales, así, en consideración a la capacidad portante solicitada presentamos diferentes posibilidades de sistemas constructivos dependiendo de los requerimientos a los que los muros se verán expuestos :

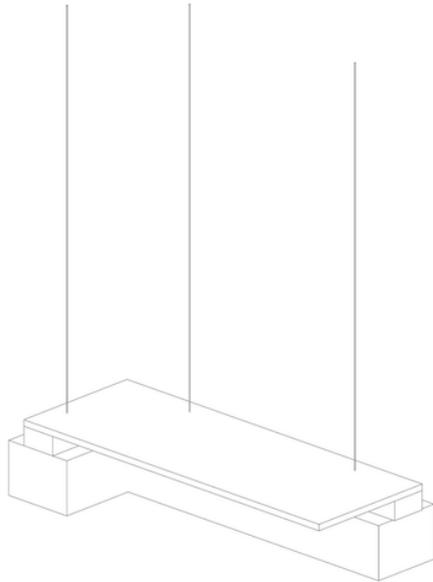
5.1.1 MUROS PORTANTES ESTRUCTURALES POST-TENSADOS.

Bajo el criterio de aplicar mampostería post-tensada como mampostería soportante, el cálculo deberá determinar la carga de presfuerzo a aplicarse considerando que las paredes están presionadas de antemano, cargas que en si mismas son precompresiones, en este caso se torna importante el esfuerzo admisible de los muros por peligro de sobrecarga. En esta tipología es importante el modo en que la tensión sirve a su vez como integradora entre las placas de cubierta o entepiso y los muros, el objetivo será que el presfuerzo promueva un funcionamiento conjunto y cohesionado de la estructura.



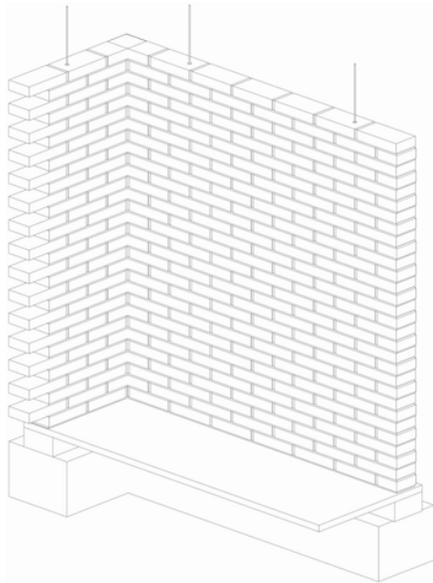
Detalle 8: Gata hidráulica automatizada adaptada como propuesta para aplicar presfuerzo a muros de mampostería. Axonometría.

Se propone la siguiente secuencia de armado y tensado por etapas, se ejemplifica una estructura sencilla:



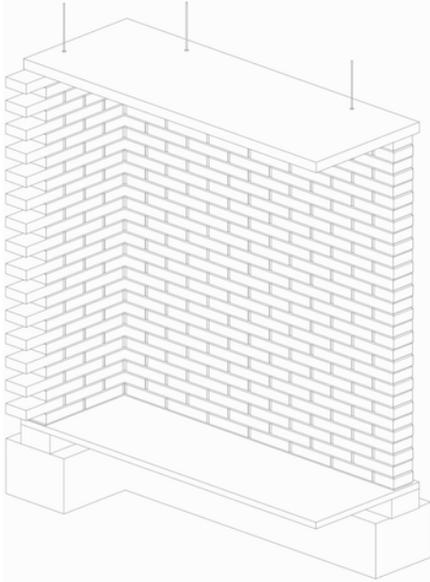
Detalle 9: Cimentación con cable embebido.

Detalle 10: Construcción de muro dejando libre los tensores pasados a través del muro.



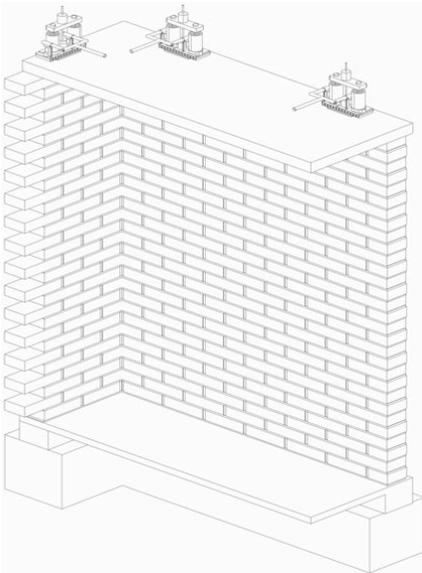
a) Fundición de cimentación: Es fundamental el anclaje extremo del cable de presfuerzo en el cimiento base al cual tiene que quedar sujeto fijamente con una longitud de desarrollo suficiente (*Detalle 54*), colocado con precisión en donde se requiere acorde a solicitaciones estructurales y requerimientos constructivos. Una ubicación precisa es fundamental por el margen de tolerancia mínimo dependiendo de el mampuesto a utilizarse y la dimensión de su perforación vertical. Se propone en esta experimentación sujetar el tensor a la cimentación por medio de un gancho formado en el tensor similar al acostumbrado a realizar en el refuerzo de varilla, para así afirmar un extremo. (*Detalles 9; Foto 40*)

b) Construcción de muro: Se levanta el muro dejando libre el cable o torón a través de las celdas verticales. Es importante dejar limpias las perforaciones contenedoras de tensores al colocar los mampuestos para a la poste no bloquear con rebabas el vertido del *grout* de protección, especialmente en mampuestos con unidades de perforación pequeñas. (*Detalle 10*)



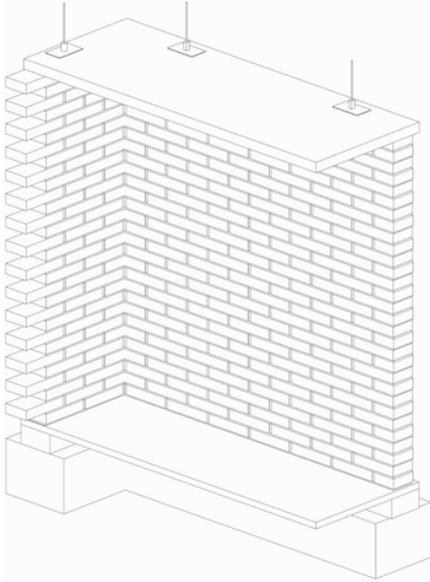
Detalle 11: Fundición de placa superior.

Detalle 12: Tensado de cables.



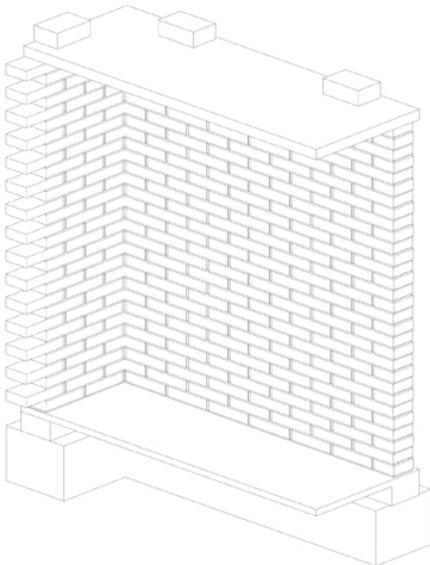
c) Fundición de placa superior: La placa superior de entrepiso o de cubierta deberá fundirse apoyada en los muros en contacto directo apoyándose en ellos dejando pasados los tendones sin que estos entren en contacto con el concreto fresco, por que al fraguar impediría el tensado posteriormente. Los tendones deben post-tensarse luego de endurecida la placa por lo cual no deben quedar fraguados en ella, al contrario, sueltos. (*Detalle 11*)

d) Tensado de cables: Para el tensado es importante la colocación previa de *grout* fluido elaborado con agregado fino en condiciones que esté apto para escurrir alrededor de el cable a todo lo alto de la celda, este material no tiene carácter estructural, su función será netamente de protección al tensor. Inmediatamente a la introducción de esta masilla se deberán aplicar los presfuerzos requeridos en cada uno de los tirantes, para esto es necesario que tanto los muros, como placa de cubierta o entrepiso estén fraguados completamente para evitar pérdidas diferidas. (*Detalle 12*)



Detalle 13: Anclaje definitivo final.

Detalle 14: Protección de anclaje.



e) Anclaje final: Una vez que se alcanza el presfuerzo requerido con el gato se coloca el anclaje definitivo el cual se fija y queda sujetando y transmitiendo la precompresión a la placa de acero transmisora que a su vez presiona la losa de entrepiso. (*Detalle 13*)

f) Una vez colocado y apretado el anclaje se requiere realizar un recubrimiento protector en este de modo que la humedad del medio ambiente no deteriore tanto el cable como la cuña o placa. En este sistema constructivo la placa de entrepiso viene a funcionar como solera distribuyendo la precompresión a lo largo del muro lo cual es muy adecuado y optimiza el sistema. (*Detalle 14*).

5.1.2 MAMPOSTERÍA NO PORTANTES O MUROS DIVISORIOS POST-TENSADOS.

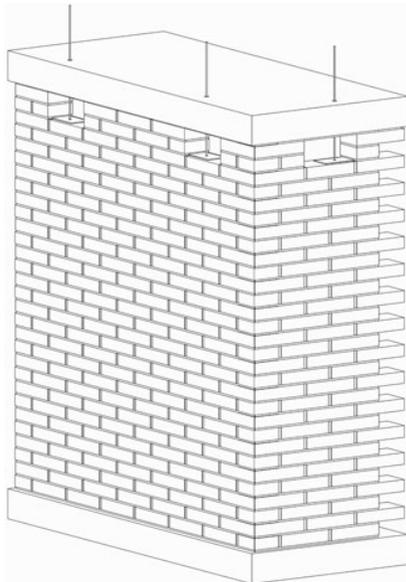
A continuación presentamos una alternativa para post-tensar muros de carácter no estructural. Los muros no portantes cumplen un papel divisorio debiendo soportar únicamente su peso propio, en este caso el presfuerzo deberá cumplir el papel de mejorar su desempeño ante empujes laterales eventuales como golpes, sismos o viento. Para construir este tipo de paredes proponemos el siguiente método:

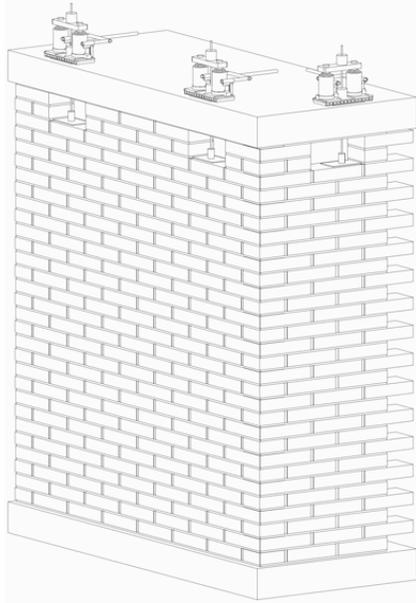
a) Anclaje o sujeción de cables en estructura portante: En primera instancia se deberán colocar los tensores embebidos en las placas de entrepiso, o en su defecto, dejarse las perforaciones en las placas de entrepiso. Esta segunda alternativa será más costosa por requerirse doble anclaje, pero con la ventaja de que los tensores no quedarán expuestos y estorbando durante la construcción en el intervalo de tiempo entre la construcción de la estructura y el levantamiento de los muros. Para ambos casos se deberá dejar orificios pasadores libres en la losa superior, aplomadas con respecto al nacimiento de los cables en la losa base. (*Detalle 15*).

Detalle 15: Construcción de estructura con cables embebidos en placa de piso y pasado sobre placa superior de entrepiso.

Detalle 16: Levantamiento de mampostería, dejando espacio para post-tensado.

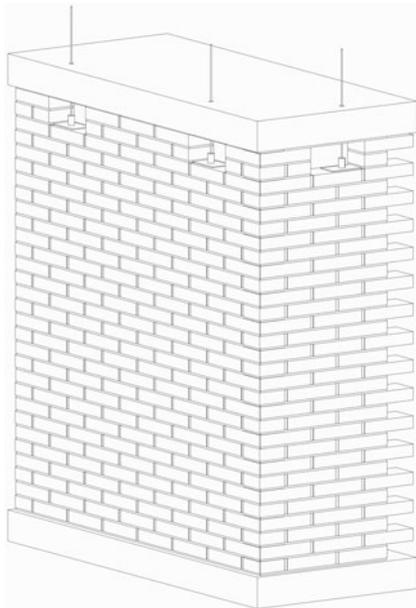
b) Construcción de muro: Se edifica el muro hilada a hilada, dejando pasados y libres los tensores hasta una altura en la que se pueda colocar la placa de transmisión además del anclaje, se requiere espacio suficiente para poder realizar el colocado de las cuñas (por ejemplo de ser mampostería de ladrillo *panelón* se necesitará aproximadamente las dos hiladas superiores por lo menos). Para el proceso de tensado es necesario que se dé el fraguado completo de mortero de las hiladas. (*Detalle 16*).





Detalle 17: Levantamiento de mampostería, dejando espacio para post-tensado.

Detalle 18: Retiro de gato tensor.



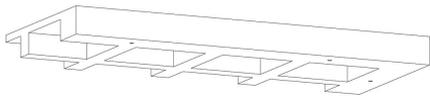
d) Tensado de cables: Una vez construida la pared y fraguadas las hiladas del muro se coloca *grout* fluido de protección en torno al tensor, se instala la placa de transmisión con el anclaje fijo y utilizando como apoyo la losa de entepiso superior se realiza el tensado, una vez alcanzado el esfuerzo necesario se fija el anclaje definitivo colocando las cuñas que sujetan el tensor, finalmente se retira el gato. (*Detalle 17*).

d) Resultado final: Una vez terminado el tensado se podrá recubrir el lugar de los anclajes con mampostería relleno el muro con hormigón o mampostería. Existe la deficiencia en esta propuesta de la falta de efecto de presfuerzo en partes en la zona superior de la pared. (*Detalle 18*).

5.1.3 TENSADO DESDE PLACA INFERIOR.

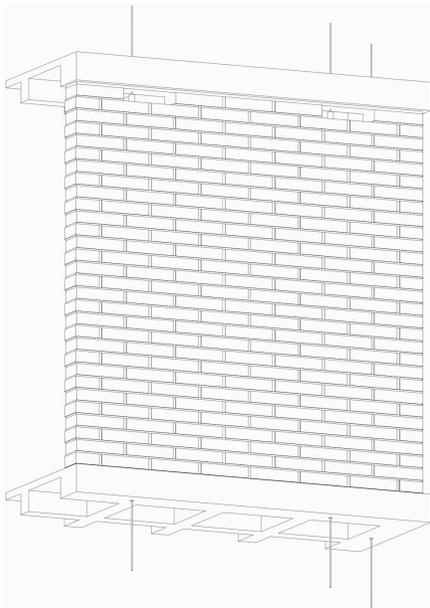
Se propone una variación para la alternativa expuesta en 5.1.2, esta es la implementación del tensado desde la losa de entrepiso inferior o de apoyo del muro, válido para plantas altas en entrepisos a partir del segundo nivel usando doble anclaje. El método constructivo será el siguiente:

a) Construcción de superestructura: Como se dijo esta opción es concebida para post-tensar paredes en plantas altas. Para su aplicación es necesario en la construcción de la estructura portante, dejar libre el hueco-pasador en las placas tanto superior como inferior de entrepiso en donde a la postre se ubicarán los tensores. Es muy importante el aplomar correctamente estos orificios y considerar el trabado de la mampostería para su ubicación exacta. (*Detalle 19*)

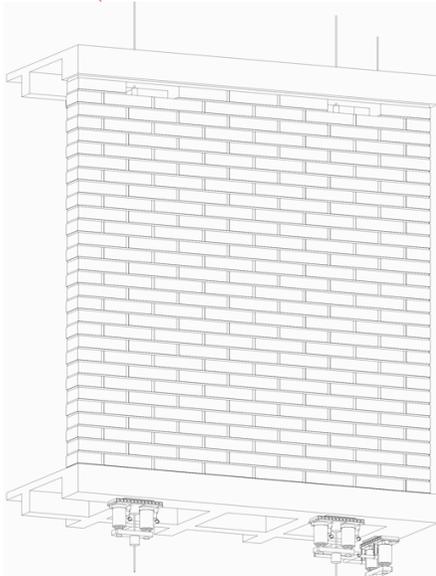


Detalle 19: Construcción de estructura portante y placas de entrepiso .

Detalle 20: Construcción de mampostería y pasado de tensores.

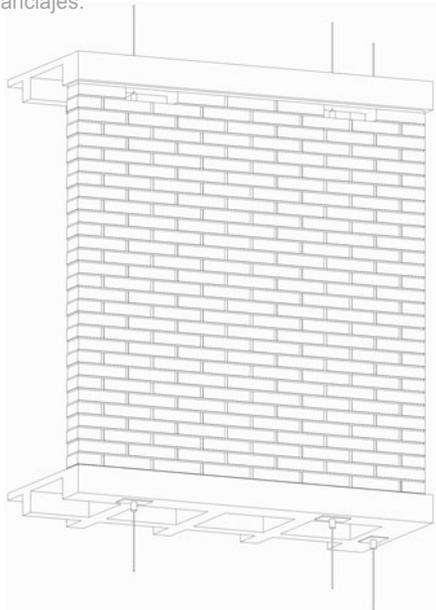


b) Elaboración de muro y colocado de cables: Para este sistema es necesaria la utilización de dos anclajes perennes. Una vez construida la pared y fraguado completamente el mortero de las hiladas de mampostería, optamos por colgar los cables sujetos a un anclaje abierto superior apoyado en la pared a través de una placa transmisora, dejándolo pasado a través de las dos placas de entrepiso. (*Detalle 20*)



Detalle 21: Aplicación de presfuerzo desde placa inferior.

Detalle 22: Retiro de gato y protección de anclajes.



c) El tensado en este método constructivo se lo realiza desde abajo del muro. Una segunda placa y anclaje perennes se fijan desde la cara inferior de la losa de entrepiso y apoyándose en esta de forma invertida, se procede a aplicar el presfuerzo con la magnitud requerida. (*Detalle 21*)

d) Finalmente alcanzada la tensión necesaria se libera el cable anclándolo colocando las cuñas en el anclaje abierto, de modo que presione en los dos extremos. Al igual que en los casos anteriores es necesario recubrir los tensores como los anclajes con mortero de protección. (*Detalle 22*)

5.1.4 TENSADO A TRAVÉS DE SOLERA

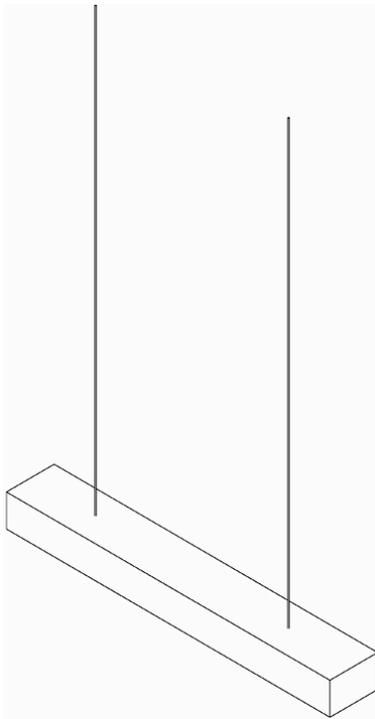
Para una mejor distribución del presfuerzo puede transmitírsele a través de una viga o solera por medio de la cual se distribuye la precompresión de una manera uniforme al muro. Este es un método adecuado respecto a los anteriores que lo ejecuta *Gavin D. Wight (Plano 4)* en su vivienda de *mampostería sin juntas* pero evidentemente más costoso por la necesidad justamente de utilizar un elemento estructural adicional a todo lo largo en el remate superior de la pared. Esta aplicación es ideal para muros de contención o muros exteriores y permite utilizar una mayor carga de presfuerzo considerando que no existe la limitación de la resistencia individual de medio mampuesto para calcular la carga máxima de post-tensado.

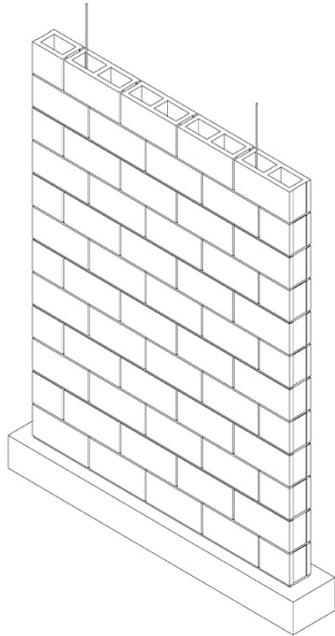
El hecho de distribuir el presfuerzo significa que se puede aplicar una mayor tensión y se logre un mejor desempeño ante carga lateral, siendo necesario considerar que la solera a utilizarse debe tener rigidez suficiente en cualquier material, en madera, acero, hormigón armado o presforzado, etc.

A continuación se expone el proceso constructivo de este sistema, en el ejemplo se considera que se colocará una solera conformada por un perfil en “C” como remate de la pared dispuesta a todo lo largo de la pared a manera de goterón. Se proponen los siguientes pasos:

a) Anclaje o sujeción de cables en cemento: En primera instancia, se deberá colocar en forma previa los cables tensores distribuidos de manera uniforme acorde a diseño estructural a lo largo de la pared embebidos en el cemento o placa de piso en la ubicación indicada acorde al trabado del muro y diseño estructural. (*Detalle 23*)

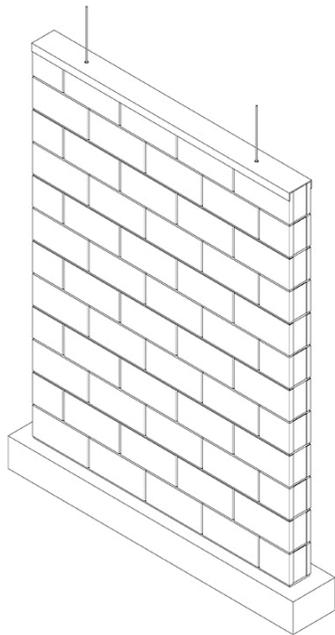
Detalle 23: Fundición de cemento y anclado inferior de tensores.





Detalle 24: Construcción de muro.

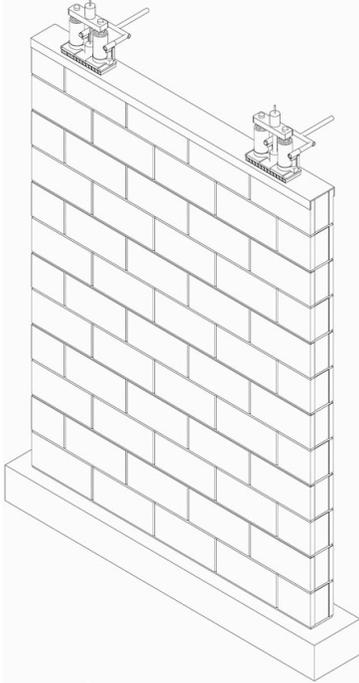
b) Se construye el muro dejando pasar los cables libremente a través de las celdas hasta la altura requerida. (*Detalle 24*)



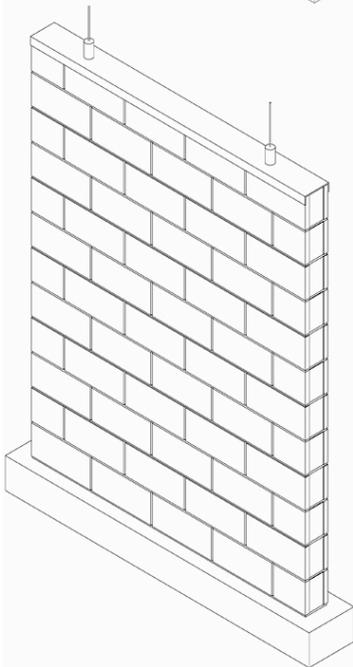
Detalle 25: Colocado de solera.

c) Se coloca la solera ya perforada de antemano en los sitios en donde pasarán los cables a lo largo de todo el remate del muro. Las perforaciones son del diámetro adecuado para dejar pasar los tensores. En el caso de tratarse de una solera de hormigón armado por ejemplo deberá dejarse los espacios para los tensores a través de ductos colocados previamente en la fundición del elemento horizontal para que no queden fundidos en ella. (*Detalle 25*)

Detalle 26: Tensado



d) Se procede a tensar apoyando la gata sobre la solera a través de un anclaje provisional y luego fijando el anclaje definitivo manteniendo así estirado el tensor. En este caso no se requiere de la placa de transmisión por que la solera viene a desempeñar este papel. (*Detalle 26*)



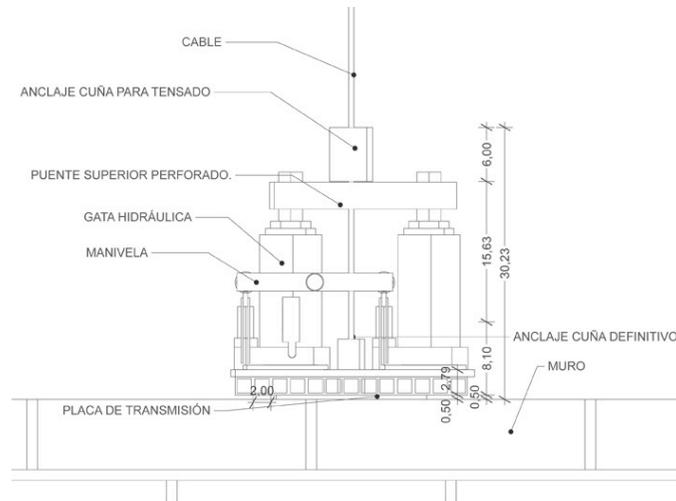
e) Alcanzada la tensión requerida se libera el gato tensor dejando el cable sujetado a través del anclaje definitivo que a su vez presiona a la solera de transmisión y esta al muro lográndose así una post-tensión distribuida uniformemente. (*Detalle 27*)

Detalle 27: Anclajes fijados en solera.

5.2 ADAPTACIÓN DE GATAS HIDRÁULICAS PARA POST-TESIÓ DE MUROS.

Por la ausencia de una herramienta adecuada para presforzar paredes (enunciado en 2.4) fue necesario pensar en una alternativa que satisfaga la necesidad de presforzar muros tanto por costo como por adaptabilidad y configuración, es decir peso y manejabilidad.

En el mercado cotidiano son comunes los gatos hidráulicos automotrices. A una pareja de gatas hidroneumáticas de este tipo se les adapta un soporte para presionar una placa de transmisión que queda fijada en el muro presforzándolo; en los cilindros de empuje de la gata se suelda una placa para que discorra el tensor a través de ella y que a su vez empuje un anclaje de tensado que tira del alambre o torón. La herramienta está pensada para empujar un anclaje temporal que abraza y sujeta el cable mientras se ejerce el jalado necesario para ubicar un anclaje definitivo mientras el tensor está estirado. Una vez que las gatas estiran el cable se fijan las cuñas en el anclaje definitivo (lo llamamos definitivo por que este quedará colocado para siempre) de modo que al liberar las gatas se presione por el regreso del tensor la placa de transmisión de acero que distribuye el esfuerzo en un área mayor que la del anclaje para que la mampostería no sufra un efecto de punzonamiento. (Foto 15 y Detalle 28). El esfuerzo aplicado se calcula a partir de la deformación de los tendones. Previo a la elaboración de esta herramienta se pretendió adaptar un manómetro a las gatas lo cual se logró sin éxito por que falla el momento que ejercía altas presiones; lo ideal sería construir la herramienta con gatas que vengan adaptadas un medidor de presión de fábrica las cuales existen en el mercado español y mexicano.



Detalle 28: Gata hidráulica automotriz adaptada.

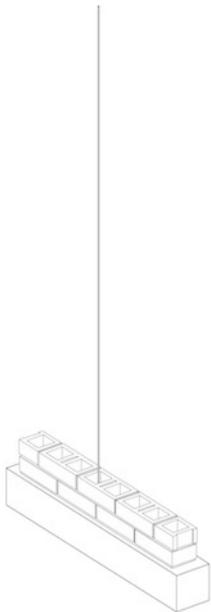
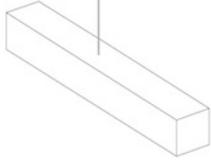
Foto 15: Resultado de adaptar la gata automotriz para presforzar.



El costo de esta herramienta en componentes es bajo, tanto la gata como elementos de acero acoplado no representan un gasto oneroso, en nuestro mercado una gata de 4 toneladas tiene un valor de 12 USD. Lo complejo y costoso fue la mano de obra de un técnico mecánico capacitado para realizar una labor milimétrica para acoplar los dos dispositivos en el sitio adecuado y realizar la construcción de la herramienta en si, a la final el dispositivo tuvo un valor aproximado a los 190 USD. Sin duda, su producción industrial en serie puede abaratar este costo.

La herramienta pesa once kilogramos, es manejable y transportable. Una gata de mayor capacidad con esta configuración puede su peso y tamaño ser un problema.

Detalle 29: Fundición de viga base y anclaje de tensor.



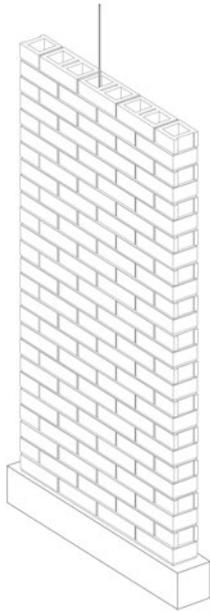
Detalle 30: Primeras hiladas.

5.3 Diseño de método aplicación de presfuerzo.

Con la gata de post-tensado lista procedemos al diseño de el método constructivo y tensado de los cables internos en los muros. Los pasos necesarios para implementar el presfuerzo con la nueva herramienta es similar para cualquier tipo de mampostería, el proceso que se propone es el siguiente:

a) Anclaje o sujeción de cable a estructura: El cable de presfuerzo debe fijarse o embeberse en la placa o viga base previo a la construcción del muro. En caso de tratarse de un torón puede doblarse en gancho (*Foto 40*) de modo similar al que comúnmente se utiliza en varilla de refuerzo (*Detalle 29*).

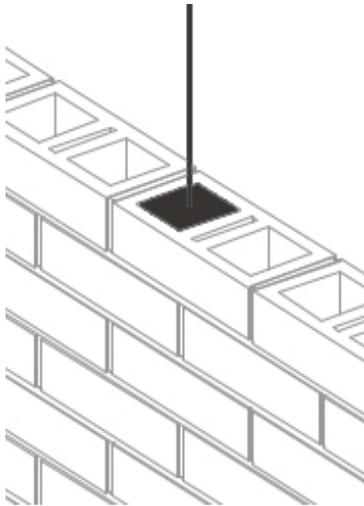
b) Construcción primeras hiladas: Las primeras hiladas emitirán el patrón de trabado al resto del muro, este patrón debe estar previamente determinado y dimensionado de modo que se pueda ubicar exactamente cada tensor en su sitio. (*Detalle 30*)



Detalle 31: Construcción total del muro.

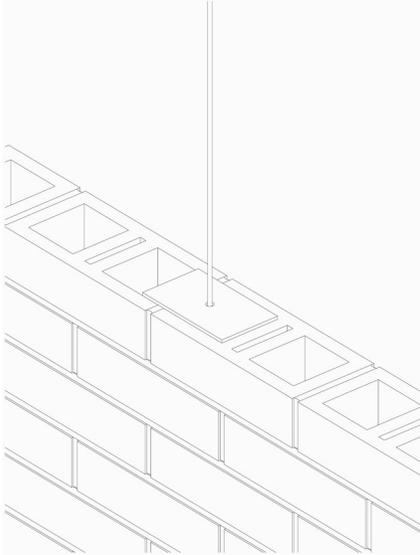
c) Construcción del muro: A continuación se levanta el resto del muro hasta la altura determinada por el diseño dejando libres y sueltos los cables tomando la precaución de retirar residuos internos de masilla que puedan quedar en las celdas. Residuos en estos espacios a la postre pueden impedir que fluya el mortero de protección adecuadamente alrededor de todo el tensor. Una vez concluido el muro es necesario esperar el fraguado completo de las juntas, previo a realizar cualquier trabajo de tensado.

Para muros altos de doble altura será necesario la ubicación de ventanas de revisión en intervalos intermedios a lo largo de la altura de la celda como las usualmente empleadas en mampostería estructural para el vertido de *grout* desde alturas intermedias y que además permitan ver y asegurar el llenado total de los ductos. (*Detalle 31*)



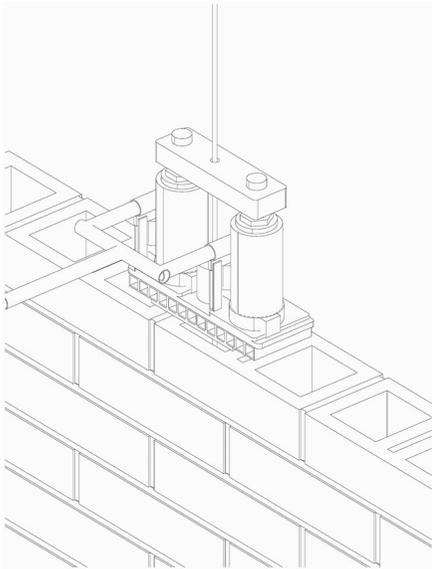
Detalle 32: Vertido de grout en perforaciones con tensores.

d) Mortero de protección o *grout*: Inmediatamente antes de realizar el trabajo de tensado, se vierte el mortero de protección fluido en las perforaciones verticales que contienen los tensores; este material no está considerado como resistente o de características estructurales. Es importante que el tensado se realice mientras el mortero esté fluido y maleable, si se realiza el tensado cuando está endurecido lo fracturaría, limitando su capacidad protectora. (*Detalle 32*)



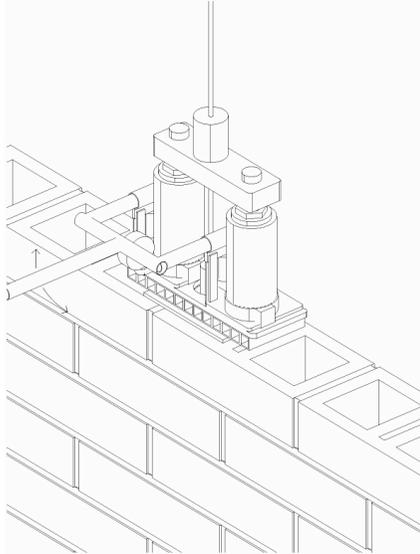
Detalle 33: Colocado de placa de transmisión.

e) Placa permanente de transmisión: Inmediatamente luego de vertido el mortero de protección y ubicado el tensor centrado en su celda, se procede a colocar una placa de acero la cual deberá estar diseñada acorde a la carga de presfuerzo y con el área mínima para distribuir dicha presión en el mampuesto de apoyo, este es el elemento que presione la mampostería, post-tensándola. Como se explicó en 5.1.4, este transmisor puede ser una solera de remate el cual logra una mejor transmisión uniformemente distribuida. (*Detalle 33*)



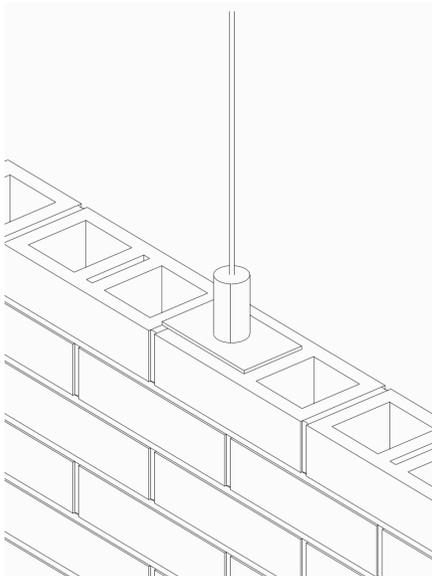
Detalle 34: Ubicación de anclaje perenne y gato.

f) Gata y anclaje perenne: Una vez colocada la placa de transmisión es momento de ejecutar el tensado del cable, para esto, se coloca primero un anclaje de presfuerzo definitivo, este no tendrá sus cuñas todavía, estará suelto; procedemos entonces a ubicar el gato en posición para el tensionamiento pasando el tensor por el orificio de el *punte superior perforado* (ver *Detalle 28*) de empuje de la herramienta. (*Detalle 34*)



Detalle 35: Proceso de tensado.

g) Tensado: Una vez ubicado el gato se coloca un anclaje removible apoyado sobre el *punte superior perforado (Detalle 28)* de la herramienta embonando a la vez el cable, sujetándolo con las cuñas respectivas para estirarlo al accionar las gatas. Una vez sujetado el tensor se acciona la herramienta y se tensa el cable controlando el esfuerzo necesario a través de medir el estiramiento del tensor. Al alcanzar el presfuerzo necesario se colocan las cuñas en el anclaje perenne, fijando de este modo el tensor estirado y sujetado al anclaje definitivo el cual a su vez presiona la placa de transmisión. (*Detalles 28 y 35*)



Detalle 36: Terminado tensado.

h) Retiro de gato tensor: Finalmente se retira el anclaje temporal y el gato tensor quedando así fijado el anclaje definitivo. Es importante proteger el anclaje y extremo de cable con mortero, concreto o algún tipo de protección para garantizar el no deterioro del dispositivo por exposición al medio ambiente. (*Detalle 36*)

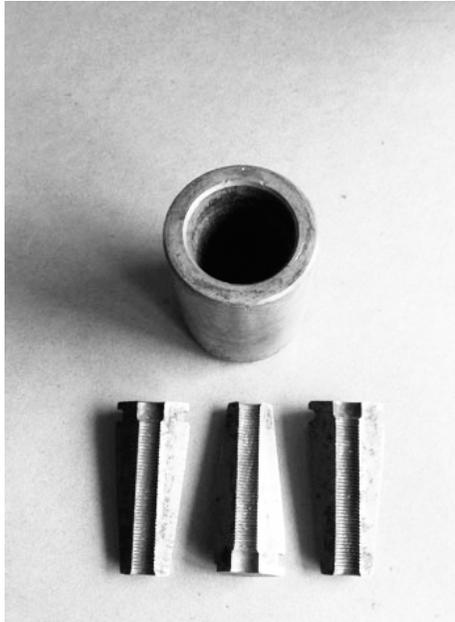


Foto 16: Anclaje tipo abierto.



Foto 17: Torón de 9 mm sujetado en anclajes

6 EXPERIMENTACIÓN.

Con los antecedentes, sistemas constructivos, herramienta adaptada y materiales disponibles, tenemos los parámetros e implementos necesarios para experimentar y observar el comportamiento de las paredes construidas con materiales locales en muros presforzados. Para esto se realiza una selección de unidades diversas de mampostería a través de pruebas de resistencia a compresión (característica fundamental para soportar precompresiones). Con los mejores mampuesto encontrados en la primera selección elaboramos prismas testigo para ensayarlos a compresión y obtener su resistencia de diseño $f'm$. Finalmente acorde a la capacidad de cada tipo de mampostería se construyen muros de altura estándar considerando las dimensiones de entrepiso en nuestra arquitectura, a estos se les aplica presfuerzo y se los prueba ejerciendo carga lateral.

6.1 SELECCIÓN DE MATERIALES.

Los materiales requeridos para la construcción de mampostería post-tensada difieren alrededor del mundo de acuerdo con la capacidad industrial y materia prima disponible. En algunos países existe una predominante industria ladrillera como es el caso de Colombia, en otros se tiene disponibilidad de bloque de concreto de alta capacidad como Nueva Zelanda, en cada lugar varían el formato, capacidades y limitaciones resistentes de lo que resulta una amplia gama de soluciones y procedimientos constructivos. Como consecuencia los referentes de esta investigación utilizan y logran diversos resultados acorde a los materiales que cada uno dispone, sucede lo mismo con los métodos de post-tensado. Del mismo modo en la presente investigación, por no existir experiencias previas locales, se hace una amplia observación de lo disponible concretamente en la ciudad de Cuenca y en Ecuador, en donde se emplea tanto bloque de concreto, ladrillo cerámico industria y artesanal; por esta razón se decide considerar estos tres tipos de materiales para las primeras pruebas como una puerta a posteriores investigaciones más profundas con la selección de mampuestos que presentan las mejores características.

En cuanto a tecnología de post-tensado se utiliza la disponible localmente a través de suministros que se importan frecuente por empresas o



Foto 18: Alambre de presfuerzo de diámetro inferior a 7 mm. Fuente: <http://www.bekaert.com/en/>

comercializadoras del país: anclaje tipo *abierto*, torón de acero de baja relajación (Fotos 16 y 17) y la herramienta de presfuerzo adaptada anteriormente descrita.

6.1.1 SELECCIÓN DE MATERIALES PARA APLICAR POST-TENSIÓN.

El post-tensado es utilizado en el Ecuador de manera cotidiana únicamente en industria de elementos prefabricados. Las características de fabricación de elementos preforzados exige aplicar grandes presiones, consecuentemente herramientas exageradamente potentes para el requerimiento aquí planteado. Por esta razón se procede a la búsqueda de una alternativa para muros con la herramienta de presfuerzo diseñada para este fin (5.2). Por otra parte, a Diciembre del 2011, se pudo establecer la ausencia en el mercado de alambre de presfuerzo de diámetro adecuado para comprimir mampostería, se dispone únicamente de torones, siendo el de 9 mm (3/8 de pulgada) el diámetro inferior disponible en la planta industrial *RFV* en Cuenca; se busca entonces adquirir tensores con secciones más adecuadas pero las comercializadoras ofrecen cotizaciones bajo el criterio de importación en volumen mínimo de tres toneladas en el diámetro que se solicite. La comercializadora *Ingecables* de Quito, por ejemplo, cotiza los 3000 kg de cable de \varnothing 6 mm en un costo de 9307,20 USD. En Cuenca otra empresa dispuesta a traer el material es *Bekaert* a través de su filial local *Ideal-Alambre* quienes disponen de alambres de presfuerzo desde \varnothing 4 mm de diámetro, desde su planta de producción en Bélgica, ellos, a pesar de la insistencia nunca realizaron una oferta económica.

Cuadro 4:: Parámetros técnicos de alambre de presfuerzo Bekaert. Fuente: <http://www.bekaert.com/en/>

Technical parameters

Standard		PN-86-01-96				
Nominal diameter	(mm)	4,0	5,0	6,0	7,0	7,5
Nominal tensile strength	(MPa)	1670	1670	1670	1570	1570
		1770	1770	1770	1670	1670
Nominal yield point	(MPa)	1390	1390	1390	1300	1300
		1470	1470	1470	1390	1390
Nominal cross section	(mm ²)	12,6	19,6	28,3	38,5	44,2
Nominal unit weight	(g/m)	98,2	153,3	220,8	300,5	345
Breaking strength	min. (kN)	21,0	32,7	47,3	60,4	69,4
		22,3	34,7	50,1	64,3	73,8
Charac. value of 0,1 % proof force	min. (kN)	17,5	27,2	39,3	50,1	57,5
		18,5	28,8	41,6	53,4	61,2
Elongation at max. strength	min. (%)	3,5				
Relaxation	0,7 Rm max. (%)	2,5				
Tolerance of diam.	(mm)	±0,04	±0,05	±0,05	±0,05	±0,06
Tolerance on cross section	(%)	±2				
Tolerance on unit weight	(g/m)	±2				

Los anclajes de precompresión seleccionados para esta investigación corresponden a un sistema muy difundido en el campo de los preforzados local e internacionalmente, se conocen como *anclaje abierto* y están constituidos por cuñas y un barrilete, se ha generalizado su uso por precio y sencillez de utilización, permite la inspección durante su empleo y es fácil de limpiar, mantener y reutilizar. Para cables la cuña está compuesta por dos piezas y para cordones o torones de tres. Se encuentran para diámetros desde 3 mm hasta torón de 18 mm su aspecto es cilíndrico-hueco con perforación cónica interna, son de acero; los elementos que conjuntamente forman el cono-cuña al momento de sujetar el tensor cuando se estiran y regresan se traban y aprietan; este dispositivo es importado por *León Cables* de Quito. Los que se obtuvieron para esta prueba están en el



Foto 19: Prueba de bloque Hormiazuay a compresión.

mercado local en un costo aproximado de 24 USD por unidad, proceden de Estados Unidos. En el país están ya en oferta nuevas marcas de procedencia China acorde al *Ing. Vladimir Carrasco* gerente operativo de *RFV*, quién nos facilita una dirección¹² de importadora que ofrece dispositivos desde 2 USD la unidad en el país de origen, a lo que habría que sumar los costos de importación lo cual implicaría un estimado del doble de valor original, es decir alrededor de 4 USD la unidad en nuestro mercado siempre y cuando se realice una compra al por mayor.

6.1.2 SELECCIÓN DE MATERIALES DE MAMPOSTERÍA

En primera instancia se preseleccionan materiales de mampostería en base a su disponibilidad y abundancia en el mercado, considerando también su procedencia, que además presenten cohesión y buena presencia. Para esto se escoge mampostería en bloques de concreto, ladrillos industrial y artesanal, los tres tipos usados que predominan en Cuenca y en el país. Se ensayan a compresión para conocer los de mejor comportamiento de cada tipo. A continuación se describen los ensayos practicados:

6.1.2.1 Prueba de selección de bloques de concreto:

Foto 20: Prueba de bloque Disensa a compresión.



Bajo observación directa en comercios y por forma, compacidad, peso y uniformidad geométrica del material se seleccionan tres marcas de bloque de concreto. Los productos son bloque de 40 X 20 X 20 de Opseret y bloque de 40 X 15 X 20 de Hormiazuay, ambos fabricantes de Cuenca, además bloque de 40 X 15 X 20 de Disensa de Guayaquil. Con la finalidad de conocer los de mayor resistencia se efectúan ensayos de tres unidades de cada uno a compresión. Por la dispersión de un ensayo de un ejemplar de Hormiazuay, se realiza otra prueba adicional de esta marca. Los resultados que alcanzan los bloques se expresan en el siguiente cuadro:

¹² http://www.alibaba.com/product-gs/548234894/post_tensioned_prestressed_anchorage.html



Foto 21: Ladrillo de Susudel probado.

Foto 22: Ladrillo de Oña a flexión.



Cuadro 5: Resistencia de pruebas individuales de bloques de concreto.

MAMPOSTERIA	Fabricante	Dimensiones (cm.)	Ensayos	Carga neta de falla	Resistencia Bruta (Kg/cm ²)	Resistencia Bruta promedio (Kg./cm ²)
Bloque de Concreto	Opseret	40 X 20 X 20	1	13076 kg.f	16,35	18,99
			2	14861 kg.f	18,58	
			3	17631 kg.f	22,04	
	Disensa	40 X 15 X 20	1	20799 kg.f	34,67	35,43
			2	21387 kg.f	35,65	
			3	21581 kg.f	35,97	
	Hormiazuy	40 X 15 X 20	1	26384 kg.f	44,30	74,37
			2	48253kg.f	81,02	
			3	49283kg.	82,75	
			4	53260 kg.f	89,42	

El bloque de mejor desempeño resultó el de Hormiazuy, con una resistencia promedio de 74,37 Kg/cm², más del doble respecto al bloque de Disensa y aproximadamente tres veces superior al bloque de Opseret.

6.1.2.2 Prueba de selección de ladrillo artesanal:

Existe en Cuenca variedad de ladrillos artesanales, el más común es el conocido como *panelón*, este material procede de muchos fabricantes pequeños, circunstancia que complica encontrar alguno que prevalezca en el mercado. Por esta razón se opta por una selección de acuerdo a procedencia de material, considerando que por ubicación, es decir, acorde a materia prima de elaboración, podemos localizar en que zona se elabora el ladrillo más resistente al ejecutar con ellos ensayos de compresión. Se toman muestras procedentes de Oña, Susudel y Sayausí, lugares que se caracterizan por fabricar y proveer este material en abundancia.

El material fabricado en Oña fue suministrado por el Comercio *Benigno Bravo*, el ladrillo de Susudel fue obtenido en *Comercial Amazonas* y el ladrillo de Sayausí proviene de la *fábrica de José Tacuri*.

A continuación se expone el cuadro comparativo con el resultado de las pruebas a compresión de estas unidades de mampostería:



Foto 23: Ladrillo industrial de Alfadomus embebido en agua para ensayo.

Cuadro 6: Resistencia de pruebas individuales de ladrillo artesanal.

MAMPOSTERÍA	Fabricante	Dimensiones (cm.)	Ensayos	Carga neta de falla	Resistencia Bruta (kg/cm ²)	Resistencia Bruta promedio (Kg/cm ²)
Ladrillo Panelón	Susudel	26,5 X 7,8 X 12,5		1 38371 kg.f	115,84	106,34
				2 40942 kg.f	123,60	
				3 26367 kg.f	79,60	
	Oña	25,7 X 7,5 X 11,8		1 29657 kg.f	97,79	96,96
				2 31751 kg.f	104,70	
				3 26808 kg.f	88,40	
	Sayausí	27,5 X 7,7 X 13,8		1 21380 kg.f	60,28	63,16
				2 25211 kg.f	71,08	
				3 20605 kg.f	58,10	

En el cuadro observamos que el ladrillo de Susudel supera en resistencia con algo más del 10% al de Oña y con más del 40% al de Sayausí en capacidad ante compresión, por lo tanto es el seleccionado.

6.1.2.3 Prueba para selección de ladrillo industrial:

En el caso de ladrillo industrial, la situación actual es muy limitada, el ladrillo industrial existente no cumple con los requisitos adecuados para elaborar mampostería industrial. En toda la investigación de campo solo encontramos un tipo de mampuesto que presenta características para ser empleado en mampostería armada con perforación vertical. Es común encontrar mampuestos con 4 perforaciones e incluso 8 o más por pieza, pero con 2 perforaciones con las dimensiones adecuadas exigidas por normativa para mampostería estructural se encontró solamente un tipo proveniente de la fábrica *Alfadomus* de Guayaquil. Sin embargo las distintas fábricas muestran apertura a realizar este tipo de material bajo pedido con la creación de la respectiva matriz para extrusión, con compras superiores a 10000 unidades.

Por esta razón se prueba el único material existente, comercialmente nominado por el proveedor como “*Bloque de 30 X 15 de 2 huecos*”.

El resultado de la prueba a compresión de elementos individuales fue el siguiente:

Cuadro 7: Resistencia de pruebas individuales de ladrillo industrial.

MAMPOSTERIA	Fabricante	Dimensiones (cm.)	Ensayos	Carga neta de falla	Resistencia Bruta kg/cm ²	Resistencia Bruta promedio
Ladrillo Industrial	Alfadomus	30,8 X 15 X 8	1	56003 kg.f	121,22	130,44
			2	60612 kg.f	131,19	
			3	64171 kg.f	138,90	

Esta prueba demuestra que la resistencia de este material en su área bruta es el más alto de todos los materiales probados a pesar de que el tamaño de las perforaciones es significativo, por lo tanto mostró ser el material más idóneo en resistencia de los ensayados.

6.2 DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA Y CAPACIDAD DE MATERIALES DE PRESFUERZO

De acuerdo a los diámetros de los cables de presfuerzo y considerando una capacidad de tensado de 15200 kg/cm² magnitud establecida en las normativas al considerarse el 80% de resistencia última, siendo dicha resistencia 18600 kg/cm² de acuerdo a catálogo de fabricación, calculamos el esfuerzo que teóricamente puede aplicar cada tipo de cable por su diámetro. Luego en base a la resistencia de las distintas mamposterías, se puede determinar la capacidad para absorber las máximas tensiones que teóricamente pueden lograrse, así, detectamos el riesgo potencial que implica el sobreesfuerzo puntual que se puede generar al aplicar precompresión en una limitada sección del muro de mampostería.

6.2.1 CAPACIDAD DE TENSIÓN DE CABLES ACORDE A SU DIÁMETRO.

La máxima fuerza que se puede aplicar en cada cable está limitada por el menor valor de :

- La máxima fuerza que se puede aplicar por la calidad y sección del tensor.
- La máxima fuerza que resiste la unidad de mampostería en media pieza.

A continuación se exponen tres ejemplos dependiendo del tipo de cable:

6.2.1.1 Capacidad de presfuerzo de cable de 5 y 6 mm:

-El cable de 5 mm de diámetro, podrá aplicar la siguiente carga:

Sección del cable: $A = (\pi * d^2)/4$

$$A = (\pi * 0,5^2) / 4$$

$$A = 0,1963 \text{ cm}^2$$

Capacidad a tensión de cable de presfuerzo de $\varnothing=5$ mm :

σ de cable de presfuerzo=15200 kg/cm²

$$F = A * \sigma$$

$$F = 0,1963 * 15200$$

F= 2984 Kg (Fuerza máxima que puede aplicar un cable de diámetro de 5 mm).

- En el caso de un cable de 6 mm de diámetro, podrá este ejercer la siguiente carga:

Sección del cable: $A = (\pi * d^2)/4$

$$A = (\pi * 0,6^2) / 4$$

$$A = 0,2827 \text{ cm}^2$$

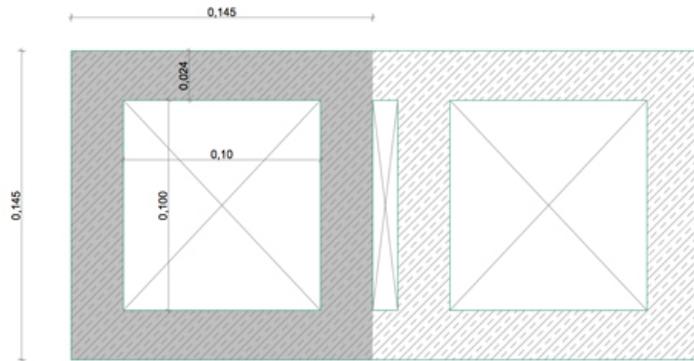
Capacidad a tensión de cable de presfuerzo de $\varnothing=6$ mm:

σ de cable de presfuerzo=15200 kg/cm²

$$F = A * \sigma$$

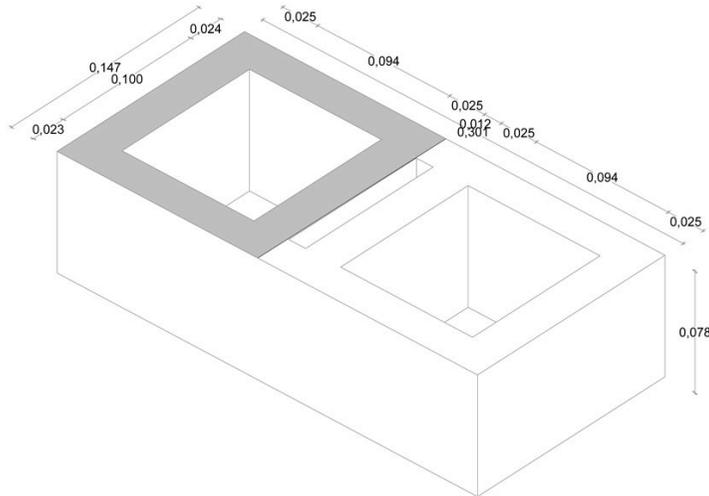
$$F = 0,2827 * 15200$$

F= 4298 Kg (Fuerza que puede aplicar un cable de diámetro de 6mm).



Detalle 37: Geometría de mampuesto Ladrillo industrial Alfadomus Área donde la presión se ejerce en el mampuesto de soporte de placa de transmisión.

Detalle 38: Axonometría de mampuesto industrial Alfadomus.



6.2.1.2 Capacidad de presfuerzo de torón de 9 mm:

En el caso de un cordón de 9 mm de diámetro tendrá capacidad de ejercer el siguiente presfuerzo teóricamente:

Sección del cable: Por tratarse de un torón, el cálculo de la sección del cable no aplica en términos convencionales sino a partir de catálogo de fabricante. Para el torón de 3/8 se considera una sección neta de 0,53 cm².

Capacidad a tensión de torón de presfuerzo de $\phi=9\text{mm}$:
 σ de cable de presfuerzo=15200 kg/cm².

$$F = A * \sigma$$

$$F = 0,53 * 15200$$

F = 8056 Kg (Fuerza máxima que puede aplicar un torón de diámetro de 9 mm).

6.2.2 COMPORTAMIENTO ESPERADO DE DIFERENTES MAMPUESTOS FRENTE A DIFERENTES SECCIONES DE CABLES O TORONES

6.2.2.1 Comportamiento de mampuesto industrial Alfadomus individualmente.

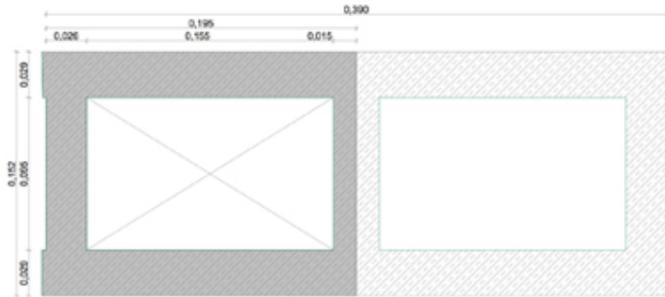
Tomando el modelo de mampuesto industrial de la fábrica Alfadomus de las siguientes características:

Área portante de pieza de transferencia de post-tensión en cm² (Detalle 37 y 38):

$$A = (14,5 * 14,5) - (10 * 10)$$

$$A = 110,25 .$$

σ de material de mampuesto necesario para resistir la carga máxima de un



Detalle 39: Geometría de mampuesto bloque de concreto Hormiazua; Área donde la presión se ejerce en el mampuesto de soporte de placa de transmisión.

cable de 5 mm.

$$\sigma = 2984 \text{ kg} / 110,25 \text{ cm}^2 = 27,07 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ de material de mampuesto necesario para resistir la carga máxima de un cable de 6 mm.

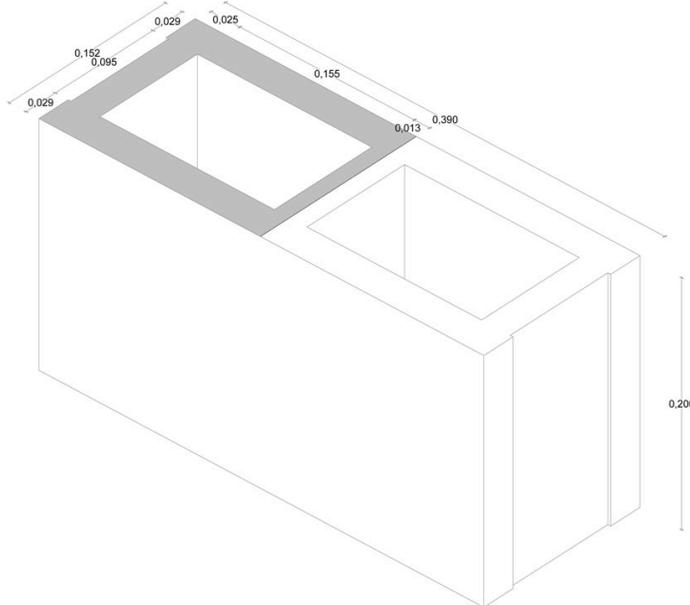
$$\sigma = 4298 \text{ kg} / 110,25 \text{ cm}^2 = 38,98 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ de material de mampuesto necesario para resistir la carga máxima de un torón de 9 mm.

$$\sigma = 8056 \text{ kg} / 110,25 \text{ cm}^2 = 73,07 \text{ Kg/cm}^2.$$

Considerando que en los ensayos de resistencia ante compresión del ladrillo industrial (ver 6.1.2.3) arroja un promedio de resistencia del mampuesto de $130,44 \text{ kg/cm}^2$ y el menor valor individual es de $121,22 \text{ kg/cm}^2$, y por otra parte, que el torón de 9 mm aplica una carga de $73,07 \text{ kg/cm}^2$, deducimos que un mampuesto, el que individualmente va a soportar la carga de presfuerzo en primera hilada, teóricamente, está en capacidad de absorber el presfuerzo máximo que estos cables y torón pueden aplicar.

Detalle 40: Axonometría de bloque de concreto Hormiazua.



6.2.2.2 Comportamiento de bloque de concreto individualmente.

En el caso del bloque de concreto de las características de Hormiazua su capacidad resistente ante compresión será:

Área portante de placa de post-tensión en cm^2 :

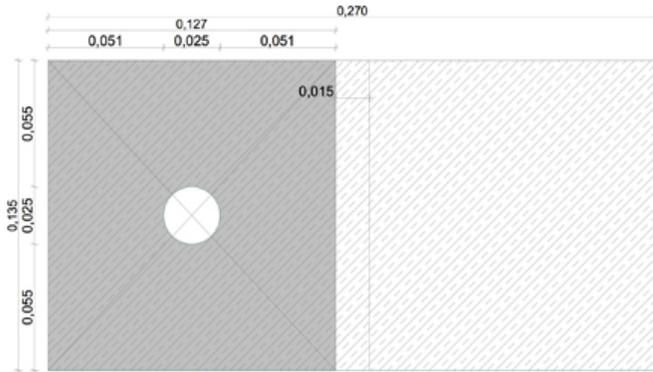
$$A = (19,5 * 15,2) - (15,5 * 9,5)$$

$$A = 149,15 \text{ cm}^2.$$

σ de material de bloque necesario para resistir la carga máxima de un cable de $\varnothing 5 \text{ mm}$:

$$\sigma = 2984 \text{ kg} / 149,15 \text{ cm}^2 = 20,01 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ de material de bloque necesario para resistir la carga máxima de un cable



Detalle 41: Geometría de mampuesto ladrillo panelón perforado:
Área donde la presión se ejerce en el mampuesto de soporte de placa de transmisión.

de $\varnothing 6$ mm:

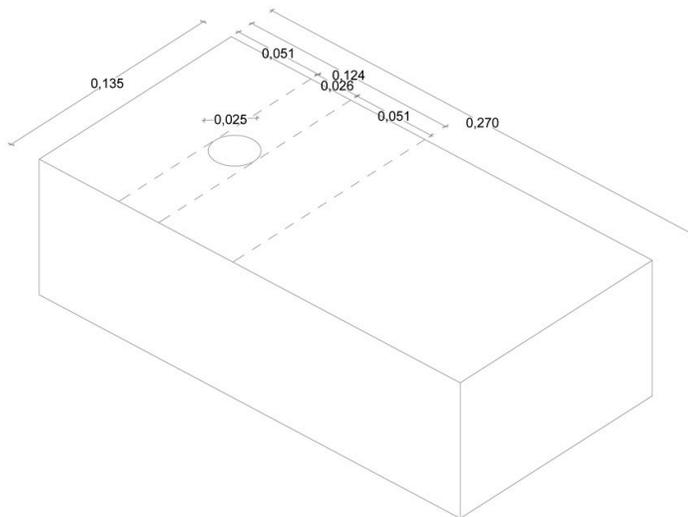
$$\sigma = 4298 \text{ kg} / 149,15 \text{ cm}^2 = 28,82 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ de material de bloque necesario para resistir la carga máxima de un torón de $\varnothing 9$ mm:

$$\sigma = 8056 \text{ kg} / 149,15 \text{ cm}^2 = 54,01 \text{ Kg/cm}^2.$$

Considerando entonces que en los ensayos de resistencia ante compresión del bloque individualmente (ver 6.1.2.1) vemos que para el mejor (Hormiazuary) su resistencia promedio es $74,37 \text{ Kg/cm}^2$ y el más bajo ensayo individual alcanzó $44,30 \text{ Kg/cm}^2$, se deduce que el primer medio bloque en el que la placa y anclaje van a actuar puede resistir teóricamente un cable de 5 y 6 mm a su máxima capacidad de presforzar; en el caso del torón de 9 mm el promedio del material permitiría teóricamente su desempeño a máxima capacidad, pero si se observa el ensayo más bajo este es notablemente inferior por lo que podría fallar en el instante de máxima carga el momento del tensado, por lo tanto se tiene el riesgo de falta de capacidad y colapso del bloque, se recomienda entonces controlar el tensado a altas presiones de este tipo de mampostería.

Detalle 42: Axonometría de ladrillo panelón perforado.



6.2.2.3 Comportamiento de unidades de ladrillo de producción artesanal:

Considerando un modelo de mampuesto artesanal tipo *panelón* de las siguientes características:

Área resistente de placa de post-tensión en cm^2 :

$$A = (13,5 * 12,7) - (\pi * 1,25^2)$$

$$A = 166,54 \text{ cm}^2.$$

σ de material de mampuesto necesario para resistir la carga máxima de un cable de 5 mm:

$$\sigma = 2984 \text{ Kg} / 166,54 \text{ cm}^2 = 17,92 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ de material de mampuesto necesario para resistir la carga máxima de un cable de 6 mm:

Tabla D.3.7-1
Factor de corrección por esbeltez para f'_m

Relación altura/espesor del murete	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
Factor de corrección	0.86	1.0	1.04	1.07	1.15	1.22

Cuadro 8: Índices de corrección de capacidad a compresión de muretes acorde a SNR-10. Fuente: *Reglamento Colombiano de la construcción sismoresistente, Bogotá 2010.*

$$\sigma = 4298 \text{ Kg} / 166,54 \text{ cm}^2 = 25,81 \text{ Kg/cm}^2.$$

σ de material de mampuesto necesario para resistir la carga máxima de un torón de 9 mm:

$$\sigma = 8056 \text{ Kg} / 166,54 \text{ cm}^2 = 48,37 \text{ Kg/cm}^2.$$

Puesto que en los ensayos de resistencia ante compresión de ladrillo *panelón* individualmente (ver 6.1.2.2) vemos que para el mejor (*de Susudel*) su resistencia promedio es 106,34 Kg/cm² y el más bajo ensayo individual alcanzó 79,60 Kg/cm², se deduce que el primer medio ladrillo en el que la placa y cuña van a actuar, puede resistir teóricamente los cables de \varnothing 5 y 6 mm y el torón de \varnothing 9 mm a su máxima capacidad de aplicar presfuerzo.

6.2.3 ELABORACIÓN DE MURETES, ENSAYO Y CÁLCULO DE CARGA ADMISIBLE (f'_m).

Luego de conocer los mampuestos con mejor comportamiento a compresión se procede a examinar su capacidad admisible bajo los parámetros de la normativa sismoresistente colombiana 2010 NSR-10 para muros. Acorde a esta reglamentación, de no existir registros históricos se puede determinar este dato por cálculo en función de los componentes individuales o a través de ensayos de muretes-testigos. Por recomendación de *H.R. Ganz*, referencia 4, se opta por lo segundo.

Cuadro 9: Cuadro de clasificación de tipo de mortero para mampostería. Fuente: *Reglamento Colombiano de la construcción sismoresistente, Bogotá 2010.*

Tabla D.3.4-1
Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad ⁽¹⁾			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión f'_c MPa ⁽²⁾	Flujo en (%) ⁽³⁾	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada ⁽⁴⁾	Cemento para Mampostería ⁽⁷⁾	Arena/Material Cementante ⁽⁵⁾	
							Min.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.0
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.5
				0.5	no aplica	1	2.50	3.0
N ⁽⁶⁾	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.5
				0	no aplica	1	3.00	4.0

Notas:

Para encontrar la resistencia por medio de muretes la normativa dispone: "Los muretes deben tener un mínimo de 300 mm de altura y una relación altura-ancho mayor ó igual a 1.5 y menor ó igual a 5. Los muretes de mampostería de bloque de perforación vertical deben tener al menos el largo de una pieza completa. Los muretes de otros tipos deben tener al menos 100 mm de largo. El ancho y el tipo de construcción deben ser representativos del tipo de mampostería que se va a utilizar en la construcción." Bajo esta normativa, se construyen 3 probetas de cada una de las mamposterías seleccionadas para probarlos en laboratorio y determinar la capacidad admisible a compresión. Adicionalmente se realiza la corrección por esbeltez de acuerdo a la geometría de la probeta acorde a los índices expuestos en el Cuadro 8.

Sobre el curado de las probetas esta misma normativa especifica que "los muretes deben guardarse por siete días al aire a una temperatura de 21



Foto 24: Prismas de ladrillo industrial emplasticándose.

grados centígrados, más/menos 5 grados, a una humedad relativa que exceda el 90 por ciento, y posteriormente en las mismas condiciones, pero con una humedad relativa que puede estar entre el 30 y el 50 por ciento, hasta su ensayo a los 28 días de la fabricación. Los muretes que se construyan a pie de obra deben guardarse bajo condiciones que les conserve la humedad por un lapso de 48 a 96 horas y después de este tiempo se pueden llevar al laboratorio". Por no contar con un espacio que cumpla con las características ambientales sugeridas se procede a construir los muretes en laboratorio y emplasticarlos de modo ceñido procurando hermeticidad para evitar fuga de humedad, luego de veinte y cuatro horas de su fabricación y ser humedecidos copiosamente, se mantienen cubiertos durante los 28 días siguientes buscando así que se mantengan en una alta humedad; adicionalmente se los guardó en una habitación interior procurando que la variación térmica no sea mayor y que no exista incidencia solar directa sobre los especímenes (Fotos 24 y 25).

Foto 25: Exudación encontrada en prisma de ladrillo industrial alfadomus después de los 28 días de emplasticado.



El mortero utilizado para todos los ensayos se elaboró con Cemento Portland Tipo IP de la casa productora Guapán y arena de procedencia Santa Isabel de la mina C & T. La relación agua / material cementante es 0,65 que acorde a observación directa produce una plasticidad similar a la utilizada en obra cotidianamente. En la normativa colombiana se incluye cal para proporcionar maleabilidad a la mezcla sin incluir agua excesivamente, pero por la ausencia de este material y su no empleo en la construcción local y nacional, no se consideró en nuestro ensayo. Acorde al Cuadro 9 tomado de la normativa colombiana, nuestro mortero debería lograr resistencias de los morteros Tipo H o M por la relación Cemento/Árido, pero por la presencia de agua no controlada minuciosamente puede esto no cumplirse. Por este motivo se realizaron cubos-probetas para obtener la resistencia del mortero empleado en nuestro estudio.

Por otra parte los referentes de este trabajo recomiendan el empleo de juntas de morteros pequeñas entre mampuestos por que es en estos tramos donde existe mayor deformación por contracciones del mortero y en consecuencia pérdida diferida de precompresión, es aquí donde existe menos resistencia en el muro especialmente en la interface mampuesto-mortero; se procura entonces en la construcción de los muros tanto prismas como en los muros para presforzar el elaborarlos con el menor espesor posible con mortero común.

6.2.3.1 Construcción de murete de Bloque de concreto.

En el ensayo de materiales se determina la superioridad en resistencia del bloque de concreto de Hormiazuary (39,5 X 20,0 X 15,2 cm) con respecto a los otros probados (*Cuadro 5*). En base a esto se procede a la elaboración y ensayo de muretes con este material.

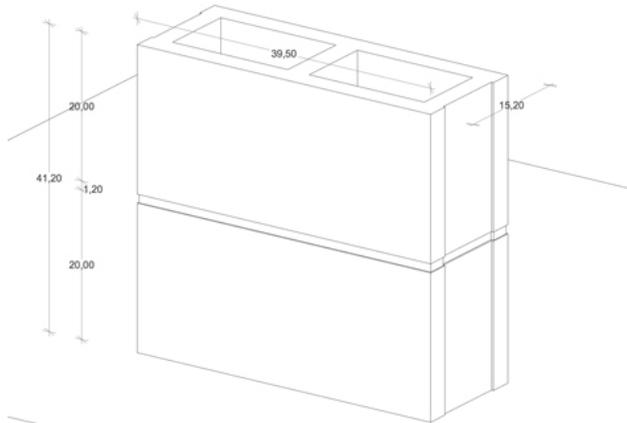
Los muretes de bloque se construyen apilando dos piezas verticalmente con una junta horizontal con mortero en todos los bordes tanto longitudinales como transversales, la junta resultó de 12 mm lo mínimo que se pudo lograr por el módulo de finura de la arena como también por la irregularidad de las mampuestos. Las dimensiones del murete resultante fueron 39,5 cm X 15,2 cm de ancho y altura de 41,2 cm. Una vez construidos se emplastican para su curado luego de aproximadamente 24 horas acorde a lo descrito en 6.2.3. La fecha de fabricación de los prismas fue el 3 de enero del 2012 y el ensayo de las tres probetas se realizó el 1 de febrero por lo que transcurrieron veintinueve días para el fraguado. No se utiliza ningún aditivo ni acelerante para el mortero por que se prefirió obtener un material acorde al comúnmente empleado en la construcción cotidiana.

En lo que se refiere a corrección por esbeltez en 6.2.3. la relación altura/espesor de este espécimen es 2,71, por lo tanto, interpolando en el *Cuadro 8*, el factor de corrección por esbeltez es 1,052.

6.2.3.2 Construcción de murete de Ladrillo Artesanal.

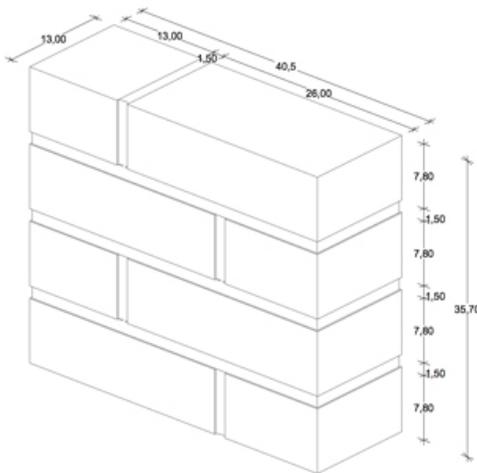
En el ensayo de materiales se descifra la superioridad resistente del ladrillo procedente de Susudel (25,90 X 12,85 X 7,70 cm) entonces se proceden a construir y ensayar muretes elaborados con este material.

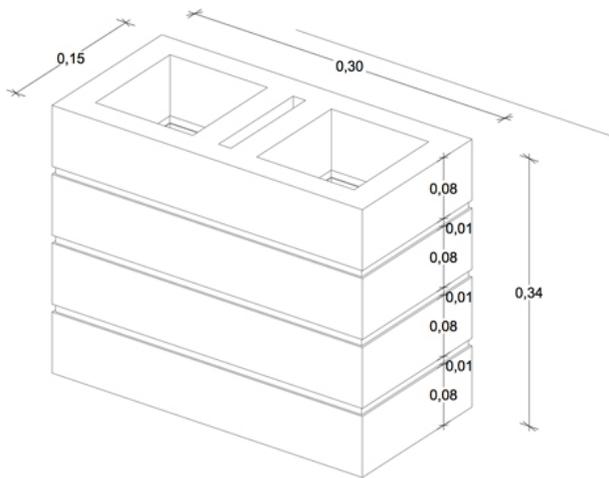
Los muretes de ladrillo *panelón* se construyen con hiladas horizontales compuestas por una pieza y media, verticalmente por cuatro piezas con junta horizontal con mortero vertido en toda la superficie, la junta resultó de 15 mm lo mínimo que se pudo lograr por la finura de la arena y por la irregularidad de las mampuestos. Las dimensiones del murete resultante es 40,5 cm X 13,0 cm de ancho y altura de 32 cm (*Detalle 44*). Una vez construidos se procede a emplastarlos para su curado luego de aproximadamente 24 horas de terminada su elaboración manteniéndose así



Detalle 43: Axonometría y geometría de prisma de bloque de concreto.

Detalle 44: Axonometría y geometría de prisma de ladrillo artesanal.





Detalle 45: Axonometría y geometría de prisma de ladrillo tipo industrial.

Fotos 26 y 27: Prismas de bloque de concreto emplasticado y ladrillo artesanal en proceso de elaboración



desde el 12 de enero del 2012 hasta el ensayo el día 6 de febrero quedando cubiertos por el lapso de veinte y cinco días cercano a lo recomendado en 6.2.3.

En lo que se refiere a corrección por esbeltez la relación altura/espesor de este espécimen es 3,02 por lo tanto, interpolando en el *Cuadro 8*, el factor de corrección por esbeltez es 1,04.

6.2.3.3 Construcción de murete de Ladrillo Industrial.

Para el ensayo de materiales únicamente se pudo conseguir un solo tipo de unidad que cumple requisitos para construir mampostería estructural y post-tensarlo, se trata de ladrillo *Alfadomus de dos huecos* (30 X 15 X 8 cm) este es su nombre a pesar de tener en realidad tres perforaciones, una franja pequeña en el medio para facilitar cortes; con este material elaboramos los respectivos prismas de prueba. Las probetas se elaboran el 3 de enero de 2012 con cuatro piezas apiladas verticalmente e integradas por junta de mortero colocado a todo lo largo de sus paredes tanto longitudinales como transversales, la junta mínima resulta de 10 mm (*Detalle 45*). Las dimensiones del muretes fueron 30 cm X 15 cm de ancho y altura de 34 cm. Una vez construidos se procede a emplasticarlos para su curado luego de aproximadamente 24 horas, desde el día 3 de enero del 2012 manteniéndose así hasta el 1 de febrero del 2012 con lo cual se cumple un tiempo de curado de 29 días cercano a lo descrito en 6.2.3. En lo que se refiere a corrección por esbeltez la relación altura/espesor de este espécimen es 2,27, por lo tanto, interpolando en el *Cuadro 8* el factor a aplicarse es 1,02.

6.2.3.4 Ensayos de muretes-testigo a compresión.

Con la finalidad de conocer la carga admisible de los muros para definir la magnitud de presfuerzo que se puede aplicar a un muro construido con cada tipo de material, luego de transcurrido el fraguado total bajo condiciones de curado explicado en 6.2.3.1, 6.2.3.2 y 6.2.3.3, se procede a realizar el ensayo a compresión de los prismas probetas ante carga axial. El resultado que se obtuvo se expresa de modo comparativo en el siguiente cuadro:

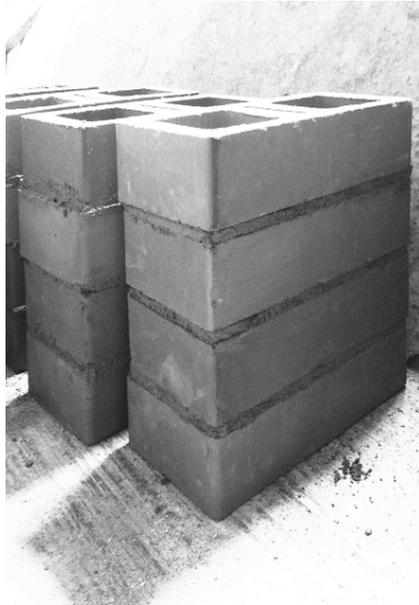


Foto 28: Prismas de ladrillo industrial.



Foto 29: Prismas de ladrillo industrial bajo ensayo.

Cuadro 10: Resistencias a compresión de prismas de distintos tipos de mampostería.

Ensayos de prismas de mampostería	tipo de mampostería	Dimensiones (cm.)	Ensayos	Carga neta de falla	Resistencia Bruta (kg/cm ²)	Resistencia Bruta promedio (Kg/cm ²)
Prismas de prueba de carga axial	Ladrillo industrial Alfadomus	30,8 X 14,8 X 35,1	1	18263 kg.f	40,06	51,08
			2	24555 kg.f	53,87	
			3	27033 kg.f	59,30	
	Ladrillo artesanal de Susudel	40,4 X 13,4 X 32,3	1	32264 kg.f	59,60	47,64
			2	23742 kg.f	43,86	
			3	21373 kg.f	39,48	
	Bloque de concreto Hormiazuary	40 X 15,1 X 40,5	1	20867 kg.f	34,55	37,53
			2	27023 kg.f	44,74	
			3	20122 kg.f	33,31	

Evidentemente existe una superioridad de la mampostería elaborada con ladrillo industrial con una resistencia 7% superior a la que se alcanza con mampostería de ladrillo artesanal y un 36% a la que se consigue con bloque de concreto.

Por la geometría de los distintas probetas y acorde a la normativa colombiana, se requiere realizar la respectiva corrección por esbeltez, la cual nos proporcionará una resistencia con la que se trabaja para efecto de diseño f_m . Esta corrección la presentamos en el siguiente cuadro:

Cuadro 11: Corrección de resistencia a compresión de mampostería por esbeltez de probeta y obtención de f_m o resistencia de diseño.

Corrección de resistencias de mampostería por factor de esbeltez	tipo de mampostería	Dimensiones (cm.)	Resistencia Bruta promedio(kg/cm ²)	Factor de corrección por esbeltez	Resistencia corregida por coeficiente de esbeltez f_m (Kg./cm ²)
Prismas de prueba de carga	Ladrillo industrial Alfadomus	30,8 X 14,8 X 35,1	51,08	1,052	53,73
	Ladrillo artesanal de Susudel	40,4 X 13,4 X 32,3	47,64	1,040	49,55
	Bloque de concreto Hormiazuary	40 X 15,1 X 40,5	37,53	1,052	39,49



Foto 30: Prismas de ladrillo "panelón" ensayado.

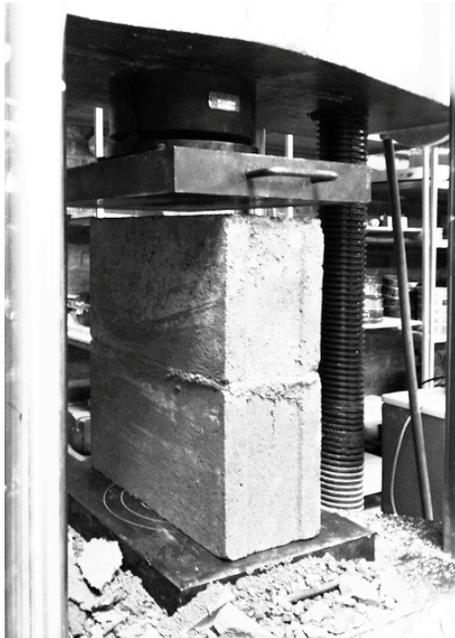


Foto 31: Prismas de bloque de concreto bajo ensayo.

Es llamativo reconocer que, proporcionalmente, la variación de resistencias entre prismas es significativamente inferior a la variación de resistencias registradas entre las unidades de mampostería individualmente.

6.2.3.5 Cálculo de carga admisible para cada tipo de mampostería.

Para determinar el presfuerzo aplicable a un muro hay que considerar previamente si va a soportar pesos apreciables como sucede en mampostería portante o si se trata de un muro divisorio únicamente. La carga aplicada en un muro portante actúa en si misma como un presfuerzo.

Para nuestra investigación se considera la ausencia de carga externa sobre las paredes, las cargas que soportan los muros probetas son únicamente la de su peso propio sumada a la carga de precompresión.

Para encontrar la carga de presfuerzo admisible máxima aplicable a cada material tomamos como referente lo expuesto por *H.R. Ganz*, quien sugiere que "el nivel de carga axial máximo debido a los efectos de gravedad y presfuerzo no deben exceder el 25% de la resistencia de diseño, así, un muro se comportará de manera dúctil y se descartará la posibilidad de fallo del muro"¹³.

Acorde a este criterio, presentamos el siguiente cuadro de capacidad portante máximo que pueden soportar teóricamente los muros de las mamposterías a probarse:

Cuadro 12: Determinación de la carga máxima a aplicarse en la mampostería considerando carga soportada, peso propio y post-tensión.

Cálculo de carga máxima recomendada por Ganz para aplicar a cada uno de los muros en kg/cm ² .	tipo de mampostería	Dimensiones (cm.)	Resistencia corregida por coeficiente de esbeltez $f'm$ (Kg./cm ²)	Máxima carga admisible (25% Carga de diseño en kg/cm ²)
Prismas de prueba de carga	Ladrillo industrial Alfadomus	30,8 X 14,8 X 35,1	53,73	13,434
	Ladrillo artesanal de Susudel	40,4 X 13,4 X 32,3	49,55	12,386
	Bloque de concreto Hormiazauay	40 X 15,1 X 40,5	39,49	9,871

¹³ H.R. Ganz, Dr. sc. techn., Civil Engineer ETH, VSL International Ltda: *Properties of Masonry Design Considerations Post-Tensioning System for Masonry Structures Applications, VSL Report Series*. Pág. 20.

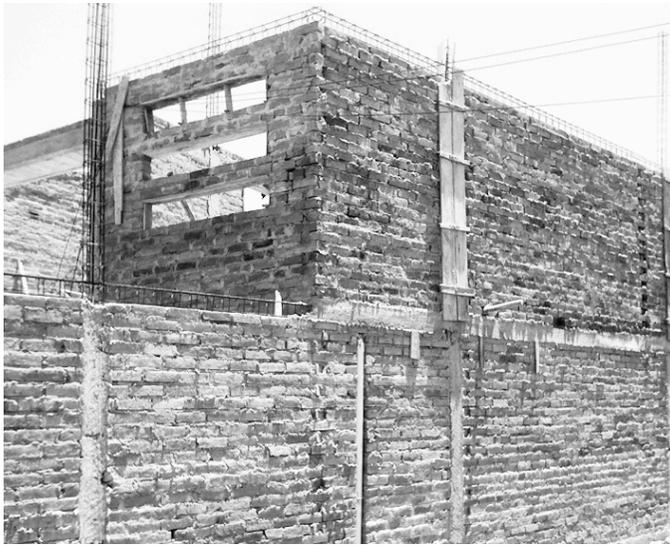


Foto 32: Vivienda construida en mampostería confinada del modo tradicional.

Foto 33: Placa-Viga "Doble T" como base para soporte de losa - cimiento de muros probetas.



Por otra parte Hernández y Aguilar recogen una expresión matemática procedente de la *normativa mexicana*¹⁴, para en función de la carga lateral que debe resistir un muro, calcular la carga de presfuerzo que debe aplicarse para soportar el efecto cortante resultante de un empuje lateral determinado:

Fórmula 1

$$V_R = F_R (0,5 V^* AT + 0,3 P_a) < 1,5 F_R V^* AT$$

En donde:

V_R : Incremento en carga vertical

F_R : Se toma para este caso 0,6

V^* : Esfuerzo cortante resistente de diseño en kg/cm^2 .

AT : Área bruta de sección de muro en cm^2 .

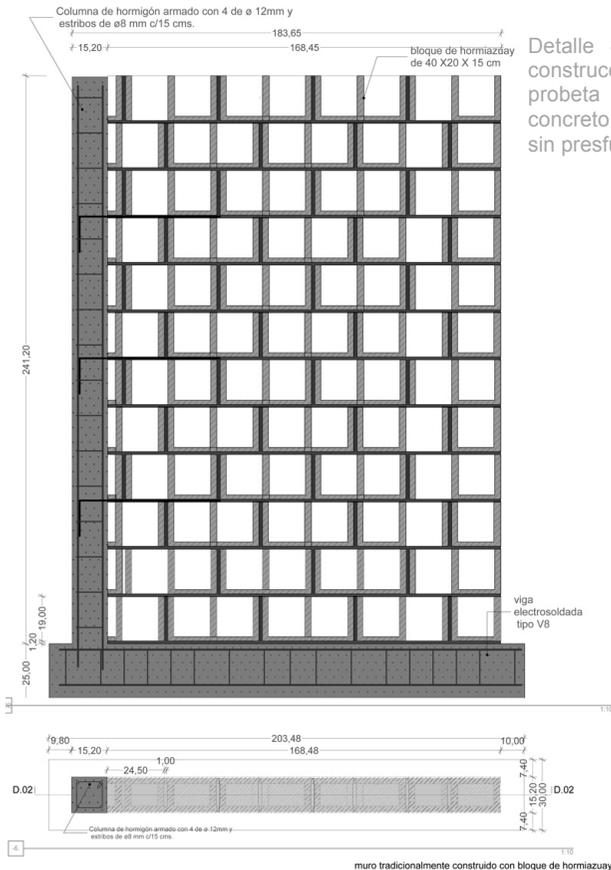
P_a : Carga vertical que actúa sobre el muro, incluyendo la carga de presfuerzo

A partir de esta expresión acorde a las dimensiones del muro a presforzar y una carga lateral, se puede calcular la carga de precompresión a aplicarse.

6.3 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE MUROS CONSTRUIDOS DE MODO TRADICIONAL.

Con el objetivo de demostrar la mejora alcanzada a través del presfuerzo en muros es imprescindible tener un parámetro base de comparación, para esto se elaboran muros construidos del modo tradicional reforzados con un método tradicional, de modo que se ensayen a empuje lateral hasta su rotura bajo las mismas condiciones a las que se los someterá a las probetas post-tensadas.

¹⁴ "Diseño y construcción de estructuras de mampostería. Normas técnicas complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", 403, Instituto de Ingeniería, UNAM (1977) Pág. 30



Detalle 46: Plano de construcción de muro probeta de bloque de concreto Hormiazuay sin presfuerzo.

6.3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS ELABORADOS DE MODO TRADICIONAL.

Para el diseño de los muros construidos de forma tradicional se busca aplicar a cada tipo de mampostería algún sistema de refuerzo que normalmente se aplique en la construcción cotidiana.

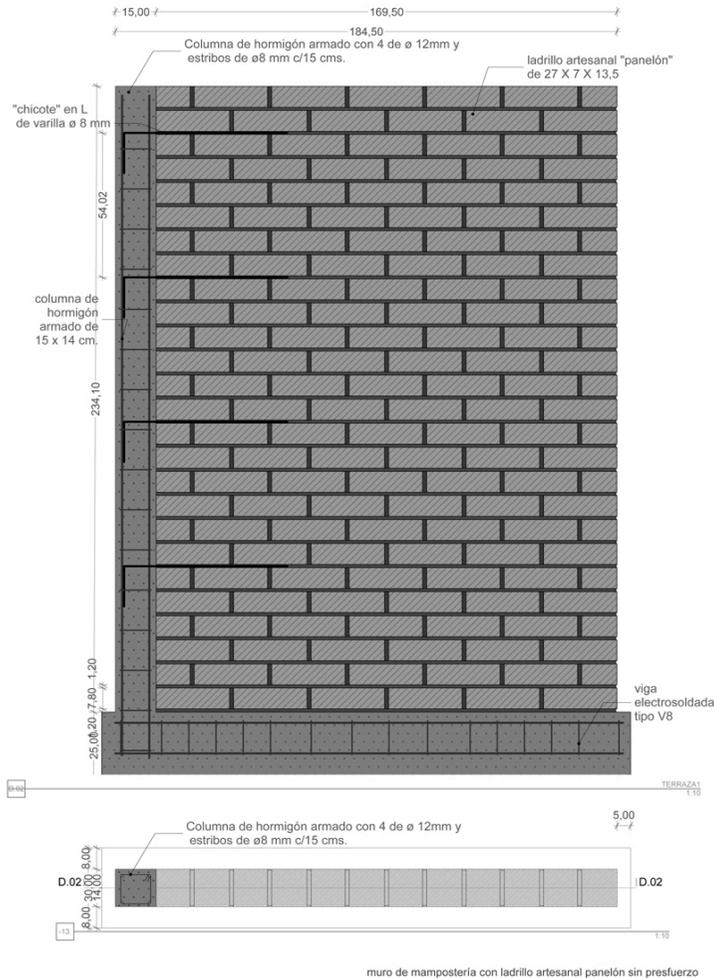
Como costumbre constructiva tenemos que en la mayoría de edificaciones de mampostería en el país se confinan sus paredes entre columnas y vigas de concreto armado a manera de marco alrededor de ellas, generalmente con una sección igual al ancho del muro, siendo estos a la postre elementos de refuerzo colaborantes mas no totalmente portantes por su limitada sección, evidentemente escasa para soportar por si sola la edificación, este hecho provoca que la mampostería adquiera un papel evidentemente portante (Foto 32). Esta tipología se ha venido practicando sobretodo en edificaciones unifamiliares de dos y hasta tres plantas. Por esta razón se decide construir probetas representativas de lo cotidiano de similares dimensiones a las presforzadas basándonos en la realidad expuesta: las construidas con ladrillo panelón artesanal y bloque de concreto se las reforzó con una columna de hormigón armado en uno de sus costados, a la probeta de ladrillo industrial apto para mampostería industrial se lo utiliza como tal es decir en muros de mampostería armada. Las probetas se limitaron a este refuerzo y tamaño considerando similares dimensiones y condiciones constructivas a las presforzadas que permita a la postre comparar parámetros de costo y tiempo de elaboración en ambos muros a competir. El criterio fue buscar una mejora resistente procurando no encarecer significativamente el precio y complejidad de la construcción.

6.3.1.1 Diseño y construcción de muro de bloque de concreto con sistema tradicional.

Diseño: Se plantea un muro en bloque de concreto de la fábrica *Hormiazuay* de 15 cm de ancho el cual se concibe con una altura aproximada de 2,41 m y de largo 1,68 m más una columna adyacente adherida al muro en uno de sus costados y enlazada por medio de “chicotes” (Foto 35) cada tres hiladas (aproximadamente 60 cm) que integran estructuralmente la pared con la columna. El muro más la columna suman una dimensión de 1,84m (Detalle 46).



Foto 34 y 35: Construcción de muro probeta de bloque de concreto.



Detalle 47: Plano de construcción de muro probeta de ladrillo panelón artesanal reforzado de modo tradicional.

La columna en mención tiene una sección de 15 x 15 cm (ancho determinada por el espesor del muro) está constituida por 4 \varnothing de 12 mm y estribos de 8 mm c/15 cm elaborados en obra, los refuerzos verticales están embebidos en la cimentación.

Se trabaja con el trabado típico de mampostería con junta de mortero lo más angosta posible en la que quedan contenidos los *chicotes*, refuerzos que también quedan embebidos en la columna a través de un gancho "L" (Foto 35) para integrar columna y muro.

Construcción: Para la construcción de la probeta se decide elaborar una cimentación compuesta por una placa base de hormigón armado que simultáneamente sirve de soporte para los *muros probetas de ladrillo artesanal y ladrillo industrial tradicionalmente elaborados*, para formar en conjunto una base integrada la cual promueva mayor firmeza y peso al trabajar conjuntamente la base o cimentación de todos los especímenes. La dosificación del concreto se realiza en volumen con una proporción cemento/arena/ripio 1 / 2,5 / 3,5, con una relación agua/cemento aproximada de 0,5 y se incluye aditivo superplastificante Sika sikament N-100 en una dosificación de 375 cm³ por saco de cemento. No se realiza prueba de resistencia de este concreto por considerarse irrelevante para los objetivos propuestos. En la losa base se incluye un refuerzo conformado por una cadena electrosoldada comercialmente conocida como V8 compuesta por 4 varillas de \varnothing 12 mm de 15 X 15 cm y estribos de \varnothing 6 mm cada 15 cm ubicada inmediatamente bajo cada muro. Toda la placa de cimentación para las tres paredes tiene una dimensión de 2,10 m X 1,8 m y se la apoya en una viga "Doble T" (Foto 33) presforzada proporcionada por RFV de considerable peso, sobre la cual se realizó la fundición de la base mencionada buscando que se enlacen monolíticamente los dos elementos, hecho factible por el alto grado de rugosidad de la superficie del elemento pretensado, rugosidad intencionada justamente para fundir enchapados de hormigón para piso terminado. En la placa quedan embebidas las varillas que conforman el refuerzo de la columna de hormigón armado.

El muro terminado consta finalmente de 11 hiladas verticales de mampostería y las juntas tanto horizontales como verticales resultan de un espesor aproximado de 10 mm a 13 mm variación consecuente con la presencia de *chicotes* en algunas juntas e irregularidades en los bloques. El mortero se fabrica con arena fina procedente de Santa Isabel de la mina C & T y cemento Port-land IP marca *Guapán* con relación agua/material cementante 0,6 proporción utilizada por lograr un mortero similar al utilizado en laboratorio para los muretes de prueba y a su vez similar al utilizado en



Foto 36: Muro probeta de ladrillo panelón en construcción.



Foto 37: Proceso de fundición de columnas de refuerzo de probetas no post-tensadas.

la construcción cotidiana.

Levantado el muro se encofra y funde la columna adyacente vertiéndose el concreto directamente en contacto con la mampostería, para lograr un enlace por adherencia adicional al logrado por los *chicotes*. Concluida la construcción es necesaria la espera de tiempo suficiente para fraguado total tanto de las hiladas como del concreto de columna y cimienta, antes de realizar el ensayo.

6.3.1.2 Diseño y construcción de muro de mampostería de ladrillo artesanal reforzado con sistema tradicional.

Diseño: Este muro fue concebido para ser ensayado ante carga lateral y conseguir un resultado de resistencia base comparativo con respecto al cual comparar la mejora que se obtiene luego de presforzar una mampostería construida con el mismo material. El criterio utilizado es elaborarlo simulando un modo tradicional de construcción en la cotidianidad.

Así y tomando en referencia el empleo de el confinamiento al que normalmente se somete este tipo de paredes se plantea elaborar la probeta sobre una base de cimentación de hormigón armado de donde surge una columna a la cual la pared se integra por medio de *chicotes*. La mencionada base se la refuerza con una cadena de acero electrosoldada de 15 X 15 cm comercialmente conocida como V8 constituida por 4 varillas de \varnothing 12 mm y estribos de \varnothing 6 mm cada 15 cm. La base de concreto resultante tiene una sección de 25 cm de peralte y ancho de 1,6 m.

La columna tiene una sección es de 15 cm por el ancho de la pared (un poco más de 13 cm) se plantea reforzarla con 4 varillas de \varnothing 12 mm en las esquinas y estribos de \varnothing 8 mm cada 20 cm, el alto de esta columna es el mismo del muro.

La pared está compuesta por mampostería simplemente trabada con una altura de 2,34 m o lo que se alcance con 26 hiladas y junta cercana a 15 mm o lo más angosta posible que permita la irregularidad de las unidades considerando además el espesor de mortero y *chicotes* embebidos. Cada seis hiladas se ubica un *chicote* de 60 cm. de largo embebido en la columna con un gancho tipo "L", 4 en total en toda la altura de la pared.

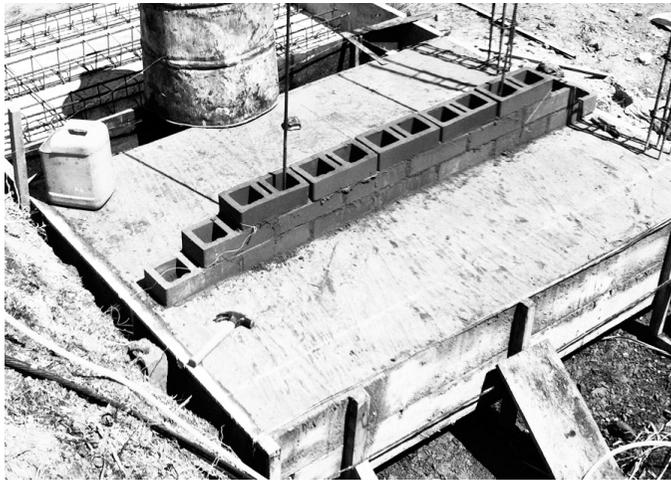


Foto 38: Primeras hiladas de muro de prueba de ladrillo industrial construido como mampostería estructural.

de relleno en las celdas verticales que llevan refuerzo¹⁵.

El muro propuesto se cimenta en una base de concreto armado de 25 cm de peralte reforzada a través de una cadena electrosoldada tipo V8 de 15 X 15 cm compuesta por cuatro varillas de \varnothing 12 mm de diámetro sunchadas por estribos de \varnothing 6 mm cada 15 cm. Del cimiento surgen dos varillas de media pulgada de diámetro las cuales quedan embebidas en el concreto de cimentación y ancladas a través de un gancho a 90°, es un refuerzo formado en “L” al que se lo debe ubicar de tal manera que coincida con el centro de la celda a contener el refuerzo. Este diámetro cumple con la normativa teniendo en cuenta que el diámetro mínimo para considerarse refuerzo de mampostería es de \varnothing 10 mm con espaciamiento horizontal máximo de 1,20 m; en nuestra probeta, acorde a la modulación provocada por las unidades los refuerzos quedaron separados los dos refuerzos 1,10 m entre si. La normativa colombiana exige además la utilización de *escaleras* (elementos de hierro electrosoldado de refuerzo horizontal) no utilizados en nuestro muro por no existir en el mercado local y no utilizarse en nuestra construcción.

El largo del muro es el resultado de una fila de 7 mampuestos continuos, las celdas con el refuerzo son la cuarta a partir de cada uno de sus extremos, una vez levantado todo el muro procedemos casi de inmediato al vertido del mortero de relleno. La dimensión de la celda es de 9,4 X 9,4 cm, el relleno ocupa toda la extensión vertical de la celda.

Construcción: El muro de ladrillo industrial se apoya en una base de hormigón armado que también sirve de soporte a los muros probetas de ladrillo artesanal y bloque de concreto por lo mencionado en 6.3.1.1. Esta base es de un espesor de 25 cm y está reforzada con una cadena de hierro electrosoldada tipo V8 compuesta por 4 \varnothing de 12 mm y estribos de 6 mm c/15 cm bajo cada muro. Esta losa de cimentación se funde sobre la superficie rugosa de una placa de hormigón presforzada tipo “Doble T” (Foto 33) procurando que las dos se integren monolíticamente para que colaboren y eviten falla, rotura o volque por la acción de los empujes que se presentarán durante los ensayos. Previo a la fundición de la base se dejan embebidos 2 refuerzos verticales de \varnothing 12 mm coincidentes con la ubicación

¹⁵ Comisión Asesora permanente para el régimen de construcciones sismorresistentes: *Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10*, Bogotá, Colombia, 2010. Pág. D-47.



Foto 39: Muros a contruicidos para post-tensarse.

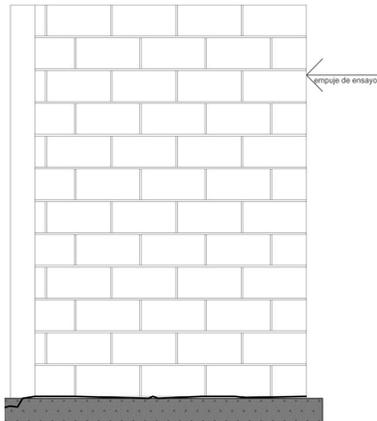
de las cuartas celdas a partir de cada uno de los extremos, para esto es necesario en la etapa de armado de refuerzo de la placa de cimentación, tender las unidades de mampostería de modo que se localicen las celdas que contienen los refuerzos y así quede definida su ubicación precisa.

Endurecido el concreto de la cimentación se construye la pared del modo tradicional con las unidades trabadas dejando pasadas en la mitad de las celdas escogidas los dos refuerzos (Foto 38), se alcanza la altura requerida únicamente con 24 hiladas por un mayor espesor de junta horizontal a lo planificado debido a irregularidades en la dimensión vertical de las unidades al parecer por ser de horneadas distintas o por materia prima o estructureadores diferentes. Una vez concluida la construcción de los muros se procede casi de inmediato al vertido de concreto de relleno en las celdas con las varillas, este material es elaborado con agregado fino de máximo 3/8 pulgada en proporción cemento/arena/agregado 1/2/3,5 y una relación agua cemento aproximado de 0,5 con aditivo superplastificante Sikament N-100 en una relación de 375 cm³ por saco de cemento. Se vibra a través de contacto entre el vibrador y la varilla de refuerzo. Durante la fundición se procura mantener centrados los refuerzos respecto a la celda.

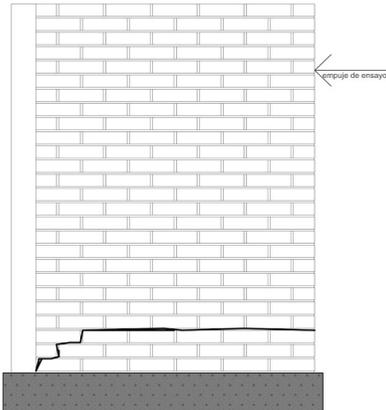
Una vez concluido el relleno de ductos se procede a esperar el tiempo necesario para fraguar tanto las juntas como el mortero o *grout* de relleno antes de realizar cualquier prueba.

6.3.2 PRUEBA ANTE CARGA LATERAL DE MUROS TRADICIONALMENTE CONSTRUIDOS.

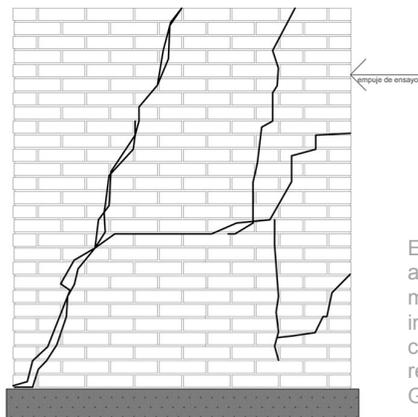
Para seleccionar la dirección de empuje de ensayo en las paredes elaboradas del modo tradicional se considera que es necesario descifrar la falla que se produce en este tipo de mampostería en la eventualidad de un terremoto. Se considera entonces el caso típico de muros divisorios que van a estar sometidos a empuje proveniente de elementos estructurales adyacentes, por esta razón se asume que la carga proviene desde el costado directamente sobre la mampostería en dirección paralela a esta, carga provocada por una columna que disipa la energía sísmica de una estructura global y se transmite sobre la pared. El muro recibe el empuje y este a su vez lo transmite al elemento estructural en su costado opuesto el cual ayuda a soportarlo, este elemento estructural es el que se representa a través de la columna de refuerzo construida en la probeta.



Esquema 5: Ensayo ante carga lateral muro de bloque de concreto reforzado con columna de hormigón armado. Gráfico de falla.



Esquema 6: Ensayo ante carga lateral muro de ladrillo panelón reforzado con columna de hormigón armado. Gráfico de falla.



Esquema 7: Ensayo ante carga lateral muro de ladrillo industrial construido como mampostería reforzada. Gráfico de falla.

En el caso del muro de mampostería estructural parcialmente inyectada se le aplica el empuje en su costado, el objetivo es observar su comportamiento y capacidad de disipar energía ante un esfuerzo proveniente en dirección paralela al elemento midiendo su resistencia al comportarse como un diafragma.

6.3.3 Análisis de falla y determinación de carga de rotura de mampostería sin presfuerzo.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de resistencias alcanzadas por los muros tradicionalmente construidos y mampostería estructural:

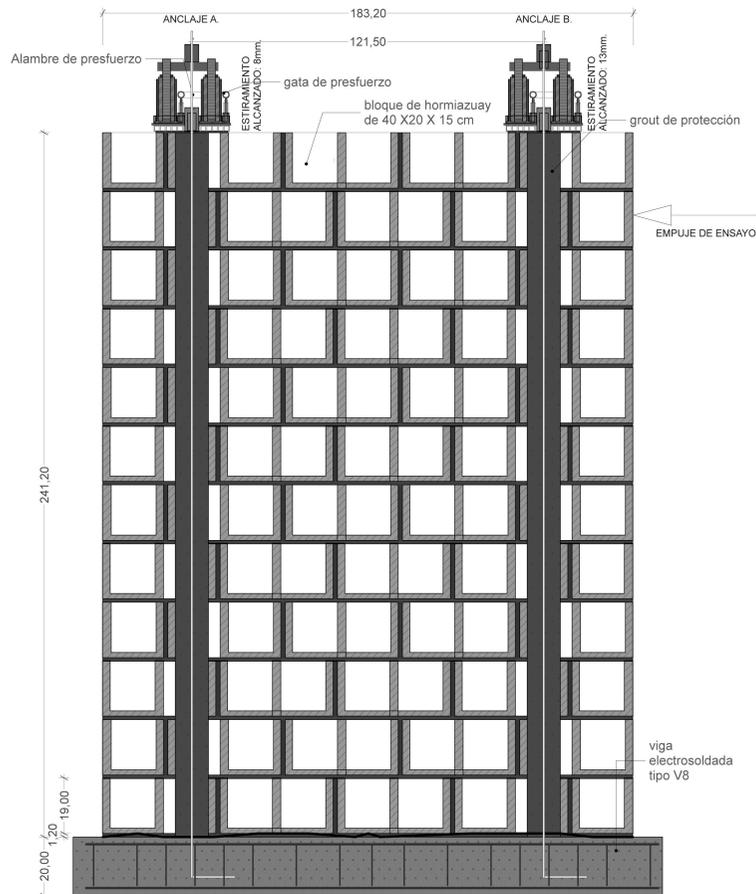
Cuadro 13: Comparación de resistencia de muros probetas ante carga lateral construidos del modo tradicional y mampostería estructural.

Muro	Esfuerzo para falla inicial (Kg.)	% de capacidad a compresión respecto al más bajo respecto a falla inicial	Esfuerzo máximo para colapso (Kg.)	% de capacidad a compresión respecto al más bajo respecto a máxima resistencia
Boque de concreto tradicionalmente construido	680	100,00%	907	105,22%
Ladrillo artesanal tradicionalmente construido	726	106,76%	862	100,00%
Mampostería estructural con ladrillo industrial	6124	900,59%	6124	710,44%

El cuadro presenta una comparación porcentual de resistencias tomando como parámetro base de porcentaje la resistencia más baja tanto de falla inicial como falla última. Es evidente la superioridad de la mampostería reforzada la cual soporta entre siete y nueve veces más que los dos muros reforzados con columna de hormigón armado.

En el caso de la pared de ladrillo panelón se produce la falla inicial en la junta de mortero en las hiladas inferiores; en el muro de bloque de concreto se agrieta en la interface bloque de hormigón-cimiento, en estas dos paredes se produce la primera falla por efecto de cortante y luego flexión de modo muy similar, la mencionada flexión provoca rotación sobre el pivote que se forma en la base de la columna al romperse el hormigón quedando como sujeción únicamente el acero de las varillas que cede y se va deformando conforme aumenta el empuje de ensayo (*Esquemas 5 y 6*).

En el caso de la probeta elaborada con ladrillo industrial como mampostería



Detalle 49: Plano de construcción de muro probeta de bloque de concreto post-tensado.

reforzada el comportamiento es muy distinto, respecto a su capacidad ante carga lateral se observa una marcada superioridad aproximadamente siete veces más resistente a las dos paredes reforzadas con columna de concreto armado; el modo de falla también es diferente, en la mampostería reforzada nunca se observa fisuración entre las hiladas, más bien el muro soporta altos empujes hasta que se produce una rotura brusca de características más bien explosivas con fractura en varias partes de la pared, se aprecia falla tanto en unidades de mampostería como en las juntas de mortero (*Esquema 7*).

6.4 ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE MUROS POST-TENSADOS ANTE CARGA LATERAL.

Para analizar el comportamiento y beneficio del post-tensado en mampostería se realizan ensayos a través de muros probetas de tamaño natural considerando altura tradicional de construcción de entrepisos (2,40m de alto). Estos ensayos se realizan en muros no reforzados, reforzados y post-tensados. La prueba se ejecuta aplicando carga lateral en la parte superior de la pared en dirección paralela a su plano hasta su rotura.

Acorde a material para mampostería y tipo de reforzamiento, las probetas que se construyen son de las siguientes características:

- 1) Muro de mampostería de bloque de concreto reforzado con una columna de hormigón armado.
- 2) Muro de mampostería de ladrillo *panelón* reforzado con una columna de hormigón armado.
- 3) Muro de mampostería con ladrillo industrial elaborado como mampostería reforzada
- 4) Muro de mampostería de bloque de concreto post-tensado.
- 5) Muro de mampostería de ladrillo *panelón* post-tensado.
- 6) Muro de mampostería de ladrillo industrial post-tensado.

6.4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MUROS PARA POST-TENSAR.

Los muros post-tensados se planean y construyen de modo similar a los muros tradicionalmente reforzados. Para la determinación de espaciamiento de los tensores se toma como criterio el espaciamiento de refuerzo mínimo

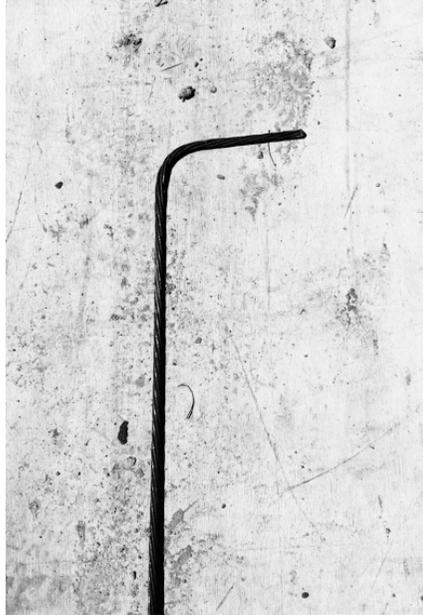


Foto 40: Gancho para anclaje embebido en cemento de torón de 3/8.



Foto 41: Elaboración de muro de bloque con tensores pasados para ser post-tensado.

planteado para mampostería reforzada acorde a la *normativa colombiana de la construcción* la cual admite como máxima una separación de 1,20 m entre refuerzo como máximo.

A continuación se describe el criterio de diseño y proceso de construcción de las probetas empleadas en esta investigación para el ensayo correspondiente:

6.4.1.1 Muro de mampostería de bloque de concreto para post-tensar.

Diseño: El bloque de concreto que por su resistencia fue seleccionado para construir la probeta en 6.1.2.1, no tiene las características geométricas adecuadas para ser utilizado en muros armados o post-tensados, sus cavidades no atraviesan verticalmente por completo la unidad, por esto se hizo necesario diseñar los muros considerando adaptar geométricamente algunas piezas por lo dificultoso de conseguir desde la fábrica la elaboración de pocas unidades perforadas por carencia de moldes. Así en la etapa de diseño se acondicionan aquellas unidades que contendrán los tensores de modo que al levantar el muro queda conformada una celda continua.

Para la colocación de los tensores tomamos como referencia el *ensayo cíclico de muro*¹⁶ empleado por G. Wight y la normativa colombiana, estos referentes separan entre si los refuerzos 1,2 m. Otro aspecto considerado es el planteado *H.R.Ganz* quien explica la importancia de colocar los cables “*simétricamente en la pared con respecto al eje vertical y a su margen por que así se obtiene una disipación equilibrada de tensión*”¹⁷ Acorde a estos criterios se plantea la colocación de los tensores centrados en el muro y equidistantes respecto al eje central.

Se utiliza una altura aproximada de muro de 2,40 m la cual se alcanza con doce hiladas de bloque, el espesor de junta requerido para un muro

¹⁶ WIGHT D. GAVIN, University of Auckland Department of Civil and Environmental Engineering: *Seismic Performance of a Post-tensioned Concrete Masonry Wall System*; Nueva Zelanda, Junio del 2010, *Cap.4 Pág.56*.

¹⁷ GANZ H. R., Dr. sc. techn., Civil Engineer ETH: *Post-tensioned Masonry Structures*, VSL International Ltd., Berne Switzerland, 1990. Pág. 25

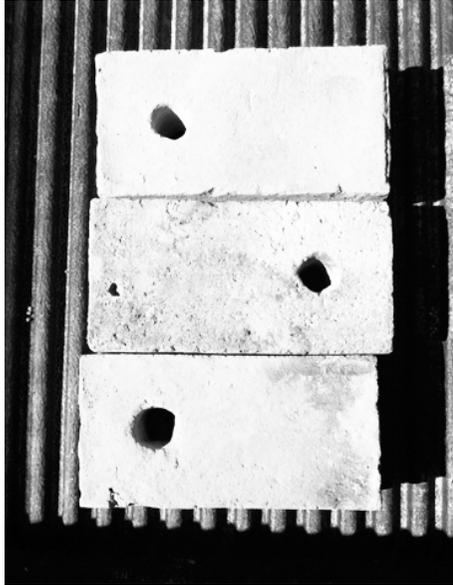


Foto 42: Ladrillo artesanal "panelón" perforados con taladro manualmente.



Foto 43: Ladrillo artesanal "panelón" perforados en ensayo a compresión.

presforzado debe ser lo mínimo posible por razones expuestas por *Hernández y Aguilar* en 2.2, así por la regularidad del material se espera no sobrepasar los 10 mm de junta.

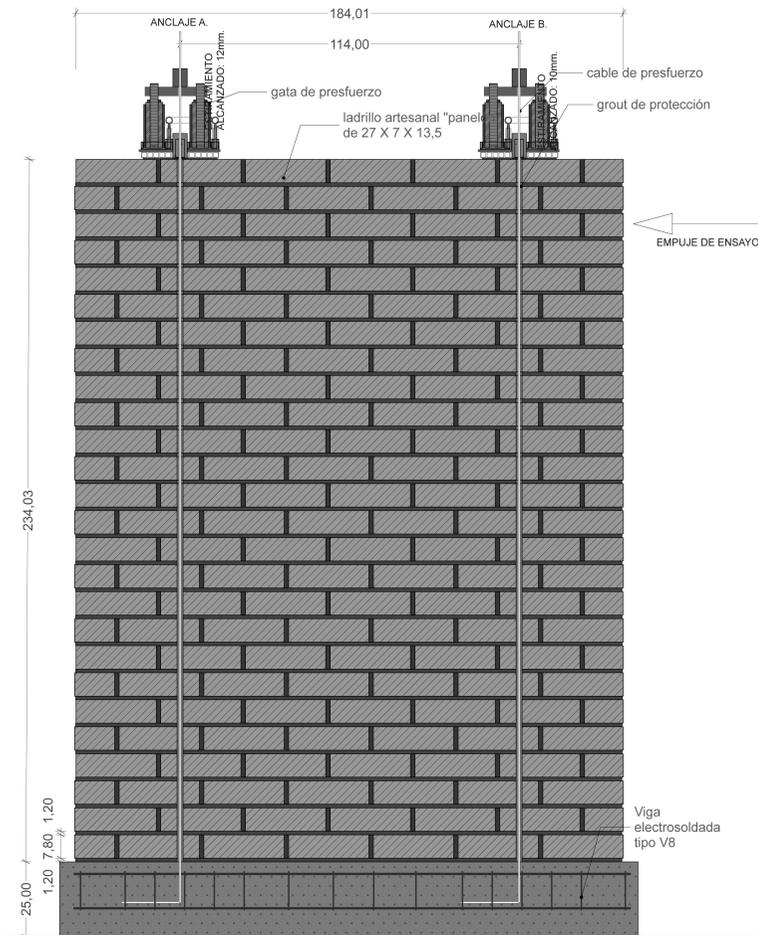
La base del muro es de hormigón armado de 25 cm de peralte reforzada en acero a través de una viga electrosoldada tipo comercial V8 de 15 X 15 cm conformada por 4 varillas de 12 mm y estribos de \varnothing 6 m cada 15 cm, refuerzo ubicado inmediatamente bajo el muro.

En la cimentación se dejan embebidos dos torones de \varnothing 3/8 de pulgada (aproximadamente 9 mm) anclado en el extremo pasivo a través de gancho en "L" similar a la que comúnmente se aplica a la varilla de refuerzo. (*Detalle 54*).

Construcción: El criterio de creación y prueba de estos muros es construirlos y ensayarlos en las mismas condiciones que sus contrapartes reforzados del modo tradicional, en este caso, puntualmente al elaborado con el mismo bloque de concreto. Para la cimentación se implementa una placa-base común para los tres muros a post-tensionar, uno junto al otro separados aproximadamente 40 cm. entre ellos. Bajo cada muro existe el refuerzo de la viga electrosoldada V8 tal como se describe en el diseño.

En la base es necesario anclar los cables de presfuerzo. Para lograr esta fijación sin el empleo de un *anclaje abierto* adicional, se forma un gancho en el extremo del cable descrito en el diseño, similar al utilizado comúnmente en varilla de refuerzo (*Foto 40*). La ubicación exacta del cable en el muro es fundamental para no tener problemas posteriores en el trabado de la mampostería, para esto se traza la colocación de cada mampuesto previo a la fundición de la base para determinar el lugar exacto en donde se requiere embeber el torón en el centro de la celda; pequeños desplazamientos pueden ser absorbido por el espacio de las juntas verticales, pero la celda admite desviaciones de pocos centímetros.

Endurecida la placa de cimentación es tiempo de la construcción del muro. A diferencia de lo previsto en el diseño se colocan los bloques con el vaciado hacia abajo por ser el método habitual de construcción con este tipo de material. Para lograr la perforación y conformación de la celda, se cortan las bases de las piezas necesarias manualmente, logrando una perforación controlada. Conforme se concluye cada hilada se pasa el tensor, se limpia la celda para evitar rebabas de mortero que entorpezcan a la poste el vertido del mortero de protección.



Detalle 50: Plano de construcción de muro probeta de ladrillo "panelón" artesanal post-tensado.

Construido este muro alcanzó once hiladas y media con una dimensión total de 230 cm de alto por 226 cm de largo cada hilada resulta de 5 mampuestos y medio. Una vez construida la pared es necesario esperar el fraguado completo del mortero de las juntas, considerando que no se utiliza ningún tipo de aditivo acelerante es necesario por lo menos veinte y ocho días para aplicar presfuerzo.

6.4.1.2 Muro de mampostería artesanal para post-tensar.

Para experimentar la pared de ladrillo *panelón* de procedencia Susudel se adaptan piezas para poder pasar sensores internamente y post-tensarlo.

Al no contar con unidades perforadas y geometría necesaria se procede a taladrar unidades comunes (Foto 42), tres en primera instancia para ensayarlas a compresión y así observar si el impacto de crear huecos maquinadamente implica daño, rotura o resquebrajamiento interno con consecuente pérdida de capacidad portante, fue entonces necesario ensayarlos a compresión obteniéndose los siguientes resultados:

Cuadro 14: Prueba a compresión de unidades de mampostería de ladrillo *panelón* perforadas a través de taladrado.

MAMPOSTERIA	Fabricante	Dimensiones (cm.)	Ensayos	Carga neta de falla (kg/cm ²)	Resistencia Bruta (kg/cm ²)	Resistencia Bruta promedio (kg/cm ²)
Ladrillo artesanal	Susudel con perforación vertical	26,5 X 7,8 X 7,8	1	171404 kg.f	215,56	No Válido
			2	31418 kg.f	94,85	
			3	45395 kg.f	137,04	115,94

De los tres ensayos dos resultaron válidos, el primero mostró una exagerada resistencia probablemente por error en la aplicación de la presión en laboratorio, se decide entonces obtener un promedio de los dos restantes, el resultado es una resistencia de 115,94 Kg/cm², un 10% superior a lo conseguido en las pruebas previas (Cuadro 6) en unidades sin perforar, los dos válidos fueron superiores a los no perforados. Por la alta resistencia mostrada en las unidades perforadas se deduce no existe alteración o disminución en capacidad a compresión al taladrar unidades de mampostería al provocar huecos de la dimensión requerida y con el sistema de perforación utilizado, se decide entonces usar ladrillos perforados en sitio para la experimentación.

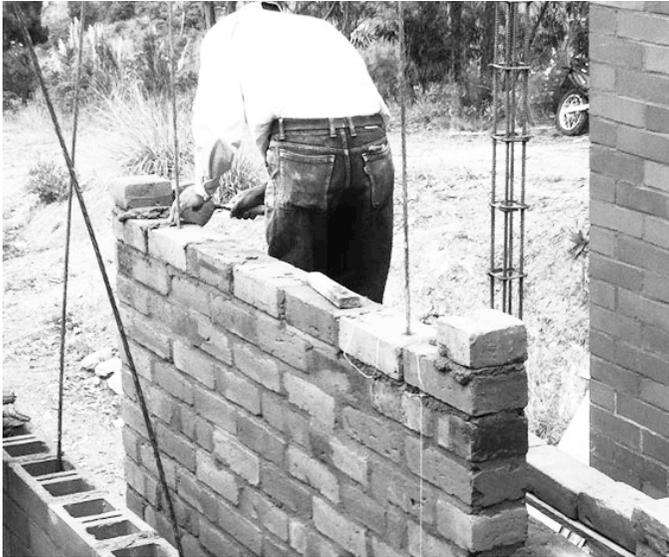


Foto 44: Muro de ladrillo "panelón" artesanal para presforzarse en proceso de construcción.



Foto 45: Muro de ladrillo "panelón" artesanal para presforzarse concluido.

Diseño: Con la disponibilidad de unidades perforadas en sitio es factible el diseño y elaboración de los muros de ladrillo artesanal para post-tensarse.

Para la colocación de tensores en este muro se toman como referencia los criterios para la colocación de tensores de G. Wight y NSR-10 ya descritos en 6.4.1.1. Por la variación de tamaño de las unidades de mampostería respecto al *muro de bloque de concreto para post-tensar* el espaciamiento entre tensores varía ligeramente respecto a la probeta mencionada, quedando una separación entre ellos de 114 cm en vez de los 120 cm, centrados en el eje vertical.

La cimentación del muro es una base de hormigón armado de 25 cm de peralte reforzada con acero a través de una viga electrosoldada tipo V8 conformada por 4 varillas de \varnothing 12 mm y estribos de \varnothing 6 mm cada 15 cm.

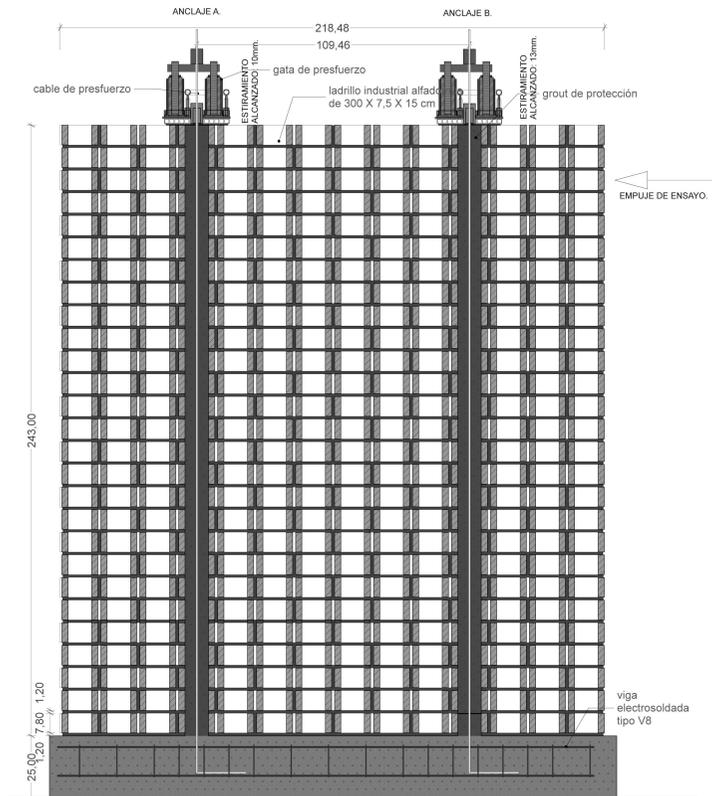
En la cimentación se dejan embebidos dos torones de 3/8 de pulgada (aproximadamente \varnothing 9 mm) con el extremo en forma de gancho en "L" como anclaje de manera similar al que comúnmente se utiliza en varilla de refuerzo por las razones ya descritas en 6.4.1.1.

El ladrillo se coloca normalmente trabado utilizándose unidades perforadas únicamente las piezas requeridas para que atraviesen los tensores.

El muro resultante es de 234 cm x 184 cm, compuesto por 26 hiladas horizontales, cada una de las cuales está conformada por seis y media unidades de mampostería. Los torones se encuentran centrados en el muro dispuestos simétricamente, emplazados a pieza y media a partir de cada uno de los extremos.

Construcción: El muro de ladrillo *panelón* a presforzarse se levanta en una base común a los muros de *bloque de concreto* y *ladrillo industrial* presforzados. Esta plataforma se la construye conjunta entre las tres probetas a post-tensarse para lograr mayor peso y firmeza, que contribuya a resistir los esfuerzo que se presentan al momento del ensayo. La base-cimiento está fundida sobre una viga "Doble T" (Foto 33) por las razones y del mismo modo ya descrito en la construcción de los muros tradicionalmente reforzados.

Acorde a diseño, inmediatamente bajo el muro en el cimiento está la viga electrosoldada de refuerzo. Los tensores se colocan y anclan al cimiento a



Detalle 51: Plano de construcción de muro probeta de ladrillo industrializado post-tensado.

través de un gancho en “L” que estará embebido en el concreto. Para la ubicación adecuada de los tensores se traza su localización previamente disponiendo las unidades de mampostería temporalmente durante armado del cimientó procurando ubicarlos correctamente para que a la poste discurren por los orificios de los ladrillos. Hay que considerar que las dimensiones de estas perforaciones son las más pequeñas y críticas en este tipo de mampuesto existiendo un limitado margen de error de apenas unos pocos milímetros. Luego de fijados los tensores y la viga electrosoldada se funde el cimientó base.

Endurecido el concreto se construye el muro trabando normalmente la mampostería dejando pasados internamente los cables de presfuerzo a través de las perforaciones de los ladrillos, hilada tras hilada, con la precaución de limpiar la angosta celda liberándola para verter posteriormente el mortero de protección al momento del tensado (*Foto 44*). Se procura que las juntas entre-hiladas sean angostas, lo cual considerando la irregularidad de las unidades no pudo ser menor a 15 mm El tamaño del muro probeta por las condiciones constructivas mencionadas, resultó de un tamaño de 185 cm de largo por 229 cm de alto y el ancho igual que el del ladrillo 13,5 cm.

Concluido el muro se procede a dejar fraguar el mortero de las hiladas por completo. Por no emplearse aditivo acelerante es necesario esperar por lo menos veinte y ocho días para a partir de entonces presforzar la pared.

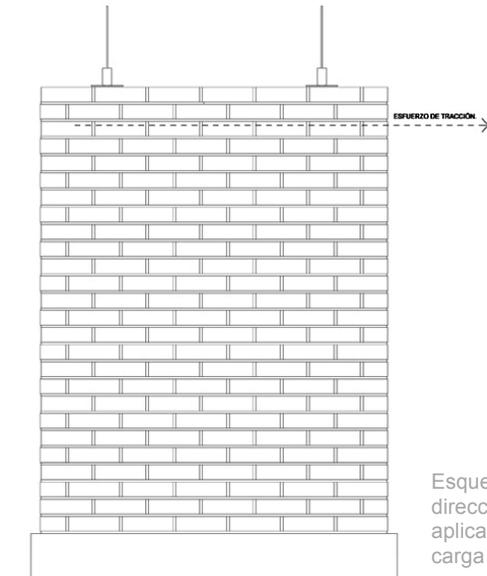
6.4.1.3 Muro de mampostería de ladrillo industrial para post-tensar.

Diseño: Se propone el empleo de ladrillo industrial reforzándolo acorde a criterios de elaboración de mampostería estructural a partir de parámetros planteados en la *Normativa colombiana de la construcción sismoresistente*, concretamente a *mampostería parcialmente reforzada con capacidad moderada de disipación de energía* acorde a NSR 98 Sec. D.7.2.1.2, este tipo de muro es considerado como tal “...cuando solo se inyecta con mortero de relleno las celdas verticales que llevan refuerzo, la mampostería reforzada construida con unidades de perforación vertical (bloque) se clasifica para efectos de diseño sismoresistente como uno de los sistemas con capacidad moderada de disipación de energía en el rango inelástico”

Al igual que en el resto de muros se plantea la construcción de una base o



Foto 46: Muro de ladrillo industrial para presforzarse en construcción.



Esquema 7:
dirección de aplicación de carga de prueba

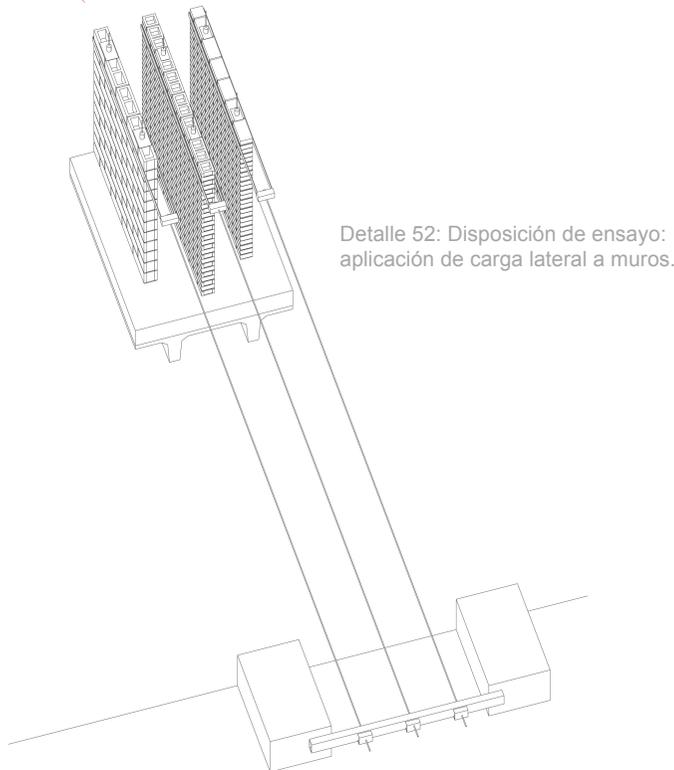
cimiento soportante bajo el muro, conformado por una losa de 25 cm de peralte reforzada por una viga electrosoldada tipo V8 de 15 X 15 cm la cual a su vez está constituida por 4 \varnothing de 12 mm sunchada por estribos de \varnothing 6 mm c/ 15 cm inmediatamente debajo el muro. Desde la mencionada base surgen los tensores ubicados en el centro de las celdas escogidas acorde a diseño.

Para el diseño de el muro se toma como referencia los criterios para la colocación de tensores de *G. Wight*, *NSR-10* y *H.R.Ganz*, con pequeñas diferencias en el espaciamiento y distribución por las dimensiones de las unidades de mampostería. Los torones se ubican a 110 cm de distancia entre si, centrados con respecto al eje vertical central del muro, emplazados en la cuarta celda a partir de cada uno de los extremos. La dimensión de la celda es de 9,4 X 9,4 cm en su sección, ubicado el cable en el centro queda un espacio libre mínimo en el contorno hasta las paredes del ducto de aproximadamente 4,2 cm en cada uno de los costados.

La altura del ducto propuesto es 243 cm, altura total del muro construido con 27 hiladas y juntas horizontales de 10 mm de espesor. Longitudinalmente la pared esta formada por siete piezas, el largo total del muro es aproximadamente 2,18 m.

Construcción: Del mismo modo que los muros anteriormente descritos, la cimentación es una base común compartida con los otros muros a post-tensarse que se elabora del siguiente modo: se ubica el refuerzo del cimiento, una viga electrosoldada V8; a continuación se localiza y sujeta en posición los cables de presfuerzo tendiendo una hilada temporal previamente para demarcar su posición, los torones con el gancho doblado (*Foto 40*) se emplazan sujetándolos bajo la viga electrosoldada previamente fijada en su lugar. Una vez encofrado los laterales de la placa de cimiento y fijados los refuerzos y tensores se funde la base de cimentación común a los tres muros con precaución de que los torones no se desplacen fuera de sitio.

Luego de endurecida la placa-base se procede a levantar el muro con la localización de las unidades de mampostería acorde a lo replanteado previamente y pasando los torones en las celdas requeridas; una vez fijados en la primera hilada, se continua levantando las siguientes hiladas (*foto 46*) limpiando interiormente la celda donde se ubican los tensores para posteriormente verter en ellos el mortero de protección sin dificultad inmediatamente previo al proceso de tensado.



Detalle 52: Disposición de ensayo: aplicación de carga lateral a muros.

Foto 47: Bancadas para aplicación de presfuerzo en la planta RFV.



Una vez alcanzada la altura requerida para el ensayo se espera el tiempo necesario para el fraguado total de las juntas de mortero, considerando que no se empleó aditivo acelerante, se requieren por lo menos veintiocho días. Una vez concluida la pared, la dimensión resultante es 2,16 m de largo por 2,28 m de alto; los tensores quedan ubicados a 1,10 m entre ellos y separados de cada borde del muro 53 cm.

6.4.2 Diseño de ensayo de comportamiento de muros post-tensados ante carga lateral.

Dirección de carga de prueba: La dirección de carga para ensayo es paralela al muro (*Esquema 7*), aplicada de modo que represente el efecto sísmico en donde los muros resistan solicitaciones laterales; en el caso de un muro divisorio, el ensayo busca asemejar la carga que se transmite desde elementos estructurales, así la pared desempeña un papel similar a una riostra en diagonal.

Ante la ausencia de dispositivos de ensayo y laboratorios especializados como los disponibles en investigaciones referentes, es necesario diseñar un modo y sistema de experimentación. La empresa RFV fue quién facilita el instrumental, espacio e instalaciones que ellos disponen para elaborar prefabricados; acorde a esta infraestructura se plantea una prueba para medir resistencia de muros ante sollicitación lateral.

Se construyen los muros de modo que se puede ejercer la carga lateral en ellos en su tramo superior con dirección horizontal y paralela a su plano como se establece en la planificación de ensayo (*Detalles 52 y 53*) por medio de bancadas de hormigón y soportes de acero diseñados para presforzar elementos de concreto. Estas bancadas están diseñadas y construidas para aplicar altos presfuerzos en elementos de considerable sección y tamaño, así, su capacidad para aplicar empuje o jalado es considerable (*Foto 47*).

Para los muros construidos de forma convencional el ensayo se realiza de la misma forma que en los muros post-tensados.

6.4.3 CARGA DE POST-TENSIÓN EN MUROS PROBETAS

Magnitud de post-tensión: Para determinar el presfuerzo con el que se post-tensionarán las probetas se consideran cuatro condicionantes fundamentales:

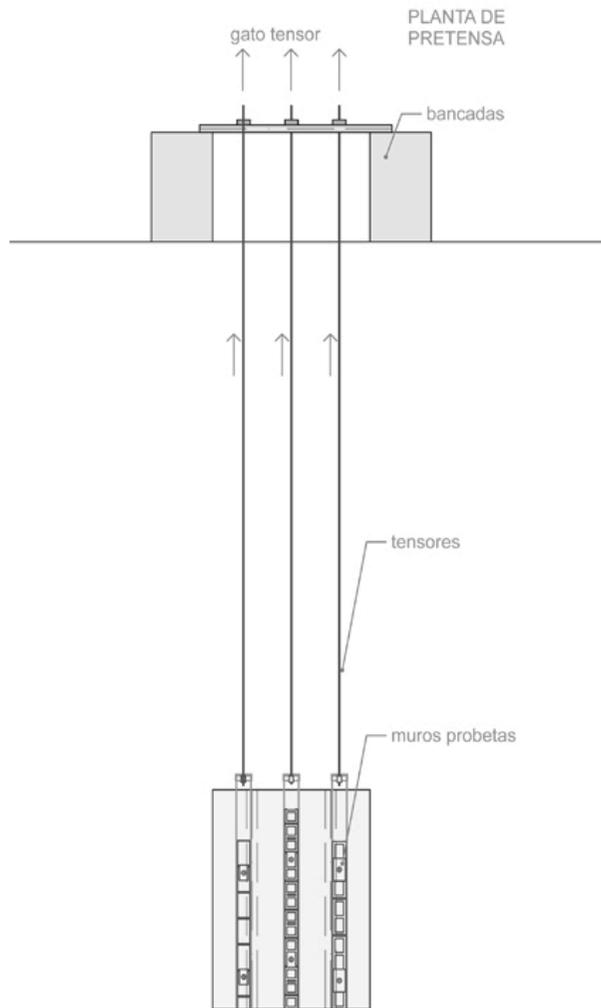
- La herramienta disponible creada para el efecto, la gata automotriz adaptada teóricamente puede aplicar una carga máxima de 8 toneladas de esfuerzo de acuerdo con las especificaciones de fábrica de esta herramienta (la suma de dos gatas de 4 toneladas cada una). Por la imposibilidad de adaptar un lector de presión en la herramienta, se opta por controlar el esfuerzo a través de la lectura de la deformación provocada en el tendón.

- En segundo lugar, de acuerdo a lo expuesto por Ganz (ver 6.2.3.5) el esfuerzo que puede resistir una pared es el 25% su capacidad de diseño, considerando peso propio, cargas que soporta y presfuerzo $f'm$. Acorde a este criterio y el área de la sección horizontal de las paredes, la carga máxima aplicable para cada uno de los tensores en cada una de las probetas será:

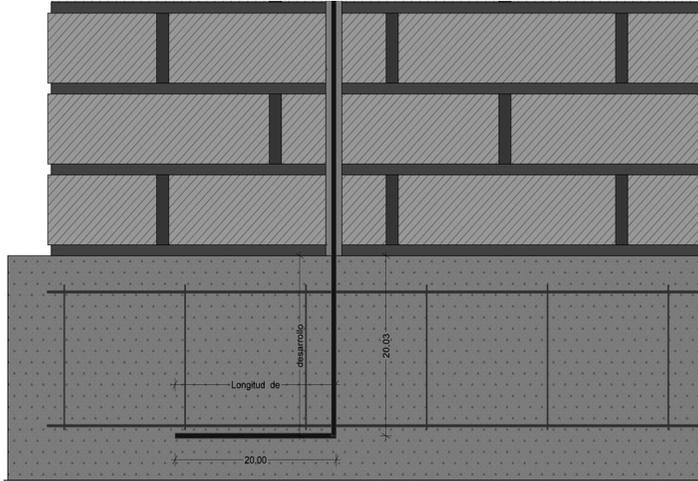
Cuadro 15: Carga máxima aplicable en cada uno de los torones acorde al área resistente de las probetas y $f'm$ de las mamposterías acorde a Ganz.

Cálculo de carga máxima recomendada por Ganz para aplicar a cada uno de los tensores de las probetas acorde a su sección.	Tipo de mampostería	Dimensiones de sección resistente(cm.)	Área resistente (cm2)	Máxima carga admisible (25% Carga de diseño en kg/cm2)	Carga máxima que soporta cada probeta (kg.)	Carga que soporta cada probeta sin considerar presfuerzo (este caso únicamente peso propio en kg)	Carga aplicable en cada tensor (kg)
Muros probeta	Ladrillo industrial Alfadomus	210 X 14,8	3108,00	13,434	41751,848	1132,866	20309,491
	Ladrillo artesanal de Susudel	186 X 13,4	2492,40	12,386	30871,863	933,155	14969,354
	Bloque de concreto Hormiazuary	225 X 15	3375,00	9,871	33316,309	1301,4	16007,454

- En el Cuadro 15 se detecta que la carga máxima potencialmente aplicable a cada uno de los tensores acorde a lo recomendado por Ganz (referencia 8) está entre las quince y veinte toneladas, esfuerzos considerables que son imposibles aplicar con la gata de tensado y peligroso incluso con los gatos disponibles en la planta industrial por la dificultad de colocación de dicha maquinaria.



Detalle 53: Detalle de método de jalado de muros post-tensados desde bancada.



Detalle 54: Gancho y longitud de desarrollo embebido en placa base.

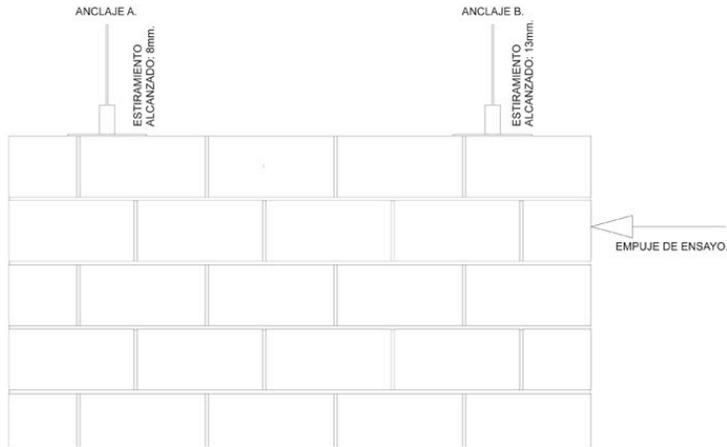
- Considerando el diámetro de los cables de presfuerzo, en 6.2.1 se expone el cálculo de la carga máxima que cada diámetro de cable puede aplicar. Por motivo de disponibilidad se utiliza el más delgado existente en el medio, se trata del torón de 3/8. Este tensor puede aplicar teóricamente máximo 8056 kg.

- Si regresamos a 6.2.2 *Comportamiento esperado de diferentes mampuestos frente a diferentes cables y torones* en donde se presenta el comportamiento de medio mampuesto frente al anclaje de transmisión de presfuerzo acorde a su capacidad ante compresión, se enuncia que dentro de todos los tipos de mampostería ensayados y que se utilizarán en los muros probetas post-tensados, es evidente que se tiene que considerar el espécimen que peor desempeño individual mostró por seguridad, hablamos concretamente de uno de bloque de concreto con una resistencia de $44,30 \text{ kg/cm}^2$, material que en promedio de el conjunto de tres ensayos es $74,37 \text{ kg/cm}^2$ y ningún otro espécimen de este material presentó una resistencia inferior a los 80 kg/cm^2 (Cuadro 5). Se adopta por seguridad la resistencia de este ensayo inferior por precaución por la posibilidad de que existan otras unidades con la misma deficiencia. Se selecciona esta resistencia mínima y se multiplica por el área neta (por mayor margen de seguridad) de la media unidad que es la encargada de soportar la presión transmitida por la placa de el anclaje de presfuerzo, el área portante considera entonces es $149,15 \text{ cm}^2$ acorde a cálculo previo (ver 6.2.2.1), en consecuencia encontramos que la máxima carga que se puede aplicar en esta sección de mampostería será de 6607 kg (área de medio mampuesto multiplicada por la más baja resistencia).

Una vez analizadas estas cuatro condicionantes se observa que la determinante es la última, la que nos arroja la limitante y mínimo presfuerzo posible en los muros, 6607 kg.f. Por último, además se decide a esta carga penalizarla con un 25% como margen de seguridad adicional, para evitar cualquier riesgo de falla por algún motivo extra o un mampuesto deficiente el momento de realizar el post-tensado, quedando definida la carga de presfuerzo prácticamente en 5000 kg. por tensor.

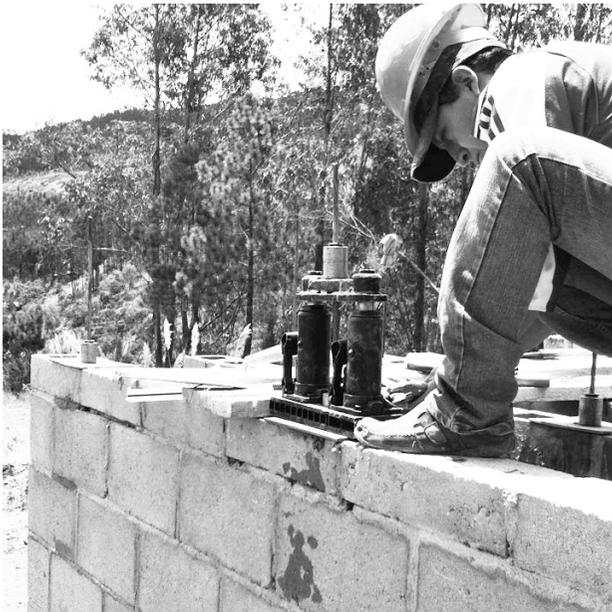
6.4.4 APLICACIÓN DE POST-TENSADO A MUROS PROBETAS

Para aplicar las 5 toneladas se calcula el alargamiento que se le provocará al cable. Para encontrar el alargamiento necesario en un torón de 3/8 se



Esquema 8: Estiramiento de tensores alcanzado al presforzar muro de bloque de concreto.

Foto 48: Proceso de tensado de muro de bloque de concreto.



aplica la siguiente expresión:

Fórmula 2

$$\delta = P \cdot L / E \cdot A$$

Dónde:

P= Carga Aplicada (se considera 5000 Kg. determinado en 6.4.3)

L = Longitud del torón (2,5 m, un poco mayor al alto del muro)

E = Módulo de elasticidad (Módulo de elasticidad del material 1.900.000 kg/cm² para el acero de baja relajación en el torón empleado)

A = Sección transversal del torón (0,53 cm² acorde a catalogo para torón de 3/8)

Aplicando la expresión tenemos que la deformación será

$$\delta_{\text{de torón}} = 5000 \text{ kg.} \times 250 \text{ cm} / 1900000 \text{ kg/cm}^2 \times 0,53 \text{ cm}$$

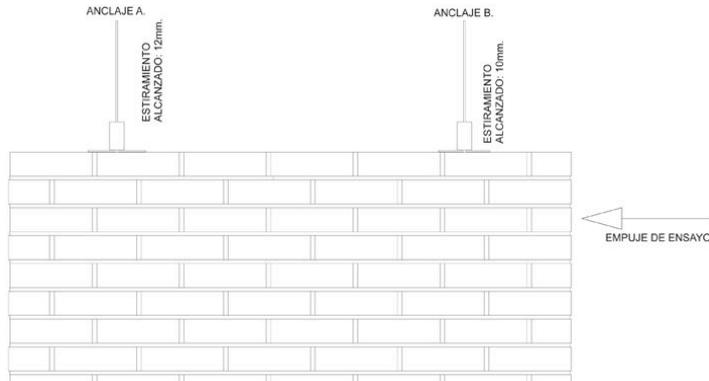
$$\delta_{\text{de torón}} = 1,24 \text{ cm}$$

Entonces, para llegar a presionar con 5000 kg con cada tensor es necesario que el torón se estire aproximadamente 1,24 cm. Sin embargo los operadores de *RFV* recomiendan alargar el tensor un par de milímetros más por que es previsible que el momento de fijar el anclaje, regrese ligeramente el estiramiento dándose una pérdida de presfuerzo al apretarse las cuñas en los torones.

6.4.4.1 Aplicación de post-tensado a muro de mampostería de bloque de concreto.

El muro de bloque de concreto es aquel que teóricamente menos presión puede soportar y en el ensayo de unidades individuales fue el que mostró más baja resistencia incluyendo un espécimen de capacidad preocupantemente baja por lo tanto es el más crítico al aplicar la precompresión.

Inmediatamente antes del tensado se vierte mortero de protección en la



Esquema 9: Estiramiento de tendones alcanzado al presforzar muros de ladrillo panelón.

celda. Este mortero es elaborado con arena gruesa y cemento en proporción 4-1 a la que se adiciona superplastificante Sikament N-100 en una proporción del 1% con respecto al cemento en peso. Al realizar el tensado lo primero que se desprende del proceso es la dificultad de aplicar presfuerzo por la facilidad con que se desbalancean las dos gatas, siendo necesario emparejar adecuadamente los dos cilindros paulatinamente conforme se aplica mayor presión bombeando acorde se observa desbalance por momentos, en una de las dos gatas. Por la necesidad de estirar en exceso por la pérdida en el apretamiento del anclaje, este efecto de regreso no resultó igual en ambos anclajes. La deformación resultante la observamos en el *Esquema 8*, el estimado de presfuerzo colocado es el siguiente:

Cuadro 16: Carga estimada aplicada en muros probetas de bloque de concreto acorde a deformación alcanzada en tendones.

Anclaje	Deformación (mm.)	Estimado de presfuerzo (Kg.)
A	8	3960
B	13	6436

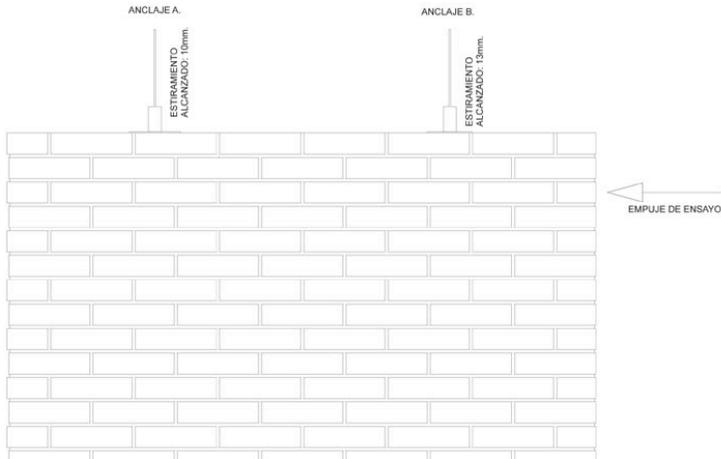
Foto 49: Proceso de tensado de muro de ladrillo panelón.



Como se evidencia en el *Cuadro 16* en el anclaje A se produce un marcado regreso de estiramiento con la consecuente pérdida de presfuerzo al momento del ajuste del anclaje, en total 3 mm más de lo esperado, en el segundo 2mm. menos de lo esperado. De esto resulta que el anclaje B tiene aproximadamente 2500 kg de presfuerzo más en comparación con el anclaje B.

6.4.4.2 Aplicación de post-tensado a muro de mampostería de ladrillo artesanal.

En el vertido del mortero de protección fue imposible lograr que este atravesara toda la altura de la pared por la dimensión mínima de la celda, a pesar de que se coloca un mortero muy líquido con una proporción arena/cemento 1/1 con arena fina de cantera cernida y mezclado adicionalmente el doble de plastificante Sikament N-100 en una relación de peso plastificante/cemento del 2%. La dificultad para el ingreso del material aparentemente no se da por la rugosidad o suciedad de la celda, sino por el cilindro de presión de aire formado en el ducto al no existir escape de aire en el momento del vertido.



Esquema 10: Estiramiento de tensores alcanzado al presforzar muros de ladrillo industrial.

Por lo demás el tensado se realiza con mayor seguridad por la superior capacidad de esta mampostería para soportar el presfuerzo estipulado en comparación con la mampostería de bloque.

Cuadro 17: Carga estimada aplicada en muros probetas de ladrillo *panelón* acorde a deformación alcanzada en tensores.

Anclaje	Deformación (mm.)	Estimado de presfuerzo (Kg.)
A	12	5941
B	10	4951

El Cuadro 17 muestra que estas paredes llevan un presfuerzo con una diferencia de aproximadamente una tonelada entre los dos tensores por la disparidad de estiramiento por pérdidas en el momento del anclaje.

6.4.4.3 Aplicación de post-tensado a muro de mampostería de ladrillo industrial.

Foto 50: Proceso de tensado de muro de ladrillo industrial.



En la aplicación de presfuerzo no se observa ninguna dificultad tanto en el vertido del mortero de protección como tampoco en la aplicación de la carga. Para el mortero de protección se utiliza la misma mezcla que la empleada para el muro de bloque de concreto (ver 6.4.4.1). En cuanto a capacidad portante, la carga a aplicarse es bastante menor a la que teóricamente resiste este tipo de muro y unidad de mampostería que lo conforma, por esta razón se considera no existe riesgo alguno de falla al momento de la aplicación de presfuerzo.

Al realizarse el tensado se alcanzan las siguientes deformaciones y sus correspondientes cargas de presfuerzo resultantes:

Cuadro 18: Carga estimada aplicada en muros probetas de ladrillo industrial acorde a deformación alcanzada en tensores.

Anclaje	Deformación (mm.)	Estimado de presfuerzo (Kg.)
A	10	4951
B	13	6436

La deformación en este caso también resulta desequilibrada con una



Foto 51: Ensayo ante carga lateral de muro de bloque tradicionalmente construido: Falla de muro.

Foto 52: Ensayo ante carga lateral de muro de bloque post-tensado: Falla de muro.



diferencia aproximada de 3 mm lo que representa en presfuerzo aproximadamente 1485 kg. superior en un tensor respecto al otro.

6.5 ENSAYO, COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS Y DETERMINACIÓN DE FACTIBILIDAD.

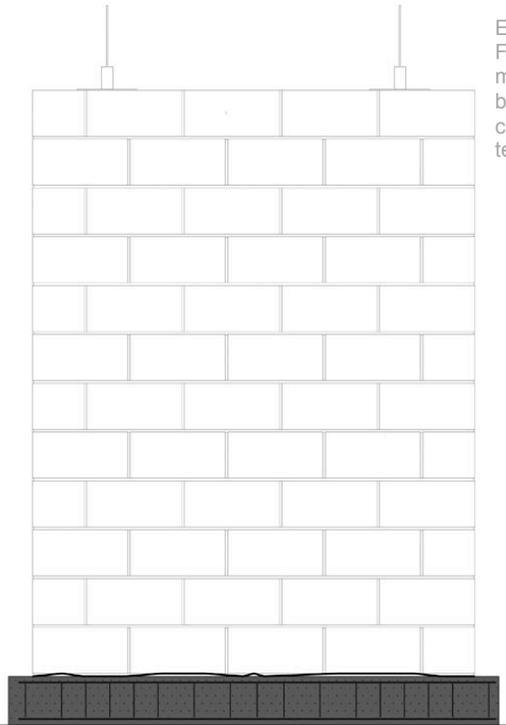
Una vez tensados los cables embebidos en el mortero de protección se espera el lapso de quince días para que este material llegue a estado de endurecimiento de alrededor del 70 %, la resistencia de este material no es determinante ya que se trata de una adhesión que es considerada como protección del acero de los tensores, sin embargo es indudable que a la postre colabora estructuralmente sobre todo en los muros de bloque de concreto y ladrillo industrial donde las celdas tienen considerable sección; en cambio, en el muro de ladrillo *panelón* es tan escaso que difícilmente influye en la resistencia del muro.

6.5.1 ENSAYO, COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO Y COSTO DE MAMPOSTERÍA DE BLOQUE TRADICIONALMENTE CONSTRUIDO VERSUS EL POST-TENSADO

6.5.1.1 Costo comparativo de muros de bloque de concreto post-tensado versus tradicionalmente construido.

Al elaborar el análisis de precios unitarios se observa que el costo del muro de bloque de concreto de Hormiazuay reforzado con una columna de hormigón armado (*Detalle 46*) tiene un costo estimado de 147,25 USD (aproximadamente 34,2 USD/m²) versus el muro de la misma dimensión post-tensado (*Detalle 49*) con un costo aproximado de 182,86 USD (42,47 USD/m²), así la diferencia económica entre las dos es 35,61 USD, el resultado porcentualmente se observa un encarecimiento del 24% con la utilización de la tecnología propuesta (rubros en anexos) versus el tradicionalmente construido.

Sin embargo esta estimación monetaria considera el empleo de anclajes norteamericanos que normalmente se reutilizan en la elaboración de prefabricados los cuales tienen un precio referencial en el mercado ecuatoriano de 24 USD, los utilizados en la experimentación por ser los



Esquema 11:
Falla de muro de
mampostería de
bloque de
concreto post-
tensado

Foto 53: Ensayo ante carga lateral de muro de bloque post-tensado: Falla en longitud de desarrollo, anclaje inferior.



únicos disponibles. Si se considera que ya se ofertan anclajes de procedencia China cuyo costo se estima 3 o 4 USD¹⁸, el costo de este mismo muro podría disminuir en 40 USD potencialmente, con lo cual estaría ya en condiciones competitivas e incluso es potencialmente más económico, de constatarse una adecuada condición técnica de estos dispositivos asiáticos.

6.5.1.2 Resistencia comparativa de muros de bloque de concreto post-tensado versus tradicionalmente construido.

En el ensayo ante carga lateral de los dos muros de bloque de concreto, el tradicionalmente construido y el post-tensado presentan ambos un modo de falla similar, la separación de la pared con respecto a su base. Esta falla se da en un empuje bastante superior en el post-tensado como se evidencia en el siguiente cuadro comparativo:

Cuadro 19: Comparación de resistencia ante carga lateral de muro probeta de bloque post-tensado frente a tradicionalmente construido.

Muro	Esfuerzo para falla inicial (Kg.)	Diferencia en % (falla inicial) enfrentadas ambas tecnologías	Esfuerzo máximo para colapso (Kg.)	Diferencia en % (colapso) enfrentadas ambas tecnologías
Boque de concreto tradicionalmente	680	12,29%	907	13,65%
Boque de concreto post-tensado	5534	813,82%	6645	732,64%

En el ensayo del muro tradicionalmente construido, al aplicarse el esfuerzo lateral, con una carga apenas superior a la necesaria para templar el cordón de jalado se observa ya una pequeña fisura en la interface entre el muro y la placa, luego al aumentar el empuje no se contempla una rotura brusca de la pared, más bien esta gira lentamente con respecto a su base en la columna de concreto conforme las varillas de refuerzo sirven de pivót y el concreto de la base en esta zona se rompe completamente sin que el gato de jalado marque algo más de los 907 Kg. Al volver al muro a su sitio este regresa completamente separado de la base tanto la mampostería como la columna,

¹⁸http://www.alibaba.com/productgs/540683163/prestressed_anchorage.html. Páginaproporcionada por Ing. MSC Vladimir Carrasco, a quién se le ofertó anclajes abiertos llevados a Cuenca por este valor a través de esta importadora.



Foto 54: Ensayo ante carga lateral de muro de ladrillo panelón tradicionalmente construido: Rotura total en juntas horizontales entre hiladas inferiores.

para terminarlo de derribarlo se lo jala con una cuerda desplomándose fácilmente con poco esfuerzo.

A comparación del muro anterior, el jalado para provocar la primera fisura en la pared post-tensionada fue de cinco toneladas y media, una carga 8 veces superior respecto a su contraparte tradicionalmente construido. A partir de esto la pared fue girando de modo similar separándose la primera hilada de bloque de la placa base; el fallo se genera no en el muro sino en el anclaje inferior pasivo del torón (foto 52), luego de la primera falla fue necesario aplicar más de seis toneladas y media para que la pared se separe definitivamente de la base. Evidentemente el punto débil del muro es la sujeción en “L” del torón y su longitud de desarrollo. Debido a que la falla se da únicamente en este anclaje la pared en si misma no se rompe, fue necesario virarla empujándola con cuerdas con considerable esfuerzo, el proceso fue lento y difícil. Una vez que se logra acostar el muro, este sigue manteniéndose en una sola pieza, para romperlo por completo fue necesario golpearlo con martillo pesado.

6.5.2 COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO Y COSTO DE MAMPOSTERÍA DE LADRILLO ARTESANAL TRADICIONALMENTE CONSTRUIDO VERSUS EL POST-TENSADO.

6.5.2.1 Costo comparativo de muros de ladrillo artesanal post-tensado versus tradicionalmente contruidos.

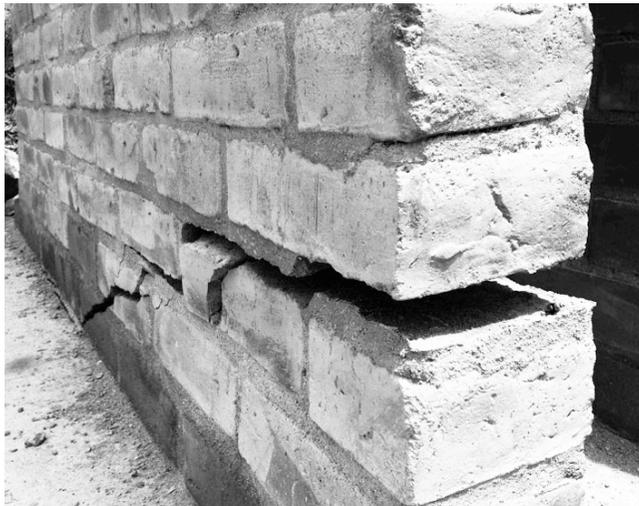
Comparativamente en costo de los especímenes contruidos se estima que el valor económico del muro de ladrillo panelón artesanal de Susudel reforzado con una columna de hormigón armado (*Detalle 47*) está en el orden de 181,51 USD (alrededor de 42,16 USD/m²) versus el muro de la misma dimensión post-tensado (*Detalle 50*) con un precio aproximado de 207,98 (48,30 USD/m²), así la diferencia es 26,47 USD, porcentualmente vemos que el costo se ve encarecido en 14% con la utilización de la tecnología propuesta (rubros en anexos).

Sin embargo esta estimación está realizada considerando que se emplean anclajes norteamericanos considerados normalmente para ser reutilizados (muy alta calidad y resistencia) en la fabricación de pretensados, estos tienen un precio referencial en el mercado ecuatoriano de 24 USD por unidad, se emplean estos anclajes en esta experimentación por ser la única



Foto 55: Ensayo ante carga lateral de muro de ladrillo panelón post-tensado: primer fisuramiento en junta y piezas de mampostería.

Foto 56: Ensayo ante carga lateral de muro de ladrillo panelón post-tensado: falla en la longitud de desarrollo de torón.



opción disponible. Si se considera que ya se ofertan anclajes de procedencia China en aproximadamente 3 o 4 USD¹⁹, el costo de este mismo muro podría disminuir potencialmente en alrededor de 40 USD. Teniendo en cuenta que los anclajes que se requieren en el sistema constructivo propuesto no se reutilizan estos pueden ser de inferior calidad, no se pudo obtener una muestra de la alternativa de anclaje chino de donde no se puede asegurar su factibilidad de uso. Con esta variación posible de costos existiría una diferencia de 15 dólares siendo más económica la pared post-tensada, tornándose plenamente competitiva.

6.5.2.2 Resistencia comparativa de muros de ladrillo artesanal post-tensado versus tradicionalmente contruidos.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de desempeño y resistencia al aplicar carga lateral en los muros probetas de ladrillo artesanal post-tensado comparado al construido y reforzado del modo tradicional:

Cuadro 20: Comparación de resistencia ante carga lateral de muro probeta de bloque post-tensado frente a tradicionalmente construido.

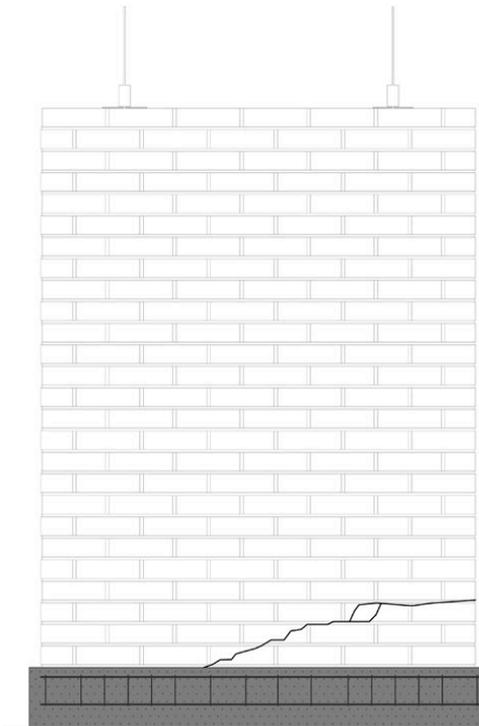
Muro	Esfuerzo para falla inicial (Kg.)	Diferencia en % (falla inicial) enfrentadas ambas tecnologías	Esfuerzo máximo para colapso (Kg.)	Diferencia en % (colapso) enfrentadas ambas tecnologías
Ladrillo artesanal tradicionalmente construido	726	16,01%	862	13,11%
Ladrillo artesanal post-tensado	4536	624,79%	6577	762,99%

En el ensayo de ladrillo panelón reforzado del modo tradicional se observa una falla prematura cuando apenas se aplican mil quinientas libras fuerza que provoca una grieta a lo largo de una de las juntas de mortero horizontal en las hiladas inferiores (foto 55), de ahí en más, el medidor de esfuerzo del gato no llega a superar las dos mil libras, se levanta la pared transformándose la grieta en fractura total de modo similar a la sucedido en el muro de bloque de concreto tradicionalmente reforzado, el elemento queda únicamente integrado por la base inferior de la columna al formarse ahí una articulación plástica producida en las cuatro varillas embebidas. Una vez que se fisura se observa que la pared no presenta mayor resistencia y

¹⁹ *Íbid.* 18



Foto 57: Ensayo ante carga lateral de muro de ladrillo panelón post-tensado: rotura total de muro tanto mortero como mampuesto.



Esquema 12:
Esquemas de falla
de muro de
mampostería de
ladrillo panelón post-
tensado.

se levanta y mueve fácilmente. Se descarga la pared y regresa a su sitio totalmente desplazada en su eje. Para tirarla definitivamente es necesario un leve empuje hacia uno de los costados, se desploma con facilidad.

Al probar su contraparte de ladrillo *panelón* con pre-compresión, el comportamiento del muro post-tensado también fue presentar en primera instancia una grieta en las hiladas inferiores pero ante carga más de seis veces superior, en este caso se rompe en forma escalonada en la parte inferior del muro, no fracturándose únicamente la junta de mortero sino en tramos de unidades de mampostería también, la rotura no se da a todo lo largo de la pared, solamente en la mitad en donde se aplica la carga de prueba (foto 56); luego al seguir aumentando la carga de ensayo, el elemento logra resistir más de siete veces más de esfuerzo en comparación al tradicionalmente construido. Una vez que el muro post-tensado empieza a girar por falla de la *longitud de desarrollo* o su anclaje inferior, este regresa a su sitio y no colapsa bruscamente ni presenta desplazamiento en su base ya que el otro tensor mantiene parte de la pared todavía integrada con la placa base trabajando normalmente (foto 57). Al tratar de aplicar cargas superiores se provoca que la gata que emite el empuje se quede sin longitud de trabajo sin lograr que la pared quede fracturada en condiciones de caerse; a pesar de que uno de los tensores está cedido en su anclaje inferior por completo, nunca se observa que se separe la pared a todo lo largo de la base. Se determina que el muro puede soportar 14500 lb.

6.5.3 COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO Y COSTO DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL CON LADRILLO INDUSTRIAL VERSUS EL POST-TENSADO

6.5.3.1 Costo comparativo de mampostería estructural con ladrillo industrial respecto a la post-tensada.

Comparativamente en costo en los especímenes construidos se calcula que el precio del muro de ladrillo industrial Alfadomus reforzado con varilla de acero a manera de mampostería estructural (*Detalle 48*) tiene un costo estimado de 179,25 USD (aproximadamente 33,76 USD /m²); el muro de la misma dimensión post-tensado (*Detalle 51*) tiene un costo aproximado de 251,45 USD (47,36 USD/m²), la diferencia es 72,2 USD, porcentualmente vemos que el costo se ve encarecido en 40% con la utilización de la tecnología propuesta (rubros en anexos) en los especímenes construidos.



Foto 58: Falla ante carga lateral de muro de mampostería estructural con ladrillo industrial



Foto 59: Falla ante carga lateral de muro de mampostería post-tensada con ladrillo industrial.

Este presupuesto está realizado considerando que se emplean anclajes americanos que tienen un precio referencial ubicados en el mercado ecuatoriano de 24 USD los cuales fueron los utilizados en esta experimentación. Si tomamos en cuenta que ya se ofertan anclajes procedentes de China en un precio cercano a los 4 USD, el valor de este muro se abarataría potencialmente en 40 USD, con lo que su costo sería de 211 USD, en consecuencia el muro de ladrillo industrialmente producido post-tensado es de todas maneras un 18% más costoso siendo evidentemente no competitivo por precio.

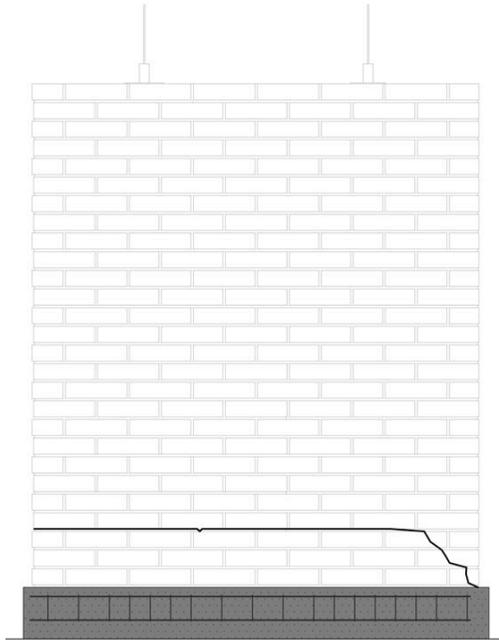
6.5.3.2 Resistencia comparativa de mampostería estructural con ladrillo industrial respecto a la post-tensada.

En la prueba realizada en la mampostería estructural se observa una gran resistencia ante la carga lateral especialmente si se compara con los muros de ladrillo y bloque reforzados del modo tradicional. Los resultados de resistencia de ambos muros se expresan comparativamente en el siguiente cuadro:

Cuadro 21: Comparación de resistencia ante carga lateral de muro de mampostería estructural respecto a mampostería post-tensada

Muro	Esfuerzo para falla inicial (Kg.)	Diferencia en % (falla inicial) enfrentadas ambas tecnologías	Esfuerzo máximo para colapso (Kg.)	Diferencia en % (colapso) enfrentadas ambas tecnologías
Mampostería estructural con ladrillo industrial	6124	221,32%	6124	192,82%
Mampostería post-tensada con ladrillo industrial	2767	45,18%	3176	51,86%

La pared de mampostería post-tensada presenta la mitad de resistencia con respecto al muro elaborado bajo normativa de mampostería estructural debido fundamentalmente a la falta de *longitud de desarrollo* o por aplastamiento del concreto justo en el cambio de dirección de la “L” de los tensores especialmente el ubicado en el costado en el que se aplica la carga de prueba, torón evidentemente sometido a mayor trabajo (*Detalle 55*). La variación de comportamiento radica claramente en el modo de falla de los dos muros: mientras en el construido como mampostería estructural fue brusco partiéndose instantáneamente en muchos pedazos de un modo explosivo, el muro post-tensado se abre paulatinamente luego de que se agrieta en una de las juntas de mortero horizontales en las hiladas

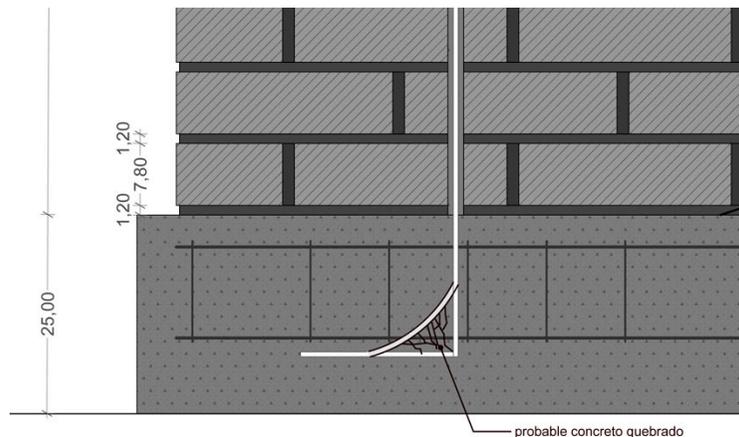


Esquema 13: Falla ante carga lateral de muro de mampostería post-tensada con ladrillo panelón.

inferiores, esta fisura, a diferencia de la probeta de ladrillo *panelón* post-tensado, dividió a todo lo largo la pared quedando separada en dos partes, sin embargo los tensores siguieron trabajando e integrando el muro hasta que definitivamente cedió el segundo anclaje inferior. Una vez que se separa en dos partes la pared, el cuerpo superior sigue integrado sólidamente.

Luego de ensayar los tres muros post-tensados se observa una diferencia de comportamiento entre el de bloque de concreto y ladrillo industrial respecto al muro de ladrillo *panelón*, comportamiento influenciado por la presencia de mortero de protección en toda la longitud de los tensores en los dos primeros a diferencia del tercero en el que fue imposible introducir este material en toda la altura de la pequeña celda. El hecho de que el mortero sujete al tensor por adherencia en las celdas rellenas hizo imposible que durante el ensayo el tensor se estire, hecho que provoca la falla en la *longitud de desarrollo* tempranamente, en cambio en la pared de ladrillo *panelón* al no estar sujeto y embebido el tensor este tiene la libertad de estirarse y contraerse a todo lo largo, permite que trabajen elásticamente por más tiempo y se deformen más durante el ensayo antes de que se presente la falla característica en la *longitud de desarrollo* hecho que se da únicamente en el tensor que más se estira; por esta razón la pared de ladrillo *panelón* post-tensado nunca se divide por completo y uno de los tensores se mantuvo trabajando siempre.

Detalle 55: Probable falla de anclaje pasivo por compresión del concreto.



7 CONCLUSIONES.

En esta investigación se explora la posibilidad de utilizar mampostería post-tensada como material estructural o como alternativa para mejorar la capacidad de muros divisorios no estructurales frente a sollicitaciones laterales.

El trabajo se inicia recopilando experiencias a nivel internacional puesto que no existen investigaciones en nuestro país con respecto al tema propuesto. A partir de estos referentes se extrae información valiosa, recomendaciones y criterios además de las conclusiones de cada investigación de referencia. Se encontraron criterios y lineamientos considerados fundamentales para nuestra investigación: clases y geometrías de mampuestos, dimensiones y características de las juntas de mortero, esfuerzo máximo de precompresión de acuerdo a la capacidad admisible del material, ubicación de tensores, consideraciones para aplicación de ensayos, etc.

Para establecer la validez de dichas recomendaciones y verificar las ventajas del comportamiento del sistema constructivo propuesto como también la factibilidad de su uso masivo en el país, se propone la realización de ensayos mediante la construcción de muros no reforzados sujetos a un elemento estructural, también en forma de muro reforzado, para contraponer estos resultados con muros de mampostería post-tensada.

Previo a la construcción y ensayo de las probetas mencionadas fue necesaria una instancia investigativa para descifrar la disponibilidad y aptitud de materiales además de diseñar e idear un método para aplicar presfuerzo con el correspondiente diseño de sistemas constructivos a implementarse. En el mismo orden, debido a la escases de laboratorios o equipamiento apto para estudiar el comportamiento de muros fue necesario idear una forma para poder someter las probetas a prueba y medir la mejora de comportamiento de las paredes construidas con la tecnología propuesta. Realizadas estas investigaciones se concluye que:

Conclusiones acorde a disponibilidad de recursos:

- El hecho de post-tensar muros en nuestro país es plenamente factible, sin embargo se requiere modificar materiales y herramientas, modificaciones sin las cuales se vuelve un sistema constructivo difícil de implementar y poco competitivo.
- Los dispositivos para presforzar disponibles en Ecuador no presentan aptitud para post-tensar muros, son adecuados para precomprimir elementos de hormigón, por lo tanto son no adecuados por dimensiones, incomodidad de uso además de peligroso para los operarios. Por esta razón fue imperativa la creación de una herramienta acorde a la necesidades y requerimientos de presforzar paredes.
- Se diseñó y construye la herramienta para post-tensar paredes en un taller local. Si bien se puede construir el dispositivo post-tensador, no fue posible adaptar un medidor de esfuerzo con éxito. En el mercado extranjero existe disponibilidad de gatas hidráulicas tipo “botella” con manómetro incluido de fábrica²⁰, herramientas que tienen condiciones de soportar grandes esfuerzos y medirlos. Bajo el esquema de herramienta aquí propuesta, lo ideal será que cada gata tenga su manómetro propio.
- El dispositivo post-tensador fue necesario construirlo a partir de dos gatas, ya que el efecto torcionante resultante de la excentricidad del eje del cuerpo de la gata y el tensor hizo imposible que funcione correctamente con una sola. En este mismo sentido, por la imposibilidad de ubicar el orificio de jalado centrado con respecto a los dos cilindros accionados por empuje hidráulico debido a la geometría de las dos gatas que idealmente se necesitaría que ambas sean construidas reflejadas simétricamente, lo cual no lo son, en consecuencia, no quedan equidistantes respecto al eje donde discurre el tensor; esta asimetría produce desequilibrio por diferencia de *momento*, por esto una de las dos gatas tiene que absorber más presión respecto a la otra. Este desequilibrio hubo que solucionarlo accionando siempre una gata más que la otra.
- En el país no existen variedad de mampuestos que tengan las características y aptitudes necesarias para la realización de muros post-tensados, de hecho tampoco para mampostería reforzada. Se encuentra un

²⁰http://www.mega.es/catalogo_automocion/catalogo_automocion_detalle.php?sIdioma=es&nIdCategoria=1&nIdSubcategoria=1&nIdArticulo=21

solo tipo de ladrillo industrial en la fábrica Alfadomus de Guayaquil que presenta condiciones adecuadas, el nombre comercial del producto es *Bloque de dos huecos de 30 X 15 cm*. Además se selecciona un ladrillo *panelón* compacto artesanal y bloque de concreto, mampuestos que mediante ensayos de resistencia se diferencian algunos de mejor calidad, por lo tanto a la postre son los utilizados; para su uso se requiere necesariamente su adaptación geométrica.

- La mampostería elaborada con unidades de tipo industrial Alfadomus demostró ser la más apta para ser post-tensada por resistencia y geometría.

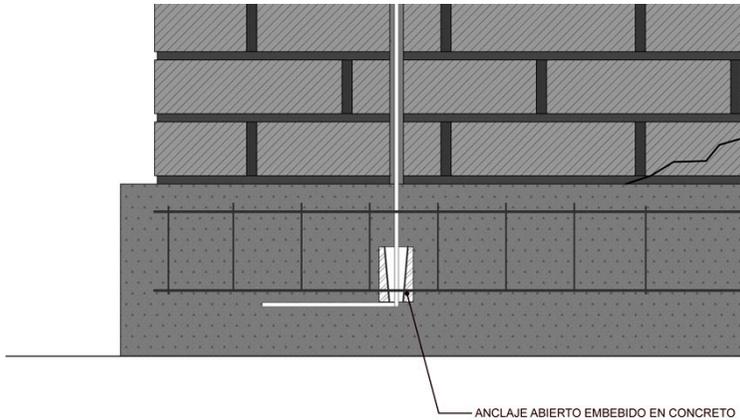
- Se concluye que para la utilización de ladrillo *panelón* exitosamente se requieren unidades con perforación vertical y con un ancho mayor a los existentes en el mercado, por que la sección de la perforación que se puede practicar sin que pierda la capacidad portante no fue suficiente para que el mortero de recubrimiento discorra en todo lo alto del ducto alrededor del tensor, hecho imprescindible para garantizar la durabilidad del mismo.

- El bloque de concreto mostró ser el menos apto para el post-tensado por ser el material de más baja resistencia a compresión. El bloque de Disensa en su geometría presenta características adecuadas para su utilización en mampostería estructural, sin embargo el más resistente, el de Hormiazuay, fue necesario adaptarlo recortando la base de media pieza.

- Para post-tensar muros de características divisorias no portantes la capacidad admisible de nuestros muros es suficiente para resistir presfuerzo. Sin embargo para la construcción de mampostería estructural post-tensada se requieren muros de alta resistencia, para así viabilizar la mampostería post-tensada como sistema constructivo estructural en edificaciones de altura.

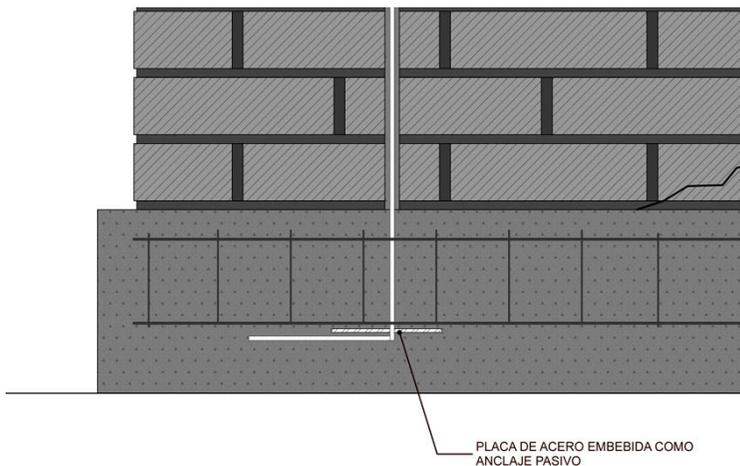
- Las *escalerillas* o refuerzo horizontal para mampostería estructural no existen en el mercado ecuatoriano. Estos refuerzos también son recomendados para mampostería post-tensada de acuerdo a los referentes.

- Con respecto al acero para aplicar la fuerza de compresión se establece que se necesitan cables de acero de baja relajación, barras de acero no son aptas. En Ecuador no se pudo obtener alambre de presfuerzo de \varnothing de 4 o 6 mm (el cual se puede importar en un volumen superior a 3 toneladas) motivo por el cual se realiza la experimentación con torón de 3/8 de pulgada, equivalente a alambre de 9 mm.



Detalle 56: Alternativa de anclaje abierto colocado como anclaje pasivo embebido en el concreto de base.

Detalle 57: Alternativa de placa de acero colocada como anclaje pasivo embebido en el concreto de base.



- En cuanto a dispositivos para aplicación de presfuerzo se consigue anclajes costosos y hechos para su reutilización. Sin embargo existe la posibilidad de importar estos accesorios al por mayor a un costo más conveniente.

Acorde a posibilidades de diseño de sistema constructivo concluimos que:

- Se planifican alternativas para aplicar presfuerzo a mampostería y se pueden buscar más opciones acorde a distintos requerimientos.

- Para la implementación del post-tensado en paredes se torna importante considerar tiempos de fraguado de mortero para luego aplicar el presfuerzo. En la programación de la construcción es imprescindible tomar en cuenta que el post-tensado se puede aplicar una vez fraguado por completo el mortero de hiladas del muro lo cual puede tomar varios días o tiene que reverse el uso de aditivos acelerantes de fraguado.

- Por la tenacidad mostrada por los especímenes post-tensados incluso después de su falla, se abre la posibilidad de prefabricar paredes precomprimidas industrialmente, para ser transportadas y ensambladas en obra.

Acorde a los condicionamientos constructivos se concluye que:

-Se pretende anclar el extremo pasivo del tensor a través de un gancho formado en el propio torón de modo similar al utilizado en la varilla de refuerzo por economía. Esta sujeción mostró ser el punto débil de los muros post-tensados y donde se produce la falla al someterlos a ensayo. La alternativa es entonces colocar un anclaje adicional embebido pasivo o una placa que colabore con la "L" evitando así la potencial fractura del concreto en este punto y disminuyendo la probabilidad de falla en la longitud de desarrollo (*Detalles 56 y 57*).

- Se requiere espacio para trabajar en el remate superior de los muros para la labor del operario del gato tensor y colocado de cuñas de los anclajes, acción que tiene que ser prevista al momento del diseño de los muros y quizás incluso en la programación de la construcción. Bajo el criterio de crear una herramienta óptima para post-tensionar, esta puede ser optimizada en su tamaño considerando que la altura de los gatos automotrices están pensados para levantar un auto un tramo suficientemente largo que permita cambiar un neumático. Sin embargo si

consideramos que para post-tensar muros es necesario alargar pocos centímetros o milímetros el tensor, la dimensión de la gata creada con el fin de presforzar puede tener una dimensión vertical menor, que a la postre signifique ahorro en peso y tamaño además de potencialmente disminuir el requerimiento de espacio de trabajo.

- Para el vertido de el mortero de protección es necesario considerar que el proceso de post-tensado se lo realiza inmediatamente y necesariamente cuando el *grout* esté fresco, una vez vertida la masilla es imposible sacarla de la celda, en consecuencia debe evitarse imprevistos al momento de colado y tensado.

Conclusiones acerca de la factibilidad económica:

- Bajo términos y condiciones de este ensayo, en el muro de bloque de concreto construido post-tensado resulta un 24% más costoso respecto al construido del modo tradicional; en resistencia ante carga lateral el post-tensado demostró tener entre siete y ocho veces mejor desempeño. A pesar de mejorar tanto en resistencia, el porcentaje de incremento en costo es demasiado grande para que se vuelva competitivo, sin embargo de lograrse reducirse el precio de los anclajes a precios ofertados ya para nuestro mercado, 83% más económicos, se torna plenamente viable e incluso más barata la alternativa propuesta.

- En la pared de ladrillo artesanal *panelón* el costo del muro de mampostería de ladrillo artesanal post-tensado resulta aproximadamente 14% más caro y se mejora su resistencia ante carga lateral entre seis y siete veces su desempeño. Igual que en el caso anterior de poderse utilizar anclajes abiertos económicos se vuelve la alternativa propuesta plenamente factible también en este caso.

- La probeta de mampostería estructural mostró tener un mejor desempeño que la post-tensada tanto en precio (un 40% más económico) como en resistencia ante carga lateral, tres veces superior. Esta superioridad se da fundamentalmente por la falencia en el anclaje inferior de los tensores embebidos. Bajo estas condiciones enfrentados los dos sistemas constructivos la mampostería estructural mostró ser más eficiente en los dos aspectos: técnicos y económicos. El aspecto positivo de la mampostería post-tensada frente al muro estructural fue el modo de falla por que el primero se rompió de un modo explosivo bruscamente en contraposición al post-tensado que mostró fractura lenta y paulatina sin colapso brusco.

BIBLIOGRAFÍA.

.HERNÁNDEZ Basilio Oscar y AGUILAR Heriberto: *Deformaciones Diferidas en Mampostería Post-tensada; Recomendaciones de diseño*; Series Instituto de Ingeniería UNAM, 1983.

.WIGHT D. Gavin, INGHAM Jason M., and WILTON Andrew R.: *Innovative seismic design of a post-tensioned concrete masonry house*; Universidad de Auckland, Nueva Zelanda. Publicado en The NRC Research Press Web, 2007.

.SINHA Braj P., Professor of Structural Engineering University of Edinburgh: *Development and Potencial of Structural Masonry*; Ponencia. Seminario sobre paredes de albañilería, Lourenco y Souza; Porto/Portugal, 2002.

.MAS GUINDAL Antonio J. y ADELL Joseph M., Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura: *Eladio Dieste y la Cerámica Estructural en Uruguay*. Madrid, 2005.

.GANZ H.R., Dr. sc. techn., Civil Engineer ETH: *Post-tensioned Masonry Structures*, VSL Internacional ltd., Berne Switzerland, 1990.

.WIGHT Gavin D., University of Auckland Department of Civil and Environmental Engineering: *Seismic Performance of a Post-tensioned Concrete Masonry Wall System, A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy*; Nueva Zelanda, Junio del 2010.

.SERNA P. Carlos, STUART C. Luis, *Análisis Económico de la mampostería post-tensada en seco versus actuales soluciones de vivienda de interés social en Colombia*, Tesis, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, 2010

.COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMORESISTENTES: *Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10, Bogotá*, Colombia, 2010.

.KOWALSKY J. Mervyn and WIGHT D. Gavin, *Application of Traditional Materials in Non-Traditional Ways for Improved Housing Construction*. North Carolina State University, Raleigh, NC.

.PÉREZ LEAL Eduwin Guillermo, *Alternativas para el diseño sísmico de edificios altos en mampostería*, Tesis, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, Marzo de 2011.

.GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras*, México DF, 2004.

. SHRIVE G. Nigel, MASIA J. Mark and LISSEL L. Shelley, *Strengthening and rehabilitation of masonry using fibre reinforced polymers*, University of Calgary, Department of Civil Engineering, Calgary, Alberta, Canadá

ANEXOS

PROYECTO: Costo de muros probetas

PRESUPUESTO						
Item	Código	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1		Muros Post-tensados				
1,01		Muro Post-tensado de Bloque de concreto				182,86
01.01.001	512004	Toron de presfuerzo de 3/8 por ml colocado	ml	6	2,62	15,72
01.01.002	516035	Mampostería bloque hormigónHormiazauy de 15 cm, mortero 1:3 para post-tensar	m2	5,2	17,78	92,46
01.01.003	512005	Tensado de cable de 3/8 incluye cuña fija y placa perforada 6 mm.	u.	2	33,08	66,16
01.01.004	514012	Mortero de cemento para relleno de mampostería estructural : arena = 1:3, producción en máquina	m3	0,07	121,74	8,52
1,02		Muro Post-tensado de ladrillo artesanal pancón				207,98
01.02.001	512004	Toron de presfuerzo de 3/8 por ml colocado	ml	6	2,62	15,72
01.02.002	516033	Mampostería de Ladrillo artesanal Visto de 27*14*7.5 para postensar	m2	4,93	25,33	124,88
01.02.003	512005	Tensado de cable de 3/8 incluye cuña fija y placa perforada 6 mm.	u.	2	33,08	66,16
01.02.004	514012	Mortero de cemento para relleno de mampostería estructural : arena = 1:3, producción en máquina	m3	0,01	121,74	1,22
1,03		Muro Post-tensado de ladrillo industrial				251,45
01.03.001	512004	Toron de presfuerzo de 3/8 por ml colocado	ml	6	2,62	15,72
01.03.002	516037	Mampostería de ladrillo industrial estructural de 15 cm, mortero 1:3	m2	4,93	33,16	163,48
01.03.003	512005	Tensado de cable de 3/8 incluye cuña fija y placa perforada 6 mm.	u.	2	33,08	66,16
01.03.004	514012	Mortero de cemento para relleno de mampostería estructural : arena = 1:3, producción en máquina	m3	0,05	121,74	6,09
2		Muros método tradicional				
2,01		Muro de bloque de concreto				147,25
02.01.001	512002	Acero de refuerzo fy=4,200 kg/cm², en varillas de 8 a 16 mm	kg	15,45	1,98	30,59
02.01.002	516036	Mampostería bloque hormigónHormiazauy de 15 cm, mortero 1:3 no post-tensar	m2	4,86	16,82	81,75
02.01.003	511043	Encofrado de columnas, sección inferior a 20, 4 caras, Hmax=2,44 m	m2	1,1	24,67	27,14
02.01.004	502041	Hormigón Simple en estructuras f'c = 240 kg/cm² general fundido	m3	0,06	129,48	7,77
2,02		Muro de ladrillo artesanal				181,51
02.02.001	512002	Acero de refuerzo fy=4,200 kg/cm², en varillas de 8 a 16 mm	kg	15,45	1,98	30,59
02.02.002	516033	Mampostería de Ladrillo artesanal Visto de 27*14*7.5 para postensar	m2	4,58	25,33	116,01
02.02.003	511043	Encofrado de columnas, sección inferior a 20, 4 caras, Hmax=2,44 m	m2	1,1	24,67	27,14
02.02.004	502041	Hormigón Simple en estructuras f'c = 240 kg/cm² general fundido	m3	0,06	129,48	7,77
2,03		Muro de ladrillo industrial				179,25
02.03.001	512002	Acero de refuerzo fy=4,200 kg/cm², en varillas de 8 a 16 mm	kg	4,89	1,98	9,68
02.03.002	516037	Mampostería de ladrillo industrial estructural de 15 cm, mortero 1:3	m2	4,93	33,16	163,48
02.03.003	514012	Mortero de cemento para relleno de mampostería estructural : arena = 1:3, producción en máquina	m3	0,05	121,74	6,09

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestria en Construcciones, Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 1

RUBRO: Toron de presfuerzo de 3/8 por ml colocado

UNIDAD: ml

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Cortadora de Hierro	1	0,74	0,74	0,25	0,185
SUBTOTAL M					0,185
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,05	4,23	0,2115	0,25	0,05288
Ayudante de Albañil	0,25	1,89	0,4725	0,25	0,11813
Albañil	0,25	2,67	0,6675	0,25	0,16688
Fierrero	1	2,89	2,89	0,25	0,7225
SUBTOTAL N					1,06039
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Toron de presfuerzo 3/8 pulgada	ml	1,05	1,3	1,365	
SUBTOTAL O					1,365
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
Transporte en Camión capacidad de 200 qq	Flete hasta 6 km	0,0004	30	0,012	
SUBTOTAL P					0,012
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					2,62239
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					2,62239
VALOR OFERTADO					2,62

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestria en Construcciones. Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 2

RUBRO: Mampostería bloque hormigónHormiazuy de 15 cm, mortero 1:3 para post-tensar

UNIDAD: m2

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Pariguelas	0,078	0,15	0,0117	1	0,0117
Máquina mezcladora de mortero	0,039	3,5	0,1365	1	0,1365
Modulo	1	0,025	0,025	1	0,025
Herramienta manual y menor de construcción	5,00 %MO	0,42548			0,31391
SUBTOTAL M					0,48711
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	0,078	1,68	0,13104	1	0,13104
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,1539	4,23	0,651	1	0,651
Ayudante de Albañil	0,789	1,89	1,49121	1	1,49121
Albañil	1,5	2,67	4,005	1	4,005
SUBTOTAL N					6,27825
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Agua en obra (Incluye instalaciones provisionales)	litro	6,552	0,05	0,3276	
Arena (P. Suelto=1,460 kg/m3 aprox.)	m3	0,026	20	0,52	
Cemento Portland Tipo 1	saco 50 kg	0,234	7,18	1,68012	
Bloque de concreto Hormiazuy de 40*20*15cm	u	8,25	0,58	4,785	
Bloque de concreto hormiazuy 40*20*15 perforado para postensar	u	5	0,62	3,1	
SUBTOTAL O					10,41272
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
Transporte en Camión capacidad de 200 qq	Flete hasta 6 km	0,02	30	0,6	
SUBTOTAL P					0,6
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					17,77808
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					17,77808
VALOR OFERTADO					17,78

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestria en Construcciones. Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 3

RUBRO: Tensado de cable de 3/8 incluye cuña fija y placa perforada 6 mm.

UNIDAD: u.

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Modulo	2	0,025	0,05	1	0,05
Gata de presfuerzo	0,1	30	3	1	3
SUBTOTAL M					3,05
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,25	4,23	1,0575	1	1,0575
Ayudante de Albañil	0,25	1,89	0,4725	1	0,4725
SUBTOTAL N					1,53
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Anclaje abierto para presfuerzo, 3 cuñas	u	1	2,2	2,2	
Placa de acero perforada 15*20 cm en 6 mm	u	1	6,5	6,5	
SUBTOTAL O					28,5
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
SUBTOTAL P					0
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					33,08
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					33,08
VALOR OFERTADO					33,08

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestria en Construcciones. Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 4

RUBRO: Mortero de cemento para relleno de mampostería estructural : arena = 1:3, producción en máquina **UNIDAD:** m3

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Herramienta manual y menor de construcción	5.00 %MO	0,42548			0,42548
Pariguelas	2	0,15	0,3	1,5	0,45
Máquina mezcladora de mortero	1	3,5	3,5	1,5	5,25
SUBTOTAL M					6,12548
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	2	1,68	3,36	1,5	5,04
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	1	4,23	4,23	0,15	0,6345
Ayudante de Albañil	1	1,89	1,89	1,5	2,835
SUBTOTAL N					8,5095
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
sikament plastificante	10 kg	0,5	24,5	12,25	
Agua en obra (Incluye instalaciones provisionales)	litro	252	0,05	12,6	
Arena (P. Suelto=1,460 kg/m3 aprox.)	m3	0,6	20	12	
Chispa pequeña seleccionada para parqueadero	m3	1	20	20	
Cemento Portland Tipo I	saco 50 kg	7	7,18	50,26	
SUBTOTAL O				107,11	
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
					0
SUBTOTAL P					0
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					121,74498
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					121,74498
VALOR OFERTADO					121,74

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestria en Construcciones. Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 5

RUBRO: Mampostería de Ladrillo artesanal Visto de 27*14*7.5 para postensar **UNIDAD:** m2

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Pariguelas	0,1925	0,15	0,02888	1	0,02888
Máquina mezcladora de mortero	0,09625	3,5	0,33688	1	0,33688
Herramienta manual y menor de construcción	5.00 %MO	0,49639			0,4161
SUBTOTAL M					0,78186
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	0,1925	1,68	0,3234	1	0,3234
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,30963	4,23	1,30973	1	1,30973
Ayudante de Albañil	0,99625	1,89	1,88291	1	1,88291
Albañil	1,8	2,67	4,806	1	4,806
SUBTOTAL N					8,32204
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Agua en obra (Incluye instalaciones provisionales)	litro	14,19	0,05	0,7095	
Arena (P. Suelto=1,460 kg/m3 aprox.)	m3	0,05335	20	1,067	
Cemento Portland Tipo I	saco 50 kg	0,6875	7,18	4,93625	
Ladrillo Artesanal Panelon	u	29,5	0,22	6,49	
Ladrillo artesanal panelon perforado	u	11	0,26	2,86	
SUBTOTAL O				16,06275	
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
Transporte en Camión capacidad de 200 qq	Flete hasta 6 km	0,0055	30	0,165	
SUBTOTAL P				0,165	
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					25,33165
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					25,33165
VALOR OFERTADO					25,33

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestría en Construcciones. Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 6

RUBRO: Mampostería de ladrillo industrial estructural de 15 cm, mortero 1:3

UNIDAD: m2

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Paríqueles	0,09	0,15	0,0135	1	0,0135
Máquina mezcladora de mortero	0,045	3,5	0,1575	1	0,1575
Modulo	1	0,025	0,025	1	0,025
Herramienta manual y menor de construcción	5,00 %MO	0,42548			0,41656
SUBTOTAL M					0,61256
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	0,09	1,68	0,1512	1	0,1512
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,2045	4,23	0,86504	1	0,86504
Ayudante de Albañil	1,045	1,89	1,97505	1	1,97505
Albañil	2	2,67	5,34	1	5,34
SUBTOTAL N					8,33129
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.		Costo
Agua en obra (Incluye instalaciones provisionales)	litro	7,56	0,05		0,378
Arena (P. Suelto=1,460 kg/m3 aprox.)	m3	0,03	20		0,6
Cemento Portland Tipo 1	saco 50 kg	0,27	7,18		1,9386
Acero en Varillas de 8 a 16 mm	kg	1	1,67		1,67
Ladrillo industrial Alfadomus mamposteria estructural	u	37,75	0,52		19,63
SUBTOTAL O					24,2166
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa		Costo
					0
SUBTOTAL P					0
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					33,16045
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					33,16045
VALOR OFERTADO					33,16

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestría en Construcciones. Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 7

RUBRO: Acero de refuerzo fy=4,200 kg/cm², en varillas de 8 a 16 mm

UNIDAD: kg

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Cortadora de Hierro	0,015	0,74	0,0111	1	0,0111
Herramienta manual y menor de construcción	5,00 %MO	0,01246			0,01246
SUBTOTAL M					0,02356
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,0017	4,23	0,00719	1	0,00719
Ayudante de fierro	0,102	1,89	0,19278	1	0,19278
Fierro	0,017	2,89	0,04913	1	0,04913
SUBTOTAL N					0,2491
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.		Costo
Alambre Amarre Negro #18 (20k)	KL	0,015	2,65		0,03975
Acero en Varillas de 8 a 16 mm	kg	1	1,67		1,67
SUBTOTAL O					1,70975
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa		Costo
					0
SUBTOTAL P					0
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					1,98241
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					1,98241
VALOR OFERTADO					1,98

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestría en Construcciones. Esteban Zalamea
PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 8

RUBRO: Mampostería bloque hormigón Hormiazuy de 15 cm, mortero 1:3 no post-tensar

UNIDAD: m2

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Pariguélas	0,078	0,15	0,0117	1	0,0117
Máquina mezcladora de mortero	0,039	3,5	0,1365	1	0,1365
Modulo	1	0,025	0,025	1	0,025
Herramienta manual y menor de construcción	5.00 %MO	0,42548			0,27776
SUBTOTAL M					0,45096
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	0,078	1,68	0,13104	1	0,13104
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,1539	4,23	0,651	1	0,651
Ayudante de Albañil	0,689	1,89	1,30221	1	1,30221
Albañil	1,3	2,67	3,471	1	3,471
SUBTOTAL N					5,5525
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Agua en obra (Incluye instalaciones provisionales)	litro	6,552	0,05	0,3276	
Arena (P. Suelto=1,460 kg/m3 aprox.)	m3	0,026	20	0,52	
Cemento Portland Tipo I	saco 50 kg	0,234	7,18	1,68012	
Bloque de concreto Hormiazuy de 40*20*15cm	u	13,25	0,58	7,685	
SUBTOTAL O					10,21272
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
Transporte en Camión capacidad de 200 qq	Flete hasta 6 km	0,02	30	0,6	
SUBTOTAL P					0,6
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					16,81893
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					16,81893
VALOR OFERTADO					16,82

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestría en Construcciones. Esteban Zalamea
PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 9

RUBRO: Encofrado de columnas, sección inferior a 20, 4 caras, Hmax=2.44 m

UNIDAD: m2

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Herramienta manual y menor de construcción	5.00 %MO	0,42413			0,42413
SUBTOTAL M					0,42413
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	0,5	4,23	2,115	1	2,115
Ayudante de encofrador	1,25	1,89	2,3625	1	2,3625
Encofrador	1,5	2,67	4,005	1	4,005
SUBTOTAL N					8,4825
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Clavo 2x12 25k	kg	0,3	2,1	0,63	
Alambre Amarre Negro #18 (20k)	KL	0,6	2,65	1,59	
Tira de Eucalipto 4x5 cm	uni 3.00 m	4	1,3	5,2	
Tabla de Encofrar	uni 3.00 m	3	2,78	8,34	
SUBTOTAL O					15,76
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
SUBTOTAL P					0
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					24,66663
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					24,66663
VALOR OFERTADO					24,67

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.

NOMBRE DEL OFERENTE: Maestria en Construcciones. Esteban Zalamea

PROYECTO: Costo de muros probetas

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Rubro 10

RUBRO: Hormigón Simple en estructuras f'c = 240 kg/cm² general fundido

UNIDAD: m³

DETALLE:

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Concretera de 1 saco	0,8	4,8	3,84	1	3,84
Pariguélas	0,8	0,15	0,12	1	0,12
Vibrador Weber a gasolina	0,8	1,9	1,52	1	1,52
Regla Vibratoria Weber de 3m	0,2	2,21	0,442	1	0,442
Vaca metálica	0,2	0,22	0,044	1	0,044
Herramienta manual y menor de construcción	5,00 %MO	0,7338			1,44913
SUBTOTAL M					7,41513
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad	Jornal/HR	Costo Hora	Rendimiento	Costo
Peón	5,7	1,68	9,576	1	9,576
Maestro de Estructura Mayor - SECAP	1,28	4,23	5,4144	1	5,4144
Ayudante de Albañil	2,6	1,89	4,914	1	4,914
Operador de equipo liviano	1	2,67	2,67	1	2,67
Albañil	2,4	2,67	6,408	1	6,408
SUBTOTAL N					28,9824
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Costo	
Plastmix 190 CC	Granel, 1 KG	1,8	2,9	5,22	
Agua en obra (Incluye instalaciones provisionales)	litro	165	0,05	8,25	
Arena (P. Suelto=1,460 kg/m ³ aprox.)	m ³	0,59	20	11,8	
Grava (P. Suelto=1,551 kg/m ³ aprox.)	m ³	0,79	20	15,8	
Cemento Portland Tipo I	saco 50 kg	6,85	7,18	49,183	
SUBTOTAL O					90,253
TRANSPORTE					
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo	
SUBTOTAL P					0
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					126,65053
INDIRECTOS Y UTILIDADES: 0.00000 %					0
OTROS INDIRECTOS: 0.00000 %					0
COSTO TOTAL DEL RUBRO					126,65053
VALOR OFERTADO					126,65

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA.