

DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ROTURA EN MAMPOSTERÍA DE ARCILLA
ESTRUCTURAL Y NO ESTRUCTURAL.

CRISTIAN ANDRÉS MURIEL GONZÁLEZ

LIS MAYERLYN LONDOÑO DÁVILA

POLITÉCNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MEDELLÍN
2014

DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ROTURA EN MAMPOSTERÍA DE ARCILLA
ESTRUCTURAL Y NO ESTRUCTURAL.

CRISTIAN ANDRÉS MURIEL GONZÁLEZ

LIS MAYERLYN LONDOÑO DÁVILA

Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al título
de Ingeniero Civil

Director:
JESÚS HUMBERTO ARANGO TOBÓN
Ingeniero Civil

POLITÉCNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MEDELLÍN
2014

A nuestros padres y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Jesús Humberto Arango Tobón y José Gabriel Marín Vargas por su colaboración, apoyo y por haber hecho posible la realización de este trabajo.

A Ingeconcreto S.A.S. por permitirnos realizar los ensayos de laboratorio en sus instalaciones y a todo su personal por la gran colaboración.

A la empresa: Ladrillera San Cristóbal S.A. por suministrar los materiales necesarios.

A aquellas personas que de una u otra forma colaboraron con la realización de este trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS	9
1 GENERALIDADES SOBRE MAMPOSTERÍA	10
1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA MAMPOSTERÍA	10
1.2 UNIDADES DE MAMPOSTERÍA	11
1.3 MORTEROS	14
1.4 MÓDULO DE ROTURA DE LA MAMPOSTERÍA	18
2 TRABAJO EXPERIMENTAL	26
2.1 UNIDADES	26
2.2 ARENA	28
2.3 MORTERO	29
2.4 MURETES	30
3 RESULTADO DE LOS ENSAYOS	36
3.1 TABLAS Y GRÁFICOS	36
3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
4 CONCLUSIONES	42
5 RECOMENDACIONES	43
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	45

RESUMEN

La resistencia a la flexión o módulo de rotura, en muros de mampostería es un tema del cual, en nuestro país, se encuentra poca información, aun así este parámetro de resistencia no deja de ser importante al momento de diseñar una estructura en mampostería que podría estar sometida a cargas de viento, sismo o presiones.

Partiendo de lo anterior, buscando experimentalmente determinar dicha propiedad y revisar o verificar los valores reglamentados, se encuentra varios métodos de ensayo creados e implementados en otros países, que luego serían, algunos de ellos, adoptados en nuestro país. En este trabajo se presenta la implementación de uno de esos métodos, ejecutando los ensayos con muestras elaboradas totalmente con materiales de la región, cumpliendo los requisitos mínimos establecidos en nuestro reglamento y realizando los ensayos según la norma competente. Para tal fin se realizaron 12 tipos de muretes con cuatro tipos de unidades de arcilla, tres tipos de mortero de pega y un mortero de inyección, para un total de 108 muretes con los cuales se determinó la resistencia a la flexión, de igual manera se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de cada uno de los materiales según la norma técnica vigente.

Se presentan los datos obtenidos del ensayo, se analizan y se comparan con los valores del reglamento, teniendo como resultado un comparativo útil del caso particular presentado con los valores presentes en reglamento y un complemento al mismo al incluir los valores no existentes, dejando abierto el tema a investigaciones más profundas.

Palabras claves: mampostería, resistencia a flexión, mortero, módulo de rotura, murete.

ABSTRACT

The flexural strength or modulus of rupture, masonry walls is a topic in our country can find a little information, including the parameter from resistance can be important in the moment to design.

A structure masonry can support a wind load, earthquake, or pressure, search experimentally to determine land but and review legal values can find different ways to test drawn up in other countries a few of this adopted in our country, in this job can find implementation and a least on of this one. Running test with our own show in the ability to requirements in compliance with the provisions in our own rules executing the test, that and 12 types enclosing concrete with four types of block of clay, 3 types of trowel mortar, for the total of 108 walls which translate determination to the resistance to the flexion.

The proposals presented the test several of the issues; acquisitions value of regulation with the result that comparative data. In this particular case the regular shall and the same complement and preparing the way to the deep investigation.

Keywords: masonry, flexural strength, mortar, modulus of rupture, low wall.

INTRODUCCIÓN

En el campo del diseño estructural se tienen en cuenta muchos requisitos y valores mínimos establecidos en la normatividad, de forma que se pueda garantizar seguridad y funcionalidad ante las sollicitaciones de carga y eventos probables a los que pueden estar sometidas las estructuras, como son el peso propio, las cargas de servicio, los eventos sísmicos, cargas de viento e impacto.

En el Colombia, la mampostería como sistema estructural y no estructural es ampliamente usada, especialmente en la construcción de vivienda y está normalizada por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), específicamente en los títulos A, D y E. El reglamento NSR-10 está basado en normas internacionales, cuyos contenidos son aplicables en su mayoría a nuestro medio luego de su respectiva revisión. Pese a lo anterior existen puntos del reglamento que merecen una verificación más profunda, tal es el caso del módulo de rotura de la mampostería el cual se relaciona directamente con su resistencia a flexión.

La NSR-10 cuenta con valores del módulo de rotura para muros elaborados con unidades de perforación vertical y unidades macizas, de una forma muy general, sin tener en cuenta algunos aspectos como son: el material, el tamaño, otros tipos de unidades como los de perforación horizontal, el tipo de mortero usado, la construcción y otras variables importantes presentes en el medio.

Por lo anterior, esta investigación pretende abrir las puertas a una verificación más amplia acerca del módulo de rotura de la mampostería, usando las variables locales, de forma que se pueda validar y complementar la información existente. Se espera que los resultados obtenidos puedan tener algún aporte técnico a la comunidad, específicamente al gremio de la construcción y el diseño de estructuras.

La investigación puede ser muy extensa, sin embargo esta tendrá un alcance que permita determinar el módulo de rotura de muretes de mampostería de arcilla, elaborados con diferentes tipos de unidades de perforación vertical y horizontal, con y sin mortero de inyección y usando los morteros de pega especificados en la NSR-10. Para tener un buen control de los factores que puedan influir en los resultados de los muretes, se evaluarán previamente las características físicas de morteros y unidades (ladrillos), componentes básicos de la mampostería.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el módulo de rotura en muros de mampostería de unidades de arcilla estructural y no estructural, para lo cual se utilizarán 4 tipos de mampuestos, 3 tipos de morteros de pega y 1 tipo de mortero de inyección.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar información sobre investigaciones hechas en otras partes del país o del mundo.
- Evaluar las principales características físicas de unidades mampostería, mortero de pega y mortero de inyección.
- Realizar los ensayos a flexión de los muretes propuestos para la determinación del módulo de rotura.
- Analizar los resultados obtenidos respecto a las diferentes variables usadas y comparar los datos obtenidos con los parámetros del reglamento.
- Elaborar recomendaciones útiles para investigaciones futuras sobre el tema en estudio.

1. GENERALIDADES SOBRE MAMPOSTERÍA

Mampostería es un sistema constructivo tradicional de construcción, consistente en levantar muros o estructuras mediante la colocación manual de los principales elementos que componen el muro. Estos elementos denominados mampuestos (unidades de mampostería), pueden ser de diferentes materiales como piedras, arcilla, concreto, plástico y tienen diferentes formas y tamaños.

Normalmente las unidades van ordenadas de forma horizontal por hiladas formando un plano vertical, siguiendo un patrón de colocación, trabazón o amarre llamado aparejo. Por lo general las unidades o mampuestos se unen por medio de una argamasa o mortero de cemento y arena con la adición de una cantidad conveniente de agua. Antiguamente se utilizaba también el barro, al cual se le añadían otros elementos naturales como paja, y en algunas zonas rurales excrementos de vaca y caballo.

En algunos casos se construyen los muros sin utilizar mortero, y los muros así resultantes se denominan muros secos.

1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA MAMPOSTERÍA

Por la necesidad de ser resguardados y ser protegidos de los fenómenos naturales, el hombre inicio el proceso de construcción con mampuestos conformando pilares en muros de piedra, se han encontrado pequeñas estructuras con estas características por lo cual posiblemente la mampostería fue inventada por nómadas hace unos 15000 años.

El adobe fue llevado al horno a principios del tercer milenio antes de Cristo, para hacer ladrillos cerámicos. Para la construcción de la mampostería, el ladrillo era asentado con mortero de betún o alquitrán, al cual se añadía arena. El ladrillo cerámico se remonta a Sumeria en la antigua Mesopotamia porque allí había abundantes depósitos de arcilla.

En Egipto, por la misma época, se pudo escoger y se prefirió para las grandes obras la roca traída de las montañas a lo largo del Nilo. Los romanos aportaron una nueva racionalidad constructiva y la invención del mortero de cemento y del concreto.

En los siglos XV y XVI la mampostería fue importante en Europa para controlar desastrosos incendios que destruían a las ciudades medievales, dejando de ser ciudades de madera para convertirse en urbes de mampostería. Aparecen ordenanzas que proclaman espesores mínimos de muros y dimensiones de ladrillos.

Con la revolución industrial (siglo XVIII), se extendió la aplicación de la mampostería de ladrillos de arcilla en Inglaterra. Desde un inicio las grandes plantas para fabricar ladrillos se ubicaron en la vecindad de las minas de carbón, combustible abundante y barato.

Entre finales del siglo XVIII y el siglo XIX ocurrieron en Europa los siguientes avances:

En 1796, se patenta el "cemento romano" que era, estrictamente hablando, una cal hidráulica. En 1824 se inventa y patenta el cemento portland. Entre 1820 y 1840, se inventa

la máquina para extruir ladrillos de arcilla, se usa por primera vez mampostería reforzada, y se inventa el horno de producción continua. Entre 1850 y 1870 se inventa y patenta el bloque de concreto, el ladrillo sílico-calcáreo y el concreto armado.¹

En Colombia, en el periodo de transición entre la ciudad colonial y la ciudad moderna, llamado también periodo republicano que tiene inicio en 1810 y se extiende hasta los años veinte del siglo XX, el ladrillo como material de construcción, y como material de acabado, evolucionó y cambió la forma de construir, se recurrió al ladrillo para los muros de carga y no a la piedra, para dar acabados a las fachadas con sentido de armonía arquitectónica. El potencial de la mampostería tendría su apogeo a finales del siglo XX, cuando se despliegan sus excelentes virtudes: resistencia, economía, durabilidad, entre otras.

A continuación se hace una breve descripción de los componentes de la mampostería para tener conocimiento acerca de ellos.

1.2 UNIDADES DE MAMPOSTERÍA^{2 3}

1.2.1 Definición.

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

En Colombia se dan diferentes nombres a los tipos de unidades dependiendo de la región algunos de estos nombres son: ladrillo, bloque, bocadillo, tolete, sucio, bloque, prensado y farol.

1.2.2 Clasificación.

De acuerdo con el NSR-10 las unidades se pueden clasificar según su composición o sus perforaciones.

Según el material se clasifica como:

- **Unidades de arcilla (ladrillos).** La materia prima está compuesta por sílice y alúmina con óxidos metálicos otros ingredientes y agua. Las arcillas pueden ser arcillas calcáreas y no calcáreas, estas se mezclan con alrededor de un 33% de limo y agua para reducir los efectos de contracción en el secado.
- **Unidades de concreto.** La materia prima está compuesta por cemento, agregados gradados y agua.

¹ Gallegos, Héctor. Las Estructuras de Mampostería (2005). México.

² INGECONCRETO – DIVISIÓN EDUCACIONAL. Curso de análisis y diseño de mampostería estructural. 2010.

³ REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORESISTENTE (NSR-10)

- **Unidades de sílice-cal.** La materia prima está compuesta por roca triturada con contenido mayor al 75% de sílice y cal viva o hidratada.

Según las perforaciones se clasifican como:

- **Unidades de perforación vertical (PV).** Unidades cuyas celdas o perforaciones son perpendiculares a la cara en que se asientan en el muro.
- **Unidades de perforación horizontal (PH).** Unidades cuyas celdas o perforaciones son paralelas a la cara o superficie en que se asientan en el muro.
- **Unidades macizas (M).** Unidades con pequeñas perforaciones que ocupan menos del 25% de su volumen, o también, que no contienen ninguna perforación.

En la tabla 1 se presenta las principales normas para la producción y control de calidad de las unidades de mampostería.

Tabla 1. NTC y ASTM para la producción y el control de calidad de la mampostería.

Normas de producción y control de calidad			
	Concreto	Arcilla	Sílice-cal
Perforación vertical	NTC 4026 ASTM C90	NTC 4205 ASTM C34	NTC 922 ASTM C73
Macizas	NTC 4026 ASTM C90	NTC 4205 ASTM C62, C652	NTC 922 ASTM C73
Mampostería no Estructural	NTC 4076 ASTM C129	NTC 4205 ASTM C56, C212, C216	NTC 922 ASTM C73

1.2.3 Propiedades de las unidades de mampostería.

- **Resistencia a la compresión.** Es la principal propiedad de las unidades de mampostería. Valores altos de resistencia a compresión señalan buena calidad para todos los fines estructurales, de exposición y durabilidad.

La resistencia a compresión tal como se mide en el ensayo de compresión estándar, es función no sólo de la resistencia intrínseca de la masa, sino de la altura del elemento y de su forma. Consecuentemente, los valores obtenidos son sólo indicativos generales del comportamiento estructural de diferentes unidades cuando integran la mampostería asentadas con mortero y/o rellenas con grout.

- **Resistencia a la tracción.** La falla de un muro de mampostería sometido a compresión ocurre por tracción transversal en la unidad de mampostería, mientras esta se encuentra en una situación de tensiones triaxiales. Esto demuestra la importancia de conocer la resistencia a tracción de la unidad; sin embargo no es posible medirla directamente y se mide por medio de ensayos indirectos; dos de estos ensayos son usuales, el ensayo de tracción indirecta y el ensayo de tracción por flexión o módulo de ruptura. (NTC 4017)⁴.
- **Absorción.** Es la cantidad de agua que una unidad de mampostería es capaz de absorber cuando se sumerge en agua durante 24 horas. El procedimiento para la realización del ensayo de absorción está indicado la NTC 4017 (ASTM C67).
- **Tasa inicial de absorción (TIA).** Es la capacidad de absorción capilar que tienen las unidades secas, medida durante 1 min.; se expresa en g/cm²/min. En la Tabla 2 se muestran los tiempos de pre humedecimiento de las unidades de acuerdo con su tasa inicial de absorción.

Tabla 2. Tasa inicial de absorción (NSR-10)

Tasa inicial de absorción (g/cm ² /min)	Tiempo recomendado de pre humedecimiento
< 0,15	ninguno
> 0,15	Humedecimiento previo conveniente
>0,25	24 horas

- **Variabilidad dimensional.** La variabilidad dimensional define la altura de las hiladas de mampostería y por tanto el espesor de las juntas de mortero que deben estar en un rango de 10 ± 3 mm.
- **Alabeo.** Corresponde a las deformaciones curvas que se producen en la unidad por gradientes de temperatura en la unidad de mampostería. También es una especie de variabilidad dimensional.
- **Eflorescencias.** Son manchas que presentan las unidades cuando tienen altos contenidos de sales solubles que al disolverse en agua salen a flote a la superficie.
- **Durabilidad.** La durabilidad es un factor que asocia todas las propiedades anteriores. El principal aspecto de la durabilidad se refiere a la resistencia a la meteorización, un indicador de durabilidad utilizado es la resistencia a ciclos de hielo y deshielo. En general si se tienen unidades resistentes a compresión se tienen unidades durables.

⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). Normas técnicas para ingeniería civil y arquitectura. Santafé de Bogotá.

1.3 MORTEROS

1.3.1 Definición.

Se denomina mortero, a la mezcla de un conglomerante con arena; equivalente a un concreto sin agregado grueso y es utilizado principalmente para unir elementos de construcción consigo mismos o con una base y también para recubrimientos interiores y exteriores de muros, para rellenos, para inyecciones, para reparaciones de elementos de concreto y para muchas más aplicaciones, las cuales se han ido especializando mediante la utilización de aditivos químicos que mejoran su comportamiento y lo hacen más aplicable al uso específico.

1.3.2 Tipos de morteros.

- Morteros de cal
- Morteros de cemento
- Morteros de cemento cal y arena
- Morteros mejorados con aditivos químicos

1.3.3 Propiedades de los morteros.

El mortero posee propiedades en tanto en estado fresco como endurecido:

- **Trabajabilidad.** Se puede definir como la propiedad que permite al mortero aplicarse sobre la superficie del ladrillo o unidades de mampostería, esta cualidad depende directamente de la cantidad de agua que se aplica a la mezcla; para asegurar una perfecta ejecución de los muros de ladrillo o bloques así como de los recubrimientos de paredes o superficies, es preciso que el mortero sea fácilmente trabajable para su aplicación, relleno de todos los huecos de la base y su retención de agua debe evitar la rigidización excesiva del mortero por succión de la base que impediría la perfecta colocación de la pieza superior o el trabajo de recubrimiento con la llana.
- **Cohesión.** Capacidad de mantener sus partículas unidas entre sí y está ligada a la trabajabilidad del mortero.
- **Consistencia.** Habitualmente se definen tres consistencias distintas: seca, plástica y fluida, que vienen determinadas por la película de pasta conglomerante que rodea a la arena.
- **Retención de agua.** La retención de agua se encuentra altamente relacionada con la tensión superficial del conglomerante. Un mortero tiende a conservar el agua precisa para mojar la superficie de las partículas del conglomerante, de la arena, las burbujas de aire ocluido o las macromoléculas presentes como micelas coloidales. Pero el agua que tenga en exceso la cederá fácilmente por succión.

- **Resistencia mecánica.** La resistencia mecánica es una característica importante que deben poseer los morteros a fin de resistir las tensiones a que pueden verse sometidos como de tracción, compresión y cizalladuras.
- **Adherencia.** La adherencia es la propiedad del mortero endurecido que mantiene unidas las piezas de mampostería.
- **Durabilidad.** Un mortero durable debe ser capaz de resistir las condiciones climáticas sin que presente deterioros excesivos que puedan comprometer sus funciones, también debe tener la capacidad de resistir al envejecimiento, los cambios del clima y a la exposición a la intemperie durante su vida útil.

1.3.4 Mortero de pega.

Además de las propiedades básicas de los morteros, los morteros de pega poseen situaciones diferentes a los otros tipos de morteros, solamente aplicables a ellos y es por ello que se tratan independientemente.

El mortero de pega es una mezcla homogénea compuesta por un material aglutinante (cemento y cal) y un inerte (arena), al unirse generan un conglomerado que al contacto con el agua se vuelve una mezcla maleable generando una reacción exotérmica que al endurecerse une los elementos.

La función principal del mortero de pega es actuar como agente de vinculación o de adherencia que integra las unidades de mampostería, permitiendo que trabajen en forma monolítica, ayudando a un adecuado comportamiento estructural de los muros, además debe acomodar variaciones dimensionales y características físicas de las unidades, debe lograr un efecto sellante entre ellas, impidiendo tanto el paso del agua como del aire.

1.3.4.1 Composición. Los morteros más recomendables para morteros de pega son aquellos que llevan como conglomerante una mezcla de cemento y cal.

El cemento Portland contribuye a la resistencia y durabilidad, la cal provee trabajabilidad, retención de agua y elasticidad. Ambos, contribuyen a la resistencia a la adherencia. La arena actúa como un complemento y le permite al mortero conservar la forma y espesor de las juntas bajo el peso de las hiladas subsiguientes de mampostería. El agua es el agente de mezclado que le da fluidez y es la que reacciona e hidrata al cemento.

- **Cemento Portland.** El cemento Portland, es un cemento hidráulico y es el principal ingrediente conglomerante en los morteros de pega. El cemento contribuye a la resistencia del mortero.
- **Cal hidratada.** Es un material que transmite al mortero que la contiene, el efecto de un lubricante, que permite incrementar la plasticidad, generando a su vez un incremento en la retención de agua del mortero. Los morteros con cal sufren un proceso de carbonatación gradual bajo la influencia del dióxido de carbono en el aire ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) frenada por el frío y el ambiente húmedo, razón por la cual el completo endurecimiento ocurre muy lentamente durante un largo período de tiempo.

Esto permite que se presente una recementación de pequeñas fisuras que se hayan formado.

- **Arena.** La arena para el mortero de pega puede ser natural o artificial y es el ingrediente del mortero que más peso y volumen ocupa. La arena actúa como un llenante inerte produciendo economía, trabajabilidad, reduciendo la retracción y contribuyendo con la resistencia para la cual está diseñada la mezcla.
- **Agua.** El agua en el mortero de pega desempeña tres funciones: Contribuye a la trabajabilidad, hidrata el cemento y contribuye a la carbonatación de la cal. El agua debe ser limpia y libre de cualquier cantidad de sustancias perjudiciales que puedan deteriorar el mortero o al refuerzo en la mampostería.
- **Aditivos.** Algunas adiciones químicas son esenciales en la fabricación de morteros de pega. La inclusión de un aditivo es también necesaria en la producción de morteros premezclados, son utilizados para mejorar las características de los morteros, en este caso para aumentar la retención de agua, la manejabilidad y la resistencia.

Según la NSR-10 hay cuatro tipos de morteros de pega, los cuales se muestran a continuación

Tabla 3. Clasificación de los morteros de pega NSR-10.

CLASIFICACIÓN DE LOS MORTEROS DE PEGA POR PROPIEDAD Y POR PROPORCIÓN								
MORTERO TIPO	ESPECIFICACIÓN DE LOS MORTEROS POR PROPIEDAD			ESPECIFICACIÓN DE LOS MORTEROS POR PROPORCIÓN				
	RESISTENCIA MINIMA A LA COMPRESION f_{cp} MPa	FLUJO EN %	RETENCIÓN MINIMA DE AGUA	CEMENTO PORTLAND	CAL HIDRATADA	CEMENTO PARA MAMPOSTERIA	ARENA/MATERIAL CEMENTANTE	
							MIN	MAX
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.5	3.5
				0.5	no aplica	1	2.5	3
N	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3	4.5
				0	no aplica	1	3	4

*tabla D.3.4-1 de la NSR-10

1.3.4.2 Factores que afectan las propiedades del mortero de pega.

- **Las unidades de mampostería.** Las unidades de mampostería son absorbentes por naturaleza y por lo tanto el agua es extraída del mortero de pega una vez entran en contacto. La cantidad de agua removida afecta la resistencia del mortero, las

propiedades del contorno entre el mortero y las unidades, la resistencia de la mampostería y otras propiedades del ensamblaje de la mampostería.

La succión ejercida por las unidades es un importante factor externo el cual afecta el mortero fresco e inicia el desarrollo de la adherencia. Las unidades de mampostería varían muy ampliamente su tasa inicial de absorción (TIA). Se hace entonces necesario que el mortero escogido tenga propiedades compatibles con las propiedades de las unidades de mampostería, con las condiciones ambientales y con las prácticas de construcción utilizadas.

- **Preparación y mezclado.** Las diferentes formas de mezclado pueden afectar las propiedades finales de la mampostería según el control que se tenga sobre la adición del agua. Existen varias formas de mezclar el mortero de pega:

Mezcla húmeda en obra: se dosifican todos los ingredientes incluyendo el agua con un tiempo aproximado de 3 a 5 minutos hasta lograr la uniformidad y consistencia deseada. La dificultad de este sistema radica en el poco tiempo disponible para el transporte y colocación del mortero.

Mezcla seca en obra: la mezcla se prepara con todos los ingredientes menos con el agua; los aditivos pueden incluirse siempre y cuando sean en polvo. El agua se adiciona a la cantidad de mezcla necesaria, hasta obtener la consistencia deseada en el momento de colocación de las unidades.

Premezclado húmedo: el mortero es preparado en plantas mezcladoras para luego ser repartido a las obras. Para lograr esto se deben utilizar aditivos que retardan el fraguado, pudiéndose utilizar aún después de varias horas de preparados.

- **Mano de Obra.** La mano de obra tiene un definitivo efecto sobre la resistencia y la adherencia de los morteros de pega en la mampostería. El tiempo adecuado que debe transcurrir entre la extensión del mortero y el asiento de la unidad de mampostería sobre él debe ser el menos posible, excepto en las piezas muy lisas y de poca succión, es conveniente que se ejerza una presión de la unidad de mampostería sobre el mortero de pega en el momento de la colocación y el alineamiento para lograr una mayor penetración del mortero dentro de las rugosidades de la pieza. Los factores anteriores varían con la experiencia y el estado de ánimo del mampostero influyendo en las propiedades finales de la mampostería.

1.3.5 Mortero de relleno o inyección.

Mezcla fluida de material cementante, agregados y agua con la consistencia apropiada para ser colocado sin segregación en las celdas o cavidades de mampostería. Permite vincular muros de mampostería con acero de refuerzo, con la adherencia y recubrimientos adecuados para convertirla en mampostería reforzada.

1.4 MÓDULO DE ROTURA DE LA MAMPOSTERÍA

Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a un eje longitudinal.

El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra o eje neutro tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. En un elemento o material sometido a flexión se generan tensiones o esfuerzos internos que equilibran y resisten el momento flector actuante, los esfuerzos de tracción a un lado de la superficie o eje neutro se equilibran con los esfuerzos de compresión del lado opuesto.

Los materiales frágiles como el concreto o la arcilla son buenos resistiendo esfuerzos de compresión pero son débiles a la tracción. El máximo esfuerzo de tracción que resiste un material, justo antes de romperse cuando es sometido a flexión, se denomina módulo de rotura.

La resistencia a la flexión en muros de mampostería se puede relacionar con la resistencia de un muro frente a cargas laterales de viento, sismo o presiones. Dependiendo de la geometría del muro y las condiciones de apoyo las cargas laterales pueden generar flexión paralela o perpendicular al plano del muro. La determinación de la resistencia a flexión de un muro de mampostería para unas condiciones particulares de dimensiones, dirección y apoyos va directamente relacionada con el módulo de rotura.

Tabla 4. Valores del módulo de rotura presentes en la NSR-10

Dirección de los esfuerzos de tracción por flexión y tipo de mampostería.	Morteros de cemento portland y cal		Morteros de cemento para mampostería	
	H, M, ó S	N	H, M, ó S	N
Perpendicular a las juntas horizontales				
Unidades Macizas	0.69	0.52	0.41	0.26
Unidades de perforación vertical				
Sin rellenar	0.43	0.33	0.26	0.16
Rellenas con morteros de inyección	1.12	1.09	1.06	1
Perpendicular a la junta vertical				
Unidades Macizas	1.38	1.03	0.83	0.52
Unidades de perforación vertical				
Sin rellenar	0.86	0.66	0.52	0.33
Rellenas y parcialmente rellenas con morteros de inyección	1.38	1.03	0.83	0.52

módulo de rotura, (fr Mpa) tabla D.5.8-1 según la NSR-10

El reglamento Colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) en el título D proporciona datos del módulo de rotura para el cálculo de muros de mampostería construidos en unidades macizas, perforación vertical vacías y rellenas, de acuerdo a la dirección en que se generen los esfuerzos de tracción respecto a las juntas del muro. (Tabla 4)

1.4.1 Métodos de ensayo para determinar la resistencia a la flexión y el módulo de rotura.⁵

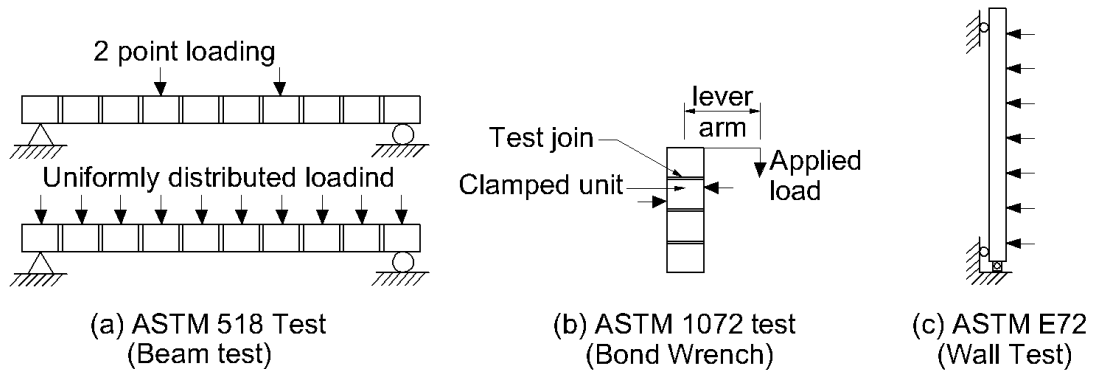
El módulo de rotura y la resistencia a flexión de la mampostería va directamente relacionada con la resistencia sus componentes (unidades de mampostería, mortero de pega y mortero de inyección) y con la adherencia e interacción entre ellos.

La unión entre el mortero de pega y las caras de las unidades de mampostería que están en contacto con el mismo es importante tanto por su adherencia como por su permeabilidad, estos dos factores son determinantes en la durabilidad y resistencia del muro, para determinar dicha resistencia hay métodos normalizados por la American Society for Testing Materials (ASTM) de los cuales se hace una breve referencia a continuación.

- **ASTM E518.** En este método se determina la resistencia a la flexión de prismas de mampostería, llamados muretes, los cuales se fallan para flexión perpendicular a su plano, disponiendo el murete como una viga simplemente apoyada, mediante cargas en los tercios de la luz o carga distribuida, para este último se usa una bolsa de aire a lo largo de todo el muro. (Ver Figura 1 (a))
- **ASTM C1072.** Ensayo de adherencia del mortero, este método consiste en aplicar una carga al murete mediante una llave, la cual generará un esfuerzo axial y de flexión dependiendo de la longitud del brazo que ejerce la palanca, este método se ha aplicado tanto en laboratorio como en campo. (Ver Figura 1 (b))
- **ASTM E72.** Ensayo de Carga uniforme en especímenes de pared, este método consiste en aplicar una carga uniformemente distribuida a lo largo del murete, el cual está apoyado en la parte inferior sobre un rodillo y lateralmente sobre dos apoyos en la dirección de la carga, las condiciones de apoyo para este ensayo son críticas y por lo tanto es difícil obtener datos significativos. (Ver Figura 1 (c))

⁵ Drysdale, Robert (1993). Masonry Structures Behavior and Design. Prentice Hall, Inc. New Jersey.

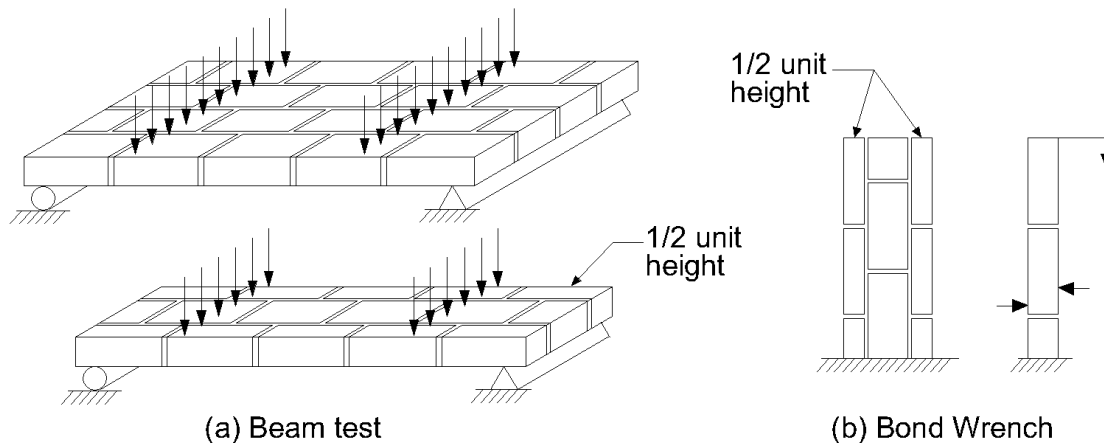
Figura 1. Ensayos para determinar la resistencia a la flexión según las normas ASTM.



Standard tests for flexural tension norma to bed joints.

Los métodos anteriores fueron desarrollados para determinar la resistencia a flexión donde los esfuerzos de tracción van en dirección perpendicular a las juntas horizontales, sin embargo los investigadores han determinado modificar dichos ensayos para ver el comportamiento de los muros con los esfuerzos de tracción presentados en el sentido perpendicular a las juntas verticales (paralelo a las juntas horizontales), tal como lo muestra la figura 2, aumentando el tamaño de los muretes de prueba, logrando así el estudio de ambas direcciones y otras formas de falla al momento del ensayo, como por ejemplo la falla escalonada.

Figura 2. Ensayos modificados para determinar la resistencia a la flexión.

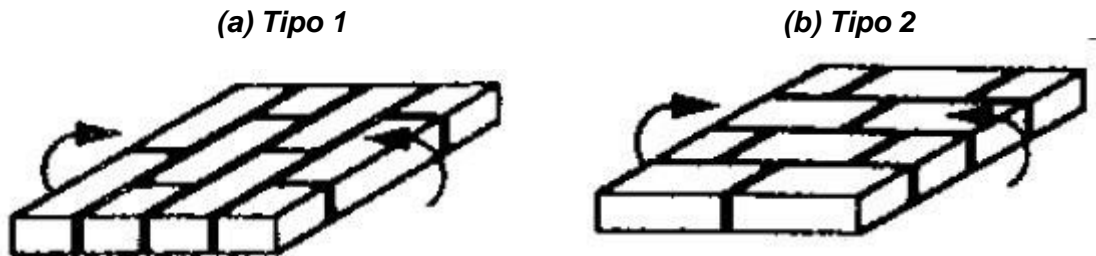


Para tener claridad respecto a los ensayos a flexión sobre muretes de mampostería y resultados de módulo de rotura, se seguirá la siguiente convención:

- **Flexión Tipo 1:** Los esfuerzos de tracción son perpendiculares a las juntas horizontales o principales. (Ver figura 3 (a))

- **Flexión Tipo 2:** Los esfuerzos de tracción son perpendiculares a las juntas verticales o secundarias. . (Ver figura 3 (b))

Figura 3. Convención muretes a flexión.



1.4.2 Mecanismos de falla.

Según la literatura hay cuatro tipos de falla comunes que pueden presentar los muros sometidos a ensayo de flexión.

- Cuando se tiene flexión tipo 1 lo más típico es que la falla sea por pérdida de adherencia a lo largo de las juntas.

Foto 1. Falla por las juntas horizontales.



* Fotografías de la investigación

- Para muretes con flexión tipo 2, generalmente la fractura se presenta a través de las juntas verticales y continúa por las unidades de mampostería que están en la misma sección transversal. Este tipo de falla muestra un buen comportamiento del mortero de pega.

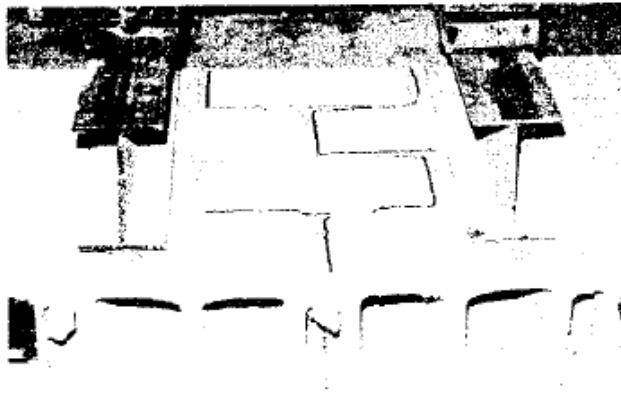
Foto 2. Falla por las juntas verticales y unidades adyacentes.



* *Fotografía de la investigación*

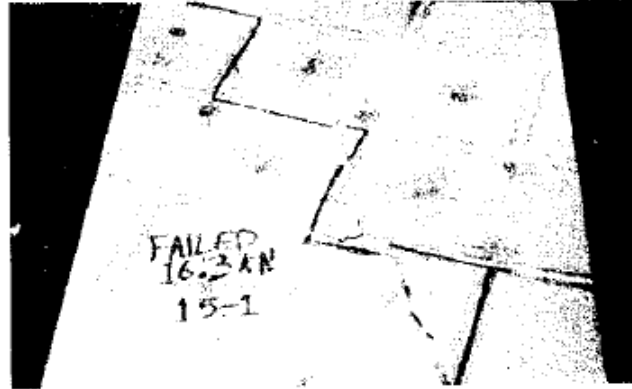
- Falla dentada a lo largo de las juntas, este tipo de fractura se da cuando las unidades son mucho más fuertes que el mortero y se genera el desprendimiento del mismo por falta de adherencia.

Figura 4. Falla dentada.



- Falla escalonada a lo largo de las juntas o por el camino más corto a través de las unidades, este patrón de falla es una variación de la falla dentada donde las unidades son relativamente débiles o el mortero de inyección fortalece el muro causando una falla en diagonal a través del muro.

Figura 5. Falla escalonada.



1.4.3 Determinación del módulo de rotura con carga en los tercios.

Se hace énfasis en el método de ensayo a flexión de muretes simplemente apoyados con cargas concentradas en los tercios, pues es el método usado en la presente investigación.

La aplicación de carga debe iniciarse sin choque y puede conducirse con cierta rapidez hasta llegar aproximadamente a la mitad de la carga máxima prevista, y después debe continuarse a una velocidad constante que produzca un aumento en el esfuerzo máximo a tracción. Este proceso de carga debe prolongarse hasta que se produzca la falla del elemento, con el fin de registrar la carga máxima alcanzada como dato para calcular el esfuerzo máximo de tracción o módulo de rotura. En condiciones normales la falla debe ocurrir dentro del tercio central.

De la teoría básica de resistencia de materiales se conoce que el esfuerzo máximo a tracción en la fibra extrema para un elemento prismático sometido a flexión es:

$$\sigma_z = \frac{M Y_{\max}}{I_x} \quad (1)$$

M: es el momento flector

Y_{\max} : es la distancia del eje neutro a la fibra extrema, $Y_{\max} = H/2$ para sección rectangular

I_x : es el momento de inercia de la sección, $I_x = BH^3/12$

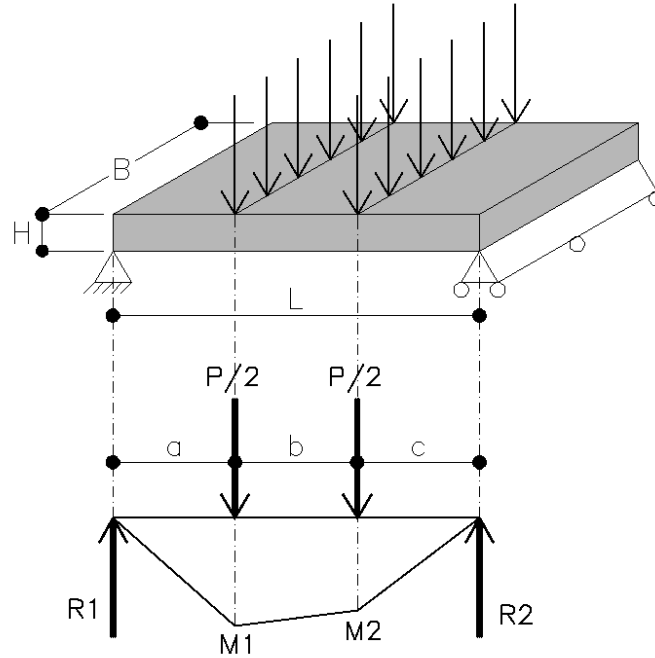
Reemplazando los valores correspondientes a una sección rectangular en la ecuación (1) se obtiene el esfuerzo máximo o módulo de rotura (MR) como:

$$\sigma_z = MR = \frac{6 M}{B H^2} \quad (2)$$

Donde B y H representan el ancho y el alto de la sección prismática respectivamente.

La siguiente figura muestra la configuración del ensayo a flexión, para la determinación del módulo de rotura de los muretes.

Figura 6. Disposición del ensayo a flexión de muretes.



Haciendo sumatoria de momentos en los apoyos se encuentra que

$$R_1 L = \frac{P}{2} c + \frac{P}{2} (c+b), \quad R_1 = \frac{2c+b}{L} \cdot \frac{P}{2}, \quad M_1 = R_1 \cdot a \quad (3)$$

$$R_2 L = \frac{P}{2} a + \frac{P}{2} (a+b), \quad R_2 = \frac{2a+b}{L} \cdot \frac{P}{2}, \quad M_2 = R_2 \cdot c \quad (4)$$

Para el caso particular en el que se aplican las cargas en los tercios de la luz, es decir $a = b = c = L/3$, se llega a los siguiente a partir de (3) y (4):

$$R_1 = R_2 = \frac{P}{2}, \quad M_1 = M_2 = \frac{PL}{6} \quad (5)$$

Reemplazando la ecuación (5) en (2) se llega a la expresión para el módulo de rotura con cargas en los tercios:

$$MR = \frac{P L}{B H^2} \quad (6)$$

Donde,

- P: carga máxima que soporta el murete, distribuida en los tercios
- L: distancia entre apoyos
- B: ancho del murete
- H: altura del murete

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

El método para la obtención de resultados de la investigación será a través de ensayos físicos sobre elementos construidos con materiales de la región, realizando dicho procedimiento según estudios hechos por otros investigadores o literatura y normas que apliquen al ensayo en cuestión, en nuestro caso nos guiaremos por normas extranjeras, ya que en nuestro país hay poca información acerca del tema. Los ensayos consistirán en aplicar carga, por medio de dos barras de acero, en el tercio medio de un murete que estará apoyado en los extremos sobre barras de iguales características que las mencionadas anteriormente, la carga se aplicará de forma paralela a las pegadas y perpendiculares a ellas; para obtener valores representativos se realizará combinaciones de unidades y tipos de mortero diferentes, con muretes totalmente inyectados y vacíos. Los ensayos se ejecutarán después de que las muestras hayan cumplido 28 días de elaboradas.

El trabajo está basado en la experimentación con muretes de mampostería estructural, no estructural, con y sin mortero de inyección, a los cuales se les determina su resistencia a la flexión o módulo de rotura; para lo anterior se usan materiales convencionales de la región con tres tipos de mortero presentes en la normatividad vigente del país.

Los ensayos se realizan con 12 tipos de muretes en los cuales se usan tres tipos de mortero de pega y uno de inyección.

Para la elaboración de los muretes de prueba es necesario establecer la homogeneidad del material, estableciendo para esto que los insumos para la construcción sean de un mismo lote, para ello las mezclas de mortero deben ser preparadas en las mismas condiciones y las unidades sometidas al mismo proceso de saturación, luego para disminuir la incertidumbre deben ser pegadas por una persona idónea con experiencia.

A partir de los resultados obtenidos se realiza una comparación con los valores propuestos en el reglamento colombiano y con otras normas internacionales.

2.1 UNIDADES

Con el fin de disminuir la variación en los materiales constituyentes se usaron unidades de un solo productor y estas a su vez de un mismo lote de producción, sin embargo difieren en sus propiedades físicas y geométricas, como la resistencia y el área.

Según la NTC 4017 se selecciona 5 unidades, como muestreo mínimo, de cada lote de ladrillos para determinar dimensiones, resistencia a la compresión, tasa inicial de absorción (T.I.A.) y absorción de agua por el método de inmersión durante 24 horas; dicha norma específica los procedimientos a seguir para hallar dichos valores.

La determinación del área se realizó mediante el método alternativo descrito en la norma técnica mencionada anteriormente, dicho procedimiento consiste en llenar las celdas de la

unidad de arcilla con arena de un tamaño determinado y densidad conocida, luego se retira la unidad y se determina el volumen de las celdas, por ultimo dicho volumen se divide por la altura de la unidad y se obtiene como resultado el área de celdas, esta última se resta del área bruta para dar como resultado el área neta.

Foto 3. Determinación del área neta de las unidades.



$$A_{\text{Neta}} = B \cdot L - \frac{P_a / \rho}{h} \quad (7)$$

Donde:

A_{Neta} : Área neta (cm²)
 B : ancho de la unidad (cm)
 L : largo de la unidad (cm)
 P_a : Peso de la arena en las celdas de la unidad (g)
 h : altura de la unidad (cm)
 ρ : densidad de la arena (g/cm³)

Después de determinada el área se procede a calcular la resistencia a la compresión con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{C}{A_{\text{Neta}}} \quad (8)$$

Donde:

R : Resistencia a la compresión de la unidad (MPa)
 C : Carga máxima (N)
 A_{Neta} : Área neta (mm²)

Para las unidades de perforación horizontal el área neta es igual al área bruta:

$$A_{\text{Neta}} = A_{\text{Bruta}} = B \cdot L \quad (9)$$

La absorción de agua se determinó sumergiendo en agua las unidades durante 24 horas para el proceso de saturación, luego de obtener el peso saturado o húmedo, se secaron las unidades para determinar su peso seco, para ser usados en la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Absorción} = \left(\frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \right) * 100 \quad (10)$$

En el anexo . (Informe No. 10957) se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión y de la determinación de la absorción de agua de cada una de las muestras.

2.2 ARENA

El mortero de pega se constituye con un 70% de arena de media-pega y un 30% de arena de revoque ya que en el gremio de la construcción con dicha combinación se han alcanzado las resistencias especificadas en el reglamento y su comportamiento es óptimo, más que si se usara solo arena de pega.

La arena usada en la elaboración de los morteros de pega es procedente de la cantera Potreritos, tanto la de media-pega como la de revoque; la arena para el mortero de inyección es de origen aluvial de la cantera Industrial Concreto. El material pétreo usado en la elaboración de los muretes es todo del mismo lote por lo tanto se extrajo una muestra de cada una y se determinaron su propiedades físicas según las normas técnicas vigentes.

Los materiales pétreos usados en la elaboración del mortero de pega no cumplen individualmente con los requisitos granulométricos especificados pero combinados se ajusta dentro de los límites establecidos.

En el anexo A (Informes de propiedades físicas de los agregados) se muestran los resultados de los ensayos realizados a las arenas usadas en la investigación.

2.3 MORTEROS

Para cumplir con los requisitos mínimos establecidos en el NSR-10 se diseñaron los morteros tipo H, M y S; los cuales tienen una resistencia a la compresión de 22,5 MPa, 17,5 MPa y 12,5 MPa respectivamente, el mortero tipo N no se usa dada su baja resistencia y solo es permitido en sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (DMI). Dicho mortero se conformó por arena, cemento Portland tipo I general, cal hidratada y Aditivo plastificante retenedor de agua (PROCON).

El mortero de inyección se constituyó por arena de concreto, cemento Portland tipo I general y aditivo superplastificante (Superlite 20).

Para los morteros de pega e inyección se verificaron diseños de mezcla elaborados por Ingeconcreto S.A.S., en los cuales se prepararon cantidades suficientes para la elaboración de 4 cilindros de 3*6 pulgadas para los de pega y 4 cilindros de 4*8 pulgadas para el de inyección.

Proporciones de los morteros usados en la investigación:

Tablas 5 y 6 Proporciones de los morteros diseñados para la elaboración de los muretes de ensayo.

MORTEROS DE PEGA					
	RESISTENCIA	CEMENTO	CAL	ARENA	ADITIVO
	MPa	Tipo I			Procon
					%
H	22.5	1	0.1	2.4	0.4
M	17.5	1	0.1	3	0.4
S	12.5	1	0.1	3.6	0.4

MORTERO DE INYECCIÓN			
RESISTENCIA	CEMENTO	ARENA	ADITIVO
MPa	Tipo I		Superlite 20
			%
14	1	4.5	1

Los componentes de los morteros tanto en obra como en laboratorio fueron pesados y la resistencia a la compresión fue determinada en los cilindros a los 7 y los 28 días.

Foto 4. Ensayo a compresión de cilindros de mortero.



2.4 MURETES

2.4.1 Muretes para determinar la resistencia a la compresión.

La elaboración de los muretes de prueba para determinar la resistencia a la compresión se llevó a cabo en las mismas condiciones de los muretes para determinar la resistencia a la tracción por flexión, dicha propiedad se determinó después de que las muestras cumplieran 28 días de elaboradas, para el caso de los muretes vacíos y de perforación horizontal, y 28 días después de inyectados para el caso de los muretes rellenos.

Foto 5. Muretes para resistencia a compresión.



La resistencia a la compresión de los muretes se determinó con la misma ecuación de los ladrillos tomando como área de celdas, para el caso de los muretes de perforación vertical, el área de celdas promedio de las unidades, para los muretes de perforación horizontal y muretes rellenos el área neta fue igual al área de la sección transversal del mismo.

Foto 6. Ensayo a compresión de muretes.



2.4.2 Elaboración de los muretes de ensayo para la determinación de la resistencia a la flexión.

Se construyeron muretes para ensayar con los dos tipos de flexión según la dirección de los esfuerzos de tracción así:

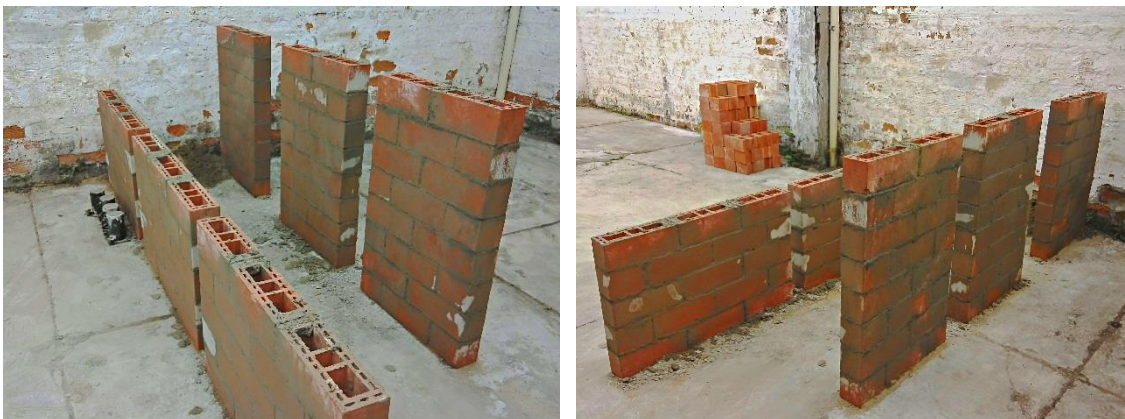
- Muretes para flexión tipo 1

Muretes de 70 cm de longitud y de 100 cm de alto aproximadamente. Dirección de los esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta horizontal.

- Muretes para flexión tipo 2

Muretes de 100 cm de longitud y de 70 cm de alto aproximadamente. Dirección de los esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta vertical.

Foto 7. Muretes tipo 1 y tipo 2



2.4.2.1 Herramientas.

- Nivel de manguera para verificar la posición de los ladrillos y el nivel de enrase de los muros.
- Flexómetro.
- Bascula.
- Plomada de castaña.
- Cepillos con cerdas plásticas para la limpieza.
- Tarros mezcladores, palas y palustres.
- Hilos para referencia de niveles.

2.4.2.2 Proceso.

Las unidades de arcilla deben estar limpias y sin imperfecciones que afecten la funcionalidad del muro, estas unidades deben cumplir con una tasa inicial de absorción según lo estipulado

en la NSR-10 D.4.5.2.1, Las unidades de arcilla cocida que excedan una tasa inicial de absorción de 0.15 gramos por minuto por cm^2 deben humedecerse convenientemente antes de colocarlas, para valores de tasa inicial de absorción mayores de 0.25 gramos por minuto por cm^2 deben humedecerse las unidades durante 24 horas previas a la colocación.

Luego de estar listas las unidades y tener los materiales para los morteros pesados se procede de la siguiente manera:

- Se toman medidas en forma vertical de la superficie del piso con respecto a un punto de referencia para corroborar niveles.

Foto 8. Construcción de muretes: Nivelación.



- Después de tener una superficie nivelada se coloca la primera hilada de mampuestos de forma tal que haya un centímetro de separación entre cada ladrillo.

Foto 9. Construcción de muretes: Primera hilada.



- Se esparce mortero del espesor de un centímetro sobre la primera hilada se colocan la segunda hilada de mampuestos de forma que los aparejos queden de forma trabada, se toma plomada y se verifica que haya un milímetro de separación con el muro.

Foto 10. Construcción de muretes: Segunda hilada



- Para un mejor nivel de acabado de cada hilada se ayuda amarrando un hilo desde el inicio de la hilada (primer ladrillo) hasta un punto extremo para que queden parejas, se debe llevar tanto nivel vertical como horizontal.

Foto 11. Construcción de muretes: Nivelación vertical.



- Para la mitad de los muretes de perforación vertical se realiza la inyección de mortero, se le aplica la mezcla idóneamente preparada y se ayuda con una varilla para que ingrese a los espacios que la mano no puede alcanzar, además que la varilla ayuda a la acomodación de las partículas y evita el aire al interior.

Foto 12. Construcción de muretes: Mortero de inyección.



- Después de alcanzar las dimensiones establecidas para el tipo de unidad se realiza la limpieza de las paredes del muro.

2.4.2.3 Ensayo de los muretes.

El ensayo de flexión se realiza apoyando las unidades en sus extremos, cargados en el tercio medio, garantizando siempre la equidistancia entre los puntos; el procedimiento se ejecuta de igual manera para todos los tipos de muro llevándolos hasta la rotura.

Como se mencionó anteriormente, en cada uno de los ensayos se garantiza que entre cada soporte haya un tercio de la longitud de apoyo del murete (Luz), por esta razón y argumentado por el análisis de un murete representativo de cada tipo se puede despreciar los pequeños voladizos formados en los extremos ya que el peso propio del murete no ejerce mayor influencia en la resistencia del mismo, este valor es inferior al 5% del módulo de rotura y representa un factor de seguridad en el cálculo de los mismos.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Ingeconcreto S.A.S., utilizando para ello una maquina universal marca Tinius Olsen, con capacidad de aplicar cargas hasta de 50 toneladas.

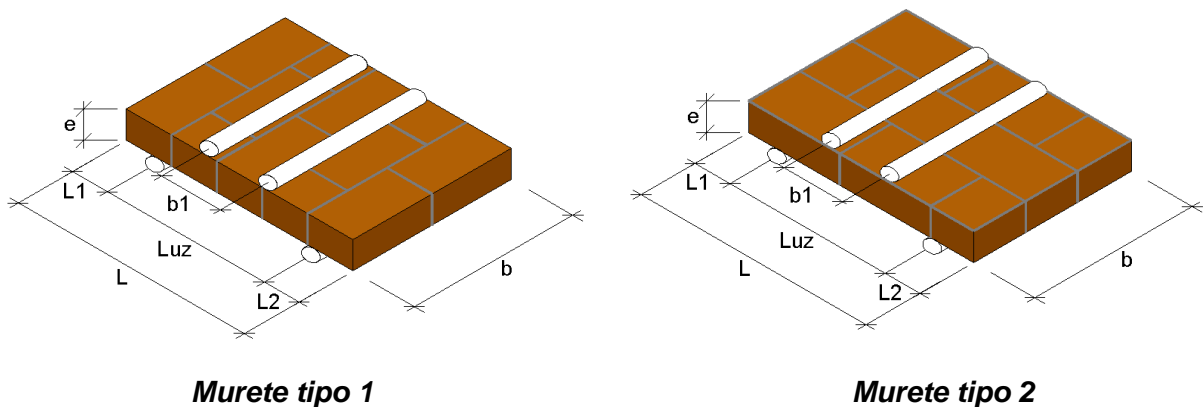
Foto 13. Montaje ensayo a flexión.



Después de que el murete cumpliera la edad de 28 días de elaborado, para el caso de aquellos que estaban constituidos por unidades de perforación horizontal y de perforación vertical sin mortero de inyección, y para los muretes rellenos 28 días después de la inyección, se ejecuta el ensayo de la siguiente manera:

- Se coloca el murete en la maquina en posición de ensayo
- Se determinan las dimensiones y se colocan los apoyos en la posición indicada
- Se aplica carga al muro hasta la rotura del mismo
- Se registra la carga máxima
- Se desecha los escombros resultantes del ensayo

Figura 7. Ensayo a flexión de muretes y tipo de murete.



Muretes Tipo 1: Dirección de los esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta horizontal.

Muretes Tipo 2: Dirección de los esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta vertical.

Debido a que en todas las muestras se cumplen las condiciones establecidas anteriormente y se desprecia el peso propio del murete, la ecuación para el cálculo del módulo de rotura es:

$$MR = \frac{P L}{B H^2} \quad (6)$$

Donde,

- MR: Módulo de rotura (MPa)
- P: carga máxima que soporta el murete (N)
- L: distancia entre apoyos (mm)
- B: ancho del murete (mm)
- H: altura del murete (mm)

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Del procedimiento anteriormente descrito se obtuvo datos que nos permiten calcular el módulo de rotura, sus promedios son mostrados en la siguiente tabla y presentados detalladamente en los anexos.

3.1 TABLAS Y GRÁFICOS.

Tabla 7. Módulo de rotura promedio de los muros.

Mortero		Murete		Módulo de Rotura	
Tipo	Resistencia	Dimensiones de la unidad	V/R	Perpendicular a las juntas Verticales	Perpendicular a las juntas Horizontales
	MPa	cm		MPa	MPa
H	22.5	12x12x32	VACIO	0.82	0.93
M	17.5	12x12x32	VACIO	0.75	0.87
S	12.5	12x12x32	VACIO	0.60	0.78
H	22.5	12x12x32	RELLENO	1.16	1.47
M	17.5	12x12x32	RELLENO	1.01	1.32
S	12.5	12x12x32	RELLENO	0.94	1.24
H	22.5	12x24x32	VACIO	0.61	0.88
M	17.5	12x24x32	VACIO	0.48	0.72
S	12.5	12x24x32	VACIO	0.46	0.65
H	22.5	12x24x32	RELLENO	0.80	1.09
M	17.5	12x24x32	RELLENO	0.65	0.97
S	12.5	12x24x32	RELLENO	0.57	0.90
H	22.5	10x20x40	N.A.	0.86	0.54
M	17.5	10x20x40	N.A.	0.67	0.49
S	12.5	10x20x40	N.A.	0.60	0.40
H	22.5	15x20x40	N.A.	0.68	0.50
M	17.5	15x20x40	N.A.	0.60	0.44
S	12.5	15x20x40	N.A.	0.59	0.40

Figura 8. Módulo de rotura vs Resistencia a la compresión del mortero, dirección de los esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta vertical

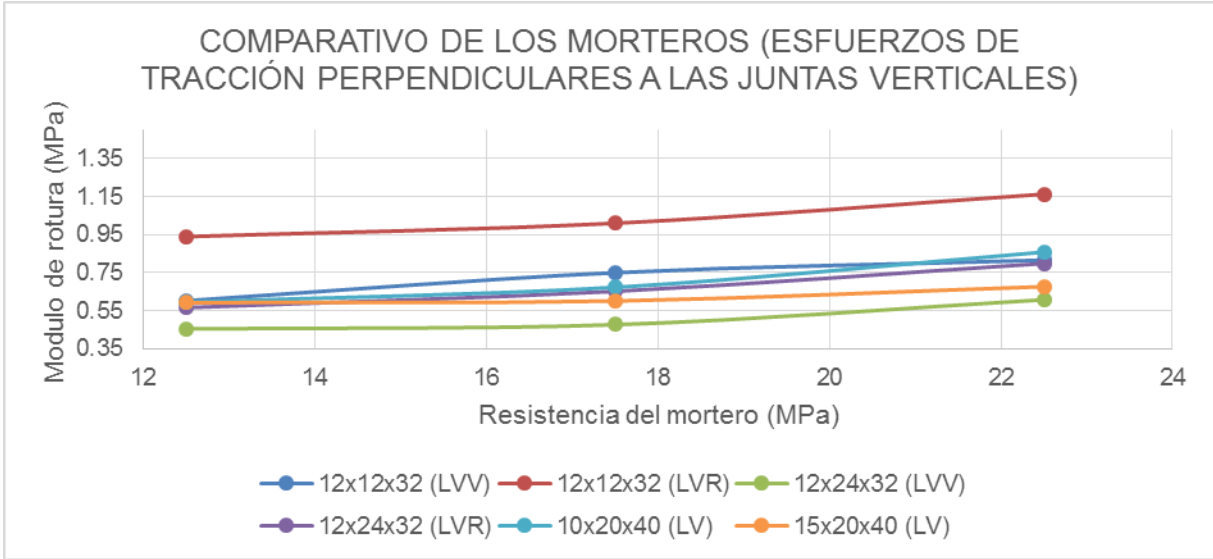


Figura 9. Módulo de rotura vs Resistencia a la compresión del mortero, dirección de los esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta horizontal.

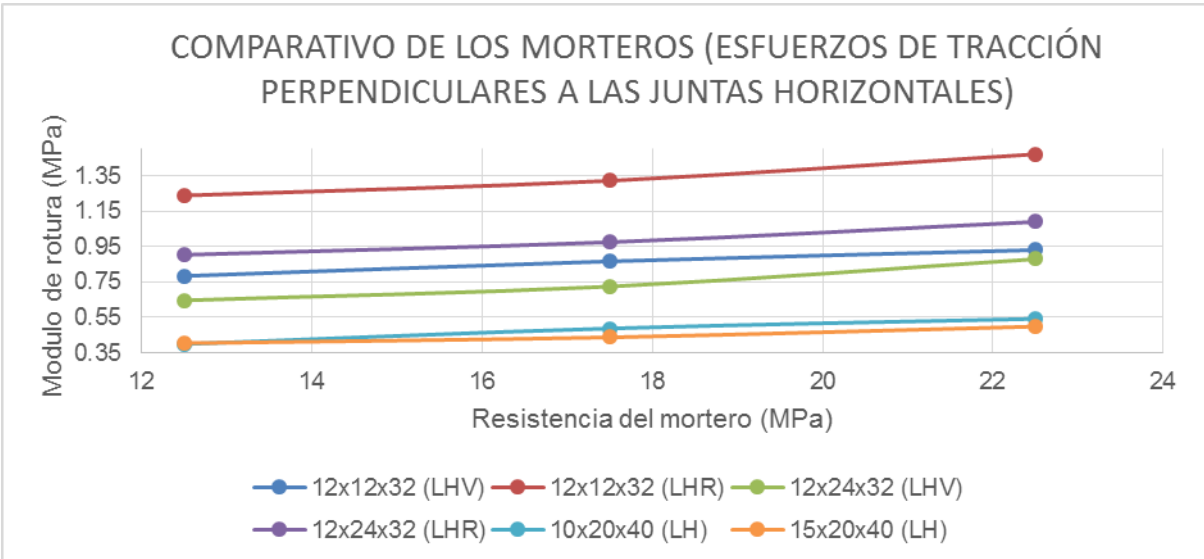


Figura 10. Comparación del módulo de rotura por tipo de mortero y de unidad.

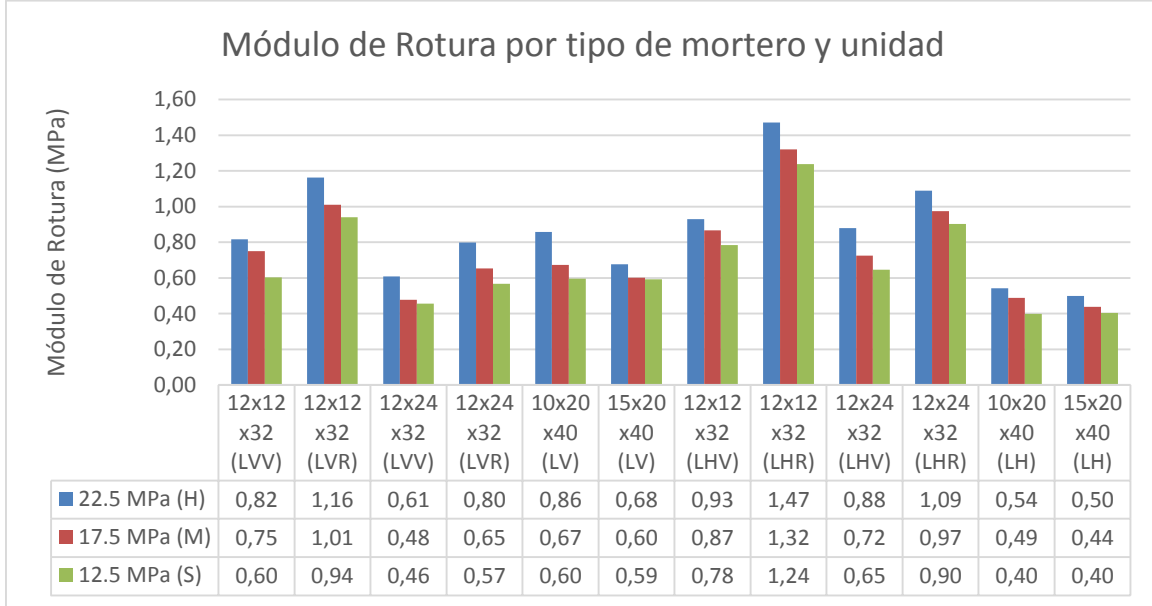


Figura 11. Valores de Módulo de rotura comparado en unidades de perforación vertical y horizontal.

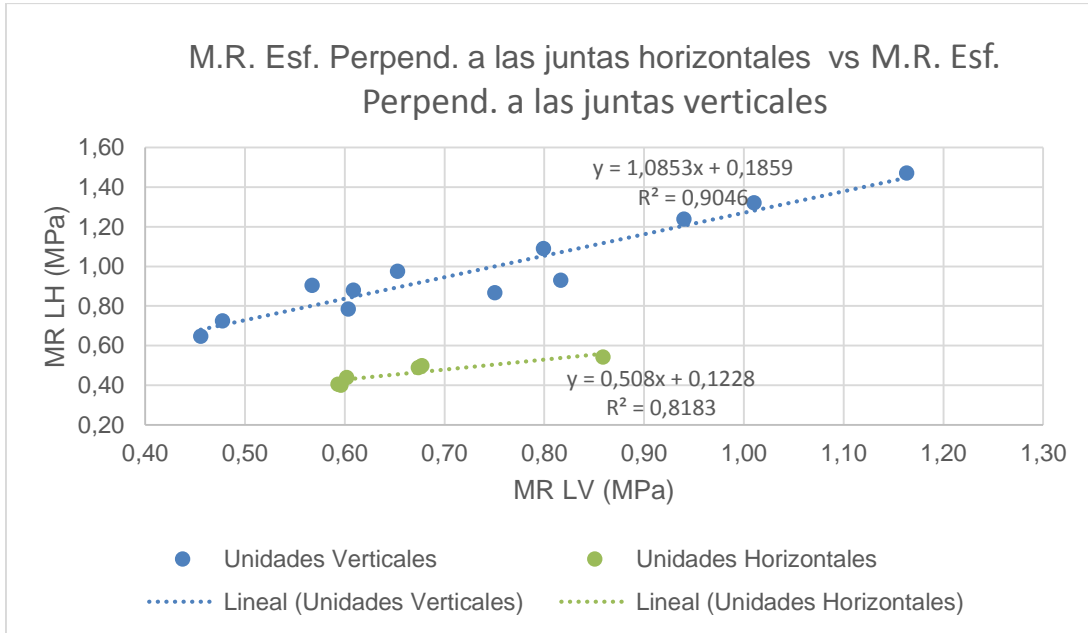


Figura 12. Comparativo de la Investigación con el reglamento NSR-10.

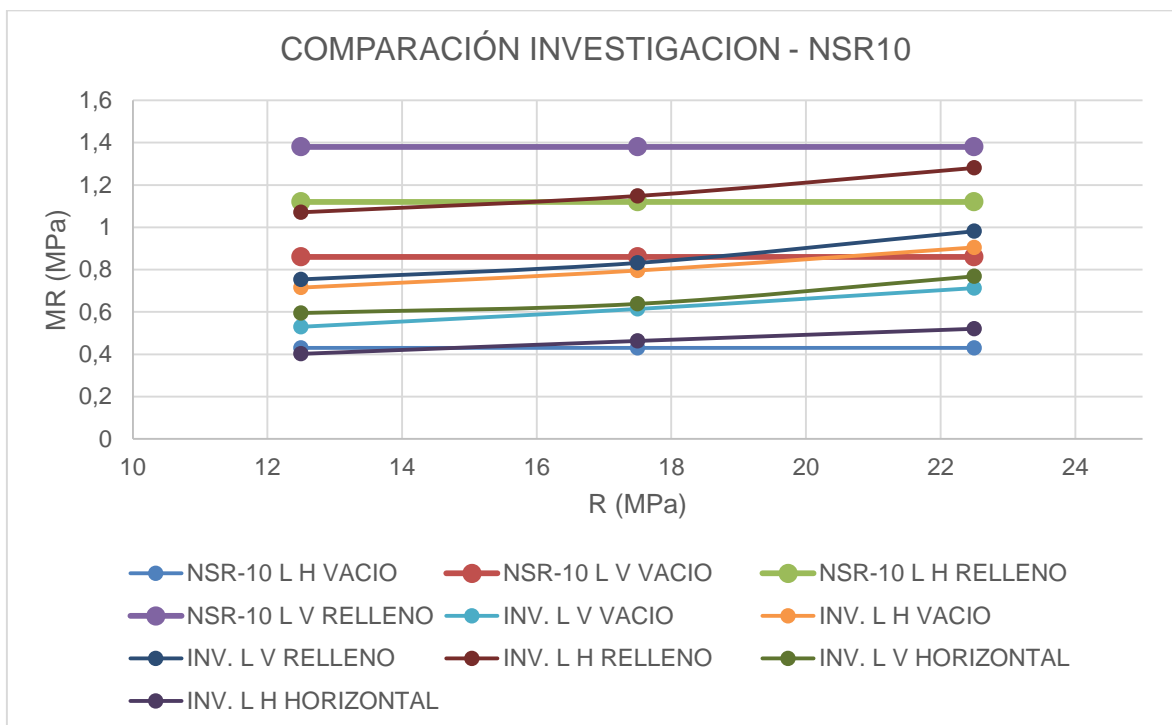


Tabla 8. Comparativo de resultados obtenidos con los del título D del NSR-10.

Dirección de los esfuerzos de tracción por flexión y tipo de mampostería.	Morteros de cemento portland y cal		Resultados investigación (min)	
	H, M, ó S	N	H, M, ó S	N
Perpendicular a las juntas horizontales				
Unidades Macizas	0.69	0.52	-	-
Unidades de perforación vertical				
Sin rellenar	0.43	0.33	0.65	-
Rellenas con morteros de inyección	1.12	1.09	0.90	-
Unidades de perforación horizontal	-	-	0.40	-
Perpendicular a la junta vertical				
Unidades Macizas	1.38	1.03	-	-
Unidades de perforación vertical				
Sin rellenar	0.86	0.66	0.46	-
Rellenas y parcialmente rellenas con morteros de inyección	1.38	1.03	0.57	-
Unidades de perforación horizontal	-	-	0.59	-

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el ensayo de tasa inicial de absorción (T.I.A.), se determinó que las muestras 1, 3 y 4 identificadas como ladrillo de perforación vertical 12x12x32, ladrillo de perforación horizontal 10x20x40 y ladrillo de perforación horizontal 15x20x40 respectivamente, se debían humedecer por un periodo conveniente antes de la elaboración de los muros, dado que tenían un valor de T.I.A. que oscilaba entre 0.15 g/cm²/min y 0.25 g/cm²/min; mientras que la muestra 2 que corresponde al ladrillo de perforación vertical 12x24x32 se debía humedecer 24 horas antes de la construcción del muro, ya que arrojó un valor de T.I.A. promedio de 0.272 g/cm²/min.

En el proceso de ensayo se evidenció que en los muretes tipo 2 (esfuerzos perpendiculares a la junta vertical) de perforación vertical, la falla se producía en la junta vertical que unía las unidades, generando fisuración en los ladrillos que hacían parte del plano de la misma.

En los muretes tipo 1 (esfuerzos perpendiculares a la junta horizontal) de perforación vertical, la falla se presentó por la junta en la zona central del murete, observándose que la adherencia disminuía a medida que decrecía la resistencia del mortero con el cual estaba elaborado el murete.

Por lo anterior se puede afirmar que en las unidades de perforación vertical se presentaron las fallas típicas planteadas por la literatura (falla a través de las juntas y falla a través de las juntas y las unidades).

En los muretes tipo 2 de perforación vertical con mortero de inyección no se observó un aumento considerable en la resistencia a la flexión, ya que la adherencia del mortero seguía siendo el factor determinante de la falla del murete, según lo dicho anteriormente.

En los muretes de perforación horizontal la dirección de los esfuerzos de tracción se dan en el sentido longitudinal del elemento, generando así una mayor rigidez o resistencia en el eje que intercepta a los tabiques de las unidades.

En las gráficas se evidencia que el módulo de rotura de las muestras en las que los esfuerzos de tracción son perpendiculares a las juntas horizontales, es mayor que las muestras ensayadas en las que los esfuerzos de tracción son perpendiculares a la junta vertical y se observa que la diferencia entre los puntos de cada tipo de mortero es proporcional.

Ante el ensayo de los muretes con los diferentes tipos de mortero se pudo observar que los muros conformados con las unidades 12x12x32, tuvieron un mejor comportamiento de resistencia respecto a las demás unidades.

Del gráfico No. 3 Se puede deducir que los mejores resultados de resistencia se obtuvieron con las unidades de 12x12x32 rellenas (esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta horizontal) y los resultados más desfavorables fueron los obtenidos con las unidades de 12x24x32 vacíos (esfuerzos de tracción perpendiculares a la junta vertical).

Al realizar la comparación del módulo de rotura de los muretes tipo 1 con los muretes tipo 2 (Gráfico No.4), se observa que los datos de los muros elaborados con unidades de perforación vertical tienen una muy buena correlación, al estar el valor de R² cercano a la

unidad; en los muros construidos con unidades de perforación horizontal la correlación es buena al estar su valor en 0,8. Por la pendiente de las líneas de tendencia se puede afirmar que para las unidades de perforación vertical la relación entre los módulos de rotura es igual mientras que para las unidades de perforación horizontal la relación entre el módulo de rotura de los muros tipo 2 y los muretes tipo 1 es alrededor del doble, lo anterior se da ya que la línea de tendencia tiene una pendiente de 0,5.

4. CONCLUSIONES

El promedio del muestreo de la resistencia a la compresión de los morteros realizado en cada una de las sesiones de construcción de muretes, tiende a estar muy cerca del valor del diseño original establecido por el reglamento, por lo tanto para evitar una mayor dispersión se usa el valor del diseño.

La correlación entre la resistencia a la compresión de los muretes y el módulo de rotura no fue posible ya que no había un patrón de tendencia entre los datos, evidenciando un alto grado de dispersión para todos los tipos de muretes.

La mampostería no estructural se debe elaborar con un mortero de buena calidad para garantizar la adherencia entre las unidades.

En el análisis de resultados se observó que el NSR-10 en la tabla D.5.8-1 no contempla valores de módulo de rotura para unidades de perforación horizontal, por lo tanto los valores presentados serían un complemento a la misma.

Teniendo en cuenta las diferencias entre la investigación y el reglamento, se puede inferir que suministra una mayor confiabilidad los resultados arrojados por la primera mencionada anteriormente, ya que estos fueron obtenidos por ensayos físicos y con materiales locales.

En los muretes tipo 1, elaborados con unidades de perforación horizontal se pudo apreciar que en algunos de ellos la falla se generaba por las unidades de arcilla más no por el mortero, lo anterior se cumple para el mortero tipo H, corroborando que la adherencia es función de la resistencia. (ima 4012-05-08 08-22-44)

En el ensayo de las arenas se encontró con que la arena de revoque y la de pega no cumplieron con la granulometría establecida por la norma, por lo tanto se realizó una combinación usada por los constructores, la cual se ajusta a los límites granulométricos establecidos por la norma.

Según los resultados obtenidos se observa que el módulo de rotura aumenta proporcionalmente con la resistencia del mortero de pega.

Por los resultados del módulo de rotura obtenidos en la investigación se puede concluir que los tabiques de la unidad cumplen la función de brindar rigidez al muro dependiendo de la dirección en que viajen los esfuerzos; lo anterior se evidencia en la tabla No. 7, donde los muretes tipo 1 dieron una mayor resistencia que los muretes tipo 2, para el caso de las unidades de perforación vertical; caso contrario a las unidades de perforación horizontal donde con los muros tipo 2 se obtuvo una mayor resistencia a la flexión que con los muros tipo 1.

5. RECOMENDACIONES

Para investigaciones futuras se hacen las siguientes recomendaciones:

- Realizar una profundización en la investigación del módulo de rotura en unidades de arcilla, usando otros tipos de unidad u otros tipos de mortero.
- Investigar el efecto de la inyección parcial en los muros de mampostería.
- Realizar una investigación del módulo de rotura en muros con unidades de concreto.

BIBLIOGRAFÍA

- Hamid, AA and Drysdale, RG., "Flexural Tensile Strength of Concrete Block Masonry", Journal of the Structural Engineering Vol. 114, No.1, January 1988, PP 50, 65.
- Article, Evaluation of the Egyptian code for masonry for estimating out-of-plane flexure of masonry, GM Ghanem*, Helwan University, Egypt.
- Article, New Test for Determination of Masonry Tensile Bond Strength, Fouad M. Khalaf
- DRYSDALE G, Robert y OTROS. Masonry Structures Behavior and Design. New Jersey, USA. Prentice Hall. 1994.
- GALLEGOS V., Héctor. Albañilería Estructural. 2 ed. Lima : Fondo editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1991. 483 p.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento colombiano de diseño y construcción sismo resistente. NSR-10, ley 400 de 1997 y decretos reglamentarios.
- INGECONCRETO – DIVISIÓN EDUCACIONAL. Curso de análisis y diseño de mampostería estructural. Medellín, 2010.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). Normas técnicas para ingeniería civil y arquitectura. Santafé de Bogotá.
- POSADA A., Santiago y SALGADO G., Rodrigo E. Efecto del Mortero de Pega en los Muros de Mampostería Estructural. Medellín, 1987. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional, Facultad de Minas.