

Mampostería Postensada

Una alternativa constructiva para Ecuador y regiones sísmicas

Post-tensioned masonry. A constructive alternative to Ecuador and seismic regions

Por:
Esteban Zalamea León
Universidad de Cuenca

Recibido: 15 de Junio 2013
Aceptado: 20 de Agosto 2013

Resumen:

El presente trabajo aborda un problema central de la construcción en Cuenca, ciudad andina del sur del Ecuador, donde cotidianamente constatamos que, en su mayoría, no se cumple con lo dispuesto por las normativas que rigen en otros países con condiciones sísmicas similares, por lo que es visible que las edificaciones corren serios riesgos.

A partir de esta evidencia, nuestra investigación busca construir muros de mampostería postensada con materiales, instrumentos y técnicas disponibles en el medio, considerando que la tecnología constructiva propuesta y adaptada para mamposterías ya es una respuesta en otras sociedades, con los mismos riesgos potenciales.

Palabras clave: Arquitectura postensada, mampostería, edificación, Ecuador.

Abstract

This work addresses a central problem of construction in Cuenca, Andean city of the South of the Ecuador, where every day we see that mostly, failure to comply with the provisions of the regulations that govern other countries with similar seismic conditions, so it is visible that the buildings are at serious risk.

From this evidence, our research seeks to construct masonry walls post-tensioned with materials, tools and techniques available in the medium, considering that the proposed construction technology and adapted for masonry is already a response in other societies, with the same potential risks.

Keywords: Architecture post-tensioned, masonry, building, Ecuador.

1. Introducción

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 cambio¹.

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 optimizar 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 a compresión.

Para tal efecto, se considera 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 postensados 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) trabaja constantemente acorde a sus posibilidades naturales (compresión) a través de la aplicación de una tecnología constructiva.

En el marco teórico utilizado se incluyen referentes de zonas sísmicas. Se toman investigaciones y documentos en donde diferentes autores plantean soluciones con mampostería postensada desde distintas perspectivas; es destacable que en prácticamente todos estos estudios se establezca, de una u otra manera, la factibilidad y posibilidad de aplicarse masivamente.

Se buscará, entonces, investigar este modo constructivo en Ecuador con recursos locales, de manera viable y que signifique una mejora con respecto a lo que se está haciendo. Para esto se propone una

serie de experimentos prácticos para determinar su factibilidad utilizando nuestros materiales y técnicas.

1.1. Problemática

Existe un vacío reglamentario en cuanto a requisitos antisísmicos para el diseño y construcción de muros. El *Código Ecuatoriano de la Construcción* incluye un capítulo de “Normas sismoresistentes”, pero no tiene el carácter de ley, a diferencia de las normativas de otros países bajo el mismo riesgo. La mampostería es el método constructivo más común en Cuenca; de acuerdo a la Cámara de la Construcción, el 81% de las edificaciones presenta mampostería en su fachada; no obstante, la mampostería sin refuerzo es el sistema que peor desempeño presenta frente a un terremoto, después de la construcción en tierra.

En nuestro país se suscitó uno de los diez terremotos más fuertes registrados en la historia, sucedió 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 del *U.S. Geological Survey Earthquake Hazards Program* se encuentra registrado el sismo más fuerte a nivel mundial ocurrido el 12 de agosto de 2010, con una magnitud de 7,1 grados en la escala Richter, afortunadamente con epicentro a gran profundidad, de lo contrario probablemente se pudo haber desatado un desastre humano y económico.

No se han encontrado estudios o estadísticas que muestren el análisis de capacidad de la mampostería local, 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 inadecuado, 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 (*Gráfico 1*). Frente a la problemática constructiva descrita, el Ecuador está inmerso en una área activa tectónica conocida como “Cinturón de fuego”, en donde suceden y se esperan eventos telúricos importantes y constantes (*Gráfico 2*); en contraposición, desde el punto de vista del análisis estructural, el modo en que tradicionalmente se levantan paredes resulta en elementos con capacidad muy baja, frágiles, riesgosos y potencialmente letales para la vida por su masa, volumen y latente falla brusca.

1.2. Objetivos

Investigar de modo práctico la mampostería disponible y su capacidad para postensarse 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 cuál es la mejora —en cuanto a resistencia— que se puede lograr en nuestra

mampostería postensándola, 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 postensado en ensayos hechos en materiales de otros países. Si bien es cierto, por su alto grado de elaboración artesanal, existe una gran 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 dichos materiales son válidos también para reforzar divisiones ambientales no estructurales.

2. Marco teórico

En julio de 1983 se emite una publicación académica latinoamericana de mampostería postensada, un reporte de investigación de la UNAM de México cuyos autores son Oscar Hernández y Heriberto Aguilar¹. En base al comportamiento del postensado en el concreto, ellos buscan encontrar la deformación diferida de la mampostería sometida constantemente a compresión y a tensión continua en el caso de los cables. Para la investigación ellos construyen muretes de prueba de 90 cm de altura sometidos a postensado. 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 porque una de las principales preocupaciones fue la posibilidad de pérdidas diferidas significantes lo cual implicaría la no aplicabilidad del sistema.
- La pérdida de presfuerzo resultó de casi la mitad en el ladrillo con respecto al bloque de concreto, por lo tanto el 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 del menor espesor posible de junta y de buena calidad.

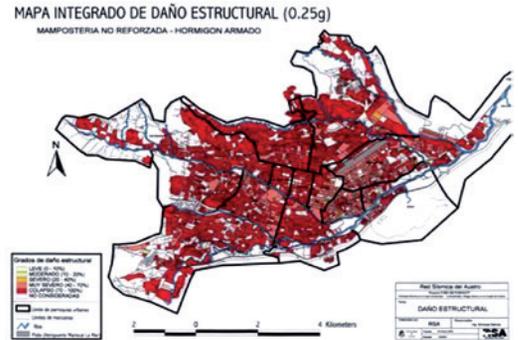


Gráfico 1: En rojo el daño esperado en estructuras de concreto y mampostería en sismo con aceleración estimada de 0,25 g, magnitud considerada como posible en la zona.

Fuente: Red sísmica del austro, Universidad de Cuenca.

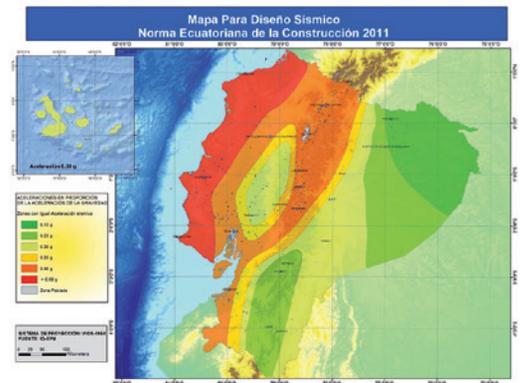


Gráfico 2: Zonificación acorde a riesgo sísmico del zonas del Ecuador y ubicación de Cuenca. Código Ecuatoriano de la Construcción, 2010

Mampostería postensada

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

Otra investigación es la realizada por Gavin D. Wight, Jason M. Ingham y Andrew R. Wilton en Nueva Zelanda, quienes desarrollaron y construyeron una casa con exigencia de resistencia antisísmica con bloque de concreto postensado. Ejecutaron 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, éstas son postensadas 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 tenemos que:

- La construcción se logró con materiales comunes del medio y es la primera experiencia de mampostería “sin junta” en Nueva Zelanda.
- Se consigue con el postensado 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, éstos deben tener dimensiones mínimas. Lo ideal en muros estructurales postensados es la no presencia de aberturas en ellos, lo cual sin duda representa una limitante arquitectónica importante.

La firma de presforzados suiza VSL emitió un documento¹ que versa específicamente sobre el tema de la mampostería postensada, si bien se trata de un documento de propaganda llamando a la aplicación de sus productos, realiza una serie de 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 la 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 postensado con respecto a unidades sólidas.
- Las propiedades inherentes a la mampostería y al sistema estático de la mayoría de muros favorecen al eje vertical como la dirección recomendada para colocar y ubicar tensores 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

postensionado e introducir efectos de segundo orden. Esto se puede controlar limitando el diámetro de los ductos o introduciendo *grout* en ellos.

- Para niveles de carga axial resultantes 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 postensado, y puede aumentarse el espaciamiento entre tensores (aplica a construcciones de varios pisos).
- Las cargas de cortante actúan típicamente en cualquier dirección acorde al viento o sismo, por lo tanto, los tendones serán requeridos simétricamente con respecto al eje central de la pared.
- La utilización de refuerzos horizontales es recomendado, ellos colaboran para evitar retracciones y resquebrajamiento en juntas.

Gavin D. Wight, quien también fue autor de la vivienda en mampostería postensada en bloque sin junta en Nueva Zelanda previamente mencionada, elabora posteriormente su tesis doctoral investigando la mampostería de concreto postensada y su desempeño sísmico².

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 algunas 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.

Por otra parte, Wight refuta los modelos matemáticos existentes para el cálculo de la intensidad del postensado, sostiene que las ecuaciones de códigos internacionales de mampostería muestran ser inapropiadas, y presenta nuevas expresiones basadas en su experimentación y el modelado con elementos finitos.

En el documento de reporte de la tesis se consideran referentes para esta investigación los siguientes capítulos:

En el *Capítulo 2*, Wight realiza un recorrido histórico por distintas experiencias a nivel mundial en Gran Bretaña, Nueva Zelanda, Estados Unidos e Irlanda, estudia silos de gran capacidad construidos por *Dublin City Milling Company*, un puente carroable en Carolina del Norte; un complejo de apartamentos en Christchurch, Nueva Zelanda, en 1970; un fuerte de armas en Warrington, Inglaterra, en 1980; en los años noventa, en Springfield, Estados Unidos, la empresa suiza VSL construye en 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, Estados Unidos, y reparaciones diversas. A continuación hace una descripción de las marcas de postensado y sus propiedades: *Proto II Wall systems*, *Integra Wall System*, *Dur-O-Wal Sure-Stress* y *VSL Wall System*.

En el *Capítulo 3*, Wight analiza las pérdidas que experimenta el postensado por retracción y contracción y 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).

En el *Capítulo 4* se expone lo que denomina *Ensayo Cíclico en Muro*. Se trata de someter al muro a carga lateral en dirección paralela a su plano. Es factible su implementación con recursos ecuatorianos, por lo que 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.

*De la Norma Sismorresistente Colombiana*⁴ 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 y que es el modo de determinar los datos de carga admisible en las distintas mamposterías en esta investigación:

- Realizarse tres 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 tres 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.

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

Ellos aseguran que la mampostería postensada 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.

Este trabajo concluye manifestando 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, por costo y logística (capacidad de fabricación a pie de obra fundamental para obtener un mayor ahorro), la investigación recomienda utilizar bloque de concreto, material que se sugiere se elabore en formaleta metálica por su gran durabilidad y porque se obtienen unidades con geometría muy precisa con un buen acoplamiento de unos con otros. Por la presencia de tensores y el riesgo que implica el que se los corte, se estipula la necesidad de elaborar un manual de uso de la vivienda; los propietarios deben estar conscientes de cómo 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 postensada bajo las condiciones supuestas es aproximadamente un 11% más costosa que la mampostería estructural y un 3% más económica frente al sistema porticado 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.

3. Diseño de sistema constructivo para postensar muros con los recursos disponibles

Los métodos y sistemas de precompresión empleados en Ecuador son aplicados únicamente a elementos de hormigón presforzado, no se encontraron 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 (*Gráfico 3*).

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.

3.1 Adaptación de gatas hidráulicas para postensar muros

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

En el mercado cotidiano son comunes las gatas hidráulicas 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 discurra el tensor a través de ella y que luego empuje un anclaje de tensado que tire del alambre o torón. La herramienta está pensada para empujar un anclaje temporal que abraza y sujeta el cable en tanto se ejerce el jalado necesario para ubicar un anclaje definitivo (*definitivo* porque éste 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 (*Gráficos 4 y 5*). El esfuerzo aplicado se calcula a partir de la deformación de los tendones. Pevio a la elaboración de esta herramienta se pretendió adaptar un manómetro a las gatas, lo cual no tuvo éxito porque falló al momento que se ejercían altas presiones; lo ideal sería construir la herramienta con gatas que tengan adaptado un medidor de presión de fábrica, las cuales existen en el mercado español y mexicano.

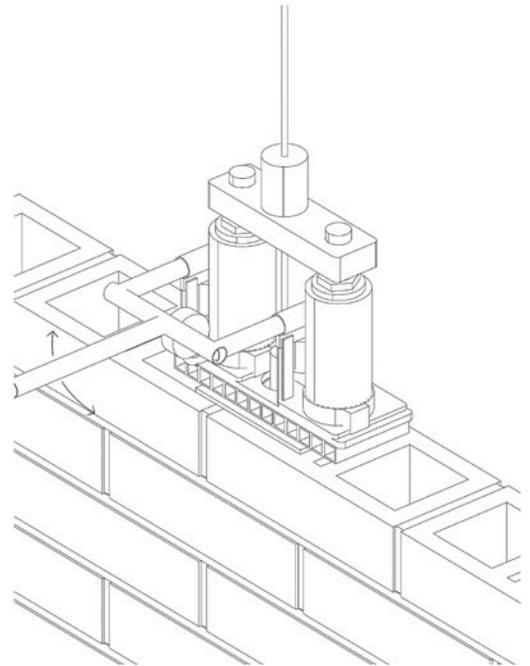


Gráfico 3: Gata hidráulica automotriz adaptada como propuesta para aplicar presfuerzo a muros de mampostería. Axonometría.

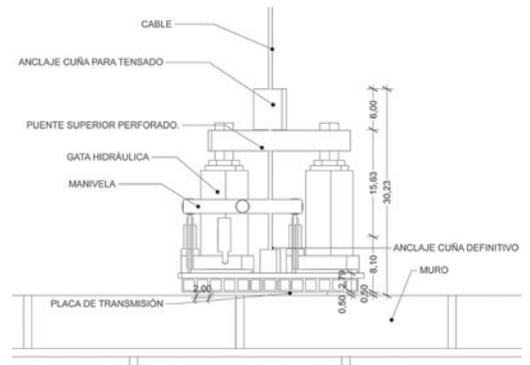


Gráfico 4: Gata hidráulica automotriz adaptada



Gráfico 5: Resultado de adaptar la gata automotriz para presforzar.

El costo de la herramienta en componentes es bajo, tanto la gata como los elementos de acero acoplado no representan un gasto oneroso; en Ecuador, una gata de 4 toneladas tiene un valor de 12 USD. Lo complejo y costoso es 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 sí; a la final el dispositivo tuvo un valor aproximado de 190 USD. Sin duda, su producción industrial en serie puede abaratar este costo.

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

3.2 Diseño del método para aplicación de presfuerzo

Con la gata de postensado construida se procede al diseño del método constructivo y tensado de los cables internos en los muros. Los pasos necesarios para implementar el presfuerzo con la nueva herramienta son idénticos para cualquier tipo de mampostería, el proceso que se propone es el siguiente:

- 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 de modo similar al que comúnmente se utiliza en varilla de refuerzo (*Gráfico 6*).
- Construcción de las 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 (*Gráfico 7*).
- Construcción del muro: Se levanta el resto del muro hasta la altura determinada por el diseño, dejando libres y sueltos los cables, y tomando la precaución de retirar residuos internos de masilla que puedan quedar en las celdas. Los residuos en estos espacios, a la larga, pueden impedir que el mortero de protección fluya adecuadamente alrededor de todo el tensor. Una vez concluido el muro es preciso esperar el fraguado completo de las juntas, previo a realizar cualquier trabajo de tensado.

Para muros altos de doble altura será necesaria 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 (*Gráfico 8*).

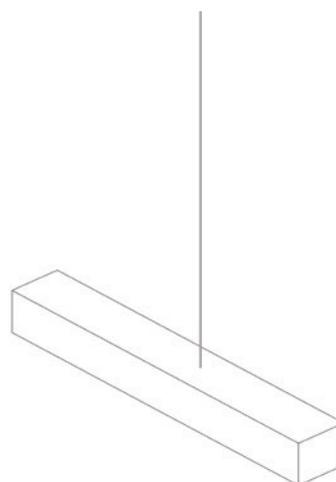


Gráfico 6:Fundición de viga base y anclaje de tensor.

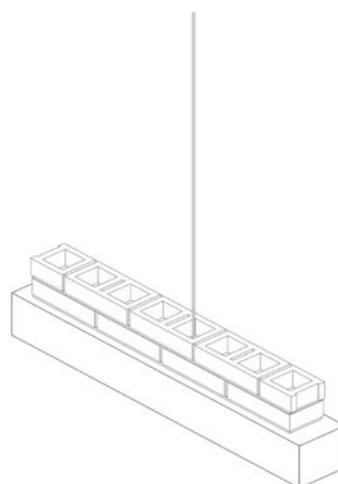


Gráfico 7:Construcción de primeras hiladas.

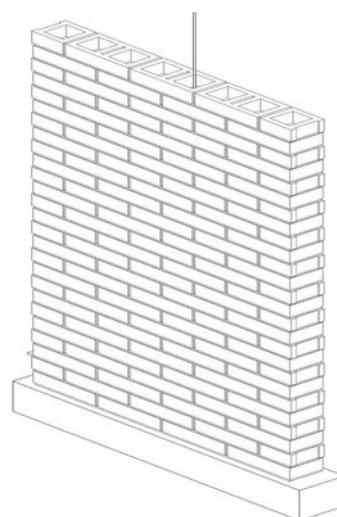


Gráfico 8:Construcción total del muro.

- d) Mortero de protección o *grout*: Inmediatamente antes de realizar el trabajo de tensado se vierte el mortero de protección 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 (*Gráfico 9*).
- e) Placa permanente de transmisión: 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 presionará la mampostería, postensándola. Este transmisor puede ser una solera de remate, la misma que logra una mejor transmisión uniformemente distribuida (*Gráfico 10*).
- 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, éste no tendrá sus cuñas todavía, estará suelto; se procede entonces a ubicar el gato en posición para el tensionamiento, pasando el tensor por el orificio del *punte superior perforado* (ver *Figura 4*) de empuje de la herramienta (*Gráfico 11*).
- g) Tensado: Una vez ubicado el gato se coloca un anclaje removible apoyado sobre el *punte superior perforado* de la herramienta embonando a la vez el cable, sujetándolo con las cuñas respectivas para estirarlo al accionar las gatas. Ya sujetado el tensor, se acciona la herramienta y se tensa el cable controlando el esfuerzo necesario a través de la medición del 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 (*Gráfico 12*).
- 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 del cable con mortero, concreto o algún tipo de protección para garantizar el no deterioro del dispositivo por exposición al medio ambiente (*Figura 13*).

4. Experimentación

4.1 Selección de mampuestos:

Los materiales requeridos para la construcción de mampostería postensada difieren alrededor del mundo de acuerdo a 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 y las 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 de acuerdo a los materiales que cada uno dispone, sucede lo mismo con los métodos de postensado. 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 como ladrillo cerámico industrial 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.

El bloque de mejor desempeño resultó el de Hormiazua, 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. El ladrillo de Susudel tiene una capacidad a compresión de 106,34 kg/cm², supera en resistencia con algo más del 10% al de Oña y con más del 40% al de Sayausí en cuanto a capacidad ante compresión, por lo tanto es el seleccionado. En toda la investigación de campo se detecta un tipo de mampuesto de fabricación industrial que presenta características geométricas para ser empleado en mampostería armada con perforación vertical; esta prueba demuestra que la resistencia de este material en su área bruta es la más alta de todos los materiales probados, con una capacidad admisible de 130,44 Kg/cm².

4.2 Diseño, construcción y ensayo 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 postensadas.

4.2.1 Diseño y construcción de muros reforzados 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.

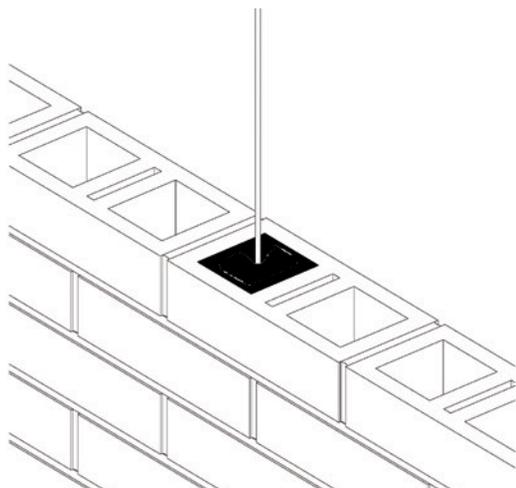


Gráfico 9: Vertido de grout en perforaciones con tendones.

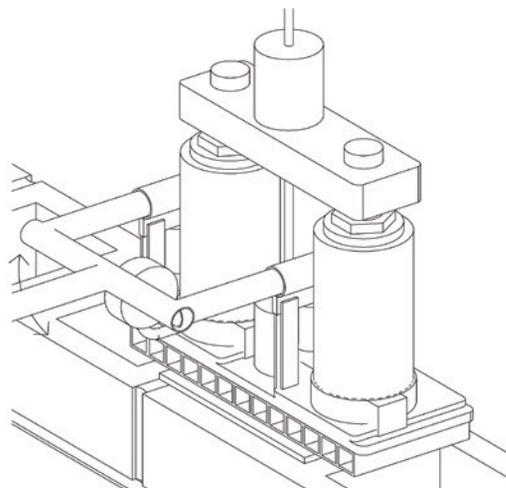


Gráfico 12: Proceso de tensado.

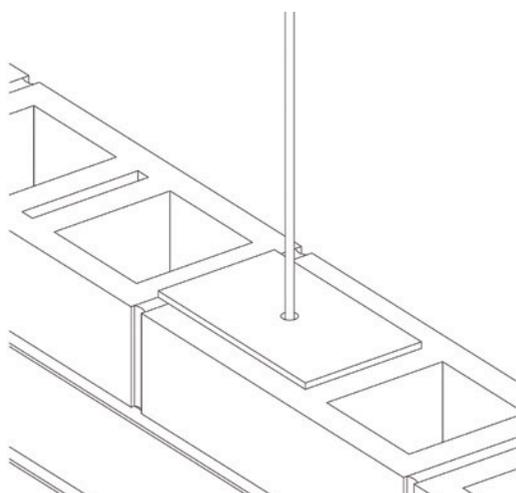


Gráfico 10: Colocado de placa de transmisión.

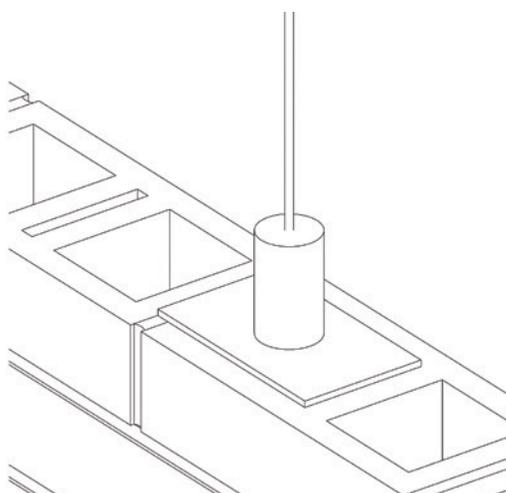


Gráfico 13: Terminado tensado.

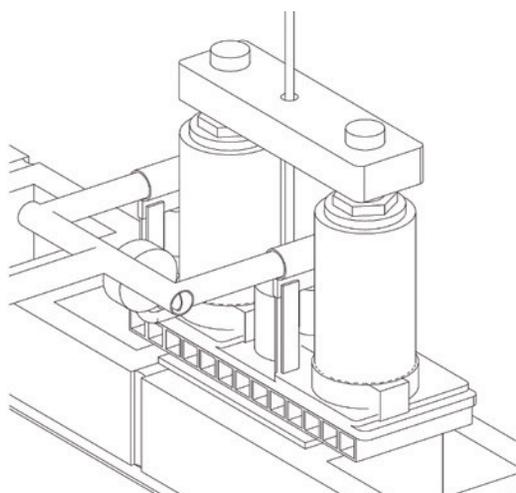


Gráfico 11: Ubicación de anclaje perenne y gato.

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%

Cuadro 1: Comparación de resistencia de muros probetas ante carga lateral construidos del modo tradicional y mampostería estructural.

Como costumbre constructiva se observa 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 éstos elementos de refuerzo colaborantes mas no totalmente portantes por su limitada sección —ciertamente escasa para soportar por sí sola la edificación—, este hecho provoca que la mampostería adquiera un papel evidentemente portante. Esta tipología se ha venido practicando sobre todo 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: a 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, lo que permitió 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.

4.2.2 Análisis de falla y determinación de carga de rotura de muros sin presfuerzo

El cuadro 1 presenta una comparación porcentual de resistencias tomando como parámetro base de porcentaje la resistencia más baja tanto de falla inicial como de falla última. Es evidente la superioridad de la mampostería reforzada acorde a la normativa de mampostería estructural, 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 a medida que aumenta el empuje de ensayo (*Gráficos 14 y 15*).

En el caso de la probeta elaborada con ladrillo industrial como mampostería 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 explosivas con fractura en varias partes de la pared, se aprecia falla tanto en unidades de mampostería como en las juntas de mortero (*Gráfico 16*).

4.2.3 Análisis de resistencia de muros postensados ante carga lateral

4.2.3.1 Muro de mampostería de bloque de concreto postensado

El bloque de concreto, que por su resistencia fue seleccionado para construir la probeta, no tiene las características geométricas adecuadas para ser utilizado en muros armados o postensados, sus cavidades no atraviesan verticalmente por completo la unidad, por esto y por lo dificultoso de conseguir desde la fábrica la elaboración de pocas unidades perforadas por carencia de moldes, se hizo necesario diseñar los muros considerando adaptar geométricamente algunas piezas. Así, en la etapa de di-

seño 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 se toma como referente el *ensayo cíclico de muro*¹ empleado por G. Wight y la normativa colombiana, estos referentes separan entre sí los refuerzos 1,2 m. Otro aspecto considerado es el planteado por H. R. Ganz, quien explica la importancia de colocar los cables “simétricamente en la pared con respecto al eje vertical y a su margen porque así se obtiene una disipación equilibrada de tensión”². 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 presforzado debe ser lo mínimo posible por razones expuestas por Hernández y Aguilar en el acápite 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 ϕ 6 m cada 15 cm, refuerzo ubicado inmediatamente bajo el muro.

En la cimentación se dejan embebidos dos torones de ϕ 3/8 de pulgada (aproximadamente 9 mm) anclados en el extremo pasivo a través de un gancho en “L”, similar al que comúnmente se aplica a la varilla de refuerzo (Gráfico 15).

4.2.3.2 Muro de mampostería de ladrillo de procedencia artesanal “panelón” postensado.

Al no contar con unidades perforadas y geometría necesaria se procede a taladrar unidades comunes (Figura 17), 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.

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 en unidades sin perforar, los dos válidos fueron superiores a los no perforados. Por la alta resistencia mostrada en las unidades perforadas se deduce que no existe alteración o disminución en la capacidad a compresión al taladrar unidades de mampostería provocando huecos de la dimensión requerida y con el sistema de perforación utilizado, se decide entonces usar ladrillos perforados en sitio para la experimentación.

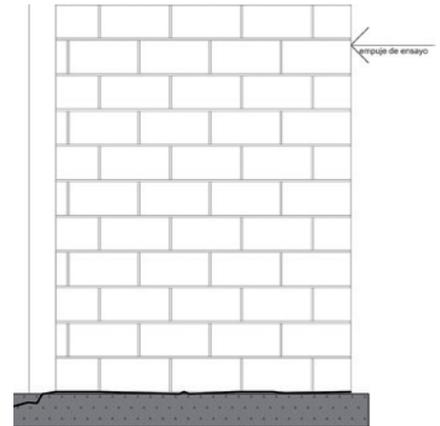


Gráfico 14: Ensayo ante carga lateral muro de bloque de concreto reforzado con columna de hormigón armado. Gráfico de falla.

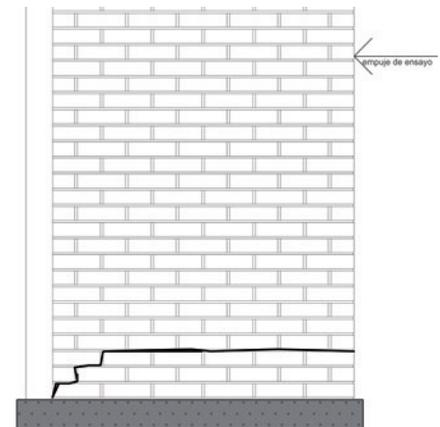


Gráfico 15: Ensayo ante carga lateral muro de ladrillo panelón reforzado con columna de hormigón armado. Gráfico de falla.

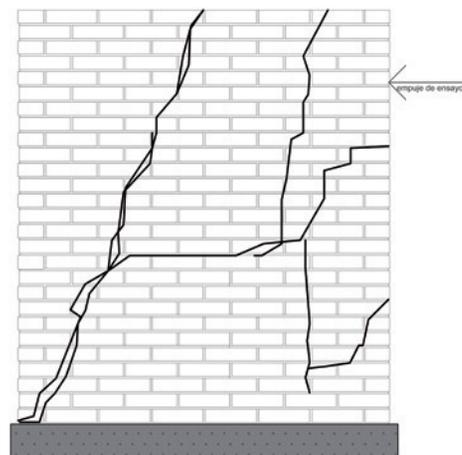


Gráfico 16: Ensayo ante carga lateral muro de ladrillo industrial construido como mampostería reforzada. Gráfico de falla.

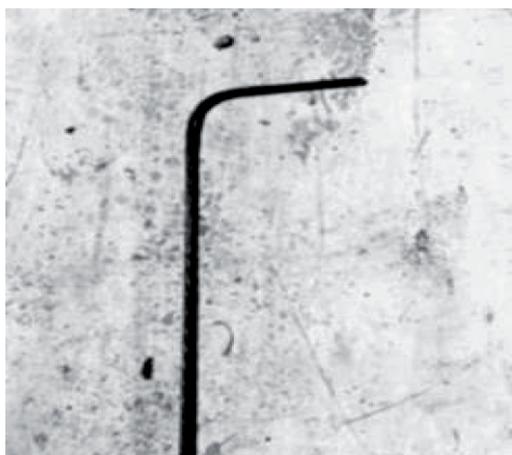


Gráfico 16: Gancho para anclaje embebido en cemento de torón de 3/8.

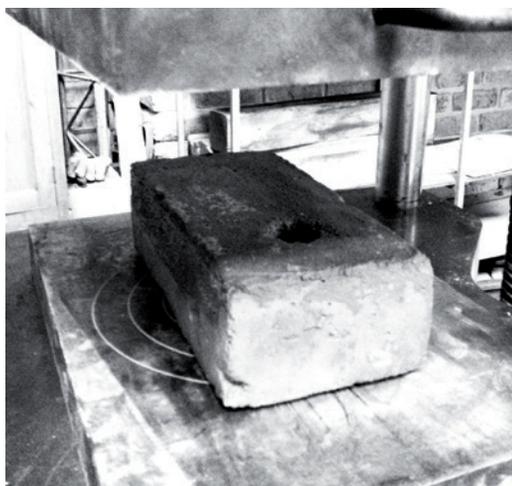


Gráfico 17: Ladrillo artesanal “panelón” perforados en ensayo a compresión.



Gráfico 18: Muro de ladrillo “panelón” artesanal para presforzarse en proceso de construcción.

Con la disponibilidad de unidades perforadas en sitio es factible el diseño y elaboración de los muros de ladrillo artesanal para postensarse.

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*. Por la variación de tamaño de las unidades de mampostería respecto al *muro de bloque de concreto para postensar*, el espaciamiento entre tensores difiere ligeramente respecto a la probeta mencionada, quedando una separación entre ellos de 114 cm próximo a los 120 cm recomendados, 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 ϕ 12 mm y estribos de ϕ 6 mm cada 15 cm.

En la cimentación se dejan embebidos dos torones de 3/8 de pulgada (aproximadamente ϕ 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.

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 hileras 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.

4.2.3.3 Muro de mampostería de ladrillo de procedencia industrial postensado

Se propone el empleo de ladrillo industrial reforzándolo según criterios de elaboración de mampostería estructural a partir de parámetros planteados en la *Normativa colombiana de la construcción sismorresistente*, concretamente los que se refieren 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 sismorresistente 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 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 ϕ de 12 mm sunchada por estribos de ϕ 6 mm c/ 15 cm inmediatamente debajo del muro.

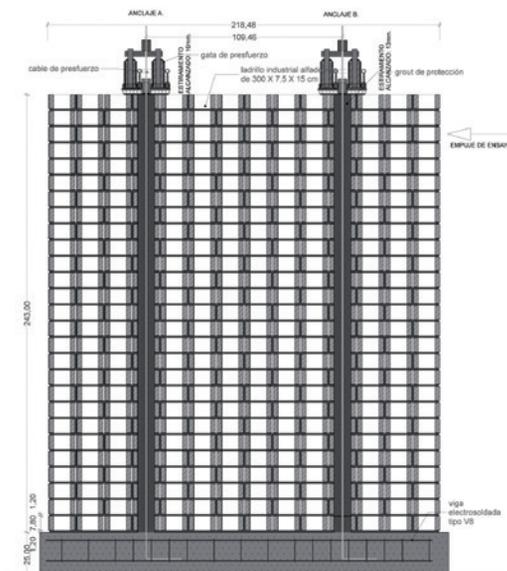


Gráfico 19: Plano de construcción de muro probeta de ladrillo industrializado post-tensado.

Gráfico 20: Muro de ladrillo industrial para presforzarse en construcción.

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 (cm ²)	Máxima carga admisible (25% Carga de diseño en kg/cm ²)	Carga máxima que soporta cada probeta (kg.)	Carga que soporta cada probeta sin considerar presfuerzo (esta 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

Cuadro 2: 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.

Desde la mencionada base surgen los tensores ubicados en el centro de las celdas escogidas acorde a diseño.

Para el diseño del muro se toman 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 sí, centrados con respecto al eje vertical central del muro, emplazados en la cuarta celda a partir de cada uno de los extremos. La sección de la celda es de 9,4 x 9,4 cm en donde se ubica el cable en el centro y 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 está formada por siete piezas, el largo total del muro es aproximadamente 2,18 m.

4.3 Carga de postensión en muros probetas

Para determinar el presfuerzo con el que se postensionarán 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, el esfuerzo que puede resistir una pared es el 25% su capacidad de diseño, considerando peso propio, cargas que soporta y presfuerzo $f'm$. De acuerdo 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:
- En el Cuadro 2 se detecta que la carga máxima potencialmente aplicable a cada uno de los tensores acorde a lo recomendado por Ganz está entre las 15 y 20 toneladas, esfuerzos considerables que son imposibles de aplicar con la gata de tensado y peligroso incluso con las gatas disponibles en la planta industrial por la dificultad de colocación de dicha maquinaria.
- Acorde al diámetro de los cables de presfuerzo 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 consideramos el comportamiento de medio mampuesto frente al anclaje de transmisión de presfuerzo acorde a su capacidad ante compresión, área tributaria que debe soportar el presfuerzo en hilada superior. Se enuncia que dentro de todos los tipos de mampostería ensayados y que se utilizarán en los muros probetas postensados, es evidente que se tiene que considerar el espécimen que peor desempeño individual mostró por seguridad, concretamente un espécimen de bloque de concreto con una resistencia de 44,30 kg/cm², material que en promedio del conjunto de tres ensayos es 74,37 kg/cm² y ningún otro espécimen de este material presentó una resistencia inferior a los 80 kg/cm². Se adopta por seguridad la resistencia de este ensayo inferior con 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 del anclaje de presfuerzo, el área portante considerada entonces es de 149,15 cm², acorde a cálculo previo; en consecuencia se tiene 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 esta última, la que expresa que la limitante y máximo presfuerzo aplicable en los muros es 6607 kg.f. Por último, se decide penalizar a esta carga 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 postensado, quedando definida la carga de presfuerzo en 5000 kg por tensor.

4.4 Ensayo, comparación de resistencias y determinación de factibilidad

4.4.1 Ensayo, comparación de desempeño y costo de mampostería de bloque de concreto tradicionalmente reforzado frente al postensado

Al elaborar el análisis de precios unitarios se advierte que el costo del muro de bloque de concreto de Hormiazuay reforzado con una columna de hormigón armado tiene un costo estimado de 147,25 USD (aproximadamente 34,20 USD/m²) versus el muro de la misma dimensión postensado con un costo aproximado de 182,86 USD (42,47 USD/m²); así, la diferencia económica entre las dos es de 35,61 USD. El resultado es desalentador, ya que 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, utilizados en la experimentación por ser los únicos disponibles. Si se considera que ya se ofertan anclajes de procedencia china cuyo costo se estima en 3 o 4 USD¹, el costo de este mismo muro podría disminuir en 40 USD, con lo cual estaría en condiciones competitivas e incluso sería potencialmente más económico, de constatarse una adecuada condición técnica de estos dispositivos asiáticos.

En el ensayo ante carga lateral de los dos muros de bloque de concreto, tanto el tradicionalmente construido como el postensado presentan 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 postensado, como se evidencia en el cuadro 3.

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 interfaz entre el muro y la placa; luego, al aumentar el empuje no se contempla una rotura brusca de la pared, más bien ésta gira lentamente con respecto a su base en la columna de concreto conforme las varillas de refuerzo sirven de pivot y el concreto de la base en esta zona se rompe completamente sin que la gata de jalado marque algo más de los 907 Kg. Al volver al muro a su sitio, éste regresa completamente separado de la base, tanto la mampostería como la columna, para terminar de derribarlo se lo jala con cuerdas desplomándose fácilmente con poco esfuerzo.

A comparación del muro anterior, el jalado para provocar la primera fisura en la pared postensionada fue de cinco toneladas y media, una carga ocho veces superior respecto al tradicionalmen-

Muro	Esfuerzo para falla inicial (Kg.)	Diferencia en % (Falla inicial) enfrentadas amdas tecnologías	Esfuerzo máximo para colapso (Kg.)	Diferencia en % (Colapso) enfrentadas amdas tecnologías
Boque de concreto tradicionalmente construido	680	12,29%	907	13,65%
Boque de concreto postensado	5534	813,82%	6645	732,64%

Cuadro 3: 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 amdas tecnologías	Esfuerzo máximo para colapso (Kg.)	Diferencia en % (Colapso) enfrentadas amdas tecnologías
Ladrillo artesanalmente construido	726	16,01%	862	13,11%
Ladrillo artesanalmente postensado	4536	624,79%	6577	762,99%

Cuadro 4: Comparación de resistencia ante carga lateral de muro probeta de bloque post-tensado frente a tradicionalmente construido.

te construido. A partir de esto la pared fue girando de modo similar separándose la primera hilada de bloque de la placa base; la falla se genera no en el muro sino en el anclaje inferior pasivo del torón, 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 sí 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, éste sigue manteniéndose en una sola pieza, para romperlo por completo fue necesario golpearlo con martillo pesado.

4.4.2 Ensayo, comparación de desempeño y costo de mampostería de ladrillo artesanal "panelón" tradicionalmente reforzado frente al postensado

Comparando el costo de los especímenes construidos, se estima que el valor económico del muro de ladrillo "panelón" artesanal de Susudel reforzado con una columna de hormigón armado está en el orden de los 181,51 USD (alrededor de 42,16 USD/m²) versus el muro de la misma dimensión postensado con un precio aproximado

de 207,98 (48,30 USD/m²); así, la diferencia es de 26,47 USD, porcentualmente se advierte que el costo se ve encarecido en un 14% con la utilización de la tecnología propuesta.

No obstante, esta estimación está realizada en base al empleo de anclajes norteamericanos considerados normalmente para ser reutilizados (por su alta calidad y resistencia) en la fabricación de pretensados, éstos tienen un precio referencial en el mercado ecuatoriano de 24 USD por unidad. Se emplean dichos anclajes en esta experimentación por ser la única opción disponible. Si se contempla que ya se ofertan anclajes de procedencia china en aproximadamente 3 o 4 USD¹, 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, éstos pueden ser de inferior calidad, no se pudo obtener una muestra de la alternativa de anclaje chino, por lo que no se puede asegurar su factibilidad de uso. Con esta variación posible de costos existiría una diferencia de 15 USD, siendo entonces más económica la pared postensada, tornándose plenamente competitiva.

El cuadro 4 contiene elementos comparativos de desempeño y resistencia al aplicar carga lateral en los muros probetas de ladrillo artesanal postensado y el construido y reforzado del modo tradicional.

En el ensayo de ladrillo "panelón" reforzado del modo tradicional se percibe una falla prematura cuando apenas se aplican 1500 libras fuerza que provoca una grieta a lo largo de una de las juntas de mortero horizontal en las hiladas inferiores, de ahí en más, el medidor de esfuerzo de la gata no llega a superar las 2000 libras, se levanta la pa-

Muro	Esfuerzo para falla inicial (Kg.)	Diferencia en % (Falla inicial) enfrentadas amdas tecnologías	Esfuerzo máximo para colapso (Kg.)	Diferencia en % (Colapso) enfrentadas amdas tecnologías
Mampostería estructural con ladrillo insdustrial	6124	221,32%	6124	192,82%
Mampostería postensada con ladrillo insdustrial	2767	45,18%	3176	51,86%

Cuadro 5: Comparación de resistencia ante carga lateral de muro de mampostería estructural respecto a mampostería post-tensada

red 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 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 precompresión, el comportamiento del muro postensado 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 también en tramos de unidades de mampostería, la rotura no se da a todo lo largo de la pared, sino solamente en la mitad en donde se aplica la carga de prueba; luego, al seguir aumentando la carga de ensayo, el elemento logra resistir siete veces más de esfuerzo en comparación al tradicionalmente construido. Al momento que el muro postensado empieza a girar por falla de la *longitud de desarrollo* o su anclaje inferior, éste 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. 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 14 500 libras.

4.4.3 Ensayo, comparación de desempeño y costo de mampostería de ladrillo industrial reforzada con criterio estructural acorde a NSR-10 frente al postensado.

Comparando el costo de los especímenes construidos, se calcula que el precio del muro de ladrillo industrial Alfadomus reforzado con varilla de acero a manera de mampostería estructural tiene un costo estimado de 179,25 USD (aproximadamente 33,76 USD/m²); el muro de la misma dimensión postensado tiene un costo aproximado de 251,45 USD (47,36 USD/m²), la diferencia es de 72,2 USD, porcentualmente vemos que el costo se ve encareci-

do en un 40% con la utilización de la tecnología propuesta en los especímenes construidos.

Este presupuesto está realizado considerando que se emplean anclajes americanos que tienen un precio referencial en el mercado ecuatoriano de 24 USD, los mismos que fueron utilizados en esta experimentación. Si se toma 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 postensado es de todas maneras un 18% más costoso, siendo evidentemente no competitivo por precio.

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 cuadro 5.

La pared de mampostería postensada 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, de manera especial el ubicado en el costado en el que se aplica la carga de prueba, torón evidentemente sometido a mayor trabajo. La variación de comportamiento radica 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 postensado se abre paulatinamente luego de que se agrieta en una de las juntas de mortero horizontales en las hiladas inferiores. Esta fisura, a diferencia de la probeta de ladrillo “panelón” postensado, dividió la pared a todo lo largo, quedando separada en dos partes; sin embargo, los tensores siguieron trabajando e integrando el muro hasta que definitivamente cedió el



Gráfico 21: Falla ante carga lateral de muro de mampostería estructural con ladrillo industrial



Gráfico 22: Falla ante carga lateral de muro de mampostería post-tensada con ladrillo industrial.

segundo anclaje inferior. Una vez que la pared se separa en dos partes, el cuerpo superior sigue integrado sólidamente.

Luego de ensayar los tres muros postensados se advierte 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 sujetado y embebido el tensor, éste 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” postensado nunca se divide por completo y uno de los tensores se mantuvo trabajando siempre.

5. Conclusiones

Conclusiones de acuerdo a disponibilidad de recursos:

- El hecho de postensar muros en Ecuador 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 postensar muros, son adecuados para precomprimir elementos de hormigón, por lo tanto no son adecuados por dimensiones, incomodidad de uso además del peligro que representa para los operarios. Por esta razón fue imperativa la creación de una herramienta acorde a las necesidades y requerimientos de presforzar paredes.

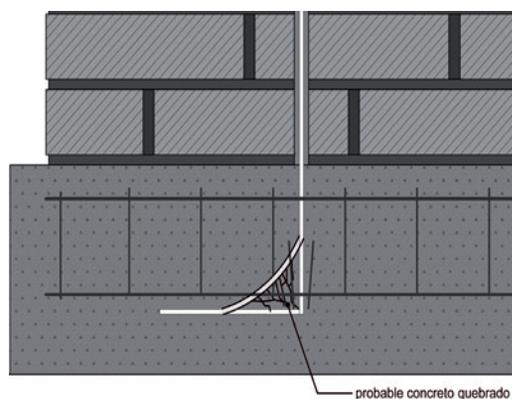


Gráfico 23: Probable falla de anclaje pasivo por compresión del concreto.

- Se diseñó y construyó la herramienta para postensar paredes en un taller local. Si bien se pudo construir el dispositivo postensador, 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 fábrica¹, 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 para postensar se construyó a partir de dos gatas, ya que el efecto torsionante 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, la imposibilidad de ubicar el orificio de jalado centrado con respecto a los dos cilindros accionados por empuje hidráulico produce

Mampostería postensada

- desequilibrio por diferencia de momento*, por esto una de las gatas tiene que absorber más presión que la otra, esto se da por la geometría de las gatas que idealmente se necesitaría que sean construidas reflejadas simétricamente, pero al no cumplir esta condición no quedan equidistantes respecto al eje donde discurre el tensor. El desequilibrio ocasionado por esta asimetría hubo que solucionarlo accionando siempre una gata más que la otra.
- En el país no existe variedad de mampuestos que tengan las características y aptitudes necesarias para la realización de muros postensados, de hecho tampoco para mampostería reforzada. Se encuentra un 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 son los utilizados; para su empleo se requiere necesariamente su adaptación geométrica.
 - La mampostería elaborada con unidades de tipo industrial Alfadomus demostró ser la más apta para ser postensada por resistencia y geometría.
 - Se concluye que para la utilización exitosa de ladrillo “panelón” se requieren unidades con perforación vertical y con un ancho mayor a los existentes en el mercado, porque la sección de la perforación que se puede practicar sin que pierda la capacidad portante no fue suficiente para que el mortero de recubrimiento discurra 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 postensado 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 postensar muros de características divisorias no portantes, la capacidad admisible de nuestros muros es suficiente para resistir presfuerzo. No obstante, para la construcción de mampostería estructural postensada se requieren muros de alta resistencia para así viabilizar la mampostería postensada como sistema constructivo estructural en edificaciones de altura.
 - Las *escaleras* o refuerzo horizontal para mampostería estructural no existen en el mercado ecuatoriano. Estos refuerzos también son recomendados para mampostería postensada 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 tres toneladas), motivo por el cual se realiza la experimentación con torón de 3/8 de pulgada, equivalente a alambre de 9 mm.
 - 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.
- De acuerdo a las posibilidades de diseño del sistema constructivo se concluye que:
- Se planifican alternativas para aplicar presfuerzo a mampostería y se pueden buscar más opciones según los distintos requerimientos.
 - Para la implementación del postensado 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 postensado se puede aplicar una vez fraguado por completo el mortero de hiladas del muro, lo cual puede tomar varios días o tiene que preverse el uso de aditivos acelerantes de fraguado.
 - Por la tenacidad mostrada por los especímenes postensados, incluso después de su falla, se abre la posibilidad de prefabricar paredes precomprimidas industrialmente para ser transportadas y ensambladas en obra.
- De acuerdo a los condicionamientos constructivos se concluye que:
- Por economía 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. Esta sujeción mostró ser el punto débil de los muros postensados y es aquí donde se produce la falla al someterlos a ensayo. La alternativa es entonces colocar un elemento de colaboración pasivo como una placa, embebido, 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* (Gráfico 24).
 - Se requiere espacio para trabajar en el remate superior de los muros para la labor del operario de la gata tensora 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 progra-

Mampostería postensada

mación de la construcción. Bajo el criterio de crear una herramienta óptima para postensar, ésta puede ser optimizada en su tamaño considerando que la altura de las gatas automotrices está pensada para levantar un auto un tramo suficientemente largo que permita cambiar un neumático. Sin embargo, si consideramos que para postensar 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 del mortero de protección es necesario considerar que el proceso de postensado se lo realice inmediatamente y necesariamente cuando el *grout* esté fresco, una vez vertida la masilla es imposible sacarla de la celda; en consecuencia, deben evitarse imprevistos al momento del colado y tensado.

Conclusiones acerca de la factibilidad económica:

- Bajo términos y condiciones de este ensayo, en el muro de bloque de concreto construido postensado resulta un 24% más costoso respecto al construido del modo tradicional; en resistencia ante carga lateral, el postensado 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 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 postensado resulta aproximadamente 14% más caro y se mejora su resistencia ante carga lateral entre seis y siete veces. Igual que en el caso anterior, de poderse utilizar anclajes abiertos económicos, la alternativa propuesta se vuelve plenamente factible.
- La probeta de mampostería estructural mostró tener un mejor desempeño que la postensada 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: técnico y económico. El aspecto positivo de la mampostería postensada frente al muro estructural fue el modo de falla porque la primera se rompió de un modo explosivo bruscamente en contraposición al postensado que mostró fractura lenta y paulatina, sin colapso brusco.

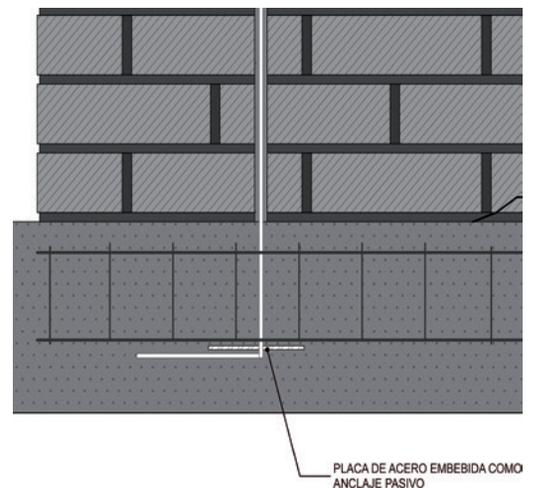


Gráfico 24: Alternativa de placa de acero colocada como anclaje pasivo embebido en el concreto de base.

Citas

- ¹ Serna Pulgarín, Carlos Andrés y Luís Fernando Stuart Contreras (2010). Análisis Económico de la mampostería postensada en seco versus actuales soluciones de vivienda de interés social en Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín.
- ² Hernández, Oscar y Heriberto Aguilar: Deformaciones diferidas en mampostería postensada. Recomendaciones de diseño, Series Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1983.
- ³ Ganz, H. R. Post-Tensioned Masonry Structures, VSL International Ltd., Berna, Suiza, 1990.
- ⁴ Wight, Gavin D. Seismic Performance of a Post-tensioned Concrete Masonry Wall System, Universidad de Auckland, Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, Nueva Zelanda, junio de 2010.
- ⁵ Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismorresistentes: Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10, Bogotá, Colombia, 2010.
- ⁶ Wight, Gavin D. Seismic Performance of a Post-Tensioned Concrete Masonry Wall System, Universidad de Auckland, Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, Nueva Zelanda, junio de 2010, p. 56.
- ⁷ Ganz, H. R. Post-Tensioned Masonry Structures, VSL International Ltd., Berna, Suiza, 1990, p. 25.
- ⁸ http://www.alibaba.com/productgs/540683163/prestressed_anchorage.html. Página proporcionada por el Ing. MSC Vladimir Carrasco, a quien se le ofertaron anclajes abiertos llevados a Cuenca por este valor a través de esta importadora.
- ⁹ Ídem.
- ¹⁰ http://www.mega.es/catalogo_automocion/catalogo_automocion_detalle.php?sldioma=es&nIdCategoria=1&nIdSubcategoria=1&nIdArticulo=21

Bibliografía

- COMISIÓN ASESORA PERMANENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO-RESISTENTES. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10*, Bogotá, Colombia, 2010.
- GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL. *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras*, México D. F, 2004.
- GANZ, H. R. *Post-Tensioned Masonry Structures*, VSL International Ltd., Berna, Suiza, 1990.
- HERNÁNDEZ, Basilio Oscar y Heriberto AGUILAR. *Deformaciones diferidas en mampostería postensada. Recomendaciones de diseño*. Series Instituto de Ingeniería UNAM, México, 1983.
- KOWALSKY J. Mervyn y Gavin D. WIGHT. *Application of Traditional Materials in Non-Traditional Ways for Improved Housing Construction*. Universidad de Carolina del Norte, Estados Unidos, 2010.
- MAS Guindal Antonio J. y Joseph M. ADELL. *Eladio Dieste y la Cerámica Estructural en Uruguay*, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid, 2005.
- PÉREZ LEAL, Edwin 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, México, marzo de 2011.
- SERNA P. Carlos y Luís STUART C. *Análisis económico de la mampostería postensada en seco versus actuales soluciones de vivienda de interés social en Colombia*, Tesis, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, 2010.
- SHRIVE G. et al., *Strengthening and rehabilitation of masonry using fibre reinforced polymers*, Universidad de Calgary, Departamento de Ingeniería Civil, Calgary, Alberta, Canadá.
- SINHA, Braj P., *Development and Potencial of Structural Masonry*, Ponencia en el Seminario sobre paredes de albañilería, Lourenco y Souza, Porto, Portugal, 2002.
- WIGHT Gavin D., *Seismic Performance of a Post-Tensioned Concrete Masonry Wall System*, Universidad de Auckland, Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, Nueva Zelanda, junio de 2010.
- WIGHT, Gavin D. Jason M. INGHAM y 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.