

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en  
arcilla, reforzados con barras de FRP**

**Luis Alfonso Quintana Ruiz**

**Bogotá, D.C., 05 de junio 2017**



**Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en estructuras**

**Nancy Torres Castellanos, PhD. – Director**

**Gustavo Tumialán, PhD. - Asesor**

**Bogotá, D.C., 05 de junio 2017**



La tesis de maestría titulada “Comportamiento a flexión pura, de muros estructurales de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP”, presentada por Luis Alfonso Quintana Ruiz, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras

Director de la tesis

Nancy Torres Castellanos

Jurado

Carlos Palomino

Jurado

Jorge Ignacio Segura Franco

## Resumen

Durante los últimos años se ha venido desarrollando nuevas tecnologías y materiales, con el fin de solucionar algunos problemas que se han presentado con los materiales y técnicas tradicionales utilizados en la industria de la construcción. Entre ellos, tenemos el concreto y la mampostería reforzada con barras de acero los cuales dadas sus amplias ventajas son los materiales de construcción más ampliamente usados, sin embargo, las estructuras que los emplean tienen el inconveniente de ser susceptibles a la corrosión; causando un serio problema y de implicaciones económicas mayores. Dentro de las estructuras sometidas a ambientes agresivos, encontramos las estructuras marinas, puentes, parqueaderos o muros de contención expuestos a ambientes salinos, haciendo que se reduzca la alcalinidad del concreto y generando posteriormente corrosión en el acero.

Para reducir estos problemas, recientemente se han implementado en la industria de la construcción materiales compuestos cuyo refuerzo se compone de fibras y se encuentran recubiertos por resinas poliméricas, estos materiales son conocidos como FRP (Fiber Reinforced Polymer, por sus siglas en inglés). Estos materiales tienen altas resistencias a la corrosión, además no presentan reacciones en zonas donde la estructura está expuesta al medio ambiente, y sus propiedades físicas y mecánicas son suficientemente atractivas para el sector de la construcción.

Adicionalmente, el FRP posee propiedades mecánicas atractivas como lo es su alta resistencia a la tensión, su baja densidad y su baja conductividad eléctrica. Aunque por otro lado se debe reconocer que estos materiales tienen un comportamiento frágil, lo cual es indeseado para estructuras sísmo-resistente en las cuales la filosofía se basa en el diseño de estructuras dúctiles. En cuanto a la normatividad ya existen diferentes guías que produce el comité ACI 440 del American Concrete Institute. Es así como en lo relacionado con el diseño de estructuras de concreto reforzado con barras de FRP, ya se cuenta con la guía del ACI 440, la cual tiene como base numerosos ensayos a diferentes elementos estructurales, sometidos a sollicitaciones como tensión, compresión, corte, flexión entre otras.

Dado el interés en el medio colombiano en estar a la vanguardia con las últimas tecnologías y materiales disponibles, se planteó un proyecto de investigación, con el fin de evaluar la capacidad a flexión de mampostería de arcilla reforzada con barras de FRP ante cargas perpendiculares al plano y dar los primeros pasos para generar un protocolo preliminar de diseño a futuro, basado en el ACI 440 y el TMS402/ACI 530, Dado que aún no existe guía de diseño que contemple el comportamiento de mampostería ante esta sollicitación. El programa experimental contempló la construcción y el ensayo de 16 muros de mampostería en arcilla, siete muros fueron reforzados con barras de GFRP (Glass fiber

reinforced polymer, por sus siglas en ingles), los siguientes siete se reforzaron con barras de CFRP (Carbon fiber reinforced polymer, por sus siglas en ingles,) y los dos restantes se reforzaron con barras de acero convencional.

Las variables que se tuvieron en cuenta en la investigación fueron las dimensiones del muro en planta y las cuantías con las cuales se reforzaron los muros.

Los muros se ensayaron en un marco de prueba el cual tenía una longitud entre apoyos de 2030 mm y cargaba los muros con dos cargas distribuidas en los tercios a lo largo del muro, buscando un comportamiento de flexión pura en el tercio central.

Se observó un comportamiento muy similar del modelo analítico, comparado con los resultados experimentales para estados de carga de servicio. En cuanto a las cargas últimas, se encuentran diferencias entre la teoría y los ensayos.

## Abstract

In recent years, new technologies have been developed in the construction industry. Among them, new materials have been used to solve issues from the past. Some of them has disadvantages like low corrosion strenght

For many structures, the alkalinity of the concrete is reduced by aggressive environments, such as bridges, parking spaces or structures exposed to saline environments, which generate corrosion phenomenon on the rebar. Currently, composite materials made by fibers and coated with polymer resins have become a great alternative to reduce the corrosion problems on the Steel. These materials are known as FRP (Fiber Reinforced Polymer) and have attractive mechanical properties such as its high tensile strength. However, they have a fragile behavior which is undesirable for earthquake-resistant structures, in comparison with the conventional materials used in the design, which are ductile materials.

Actually ACI 440.1R has a Guide for Design and Construction of Structural Concrete Reinforced With FRP Bars

This research carried out the construction and the testing of 16 clay brick masonry walls. Seven walls were reinforced with GFRP (Glass fiber reinforced polymer), other seven with CFRP (Carbon fiber reinforced polymer) and the remaining with conventional steel. For the three types of reinforced were used 12 mm diameter rebars.

The variables that were taken into account in the research were the dimensions of the wall in plan and the reinforced ratio with which were reinforced the walls.

The walls were tested on a test framework which has a length between the supports of 2030 mm. Two distributed loads were applied by the framework in the third height of the walls, which generates pure bending in the middle third to study the bending behavior perpendicular to the plane of the wall with the different types of rebars mentioned above.

## Índice general

|  |    |
|--|----|
| Resumen .....  | 4  |
| Índice general .....   | 7  |
| 1.1.1 Índice de tablas .....   | 11 |
| 1.1.2 Índice de figuras .....  | 14 |
| 1.1.3 Índice de anexos .....   | 20 |
| 1 MARCO TEÓRICO .....  | 27 |
| 1.1 BARRAS DE FRP .....  | 27 |
| 1.1.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FRP .....  | 28 |
| 1.2 RESISTENCIA DE DISEÑO DE LA MAMPOSTERÍA BASADO EN TMS 402/ACI 530/ASCE-5 ..... | 29 |
| 1.2.1 FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA .....                                   | 29 |
| 1.2.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MAMPOSTERÍA .....                          | 29 |
| 1.2.3 RESISTENCIA DEL MORTERO DE RELLENO .....                                     | 29 |
| 1.2.4 MÓDULO DE ROTURA DE LA MAMPOSTERÍA .....                                     | 30 |
| 1.2.5 SUPOSICIONES DE DISEÑO PARA LA MAMPOSTERÍA REFORZADA ..                      | 30 |
| 1.2.6 RESISTENCIA NOMINAL DE LA FLEXIÓN, CON CARGAS FUERA DEL PLANO                | 31 |
| 1.2.7 DEFLEXIONES PARA MUROS DE MAMPOSTERÍA .....                                  | 31 |
| 1.3 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO BASADOS EN ACI 440.1R .....     | 32 |
| 1.3.1 FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA .....                                   | 32 |
| 1.3.2 FILOSOFIA DE DISEÑO .....  | 32 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.3.3 | SUPOSICIONES DE DISEÑO .....  | 32 |
| 1.3.4 | RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....  | 33 |
| 1.3.5 | MODOS DE FALLA .....  | 33 |
| 1.3.6 | RESISTENCIA A LA FLEXIÓN CUANDO SE PRESENTA APLASTAMIENTO EN EL CONCRETO .....                        | 34 |
| 1.3.7 | RESISTENCIA A LA FLEXIÓN CUANDO SE PRESENTA ROTURA EN EL FRP  | 35 |
| 1.4   | CÁLCULO DE DEFLEXIONES METODOLOGÍA DE BRANSON .....   | 36 |
| 1.5   | CÁLCULO DE DEFLEXIONES METODOLOGÍA BISCHOFF .....   | 37 |
| 2     | ESTADO DEL ARTE .....   | 38 |
| 2.1   | OUT-OF-PLANE FLEXURAL BEHAVIOR OF UNREINFORCED RED BRICK WALLS STRENGTHENED WITH FRP COMPOSITES ..... | 38 |
| 2.2   | STRENGTHENING WITH FRP BARS OF URM WALLS SUBJECT TO OUT-OF-PLANE LOADS .....                          | 39 |
| 2.3   | EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON OUT-OF-PLANE BEHAVIOR OF GFRP RETROFITTED MASONRY PANELS .....          | 40 |
| 2.4   | LATERAL OUT-OF-PLANE STRENGTHENING OF MASONRY WALLS WITH COMPOSITE MATERIALS.....                     | 41 |
| 3     | OBJETIVOS .....   | 43 |
| 3.1   | OBJETIVO GENERAL.....   | 43 |
| 3.2   | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....  | 43 |
| 4     | PROGRAMA EXPERIMENTAL .....   | 44 |
| 4.1   | METODOLOGÍA.....  | 44 |
| 4.2   | CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....   | 44 |
| 4.2.1 | CILINDROS MORTERO DE PEGA .....   | 45 |
| 4.2.2 | CILINDROS GROUT DE RELLENO .....  | 46 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.2.3 | MURETES DE MAMPOSTERÍA.....  | 47 |
| 4.2.4 | BARRAS DE FRP.....   | 48 |
| 4.3   | MARCO DE PRUEBA.....   | 50 |
| 4.4   | PROCESO CONSTRUCTIVO.....  | 54 |
| 4.5   | NOMENCLATURA DE MUROS.....   | 55 |
| 5     | ENSAYOS A LOS MATERIALES.....  | 62 |
| 5.1   | RESULTADOS MORTERO DE PEGA.....  | 62 |
| 5.2   | RESULTADOS MORTERO DE RELLENO.....   | 62 |
| 5.3   | RESULTADOS MURETES DE MAMPOSTERÍA.....   | 64 |
| 5.4   | RESULTADOS DE ENSAYOS A BARRAS DE FRP.....                                       | 65 |
| 6     | CÁLCULOS TEÓRICOS DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA.....      | 66 |
| 6.1   | CÁLCULO DEL MOMENTO RESISTENTE DE MURO DE MAMPOSTERÍA.....                       | 66 |
| 6.1.1 | MOMENTO RESISTENTE DE UN MURO QUE FALLA POR APLASTAMIENTO EN LA MAMPOSTERÍA..... | 66 |
| 6.1.2 | MOMENTO RESISTENTE DE UN MURO QUE FALLA POR ROTURA EN EL FRP. 70                 |    |
| 6.2   | CÁLCULO DE DEFLEXIONES EN EL CENTRO DE LA LUZ DE LOS MUROS                       | 73 |
| 6.2.1 | CÁLCULO DE DEFLEXIONES POR LA METODOLOGIA BRANSON.....                           | 73 |
| 6.2.2 | CÁLCULO DE DEFLEXIONES POR LA METODOLOGIA BISCHOFF.....                          | 77 |
| 7     | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....   | 79 |
| 7.1   | RESULTADOS DE ENSAYOS A MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON GFRP.....            | 79 |
| 7.2   | RESULTADOS DE ENSAYOS A MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON CFRP.....            | 84 |
| 7.3   | COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MUROS.....                                  | 89 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 7.3.1 | MOMENTO TEÓRICO CONTRA MOMENTO EXPERIMENTAL .....  | 89  |
| 7.4   | COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO DE UN MURO REFORZADO CON FRP Y UN MURO REFORZADO CON ACERO ..... | 92  |
| 7.5   | COMPARACIÓN DE DEFLEXIONES TEÓRICAS CONTRA EXPERIMENTALES                                    | 94  |
| 7.5.1 | DEFLEXIONES EN MUROS DE MAMPOSTERÍA CON BLOQUES DE CONCRETO.....                             | 100 |
| 8     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....   | 105 |
| 8.1   | CONCLUSIONES.....  | 105 |
| 8.2   | RECOMENDACIONES.....   | 106 |
| 9     | BIBLIOGRAFIA.....  | 108 |
| 10    | ANEXOS.....  | 109 |

### 1.1.1 Índice de tablas

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabla 1-1   | Módulo de rotura fr. Fuente tomado: TMS 402/ACI 530/ASCE-5.....                | 30  |
| Tabla 4-1   | Ensayos para caracterizar los materiales. Fuente: el autor.....                | 44  |
| Tabla 4-2   | Resumen de muros del programa experimental. Fuente: el autor.....              | 55  |
| Tabla 5-1   | Propiedades mecánicas de la mampostería. Fuente: el autor.....                 | 64  |
| Tabla 5-2   | Propiedades mecánicas barras de FRP.....                                       | 65  |
| Tabla 6-1   | Resultados teóricos de muros reforzados con FRP. Fuente: el autor .....        | 72  |
| Tabla 7-1   | Resumen de resultados. Fuente: el autor .....                                  | 90  |
| Tabla 7-2   | Resultados ensayos de módulo de rotura.....                                    | 97  |
| Tabla 10-1  | Resultados de ensayos de cilindros de mortero de pega. Fuente del autor<br>110 |     |
| Tabla 10-2  | Resultados de ensayos de cilindros de mortero de pega. Fuente el autor<br>112  |     |
| Tabla 10-3  | Datos de la curva esfuerzo deformación murete M1. Fuente: el autor...          | 116 |
| Tabla 10-4  | Propiedades mecánicas murete M1. Fuente: el autor .....                        | 117 |
| Tabla 10-5  | Datos de la curva esfuerzo deformación murete M2. Fuente: el autor...          | 118 |
| Tabla 10-6  | Propiedades mecánicas murete M2. Fuente: el autor .....                        | 119 |
| Tabla 10-7  | Datos de la curva esfuerzo deformación murete M3. Fuente: el autor...          | 120 |
| Tabla 10-8  | Propiedades mecánicas murete M3. Fuente: el autor .....                        | 122 |
| Tabla 10-9  | Datos de la curva esfuerzo deformación murete M4. Fuente: el autor...          | 123 |
| Tabla 10-10 | Propiedades mecánicas murete M4. Fuente: el autor .....                        | 124 |
| Tabla 10-11 | Datos de la curva esfuerzo deformación murete M5. Fuente: el autor...          | 125 |
| Tabla 10-12 | Propiedades mecánicas murete M5. Fuente: el autor .....                        | 126 |

|                      |   |     |
|----------------------|---|-----|
| Tabla 10-13          | Datos de la curva esfuerzo deformación murete M6. Fuente: el autor...           | 127 |
| Tabla 10-14          | Propiedades mecánicas murete M6. Fuente: el autor .....                         | 128 |
| Tabla 10-15          | Resumen propiedades mecánicas de los muretes. Fuente: el autor .....            | 130 |
| Tabla 10-16<br>autor | Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra GFRP V1. Fuente el<br>133 |     |
| Tabla 10-17          | Propiedades mecánicas barra GFRP V1. Fuente el autor .....                      | 134 |
| Tabla 10-18<br>autor | Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra GFRP V2. Fuente el<br>134 |     |
| Tabla 10-19          | Propiedades mecánicas barra GFRP V2. Fuente el autor .....                      | 135 |
| Tabla 10-20          | Resumen propiedades mecánicas barras GFRP. Fuente el autor .....                | 136 |
| Tabla 10-21<br>autor | Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V1. Fuente el<br>137 |     |
| Tabla 10-22          | Propiedades mecánicas barra CFRP V1. Fuente el autor .....                      | 138 |
| Tabla 10-23<br>autor | Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V2. Fuente el<br>139 |     |
| Tabla 10-24          | Propiedades mecánicas barra CFRP V2. Fuente el autor .....                      | 140 |
| Tabla 10-25<br>autor | Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V3. Fuente el<br>141 |     |
| Tabla 10-26          | Propiedades mecánicas barra CFRP V3. Fuente el autor .....                      | 142 |
| Tabla 10-27<br>autor | Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V4. Fuente el<br>143 |     |
| Tabla 10-28          | Propiedades mecánicas barra CFRP V4. Fuente el autor .....                      | 143 |
| Tabla 10-29          | Propiedades mecánicas de las barras CFRP .....                                  | 146 |
| Tabla 10-30          | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M1-G. Fuente: el autor<br>148    |     |
| Tabla 10-31          | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M2-G. Fuente: el autor<br>152    |     |

|             |   |
|-------------|---|
| Tabla 10-32 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M3-G. Fuente: el autor<br>155  |
| Tabla 10-33 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M4-G. Fuente: el autor<br>159  |
| Tabla 10-34 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M5-G. Fuente: el autor<br>161  |
| Tabla 10-35 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M7-G. Fuente: el autor<br>163  |
| Tabla 10-36 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M8-C. Fuente: el autor<br>166  |
| Tabla 10-37 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M9-C. Fuente: el autor<br>170  |
| Tabla 10-38 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M10-C. Fuente: el autor<br>172 |
| Tabla 10-39 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M11-C. Fuente: el autor<br>174 |
| Tabla 10-40 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M12-C. Fuente: el autor<br>178 |
| Tabla 10-41 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M13-C. Fuente: el autor<br>182 |
| Tabla 10-42 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M15-S. Fuente: el autor<br>186 |
| Tabla 10-43 | Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M16-S. Fuente: el autor<br>189 |

## 1.1.2 Índice de figuras

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 1-1  | Esfuerzo y deformaciones para los diferentes modos de falla en condiciones últimas. Fuente: tomado ACI 440.1R (Fig 8-2).....     | 34 |
| Figura 2-1  | Montaje del ensayo realizado. Tomado: Ayman S. Mosallam. 2006 .....  | 39 |
| Figura 2-2  | Muro a escala real reforzado externamente con barras de FRP. Tomado: Nestore Galati, Gustavo Tumialan, Antonio Nanni. 2005. .... | 39 |
| Figura 2-3  | Esquema de reforzamiento del muro con FRP. Tomado: Razieh Sistani Nezhad, Mohammad Z. Kabir. 2016. ....                          | 40 |
| Figura 2-4  | Esquema de los muros. Tomado: Ehab Hamed and Oded Rabinovitch.....   | 41 |
| Figura 4-1  | Cilindros de mortero de pega. Fuente: el autor .....   | 45 |
| Figura 4-2  | Ensayos a cilindros mortero de pega. Fuente: el autor .....  | 45 |
| Figura 4-3  | Cilindros de mortero de relleno. Fuente: el autor .....  | 46 |
| Figura 4-4  | Ensayo a cilindros mortero de relleno. Fuente: el autor .....  | 46 |
| Figura 4-5  | Muretes de mampostería sin inyección de grout de relleno. Fuente: el autor<br>47   |    |
| Figura 4-6  | Muretes de mampostería con inyección de grout. Fuente: el autor .....  | 47 |
| Figura 4-7  | Montaje del ensayo a muretes de mampostería. Fuente: el autor .....  | 48 |
| Figura 4-8  | Tubo de acero para anclaje de la barra. Fuente: el autor.....  | 49 |
| Figura 4-9  | Barras de FRP con tubos metálicos en sus extremos. Fuente: el autor .....  | 49 |
| Figura 4-10 | Ensayo a barras de FRP. Fuente: el autor .....   | 50 |
| Figura 4-11 | Plano esquemático del marco de prueba. Fuente: el autor.....   | 51 |
| Figura 4-12 | Marco de prueba Fuente: el autor .....   | 52 |
| Figura 4-13 | Detalle de conexión vigas UPN 200 a barra roscada. Fuente: el autor....  | 53 |
| Figura 4-14 | Perfiles 80X80X3 mm, para carga y apoyo de los muros. Fuente: el autor<br>54   |    |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 4-15 | Viga de cimentación S=20X25 .....   | 54 |
| Figura 4-16 | Configuración de muros, dimensiones y refuerzo. Fuente: el autor .....  | 55 |
| Figura 4-17 | Configuración dimensional y de refuerzo de los muros. Fuente: el autor.   | 57 |
| Figura 4-18 | Construcción del muro en mampostería. Fuente: el autor .....  | 58 |
| Figura 4-19 | Instrumentación de barras de FRP. Fuente: el autor .....  | 59 |
| Figura 4-20 | Inyección mortero de relleno en los muros de mampostería. Fuente: el autor<br>60  |    |
| Figura 4-21 | Instrumentación de muros. Fuente: el autor. ....  | 61 |
| Figura 5-1  | Cilindros mortero de pega. Fuente: el autor .....   | 62 |
| Figura 5-2  | Cilindros mortero de relleno. Fuente: el autor .....  | 63 |
| Figura 5-3  | Ensayo típico de compresión a muretes de mampostería. Fuente: el autor  | 64 |
| Figura 5-4  | Falla típica de una barra de GFRP. Fuente: el autor.....  | 65 |
| Figura 5-5  | Falla típica barra de CFRP. Fuente: el autor.....   | 65 |
| Figura 6-1  | Esquema de falla cuando se alcanza la deformación unitaria última en la mampostería “aplastamiento”. Fuente el autor..... | 67 |
| Figura 6-2  | Esquema de falla cuando se alcanza la deformación unitaria última en el FRP “Rotura”. Fuente el autor.....                | 70 |
| Figura 6-3  | Módulo de rotura muro M1-G.....   | 74 |
| Figura 7-1  | Ciclos de carga y descarga, Curva carga contra deflexión Muro M2-G. Fuente: el autor.....                                 | 79 |
| Figura 7-2  | Curvas momento contra deformación de los muros reforzados con GFRP. Fuente: el autor.....                                 | 80 |
| Figura 7-3  | Momentos contra deformaciones unitarias en el refuerzo para barras de GFRP. Fuente: el autor.....                         | 81 |
| Figura 7-4  | Momentos contra deformaciones unitarias en la mampostería para muros reforzados con barras de GFRP. Fuente: el autor..... | 82 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 7-5  | Falla típica en los muros de mampostería reforzados con barras de GFRP.<br>Fuente: el autor.....   | 83 |
| Figura 7-6  | Ciclos de carga y descarga, Curva carga contra deflexión Muro M9-C.<br>Fuente: el autor.....   | 84 |
| Figura 7-7  | Curvas momento contra deformación de los muros reforzados con CFRP.<br>Fuente: el autor.....   | 85 |
| Figura 7-8  | Momentos contra deformaciones unitarias en el refuerzo para barras de CFRP. Fuente: el autor .....   | 86 |
| Figura 7-9  | Momentos contra deformaciones unitarias en la mampostería para muros reforzados con barras de CFRP. Fuente: el autor .....                             | 87 |
| Figura 7-10 | Falla típica en los muros de mampostería reforzados con barras de CFRP.<br>Fuente: el autor.....   | 88 |
| Figura 7-11 | Momentos experimentales máximos de muros con relación a los teóricos.<br>Fuente: el autor.....   | 89 |
| Figura 7-12 | Momento contra deformación muro M2-G, y M15-S. Fuente: El autor.....   | 92 |
| Figura 7-13 | Momento contra deformación muro M9-C, y M16-S. Fuente: El autor.....   | 93 |
| Figura 7-14 | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M1-G. Fuente. El autor .....                                       | 95 |
| Figura 7-15 | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M2-G. Fuente. El autor .....                                       | 95 |
| Figura 7-16 | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M8-C. Fuente. El autor .....                                       | 96 |
| Figura 7-17 | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M9-C. Fuente. El autor .....                                       | 97 |
| Figura 7-18 | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M1-G con el valor de $M_{cr}$ experimental. Fuente. El autor ..... | 98 |
| Figura 7-19 | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M2-G con el valor de $M_{cr}$ experimental. Fuente. El autor ..... | 99 |
| Figura 7-20 | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M8-C con el valor de $M_{cr}$ experimental. Fuente. El autor.....  | 99 |

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Figura 7-21  | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M9-C con el valor de $M_{cr}$ experimental. Fuente. El autor..... | 100 |
| Figura 7-22  | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro de mampostería de concreto M3-G. Fuente. El autor .....           | 102 |
| Figura 7-23  | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro de mampostería de concreto M6-G. Fuente. El autor .....           | 103 |
| Figura 7-24  | Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro de mampostería de concreto M9-C. Fuente. El autor.....            | 104 |
| Figura 10-1  | Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M1. Fuente: el autor...  | 117 |
| Figura 10-2  | Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M2. Fuente: el autor...  | 119 |
| Figura 10-3  | Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M3. Fuente: el autor...  | 122 |
| Figura 10-4  | Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M4. Fuente: el autor...  | 124 |
| Figura 10-5  | Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M5. Fuente: el autor...  | 126 |
| Figura 10-6  | Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M6. Fuente: el autor...  | 128 |
| Figura 10-7  | Valor promedio de la resistencia de la mampostería $f'_m$ . Fuente: el autor  | 129 |
| Figura 10-8  | Valor Promedio del módulo de elasticidad de los muretes $E_m$ . Fuente: el autor  | 129 |
| Figura 10-9  | Valor promedio de la deformación unitaria última de los muretes $\epsilon_{mu}$ . Fuente: el autor.....   | 130 |
| Figura 10-10 | Preparación e instalación mortero expansivo CRAS TX40T232. Fuente el autor  | 132 |
| Figura 10-11 | Curva esfuerzo deformación barra GFRP V1. Fuente el autor .....   | 133 |
| Figura 10-12 | Curva esfuerzo deformación barra GFRP V2. Fuente el autor .....   | 135 |
| Figura 10-13 | Modo de falla barra GFRP V2. Fuente el autor .....  | 135 |
| Figura 10-14 | Curva esfuerzo deformación barra CFRP V1. Fuente el autor.....  | 138 |
| Figura 10-15 | Modo de falla barra CFRP V1. Fuente el autor.....   | 138 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Figura 10-16 | Curva esfuerzo deformación barra CFRP V2. Fuente el autor.....                       | 140 |
| Figura 10-17 | Curva esfuerzo deformación barra CFRP V3. Fuente el autor.....                       | 141 |
| Figura 10-18 | Modo de falla barra CFRP V3. Fuente el autor.....                                    | 142 |
| Figura 10-19 | Curva esfuerzo deformación barra CFRP V4. Fuente el autor.....                       | 143 |
| Figura 10-20 | Valor promedio de resistencia de las barras de CFRP. Fuente el autor                 | 144 |
| Figura 10-21 | Valor promedio del módulo de elasticidad de las barras CFRP. Fuente el autor         | 145 |
| Figura 10-22 | Valor promedio de la deformación unitaria última de las barras CFRP. Fuente el autor | 145 |
| Figura 10-23 | Curva de momento contra deformación muro M1-G. Fuente: el autor ...                  | 148 |
| Figura 10-24 | Ensayo muro M1-G. Fuente: el autor .....   | 151 |
| Figura 10-25 | Curva de momento contra deformación muro M2-G. Fuente: el autor ...                  | 152 |
| Figura 10-26 | Ensayo muro M2-G. Fuente: el autor .....   | 154 |
| Figura 10-27 | Curva de momento contra deformación muro M3-G. Fuente: el autor ...                  | 155 |
| Figura 10-28 | Ensayo muro M3-G. Fuente: el autor .....   | 158 |
| Figura 10-29 | Curva de momento contra deformación muro M4-G. Fuente: el autor ...                  | 159 |
| Figura 10-30 | Ensayo muro M4-G. Fuente: el autor .....   | 160 |
| Figura 10-31 | Curva de momento contra deformación muro M5-G. Fuente: el autor ...                  | 161 |
| Figura 10-32 | Ensayo muro M5-G. Fuente: el autor .....   | 162 |
| Figura 10-33 | Curva de momento contra deformación muro M7-G. Fuente: el autor ...                  | 163 |
| Figura 10-34 | Ensayo muro M7-G. Fuente: el autor .....   | 165 |
| Figura 10-35 | Curva de momento contra deformación muro M8-C. Fuente: el autor ...                  | 166 |
| Figura 10-36 | Ensayo muro M8-C. Fuente: el autor.....  | 169 |
| Figura 10-37 | Curva de momento contra deformación muro M9-C. Fuente: el autor ...                  | 170 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Figura 10-38 | Ensayo muro M9-C. Fuente: el autor.....                            | 171 |
| Figura 10-39 | Curva de momento contra deformación muro M10-C. Fuente: el autor . | 172 |
| Figura 10-40 | Ensayo muro M10-C. Fuente: el autor.....                           | 173 |
| Figura 10-41 | Curva de momento contra deformación muro M11-C. Fuente: el autor . | 174 |
| Figura 10-42 | Ensayo muro M11-C. Fuente: el autor.....                           | 177 |
| Figura 10-43 | Curva de momento contra deformación muro M12-C. Fuente: el autor . | 178 |
| Figura 10-44 | Ensayo muro M12-C. Fuente: el autor.....                           | 181 |
| Figura 10-45 | Curva de momento contra deformación muro M13-C. Fuente: el autor . | 182 |
| Figura 10-46 | Ensayo muro M13-C. Fuente: el autor.....                           | 185 |
| Figura 10-47 | Curva de momento contra deformación muro M15-S. Fuente: el autor . | 186 |
| Figura 10-48 | Ensayo muro M15-S. Fuente: el autor.....                           | 188 |
| Figura 10-49 | Curva de momento contra deformación muro M16-S. Fuente: el autor . | 189 |
| Figura 10-50 | Ensayo muro M16-S. Fuente: el autor.....                           | 191 |

### 1.1.3 Índice de anexos

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO A: RESULTADO ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE MORTERO DE PEGA.....    | 109 |
| ANEXO B: RESULTADO ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE MORTERO DE RELLENO..... | 111 |
| ANEXO C: RESULTADO ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN MURETES DE MAMPOSTERÍA.....          | 113 |
| ANEXO D: RESULTADO ENSAYOS DE TENSIÓN EN BARRAS DE FRP.....                      | 131 |
| ANEXO E RESULTADO ENSAYOS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON FRP             | 147 |

## Lista de Símbolos y Abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

| Símbolo | Término   | Unidad SI       |
|---------|---|-----------------|
| Ab      | Área de la barra                                | mm <sup>2</sup> |
| Af      | Área de refuerzo                                | mm <sup>2</sup> |
| b       | Ancho del muro                                  | mm              |
| c       | Profundidad del eje neutro del muro             | mm              |
| d       | Profundidad efectiva del muro                   | mm              |
| Em      | Módulo de elasticidad mampostería               | MPa             |
| Ffu     | Resistencia a la rotura barra FRP               | MPa             |
| Ef      | Módulo de elasticidad barra FRP                 | MPa             |
| f'm     | Resistencia a la compresión mampostería         | MPa             |
| f'cp    | Resistencia a la compresión mortero de pega     | MPa             |
| f'cr    | Resistencia a la compresión mortero de relleno  | MPa             |
| fr      | Módulo de rotura                                | MPa             |
| Fy      | Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo | MPa             |
| Icr     | Inercia con la sección agrietada del muro       | mm <sup>4</sup> |
| Ig      | Inercia del muro                                | mm <sup>4</sup> |
| Kcr     | Curvatura debida al momento de agrietamiento    | rad/mm          |
| Ku      | Curvatura debida al momento último              | rad/mm          |
| L       | Altura del muro                                 | mm              |
| Mn      | Momento de resistencia nominal                  | kN-m            |

|     |  |                    |
|-----|--|--------------------|
| Mcr | Momento de agrietamiento                           | kN-m               |
| n   | Relación modular                                   | MPa/MPa            |
| Lb  | Longitud de la barra                               | mm                 |
| P   | Fuerza de falla en los muros                       | kN                 |
| Pcr | Fuerza de agrietamiento                            | kN                 |
| S   | Módulo elástico de la sección transversal del muro | mm <sup>2</sup> -m |
| t   | Espesor del muro                                   | mm                 |

### Símbolos con letras griegas

| Símbolo         | Término   | Unidad SI |
|-----------------|---|-----------|
| $\alpha_1$      | Relación del promedio de esfuerzos del bloque de compresiones ACI 530 |           |
| $\beta_1$       | Factor para calcular la altura del bloque de compresiones ACI 530     |           |
| $\delta$        | Deformación máxima en el muro   | mm        |
| $\epsilon_{mu}$ | Deformación unitaria última de la mampostería                         | mm/mm     |
| $\epsilon_{fu}$ | Deformación unitaria última en el refuerzo                            | mm/mm     |
| $\epsilon_{fu}$ | Deformación unitaria última de las barras de FRP                      | mm/mm     |
| $\phi_d$        | Diámetro de la barra  | mm        |
| $\phi$          | Coeficiente de reducción de resistencia                               |           |
| $\rho_b$        | Cuantía de refuerzo balanceada  | mm/mm     |
| $\rho$          | Cuantía de refuerzo del muro  | mm/mm     |
| $\sigma_f$      | Esfuerzo en la barra de refuerzo                                      | MPa       |

## Abreviaturas

| Abreviatura | Término   |
|-------------|---|
| ACI         | American Concrete Institute                           |
| AFRP        | Aramid Fiber Reinforced Polymer                       |
| ASTM        | American Society For Testing And Materials            |
| CFRP        | Carbon Fiber Reinforced Polymer                       |
| ECI         | Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Gravito"      |
| FRP         | Fiber Reinforced Polymer                              |
| GFRP        | Glass Fiber Reinforced Polymer                        |
| NSR         | Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente |
| NTC         | Norma Técnica Colombiana                              |
| LVDT        | Linear Variable Differential Transformer              |
| TMS         | The Masonry Society                                   |

## Introducción

Durante los últimos años se ha venido implementando, en obras de infraestructura, el uso de barras de fibras (carbono, vidrio y aramida) como refuerzo principal en elementos de concreto, de antemano es sabido que el comportamiento mecánico de estos polímeros reforzados con fibra, no tiene un modo de falla dúctil, y por el contrario su modo de falla es de tipo frágil. En el medio colombiano existen empresas que han iniciado la comercialización de este producto despertándose el interés de estudiar las propiedades mecánicas de este material, y el comportamiento de elementos estructurales al ser reforzados con estas barras. Adicionalmente, dado que en Colombia predominan las obras en mampostería, también es interesante conocer la interacción que tienen estas barras al usarlas como refuerzo interno y su comportamiento estructural. Es de resaltar que a nivel internacional ya se cuenta con guías para diseñar elementos de concreto reforzados con barras de FRP, pero aún no se cuenta con guías para el diseño de mampostería nueva reforzadas con este material. Entre los países que han investigado las propiedades del FRP, se encuentran algunos países europeos, Canadá y Estados Unidos, incluso ya está anexo a sus reglamentos de concreto como en el caso de Canadá en el código CAN/CSA S806 y en Estados Unidos en el comité del ACI 440.1.

Aun conociendo que este material no tiene el mismo estudio, que ha tenido el acero durante varias décadas, es sabido que tiene suficientes ventajas en lo que respecta al acero estructural, como, por ejemplo, su alta resistencia a la tensión, su bajo peso y su alta resistencia a la fatiga, aunque también tiene algunas desventajas, entre ellas su baja resistencia al impacto, su comportamiento mecánico frágil, además de su bajo módulo de elasticidad.

Las investigaciones que se han realizado, usando barras de FRP como refuerzo de muros de mampostería, han sido en su totalidad para el reforzamiento externo de estructuras existentes, como por ejemplo evaluaciones de tecnologías de reacondicionamiento de muros de mampostería (Nanni et al 2000) en donde se estudiaron diferentes métodos para reforzar muros de mampostería. Una de las metodologías utilizadas fue embeber barras de FRP en las juntas del mortero de pega y estudiar el comportamiento de los muros bajo esfuerzos de corte y flexión tanto en el plano como fuera de él.

En algunas investigaciones que se muestran en el capítulo 2 “ESTADO DEL ARTE” se evidencian ensayos de muros de mampostería reforzados generalmente con barras de FRP colocadas externamente, sin embargo, aún no se han desarrollado investigaciones de mampostería reforzada internamente con barras de FRP.

Debido a que no se tiene hoy en día, guías o reglamentos para el diseño de muros de mampostería reforzados con barras de FRP, se pensó en desarrollar una investigación, que

dé, el primer paso para desarrollar a futuro una guía con este objetivo. Para la realización de la investigación, se desarrolló un programa experimental, el cual se basó primero en determinar de manera teórica la resistencia a la flexión perpendicular al plano de los muros reforzados con barras de FRP, combinado las metodologías descritas en el TMS402/ACI 530 y el código ACI 440.1R y determinar también las deflexiones que estos presentaban bajo diferentes estados de carga. Posteriormente se realizaron los ensayos experimentales de los muros, y se compararon los resultados, los cuales se presentan en este documento el cual se divide en diez capítulos

En el primer capítulo se desarrolla el marco teórico donde se exponen la filosofía y las suposiciones de diseño, los modos de falla, la resistencia teórica a la flexión de muros de mampostería con cargas aplicadas perpendicular al plano y las metodologías para el cálculo de las deflexiones para muros, la teoría se obtuvo del documento TMS402/ACI 530 y del ACI 440.1R.

En el segundo capítulo se presentan algunas de las investigaciones que se han realizado en muros de mampostería reforzados externamente con barras de FRP y con cargas actuando fuera del plano. Estas investigaciones se han realizado para reforzar estructuras existentes, no se encontró bibliografía relacionada con el uso de FRP como refuerzo interno de muros de mampostería nuevos

En el tercer capítulo se plantean objetivos generales y específicos para ser desarrollados en la presente investigación.

Luego, en el cuarto capítulo se expone el programa experimental, donde se definen las diferentes variables de estudio: entre ellas dimensiones en planta del muro, cuantías de refuerzo y tipos de barras de FRP. También se caracterizan los materiales, se presenta el proceso constructivo de los muros de mampostería y la instrumentación tanto de las barras de FRP y de acero como de los muros de mampostería.

En el capítulo quinto se presentan los diferentes ensayos realizados a los materiales.

En el capítulo sexto se desarrolla la metodología para el cálculo teórico, tanto de la capacidad a flexión fuera del plano como de la rigidez de los muros de mampostería, aplicando las metodologías descritas en los códigos TMS402/ACI 530 y ACI 440.1R.

Posteriormente en el capítulo séptimo se presentan los resultados experimentales de los ensayos y se muestra una comparación de resultados teóricos contra experimentales. Allí mismo se muestran resultados de deflexiones de algunos muros de mampostería con unidades en concreto.

En el capítulo octavo se presentan las conclusiones de la investigación y se brindan algunas recomendaciones para investigaciones futuras.

En el capítulo noveno se presenta la bibliografía consultada para el desarrollo de la investigación

Finalmente en el capítulo decimo se incluyen los anexos de los cálculos de los ensayos que se realizaron a los materiales componentes de la mampostería y los cálculos teóricos de cada uno de los muros.

## **1 MARCO TEÓRICO**

Uno de los sistemas estructurales más usados en sótanos, muros de contención o de cerramiento y para edificaciones multifamiliares de diferentes alturas, es el sistema de muros portantes, por lo general de mampostería estructural la cual se ha implementado no solo en Colombia sino también a nivel internacional. Este sistema ofrece grandes ventajas para ciertos tipos de usos desde el punto de vista económico y arquitectónico.

La mampostería desde el punto de vista mecánico se caracteriza por alcanzar grandes resistencias a la compresión, pero baja capacidad ante esfuerzos a tensión de tan solo entre el 5% y el 10% aproximadamente de la resistencia a la compresión, comportamiento similar al concreto. Por esta razón es necesario usar acero de refuerzo para absorber los esfuerzos de tensión que el muro en mampostería no puede resistir.

Actualmente existen diversas normas en Latinoamérica y en estados unidos para el diseño y construcción de muros de mampostería, en Colombia se encuentra vigente el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10, en donde, el titulo D especifica los requisitos mínimos para el diseño y construcción de edificaciones de mampostería, dicha norma está basada en los códigos americanos (TMS402/ACI 530/ ASCE) en el documento Building Code Requirements and Specifications for Masonry Structures.

Unas de las desventajas de la combinación de la mampostería y el acero, es la posible corrosión que puede presentar el acero en zonas de ambientes agresivos como zonas costeras con ambientes salinos para las diferentes estructuras como en edificaciones, parqueaderos, puentes, plataformas marinas muelles entre otros. Implementar el FRP como refuerzo en muros de mampostería en reemplazo del acero convencional sería una alternativa eficiente a esta problemática.

Dado que las barras de FRP, son un material novedoso en el medio Colombiano, a continuación, se presentan algunas de las propiedades mecánicas, las filosofías y las suposiciones de diseño, los factores de resistencia de los diferentes códigos para las diferentes sollicitaciones o modos de falla y las ecuaciones para determinar la resistencia y las deflexiones propuestas por los códigos TMS402/ACI 530/ ASCE y I 440.1R.

### **1.1 BARRAS DE FRP**

Las barras de FRP se caracterizan por presentar un comportamiento aniso trópico, los factores de producción del material como por ejemplo tipo de fibra, el tipo de resina, orientación de la fibra, dimensiones y control de calidad de su producción, juegan un papel importante a la hora de definir las propiedades físicas y mecánicas, que a continuación se presentan

### 1.1.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL FRP

Las propiedades mecánicas de las barras de FRP se describen a continuación (ACI 440.1R, pp 3.2)

- Tensión:

Cuando se carga en tensión una barra FRP no muestra ningún comportamiento plástico, es decir no presenta fluencia antes de la falla, pero en cambio presenta un comportamiento de esfuerzo deformación linealmente elástico hasta la falla.

La rigidez y la resistencia de estas barras dependen de varios factores, debido a que las fibras son las que transmiten la carga. La cantidad en volumen de fibra en la elaboración de las barras afecta significativamente las propiedades en tensión. Las propiedades de rigidez y de resistencia de estas barras están fuertemente ligadas a la relación en volumen de fibra.

- Compresión:

No se recomienda confiar en la capacidad de compresión en estas barras. Numerosos ensayos de barras FRP con relaciones de diámetro longitud de 1:1 o de 1:2 muestran que la resistencia a la compresión es más baja que la resistencia a tensión. El modo de falla de barras FRP sometidas a esfuerzos de compresión, puede incluir, falla por tensión transversal, micro pandeo en las fibras, o falla por corte. El modo de falla depende del tipo de fibra, de la relación en volumen de fibra, y del tipo de resina.

- Corte:

La mayoría de las barras FRP son relativamente débiles ante solicitaciones del corte. Esto es porque usualmente no hay refuerzo transversal en las capas de la resina, la resistencia al corte está gobernada por la relativamente débil matriz del polímero. La orientación de las fibras en una dirección transversal de los ejes podría incrementar la resistencia cortante de las barras, dependiendo del grado de desplazamiento o de orientación, Aunque este proceso es complicado de llevar a cabo en su producción.

- Adherencia

La fuerza de la adherencia entre el concreto y la barra es transferida por:

- La resistencia entre la interface o por adherencia química.
- La resistencia de fricción en la interface de los materiales.
- Y por la unión mecánica debida a la irregularidad de la superficie.

Una vez presentadas las propiedades mecánicas del FRP, se procede a presentar los coeficientes de resistencia, las filosofías de diseño y las ecuaciones de resistencia y cálculo de deflexiones que se proponen en los códigos TMS 402/ACI 530/ASCE-5 y el en ACI 440, lo cual se utilizó para el cálculo teórico de la resistencia y las deflexiones de los muros del programa experimental del presente proyecto.

## **1.2 RESISTENCIA DE DISEÑO DE LA MAMPOSTERÍA BASADO EN TMS 402/ACI 530/ASCE-5**

Existen diversas metodologías para el diseño de elementos estructurales, como por ejemplo la metodología de los esfuerzos admisibles o la metodología de los estados límites, hoy en día la metodología mejor aceptada es la metodología de los estados límites basada en coeficientes de carga y resistencia, la cual consiste en verificar que la estructura sea adecuada para diferentes estados carga y de servicio que puedan presentarse durante su vida útil, (para los elementos reforzados con FRP se debe verificar con detenimiento los estados límites de servicio, debido a que se presentan deflexiones grandes, ya que su módulo de elasticidad es bajo con referencia al del acero convencional)

A continuación, se presentan los coeficientes de resistencia, requisitos para el cálculo de la resistencia a la flexión perpendicular al plano del muro de mampostería en arcilla, y suposiciones de diseño, basados en el (TMS 402/ACI 530/ASCE-5) buildings code requirements for masonry structures

### **1.2.1 FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA**

Para mampostería reforzada los coeficientes de reducción de resistencia estipulados para diferentes sollicitaciones son los siguientes:

- Corte:  $\Phi = 0.80$
- Flexión:  $\Phi = 0.90$
- Carga Axial:  $\Phi = 0.90$
- Combinación de carga axial y flexión:  $\Phi = 0.90$

Y los siguientes son algunos de los requisitos de los materiales especificados para los muros de mampostería.

### **1.2.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MAMPOSTERÍA**

El valor de la resistencia mínima a la compresión, no debe ser menor a  $f'm = 10$  MPa, ni mayor a  $f'm = 41$  MPa para mampostería con unidades de arcilla

### **1.2.3 RESISTENCIA DEL MORTERO DE RELLENO**

La resistencia a la compresión del mortero de relleno no debe exceder  $f'cr = 41$  MPa.

## 1.2.4 MÓDULO DE ROTURA DE LA MAMPOSTERÍA

Para determinar el módulo de rotura de la mampostería el TMS 402/ACI 530/ASCE-5, en la tabla 3.1.8.2 especifica los módulos de rotura para diferentes tipos de muros, con unidades solidas o huecas, celdas rellenas o vacías y para los diferentes tipos de mortero de pega.

Table 3.1.8.2.1 — Modulus of rupture ( $f_r$ ), psi (kPa)

| Direction of flexural tensile stress and masonry type | Mortar types                          |            |  |            |
|---|---------------------------------------|------------|--|------------|
|   | Portland cement/lime or mortar cement |            | Masonry cement or air entrained portland cement/lime |            |
|   | M or S                                | N          | M or S   | N          |
| Normal to bed joints in running or stack bond         |                                       |            |  |            |
| Solid units   | 100 (689)                             | 75 (517)   | 60 (413)   | 38 (262)   |
| Hollow units <sup>1</sup>                             |                                       |            |  |            |
| UngROUTED   | 63 (431)                              | 48 (331)   | 38 (262)   | 23 (158)   |
| Fully grouted   | 163 (1124)                            | 158 (1089) | 153 (1055)   | 145 (1000) |
| Parallel to bed joints in running bond                |                                       |            |  |            |
| Solid units   | 200 (1379)                            | 150 (1033) | 120 (827)  | 75 (517)   |
| Hollow units  |                                       |            |  |            |
| UngROUTED and partially grouted                       | 125 (862)                             | 95 (655)   | 75 (517)   | 48 (331)   |
| Fully grouted   | 200 (1379)                            | 150 (1033) | 120 (827)  | 75 (517)   |
| Parallel to bed joints in stack bond                  | 0 (0)                                 | 0 (0)      | 0 (0)  | 0 (0)      |

<sup>1</sup> For partially grouted masonry, modulus of rupture values shall be determined on the basis of linear interpolation between fully grouted hollow units and ungrouted hollow units based on amount (percentage) of grouting.

Tabla 1-1 Módulo de rotura  $f_r$ . Fuente tomado: TMS 402/ACI 530/ASCE-5

Y para calcular el módulo de rotura de muros que están parcialmente rellenos, se puede hacer una interpolación lineal.

## 1.2.5 SUPOSICIONES DE DISEÑO PARA LA MAMPOSTERÍA REFORZADA

A continuación, se presentan las suposiciones para calcular la resistencia de los muros de mampostería reforzada, bajo flexión fuera del plano.

- Existe compatibilidad de deformaciones entre el refuerzo, el mortero de relleno y la mampostería
- La resistencia nominal de la mampostería a la flexión, está basada en condiciones de equilibrio
- La deformación unitaria última de la mampostería, para unidades de arcilla es de  $\epsilon_{mu} = 0.0035$

- La deformación unitaria del refuerzo y de la mampostería se asume que es directamente proporcional a la distancia del eje neutro.
- La resistencia a la tensión de la mampostería se desprecia para el cálculo de la resistencia a la flexión del muro.
- La relación entre el esfuerzo a compresión y la deformación unitaria de la mampostería se define así:

El esfuerzo de 0.80 f'm se asume uniformemente distribuido sobre el bloque equivalente de compresiones, y la altura del bloque de compresiones será de  $a = 0.80 c$ , donde  $a$ , es la altura del bloque de compresiones y  $c$  es el eje neutro de la sección transversal.

### 1.2.6 RESISTENCIA NOMINAL DE LA FLEXIÓN, CON CARGAS FUERA DEL PLANO

La resistencia nominal a la flexión del muro de mampostería, se determina con la siguiente ecuación.

$$Mn = As * fy * \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

Ecuación 1-1 Resistencia nominal a la flexión de la mampostería. Fuente tomado de TMS 402/ACI 530/ASCE-5 p.p, C-125)

### 1.2.7 DEFLEXIONES PARA MUROS DE MAMPOSTERÍA

Para cargas de servicio se permite una deflexión máxima en la mitad de la altura de muro de:

$$\delta_s \leq 0.007h$$

Ecuación 1-2 Deflexión admisible en la altura media del muro. Fuente tomado: TMS 402/ACI 530/ASCE-5 (ecuación 3-28)

Donde  $h$ , es la altura del muro y  $\delta_s$  es la deflexión máxima admisible en la altura media del muro.

Para determinar las deflexiones se deben aplicar los principios de la mecánica estructural dependiendo de las condiciones de apoyo del elemento estructural y del estado de cargas al que esté sometido.

Se debe tener en cuenta que si el momento actuante es menor al momento de agrietamiento las deflexiones se deben calcular con la inercia bruta de la sección transversal del muro. En caso que el momento actuante sea mayor al momento de agrietamiento se debe determinar la inercia efectiva de la sección transversal del muro a partir de la sección fisurada utilizando la sección transformada.

### **1.3 RESISTENCIA A FLEXIÓN DE ELEMENTOS DE CONCRETO BASADOS EN ACI 440.1R**

A continuación, se presentan las consideraciones generales y los requisitos para el cálculo de la resistencia a flexión de elementos de concreto reforzados con barras de FRP, basado en ACI440.1R

#### **1.3.1 FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA**

Para el diseño a flexión el ACI 440.1R recomienda los siguientes factores de reducción de resistencia

- Rotura en el FRP  $\Phi = 0.55$
- Aplastamiento en el concreto  $\Phi = 0.65$

#### **1.3.2 FILOSOFIA DE DISEÑO**

El diseño a flexión de elementos de concreto reforzado con acero convencional, comúnmente es sub-reforzado, para asegurar fluencia en el acero antes que aplastamiento en el concreto. La fluencia en el acero provee ductilidad y genera una advertencia de falla del elemento. La no ductilidad de las barras FRP, presenta reconsideraciones de este enfoque.

Si las barras de FRP llegan a la rotura, la falla del elemento es súbita. Para evitar este tipo de falla, se deben utilizar márgenes de seguridad más altos de los usados para acero convencional. En ningún caso el elemento reforzado con FRP tendrá un comportamiento dúctil como lo tiene el concreto reforzado con acero.

Por lo tanto, el modo de falla de aplastamiento en el concreto es menos frágil, que la rotura en las barras, cuando el elemento se refuerza con barras FRP. Datos experimentales muestran que la falla de aplastamiento en el concreto, evidencia algún tipo de comportamiento plástico antes de la falla.

En conclusión, ambos modos de falla (Aplastamiento en el concreto y rotura en las barras FRP) para el diseño de estos elementos, son aceptables siempre y cuando se cumplan los criterios de resistencia y servicio. Para compensar la falta de ductilidad, el diseño de estos elementos tiene una reserva de resistencia. Por lo cual el margen de seguridad sugerido por el ACI es por lo tanto mayor que el usado tradicionalmente en elementos de concreto reforzados con acero.

#### **1.3.3 SUPOSICIONES DE DISEÑO**

Los cálculos de la resistencia de la sección transversal están basados en las siguientes suposiciones:

- Las deformaciones del concreto y las barras de FRP son proporcionales a la distancia al eje neutro (las secciones planas permanecen planas)
- La deformación última en el concreto es 0.003
- Se desprecia la resistencia a la tensión en el concreto
- El comportamiento a tensión del refuerzo FRP se considera linealmente elástico hasta la falla.
- Existe una perfecta adherencia entre el concreto y las barras de FRP.

#### 1.3.4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La filosofía de diseño está basada en los estados límites. La resistencia de diseño a flexión se refiere a un momento nominal multiplicado por un factor de reducción de resistencia, el cual debe ser mayor que el momento mayorado con los factores de carga.

$$\phi Mn \geq Mu$$

Ecuación 1-3 Filosofía de diseño. Fuente: tomado ACI 440.1R (ecuación 8.1)

#### 1.3.5 MODOS DE FALLA

La capacidad a flexión de un elemento de concreto reforzado con FRP depende del modo de falla, si está gobernado por el aplastamiento en el concreto o la rotura en las barras de FRP. El modo de falla puede ser determinado comparando la cantidad de refuerzo usado con la cantidad de refuerzo balanceado (la cantidad de refuerzo balanceado es aquel en el cual el concreto se aplasta y las barras de FRP llegan a la rotura simultáneamente).

La cuantía de refuerzo colocada se calcula con la siguiente ecuación

$$\rho = \frac{Af}{bd}$$

Ecuación 1-4 Cálculo de la cuantía de refuerzo. Fuente: tomado de ACI 440.1R (ecuación 8-2)

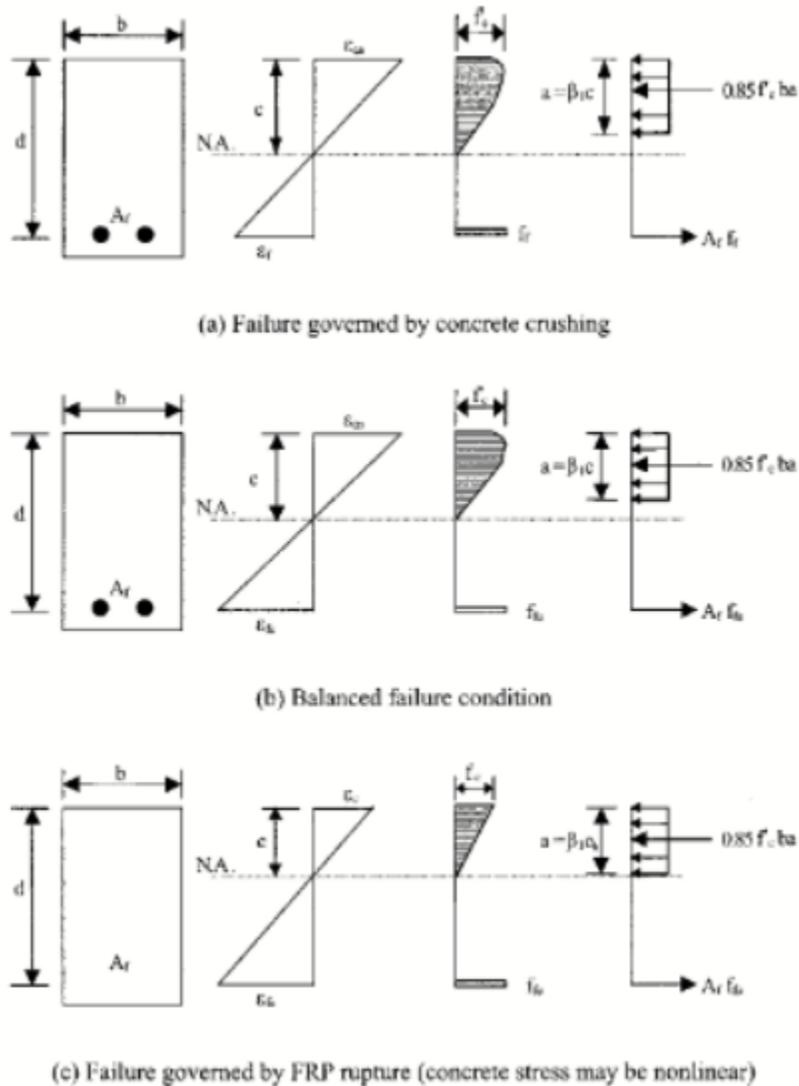
Para calcular la cuantía balanceada se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho_b = 0.85 * \beta_1 * \left( \frac{f'_c}{f_{fu}} \right) * \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right)$$

Ecuación 1-5 Cuantía balanceada. Fuente: tomado ACI 440.1R (ecuación 8-3)

Si la cuantía de refuerzo es menor que la cuantía balanceada, la rotura en el FRP gobierna el diseño. Si la cuantía de refuerzo es mayor a la cuantía balanceada, el aplastamiento en el concreto gobierna el diseño

En la Figura 1-1 se presenta los diagramas de deformación unitaria y los diagramas de esfuerzos para los diferentes modos de falla en condiciones últimas



*Fig. 8.2—Strain and stress distribution at ultimate conditions.*

Figura 1-1 Esfuerzo y deformaciones para los diferentes modos de falla en condiciones últimas. Fuente: tomado ACI 440.1R (Fig 8-2)

### 1.3.6 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN CUANDO SE PRESENTA APLASTAMIENTO EN EL CONCRETO

Cuando la cuantía de refuerzo es mayor que la cuantía balanceada, se espera que el modo de falla en el elemento estructural sometido a flexión sea el de aplastamiento en el concreto. El momento resistente para este modo de falla se calcula con las siguientes expresiones

$$Mn = Af * f_f * \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Ecuación 1-6 Momento nominal resistente Fuente: tomado: ACI 440.1R (ecuación 8-4<sup>a</sup>)

$$a = \frac{Af * f_f}{0.85 * f'c * b}$$

Ecuación 1-7 Altura del bloque equivalente de compresiones Fuente: tomado ACI 440.1R (ecuación 8-4b)

$$f_f = E_f * \varepsilon_{cu} * \left(\frac{\beta_1 * d - a}{a}\right)$$

Ecuación 1-8 Esfuerzo en el FRP. Fuente ACI 440.1R (ecuación 8-4c)

Al solucionar simultáneamente las ecuaciones, se determina el momento nominal resistente del elemento estructural

### 1.3.7 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN CUANDO SE PRESENTA ROTURA EN EL FRP

Cuando la cuantía colocada en el elemento estructural es menor a la cuantía balanceada, el modo de falla esperado será el de rotura en el FRP, por lo tanto, se espera que no se alcance la deformación unitaria última en el concreto. Sin embargo, el ACI 440.1R permite determinar el momento resistente en el elemento estructural conservadoramente usando la deformación última en el concreto ya que los resultados no cambian considerablemente.

Para determinar el momento resistente se proponen las siguientes ecuaciones

$$Mn = Af * f_{fu} * \left(d - \frac{\beta_1 * cb}{2}\right)$$

Ecuación 1-9 Momento nominal resistente. Fuente: tomado del ACI 440.1R (ecuación 8-6b)

$$cb = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) * d$$

Ecuación 1-10 Distancia al eje neutro. Fuente: tomado del ACI 440.1R (ecuación 8-6c)

## 1.4 CÁLCULO DE DEFLEXIONES METODOLOGÍA DE BRANSON

La determinación de las deflexiones se basa en la metodología de Branson, evaluando la inercia efectiva de la sección transversal.

Para determinar la inercia efectiva, se calcula primero el momento de agrietamiento, la inercia fisurada de la sección transversal y se aplica la ecuación 8-12a del ACI 440.1R.

$$M_{cr} = f_r * S$$

Ecuación 1-11 Momento de agrietamiento de la sección transversal

Para calcular la inercia fisurada de la sección transversal se sigue el procedimiento propuesto por el ACI 440.1R, como se describe a continuación

$$k = \sqrt{2 * \rho_f * n_f + (\rho_f * n_f)^2} - \rho_f * n_f$$

Ecuación 1-12 Relación de la profundidad del eje neutro a la profundidad del refuerzo

$$I_{cr} = \frac{b * d^3}{3} * k^2 + n_f * A_f * d^2 * (1 - k)^2$$

Ecuación 1-13 Momento de inercia de la sección fisurada

Una vez obtenidos los valores del momento de agrietamiento, la inercia fisurada y la inercia bruta de la sección transversal, se determina la inercia efectiva de la sección transversal.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 * \beta_d * I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right) * I_{cr} \leq 1.0$$

Ecuación 1-14 Inercia efectiva de la sección transversal

Esta ecuación es igual a la utilizada para elementos de concreto con refuerzo convencional, con la variante del coeficiente  $\beta_d$ , el cual tiene en cuenta la adherencia entre la barra y el concreto. El ACI 440.1R-06 propone la siguiente expresión para determinar el valor de  $\beta_d$ .

$$\beta_d = \frac{1}{5} * \left(\frac{\rho_f}{\rho_b}\right)$$

Ecuación 1-15 Coeficiente que tiene en cuenta la adherencia de la barra

Utilizando el análisis estructural y la mecánica de materiales, se determina la expresión para calcular la deformación en el centro de la luz, la cual está en función de la inercia y esta se debe reemplazar por la inercia efectiva calculada con la Ecuación 1-14.

## 1.5 CÁLCULO DE DEFLEXIONES METODOLOGÍA BISCHOFF

Algunas investigaciones realizadas por Bischof demuestran que la ecuación del cálculo de la inercia efectiva propuesta por Branson sobrestiman la rigidez del elemento cuando la relación entre la inercia bruta es mayor a tres veces la inercia fisurada. Para elementos reforzados con FRP esta relación se encuentra entre 5 a 25 veces, (Nanni, 2014 p. 122).

Para determinar la inercia efectiva de la sección transversal del muro, Bischoff propone una ecuación que no tiene el factor  $\beta_d$ .

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma * \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 * \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)}$$

Ecuación 1-16 Inercia efectiva metodología de Bischoff

El factor  $\gamma$  es dependiente de la carga y de las condiciones de contorno en la zona no fisurada del miembro y tiene en cuenta el cambio de rigidez en la zona fisurada. Se determina para una viga simplemente apoyada con cargas puntuales en los tercios, utilizando la siguiente ecuación

$$\gamma = 1,7 - 0,7 * \frac{M_{cr}}{M_a}$$

Ecuación 1-17 Factor  $\gamma$ , para calcular la inercia efectiva

Una vez determinada la inercia efectiva por esta metodología, se calculan las deflexiones en los muros utilizando los métodos de la mecánica estructural.

## **2 ESTADO DEL ARTE**

En la literatura no se encontraron investigaciones sobre evaluación de muros de mampostería reforzados con barras de FRP como refuerzo principal, la mayoría de los usos del FRP en muros de mampostería está basado en rehabilitación y reforzamiento de estructuras existentes. Sin embargo, en el caso de concreto, en Estados Unidos y Canadá se han realizado varias investigaciones de elementos estructurales de concreto reforzados con barras de FRP como refuerzo interno, incluso existen guías como “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars” del ACI 440.1R, la cual ha emitido cuatro actualizaciones desde su primera publicación, la primera guía se publicó en el año 1996 y la revisión vigente se publicó en el año 2015.

Por lo tanto, a continuación, se enuncian algunas de las investigaciones de muros de mampostería reforzada externamente con barras de FRP y con cargas fuera del plano.

### **2.1 OUT-OF-PLANE FLEXURAL BEHAVIOR OF UNREINFORCED RED BRICK WALLS STRENGTHENED WITH FRP COMPOSITES**

Ayman S. Mosallam. Julio 27 2006

Esta investigación consistió en ensayar muros de mampostería no reforzada con cargas perpendiculares al plano colocando dos tipos de reforzamientos con FRP. Se ensayaron 4 muros a escala real de los cuales, uno de los muros no tuvo ningún tipo de reforzamiento con FRP, los tres restantes fueron reforzados con láminas de GFRP y CFRP las cuales se adhirieron al muro externamente utilizando aditivos epóxicos. El objetivo del trabajo fue determinar el modo de falla y la capacidad última de los muros. Los resultados del uso de láminas de FRP adheridas a los muros muestran la eficacia del uso de estos sistemas para soportar la flexión perpendicular al plano del muro. En la investigación se desarrolló un modelo analítico para predecir la capacidad última del reforzamiento del muro. El modelo analítico se basó en compatibilidad de deformaciones y equilibrio de fuerzas y utilizando el procedimiento de sección simple. Los resultados experimentales tuvieron un buen comportamiento comparados con los resultados teóricos. En la Figura 2-1 se presenta en montaje del ensayo realizado.



Figura 2-1 Montaje del ensayo realizado. Tomado: Ayman S. Mosallam. 2006

## 2.2 STRENGTHENING WITH FRP BARS OF URM WALLS SUBJECT TO OUT-OF-PLANE LOADS

Nestore Galati, Gustavo Tumialan, Antonio Nanni. Junio 2005.

El programa experimental de la investigación se basó en el estudio del comportamiento a flexión perpendicular al plano, de muros de mampostería reforzados mediante barras de FRP. En la investigación se ensayaron 15 muros de mampostería a los cuales se les instaló un reforzamiento externo de barras de FRP de sección transversal redondas y cuadradas, como se muestra en la Figura 2-2.



Figura 2-2 Muro a escala real reforzado externamente con barras de FRP. Tomado: Nestore Galati, Gustavo Tumialan, Antonio Nanni. 2005.

Los muros fueron reforzados con diferentes cantidades de barras para observar su comportamiento, y para observar los diferentes modos de falla. La investigación se enfocó en estudiar las siguientes variables, forma de la barra, material de FRP (GFRP y CFRP), dimensiones de la regata donde se embebía la barra y tipo de material en el cual se embebía la barra (epóxico y pasta de cemento).

La investigación concluyó lo siguiente:

- El reforzamiento con barras de FRP instaladas superficialmente incrementó la capacidad a flexión de los muros
- Los resultados identificaron diferentes modos de falla, cortante, rotura en el FRP y aplastamiento en la mampostería.

### **2.3 EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON OUT-OF-PLANE BEHAVIOR OF GFRP RETROFITTED MASONRY PANELS**

Razieh Sistani Nezhad, Mohammad Z. Kabir. Noviembre 2016

La investigación que se llevó a cabo consistió en evaluar el comportamiento a flexión fuera del plano de muros de mampostería a escala reducida, los cuales se reforzaron externamente con láminas de GFRP. Los especímenes ensayados representaban muros de carga de mampostería típicos de Irán. Se ensayaron seis muros bajo carga fuera del plano, uno fue de mampostería no reforzada, cuatro se reforzaron con láminas de GFRP y el restante se reforzó con capas de mortero por ambas caras. En la Figura 2-3 se presenta un esquema del reforzamiento con FRP del muro



Figura 2-3 Esquema de reforzamiento del muro con FRP. Tomado: Razieh Sistani Nezhad, Mohammad Z. Kabir. 2016.

El estudio que se llevó a cabo tuvo en cuenta, la capacidad de carga del muro, desplazamiento, ductilidad, absorción de energía y modos de falla.

Los resultados de la investigación muestran que el comportamiento mecánico y la resistencia a flexión de los muros de mampostería reforzados mejoraron significativamente

## 2.4 LATERAL OUT-OF-PLANE STRENGTHENING OF MASONRY WALLS WITH COMPOSITE MATERIALS

Ehab Hamed and Oded Rabinovitch

En la investigación se estudió el comportamiento teórico y experimental de muros de mampostería sometidos a carga fuera del plano, reforzados externamente con materiales compuestos. Se estudiaron unidades de concreto huecas y unidades sólidas de concreto con aire incluido. La investigación presentó un modelo teórico que tuvo en cuenta la fisuración, el comportamiento no lineal la adherencia entre los materiales compuestos y la mampostería, la curvatura, y los esfuerzos en la interfaz de los materiales.

Los muros con unidades huecas presentaron fallas prematuras a cortante y por otro lado los muros con unidades sólidas de concreto con aire incluido presentaron mejor comportamiento en cuanto a resistencia deformación e integridad a la hora de la falla.

La Figura 2-4 presenta un esquema de los muros ensayados.

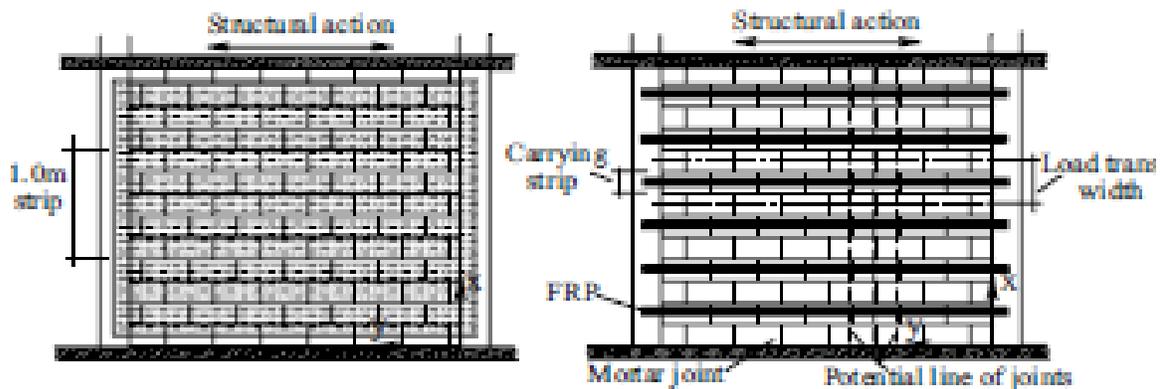


Figura 2-4 Esquema de los muros. Tomado: Ehab Hamed and Oded Rabinovitch

Como se indica en las investigaciones anteriormente resumidas, la mampostería ha sido ampliamente investigada desde el punto de vista de reforzamiento externo con materiales compuestos como el caso del FRP (tanto en barras como en láminas). Por otro lado, el FRP como refuerzo nuevo en elementos de concreto se ha venido implementando ampliamente, tanto así, que el American Concrete Institute, creó el comité 440 para elementos de concreto reforzado con barras de FRP basando en un amplio margen de investigaciones.

Sin embargo, los muros de mampostería con unidades de arcilla reforzados internamente con barras de FRP, no se ha investigado su comportamiento y por tal razón nace la presente investigación que busca estudiar el comportamiento a flexión perpendicular al plano de muros de mampostería con unidades de arcilla reforzados con barras de FRP y plantear una propuesta preliminar de protocolo de diseño para calcular las capacidades teóricas además de comparar las metodologías teóricas propuestas por Branson y la metodología propuesta por Bischoff para el cálculo de deflexiones.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento teórico a flexión fuera del plano, de muros de mampostería en arcilla reforzada con barras de CFRP y GFRP, basados en las metodologías del ACI 440.1R y TMS402/ACI 530 para posteriormente compararlos con los resultados obtenidos de los ensayos a escala real.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar experimentalmente, las cargas últimas de los muros de mampostería cagados perpendicularmente a su plano y compararlas teóricamente con las ecuaciones propuestas por el ACI 440 y el ACI 530.
- Determinar experimentalmente, las deflexiones de los muros de mampostería cagados perpendicularmente a su plano y compararlas teóricamente con las ecuaciones propuestas por Branson y Bischoff
- Comparar teórica y experimentalmente los estados límites de resistencia y rigidez de muros reforzados con FRP y de muros reforzados con acero convencional.
- Verificar el modo de falla de los muros, de acuerdo a los resultados de los cálculos teóricos.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 METODOLOGÍA

Se determinaron las dimensiones, cuantías y tipos de refuerzo a utilizar en los muros. Posteriormente se procedió a caracterizar los materiales, para definir sus propiedades mecánicas, basados en las respectivas normas ASTM. Una vez definidas estas variables se calcularon teóricamente las capacidades y las deflexiones de los muros bajo cargas fuera del plano.

Posteriormente, se construyó el marco de prueba en donde se realizaron los ensayos para cada uno de los muros

Simultáneamente al ensamble del marco de prueba se fueron construyendo los muros de mampostería para posteriormente llevarlos al marco y realizar el respectivo ensayo.

### 4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Para el mortero de pega se seleccionó un mortero de  $f'_{cp}$  de 17,5 MPa, el grout de relleno de las celdas  $f'_{cr}$  se diseñó para 21 MPa: Las unidades de arcilla que conformaron los muretes o prismas para el ensayo de compresión, fueron unidades de la ladrillera santafe (ladrillo portante 30). Las barras de FRP se importaron de Italia (SIREG S. p A.) a las cuales se les realizó ensayos de tensión. Para caracterizar los materiales se realizaron los ensayos correspondientes a cada uno de ellos, en la Tabla 4-1 se presentan la cantidad de ensayos que se realizaron a cada material y la norma ASTM aplicable.

Tabla 4-1 Ensayos para caracterizar los materiales. Fuente: el autor.

| Ensayo                                  | Norma ASTM | Cantidad |
|---|------------|----------|
| Compresión cilindros de mortero de pega | ASTM C109  | 3        |
| Compresión cilindros mortero de relleno | ASTM C109  | 4        |
| Compresión en muretes de mampostería    | ASTM C1314 | 6        |
| Tensión en barras de FRP                | ASTM D7205 | 6        |

A continuación, se presentan los ensayos que se realizó a cada uno de los materiales componentes de la mampostería de arcilla reforzada con barras de FRP.

#### 4.2.1 CILINDROS MORTERO DE PEGA

Para calcular la resistencia a compresión del mortero de pega de los muros de mampostería de arcilla, se construyeron cilindros de 50 mm de diámetro, por 100 mm de altura como se muestra en la Figura 4-1



Figura 4-1 Cilindros de mortero de pega. Fuente: el autor

El mortero con el cual se construyeron los cilindros, fue tomado de mortero utilizado durante la construcción de los muros de mampostería.

Los cilindros de mortero de pega se ensayaron siguiendo las normas ASTM C109. Se determinó la resistencia a la compresión ( $f'_{cp}$ ) en la fecha de ensayo de los muros, 28 días. A continuación, se presentan en la Figura 4-2 el esquema del ensayo realizado.

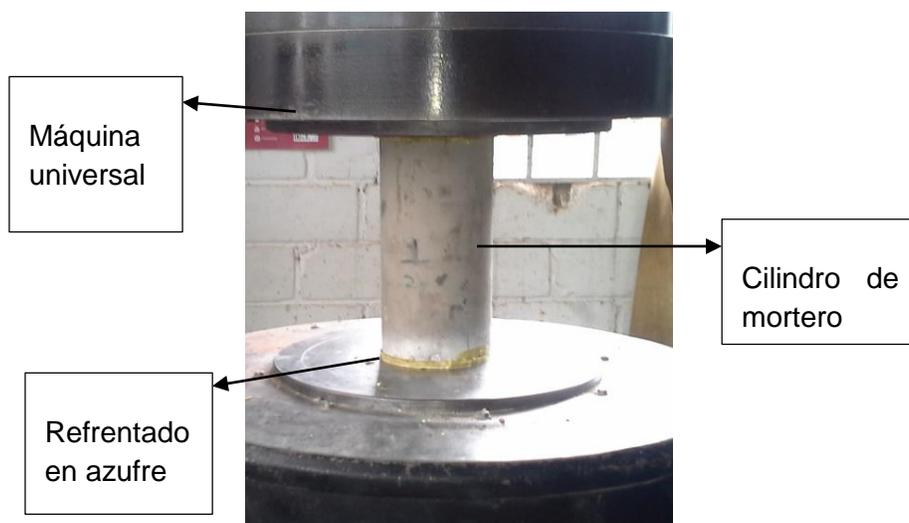


Figura 4-2 Ensayos a cilindros mortero de pega. Fuente: el autor

#### 4.2.2 CILINDROS GROUT DE RELLENO

Para calcular la resistencia del grout de relleno inyectado a los muros de mampostería de arcilla, se construyeron seis cilindros de 100 mm de diámetro, por 200 mm de altura como se muestra en la Figura 4-3



Figura 4-3 Cilindros de mortero de relleno. Fuente: el autor

Los cilindros de grout de relleno se ensayaron siguiendo las normas ASTM C109 Se determinó la resistencia a la compresión ( $f'_{cp}$ ) en la fecha de ensayo de los muros, 28 días. A continuación, se presentan en la Figura 4-4 el montaje del ensayo

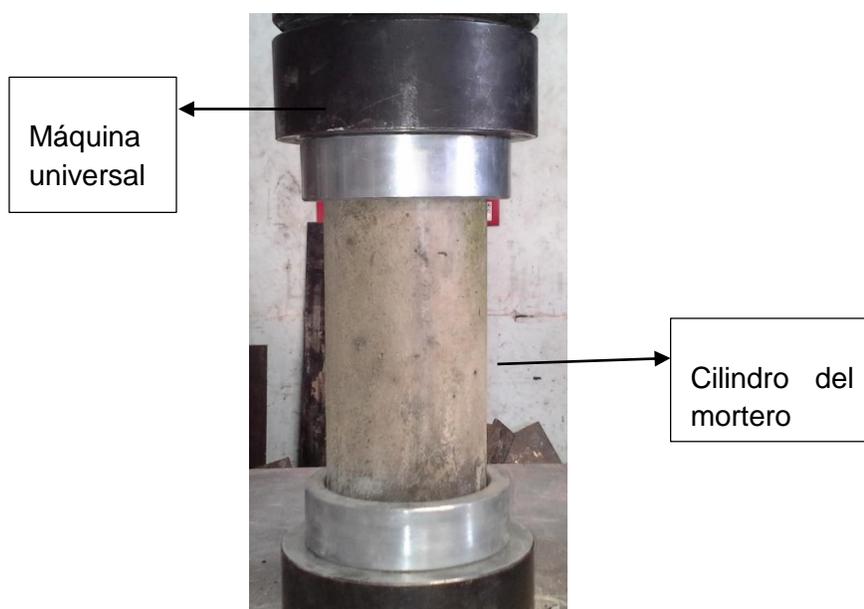


Figura 4-4 Ensayo a cilindros mortero de relleno. Fuente: el autor

### 4.2.3 MURETES DE MAMPOSTERÍA

Para calcular la resistencia a compresión  $f'_m$  de la mampostería, se construyeron seis muretes de 290 mm de altura y 440 mm de ancho, de los cuales a tres se les inyectó grout de relleno a todas las celdas y los tres restantes se dejaron vacíos.

En la Figura 4-5 se presentan los muretes vacíos.

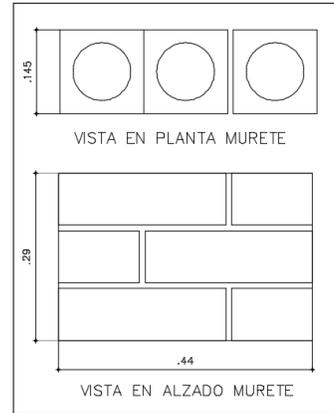


Figura 4-5 Muretes de mampostería sin inyección de grout de relleno. Fuente: el autor

En la Figura 4-6 se muestra los muretes de mampostería, a los cuales se les inyectó grout en sus celdas.



Figura 4-6 Muretes de mampostería con inyección de grout. Fuente: el autor

Para calcular las propiedades mecánicas de la mampostería (resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y deformación unitaria última) se realizó el ensayo a los muretes siguiendo las normas ASTM C1314. A continuación, en la Figura 4-7 se presenta el montaje del ensayo, con la correspondiente instrumentación para determinar las deformaciones unitarias, que permitieron calcular el módulo de elasticidad.

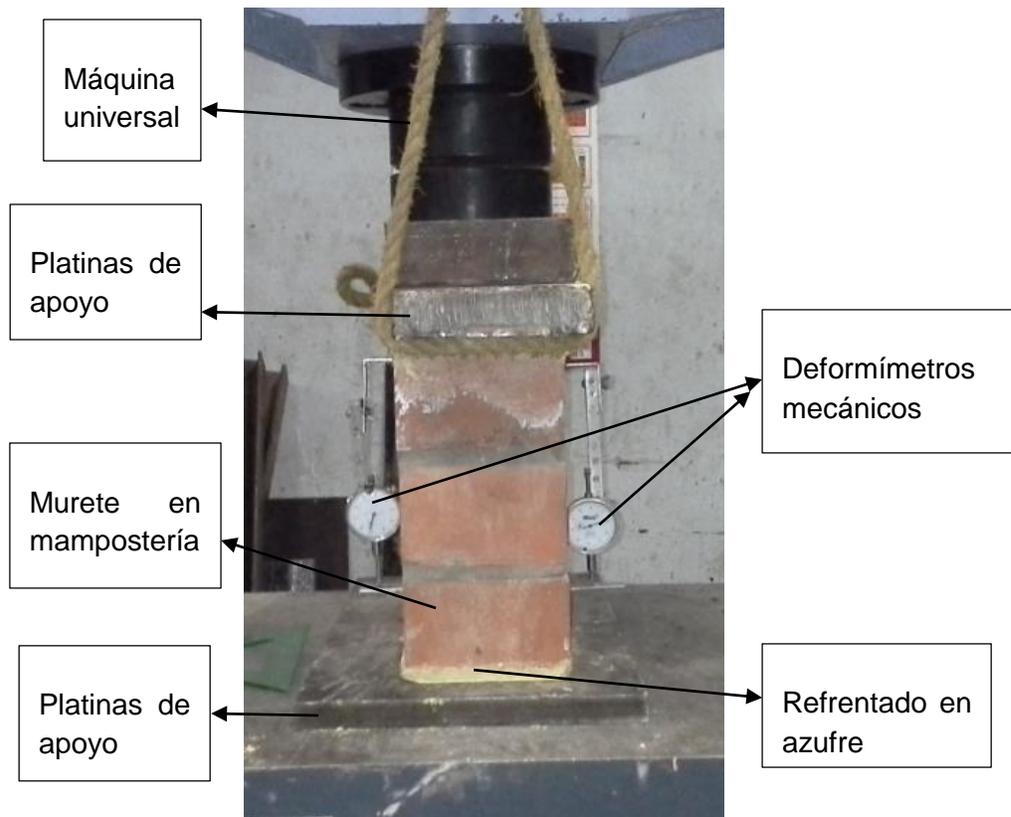


Figura 4-7 Montaje del ensayo a muretes de mampostería. Fuente: el autor

#### 4.2.4 BARRAS DE FRP

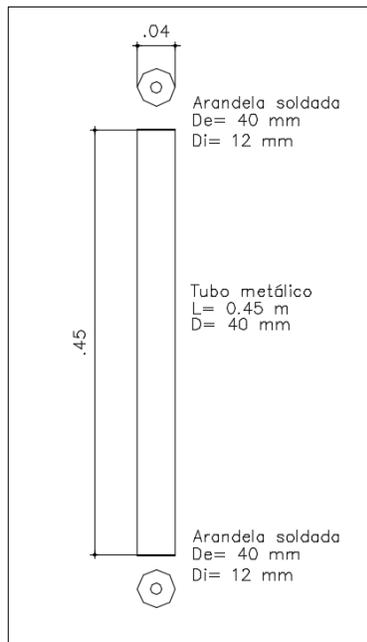
Para caracterizar las barras de FRP y con el fin de brindar el anclaje suficiente en sus extremos, se cortaron tubos de acero de 450 mm de longitud con un diámetro externo de 40 mm y un espesor de 4 mm, a los cuales se les soldaron arandelas en ambos extremos, estas arandelas tenían un diámetro interno de 12 mm y un diámetro externo de 40 mm, (Recomendación de la norma ASTM D7205) como se muestra en la Figura 4-8



1.) Tubo metálico de longitud 0.45 m



2.) Vista en planta del tubo



3.) Esquema del tubo metálico con las dimensiones de las arandelas



4.) Tubería metálica estructural.

Figura 4-8 Tubo de acero para anclaje de la barra. Fuente: el autor

Una vez se soldó la arandela al tubo se colocó dentro la barra de FRP a ensayar y se centró por medio de las arandelas, por último, se inyectó un mortero expansivo (CRAS TX40T232) en un caso y un epóxico adherente (Hilti RE500) en el otro, para generar la adherencia en la barra y la tubería. En la Figura 4-9 se presenta la barra con los tubos metálicos instalados en sus extremos.



Figura 4-9 Barras de FRP con tubos metálicos en sus extremos. Fuente: el autor

Para evaluar las propiedades mecánicas de las barras de CFRP (carbón fiber reinforced polymer) y GFRP (glass fiber reinforced polymer), se ensayaron a tensión como lo propone

la norma ASTM D7207. A continuación, en la Figura 4-10 se presenta la disposición de las muestras durante el proceso de ensayo

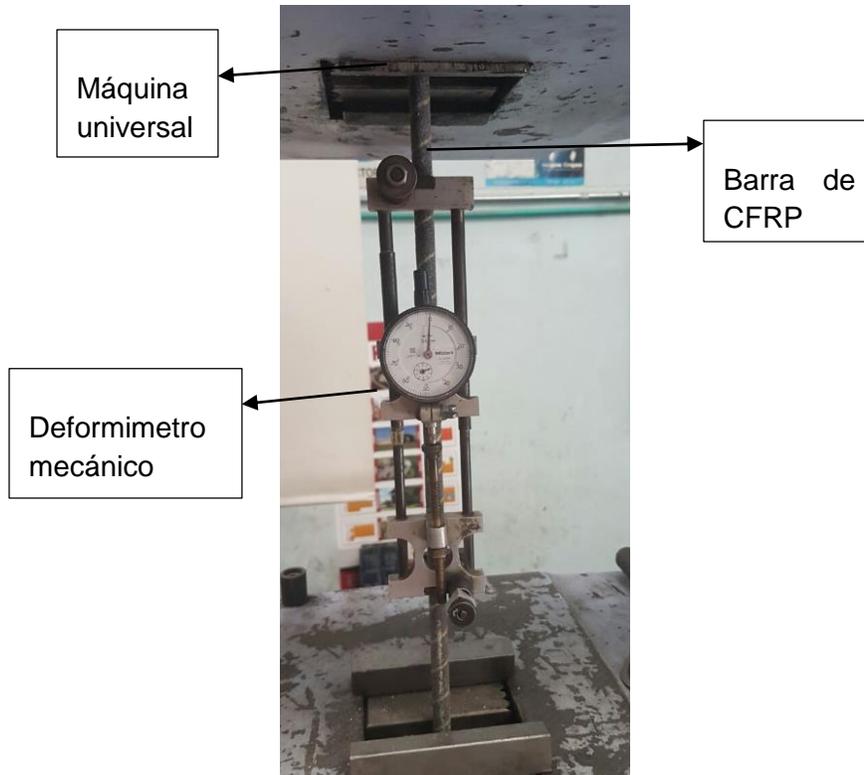


Figura 4-10 Ensayo a barras de FRP. Fuente: el autor

### 4.3 MARCO DE PRUEBA

Para realizar los ensayos de los muros de mampostería, se construyó un marco de prueba, el cual funcionaba como apoyo para los muros. Un esquema del marco de prueba se presenta en la Figura 4-11.

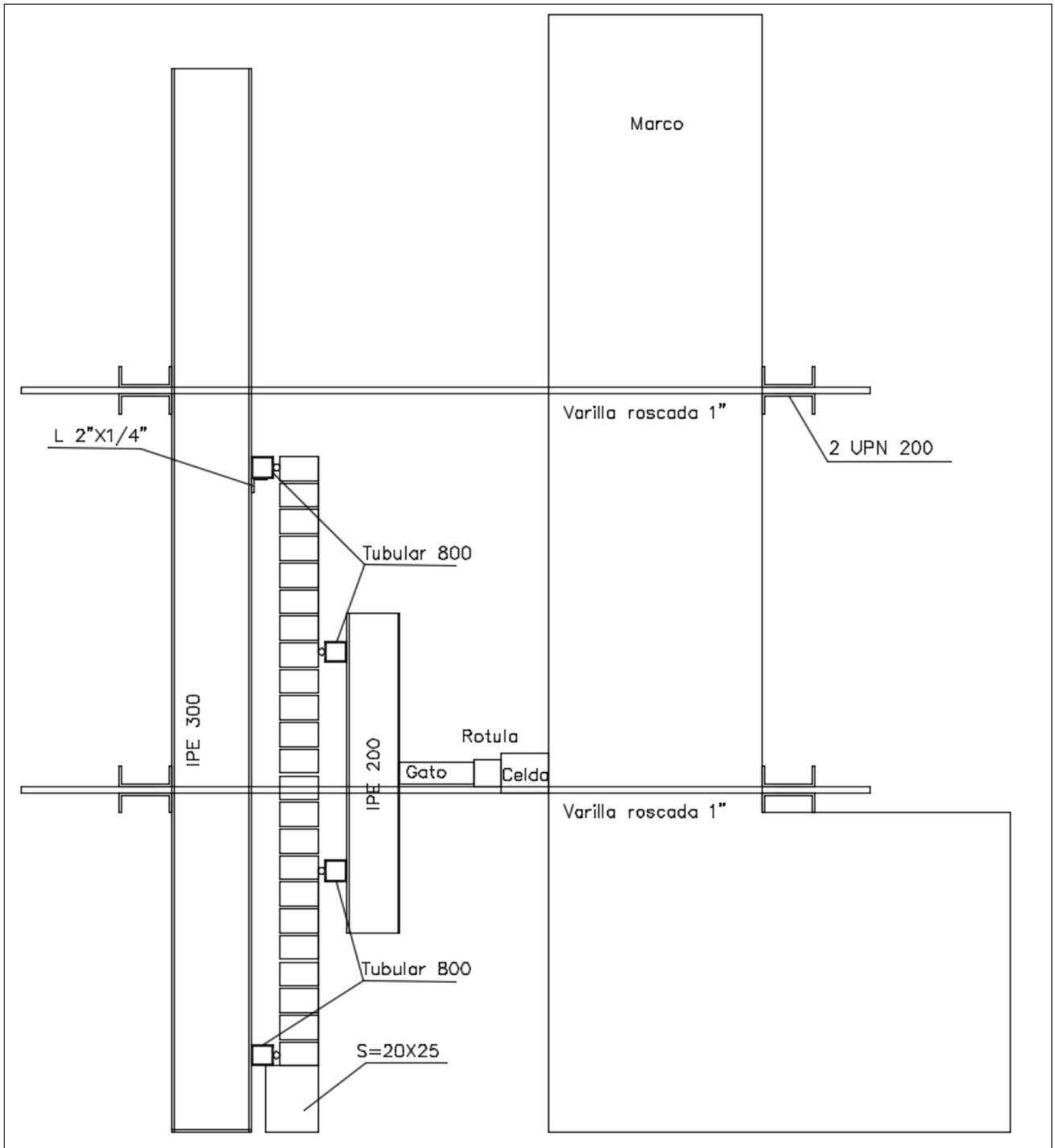


Figura 4-11 Plano esquemático del marco de prueba. Fuente: el autor

En la Figura 4-12 se presenta el marco de prueba ensamblado, el cual se adosó al marco de ensayos existentes en el laboratorio de materiales y

estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería, con el fin de reaccionar contra el generando un Closed Loop.

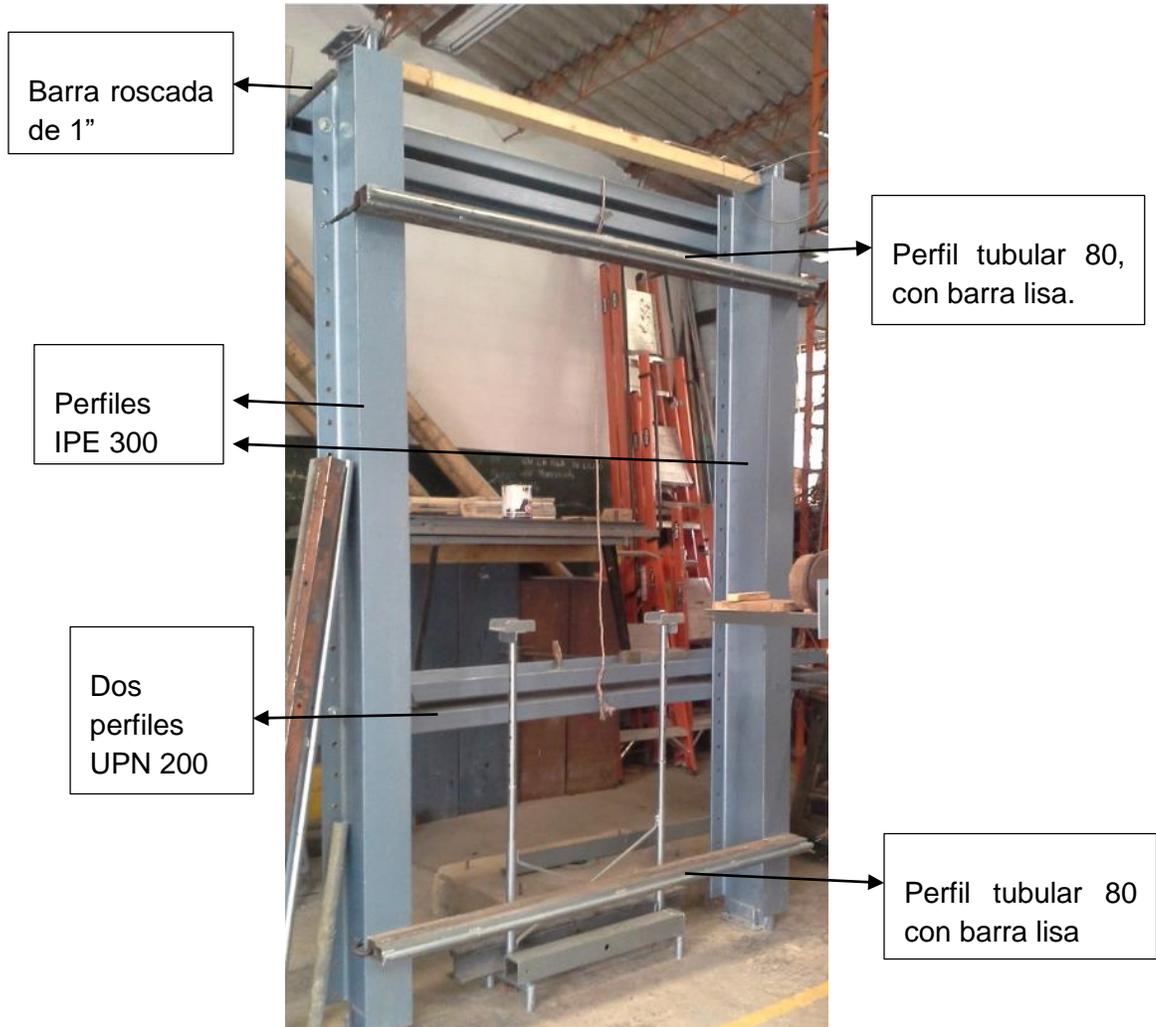
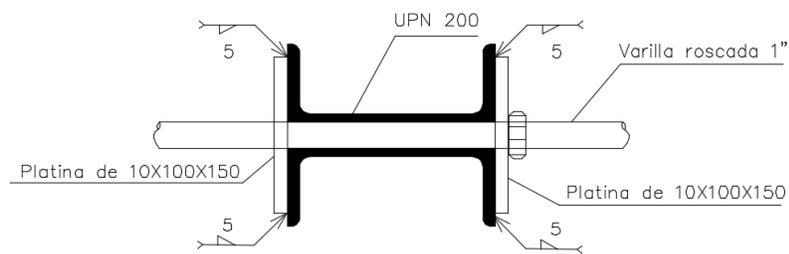


Figura 4-12 Marco de prueba Fuente: el autor

El marco de prueba consistía en dos columnas IPE 300, las cuales estaban apoyadas en la placa de cimentación con platinas y pernos de 5/8" (16 mm). Lateralmente estaba apoyadas en vigas que consistían en perfiles metálicos tipo (UPN 200) colocados espalda contra espalda, los cuales estaban separados por una barra roscada de 1" (25.4 mm). Estas barras eran las encargadas de reaccionar contra la fuerza de el gato, a continuación se muestran los detalles en la Figura 4-13



1.) Conexión perfiles UPN 200 y barra roscada D=25.4 mm



DETALLE DE CONEXIÓN

2.) Planos de la conexión entre UPN 200 y barra roscada.

Figura 4-13 Detalle de conexión vigas UPN 200 a barra roscada. Fuente: el autor

Para apoyar el muro y transmitir la carga se colocaron perfiles tubulares de 80X80X3 mm y se les soldó una barra lisa de 1" (25.4 mm). En la Figura 4-14 se presenta el detalle

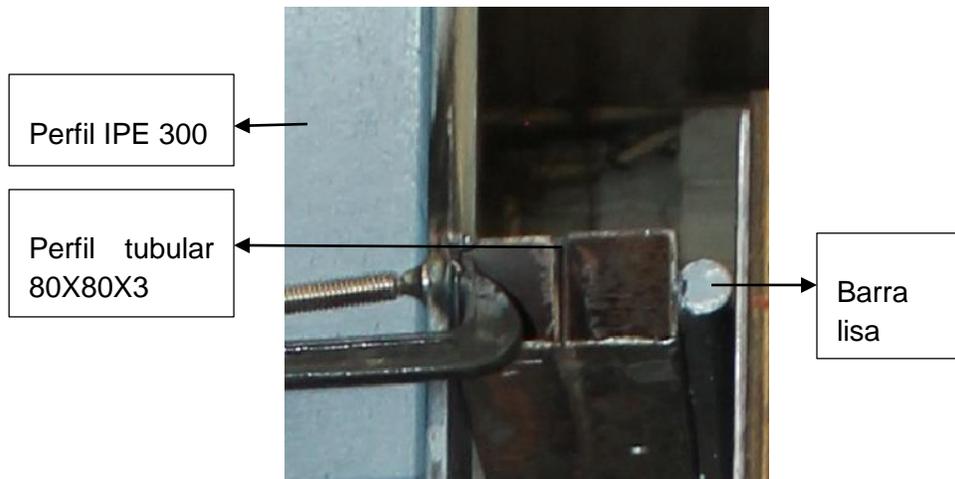


Figura 4-14 Perfiles 80X80X3 mm, para carga y apoyo de los muros. Fuente: el autor

#### 4.4 PROCESO CONSTRUCTIVO

Para el soporte de los muros de mampostería se construyeron vigas de cimentación, los planos de la viga muestran en la Figura 4-15

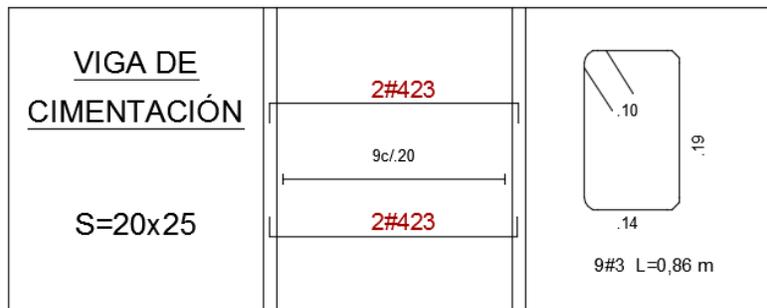


Figura 4-15 Viga de cimentación S=20X25

Se construyeron 16 muros de los cuales se reforzaron 7 con barras de GFRP y los otros 7 se reforzaron con barras CFRP. Y los últimos dos fueron reforzados con acero convencional. En la Figura 4-16 se muestra la configuración de muros (dimensiones y refuerzo)

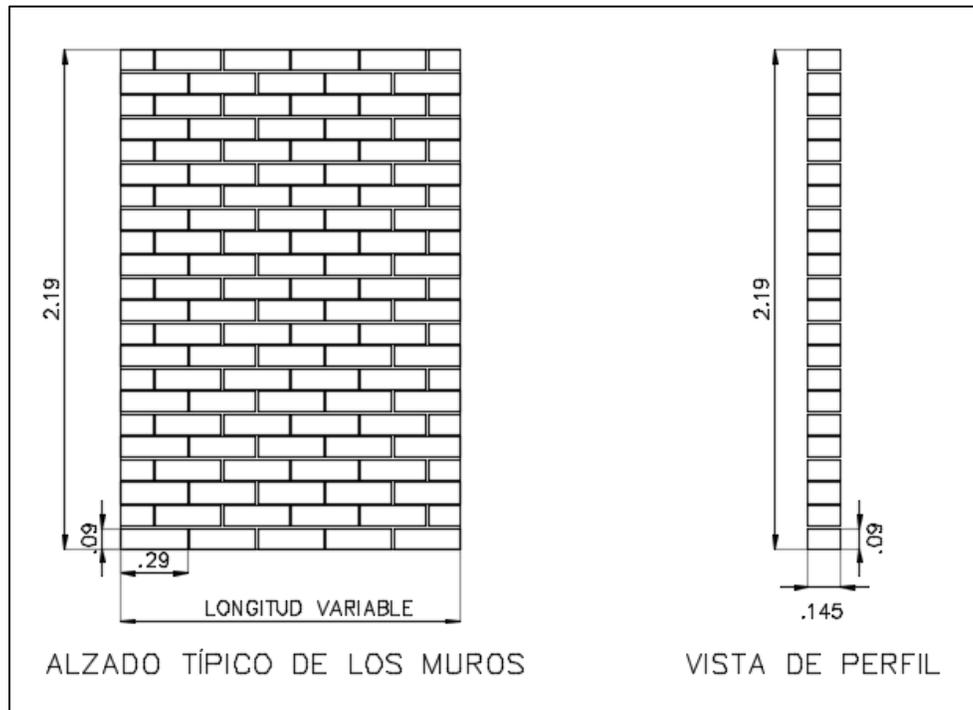


Figura 4-16 Configuración de muros, dimensiones y refuerzo. Fuente: el autor

#### 4.5 NOMENCLATURA DE MUROS

En la Tabla 4-2 se presenta la nomenclatura de los muros, su ancho y el refuerzo colocado.

Los primeros 7 muros llevan la letra “G” la cual indica “GLASS” y representa el refuerzo con barras de GRFP. De estos muros se construyeron 7 el muro M6-G no se construyó debido a que en el transcurso de los ensayos se concluyó que los muros con cuantías bajas no presentaban concordancia con los valores teóricos calculados.

Los siguientes siete muros presentan en su nomenclatura la letra “C” la cual indica “CARBON” y representa el refuerzo con barras de CFRP. Los últimos dos muros muestran la letra “S” la cual hace referencia a “STEEL” e indica que estos se reforzaron con barras de acero convencional. Para todos los muros reforzados con FRP se utilizaron barras de 12 mm de diámetro.

Tabla 4-2 Resumen de muros del programa experimental. Fuente: el autor

| Muro | Nomenclatura | Ancho mm | Refuerzo         |
|------|--------------|----------|------------------|
| M1   | M1-G         | 1045     | 4 Barras de GFRP |
| M2   | M2-G         | 1490     | 4 Barras de GFRP |
| M3   | M3-G         | 1345     | 3 Barras de GFRP |

| Muro | Nomenclatura | Ancho mm | Refuerzo          |
|------|--------------|----------|-------------------|
| M4   | M4-G         | 745      | 1 Barra de GFRP   |
| M5   | M5-G         | 890      | 1 Barra de GFRP   |
| M6   |              |          | 1 Barra de GFRP   |
| M7   | M7-G         | 1490     | 1 Barra de GFRP   |
| M8   | M8-C         | 1045     | 4 Barras de CFRP  |
| M9   | M9-C         | 1490     | 4 Barras de CFRP  |
| M10  | M10-C        | 1345     | 3 Barras de CFRP  |
| M11  | M11-C        | 745      | 1 Barra de CFRP   |
| M12  | M12-C        | 890      | 1 Barra de CFRP   |
| M13  | M13-C        | 1190     | 1 Barra de CFRP   |
| M14  |              |          | 1 Barra de CFRP   |
| M15  | M15-S        | 1490     | 4 Barras de Acero |
| M16  | M16-S        | 1490     | 3 Barras de Acero |

En la Figura 4-17 se presentan los esquemas de los muros, mostrando las dimensiones en planta y el refuerzo longitudinal, donde se indica que celdas van con refuerzo y grout, y que tipo de refuerzo. Como se muestra en la figura, los muros del uno al siete tienen la misma configuración geométrica y de refuerzo que los muros del ocho al catorce, la diferencia radica en que unos llevan refuerzo en GFRP y los otros tienen refuerzo de CFRP.

Los últimos dos muros, el quince y el dieciséis se encontraban reforzados con barras de acero convencional de ½ pulgada de diámetro.

Cabe anotar que no todos los muros tienen el refuerzo colocado de forma simétrica, los muros M5-G, M6-G, M7-G, M12-C, M13-C y M14-C presentan una asimetría en el refuerzo como se muestra a continuación.

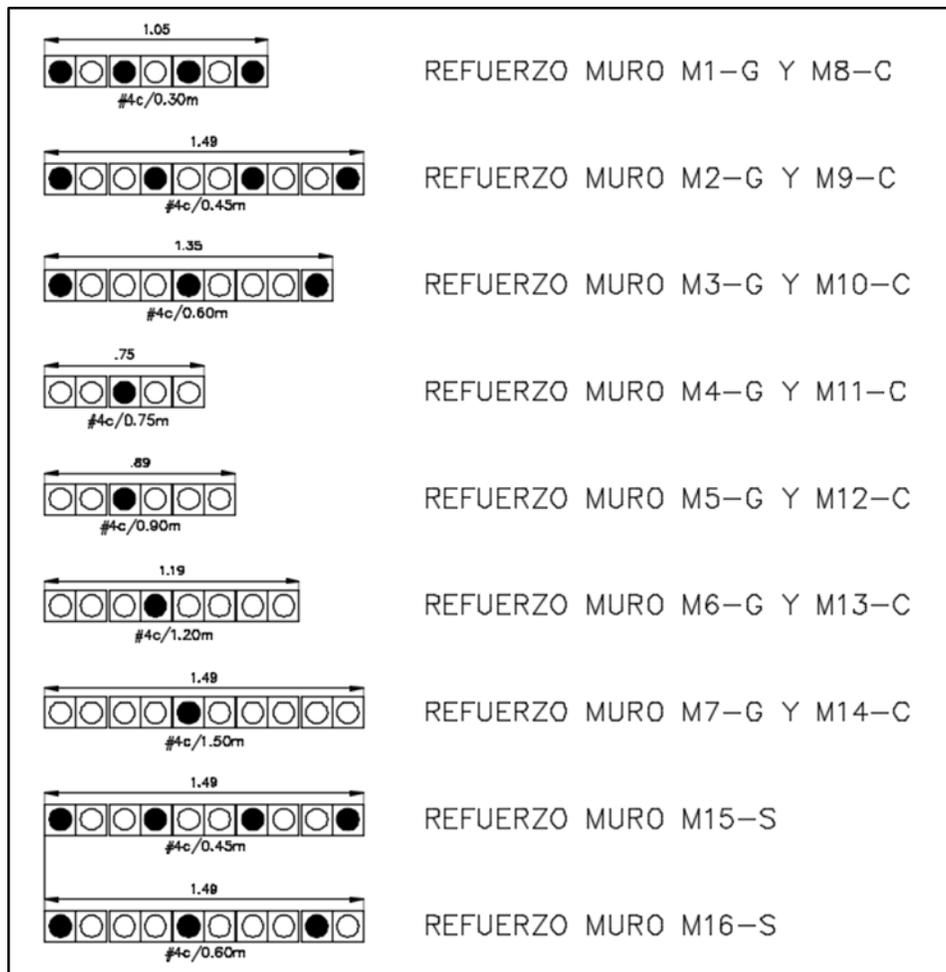


Figura 4-17 Configuración dimensional y de refuerzo de los muros. Fuente: el autor

En la Figura 4-18 se presenta el proceso de construcción paso a paso de los muros de mampostería



1.) Viga de cimentación del muro de mampostería y primera hilada



2.) Vista de planta de la colocación del mortero de pega en los ladrillos



3.) Alambre para centrar el refuerzo longitudinal del muro



4.) Colocación del mortero de pega en las hiladas de los ladrillos de mampostería.



5.) Ubicación y nivelación de la hilera



6.) Muro terminado.

Figura 4-18 Construcción del muro en mampostería. Fuente: el autor

Posterior a la construcción de los muros, se procedió a instrumentar las barras de FRP colocando deformímetros electrónicos (strain gauge) con el fin de registrar las deformaciones unitarias durante el proceso de ensayo y evaluar con ellas los esfuerzos a que se veían sometidas las barras. Para evitar el contacto directo entre el grout de relleno y los deformímetros electrónicos, estos se sellaron y protegieron con cinta. En la Figura 4-19 se muestra la instrumentación de ellas.



1.) Instrumentación de la barra de carbono CFRP



2.) Instrumentación de la barra de vidrio GFRP



3.) Protección de la instrumentación de la barra de carbono CFRP



4.) Barras de FRP instrumentadas

Figura 4-19 Instrumentación de barras de FRP. Fuente: el autor

Luego se colocó la barra dentro de la celda y se inyectó el mortero de relleno como se muestra en la Figura 4-20; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



1.) Ubicación de la barra de refuerzo.



2.) Colocación del mortero de relleno.

Figura 4-20 Inyección mortero de relleno en los muros de mampostería. Fuente: el autor

Por último, se llevó el muro al marco de prueba y se instrumentó con transductores de desplazamiento LVDts, en la cara donde se presentan las tensiones, y se instrumentó la cara a compresión del muro de mampostería mediante un strain gauge, que se ubicaba enfrente al de la barra de FRP. En la Figura 4-21 se muestran ambas caras del muro instrumentado.



Strain gauge, en la cara de compresión



Transductor de desplazamiento LDVT, en la cara de tensión



1.) Instalación del deformimetro electrónico strain gauge cara de compresión



2.) Instalación del deformimetro electrónico LDVT cara de tensión

Figura 4-21 Instrumentación de muros. Fuente: el autor.

## 5 ENSAYOS A LOS MATERIALES

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados. En primera instancia se presentan los resultados de los morteros de pega y de relleno. Luego se presenta lo obtenido de las propiedades mecánicas en las barras de FRP, tanto para las de fibras de vidrio “GFRP” como las de fibra de carbono “CFRP”. Luego se presentan los ensayos de los muretes y las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos

### 5.1 RESULTADOS MORTERO DE PEGA

Los resultados de los ensayos del mortero de pega se presentan en el ANEXO A, sin embargo, en la Figura 5-1 se presenta la falla a compresión de una de las muestras.



Figura 5-1 Cilindros mortero de pega. Fuente: el autor

El promedio de los ensayos de compresión del mortero de pega fue de  $f'_{cp} = 23,4$  MPa.

### 5.2 RESULTADOS MORTERO DE RELLENO

Los resultados de los ensayos del mortero de relleno se presentan en el ANEXO B, sin embargo, en la Figura 5-2 se presenta la falla a compresión de los cilindros ensayados.



1.) Cilindro mortero de relleno 1



2.) Cilindro mortero de relleno 2



3.) Cilindro mortero de relleno 3



4.) Cilindro mortero de relleno 4

Figura 5-2 Cilindros mortero de relleno. Fuente: el autor

El promedio de los ensayos de compresión del grout de relleno fue de  $f'_{cr} = 29,6$  MPa.

### 5.3 RESULTADOS MURETES DE MAMPOSTERÍA

Los resultados de los ensayos a los muretes de mampostería se presentan en el ANEXO C. En la Figura 5-3 se presenta el ensayo a uno de los muretes

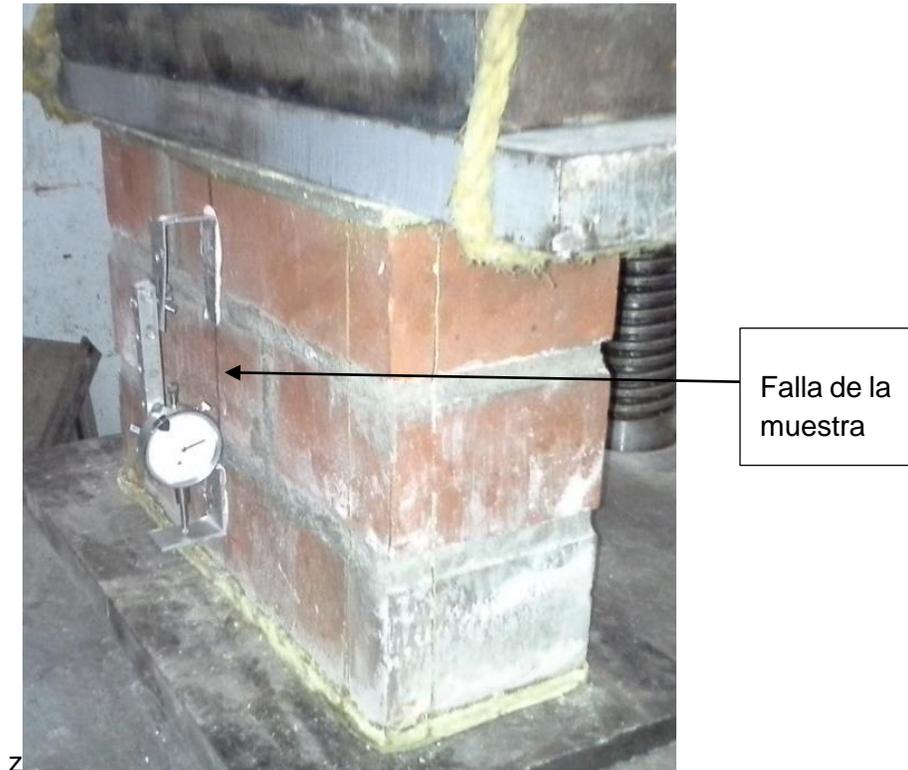


Figura 5-3 Ensayo típico de compresión a muretes de mampostería. Fuente: el autor

A continuación, en la Tabla 5-1 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de los muretes de mampostería.

Tabla 5-1 Propiedades mecánicas de la mampostería. Fuente: el autor

| Propiedades mecánicas de muretes |              |                          |
|----------------------------------|--------------|--------------------------|
| $f'_m$<br>MPa                    | $E_m$<br>MPa | $\epsilon_{mu}$<br>mm/mm |
| 13,7                             | 6285         | 0,0023                   |

#### 5.4 RESULTADOS DE ENSAYOS A BARRAS DE FRP

En la Figura 5-4 se presentan los resultados de los ensayos a las barras de GFRP.



Figura 5-4 Falla típica de una barra de GFRP. Fuente: el autor

En la Figura 5-5 se presenta la falla típica de una barra de CFRP



Figura 5-5 Falla típica barra de CFRP. Fuente: el autor

A continuación, en la Tabla 5-2 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de las barras de FRP.

Tabla 5-2 Propiedades mecánicas barras de FRP

| Propiedades mecánicas FRP |        |        |
|---------------------------|--------|--------|
|                           | GFRP   | CFRP   |
| Ffu (MPa)=                | 916    | 2300   |
| $\epsilon_{fu}$ =         | 0,0156 | 0,0180 |
| Ef (MPa)=                 | 55510  | 126658 |

## 6 CALCULOS TEÓRICOS DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA

Es este capítulo se presentan los cálculos teóricos de la resistencia a la flexión perpendicular al plano de los muros reforzados con barras de FRP basado en las metodologías del TMS402/ACI 530 y el ACI 440.1R. Se presenta un ejemplo numérico paso a paso para el modo de falla por aplastamiento en la mampostería y para el modo de falla de rotura del FRP.

También se presentan los cálculos de la deflexión en el centro de la luz del muro con un ejemplo numérico, por la metodología Branson y por la metodología de Bischoff basada en la flexibilidad del muro.

### 6.1 CALCULO DEL MOMENTO RESISTENTE DE MURO DE MAMPOSTERÍA

Para calcular el momento resistente de un muro de mampostería, primero se debe determinar si su modo de falla es rotura en el FRP o aplastamiento en la mampostería dependiendo de la cantidad de refuerzo que se coloque en el muro. Si la cantidad de refuerzo es mayor a la cuantía balanceada, se espera una falla de aplastamiento en la mampostería, y en caso de que el refuerzo colocado no supere la cuantía balanceada se espera que la falla se presente por rotura en el FRP

Se debe tener en cuenta que la cuantía balanceada corresponde a la cantidad de refuerzo necesaria para que se alcance la rotura en el FRP simultáneamente con el aplastamiento en la mampostería.

De la compatibilidad de deformaciones la cuantía balanceada se determina así:

$$\rho_b = \alpha_1 * \left( \frac{f'_m}{F_{fu}} \right) * \beta_1 * \left( \frac{\epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{fu}} \right)$$

Ecuación 6-1 Cuantía balanceada de refuerzo

A continuación, se presenta el cálculo del momento resistente del para un muro que alcanza el aplastamiento en la mampostería y para un muro que falle por rotura en el FRP.

#### 6.1.1 MOMENTO RESISTENTE DE UN MURO QUE FALLA POR APLASTAMIENTO EN LA MAMPOSTERÍA

Cuando la cuantía de refuerzo es mayor a la cuantía balanceada, la falla se presenta por aplastamiento en la mampostería. Es decir, la mampostería alcanza su deformación unitaria última antes que el FRP. En la Figura 6-1 se presenta los esquemas de deformaciones y esfuerzos en los materiales.

FALLA POR APLASTAMIENTO EN LA MAMPOSTERÍA

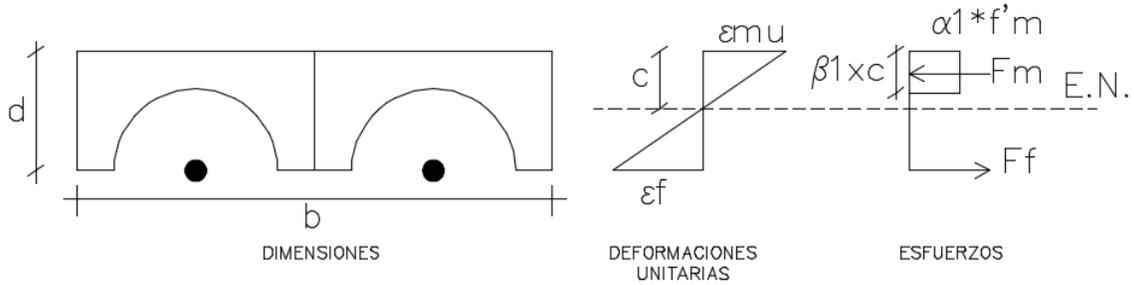


Figura 6-1 Esquema de falla cuando se alcanza la deformación unitaria última en la mampostería “aplastamiento”. Fuente el autor.

De la compatibilidad de deformaciones se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{c}{\epsilon_{mu}} = \frac{d}{\epsilon_{mu} + \epsilon_f}$$

Ecuación 6-2 Compatibilidad de deformaciones aplastamiento en la mampostería

Al despejar la deformación unitaria en el FRP de la Ecuación 6-2 Compatibilidad de deformaciones Ecuación 6-2, se tiene:

$$\epsilon_f = \epsilon_{mu} * \left( \frac{d - c}{c} \right)$$

Ecuación 6-3 Deformación unitaria en el FRP

Por equilibrio de fuerzas, se iguala la fuerza a compresión en la mampostería  $F_m$  con la fuerza en el FRP  $F_f$  a tensión.  $F_m = F_f$ .

$$F_m = \alpha_1 * f'_m * \beta_1 * c * b$$

Ecuación 6-4 Fuerza en la mampostería

$$F_f = A_f * E_f * \epsilon_f$$

Ecuación 6-5 Fuerza en el FRP

Al igualar las dos ecuaciones anteriores, reemplazando la Ecuación 6-3 y despejando, obtenemos:

$$\alpha_1 * f'_m * \beta_1 * d * c^2 + A_f * E_f * \epsilon_{mu} * c - A_f * E_f * \epsilon_{mu} * d = 0$$

La solución de la ecuación para a variable c, es una expresión cuadrática, de donde remplazan por las siguientes variables para su solución.

$$A1 = \alpha1 * f'm * \beta1 * d$$

$$B1 = Af * Ef * \epsilon mu$$

$$C1 = -Af * Ef * \epsilon mu * d$$

Donde A1, B1 y C1, son los valores de la ecuación cuadrática. Al solucionar la cuadrática, se obtiene el valor del eje neutro "c" y con este se calcula el momento resistente de la sección

$$Mn = \alpha1 * f'm * \beta1 * c * b * \left( d - \frac{\beta1 * c}{2} \right)$$

Ecuación 6-6 Momento resistente nominal del muro para falla por aplastamiento en la mampostería.

A continuación, se presenta el ejemplo numérico del momento resistente del muro M9-C.

Propiedades de los materiales:

Para la mampostería

$$f'm = 13,7 \text{ MPa}$$

$$Em = 6285 \text{ MPa}$$

$$\epsilon mu = 0,0023$$

$$\alpha1 = 0,80$$

$$\beta1 = 0,80$$

Para las barras de CFRP

$$Ffu = 2300 \text{ MPa}$$

$$Ef = 126\,700 \text{ MPa}$$

$$\epsilon fu = 0,0018$$

Geometría del muro

$$t = 145 \text{ mm}$$

$$b = 1490 \text{ mm}$$

$$d = 72,5 \text{ mm}$$

$$L = 2030 \text{ mm}$$

Área del refuerzo del muro, se colocaron 4 barras de 12.7 mm de diámetro

$$A_f = 506,7 \text{ mm}^2$$

Cálculo de la cuantía balanceada del muro.

Aplicando la Ecuación 6-1, obtenemos:

$$\rho_b = 0,80 * \left(\frac{13,7}{2300}\right) * 0,80 * \left(\frac{0,0023}{0,0023 + 0,018}\right) = 0,0004$$

La cuantía colocada en el muro es:

$$\rho = \frac{A_f}{b * d} = \frac{506,7}{1490 * 72,5} = 0,0047$$

Debido a que la cuantía colocada es mucho mayor que la cuantía balanceada, la falla se presentará por aplastamiento en la mampostería

Para calcular la profundidad del eje neutro, se determinan los valores de A1, B1 y C1 para posteriormente aplicar la ecuación cuadrática.

$$A1 = \alpha_1 * f'c * \beta_1 * d = 0,80 * 13,7 * 10^6 * 0,80 * 1,49 = 1,3064 * 10^7 \text{ N/m}$$

$$B1 = A_f * E_f * \epsilon_{mu} = 506,7 * 126\,700 * 0,0023 = 1,4766 * 10^5 \text{ N}$$

$$C1 = -A_f * E_f * \epsilon_{mu} * d = -506,7 * 126\,700 * 0,0023 * 0,0725 = -10705,32 \text{ N m}$$

Al solucionar la ecuación cuadrática, obtenemos la profundidad del eje neutro

$$c = 23,53 \text{ mm}$$

Una vez obtenida la profundidad del eje neutro, se procede a calcular el momento nominal resistente con la Ecuación 6-6

$$M_n = 0,80 * 13,7 * 0,80 * 23,53 * 1490 * \left(72,5 - \frac{0,80 * 23,53}{2}\right) / 10^6$$

$$M_n = 19,39 \text{ kN m}$$

La ecuación se divide en un millón para dejar unidades en kN .

### 6.1.2 MOMENTO RESISTENTE DE UN MURO QUE FALLA POR ROTURA EN EL FRP.

Si la cuantía de refuerzo es menor a la cuantía balanceada, la falla se presenta por rotura en las barras de FRP, dado que alcanza su deformación unitaria última. El ACI 440.1R permite utilizar de forma conservadora, la deformación unitaria última de la mampostería para el cálculo del momento resistente.

En la

Figura 6-2 se presenta los esquemas de deformaciones y esfuerzos en los materiales.

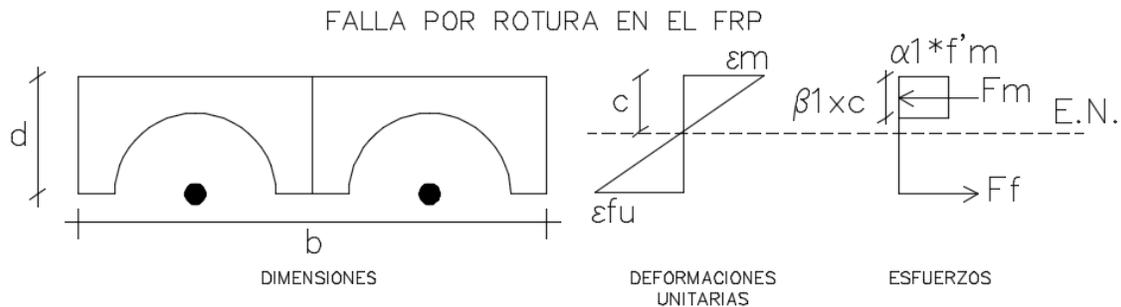


Figura 6-2 Esquema de falla cuando se alcanza la deformación unitaria última en el FRP "Rotura". Fuente el autor.

De la compatibilidad de deformaciones se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{c}{\epsilon_{mu}} = \frac{d}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{fu}}$$

Ecuación 6-7 Compatibilidad de deformaciones, rotura en FRP

Al despejar el eje neutro de la ecuación se obtiene

$$c = \frac{\epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{fu}} * d$$

Ecuación 6-8 Determinación del eje neutro en rotura para el FRP

Ya teniendo la distancia al eje neutro, se puede calcular el momento resistente de la sección transversal

$$Mn = Af * f_{fu} * \left( d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right)$$

Ecuación 6-9 Momento nominal resistente para falla por rotura en el FRP

A continuación, se presenta el ejemplo numérico del momento resistente del muro M7-G.

Propiedades de los materiales:

Para la mampostería

$$f'm = 13,7 \text{ MPa}$$

$$Em = 6285 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{mu} = 0,0023$$

$$\alpha_1 = 0,80$$

$$\beta_1 = 0,80$$

Para las barras de GFRP

$$Ffu = 916 \text{ MPa}$$

$$Ef = 55510 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{fu} = 0,00156$$

Geometría del muro

$$t = 145 \text{ mm}$$

$$b = 1490 \text{ mm}$$

$$d = 72,5 \text{ mm}$$

$$L = 2030 \text{ mm}$$

Área del refuerzo del muro, se colocó una barra de GFRP de 12.7 mm de diámetro

$$Af = = 126,7 \text{ mm}^2$$

Cálculo de la cuantía balanceada del muro.

Aplicando la Ecuación 6-1, obtenemos:

$$\rho b = 0,80 * \left(\frac{13,7}{916}\right) * 0,80 * \left(\frac{0,0023}{0,0023 + 0,0156}\right) = 0,00123$$

La cuantía colocada en el muro es:

$$\rho = \frac{Af}{b * d} = \frac{126,7}{1490 * 72,5} = 0,00117$$

Debido a que la cuantía colocada es menor que la cuantía balanceada, la falla se presentará por rotura en el FRP

A continuación, se presenta el cálculo de la profundidad del eje Neutro aplicando la Ecuación 6-8. Se debe tener en cuenta que se está utilizando la deformación unitaria última de la mampostería de forma conservadora, además esto no afecta considerablemente el resultado del momento resistente como se explica en (Nani, De Luca, Zadeh, 2014 pp 97)

$$c = \frac{0,0023}{0,0023 + 0,0156} * 72,5 = 9,31 \text{ mm}$$

Una vez obtenido el valor del eje neutro se procede a calcular el momento nominal resistente con la Ecuación 6-9

$$Mn = 126,7 * 916 * \left(72,5 - \frac{0,80 * 9,31}{2}\right) / 1 \times 10^6 = 7,98 \text{ kN m}$$

Se divide el valor obtenido en la ecuación en un millón para tener unidades de kN m.

En la Tabla 6-1 se presenta el resumen de resultados de cálculos de momento nominales teóricos, el modo de falla y el valor del eje neutro de la sección de los 14 muros reforzados con FRP.

Tabla 6-1 Resultados teóricos de muros reforzados con FRP. Fuente: el autor

| Muro  | Cant | Af                 | b    | d    | $\rho$  | $\rho b$ | Tipo de falla | c     | Mn     |
|-------|------|--------------------|------|------|---------|----------|---------------|-------|--------|
|       |      | (mm <sup>2</sup> ) | (mm) | (mm) |         |          |               | (mm)  | (kN m) |
| M1-G  | 4#4  | 507                | 1050 | 72,5 | 0,00666 | 0,00123  | Aplastamiento | 19,33 | 11,53  |
| M2-G  | 4#4  | 507                | 1490 | 72,5 | 0,00469 | 0,00123  | Aplastamiento | 16,63 | 14,31  |
| M3-G  | 3#4  | 380                | 1350 | 72,5 | 0,00388 | 0,00123  | Aplastamiento | 15,31 | 12,03  |
| M4-G  | 1#4  | 127                | 750  | 72,5 | 0,00233 | 0,00123  | Aplastamiento | 12,18 | 5,42   |
| M5-G  | 1#4  | 127                | 890  | 72,5 | 0,00196 | 0,00123  | Aplastamiento | 11,27 | 5,98   |
| M6-G  | 1#4  | 127                | 1190 | 72,5 | 0,00147 | 0,00123  | Aplastamiento | 9,85  | 7,05   |
| M7-G  | 1#4  | 127                | 1495 | 72,5 | 0,00117 | 0,00123  | Rotura de FRP | 9,32  | 7,98   |
| M8-C  | 4#4  | 507                | 1050 | 72,5 | 0,00666 | 0,00043  | Aplastamiento | 27,01 | 15,34  |
| M9-C  | 4#4  | 507                | 1490 | 72,5 | 0,00469 | 0,00043  | Aplastamiento | 23,53 | 19,39  |
| M10-C | 3#4  | 380                | 1350 | 72,5 | 0,00388 | 0,00043  | Aplastamiento | 21,78 | 16,45  |

| Muro  | Cant | Af                 | b    | d    | $\rho$  | $\rho b$ | Tipo de falla | c     | Mn     |
|-------|------|--------------------|------|------|---------|----------|---------------|-------|--------|
|       |      | (mm <sup>2</sup> ) | (mm) | (mm) |         |          |               | (mm)  | (kN m) |
| M11-C | 1#4  | 127                | 750  | 72,5 | 0,00233 | 0,00043  | Aplastamiento | 17,56 | 7,56   |
| M12-C | 1#4  | 127                | 890  | 72,5 | 0,00196 | 0,00043  | Aplastamiento | 16,30 | 8,39   |
| M13-C | 1#4  | 127                | 1190 | 72,5 | 0,00147 | 0,00043  | Aplastamiento | 14,34 | 9,99   |
| M14-C | 1#4  | 127                | 1490 | 72,5 | 0,00117 | 0,00043  | Aplastamiento | 12,97 | 11,41  |

Para ensayar los muros, se realizó un protocolo de carga, el cual consistió en cargar y descargar el muro a partir de una carga resistente teórica, Tabla 1-1 Tabla 6-1. El protocolo se resume a continuación.

Primero se carga el muro hasta el 20% de la carga resistente, a este le llamamos primer ciclo de carga, luego se descarga hasta llevarlo a el 5% de la carga resistente. Después se aumenta la carga hasta el 40% de la resistencia para completar el segundo ciclo de carga y de nuevo se descarga el muro hasta el 5% de su resistencia teórica. En el tercer ciclo de carga el muro se lleva a el 80% de la su carga resistente y seguidamente se realiza la última descarga del muro. Por último, se realiza el cuarto ciclo de carga que consiste en llevar el muro a la falla

## 6.2 CÁLCULO DE DEFLEXIONES EN EL CENTRO DE LA LUZ DE LOS MUROS

A continuación, se explica paso a paso el cálculo de dos puntos teóricos de deformación y momento para el muro M1-G, por cada uno de los métodos referenciados anteriormente.

### 6.2.1 CÁLCULO DE DEFLEXIONES POR LA METODOLOGIA BRANSON

Propiedades de los materiales:

Para la mampostería

$$f'm = 13,7 \text{ MPa}$$

$$E_m = 6285 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{mu} = 0,0023$$

$$\alpha_1 = 0,80$$

$$\beta_1 = 0,80$$

Para las barras de CFRP

$$F_f u = 916 \text{ MPa}$$

$$E_f = 55510 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0,00156$$

Geometría del muro

$$t = 145 \text{ mm}$$

$$b = 1045 \text{ mm}$$

$$d = 72,5 \text{ mm}$$

$$L = 2030 \text{ mm}$$

Área del refuerzo del muro, se colocaron 4 barras de 12,7 mm de diámetro

$$A_f = 506,7 \text{ mm}^2$$

El módulo de rotura se determinó con la Tabla 1-1 Módulo de rotura fr. Fuente tomado: TMS 402/ACI 530/ASCE-5, en donde para un muro sin celdas rellenas y con un mortero de pega tipo M, el valor del módulo de rotura es de  $f_r = 0,331 \text{ MPa}$ . Y para un muro con todas las celdas rellenas y con un mortero de pega tipo M el módulo de rotura es  $f_r = 1,089 \text{ MPa}$ . El TMS 402/ACI 530/ASCE-5 permite determinar por interpolación lineal el valor del módulo de rotura para un muro parcialmente relleno en donde no todas las celdas están rellenas.

Para el muro M1-G, el cual tiene cuatro celdas rellenas de siete, el módulo de rotura es el que se muestra en la Figura 6-3

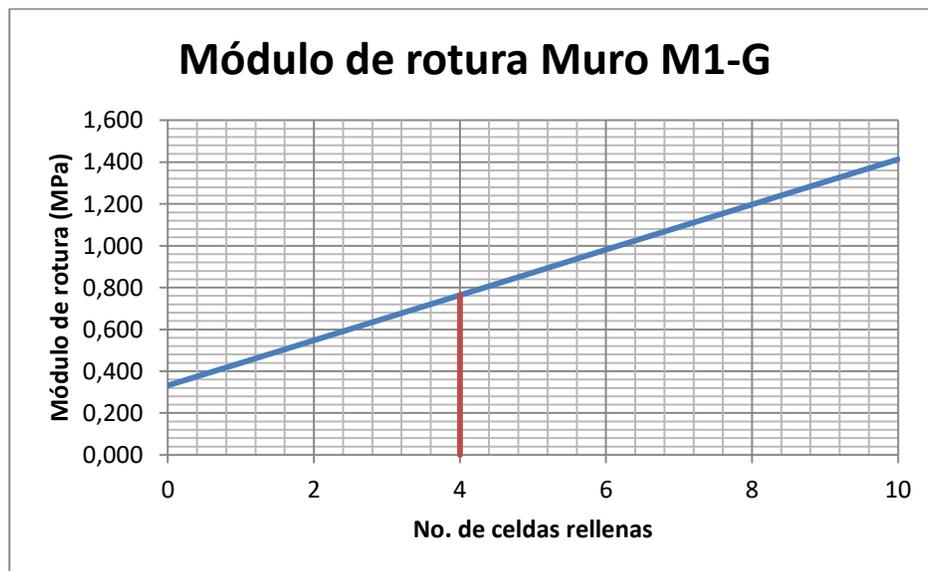


Figura 6-3 Módulo de rotura muro M1-G

Por lo tanto, el módulo de rotura del muro M1-G es:

$$f_r = 0,7641 \text{ MPa}$$

Utilizando la mecánica estructural, se determina el momento centroidal de inercia de la sección transversal del muro

$$I_g = 2.578 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

El momento de agrietamiento de la sección se determina utilizando los principios de la mecánica estructural.

$$M_{cr} = \frac{I_g}{y} * f_r$$

Ecuación 6-10 Momento de agrietamiento

$$M_{cr} = \frac{2.578 \times 10^8}{72,5} * 0,7641 / 1000000 = 2,717 \text{ kN m}$$

La ecuación anterior se divide en 1000000 para obtener unidades de kN m.

A continuación, se procede a calcular el momento centroidal de inercia de la sección fisurada, utilizando la metodología de Branson. Utilizando la Ecuación 1-12, se determina la relación de la profundidad del eje neutro a la profundidad del refuerzo, considerando la relación modular y la cuantía colocada en el muro.

$$n_f = \frac{E_f}{E_m}$$

Ecuación 6-11 Relación modular

$$n_f = \frac{55510}{6285} = 8,83$$

$$\rho_f = \frac{506,7}{1045 * 72,5} = 0,0067$$

Una vez calculada la cuantía y la relación modular determinamos el valor de k

$$k = \sqrt{2 * \rho_f * n_f + (\rho_f * n_f)^2} - \rho_f * n_f$$

$$k = \sqrt{2 * 0,0067 * 8,83 + (0,0067 * 8,83)^2} - 0,0067 * 8,83 = 0,289$$

Ya teniendo el valor de k se determina el valor del momento centroidal de inercia de la sección fisurada, utilizando la Ecuación 1-13

$$I_{cr} = \frac{b * d^3}{3} * k^3 + n_f * A_f * d^2 * (1 - k)^2$$

$$I_{cr} = \frac{1045 * 72,5^3}{3} * 0,289^3 + 8,83 * 506,7 * 72,5^2 * (1 - 0,289)^2 = 1.509 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

Una vez conocido el momento centroidal de inercia de la sección fisurada se puede determinar la inercia efectiva de la sección transversal. Debido a que la inercia efectiva depende del momento flector que está actuando, para este caso se seleccionan dos momentos flectores, uno para el cual la sección no se ha fisurado, es decir menor al momento de agrietamiento y un momento flector mayor al momento de agrietamiento. Los momentos se toman de forma aleatoria y para estos se determina la respectiva deflexión en el muro, los momentos seleccionados son  $M_a = 1,0 \text{ kN m}$  y  $M_a = 5,0 \text{ kN m}$ .

Para el caso de  $M_a = 1,0 \text{ kN m}$  la inercia efectiva corresponde a la inercia bruta de la sección transversal, ya que la sección no se ha fisurado. Aplicando los principios de la mecánica estructural para una viga simplemente apoyada y con cargas en los tercios la deflexión se calcula con la Ecuación 6-12

$$\delta = \frac{23 * M_a * L^2}{216 * E_m * I_e}$$

Ecuación 6-12 Deflexión en la altura media del muro

$$\delta = \frac{23 * 1,0 * 2,03^2}{216 * (6285 * 1000) * 2.578 \times 10^8} * 1000 = 0,135 \text{ mm}$$

El módulo de elasticidad se multiplica por mil para que el resultado sea en kPa y la deflexión teórica calculada, se multiplica por mil para tener la respuesta en mm.

Para el caso de  $M_a = 5,0 \text{ kN m}$ , primero se determina el valor de la inercia efectiva de la sección transversal con la Ecuación 1-14

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 * \beta d * I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right) * I_{cr} \leq 1.0$$

El coeficiente  $\beta d$ , tiene en cuenta la adherencia entre la barra y el concreto. Y se determina con la Ecuación 1-15

$$\beta d = \frac{1}{5} * \left(\frac{\rho_f}{\rho_b}\right) \leq 1,0$$

Para determinar la cuantía balanceada se utiliza la Ecuación 1-5.

$$\rho b = 0,80 * \beta_1 * \left( \frac{f' m}{f_{fu}} \right) * \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right)$$

$$\rho b = 0,80 * 0,80 * \left( \frac{13,7}{916} \right) * \left( \frac{0,0023}{0,0023 + 0,0156} \right) = 0,0012$$

Ahora se determina el coeficiente que tiene en cuenta la adherencia entre la barra y el mortero.

$$\beta d = \frac{1}{5} * \left( \frac{0,0067}{0,0012} \right) = 1,11$$

El coeficiente no debe ser mayor que 1,0 por lo tanto se toma 1,0 y se calcula la inercia efectiva.

$$I_e = \left( \frac{2,717}{5,0} \right)^3 * 1,0 * 2,578x10^8 + \left( 1 - \left( \frac{2,717}{5,0} \right)^3 \right) * 1,509x10^7 = 5,404x10^7 mm^4$$

Una vez obtenida la inercia efectiva, se calcula la deflexión en el centro de la altura del muro

$$\delta = \frac{23 * 5,0 * 2,03^2}{216 * (6285 * 1000) * 5,404x10^7} * 1000 = 6,460 mm$$

Este procedimiento se repite para varios momentos y se grafica la curva teórica de momento flector contra deflexión en la altura media del muro.

## 6.2.2 CÁLCULO DE DEFLEXIONES POR LA METODOLOGIA BISCHOFF

A continuación, se determina la deflexión del mismo muro M1-G, utilizando la metodología de Bisschoff. Para el cálculo de la inercia efectiva, también a modo de ejemplo se utiliza el momento  $M_a = 5 \text{ kN m}$ .

Primero se determina el factor  $\gamma$ , utilizando la Ecuación 1-17

$$\gamma = 1,7 - 0,7 * \frac{2,717}{5,0} = 1,319$$

El valor de la inercia efectiva se determina con la Ecuación 1-16

$$I_e = \frac{1,509x10^7}{1 - 1,319 * \left( \frac{2,717}{5,0} \right)^2 * \left( 1 - \frac{1,509x10^7}{2,578x10^8} \right)}$$

$$I_e = 2.383x10^7 mm$$

Una vez calculada la inercia efectiva con esta metodología, se determina la deflexión en el muro utilizando las ecuaciones de la mecánica estructural

$$\delta = \frac{23 * Ma * L^2}{216 * Em * Ie}$$

$$\delta = \frac{23 * 5.0 * 2.03^2}{216 * 6285 * 1000 * 2.383 \times 10^{-5}} * 1000 = 14.64 \text{ mm}$$

Este procedimiento se repite para varios momentos y se grafica la curva teórica de momento flector contra deformación en la altura media del muro.

## 7 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en los ensayos de los muros que fueron reforzados con barras de GFRP, CFRP y con acero convencional. Posteriormente se realiza un análisis comparativo de los resultados experimentales con los resultados teóricos y luego se realiza la comparación entre los muros M2-G con el muro M15-S y el M9-C con el M16-S, para ver las diferencias entre un muro reforzado con acero convencional y un muro reforzado con FRP, de la misma capacidad teórica.

### 7.1 RESULTADOS DE ENSAYOS A MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON GFRP

De los resultados obtenidos de los Ldvt's y la carga reportada en la celda de carga, se construyeron las gráficas de los muros. En la Figura 7-1 se presenta la curva de carga contra deflexión del muro M2-G donde se pueden observar los ciclos de carga y descarga descritos en el protocolo; donde en las ordenadas se grafican las cargas y en las abscisas las deflexiones en el centro de la altura del muro, como se puede observar, la gráfica tiene una pendiente alta en el primero y parte del segundo ciclo (donde el muro aún no se ha fisurado). Una vez el muro se fisura la pendiente disminuye y esta se mantiene hasta la falla del muro. También se puede apreciar, que una vez se descarga el muro este tiende a recuperar su posición inicial simulando un comportamiento elástico.

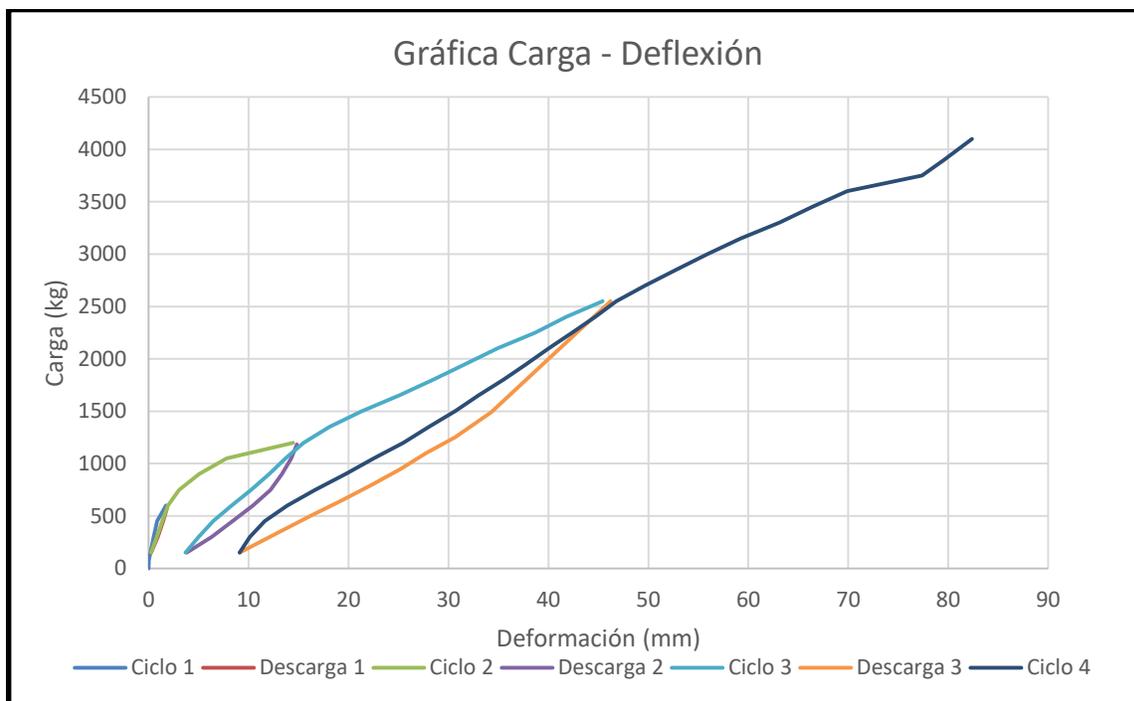


Figura 7-1 Ciclos de carga y descarga, Curva carga contra deflexión Muro M2-G.  
Fuente: el autor.

Las curvas de la envolvente de momento contra deflexión se presentan en la Figura 7-2. En la cual se muestran los resultados de todos los muros reforzados con barras de GFRP y además los muros que están reforzados con barras de acero convencional para comparar el comportamiento en una misma escala.

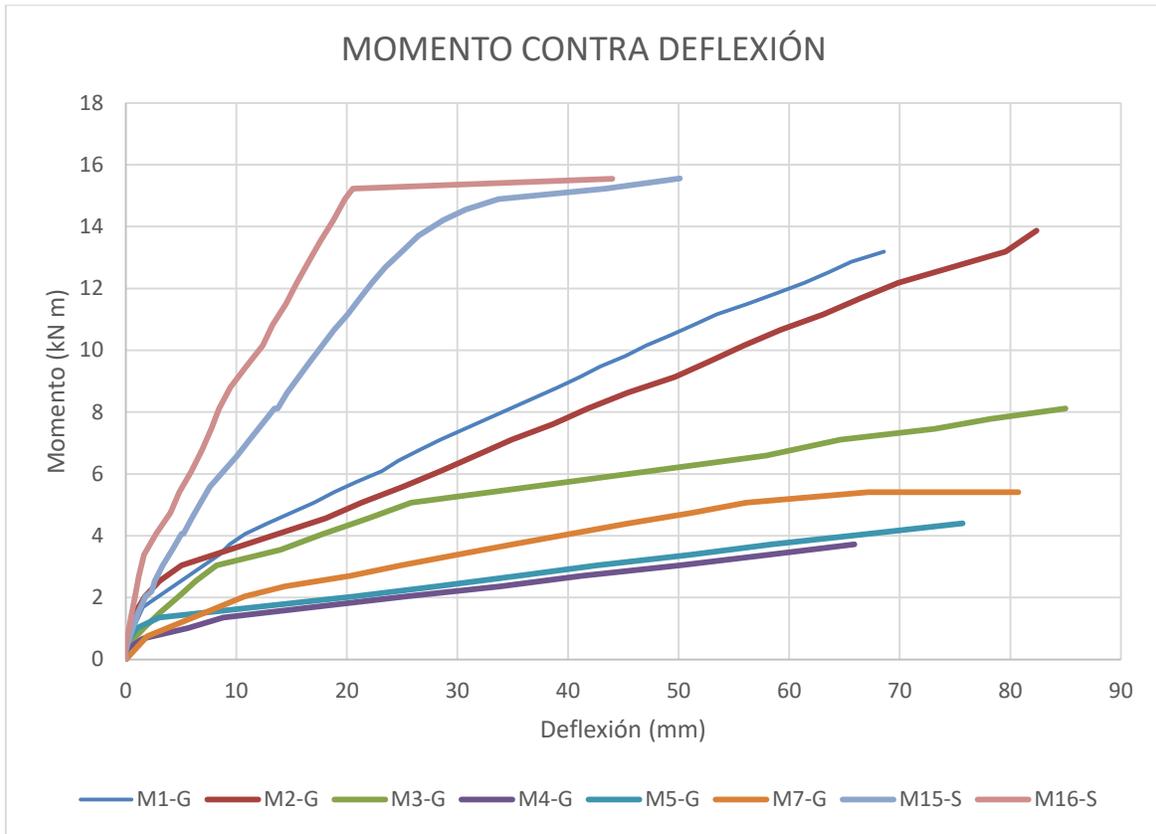


Figura 7-2 Curvas momento contra deformación de los muros reforzados con GFRP.  
Fuente: el autor

En la gráfica se puede observar que las curvas para todos los muros de mampostería reforzados con FRP, se presenta una recta con una pendiente alta hasta el momento de agrietamiento, de allí en adelante la pendiente disminuye y se mantiene hasta la falla del muro con un comportamiento lineal elástico.

Para las curvas de los muros que contenían acero se pueden observar tres pendientes, la primera se presenta hasta el momento de agrietamiento del muro, la segunda hasta el punto de fluencia del acero y de allí en adelante una recta sin pendiente hasta la falla del muro.

Los resultados individuales de la envolvente de momento contra deflexión de cada uno de los muros se presentan en el ANEXO E

Igualmente, en la Figura 7-3 se muestran los resultados de las deformaciones unitarias en el refuerzo contra el momento alcanzado en el muro reforzado con barras de FRP y de igual forma en la misma grafica se presentan los resultados de los muros reforzados con acero convencional. Donde las deformaciones unitarias en las barras se determinaron a partir de los resultados arrojados por los deformímetros electrónicos Strain gauge, y los momentos se determinaron con la lectura de la carga registrada en la celda de carga.

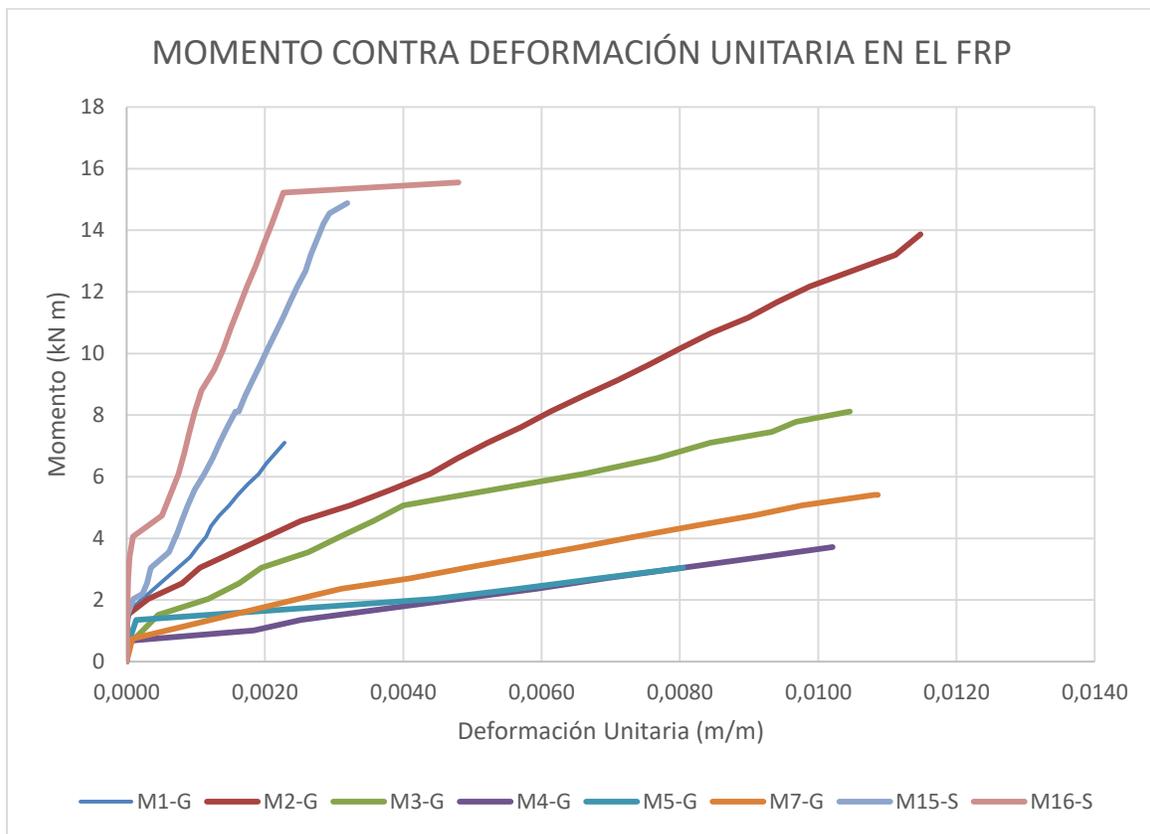


Figura 7-3 Momentos contra deformaciones unitarias en el refuerzo para barras de GFRP. Fuente: el autor

De la gráfica, se puede observar que ninguna barra alcanzo su deformación última incluso en el muro M7-G donde se esperaba una falla por rotura en el FRP (como se muestra en los cálculos teóricos, presentados en el capítulo 5). En los muros de acero convencional se ven deformaciones unitarias más bajas para momentos mayores. También se observa un comportamiento lineal de las deformaciones en función del momento actuante

En la Figura 7-4 se muestran la graficas de las deformaciones unitarias de la mampostería para los muros reforzados con barras de GFRP y los muros reforzados con acero convencional. Estas deformaciones unitarias en la mampostería se determinaron a partir de los resultados arrojados por los deformímetros electrónicos Strain gauge, y los momentos se determinaron con la lectura de la carga registrada por la celda de carga.

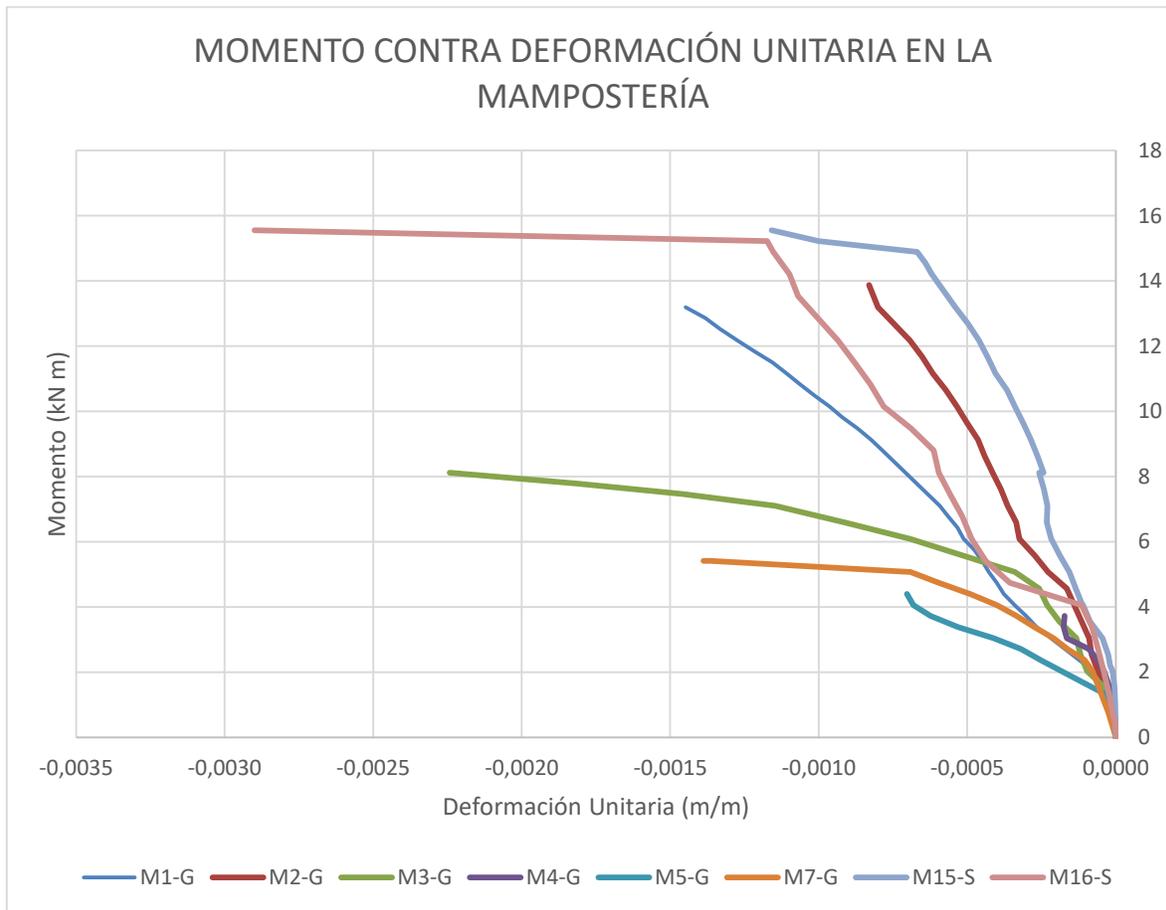
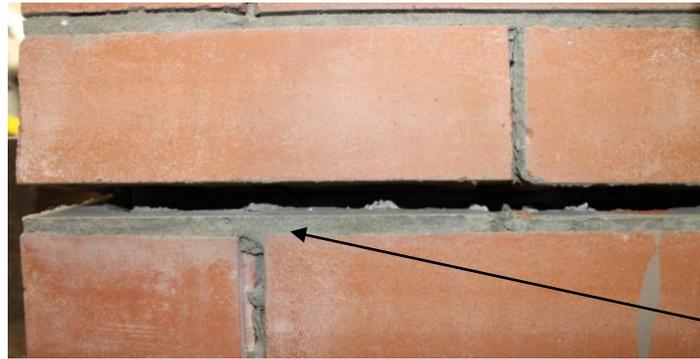


Figura 7-4 Momentos contra deformaciones unitarias en la mampostería para muros reforzados con barras de GFRP. Fuente: el autor

Como se indica en la gráfica ningún muro reforzado con barras de GFRP alcanzó la deformación unitaria última en la mampostería, ( $\epsilon_{mu} = 0.0023$ , resultado de los ensayos a los materiales capítulo 5) debido a que por grandes deformaciones el muro no tenía capacidad de absorber más carga. Sin embargo, en los muros se observa aplastamiento en la zona de compresión, quizás el Strain gauge no estaba ubicado en la zona de máxima compresión.

De igual forma se presenta un comportamiento lineal de deformaciones. (deformaciones proporcionales al momento actuante)

En la Figura 7-5 se presenta la falla típica de los muros reforzados con barras de GFRP.



Separación entre el mortero de pega y la unidad de mampostería



Separación entre el mortero de pega y la unidad de mampostería

Fisura por tensión en la unidad de mampostería

Figura 7-5 Falla típica en los muros de mampostería reforzados con barras de GFRP. Fuente: el autor.

## 7.2 RESULTADOS DE ENSAYOS A MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON CFRP.

De igual forma que en los muros reforzados con barras de GFRP, los muros se ensayaron siguiendo el protocolo de carga establecido

En la Figura 7-6 se presenta la curva de carga contra deflexión del muro M9-C donde se observan los ciclos de carga

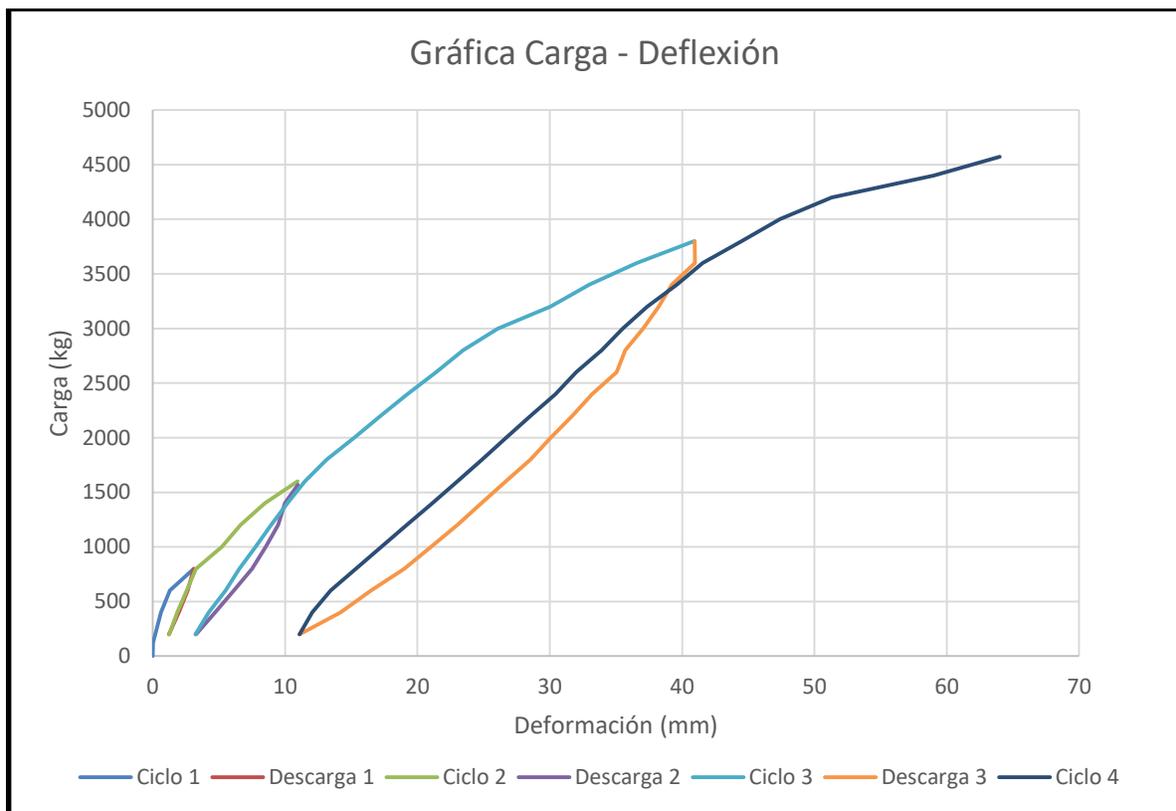


Figura 7-6 Ciclos de carga y descarga, Curva carga contra deflexión Muro M9-C.  
Fuente: el autor.

De los resultados obtenidos de los deformímetros electrónicos y la carga registrada en la celda de carga, se construyeron la envolvente de las curvas del protocolo de carga de los muros, los cuales se presentan en la Figura 7-7. En la cual se muestran los resultados de todos los muros reforzados con barras de CFRP y además los muros que están reforzados con barras de acero convencional para comparar el comportamiento en una misma escala.

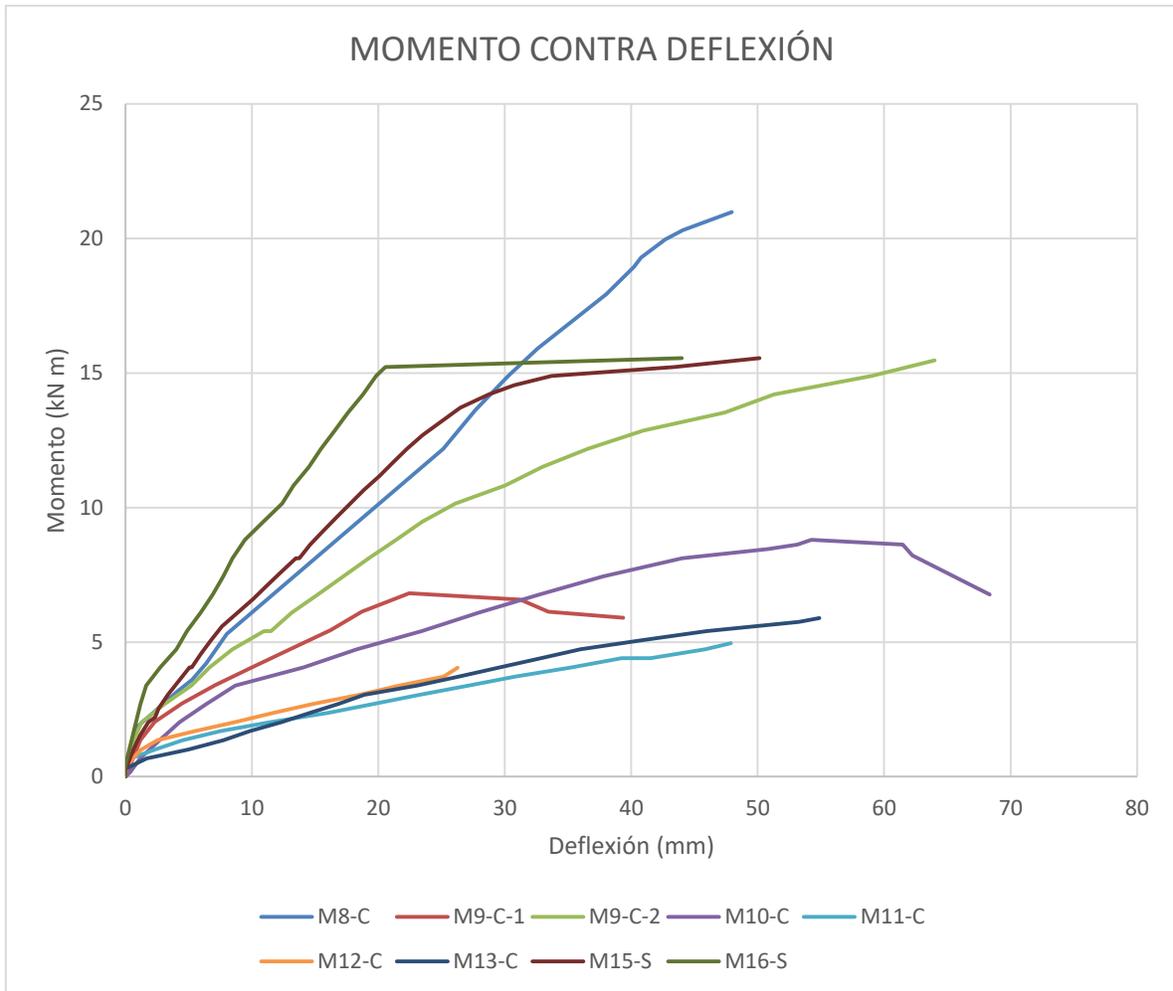


Figura 7-7 Curvas momento contra deformación de los muros reforzados con CFRP.  
Fuente: el autor

De igual forma que los muros reforzados con barras de GFRP las gráficas presentan un comportamiento linealmente elástico hasta la falla, con una pendiente hasta el momento de agrietamiento y otra pendiente menor a partir de dicho momento.

En la Figura 7-8 se muestran los resultados de las deformaciones unitarias en el refuerzo contra el momento alcanzado en el muro y de igual forma que en la gráfica anterior, se muestran los resultados de los muros que tienen acero convencional en la misma figura. Estas deformaciones unitarias en las barras de CFRP se determinaron a partir de los resultados arrojados por los deformímetros electrónicos Strain gauge, y los momentos se determinaron con la lectura de la carga registrada por la celda de carga.

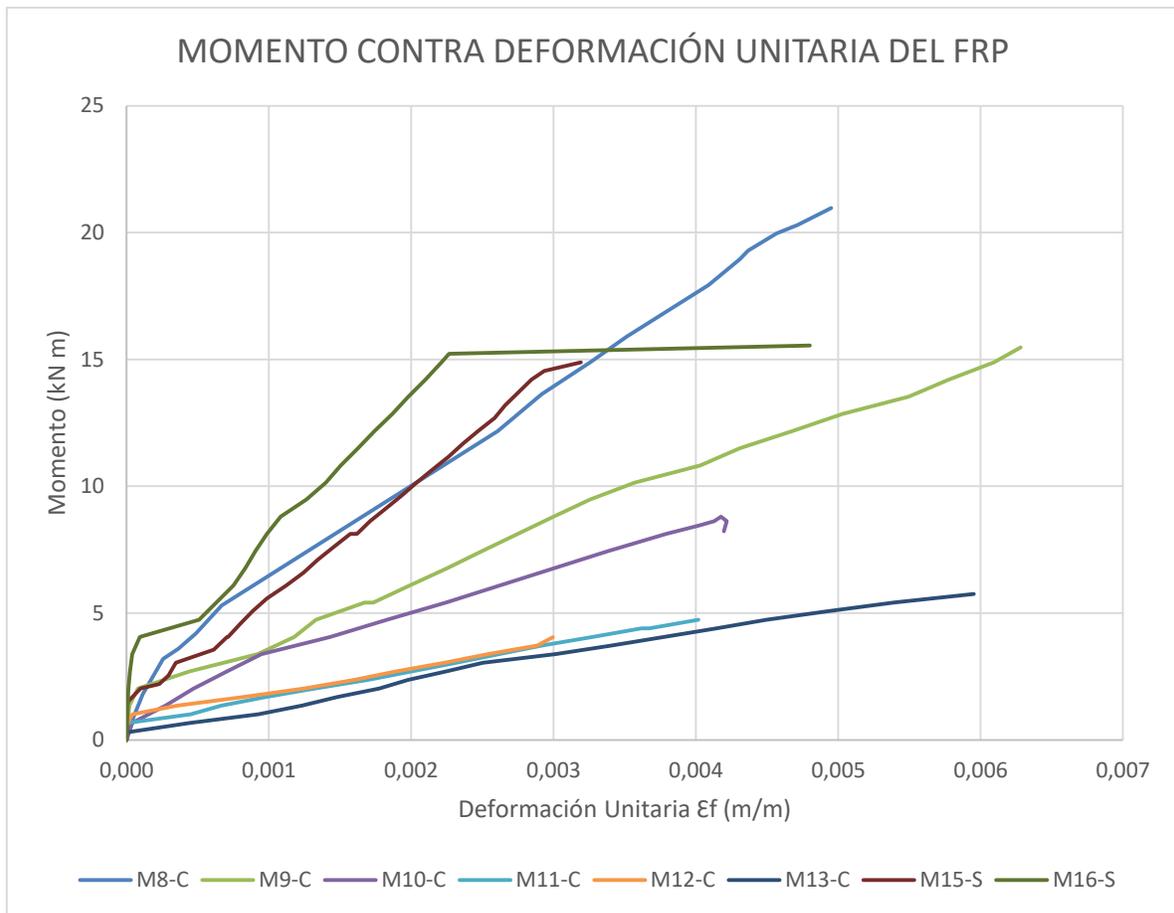


Figura 7-8 Momentos contra deformaciones unitarias en el refuerzo para barras de CFRP. Fuente: el autor

De la gráfica anterior se puede observar que ninguna barra de CFRP alcanzó grandes deformaciones unitarias y estuvieron bastante lejos de la deformación unitaria de falla (para las barras de CFRP,  $\epsilon_{fu} = 0.0018$ , según los ensayos de los materiales). También se observan comportamiento lineal de las deformaciones en función del momento actuante

En la Figura 7-9 se muestran las gráficas de las deformaciones unitarias de la mampostería para los muros reforzados con barras de CFRP y los muros reforzados con acero convencional. Estas deformaciones unitarias en la mampostería se determinaron a partir de los resultados arrojados por las galgas, y los momentos se determinaron con la lectura registrada por la celda de carga.

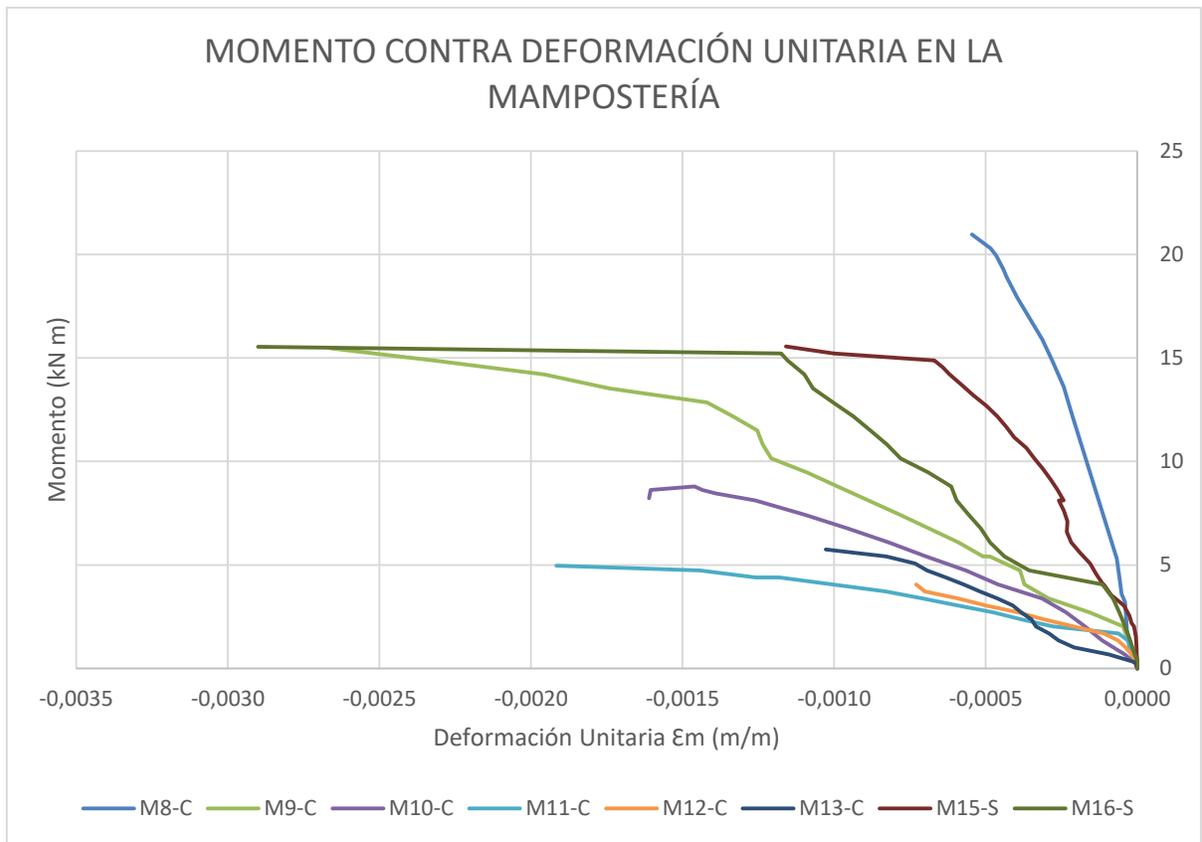


Figura 7-9 Momentos contra deformaciones unitarias en la mampostería para muros reforzados con barras de CFRP. Fuente: el autor

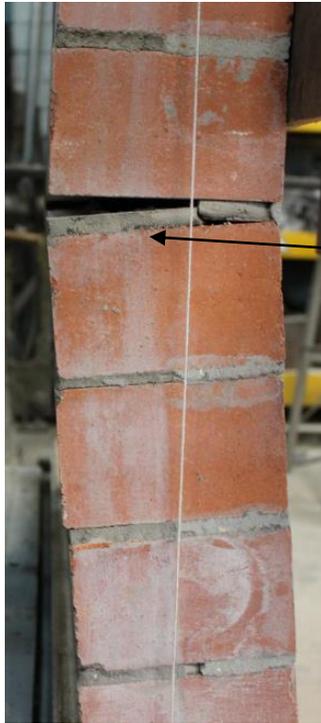
Como se indica en la gráfica solo los muros M9-C y M16-S alcanzaron la deformación unitaria de falla de la mampostería.

De igual forma se presenta un comportamiento lineal de deformaciones. (deformaciones proporcionales al momento actuante)

En la Figura 7-10 se presenta la falla típica de los muros reforzados con barras de CFRP.



Aplastamiento en la mampostería.



Separación del mortero de pega y la unidad de mampostería.

Figura 7-10 Falla típica en los muros de mampostería reforzados con barras de CFRP.  
Fuente: el autor.

### 7.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MUROS

En esta sección se presentan los resultados de todos los muros simultáneamente para poder analizar los resultados en conjunto, de los datos obtenidos experimentalmente y teóricamente.

#### 7.3.1 MOMENTO TEÓRICO CONTRA MOMENTO EXPERIMENTAL

En la Figura 7-11 se presentan las relaciones entre los momentos calculados teóricamente y los experimentales, la recta representa el valor teórico del momento y los puntos representan los resultados experimentales.

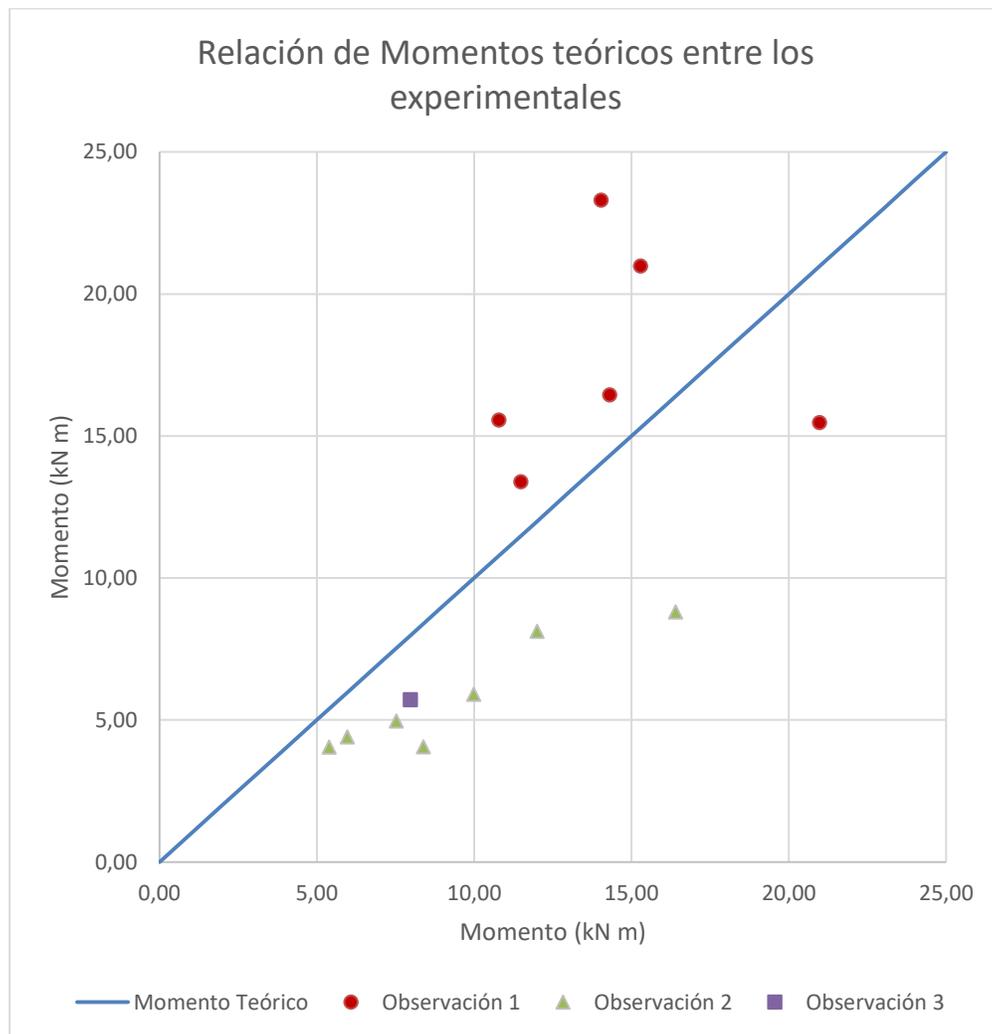


Figura 7-11 Momentos experimentales máximos de muros con relación a los teóricos.  
Fuente: el autor.

Las observaciones 1, 2 y 3 se refieren a:

Observación 1: indica que el ensayo fue adecuado y que los resultados se admiten, aunque el muro M9-C tuvo una carga experimental un poco inferior a la carga teórica y esto se debe a que durante el ensayo se alcanzó una deformación muy grande (la cual ofreció inestabilidad y posible colapso del muro) y por motivos de seguridad no se continuó aumentando la carga.

Observación 2: hace referencia a que el ensayo no alcanzó la carga teórica debido a que posiblemente no hubo suficiente adherencia entre los materiales (grout de relleno, barras de FRP y unidades de arcilla)

Observación 3: indica que el ensayo se considera inadecuado, ya que el montaje se deforma más de lo esperado, esto sucedió para los dos primeros ensayos, a partir de esto, se rigidizaron algunos elementos del marco de prueba y de allí en adelante, funcionó adecuadamente.

En la Tabla 7-1 se presentan un resumen de los resultados teóricos y experimentales de los muros con las correspondientes observaciones del caso para cada uno de ellos.

Cabe anotar que en la Tabla 7-1, se muestran los resultados de resistencia última de los muros, y que el 57% de ellos no alcanzó el resultado esperado, por los motivos que se presentan en las observaciones y en las conclusiones del documento. Sin embargo, los muros se revisaron bajo estados límites de servicio, donde su carga teórica resistente se factora por 0,625 (lo cual simula las combinaciones de servicio) y se presentan las gráficas de momento contra deflexión para cada uno de ellos (capítulo 7.5 y anexo E), de los cuales el 100% de ellos muestran resultados que se ajustan satisfactoriamente a los teóricos.

Tabla 7-1      Resumen de resultados. Fuente: el autor

| No. | Muro  | Tipo Ref. | b<br>(mm) | Ref |     | Af<br>(mm <sup>2</sup> ) | ρ      | c<br>(mm) | Mn teo<br>(kN m) | Mn exp<br>(kN m) | Mn serv<br>(kN m) | Mnteo/<br>Mnexp | εx(teórica)<br>FRP | εx(exp)<br>FRP | εx(teórica)<br>Mamp | εx(exp)<br>Mamp | Tipo de falla<br>Teórica        | Tipo de falla<br>Experimental   | Observación   |
|-----|-------|-----------|-----------|-----|-----|--------------------------|--------|-----------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------|---------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---|
|     |       |           |           |     | #   |                          |        |           |                  |                  |                   |                 |                    |                |                     |                 |                                 |                                 |   |
| 1   | M1-G  | GFRP      | 1045      | 4   | # 4 | 506                      | 0,0067 | 21,00     | 11,53            | 13,38            | 7,20              | 0,86            | 0,0063             | 0,0075         | 0,0023              | 0,0014          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 1.Resultados adecuados  |
| 2   | M2-G  | GFRP      | 1490      | 4   | # 4 | 506                      | 0,0047 | 18,08     | 14,31            | 16,44            | 8,94              | 0,87            | 0,0077             | 0,0134         | 0,0023              | 0,0010          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 1. Resultados adecuados   |
| 3   | M3-G  | GFRP      | 1345      | 3   | # 4 | 380                      | 0,0039 | 16,69     | 12,03            | 8,12             | 7,52              | 1,48            | 0,0086             | 0,0105         | 0,0023              | 0,0022          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 2. No hubo suficiente adherencia entre el refuerzo y el mortero de relleno                                  |
| 4   | M4-G  | GFRP      | 745       | 1   | # 4 | 126                      | 0,0023 | 13,33     | 5,42             | 4,04             | 3,39              | 1,34            | 0,0113             | 0,0102         | 0,0023              | 0,0002          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 2. No hubo suficiente adherencia entre el refuerzo y el mortero de relleno                                  |
| 5   | M5-G  | GFRP      | 890       | 1   | # 4 | 126                      | 0,0020 | 12,30     | 5,98             | 4,40             | 3,74              | 1,36            | 0,0125             | 0,0080         | 0,0023              | 0,0007          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 2. No hubo suficiente adherencia entre el refuerzo y el mortero de relleno                                  |
| 6   | M6-G  | GFRP      | 1190      | 1   | # 4 | 126                      | 0,0015 | 10,77     | 7,05             | -                | 4,41              | -               | -                  | -              | -                   | -               |                                 |                                 | Muro no ensayado  |
| 7   | M7-G  | GFRP      | 1490      | 1   | # 4 | 126                      | 0,0012 | 9,71      | 7,98             | 5,71             | 4,99              | 1,40            | 0,0156             | 0,0109         | 0,0022              | 0,0015          | Rotura en el FRP                | Aplastamiento en la mampostería | 3. El montaje se deforma más de lo esperado   |
| 8   | M8-C  | CFRP      | 1045      | 4   | # 4 | 506                      | 0,0067 | 29,12     | 15,34            | 20,98            | 9,59              | 0,73            | 0,0039             | 0,0030         | 0,0023              | 0,0002          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 1.Resultados adecuados  |
| 9   | M9-C  | CFRP      | 1490      | 4   | # 4 | 506                      | 0,0047 | 25,41     | 19,39            | 15,47            | 12,12             | 1,25            | 0,0048             | 0,0063         | 0,0023              | 0,0027          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 1.Resultados adecuados  |
| 10  | M10-C | CFRP      | 1345      | 3   | # 4 | 380                      | 0,0039 | 23,60     | 16,45            | 8,80             | 10,28             | 1,87            | 0,0053             | 0,0042         | 0,0023              | 0,0016          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 2. No hubo suficiente adherencia entre el refuerzo y el mortero de relleno                                  |
| 11  | M11-C | CFRP      | 745       | 1   | # 4 | 126                      | 0,0023 | 19,13     | 7,56             | 4,96             | 4,73              | 1,52            | 0,0072             | 0,0040         | 0,0023              | 0,0019          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 2.No hubo suficiente adherencia entre el refuerzo y el mortero de relleno                                   |
| 12  | M12-C | CFRP      | 890       | 1   | # 4 | 126                      | 0,0020 | 17,73     | 8,39             | 4,05             | 5,25              | 2,07            | 0,0079             | 0,0030         | 0,0023              | 0,0007          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 2. No hubo suficiente adherencia entre el refuerzo y el mortero de relleno                                  |
| 13  | M13-C | CFRP      | 1190      | 1   | # 4 | 126                      | 0,0015 | 15,62     | 9,99             | 5,90             | 6,25              | 1,69            | 0,0093             | 0,0060         | 0,0023              | 0,0010          | Aplastamiento en la mampostería | Aplastamiento en la mampostería | 2. No hubo suficiente adherencia entre el refuerzo y el mortero de relleno                                  |
| 14  | M14-C | CFRP      | 1490      | 1   | # 4 | 126                      | 0,0012 | 14,14     | 11,41            | -                | 7,13              | -               | -                  | -              | -                   | -               |                                 |                                 | 3. Los resultados del muro no se consideran aceptados debido a que el montaje se deforma más de lo esperado |
| 15  | M15-S | STEEL     | 1490      | 3   | # 4 | 380                      | 0,0035 | 27,14     | 10,80            | 15,55            | 6,75              | 0,69            | 0,0021             | 0,0032         | 0,0004              | 0,0012          | Fluencia en el acero            | Fluencia en el acero            | 1.Resultados adecuados  |
| 16  | M16-S | STEEL     | 1490      | 4   | # 4 | 506                      | 0,0047 | 30,24     | 14,04            | 23,29            | 8,78              | 0,60            | 0,0021             | 0,0048         | 0,0006              | 0,0029          | Fluencia en el acero            | Fluencia en el acero            | 1.Resultados adecuados  |

## 7.4 COMPARACIÓN ENTRE EL DISEÑO DE UN MURO REFORZADO CON FRP Y UN MURO REFORZADO CON ACERO

Para comparar los muros reforzados con FRP y reforzados con acero estructural, se tomaron los resultados del ensayo del muro M2-G para el caso de barras de fibra de vidrio y el M9-C para las barras de fibra de carbono. El muro M15-S y M16 –S tienen las mismas dimensiones y una cantidad de refuerzo utilizando acero convencional, con el cual se obtiene un valor de  $\Phi M_n$  igual al M2-G y al M9-C respectivamente

En la Figura 7-12 se presenta las curvas de momento contra deflexión de los muros M2-G, y M15-S simultáneamente para observar resistencias y rigideces.

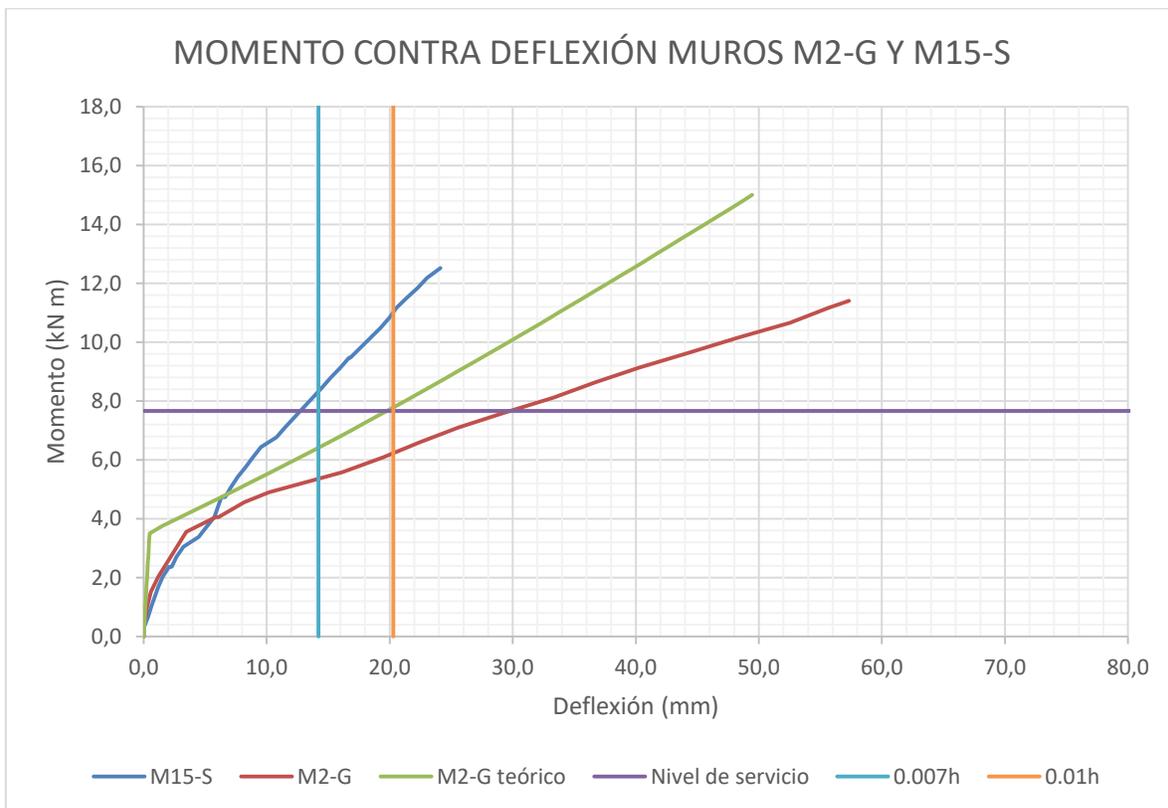


Figura 7-12 Momento contra deformación muro M2-G, y M15-S. Fuente: El autor

De la Figura 7-12 se puede observar que entre mayor módulo de elasticidad tenga la barra, el muro resulta más rígido, y como era de esperarse, el módulo de elasticidad del acero que es el mayor presenta deflexiones menores para momentos más altos que el FRP.

Las curvas M15-S y M2-G se tomaron de los resultados experimentales arrojados por los ensayos realizados a cada uno de los muros. Las rectas verticales, representan la deformación permitida como porcentajes de la altura del muro, para este caso, se determina

que la deformación permisible es del 1,0% de la altura del muro, para la cual el muro aun no presenta grandes fisuras.

La recta horizontal representa el valor del momento hasta el cual el muro trabaja bajo cargas de servicio, este valor se determina como el 62,5% de la resistencia nominal del muro.

Por último, la curva M2-G teórica, representa la rigidez teórica que debería tener el muro, para que a nivel de servicio no supere una deformación del 1,0% la altura del muro. Para lograr esto, se debe aumentar la cantidad de refuerzo para así, aumentar la rigidez del muro y poder controlar las deflexiones en los niveles de carga de servicio. Para este caso se deberían colocar 9 barras de GFRP, es decir, 5 barras más a las que el muro tenía inicialmente.

En la Figura 7-13 se presenta las curvas de momento contra deflexión de los muros M9-C, y M16-S simultáneamente para observar resistencias y rigideces.

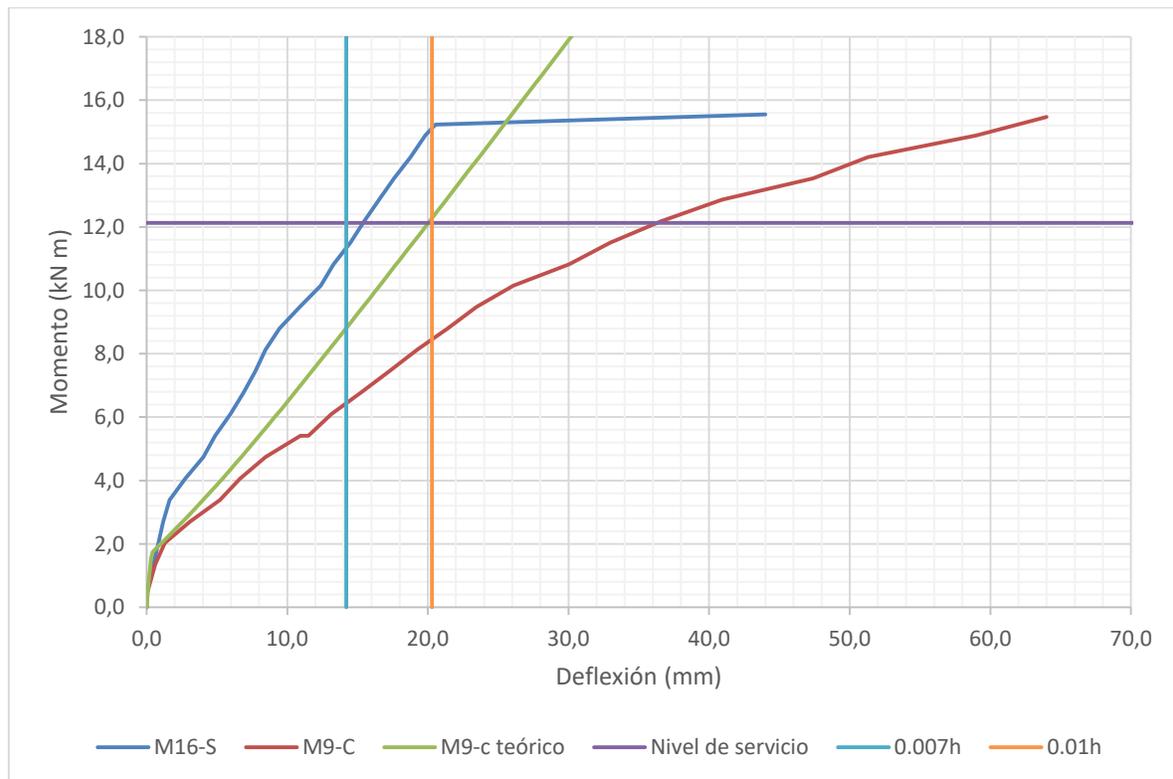


Figura 7-13 Momento contra deformación muro M9-C, y M16-S. Fuente: El autor

De manera similar al caso anterior, las curvas de los muros M16-S y M9-C se tomaron de los resultados experimentales arrojados por los ensayos realizados a cada uno de los muros. Las rectas verticales, representan la deformación permitida como porcentajes de la

altura del muro, para este caso, se determina que la deformación permisible es del 1,0% de la altura del muro, para la cual el muro aun no presenta grandes fisuras.

La recta horizontal representa el valor del momento hasta el cual el muro trabaja bajo cargas de servicio, este valor se determina como el 62,5% de la resistencia nominal del muro.

Por último, la curva M9-C teórica, representa la rigidez teórica que debería tener el muro, para que a nivel de servicio no supere una deformación del 1,0% la altura del muro. Para lograr esto, se debe aumentar la cantidad de refuerzo para así, aumentar la rigidez del muro y poder controlar las deflexiones en los niveles de carga de servicio. Para este caso se deberían colocar 6 barras de CFRP, es decir, 2 barras más a las que el muro tenía inicialmente.

También se observa que los muros reforzados con FRP alcanzaron deflexiones muy grandes a la falla, sin embargo, estos muros presentaron mayor cantidad y anchos de fisuras para estados de carga relativamente bajos.

En cuanto a la resistencia el muro de acero obtuvo valores mayores de resistencia, esto puede quizás deberse a que las barras de acero presentaban un corrugado que desarrolla mejor adherencia y por lo tanto un mejor comportamiento que los muros reforzados con FRP.

## **7.5 COMPARACIÓN DE DEFLEXIONES TEÓRICAS CONTRA EXPERIMENTALES**

Para comparar las deflexiones calculadas teóricamente contra las experimentales, se grafica en un mismo sistema coordinado la curva experimental y la curva teórica de momento flector contra la deflexión en el centro del muro.

La curva experimental se obtuvo de los resultados leídos en los transductores de desplazamiento (LDVTs) y de la carga aplicada en los tercios de la luz mediante el gato mecánico. Para la construcción de la curva teórica se utilizó la metodología del cálculo de deflexiones propuesta por Branson, y el método del cálculo de la inercia efectiva propuesto por Bischoff. El ejemplo paso a paso de un punto en las curvas teóricas de deformación se presentó en el capítulo 6

A continuación, se presentan las curvas teóricas por el método de Branson, por la metodología de Bischoff y la curva experimental de los muros M1-G y M2-G, los cuales están reforzados con barras GFRP y los muros M8-C y M9-C los cuales están reforzados con barras de CFRP.

La Figura 7-14 muestra la curva experimental y teóricas de momento contra deflexión del muro M1-G, donde se puede observar que las curvas teóricas resultan más rígidas que la curva experimental. También se observa que el momento de agrietamiento teórico es mayor que el experimental.

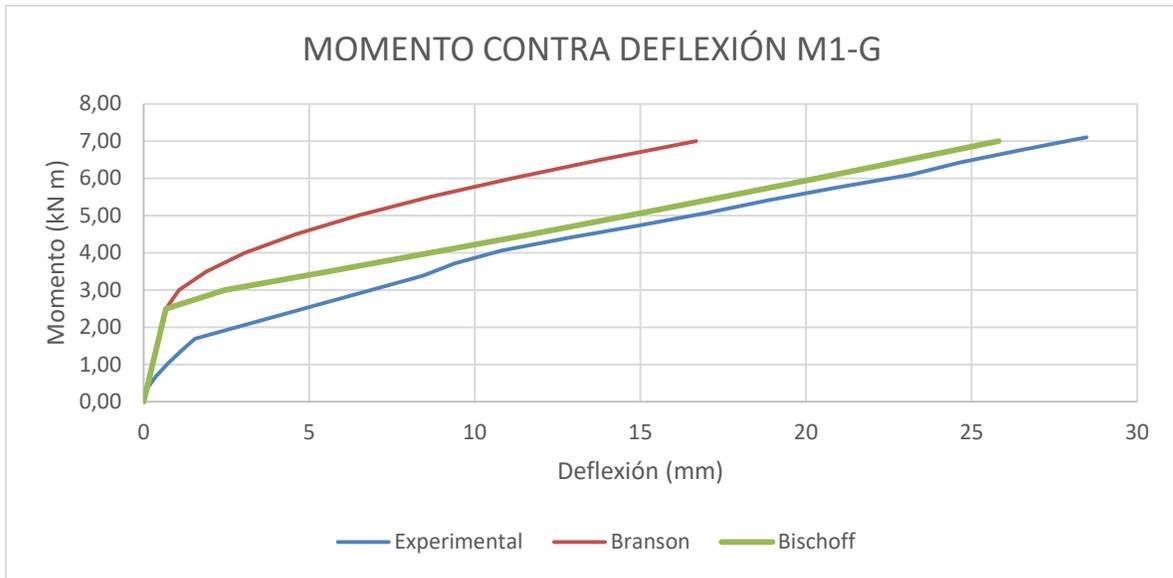


Figura 7-14 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M1-G. Fuente. El autor

La Figura 7-15 muestra la curva experimental y teóricas de momento contra deflexión del muro M2-G, donde se puede observar que las curvas teóricas resultan más rígidas que la curva experimental. También se observa que el momento de agrietamiento teórico es mayor que el experimental

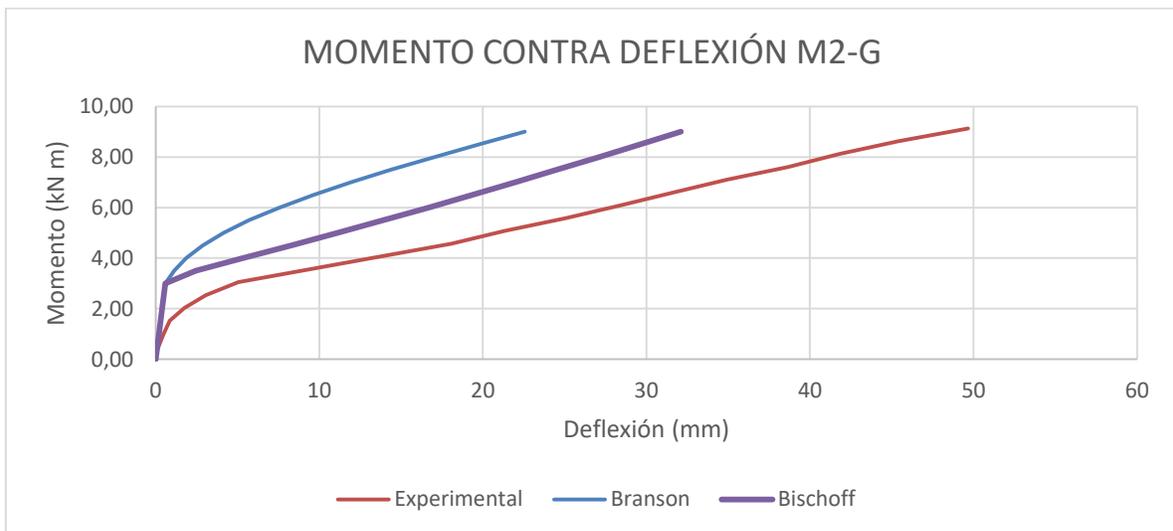


Figura 7-15 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M2-G. Fuente. El autor

La Figura 7-16 muestra la curva experimental y teóricas de momento contra deflexión del muro M8-C, donde se puede observar que, para este muro, la curva experimental resulta

más rígida que las teóricas, a partir de un momento de 7,0 kN m aproximadamente. También se observa que el momento de agrietamiento teórico es mayor que el experimental

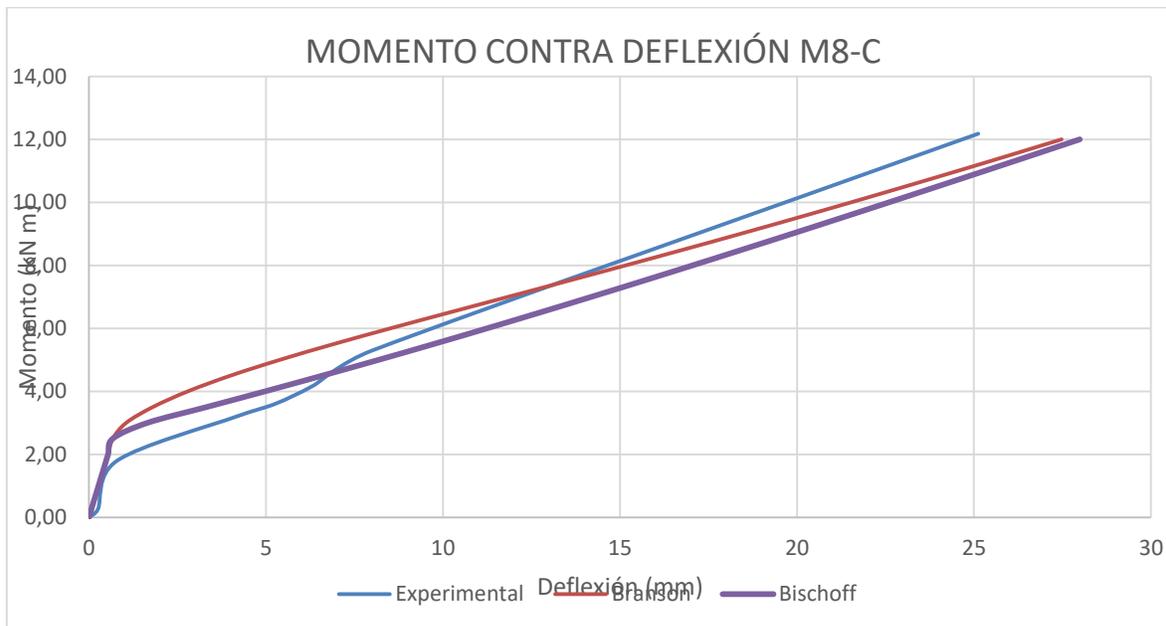


Figura 7-16 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M8-C. Fuente. El autor

La Figura 7-17 muestra la curva experimental y teóricas de momento contra deflexión del muro M9-C, donde se puede observar que las curvas teóricas resultan más rígidas que la curva experimental. También se observa que el momento de agrietamiento teórico es mayor que el experimental

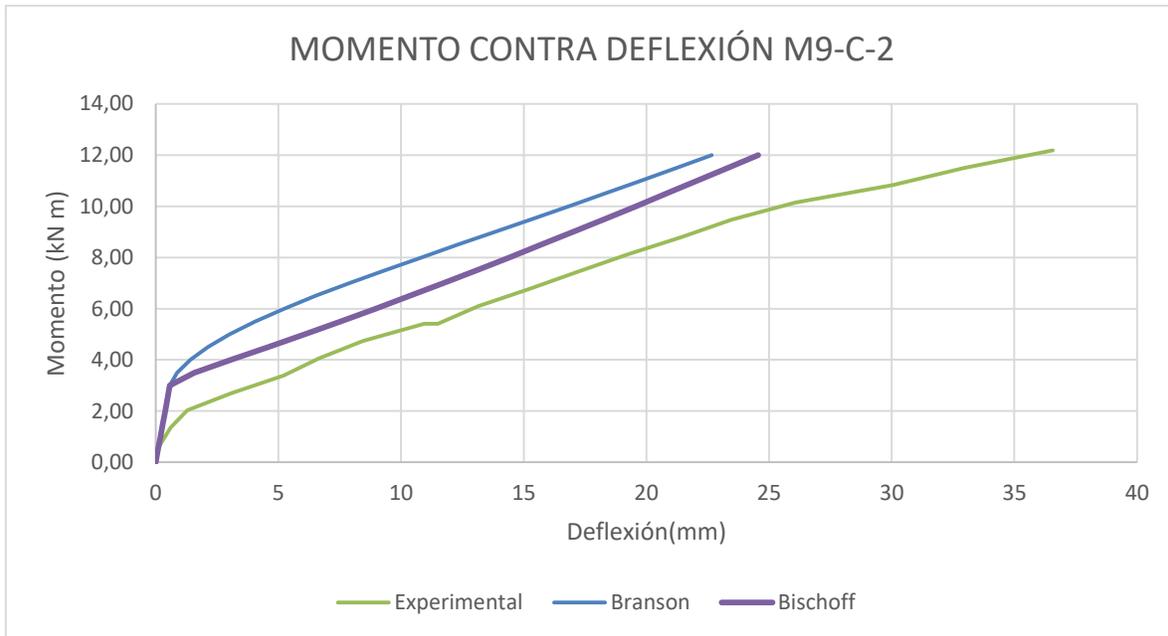


Figura 7-17 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M9-C. Fuente. El autor

Como se observa en las gráficas de momento contra deflexión anteriores, los momentos de agrietamiento experimentales resultaron menores a los teóricos, por lo tanto, se decidió realizar las gráficas con los valores de los momentos de agrietamiento obtenidos de las curvas de los ensayos experimentales y graficar nuevamente.

Debido a que los momentos de agrietamiento experimentales de los muros, resultaron menores a los teóricos, se construyeron cinco muretes de 0.45 m de ancho y 0.60 m de altura, con tres dovelas, de las cuales una estaba rellena. Para estos muretes se realizó el ensayo de módulo de rotura siguiendo la norma ASTM E518. Los resultados experimentales se muestran en la Tabla 7-2

Tabla 7-2 Resultados ensayos de módulo de rotura

| MÓDULO DE ROTURA MURETES DE ARCILLA |        |        |          |              |                |              |
|-------------------------------------|--------|--------|----------|--------------|----------------|--------------|
| Murete                              | P (N)  | Ps (N) | Luz (mm) | Ancho b (mm) | Espesor d (mm) | MR (MPa)     |
| 1                                   | 5140,1 | 744,8  | 600      | 450          | 148            | 0,347        |
| 2                                   | 5997,6 | 769,3  | 600      | 450          | 148            | 0,400        |
| 3                                   | 5306,7 | 774,2  | 600      | 452          | 148            | 0,357        |
| 4                                   | 3283,0 | 779,1  | 600      | 448          | 148            | 0,236        |
| 5                                   | 5688,9 | 759,5  | 600      | 451          | 148            | 0,380        |
| PROMEDIO                            |        |        |          |              |                | <b>0,344</b> |

El resultado teórico del módulo de rotura, siguiendo la tabla 3.1.8.2 del TMS402/ACI 530, es de  $M_r=0.526$  MPa, lo cual confirma que el módulo de rotura experimental para estos muros es inferior al teórico.

En la Figura 7-18 se muestra la curva del muro M1-G ajustando las gráficas teóricas con el valor del momento de agrietamiento experimental, en donde se puede observar que la curva experimental se ajusta mejor a la curva teórica de Branson

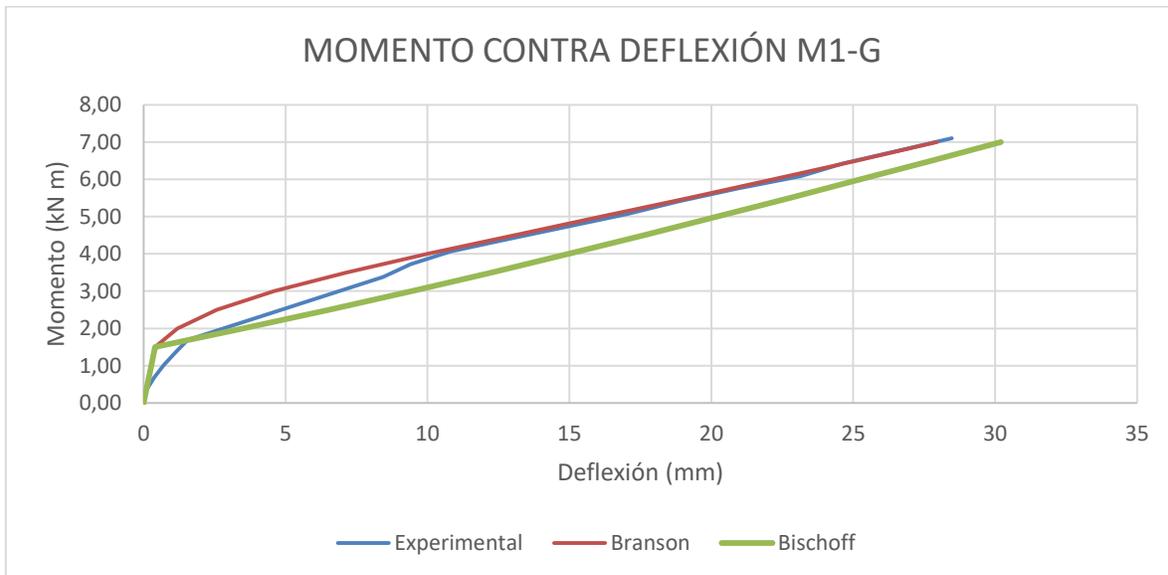


Figura 7-18 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M1-G con el valor de  $M_{cr}$  experimental. Fuente. El autor

En la Figura 7-19 se muestra la curva del muro M2-G ajustando las gráficas teóricas con el momento de agrietamiento experimental, donde se observa que la curva experimental esta entre las curvas teóricas.

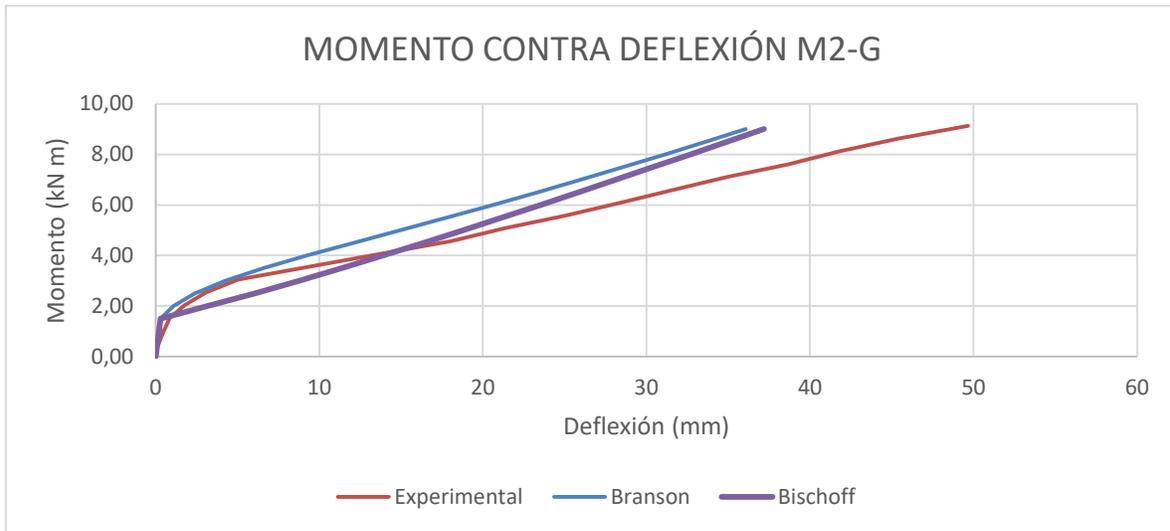


Figura 7-19 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M2-G con el valor de  $M_{cr}$  experimental. Fuente. El autor

En la Figura 7-20 se muestra la curva del muro M8-C ajustando las gráficas teóricas con el momento de agrietamiento experimental, donde se puede ver que para este caso la curva teórica resulta más rígida que las curvas experimentales.

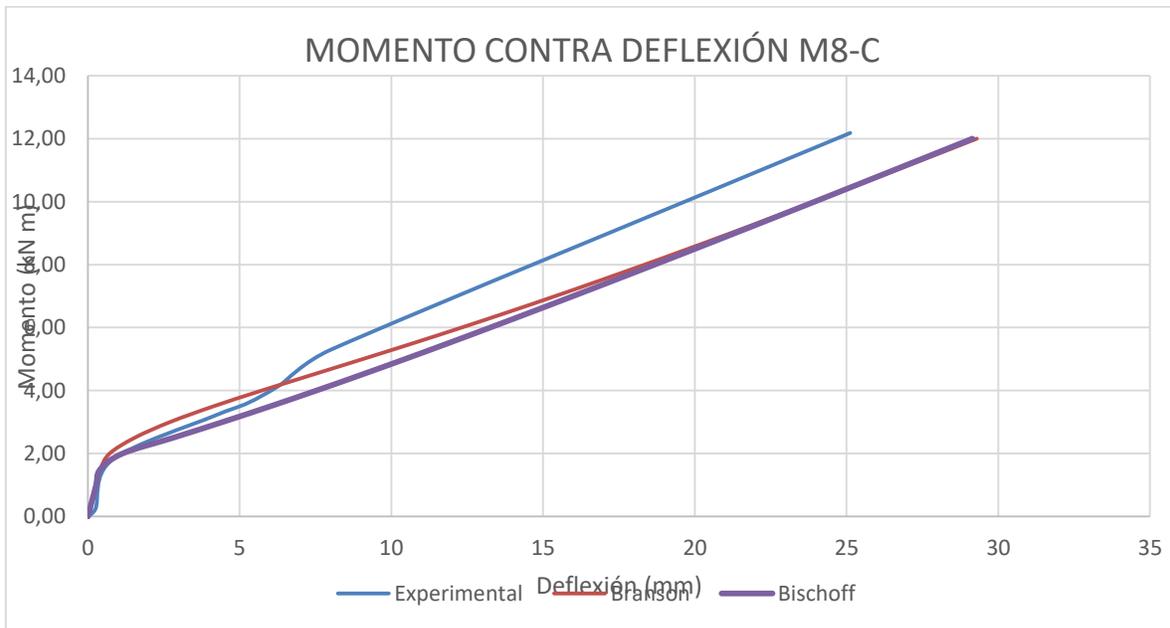


Figura 7-20 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M8-C con el valor de  $M_{cr}$  experimental. Fuente. El autor

En la Figura 7-21 se muestra la curva del muro M9-C ajustando las gráficas teóricas con el momento de agrietamiento experimental, donde se observa que la curva se ajusta bien a las teóricas hasta aproximadamente un momento de 6,0 kN m, donde la curva experimental muestra deformaciones un poco mayores para un mismo momento.

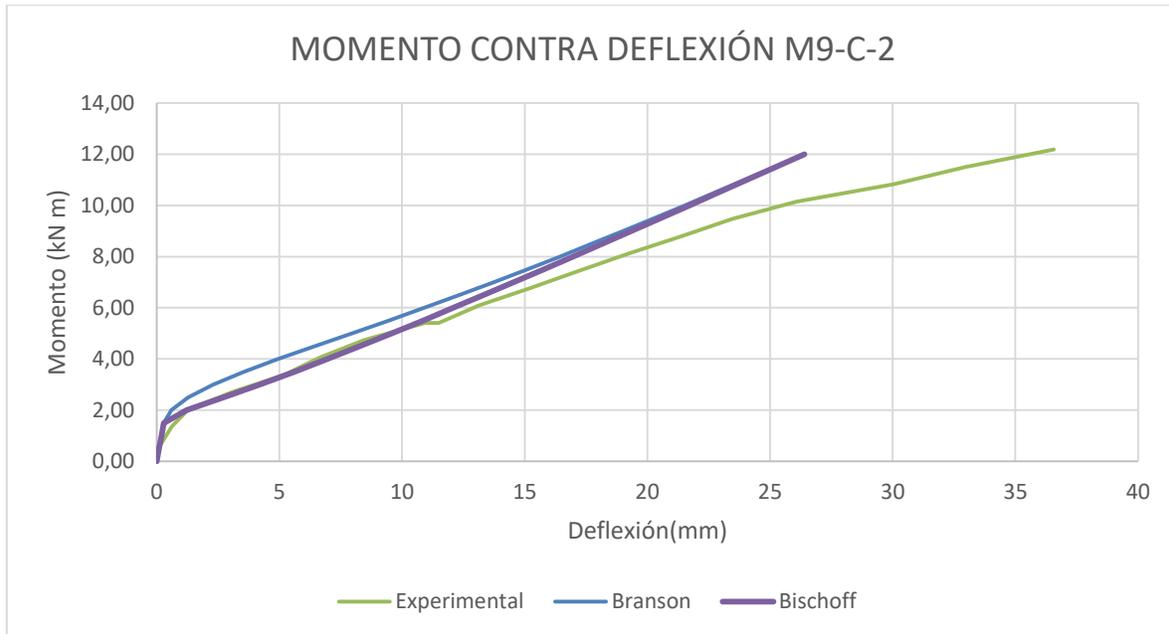


Figura 7-21 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro M9-C con el valor de  $M_{cr}$  experimental. Fuente. El autor

Las gráficas anteriores muestran que para el método de Bischoff, las curvas experimentales se ajustan muy bien del lado conservador, y para el método de Branson los resultados no difieren en grandes proporciones, sin embargo, el método de Branson subestima las deflexiones en los muros.

Todas las gráficas anteriores muestran los resultados hasta el 63% de la resistencia teórica a momento del muro, lo cual se considera que son cargas de servicio, debido a que las deflexiones se revisan bajo cargas de servicio.

En el ANEXO E se presentan las curvas experimentales y teóricas de momento contra deflexión para todos los muros.

### 7.5.1 DEFLEXIONES EN MUROS DE MAMPOSTERÍA CON BLOQUES DE CONCRETO.

Con el ánimo de validar las deflexiones teóricas (determinados con la metodología de Branson y la de Bischoff) y las deflexiones experimentales de los muros de mampostería en concreto y realizar la analogía con la mampostería de bloques de arcilla, se tomaron los

resultados de la investigación del Ingeniero Daniel Otálora “Muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP” y se construyeron las gráficas teóricas (Utilizando las metodologías explicadas paso a paso en el capítulo 6 y utilizando las propiedades mecánicas y los coeficientes correspondientes a estos muros). A continuación, se presentan las gráficas para los 3 muros que mejor se ajustaron a la teoría.

Las propiedades mecánicas de los muros de mampostería de unidades de concreto son:

$$f'm = 10 \text{ MPa}$$

$$E_m = 9000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{mu} = 0,0025$$

$$\alpha_1 = 0,80$$

$$\beta_1 = 0,80$$

En la Figura 7-22 se presenta las curvas teóricas (Branson y Bischoff) y experimentales para un muro que tiene la siguiente configuración geométrica y de refuerzo

Ancho del muro B = 1600 mm

Espesor del muro t = 140 mm

Altura del muro L = 2.03 m

El muro esta reforzado con 4 barras de GFRP

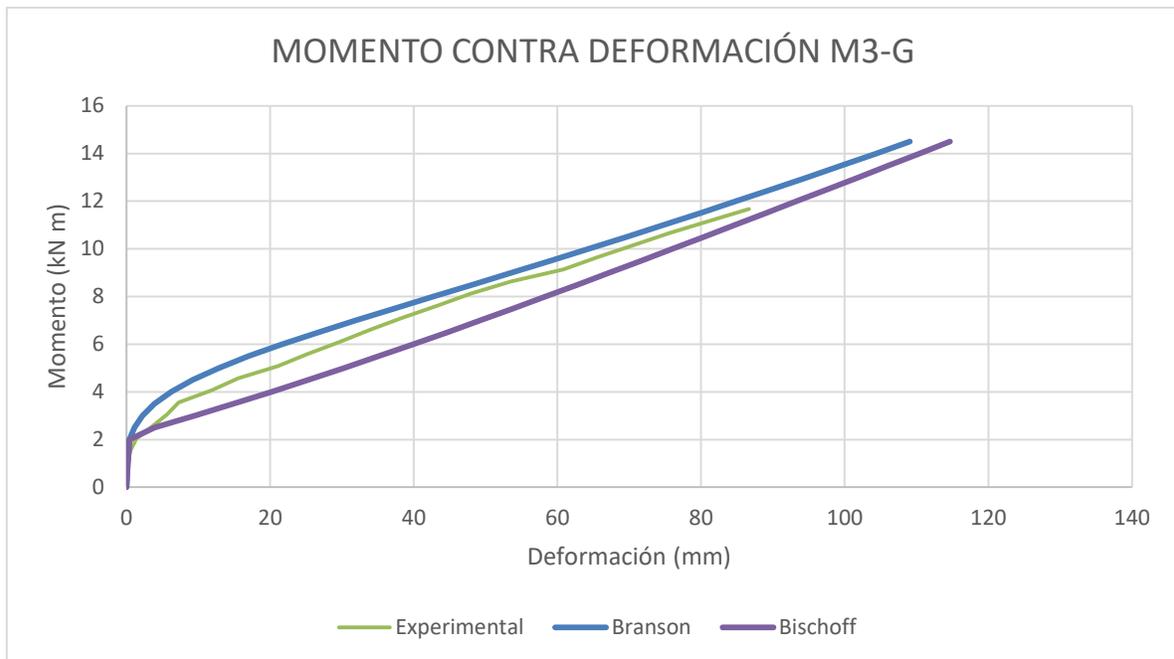


Figura 7-22 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro de mampostería de concreto M3-G. Fuente. El autor

En la Figura 7-23 se presenta las curvas teóricas (Branson y Bischoff) y experimentales para un muro que tiene la siguiente configuración geométrica y de refuerzo

Ancho del muro  $B = 1600$  mm

Espesor del muro  $t = 140$  mm

Altura del muro  $L = 2.03$  m

El muro esta reforzado con 4 barras de GFRP

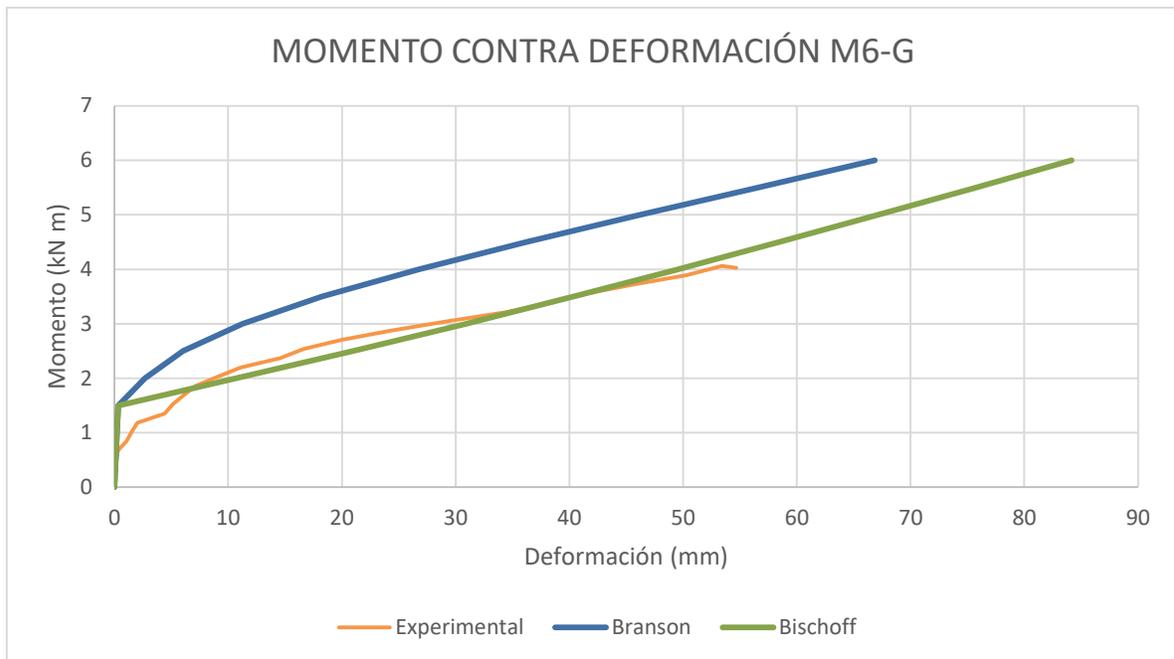


Figura 7-23 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro de mampostería de concreto M6-G. Fuente. El autor

En la Figura 7-24 se presenta las curvas teóricas (Branson y Bischoff) y experimentales para un muro que tiene la siguiente configuración geométrica y de refuerzo

Ancho del muro  $B = 1600$  mm

Espesor del muro  $t = 140$  mm

Altura del muro  $L = 2.03$  m

El muro está reforzado con 4 barras de CFRP

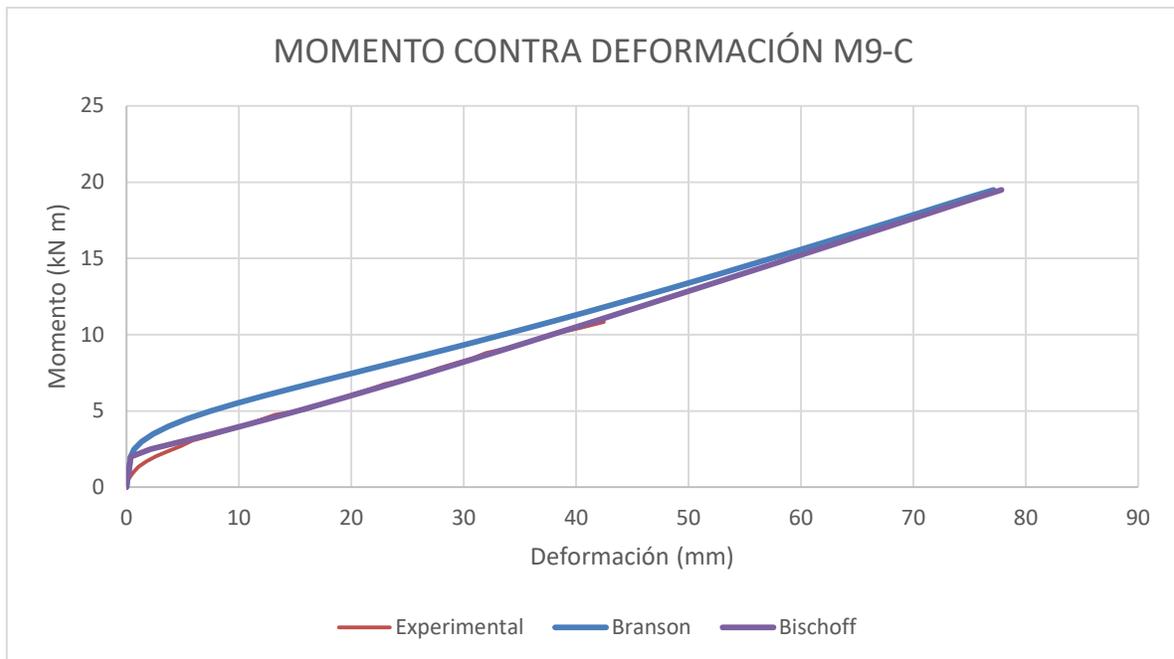


Figura 7-24 Curva experimental y teóricas (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión Muro de mampostería de concreto M9-C. Fuente. El autor

De la misma manera que en los muros con unidades de arcilla, los resultados se ajustan muy bien desde el punto de vista conservador con el método de Bischoff.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

- Como se muestra tanto teórica como experimentalmente, los muros reforzados con barras de FRP experimentan deflexiones mayores a los muros reforzados con acero convencional (debido a su bajo módulo de elasticidad). Por tal motivo se debe tener especial atención a los estados límites de servicio en el diseño de estos muros ya que las deflexiones son altas bajo estados de carga bajos.
- Los momentos o cargas resistentes teóricas, en la mayoría de los ensayos, estuvo por encima de los resultados experimentales, esto se debió posiblemente a dos motivos: primero a que las barras tenían un corrugado con una capa de arena, por lo tanto, la adherencia entre el mortero de relleno y la barra se perdía bajo cierto estado de carga, lo cual hacía que el muro perdiera resistencia, o como segunda hipótesis podría pensarse que la adherencia entre el grout de relleno y la unidad de mampostería posiblemente no era la más óptima. Y segundo las deflexiones en estados de carga altos (tercer y cuarto ciclo de carga) presentaba deformaciones muy altas en el muro, lo cual hacía que los ladrillos se separaran del mortero de pega y el muro no podía absorber más carga.
- Los modos de falla de los muros, en la mayoría de los casos no alcanzaron el aplastamiento en la mampostería esto sucedió por las razones expresadas en la conclusión anterior y además porque la adherencia que hay entre el mortero de pega y la unidad de arcilla se perdía bajo estados de carga del tercer y cuarto ciclo donde las deflexiones en los muros eran muy grandes.
- Algunos muros mostraban aplastamiento en la zona de compresión, pero las galgas (strain gauges) mostraban deformaciones unitarias inferiores a la última esto se debía a que no estaba la instrumentación en la zona de mayor deformación unitaria, esto es debido a que todo el tercio central tiene la misma compresión ya que esa zona está sometida a flexión uniforme.
- Cuando se compara el diseño de muros con acero convencional y el de muros reforzados con FRP se debe tener especial atención a los estados límites de servicio ya que los muros reforzados con FRP presentan deflexiones mayores y por lo tanto anchos de fisuras mayores a los de acero bajo cargas relativamente bajas (para el primer y segundo ciclo de carga). En cuanto al estado límite de resistencia la mampostería reforzada con FRP podría tener valores mayores que reforzándola con acero convencional si se mejoran la adherencia entre mortero de pega y las unidades de arcilla y entre barras y mortero de relleno, esto demuestran los cálculos teóricos.

- Los muros reforzados con acero, presentan deflexiones menores que los muros reforzados con FRP para un mismo estado de carga, y además presentan menor cantidad de fisuras y anchos de fisuras inferiores a los muros reforzados con barras de FRP.
- Los resultados experimentales muestran que los muros con cuantías superiores a 0,0047 alcanzan momentos similares a los momentos teóricos, esto para los muros reforzados con GFRP y con CFRP. Los muros que tenían cuantías inferiores estuvieron lejos de las cargas teóricas. Esto indica que aun cuando el modo de falla sea aplastamiento en la mampostería, se debería tener una mínima cantidad de refuerzo para que el comportamiento sea el que indica la teoría.
- Los muros reforzados con una sola barra fueron los que indicaron un comportamiento bastante inferior al esperado por los cálculos teóricos. Claramente estos muros eran los que tenían las cuantías más bajas y fueron los que tuvieron un comportamiento inferior al teórico en cuanto a resistencia.
- De acuerdo con los resultados experimentales de esta investigación, todos los muros presentaron momentos de agrietamiento inferiores al momento de agrietamiento teórico calculado con la metodología del ACI 530, la cual coincide con la utilizada en reglamento colombiano NSR-10, título D. Por lo tanto se debe tener especial cuidado con el valor teórico del módulo de rotura propuesto por el ACI, ya que estos valores fueron determinados a partir de ensayos de mampostería que producen en Estados Unidos.
- La metodología de Branson para el cálculo de las deflexiones de los muros de esta investigación, subestima el valor de la deflexión de los muros, y aunque la metodología de Bischoff ajusta un poco mejor los resultados, las deflexiones experimentales de los muros resultaron mayores que las deflexiones teóricas calculadas por estos dos métodos como se muestran en el ANEXO E y en capítulo 7 análisis de resultados.
- Los muros de mampostería con unidades de concreto resultaron más rígidos que los de arcilla y las metodologías del ACI 440 y la Bischoff se ajustan mejor a los resultados experimentales como se muestra en el capítulo 7.5.1.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

- Teniendo en cuenta que los muros presentaron momentos de agrietamiento inferiores a los momentos teóricos, siguiendo la metodología del ACI 530, se recomienda realizar investigaciones para mampostería en arcilla donde se determine el módulo de rotura para unidades de perforación vertical, donde exista una variedad en la

cantidad de celdas rellenas desde mampostería con celdas parcialmente llenas, a mampostería donde todas las celdas estén rellenas.

- Debido a que existe cierta incertidumbre en la adherencia de las barras con el mortero de relleno, se recomienda realizar pruebas de adherencia para futuras investigaciones donde se ensayen muros de mampostería con unidades de arcilla de dovelas circulares de diámetros pequeños (de 8 cm o menores)
- Los muros que tenían refuerzo de FRP con solo una barra, presentaron resultados inferiores a los esperados según la teoría, estos muros tenían cuantías menores a 0,0047. Se considera que estos muros no tenían una perfecta simetría por la localización de su refuerzo, por lo tanto, se recomienda ensayar muros con la misma cuantía, pero colocando más cantidad de barras en el muro con el fin de obtener resultados más representativos y poder comparar con las ecuaciones teóricas.
- Para futuras investigaciones tanto de flexión perpendicular como de flexión paralela al plano, se recomienda utilizar barras de diferentes proveedores, donde se tengan diferentes diámetros en las barras y diferentes corrugados para tener diferentes adherencias, esto con el fin de tener más datos experimentales y continuar con esta investigación

## 9 BIBLIOGRAFIA

- Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10. Bogotá: AIS.
- American Concrete Institute, ACI committee 440
- American Concrete Institute, ACI committee 530
- .Ayman S., Mosallam. (2006). Out-of-plane flexural behavior of unreinforced red brick walls strengthened with frp composites
- Galati N., Tumialan G., Nanni A., (2005). Strengthening with frp bars of urm walls subject to out-of-plane loads
- Sistani R., Mohammad N., Kabir. (2016). Experimental investigation on out-of-plane behavior of gfrp retrofitted masonry panels
- Hamed E., Rabinovitch O., Lateral out-of-plane strengthening of masonry walls with composite materials
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003b). Método de ensayo para determinar la Resistencia a la compresión de muretes de mampostería (NTC 3495). Bogotá D.C: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto (NTC 673). Bogotá D.C.: ICONTEC.
- American Society for Testing and Materials (2011). Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars (ASTM D7205).
- Nanni A., Luca A., Zadeh H., (2014). Reinforced Concrete with FRP Bars Mechanics and Design. CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Schneider R., Dickey W. (1994)., Reinforced Masonry design. Prentice Hall

## **10 ANEXOS**

### **ANEXO A: RESULTADO ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE MORTERO DE PEGA**

## ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE MORTERO DE PEGA

En la Tabla 10-1 se presentan los resultados de los ensayos de los cilindros de mortero de pega.

Tabla 10-1 Resultados de ensayos de cilindros de mortero de pega. Fuente del autor

| Cilindro | Diámetro (mm) | Altura (mm) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Carga (N) | Resistencia (MPa) |
|----------|---------------|-------------|-------------------------|-----------|-------------------|
| 1        | 51            | 99          | 2043                    | 49050     | 24                |
| 2        | 50            | 100         | 1963                    | 43164     | 22                |

Para calcular la resistencia del mortero de pega se promedian los resultados de los ensayos de los cilindros. Por lo tanto, el valor del  $f'_{cp} = 23.45$  MPa

**ANEXO B: RESULTADO ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN  
CILINDROS DE MORTERO DE RELLENO**

## ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE MORTERO DE RELLENO

En la Tabla 10-2 se presentan los resultados de los ensayos de los cilindros de mortero de relleno

Tabla 10-2 Resultados de ensayos de cilindros de mortero de pega. Fuente el autor

| Cilindro | Diámetro (mm) | Altura (mm) | Área (mm <sup>2</sup> ) | Carga (N) | Resistencia (MPa) |
|----------|---------------|-------------|-------------------------|-----------|-------------------|
| 1        | 101           | 205         | 8012                    | 194238    | 24                |
| 2        | 101           | 204         | 8012                    | 206991    | 26                |
| 3        | 103           | 200         | 8332                    | 289591    | 35                |
| 4        | 104           | 203         | 8495                    | 285667    | 34                |

Para calcular la resistencia del mortero de relleno se promedian los resultados de los ensayos de los cilindros. Por lo tanto, la resistencia a la compresión es  $f'_{cr} = 29.6$  MPa.

**ANEXO C: RESULTADO ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN MURETES DE  
MAMPOSTERÍA**

## ENSAYOS DE COMPRESIÓN EN MURETES DE MAMPOSTERÍA

Para calcular la resistencia de los muros de mampostería a la compresión “f’*m*”, el ACI-530.1-11 propone varias metodologías. Para este caso se basó en la elaboración de muretes, sin embargo, se calculó la resistencia a la compresión de la mampostería, utilizando la metodología propuesta en el título D de la NSR-10 la cual se basa en la calidad de los materiales. A continuación, se presenta la determinación de f’*m* utilizando ambas metodologías.

### CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN F’*m* DE LA MAMPOSTERÍA BASADO EN LA CALIDAD DE LOS MATERIALES

Las ecuaciones propuestas por la NSR-10 en el título D para el cálculo de la resistencia a la compresión de la mampostería sin celdas rellenas son:

$$f'm = 0.75Rm \quad (D.3.7 - 2)$$

$$Rm = \left( \frac{2h}{75 + 3h} \right) f'cu + \left( \frac{50kp}{75 + 3h} \right) f'cp \leq 0.80f'cu \quad (D.3.7 - 1)$$

Donde:

h: altura de la unidad de mampostería h= 90 mm

kp: Factor de corrección por absorción de la unidad. Para mampostería en arcilla kp=0.80

f’cu: Resistencia especificada a la compresión de la unidad de mampostería. (Tomada del catálogo de la ladrillera f’cu=29.80 MPa)

f’cp: Resistencia especificada del mortero de pega, f’cp= 23.45 MPa.

Rm: parámetro definido por la ecuación D.3.7-1 de la NSR-10. Remplazando los valores en la ecuación Rm=18.27 MPa.

f’*m*: Resistencia a la compresión de la mampostería.

$$f'm = 0.75 * 18.27 = 13.70 \text{ MPa}$$

Las ecuaciones propuestas por la NSR-10 en el título D para el cálculo de la resistencia a la compresión de la mampostería con celdas rellenas son:

$$Rm = 0.75 * [r * Rm + 0.90kr(1 - r) * f'cr] \leq 0.94Rm \quad (D.3.7 - 3)$$

Donde:

r: Relación entre el área neta y el área bruta de las unidades de mampostería,  $r=0.68$

kr: Factor de corrección por absorción de la unidad inyectada. Para mampostería en arcilla  $kr=0.75$

f'cr: Resistencia especificada a la compresión del mortero de relleno. El promedio de los cilindros fue de  $f'cr= 29.6$  MPa

Rm: Parámetro definido por la ecuación D.3.7-1 de la NSR-10. Reemplazando los valores en la ecuación  $Rm=18.27$  MPa

Reemplazando en la ecuación se obtiene el valor de f'm.

$$f'm = 14.12 \text{ MPa}$$

El valor promedio de f'm teniendo en cuenta los muros con dovelas vacías y con dovelas rellenas es de:  $f'm = 13.91$  MPa.

#### CÁLCULO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN F'm DE LA MAMPOSTERÍA BASADO EN ENSAYOS DE MURETES

Los resultados de los ensayos de los muretes se presentan a continuación

- Murete M1 con dovelas vacías:

Las dimensiones y propiedades geométricas del murete son las siguientes.

##### Dimensiones

|       |       |                 |                           |
|-------|-------|-----------------|---------------------------|
| L =   | 445   | mm              | Longitud del murete       |
| t =   | 145   | mm              | Espesor del murete        |
| h =   | 300   | mm              | altura del murete         |
| Le =  | 200   | mm              | Longitud del ensayo       |
| h/t   | 2,07  |                 | Relación altura - espesor |
| F.C = | 1,01  |                 | Factor de corrección      |
| An =  | 45501 | mm <sup>2</sup> | Área neta del murete      |

En la Tabla 10-3 se presentan los datos de carga y deformación de cada uno de los deformímetros mecánicos utilizados en el ensayo. Además, se presentan los valores del esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 10-3 Datos de la curva esfuerzo deformación murete M1. Fuente: el autor

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 0         | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 118       | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 4905      | 0,03      | 0,00      | 0,01     | 0,0001             | 0,11           |
| 9810      | 0,03      | 0,03      | 0,03     | 0,0001             | 0,22           |
| 14715     | 0,03      | 0,05      | 0,04     | 0,0002             | 0,33           |
| 19620     | 0,03      | 0,06      | 0,04     | 0,0002             | 0,43           |
| 24525     | 0,04      | 0,08      | 0,06     | 0,0003             | 0,54           |
| 29430     | 0,04      | 0,09      | 0,06     | 0,0003             | 0,65           |
| 34335     | 0,04      | 0,10      | 0,07     | 0,0003             | 0,76           |
| 39240     | 0,04      | 0,13      | 0,08     | 0,0004             | 0,87           |
| 44145     | 0,04      | 0,13      | 0,08     | 0,0004             | 0,98           |
| 49050     | 0,04      | 0,15      | 0,10     | 0,0005             | 1,08           |
| 53955     | 0,04      | 0,17      | 0,10     | 0,0005             | 1,19           |
| 58860     | 0,04      | 0,18      | 0,11     | 0,0005             | 1,30           |
| 68670     | 0,04      | 0,20      | 0,12     | 0,0006             | 1,52           |
| 78480     | 0,04      | 0,23      | 0,13     | 0,0007             | 1,73           |
| 88290     | 0,04      | 0,25      | 0,15     | 0,0007             | 1,95           |
| 98100     | 0,04      | 0,28      | 0,16     | 0,0008             | 2,17           |
| 107910    | 0,05      | 0,30      | 0,18     | 0,0009             | 2,38           |
| 117720    | 0,05      | 0,33      | 0,19     | 0,0010             | 2,60           |
| 127530    | 0,05      | 0,34      | 0,20     | 0,0010             | 2,82           |
| 137340    | 0,05      | 0,36      | 0,20     | 0,0010             | 3,04           |
| 147150    | 0,05      | 0,38      | 0,22     | 0,0011             | 3,25           |
| 156960    | 0,05      | 0,38      | 0,22     | 0,0011             | 3,47           |
| 166770    | 0,06      | 0,41      | 0,23     | 0,0012             | 3,69           |
| 176580    | 0,10      | 0,43      | 0,27     | 0,0013             | 3,90           |
| 760864    | 0,60      | 0,60      | 0,60     | 0,0030             | 16,81          |

En la Figura 10-1 se presenta la curva esfuerzo deformación unitaria del murete M1

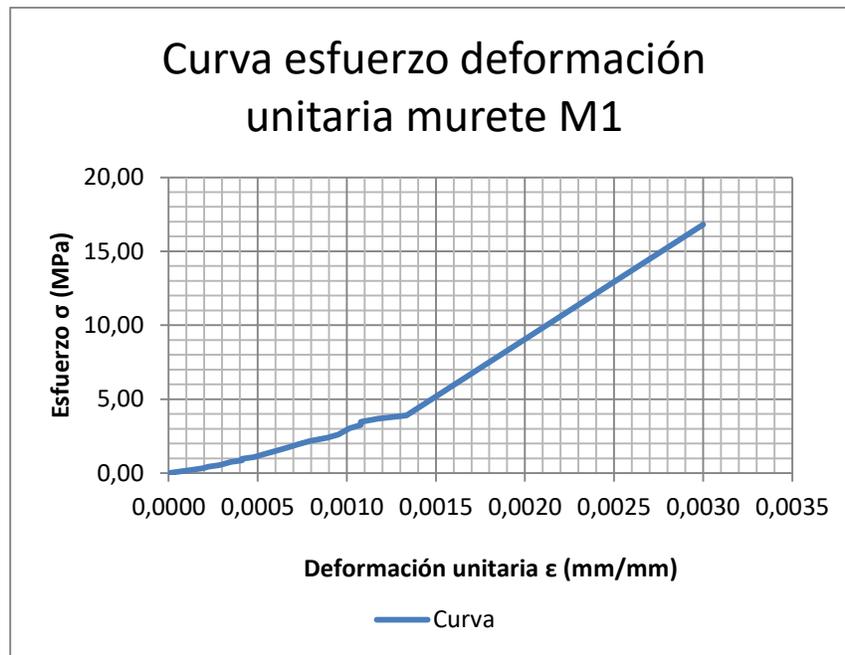


Figura 10-1 Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M1. Fuente: el autor

De la gráfica anterior se obtiene las propiedades mecánicas del murete, las cuales se resumen en la Tabla 10-4

Tabla 10-4 Propiedades mecánicas murete M1. Fuente: el autor

| Propiedades mecánicas M1 |        |       |
|--------------------------|--------|-------|
| $f'm =$                  | 16,81  | MPa   |
| $\epsilon_{mu} =$        | 0,0030 | mm/mm |
| $0,05*f'm =$             | 0,76   | MPa   |
| $0,33*f'm =$             | 3,90   | MPa   |
| $0,05*\epsilon =$        | 0,0003 | mm/mm |
| $0,33*\epsilon =$        | 0,0013 | mm/mm |
| $E_m =$                  | 3194   | MPa   |

- Murete M2 con dovelas vacías:

Las dimensiones y propiedades geométricas del murete son las siguientes.

Dimensiones

|      |        |                           |
|------|--------|---------------------------|
| L =  | 445 mm | Longitud del murete       |
| t =  | 145 mm | Espesor del murete        |
| h =  | 300 mm | altura del murete         |
| Le = | 200 mm | Longitud del ensayo       |
| h/t  | 2,07   | Relación altura - espesor |

F.C = 1,01 Factor de corrección  
 An = 45501 mm<sup>2</sup> Área neta del murete

En la Tabla 10-5 se presentan los datos de carga y deformación de cada uno de los deformímetros mecánicos utilizados en el ensayo. Además, se presentan los valores del esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 10-5 Datos de la curva esfuerzo deformación murete M2. Fuente: el autor

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 0         | 0,0000    | 0,0000    | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 78        | 0,0000    | 0,0000    | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 14715     | 0,0000    | 0,0000    | 0,00     | 0,0000             | 0,33           |
| 29430     | 0,0254    | 0,0000    | 0,01     | 0,0001             | 0,65           |
| 44145     | 0,0254    | 0,0127    | 0,02     | 0,0001             | 0,98           |
| 58860     | 0,0381    | 0,0127    | 0,03     | 0,0001             | 1,30           |
| 73575     | 0,0508    | 0,0254    | 0,04     | 0,0002             | 1,63           |
| 88290     | 0,0635    | 0,0381    | 0,05     | 0,0003             | 1,95           |
| 103005    | 0,0762    | 0,0508    | 0,06     | 0,0003             | 2,28           |
| 117720    | 0,0889    | 0,0635    | 0,08     | 0,0004             | 2,60           |
| 132435    | 0,1143    | 0,0635    | 0,09     | 0,0004             | 2,93           |
| 147150    | 0,1270    | 0,0762    | 0,10     | 0,0005             | 3,25           |
| 161865    | 0,1270    | 0,0889    | 0,11     | 0,0005             | 3,58           |
| 176580    | 0,1524    | 0,0889    | 0,12     | 0,0006             | 3,90           |
| 191295    | 0,1651    | 0,1143    | 0,14     | 0,0007             | 4,23           |
| 206010    | 0,1778    | 0,1143    | 0,15     | 0,0007             | 4,55           |
| 220725    | 0,1778    | 0,1397    | 0,16     | 0,0008             | 4,88           |
| 235440    | 0,1905    | 0,1524    | 0,17     | 0,0009             | 5,20           |
| 250155    | 0,1905    | 0,1651    | 0,18     | 0,0009             | 5,53           |
| 264870    | 0,2032    | 0,1778    | 0,19     | 0,0010             | 5,85           |
| 279585    | 0,2032    | 0,2032    | 0,20     | 0,0010             | 6,18           |
| 294300    | 0,2032    | 0,2159    | 0,21     | 0,0010             | 6,50           |
| 309015    | 0,2032    | 0,2159    | 0,21     | 0,0010             | 6,83           |
| 323730    | 0,2032    | 0,2159    | 0,21     | 0,0010             | 7,15           |
| 338445    | 0,1905    | 0,2159    | 0,20     | 0,0010             | 7,48           |
| 353160    | 0,1905    | 0,2286    | 0,21     | 0,0010             | 7,80           |
| 367875    | 0,1905    | 0,2413    | 0,22     | 0,0011             | 8,13           |
| 382590    | 0,1778    | 0,2413    | 0,21     | 0,0010             | 8,45           |
| 397305    | 0,2032    | 0,2413    | 0,22     | 0,0011             | 8,78           |
| 421830    | 0,2286    | 0,2413    | 0,23     | 0,0012             | 9,32           |
| 436545    | 0,2286    | 0,2413    | 0,23     | 0,0012             | 9,65           |
| 451260    | 0,2286    | 0,2413    | 0,23     | 0,0012             | 9,97           |

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 465975    | 0,2362    | 0,2413    | 0,24     | 0,0012             | 10,30          |
| 480690    | 0,2413    | 0,2489    | 0,25     | 0,0012             | 10,62          |
| 495405    | 0,2489    | 0,2489    | 0,25     | 0,0012             | 10,95          |
| 510120    | 0,2540    | 0,2489    | 0,25     | 0,0013             | 11,27          |
| 524835    | 0,2540    | 0,2540    | 0,25     | 0,0013             | 11,60          |
| 539550    | 0,2540    | 0,2540    | 0,25     | 0,0013             | 11,92          |
| 674536    | 0,3714    | 0,3714    | 0,37     | 0,0019             | 14,91          |

En la Figura 10-2 se presenta la curva esfuerzo deformación unitaria del murete M2.

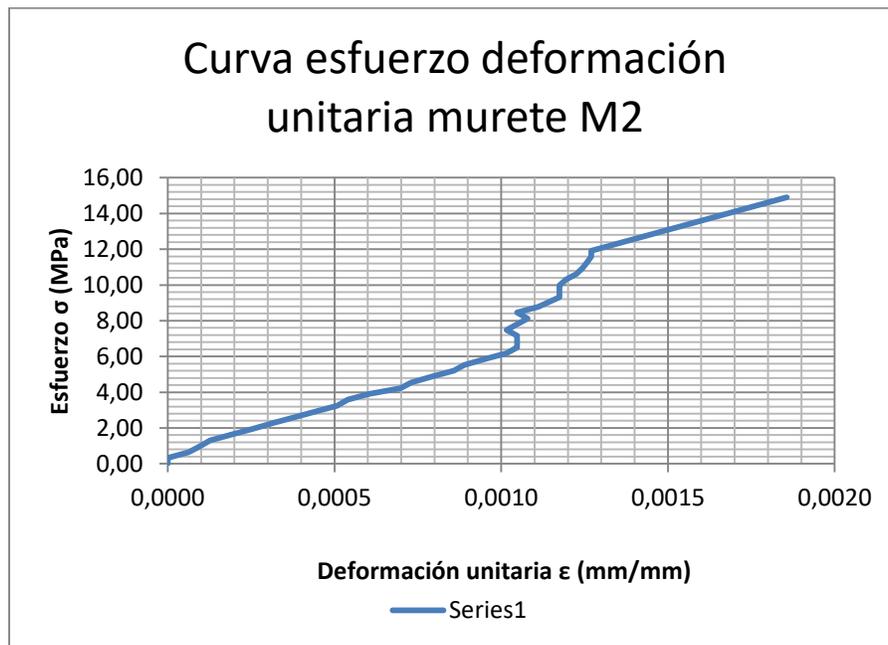


Figura 10-2 Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M2. Fuente: el autor

De la gráfica anterior se obtiene las propiedades mecánicas del murete, las cuales se resumen en la Tabla 10-6

Tabla 10-6 Propiedades mecánicas murete M2. Fuente: el autor

| Propiedades mecánicas M2 |        |       |
|--------------------------|--------|-------|
| $f'm =$                  | 14,91  | MPa   |
| $\epsilon_{mu} =$        | 0,0019 |       |
| $0,05*f'm =$             | 0,98   | MPa   |
| $0,33*f'm =$             | 5,20   | MPa   |
| $0,05*\epsilon =$        | 0,0001 | mm/mm |
| $0,33*\epsilon =$        | 0,0009 | mm/mm |

| Propiedades mecánicas M2 |      |     |
|--------------------------|------|-----|
| Em =                     | 5548 | MPa |

- Murete M3 con dovelas vacías:

Las dimensiones y propiedades geométricas del murete son las siguientes.

Dimensiones

|       |                       |                           |
|-------|-----------------------|---------------------------|
| L =   | 445 mm                | Longitud del murete       |
| t =   | 145 mm                | Espesor del murete        |
| h =   | 300 mm                | altura del murete         |
| Le =  | 200 mm                | Longitud del ensayo       |
| h/t   | 2,07                  | Relación altura - espesor |
| F.C = | 1,01                  | Factor de corrección      |
| An =  | 45501 mm <sup>2</sup> | Área neta del murete      |

En la Tabla 10-7 Se presentan los datos de carga y deformación de cada uno de los deformímetros mecánicos utilizados en el ensayo. Además, se presentan los valores del esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 10-7 Datos de la curva esfuerzo deformación murete M3. Fuente: el autor

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 0         | 0,0000    | 0,0000    | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 78        | 0,0000    | 0,0000    | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 14715     | 0,0254    | 0,0000    | 0,01     | 0,0001             | 0,33           |
| 29430     | 0,0254    | 0,0003    | 0,01     | 0,0001             | 0,65           |
| 44145     | 0,0508    | 0,0003    | 0,03     | 0,0001             | 0,98           |
| 58860     | 0,0762    | 0,0005    | 0,04     | 0,0002             | 1,30           |
| 73575     | 0,1016    | 0,0005    | 0,05     | 0,0003             | 1,63           |
| 88290     | 0,1016    | 0,0008    | 0,05     | 0,0003             | 1,95           |
| 103005    | 0,1016    | 0,0008    | 0,05     | 0,0003             | 2,28           |
| 117720    | 0,1270    | 0,0010    | 0,06     | 0,0003             | 2,60           |
| 132435    | 0,1524    | 0,0011    | 0,08     | 0,0004             | 2,93           |
| 147150    | 0,1524    | 0,0013    | 0,08     | 0,0004             | 3,25           |
| 161865    | 0,1778    | 0,0014    | 0,09     | 0,0004             | 3,58           |
| 176580    | 0,1905    | 0,0015    | 0,10     | 0,0005             | 3,90           |
| 191295    | 0,2032    | 0,0017    | 0,10     | 0,0005             | 4,23           |
| 206010    | 0,2921    | 0,0011    | 0,15     | 0,0007             | 4,55           |
| 220725    | 0,2286    | 0,0024    | 0,12     | 0,0006             | 4,88           |
| 235440    | 0,2540    | 0,0025    | 0,13     | 0,0006             | 5,20           |

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 250155    | 0,2540    | 0,0027    | 0,13     | 0,0006             | 5,53           |
| 264870    | 0,2540    | 0,0028    | 0,13     | 0,0006             | 5,85           |
| 279585    | 0,2794    | 0,0030    | 0,14     | 0,0007             | 6,18           |
| 294300    | 0,2794    | 0,0030    | 0,14     | 0,0007             | 6,50           |
| 323730    | 0,3048    | 0,0033    | 0,15     | 0,0008             | 7,15           |
| 338445    | 0,3048    | 0,0034    | 0,15     | 0,0008             | 7,48           |
| 353160    | 0,3302    | 0,0036    | 0,17     | 0,0008             | 7,80           |
| 367875    | 0,3302    | 0,0036    | 0,17     | 0,0008             | 8,13           |
| 382590    | 0,3302    | 0,0036    | 0,17     | 0,0008             | 8,45           |
| 397305    | 0,3556    | 0,0036    | 0,18     | 0,0009             | 8,78           |
| 412020    | 0,3556    | 0,0038    | 0,18     | 0,0009             | 9,11           |
| 426735    | 0,3683    | 0,0038    | 0,19     | 0,0009             | 9,43           |
| 441450    | 0,3810    | 0,0038    | 0,19     | 0,0010             | 9,76           |
| 456165    | 0,3810    | 0,0038    | 0,19     | 0,0010             | 10,08          |
| 470880    | 0,3937    | 0,0038    | 0,20     | 0,0010             | 10,41          |
| 485595    | 0,4318    | 0,0039    | 0,22     | 0,0011             | 10,73          |
| 500310    | 0,4318    | 0,0041    | 0,22     | 0,0011             | 11,06          |
| 515025    | 0,4572    | 0,0036    | 0,23     | 0,0012             | 11,38          |
| 529740    | 0,6858    | 0,0033    | 0,34     | 0,0017             | 11,71          |
| 544455    | 0,7112    | 0,0033    | 0,36     | 0,0018             | 12,03          |
| 559170    | 0,7366    | 0,0030    | 0,37     | 0,0018             | 12,36          |
| 573885    | 0,7620    | 0,0032    | 0,38     | 0,0019             | 12,68          |
| 593505    | 0,7874    | 0,0025    | 0,39     | 0,0020             | 13,12          |
| 631077    | 0,4235    | 0,4235    | 0,42     | 0,0021             | 13,95          |

En la Figura 10-3 se presenta la curva esfuerzo deformación unitaria del murete M3

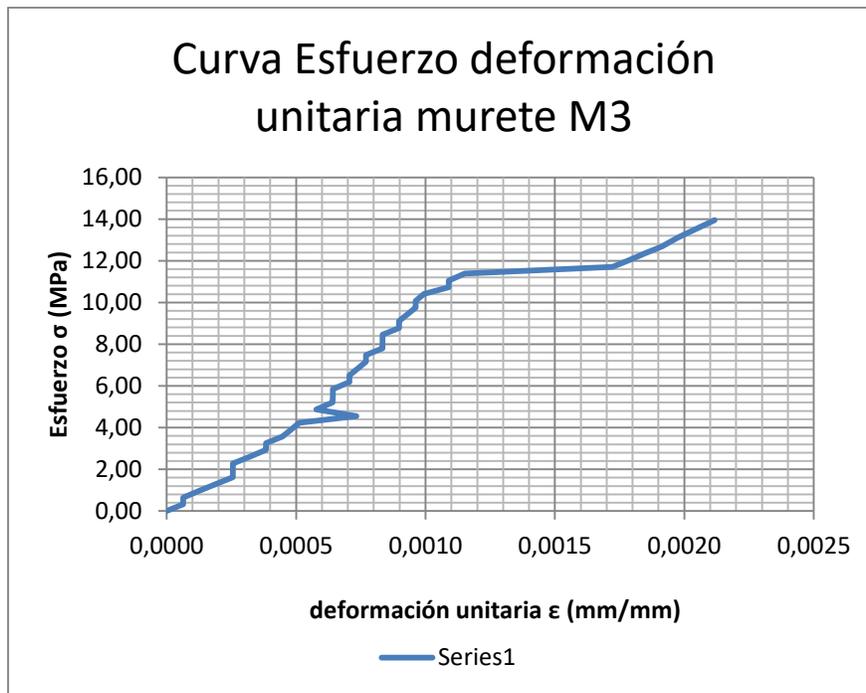


Figura 10-3 Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M3. Fuente: el autor

De la gráfica anterior se obtiene las propiedades mecánicas del murete, las cuales se resumen en la Tabla 10-8

Tabla 10-8 Propiedades mecánicas murete M3. Fuente: el autor

| Propiedades mecánicas M3 |        |       |
|--------------------------|--------|-------|
| $f'm =$                  | 13,95  | MPa   |
| $\epsilon_{mu} =$        | 0,0018 | mm/mm |
| $0,05*f'm =$             | 0,98   | MPa   |
| $0,33*f'm =$             | 5,20   | MPa   |
| $0,05*\epsilon =$        | 0,0001 | mm/mm |
| $0,33*\epsilon =$        | 0,0006 | mm/mm |
| $E_m =$                  | 8229   | MPa   |

- Murete M4 con dovelas rellenas:

Las dimensiones y propiedades geométricas del murete son las siguientes.

Dimensiones

|      |        |                     |
|------|--------|---------------------|
| L =  | 445 mm | Longitud del murete |
| t =  | 145 mm | Espesor del murete  |
| h =  | 300 mm | altura del murete   |
| Le = | 200 mm | Longitud del ensayo |

h/t                    2,07                    Relación altura - espesor  
 F.C =                    1,01                    Factor de corrección  
 An =                    64525 mm<sup>2</sup>            Área neta del murete

En la Tabla 10-9 se presentan los datos de carga y deformación de cada uno de los deformímetros mecánicos utilizados en el ensayo. Además, se presentan los valores del esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 10-9 Datos de la curva esfuerzo deformación murete M4. Fuente: el autor

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 0         | 0,000     | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,000          |
| 177       | 0,000     | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,003          |
| 19620     | 0,005     | 0,01      | 0,01     | 0,0000             | 0,306          |
| 39240     | 0,013     | 0,01      | 0,01     | 0,0001             | 0,611          |
| 58860     | 0,018     | 0,02      | 0,02     | 0,0001             | 0,917          |
| 78480     | 0,020     | 0,03      | 0,02     | 0,0001             | 1,223          |
| 98100     | 0,025     | 0,03      | 0,03     | 0,0001             | 1,529          |
| 117720    | 0,033     | 0,03      | 0,03     | 0,0002             | 1,834          |
| 137340    | 0,038     | 0,04      | 0,04     | 0,0002             | 2,140          |
| 156960    | 0,051     | 0,05      | 0,05     | 0,0003             | 2,446          |
| 176580    | 0,051     | 0,05      | 0,05     | 0,0003             | 2,752          |
| 196200    | 0,063     | 0,05      | 0,06     | 0,0003             | 3,057          |
| 235440    | 0,076     | 0,06      | 0,07     | 0,0003             | 3,669          |
| 255060    | 0,097     | 0,08      | 0,09     | 0,0004             | 3,975          |
| 274680    | 0,102     | 0,08      | 0,09     | 0,0004             | 4,280          |
| 294300    | 0,114     | 0,09      | 0,10     | 0,0005             | 4,586          |
| 313920    | 0,127     | 0,10      | 0,11     | 0,0006             | 4,892          |
| 333540    | 0,140     | 0,10      | 0,12     | 0,0006             | 5,198          |
| 353160    | 0,152     | 0,15      | 0,15     | 0,0008             | 5,503          |
| 372780    | 0,160     | 0,15      | 0,16     | 0,0008             | 5,809          |
| 392400    | 0,178     | 0,17      | 0,17     | 0,0009             | 6,115          |
| 412020    | 0,185     | 0,18      | 0,18     | 0,0009             | 6,421          |
| 431640    | 0,203     | 0,18      | 0,19     | 0,0010             | 6,726          |
| 451260    | 0,229     | 0,19      | 0,21     | 0,0010             | 7,032          |
| 470880    | 0,254     | 0,20      | 0,23     | 0,0011             | 7,338          |
| 490500    | 0,267     | 0,22      | 0,24     | 0,0012             | 7,644          |
| 510120    | 0,287     | 0,23      | 0,26     | 0,0013             | 7,949          |
| 529740    | 0,305     | 0,24      | 0,27     | 0,0014             | 8,255          |
| 549360    | 0,381     | 0,28      | 0,33     | 0,0017             | 8,561          |
| 568980    | 0,381     | 0,29      | 0,34     | 0,0017             | 8,867          |
| 588600    | 0,381     | 0,29      | 0,34     | 0,0017             | 9,172          |
| 608220    | 0,381     | 0,29      | 0,34     | 0,0017             | 9,478          |

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 627840    | 0,381     | 0,29      | 0,34     | 0,0017             | 9,784          |
| 647460    | 0,381     | 0,29      | 0,34     | 0,0017             | 10,090         |
| 667080    | 0,381     | 0,29      | 0,34     | 0,0017             | 10,395         |
| 686700    | 0,381     | 0,30      | 0,34     | 0,0017             | 10,701         |
| 706320    | 0,363     | 0,29      | 0,33     | 0,0018             | 11,007         |

En la Figura 10-4 se presenta la curva esfuerzo deformación unitaria del murete M4

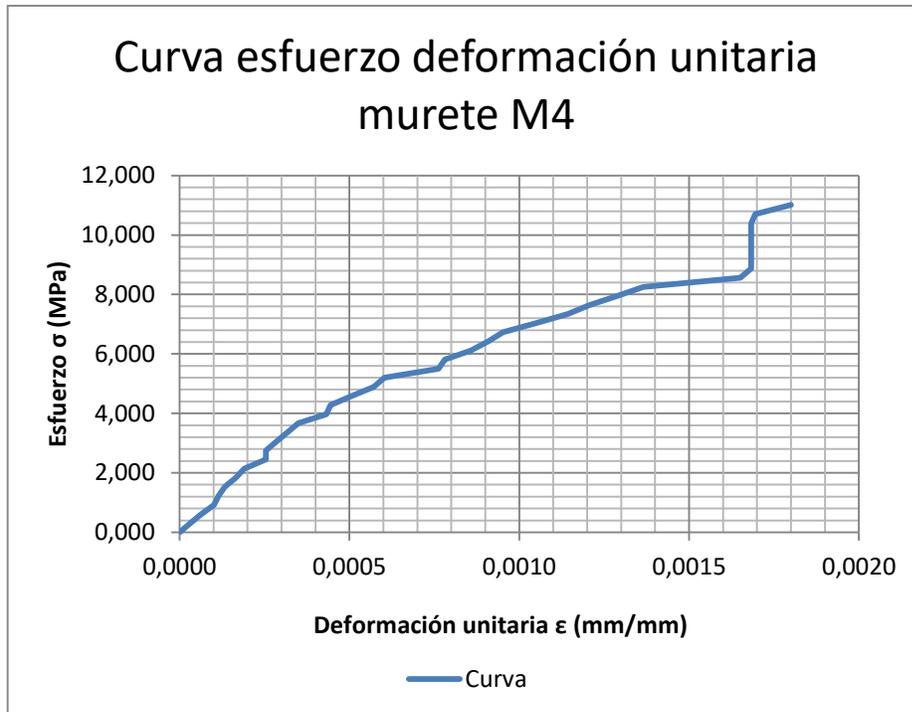


Figura 10-4 Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M4. Fuente: el autor

De la gráfica anterior se obtiene las propiedades mecánicas del murete, las cuales se resumen en la Tabla 10-10

Tabla 10-10 Propiedades mecánicas murete M4. Fuente: el autor

| Propiedades mecánicas M4 |        |       |
|--------------------------|--------|-------|
| $f'm =$                  | 12,22  | MPa   |
| $\epsilon_{mu} =$        | 0,0018 | mm/mm |
| $0,05*f'm =$             | 0,61   | MPa   |
| $0,33*f'm =$             | 4,03   | MPa   |
| $0,05*\epsilon =$        | 0,0001 | mm/mm |
| $0,33*\epsilon =$        | 0,0004 | mm/mm |
| $E_m =$                  | 9225   | MPa   |

- Murete M5 con dovelas rellenas:

Las dimensiones y propiedades geométricas del murete son las siguientes.

Dimensiones

|       |                       |                           |
|-------|-----------------------|---------------------------|
| L =   | 445 mm                | Longitud del murete       |
| t =   | 145 mm                | Espesor del murete        |
| h =   | 300 mm                | altura del murete         |
| Le =  | 200 mm                | Longitud del ensayo       |
| h/t   | 2,07                  | Relación altura - espesor |
| F.C = | 1,01                  | Factor de corrección      |
| An =  | 64525 mm <sup>2</sup> | Área neta del murete      |

En la Tabla 10-11 se presentan los datos de carga y deformación de cada uno de los deformímetros mecánicos utilizados en el ensayo. Además, se presentan los valores del esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 10-11 Datos de la curva esfuerzo deformación murete M5. Fuente: el autor

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 0         | 0,000     | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 49050     | 0,000     | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,76           |
| 98100     | 0,025     | 0,00      | 0,01     | 0,0001             | 1,53           |
| 147150    | 0,076     | 0,00      | 0,04     | 0,0002             | 2,29           |
| 196200    | 0,127     | 0,00      | 0,06     | 0,0003             | 3,06           |
| 245250    | 0,178     | 0,01      | 0,10     | 0,0005             | 3,82           |
| 294300    | 0,229     | 0,03      | 0,13     | 0,0006             | 4,59           |
| 343350    | 0,279     | 0,05      | 0,17     | 0,0008             | 5,35           |
| 392400    | 0,330     | 0,08      | 0,20     | 0,0010             | 6,11           |
| 441450    | 0,381     | 0,10      | 0,24     | 0,0012             | 6,88           |
| 490500    | 0,406     | 0,13      | 0,27     | 0,0013             | 7,64           |
| 539550    | 0,457     | 0,15      | 0,30     | 0,0015             | 8,41           |
| 588600    | 0,508     | 0,20      | 0,36     | 0,0018             | 9,17           |
| 637650    | 0,533     | 0,23      | 0,38     | 0,0019             | 9,94           |
| 686700    | 0,584     | 0,28      | 0,43     | 0,0022             | 10,70          |
| 735750    | 0,635     | 0,30      | 0,47     | 0,0023             | 11,47          |
| 784800    | 0,686     | 0,33      | 0,51     | 0,0025             | 12,23          |

En la Figura 10-5 se presenta la curva esfuerzo deformación unitaria del murete M5

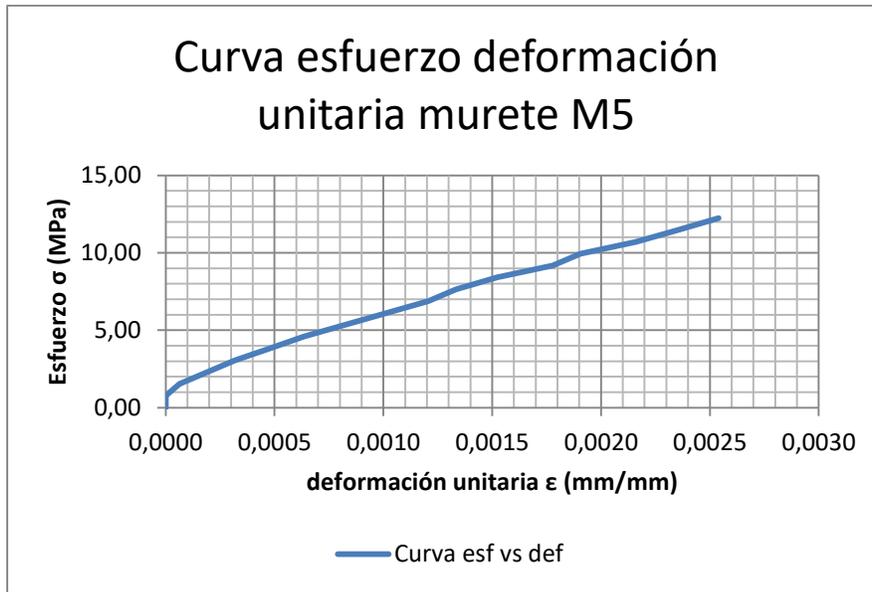


Figura 10-5 Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M5. Fuente: el autor

De la gráfica anterior se obtiene las propiedades mecánicas del murete, las cuales se resumen en la Tabla 10-12

Tabla 10-12 Propiedades mecánicas murete M5. Fuente: el autor

| Propiedades mecánicas M5 |        |       |
|--------------------------|--------|-------|
| $f'm =$                  | 12,23  | MPa   |
| $\epsilon_{mu} =$        | 0,003  |       |
| $0,05*f'm =$             | 0,76   | MPa   |
| $0,33*f'm =$             | 4,59   | MPa   |
| $0,05*\epsilon =$        | 0,0000 | mm/mm |
| $0,33*\epsilon =$        | 0,0006 | mm/mm |
| $E_m =$                  | 6031   | MPa   |

- Murete M6 con dovelas rellenas:

Las dimensiones y propiedades geométricas del murete son las siguientes.

**Dimensiones**

|       |        |                           |
|-------|--------|---------------------------|
| L =   | 445 mm | Longitud del murete       |
| t =   | 145 mm | Espesor del murete        |
| h =   | 300 mm | altura del murete         |
| Le =  | 200 mm | Longitud del ensayo       |
| h/t   | 2,07   | Relación altura - espesor |
| F.C = | 1,01   | Factor de corrección      |

An = 64525 mm<sup>2</sup> Área neta del murete

En la Tabla 10-13 se presentan los datos de carga y deformación de cada uno de los deformímetros mecánicos utilizados en el ensayo. Además, se presentan los valores del esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 10-13 Datos de la curva esfuerzo deformación murete M6. Fuente: el autor

| Carga (N) | def1 (mm) | def2 (mm) | def (mm) | $\epsilon$ (mm/mm) | $\sigma$ (MPa) |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------|----------------|
| 0         | 0,000     | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,00           |
| 49050     | 0,000     | 0,00      | 0,00     | 0,0000             | 0,76           |
| 98100     | 0,051     | 0,00      | 0,03     | 0,0001             | 1,53           |
| 147150    | 0,152     | 0,00      | 0,08     | 0,0004             | 2,29           |
| 196200    | 0,152     | 0,00      | 0,08     | 0,0004             | 3,06           |
| 245250    | 0,178     | 0,03      | 0,10     | 0,0005             | 3,82           |
| 294300    | 0,229     | 0,05      | 0,14     | 0,0007             | 4,59           |
| 343350    | 0,254     | 0,08      | 0,17     | 0,0008             | 5,35           |
| 392400    | 0,279     | 0,13      | 0,20     | 0,0010             | 6,11           |
| 441450    | 0,330     | 0,15      | 0,24     | 0,0012             | 6,88           |
| 490500    | 0,356     | 0,18      | 0,27     | 0,0013             | 7,64           |
| 539550    | 0,406     | 0,23      | 0,32     | 0,0016             | 8,41           |
| 588600    | 0,432     | 0,25      | 0,34     | 0,0017             | 9,17           |
| 637650    | 0,483     | 0,28      | 0,38     | 0,0019             | 9,94           |
| 686700    | 0,533     | 0,33      | 0,43     | 0,0022             | 10,70          |
| 735750    | 0,559     | 0,36      | 0,46     | 0,0023             | 11,47          |
| 784800    | 0,610     | 0,38      | 0,50     | 0,0025             | 12,23          |

En la Figura 10-6 se presenta la curva esfuerzo deformación unitaria del murete M6

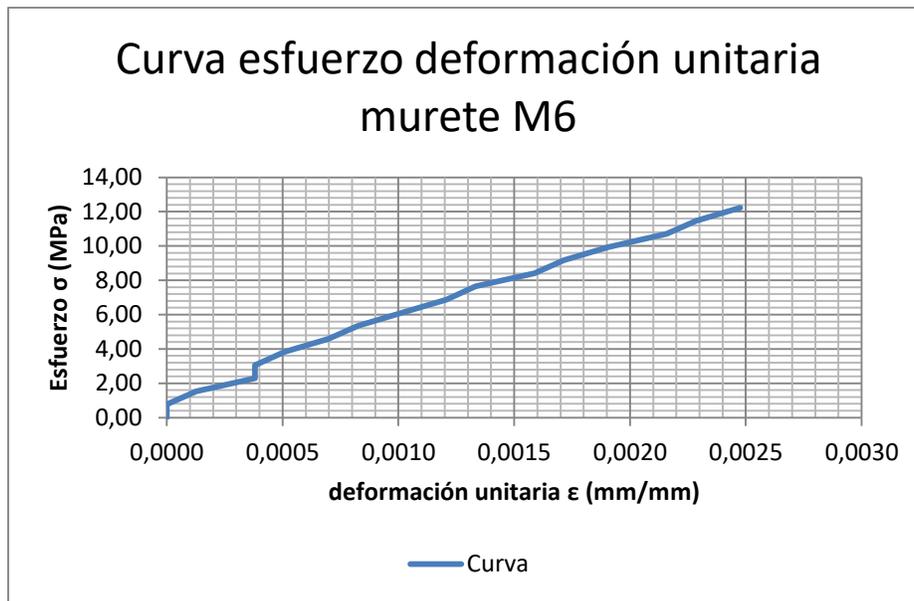


Figura 10-6 Curva esfuerzo deformación unitaria del murete M6. Fuente: el autor

De la gráfica anterior se obtiene las propiedades mecánicas del murete, las cuales se resumen en la Tabla 10-14

Tabla 10-14 Propiedades mecánicas murete M6. Fuente: el autor

| Propiedades mecánicas M6 |       |       |
|--------------------------|-------|-------|
| $f'm =$                  | 12,23 | MPa   |
| $\epsilon_{mu} =$        | 0,002 |       |
| $0,05*f'm =$             | 0,76  | MPa   |
| $0,33*f'm =$             | 4,59  | MPa   |
| $0,05*\epsilon =$        | 0,000 | mm/mm |
| $0,33*\epsilon =$        | 0,001 | mm/mm |
| $E_m =$                  | 5483  | MPa   |

De acuerdo a los resultados presentados para cada uno de los muretes se determinaron las propiedades mecánicas promedio de los ensayos.

En la Figura 10-7 se presentan los resultados de las resistencias a la compresión de los muretes

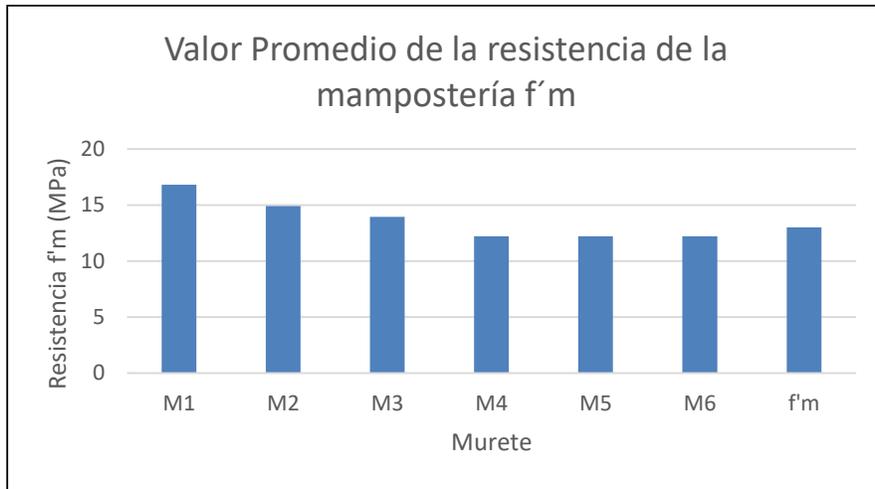


Figura 10-7 Valor promedio de la resistencia de la mampostería  $f'm$ . Fuente: el autor

De acuerdo a la gráfica anterior se determina un valor de  $f'm = 13$  MPa, el cual se utilizara para el cálculo de los ensayos de los muros a escala real.

En la Figura 10-8 se presenta los resultados de los módulos de elasticidad de los muretes.

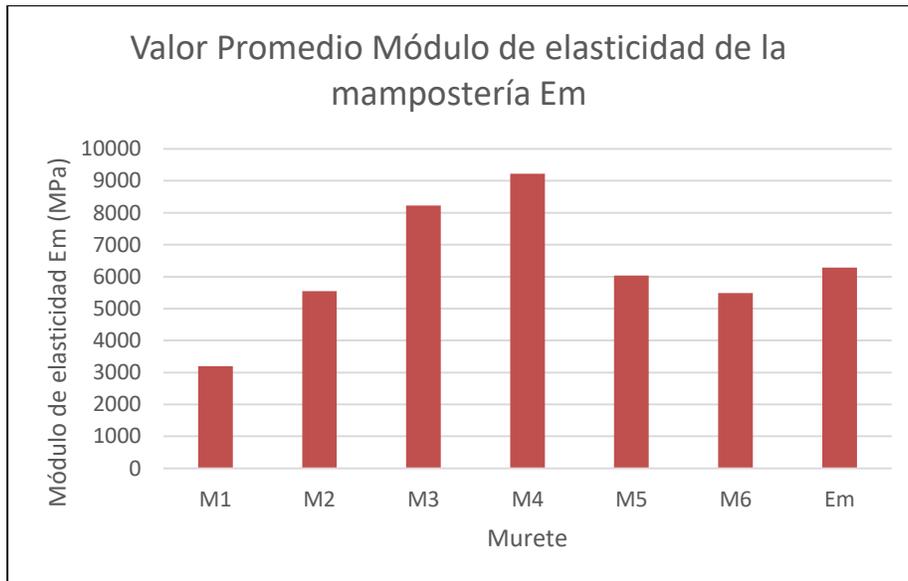


Figura 10-8 Valor Promedio del módulo de elasticidad de los muretes  $E_m$ . Fuente: el autor

De la gráfica anterior se determinó que el valor promedio del módulo de elasticidad de los muretes es de  $E_m = 6285$  MPa.

En Figura 10-9 la presentan los valores de las deformaciones unitarias de los muretes ensayados.

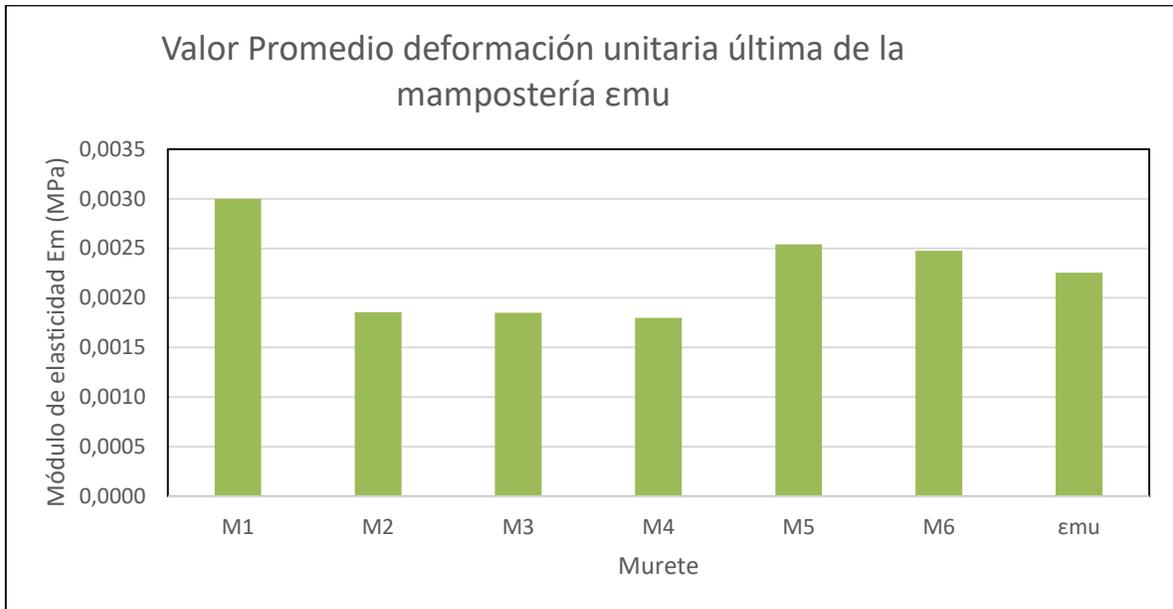


Figura 10-9 Valor promedio de la deformación unitaria última de los muretes  $\epsilon_{mu}$ .  
Fuente: el autor

De la gráfica anterior se determinó que el valor promedio de la deformación unitaria de los muretes es de  $\epsilon_{mu} = 0.0023$

En la Tabla 10-15 se presenta el resumen de las propiedades mecánicas de los ensayos a los muretes

Tabla 10-15 Resumen propiedades mecánicas de los muretes. Fuente: el autor

| Resumen propiedades mecánicas de los muretes |     |      |                 |
|--|-----|------|-----------------|
|  | f'm | Em   | $\epsilon_{mu}$ |
|  | MPa | MPa  | mm/mm           |
| Murete M1                                    | 17  | 3194 | 0,0030          |
| Murete M2                                    | 15  | 5548 | 0,0019          |
| Murete M3                                    | 14  | 8229 | 0,0018          |
| Murete M4                                    | 12  | 9225 | 0,0018          |
| Murete M5                                    | 12  | 6031 | 0,0025          |
| Murete M6                                    | 12  | 5483 | 0,0025          |
| Promedio                                     | 13  | 6285 | 0,0023          |

**ANEXO D: RESULTADO ENSAYOS DE TENSIÓN EN BARRAS DE FRP**

## ENSAYOS DE TENSIÓN EN BARRAS DE FRP

Para ensayar las barras de FRP, se siguieron las recomendaciones de la norma ASTM D7205 como se mencionó anteriormente. De acuerdo a esta metodología se presentan los resultados de los ensayos

### CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS BARRAS DE GFRP

Para calcular las propiedades mecánicas de las barras de GFRP, se realizaron dos ensayos, en los cuales se inyectó en los tubos metálicos, para ambas pruebas, un mortero expansivo (CRAS TX40T232), con el fin de dar la mejor adherencia a la barra durante el ensayo. En Figura 10-10 se presenta la preparación del mortero expansivo.



1.) Preparación e inyección del mortero

2.) Barra inyectada con mortero

Figura 10-10 Preparación e instalación mortero expansivo CRAS TX40T232. Fuente el autor

Para medir las deformaciones en la barra se utilizaron deformímetros mecánicos.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos a las dos barras GFRP

- barra GFRP V1

Las dimensiones y propiedades geométricas de la barra GFRP V1 son las siguientes:

|          |                    |                      |
|----------|--------------------|----------------------|
| $\phi$ = | 11 mm              | Diámetro de la barra |
| A=       | 95 mm <sup>2</sup> | Área de la barra     |
| L=       | 250 mm             | Longitud de la barra |

En la Tabla 10-16 se presenta los resultados de cargas y deformaciones del ensayo, además están los cálculos de los esfuerzos y las deformaciones unitarias en la barra.

Tabla 10-16 Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra GFRP V1. Fuente el autor

| Carga (N) | Def (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|-----------|----------|----------------|--------------------|
| 0         | 0,000    | 0,0            | 0,0000             |
| 4905      | 0,000    | 51,6           | 0,0000             |
| 9810      | 0,240    | 103,2          | 0,0010             |
| 14715     | 0,460    | 154,8          | 0,0018             |
| 19620     | 0,680    | 206,5          | 0,0027             |
| 24525     | 0,900    | 258,1          | 0,0036             |
| 29430     | 1,140    | 309,7          | 0,0046             |
| 34335     | 1,370    | 361,3          | 0,0055             |
| 39240     | 1,590    | 412,9          | 0,0064             |
| 44145     | 1,820    | 464,5          | 0,0073             |
| 49050     | 2,050    | 516,1          | 0,0082             |
| 53955     | 2,290    | 567,7          | 0,0092             |
| 58860     | 2,510    | 619,4          | 0,0100             |
| 63765     | 2,740    | 671,0          | 0,0110             |
| 68670     | 2,990    | 722,6          | 0,0120             |
| 73575     | 3,240    | 774,2          | 0,0130             |
| 78480     | 3,470    | 825,8          | 0,0139             |
| 83385     | 3,710    | 877,4          | 0,0148             |
| 87054     | 3,900    | 916,0          | 0,0156             |

En la Figura 10-11 se presenta la curva esfuerzo deformación de la barra

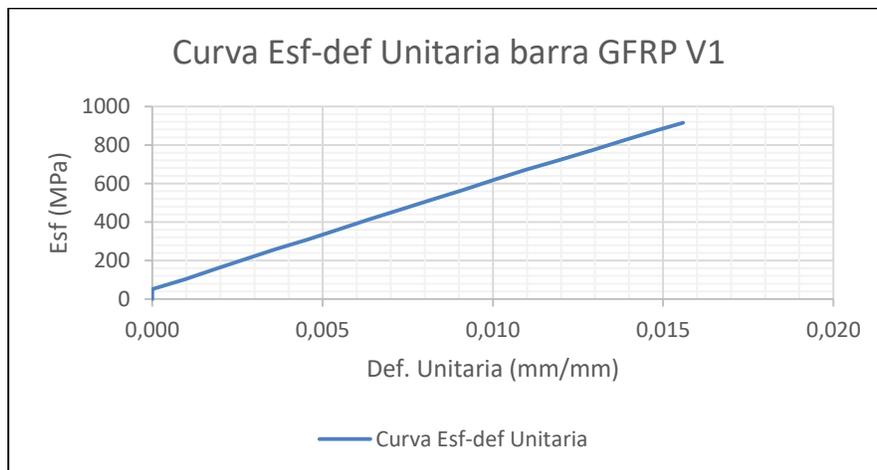


Figura 10-11 Curva esfuerzo deformación barra GFRP V1. Fuente el autor

De la curva esfuerzo deformación se determinan las propiedades mecánicas de la barra, las cuales se presenta en la Tabla 10-17

Tabla 10-17 Propiedades mecánicas barra GFRP V1. Fuente el autor

| Propiedades mecánicas Barra GFRP V1 |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| $f_{fu} =$                          | 916    | MPa   |
| $\epsilon_{fu} =$                   | 0,0156 | mm/mm |
| $E_f =$                             | 55510  | MPa   |

- Barras GFRP V2

Las dimensiones y propiedades geométricas de la barra GFRP V2 son las siguientes:

|          |                    |                      |
|----------|--------------------|----------------------|
| $\phi =$ | 11 mm              | Diámetro de la barra |
| $A =$    | 95 mm <sup>2</sup> | Área de la barra     |
| $L =$    | 250 mm             | Longitud de la barra |

En la Tabla 10-18 se presenta los resultados de cargas y deformaciones del ensayo, además están los cálculos de los esfuerzos y las deformaciones unitarias en la barra.

Tabla 10-18 Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra GFRP V2. Fuente el autor

| Carga (N) | Def (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|-----------|----------|----------------|--------------------|
| 0         | 0,000    | 0,0            | 0,0000             |
| 4905      | 0,240    | 51,6           | 0,0010             |
| 9810      | 0,500    | 103,2          | 0,0020             |
| 14715     | 0,760    | 154,8          | 0,0030             |
| 19620     | 1,000    | 206,5          | 0,0040             |
| 24525     | 1,270    | 258,1          | 0,0051             |
| 29430     | 1,540    | 309,7          | 0,0062             |
| 34335     | 1,790    | 361,3          | 0,0072             |
| 39240     | 2,080    | 412,9          | 0,0083             |
| 44145     | 2,320    | 464,5          | 0,0093             |
| 49050     | 2,590    | 516,1          | 0,0104             |
| 53955     | 2,860    | 567,7          | 0,0114             |
| 58860     | 3,110    | 619,4          | 0,0124             |
| 60920     | 3,220    | 641,0          | 0,0129             |

En la Figura 10-12 se presenta la curva esfuerzo deformación de la barra

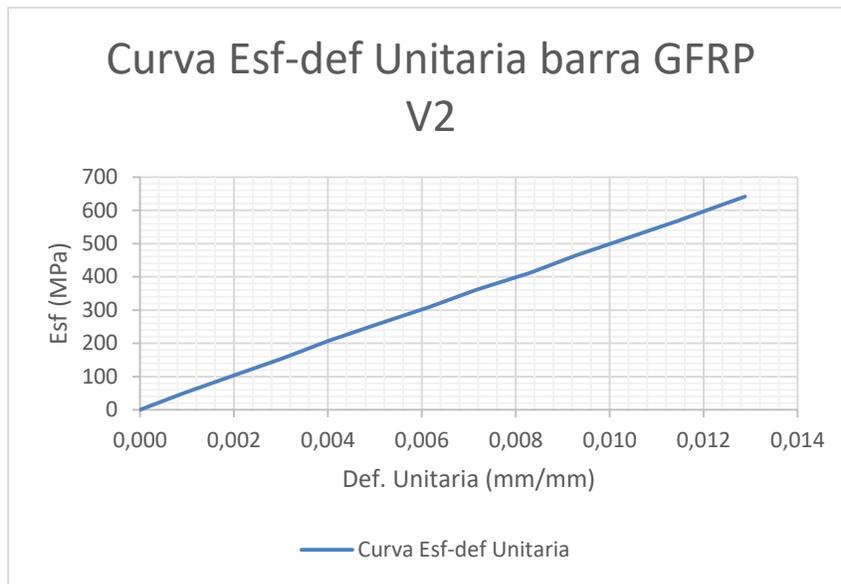


Figura 10-12 Curva esfuerzo deformación barra GFRP V2. Fuente el autor

De la curva esfuerzo deformación se determinan las propiedades mecánicas de la barra, las cuales se presenta en la Tabla 10-19

Tabla 10-19 Propiedades mecánicas barra GFRP V2. Fuente el autor

| Propiedades mecánicas barra GFRP V2 |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| $f_{tu} =$                          | 641    | MPa   |
| $\epsilon_{tu} =$                   | 0,0129 | mm/mm |
| $E_f =$                             | 49606  | MPa   |

Los resultados de esta barra, en especial la resistencia, está muy por debajo de los resultados de la barra GFRP V1. De los resultados del ensayo, se puede ver que la barra fallo en la zona del apoyo o del tubo metálico como se presenta en la Figura 10-13



Figura 10-13 Modo de falla barra GFRP V2. Fuente el autor

Debido a que la falla de esta barra no fue en la zona central y de una manera uniforme, los resultados del ensayo no se tienen en cuenta en las propiedades mecánicas de las barras de GFRP.

Por lo tanto el resumen de las propiedades mecánicas de las barras GFRP se presenta en la Tabla 10-20

Tabla 10-20 Resumen propiedades mecánicas barras GFRP. Fuente el autor

| Propiedades mecánicas Barras GFRP |        |       |
|-----------------------------------|--------|-------|
| $f_{tu} =$                        | 916    | MPa   |
| $\epsilon_{fu} =$                 | 0,0156 | mm/mm |
| $E_t =$                           | 55510  | MPa   |

#### CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS BARRAS DE CFRP

Para ensayar la primera barra de CFRP se inyectó en los tubos metálicos epóxico HILTY – R51, y para medir las deformaciones se utilizó un deformímetro electrónico (strenght age).

Para los otros tres ensayos de las barras se utilizó en mortero expansivo (CRAS TX40T232) para inyectar los tubos metálicos. Y para medir las deformaciones se utilizaron deformímetros mecánicos. A continuación se describe cada uno de los ensayos.

- Barras CFRP V1

Las dimensiones y propiedades geométricas de la barra CFRP V1 son las siguientes:

|          |                     |                      |
|----------|---------------------|----------------------|
| $\phi$ = | 11,9 mm             | Diámetro de la barra |
| A=       | 111 mm <sup>2</sup> | Área de la barra     |
| L=       | 250 mm              | Longitud de la barra |

En la Tabla 10-21 se presenta los resultados de cargas y deformaciones del ensayo, además están los cálculos de los esfuerzos y las deformaciones unitarias en la barra.

Tabla 10-21 Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V1. Fuente el autor

| Carga (N) | Def (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|-----------|----------|----------------|--------------------|
| 0         | 0,000    | 0,0            | 0,0000             |
| 4905      | 0,000    | 44,1           | 0,0000             |
| 9810      | 0,080    | 88,2           | 0,0003             |
| 14715     | 0,260    | 132,3          | 0,0010             |
| 19620     | 0,350    | 176,4          | 0,0014             |
| 24525     | 0,510    | 220,5          | 0,0020             |
| 29430     | 0,590    | 264,6          | 0,0024             |
| 34335     | 0,840    | 308,7          | 0,0034             |
| 39240     | 0,930    | 352,8          | 0,0037             |
| 44145     | 1,000    | 396,9          | 0,0040             |
| 49050     | 1,070    | 441,0          | 0,0043             |
| 53955     | 1,150    | 485,1          | 0,0046             |
| 58860     | 1,250    | 529,2          | 0,0050             |
| 63765     | 1,320    | 573,3          | 0,0053             |
| 68670     | 1,400    | 617,4          | 0,0056             |
| 73575     | 1,680    | 661,5          | 0,0067             |
| 78480     | 1,800    | 705,6          | 0,0072             |
| 83385     | 1,850    | 749,7          | 0,0074             |

En la Figura 10-14 se presenta la curva esfuerzo deformación de la barra

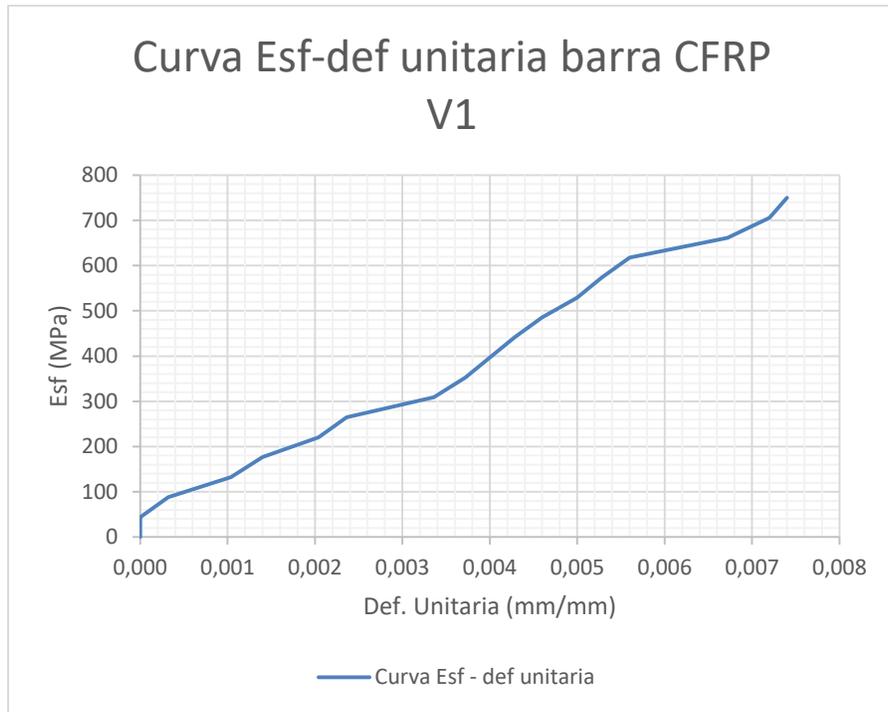


Figura 10-14 Curva esfuerzo deformación barra CFRP V1. Fuente el autor

De la curva esfuerzo deformación se determinan las propiedades mecánicas de la barra, las cuales se presenta en la Tabla 10-22

Tabla 10-22 Propiedades mecánicas barra CFRP V1. Fuente el autor

| Propiedades mecánicas barra CFRP V1 |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| $f_{fu} =$                          | 750    | MPa   |
| $\epsilon_{fu} =$                   | 0,0074 | mm/mm |
| $E_f =$                             | 119067 | MPa   |

En la Figura 10-15 se presenta el modo de falla de la barra



Figura 10-15 Modo de falla barra CFRP V1. Fuente el autor

Como se puede observar la barra no llegó a la rotura si no que se deslizo por adherencia. Por lo tanto no se llegó al máximo rendimiento de la barra.

## Barras CFRP V2

Las dimensiones y propiedades geométricas de la barra CFRP V2 son las siguientes:

|          |                     |                      |
|----------|---------------------|----------------------|
| $\phi$ = | 11,9 mm             | Diámetro de la barra |
| A=       | 111 mm <sup>2</sup> | Área de la barra     |
| L=       | 250 mm              | Longitud de la barra |

En la Tabla 10-23 se presenta los resultados de cargas y deformaciones del ensayo, además están los cálculos de los esfuerzos y las deformaciones unitarias en la barra.

Tabla 10-23 Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V2. Fuente el autor

| Carga (N) | Def (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|-----------|----------|----------------|--------------------|
| 0         | 0,000    | 0,0            | 0,0000             |
| 1766      | 0,000    | 15,9           | 0,0000             |
| 9810      | 0,170    | 88,2           | 0,0007             |
| 19620     | 0,360    | 176,4          | 0,0014             |
| 29430     | 0,500    | 264,6          | 0,0020             |
| 39240     | 0,650    | 352,8          | 0,0026             |
| 49050     | 0,830    | 441,0          | 0,0033             |
| 58860     | 1,000    | 529,2          | 0,0040             |
| 68670     | 1,230    | 617,4          | 0,0049             |
| 78480     | 1,390    | 705,6          | 0,0056             |
| 88290     | 1,550    | 793,8          | 0,0062             |
| 92705     | 1,630    | 833,5          | 0,0065             |

En la Figura 10-16 se presenta la curva esfuerzo deformación de la barra

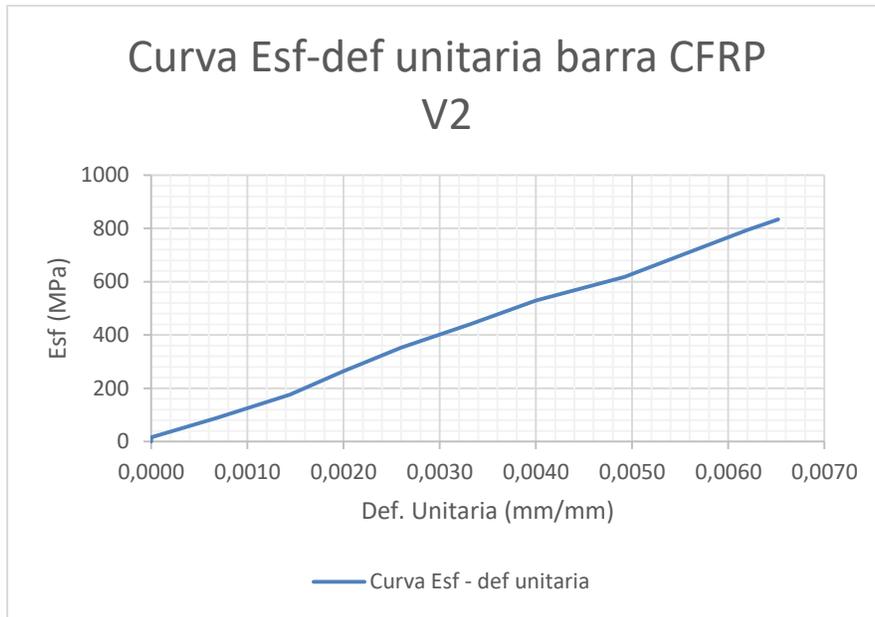


Figura 10-16 Curva esfuerzo deformación barra CFRP V2. Fuente el autor

De la curva esfuerzo deformación se determinan las propiedades mecánicas de la barra, las cuales se presenta en la Tabla 10-24

Tabla 10-24 Propiedades mecánicas barra CFRP V2. Fuente el autor

| Propiedades mecánicas barra CFRP V2 |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| ffu=                                | 833,5  | MPa   |
| εfu=                                | 0,0062 | mm/mm |
| Ef=                                 | 127469 | MPa   |

De igual forma que en la barra CFRP V1 esta barra se deslizo antes de llegar a la rotura.

- Barras CFRP V3

Las dimensiones y propiedades geométricas de la barra CFRP V3 son las siguientes:

|    |      |                 |                      |
|----|------|-----------------|----------------------|
| φ= | 11,9 | mm              | Diámetro de la barra |
| A= | 111  | mm <sup>2</sup> | Área de la barra     |
| L= | 250  | mm              | Longitud de la barra |

En la Tabla 10-25 se presenta los resultados de cargas y deformaciones del ensayo, además están los cálculos de los esfuerzos y las deformaciones unitarias en la barra.

Tabla 10-25 Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V3. Fuente el autor

| Carga (N) | Def (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|-----------|----------|----------------|--------------------|
| 0         | 0,000    | 0,0            | 0,0000             |
| 9810      | 0,130    | 88,2           | 0,0005             |
| 19620     | 0,340    | 176,4          | 0,0014             |
| 29430     | 0,520    | 264,6          | 0,0021             |
| 39240     | 0,700    | 352,8          | 0,0028             |
| 49050     | 0,870    | 441,0          | 0,0035             |
| 58860     | 1,040    | 529,2          | 0,0042             |
| 68670     | 1,210    | 617,4          | 0,0048             |
| 78480     | 1,360    | 705,6          | 0,0054             |
| 88290     | 1,540    | 793,8          | 0,0062             |
| 98100     | 1,690    | 882,0          | 0,0068             |
| 107910    | 1,850    | 970,2          | 0,0074             |
| 117720    | 2,040    | 1058,4         | 0,0082             |
| 124391    | 2,160    | 1118,4         | 0,0086             |

En la Figura 10-17 se presenta la curva esfuerzo deformación de la barra

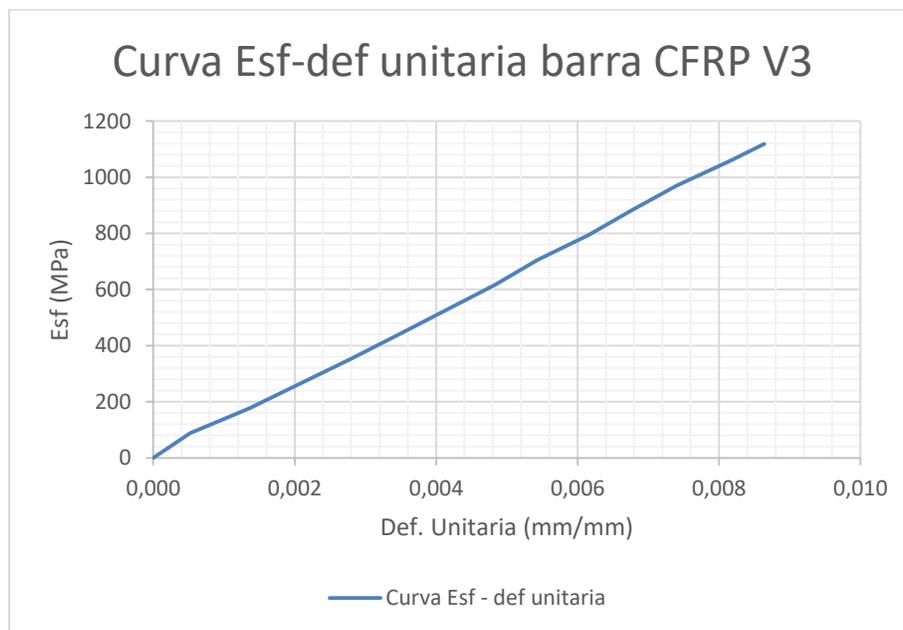


Figura 10-17 Curva esfuerzo deformación barra CFRP V3. Fuente el autor

De la curva esfuerzo deformación se determinan las propiedades mecánicas de la barra, las cuales se presenta en la Tabla 10-26

Tabla 10-26 Propiedades mecánicas barra CFRP V3. Fuente el autor

| Propiedades mecánicas barra CFRP V3 |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| ffu=                                | 1118,4 | MPa   |
| εfu=                                | 0,0086 | mm/mm |
| Ef=                                 | 128140 | MPa   |

En la Figura 10-18 se presenta el modo de falla de la barra



Figura 10-18 Modo de falla barra CFRP V3. Fuente el autor

De igual forma que en las dos barras anteriores, esta barra no llegó a la rotura si no que se deslizo por adherencia del tubo metálico.

- Barras CFRP V4

Las dimensiones y propiedades geométricas de la barra CFRP V4 son las siguientes:

|    |      |                 |                      |
|----|------|-----------------|----------------------|
| φ= | 12.1 | mm              | Diámetro de la barra |
| A= | 115  | mm <sup>2</sup> | Área de la barra     |
| L= | 250  | mm              | Longitud de la barra |

En la Tabla 10-27 se presenta los resultados de cargas y deformaciones del ensayo, además están los cálculos de los esfuerzos y las deformaciones unitarias en la barra.

Tabla 10-27 Datos de la curva esfuerzo deformación unitaria barra CFRP V4. Fuente el autor

| Carga (N) | Def (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|-----------|----------|----------------|--------------------|
| 0         | 0,000    | 0,0            | 0,0000             |
| 9810      | 0,080    | 85,3           | 0,0003             |
| 19620     | 0,160    | 170,6          | 0,0006             |
| 29430     | 0,330    | 255,9          | 0,0013             |
| 39240     | 0,500    | 341,2          | 0,0020             |
| 49050     | 0,690    | 426,6          | 0,0028             |
| 58860     | 0,870    | 511,9          | 0,0035             |
| 68670     | 1,100    | 597,2          | 0,0044             |
| 78480     | 1,300    | 682,5          | 0,0052             |
| 88290     | 1,470    | 767,8          | 0,0059             |
| 98100     | 1,650    | 853,1          | 0,0066             |
| 103397    | 1,740    | 899,2          | 0,0070             |

En la Figura 10-19 se presenta la curva esfuerzo deformación de la barra

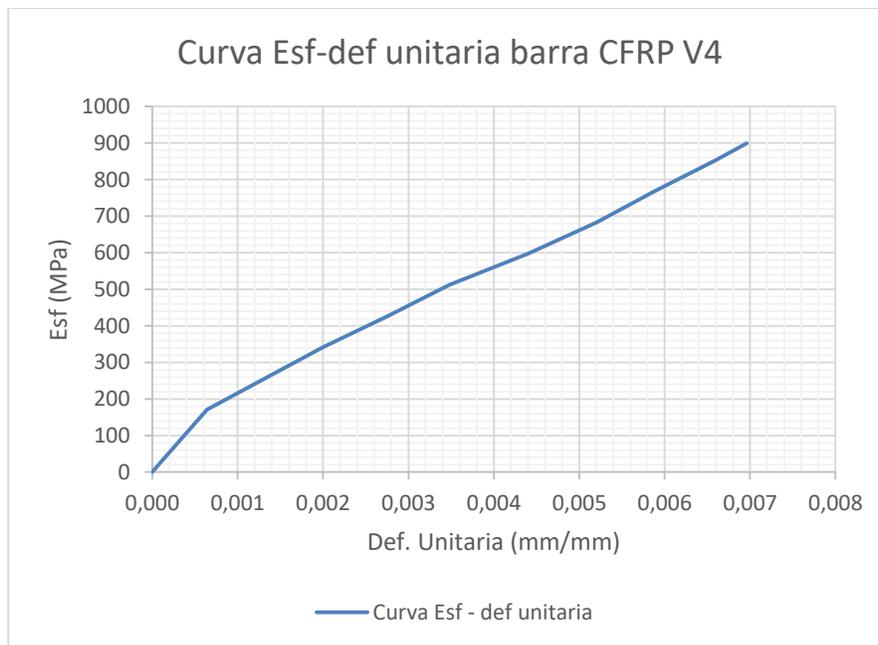


Figura 10-19 Curva esfuerzo deformación barra CFRP V4. Fuente el autor

De la curva esfuerzo deformación se determinan las propiedades mecánicas de la barra, las cuales se presenta en la Tabla 10-28

Tabla 10-28 Propiedades mecánicas barra CFRP V4. Fuente el autor

| Propiedades mecánicas barra CFRP V4 |       |     |
|-------------------------------------|-------|-----|
| ffu=                                | 899,2 | MPa |

| Propiedades mecánicas barra CFRP V4 |        |       |
|-------------------------------------|--------|-------|
| $\epsilon_{fu} =$                   | 0,0070 | mm/mm |
| $E_f =$                             | 131954 | MPa   |

Igual que en las anteriores barras esta se deslizo y no fallo por rotura

De acuerdo a los resultados presentados para cada una de las barras se determinaron las propiedades mecánicas promedio de los ensayos, las cuales se presentan de manera resumida a continuación

En la Figura 10-20 se presenta los resultados de la resistencia a de cada una de las barras

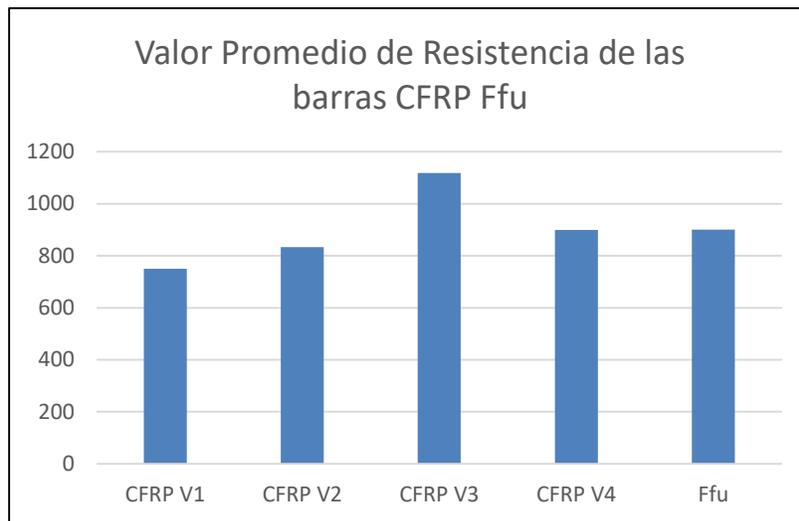


Figura 10-20 Valor promedio de resistencia de las barras de CFRP. Fuente el autor

Debido a que ninguna barra llego a la rotura y todas fallaron fue por deslizamiento ya que la adherencia no era la adecuada, para los cálculos de los muros a escala se decidió tomar el valor que estaba en la ficha técnica de la barra. Para este caso  $F_{fu} = 2300$  MPa.

En la Figura 10-21 se presenta los resultados de los módulos de elasticidad de cada una de las barras

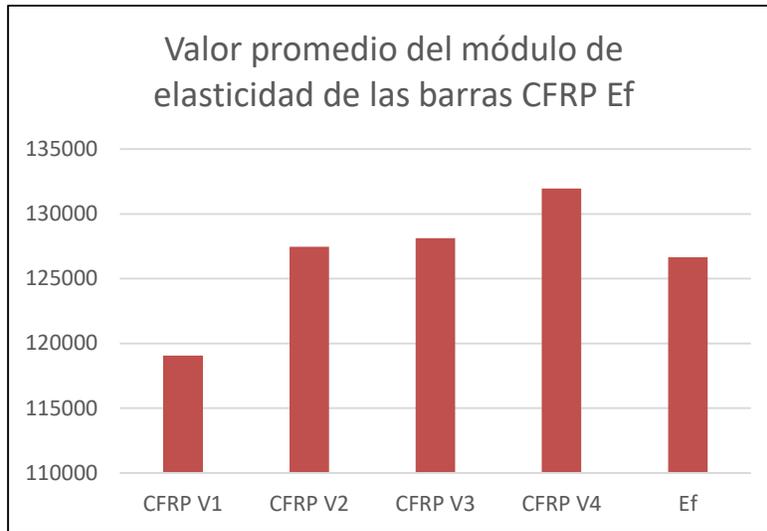


Figura 10-21 Valor promedio del módulo de elasticidad de las barras CFRP. Fuente el autor

El valor del módulo de elasticidad promedio, obtenido de los ensayos según el gráfico anterior es de  $E_f = 126\,658$  MPa.

Por último en la Figura 10-22 se presenta los resultados de las deformaciones últimas de cada una de las barras

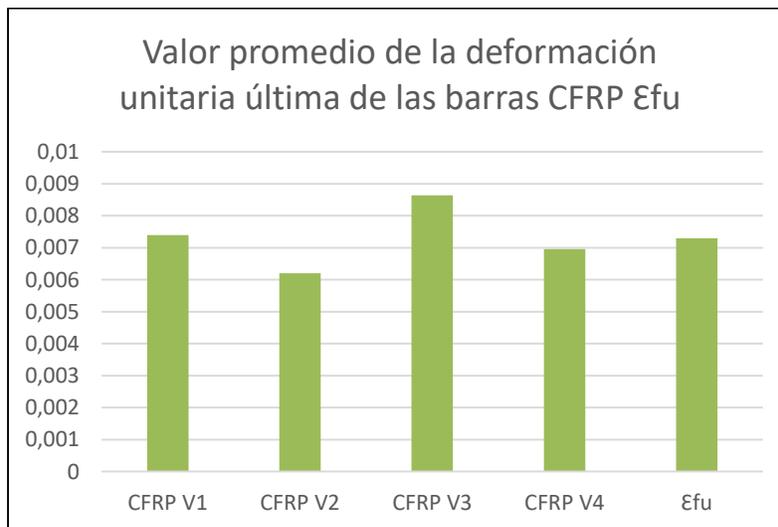


Figura 10-22 Valor promedio de la deformación unitaria última de las barras CFRP. Fuente el autor

De igual forma que en la resistencia de las barras se decide tomar la deformación unitaria última de las barras de la ficha técnica, ya que las barras nunca llegaron a la rotura y por tal motivo no se obtuvo la deformación unitaria última. Para este caso  $\epsilon_{fu} = 0.020$

A continuación en la Tabla 10-29 se resumen los resultados de las gráficas anteriores.

Tabla 10-29 Propiedades mecánicas de las barras CFRP

| Propiedades mecánicas de las barras CFRP |         |           |         |         |          |
|--|---------|-----------|---------|---------|----------|
|  | CFRP V1 | CFRP V2   | CFRP V3 | CFRP V4 | Promedio |
| Ffu (MPa)=                               | 750     | 834       | 1118    | 899     | 900      |
| $\epsilon_{fu} =$                        | 0,0074  | 0,0062    | 0,0086  | 0,0070  | 0,0073   |
| Ef (MPa)=                                | 119067  | 127469,19 | 128140  | 131954  | 126658   |

**ANEXO E    RESULTADO ENSAYOS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA  
REFORZADOS CON FRP**

## ENSAYOS DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON FRP

A continuación se presentan los resultados de todos los muros ensayados.

### MURO DE MAMPOSTERÍA M1-G

En la Figura 10-23 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

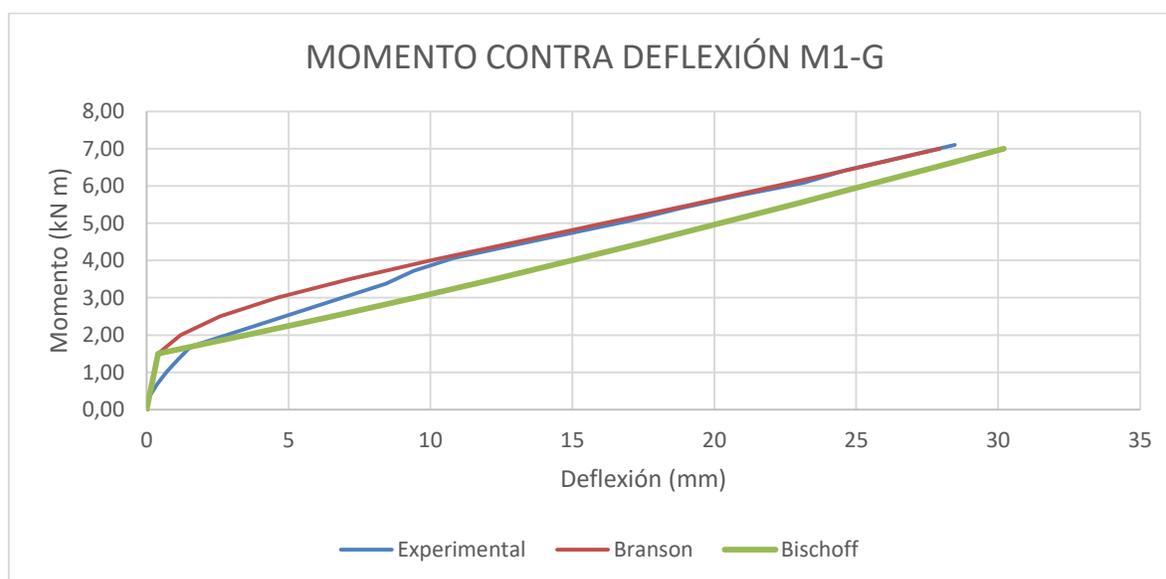


Figura 10-23 Curva de momento contra deformación muro M1-G. Fuente: el autor

En la Tabla 10-30 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-30 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M1-G. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M1-G        |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 3955   | kg    |
| Deformación máxima               | 69     | mm    |
| Momento máximo                   | 13,38  | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0075 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0014 | mm/mm |

En la Figura 10-24 se presenta el ensayo del muro M1-G



1.) Montaje en el marco de prueba del muro M1-G



2.) Carga aplicada al muro M1-G



3.) Vista superior del muro M1-G



#### 4.) Fisuras en la cara de tensión

Figura 10-24 Ensayo muro M1-G. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión

## MURO DE MAMPOSTERÍA M2-G

En la Figura 10-25 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

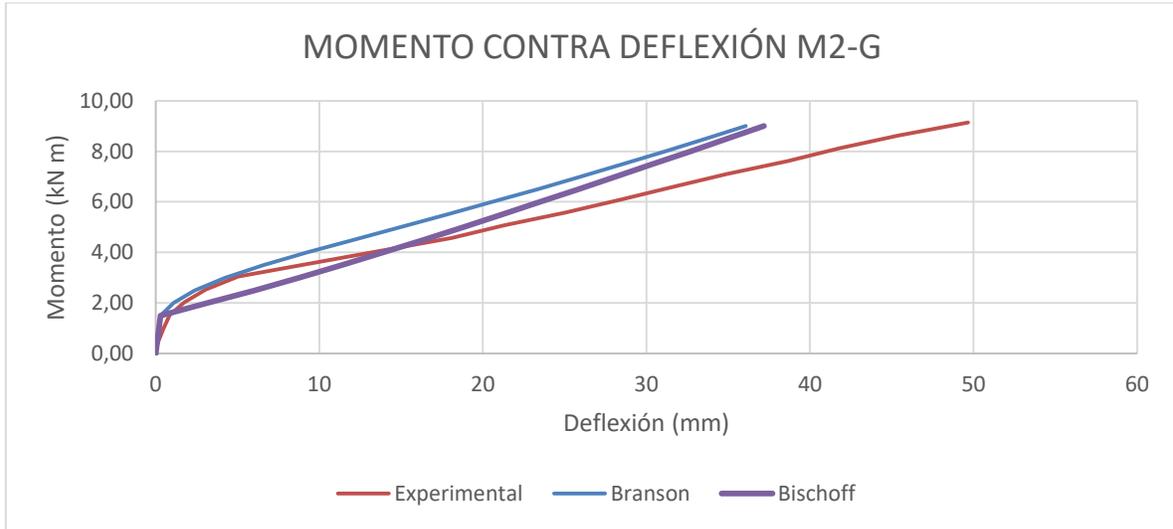


Figura 10-25 Curva de momento contra deformación muro M2-G. Fuente: el autor

En la Tabla 10-31 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

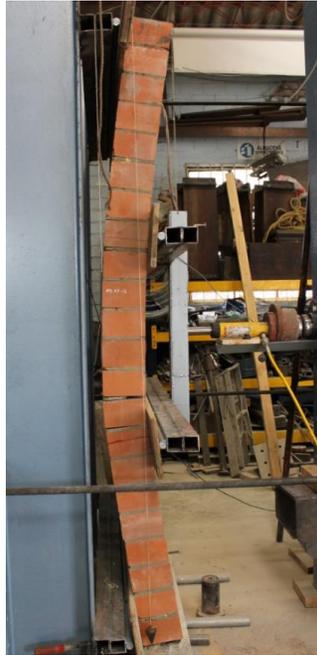
Tabla 10-31 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M2-G. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M2-G        |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 4860   | kg    |
| Deformación máxima               | 82     | mm    |
| Momento máximo                   | 16,44  | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0134 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0010 | mm/mm |

En la Figura 10-26 se presenta el ensayo del muro M2-G



1.) Montaje en marco de prueba muro M2-G



2.) Deformación del muro M2-G al aplicar la carga



3.) Fisuras en la cara de compresión del muro M2-G

Figura 10-26 Ensayo muro M2-G. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión

## MURO DE MAMPOSTERÍA M3-G

En la Figura 10-27 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

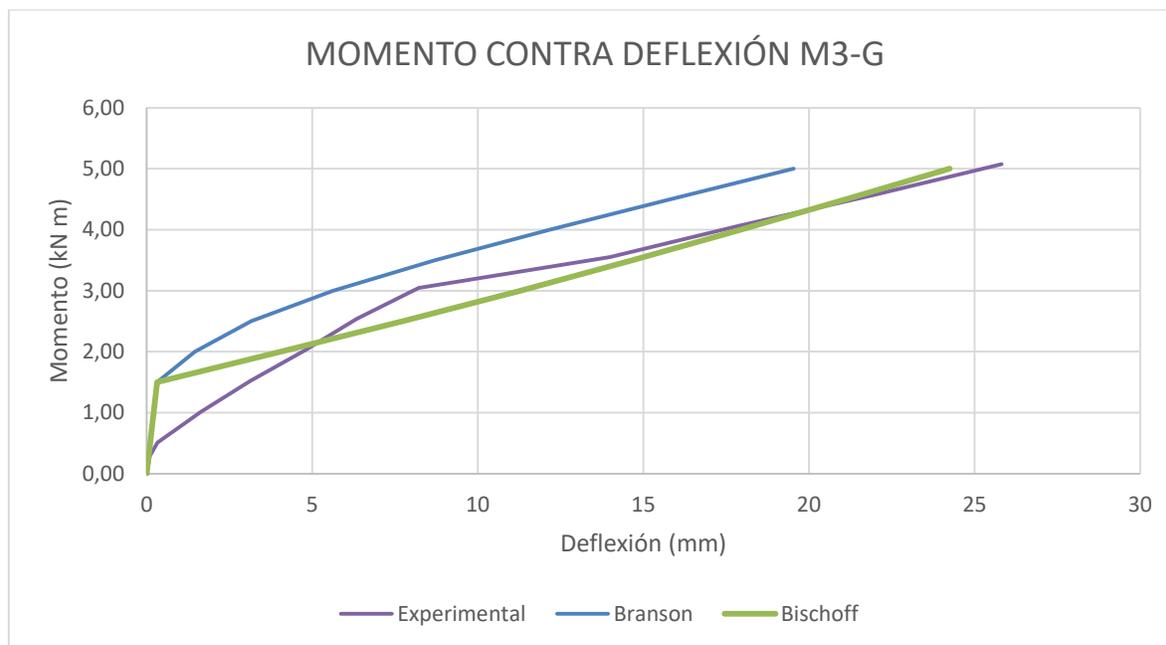


Figura 10-27 Curva de momento contra deformación muro M3-G. Fuente: el autor

En la Tabla 10-32 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones y cargas y momentos

Tabla 10-32 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M3-G. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M3-G        |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 2400   | kg    |
| Deformación máxima               | 85     | mm    |
| Momento máximo                   | 8,12   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0105 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0022 | mm/mm |

En la Figura 10-28 se presenta el ensayo del muro M3-G



1.) Montaje en el marco de prueba del muro M3-G



2.) Falla del muro M3-G por separación de los ladrillos



3.) Fisuras en la cara de compresión del muro M3-G



4.) Fisuras por aplastamiento en la cara de compresión

Figura 10-28 Ensayo muro M3-G. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión y además se alcanzó a notar aplastamiento en la cara de compresión del muro. En los resultados de la Tabla 10-32 se muestra el valor al que llegó la deformación unitaria en la mampostería

## MURO DE MAMPOSTERÍA M4-G

En la Figura 10-29 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

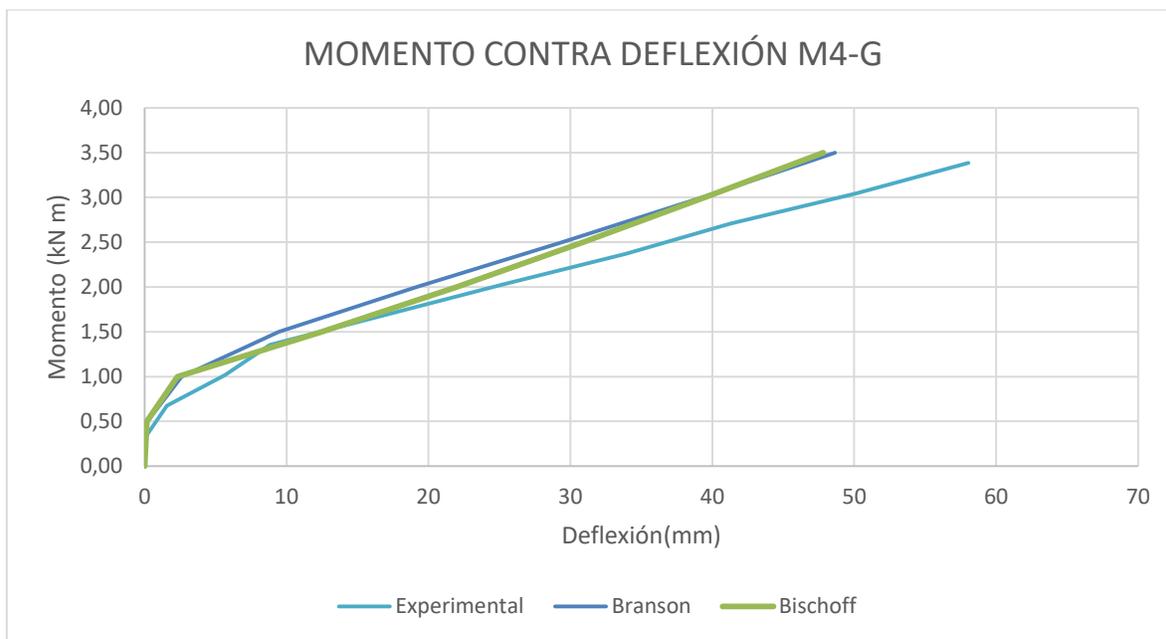


Figura 10-29 Curva de momento contra deformación muro M4-G. Fuente: el autor

En la Tabla 10-33 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-33 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M4-G. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M4-G        |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 1194   | kg    |
| Deformación máxima               | 66     | mm    |
| Momento máximo                   | 4,04   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0102 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0002 | mm/mm |

En la Figura 10-30 se presenta el ensayo del muro M4-G



1.) Fisuras en la cara de tensión del muro M4-G



2.) Fisuras por aplastamiento en la cara de compresión

Figura 10-30 Ensayo muro M4-G. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M5-G

En la Figura 10-31 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

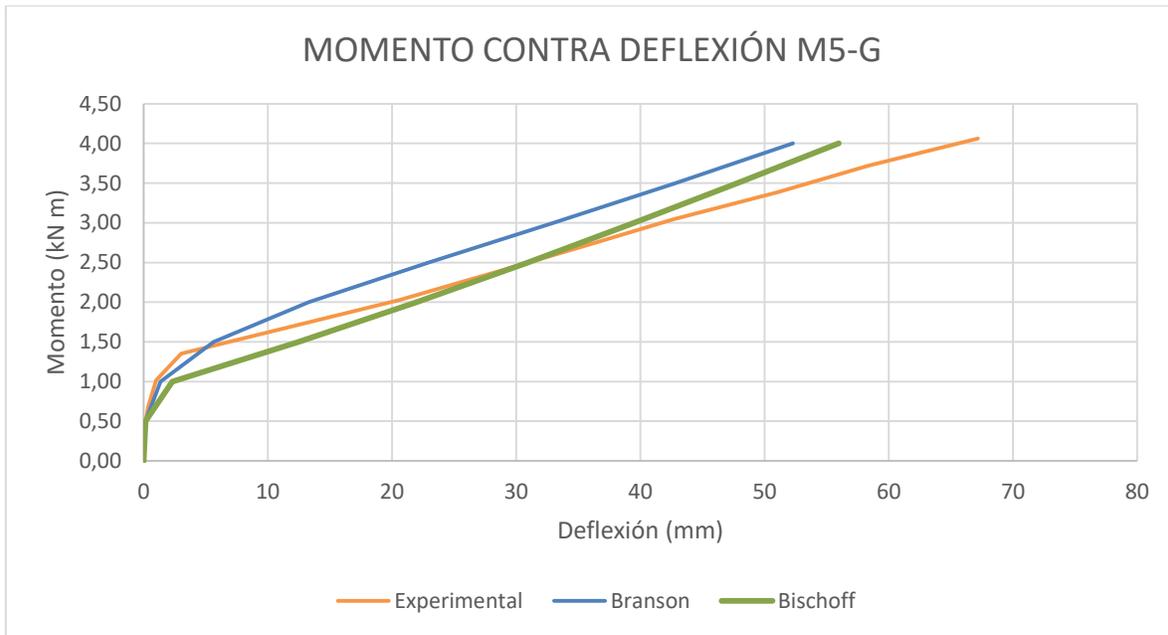


Figura 10-31 Curva de momento contra deformación muro M5-G. Fuente: el autor

En la Tabla 10-34 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-34 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M5-G. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M5-G        |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 1300   | kg    |
| Deformación máxima               | 76     | mm    |
| Momento máximo                   | 4,40   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0080 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0007 | mm/mm |

En la Figura 10-32 se presenta el ensayo del muro M5-G



1.) Falla por separación de los ladrillos del muro M5-G

Figura 10-32 Ensayo muro M5-G. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M7-G

En la Figura 10-33 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

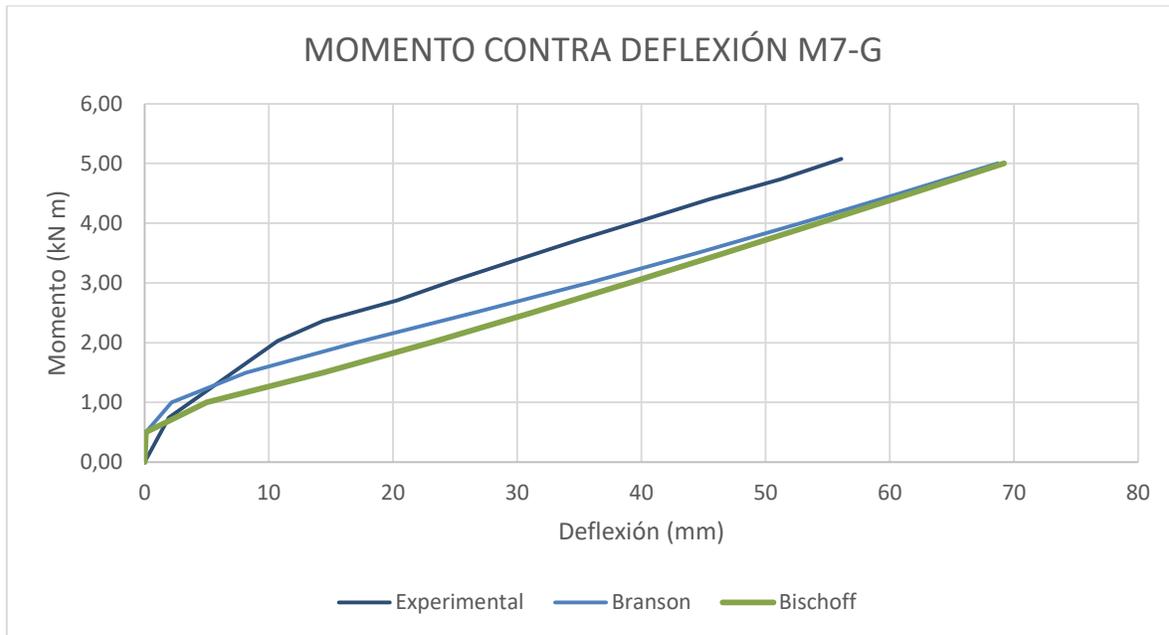


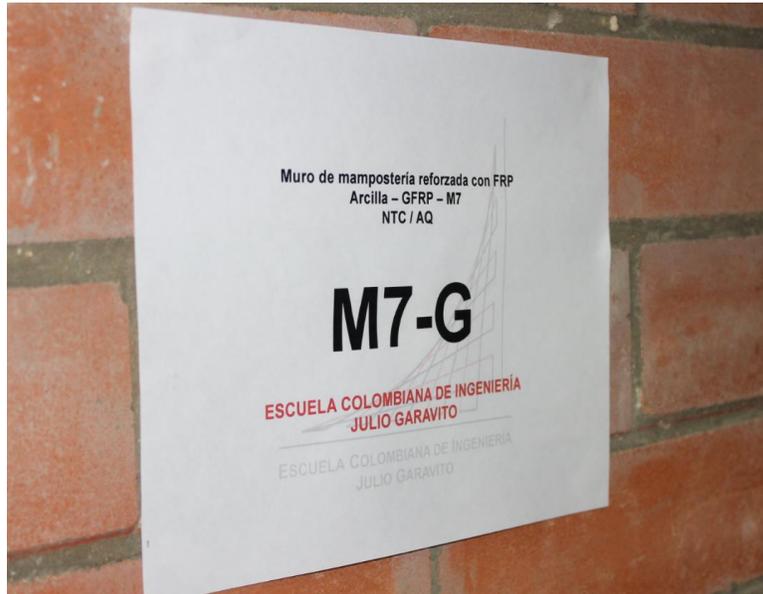
Figura 10-33 Curva de momento contra deformación muro M7-G. Fuente: el autor

En la Tabla 10-35 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-35 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M7-G. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M7-G        |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 1689   | kg    |
| Deformación máxima               | 81     | mm    |
| Momento máximo                   | 5,71   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0109 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0015 | mm/mm |

En la Figura 10-34 se presenta el ensayo del muro M7-G



1.) Montaje del muro M7-G



2.) Falla por separación entre ladrillos



3.) Deformada del muro M7-G

Figura 10-34 Ensayo muro M7-G. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M8-C

En la Figura 10-35 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

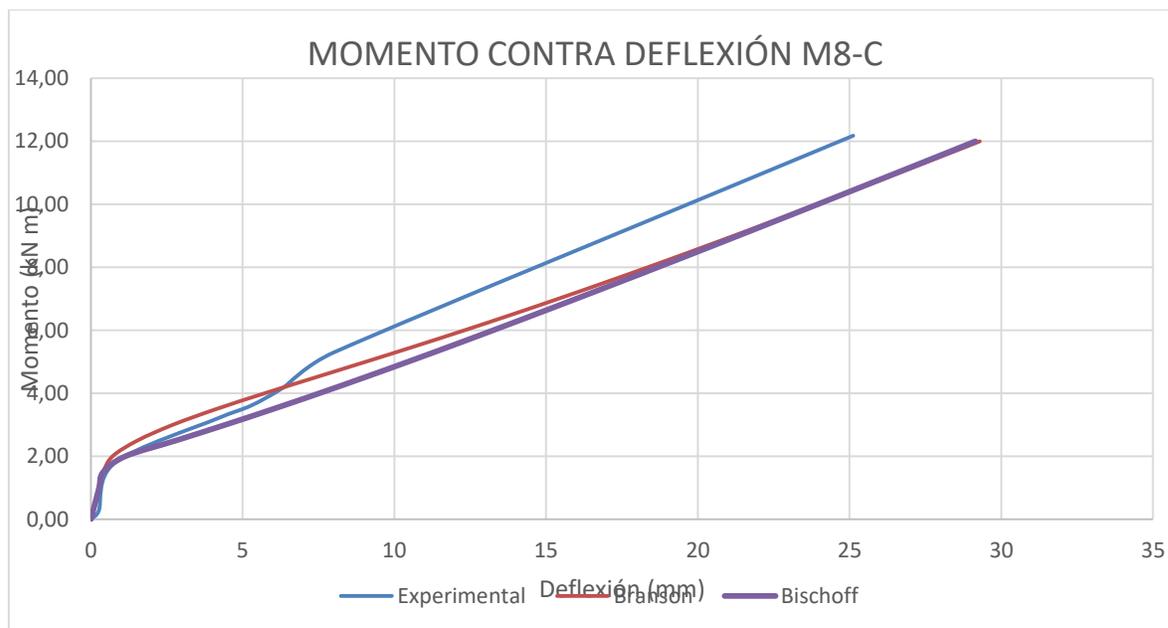


Figura 10-35 Curva de momento contra deformación muro M8-C. Fuente: el autor

En la Tabla 10-36 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-36 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M8-C. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M8-C        |         |       |
|----------------------------------|---------|-------|
| Carga máxima                     | 6200    | kg    |
| Deformación máxima               | 47,95   | mm    |
| Momento máximo                   | 20,98   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,00495 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,00055 | mm/mm |

En la Figura 10-36 se presenta el ensayo del muro M8-C



1.) Montaje del muro M8-C



2.) Falla por separación entre ladrillos



3.) Falla del muro M8-C

Figura 10-36 Ensayo muro M8-C. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M9-C

En la Figura 10-37 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

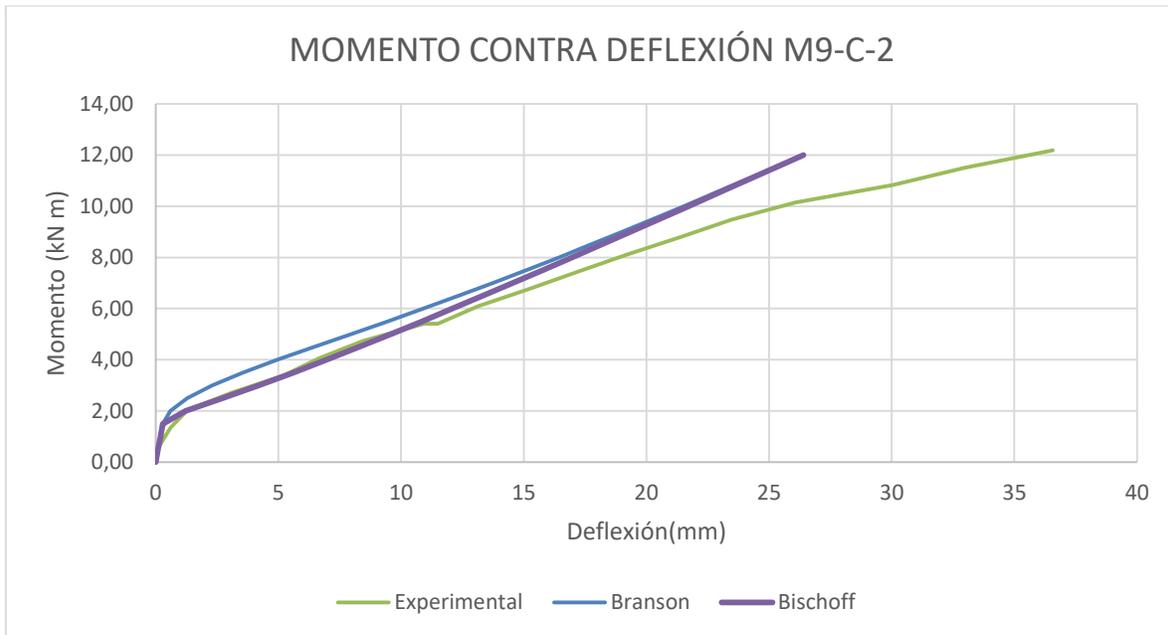


Figura 10-37 Curva de momento contra deformación muro M9-C. Fuente: el autor

En la Tabla 10-37 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-37 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M9-C. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M9-C ensayo 1 |        |       |
|------------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                       | 2013   | kg    |
| Deformación máxima                 | 39     | mm    |
| Momento máximo                     | 15,47  | kN m  |
| Deformación unitaria FRP           | 0,0021 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería   | 0,0003 | mm/mm |

En la Figura 10-38 se presenta el ensayo del muro M9-C



1.) Fisuras en la cara de tensión del muro M9-C

Figura 10-38 Ensayo muro M9-C. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación de los ladrillos de mampostería en la zona de tensión

## MURO DE MAMPOSTERÍA M10-C

En la Figura 10-39 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

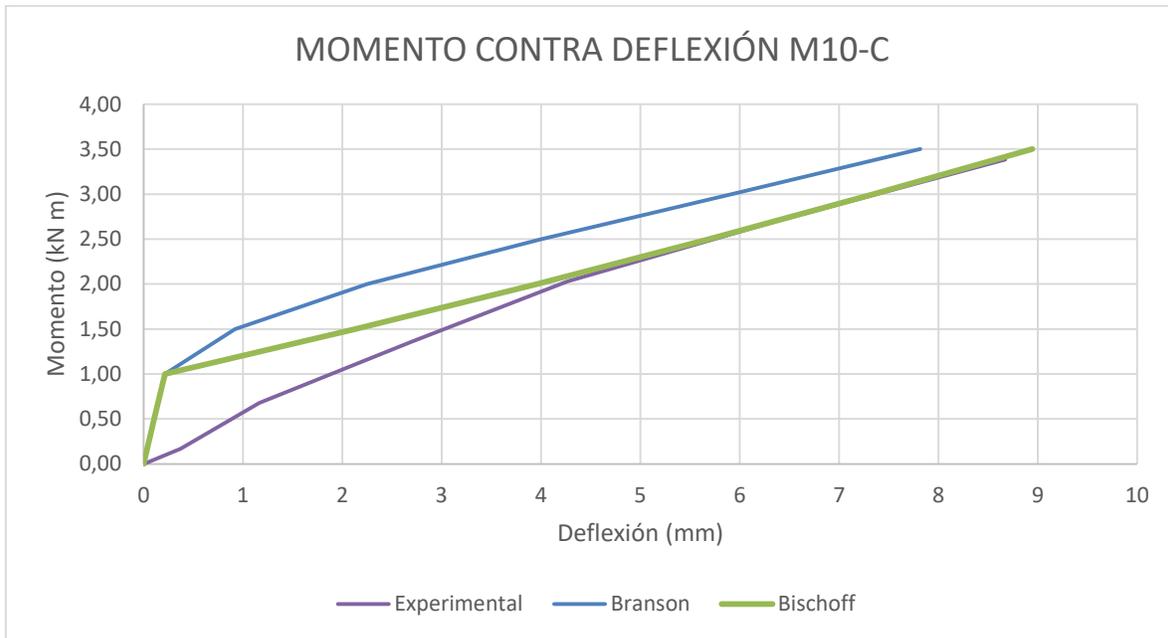


Figura 10-39 Curva de momento contra deformación muro M10-C. Fuente: el autor

En la Tabla 10-38 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-38 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M10-C. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M10-C       |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 2600   | kg    |
| Deformación máxima               | 68     | mm    |
| Momento máximo                   | 8,80   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0042 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0016 | mm/mm |

En la Figura 10-40 se presenta el ensayo del muro M10-C



1.) Perfil del muro M10-C falla por separación entre los ladrillos y el mortero de pega.

Figura 10-40 Ensayo muro M10-C. Fuente: el autor

La falla del muro por separación entre el mortero de pegas y los ladrillos.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M11-C

En la Figura 10-41 se presenta la gráfica de carga contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

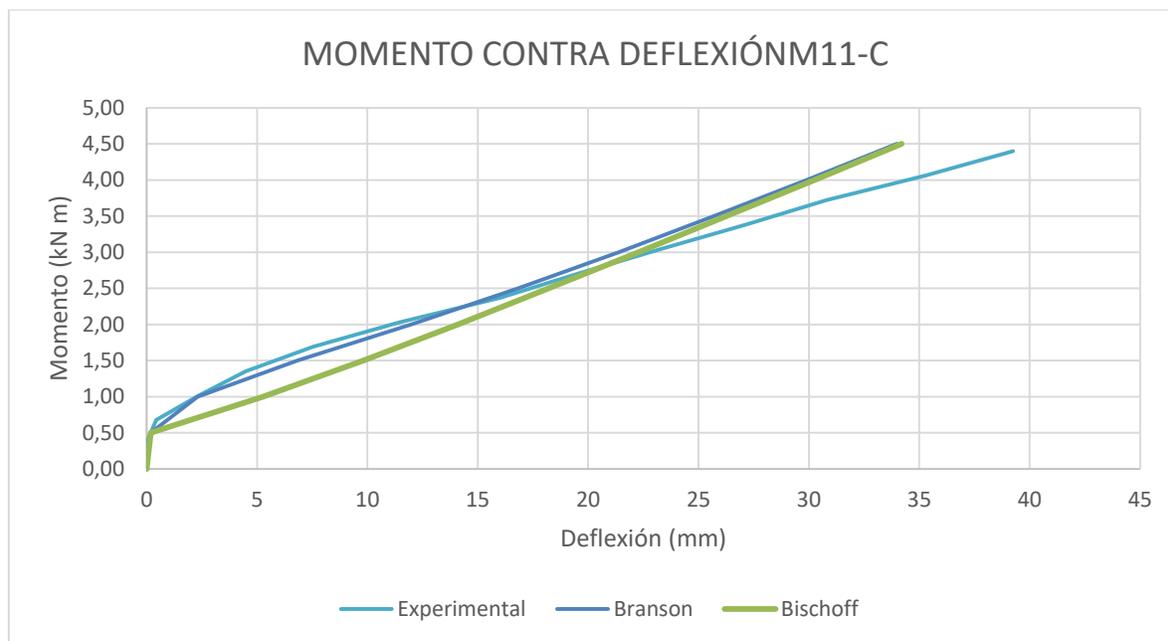


Figura 10-41 Curva de momento contra deformación muro M11-C. Fuente: el autor

En la Tabla 10-39 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-39 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M11-C. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M11-C       |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 1467   | kg    |
| Deformación máxima               | 48     | mm    |
| Momento máximo                   | 4,96   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0040 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0019 | mm/mm |

En la Figura 10-42 se presenta el ensayo del muro M11-C



1.) Montaje del muro M11-C



2.) Deformada del muro M11-C.



3.) Deformada del muro M11-C



#### 4.) Fisuras muro M11-C

Figura 10-42 Ensayo muro M11-C. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación entre el mortero de pega y los ladrillos.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M12-C

En la Figura 10-43 se presenta la gráfica de carga contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

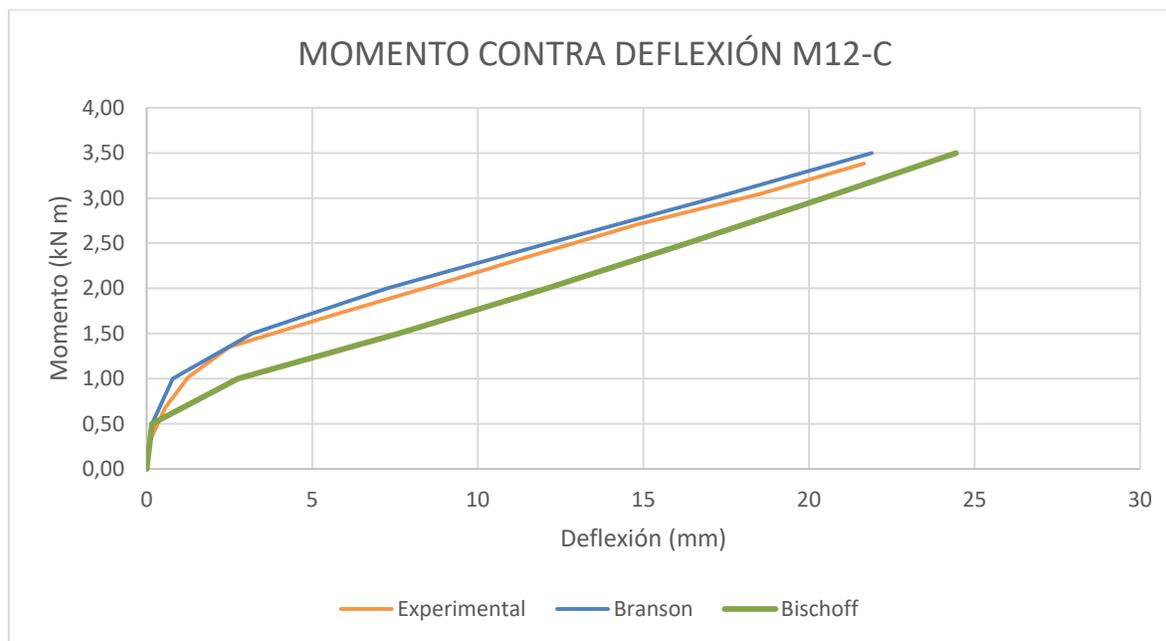


Figura 10-43 Curva de momento contra deformación muro M12-C. Fuente: el autor

En la Tabla 10-40 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-40 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M12-C. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M12-C       |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 1198   | kg    |
| Deformación máxima               | 27     | mm    |
| Momento máximo                   | 4,05   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0030 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0007 | mm/mm |

En la Figura 10-44 se presenta el ensayo del muro M12-C



1.) Montaje del muro M12-C



2.) Falla por separación del mortero de pega con el ladrillo del muro  
M12-C.vista de perfil



3.) Falla por separación del mortero de pega con el ladrillo del muro M12-C.vista posterior

Figura 10-44 Ensayo muro M12-C. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación entre el mortero de pega y los ladrillos.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M13-C

En la Figura 10-45 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

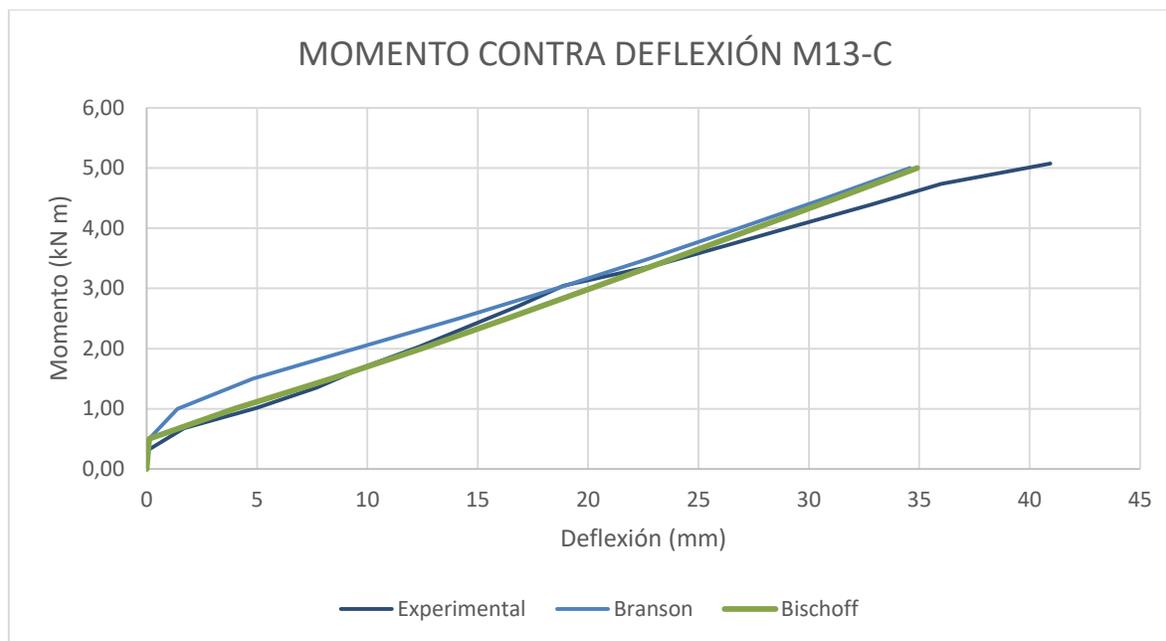


Figura 10-45 Curva de momento contra deformación muro M13-C. Fuente: el autor

En la Tabla 10-41 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-41 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M13-C. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M13-C       |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 1743   | kg    |
| Deformación máxima               | 55     | mm    |
| Momento máximo                   | 5,90   | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0060 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0010 | mm/mm |

En la Figura 10-46 se presenta el ensayo del muro M13-C



1.) Montaje del muro M13-C



2.) Fisuras en la cara de compresión del muro M13-C.



3.) Falla por separación del mortero de pega con el ladrillo del muro M13-C.vista posterior

Figura 10-46 Ensayo muro M13-C. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por separación entre el mortero de pega y los ladrillos.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M15-S

En la Figura 10-47 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

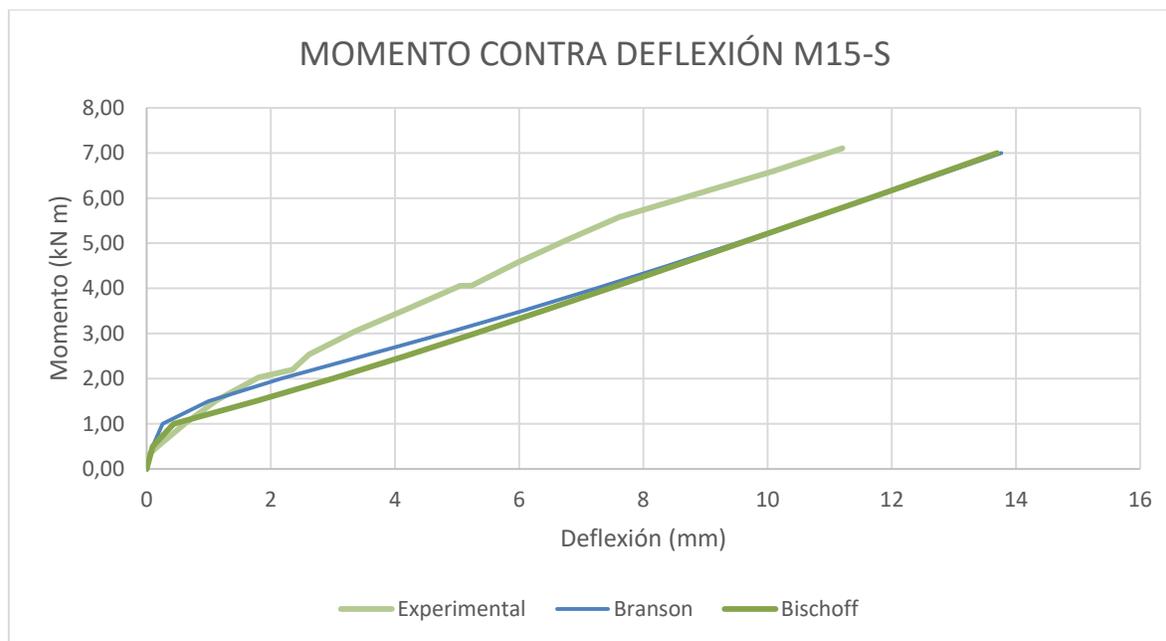


Figura 10-47 Curva de momento contra deformación muro M15-S. Fuente: el autor

En la Tabla 10-42 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-42 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M15-S. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M15-S       |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 4597   | kg    |
| Deformación máxima               | 50     | mm    |
| Momento máximo                   | 15,55  | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0032 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0012 | mm/mm |

En la Figura 10-48 se presenta el ensayo del muro M15-S



1.) Montaje del muro M15-S



2.) Fisuras en la cara de tensión del muro M15-S.



3.) Deformada bajo carga del muro M15-S.

Figura 10-48 Ensayo muro M15-S. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por fluencia en el acero.

## MURO DE MAMPOSTERÍA M16-S

En la Figura 10-49 se presenta la gráfica de momento contra deformación de todos los ciclos de carga, también se presentan las tres curvas, la experimental y las dos curvas teóricas, metodología de Branson y la de Bischoff.

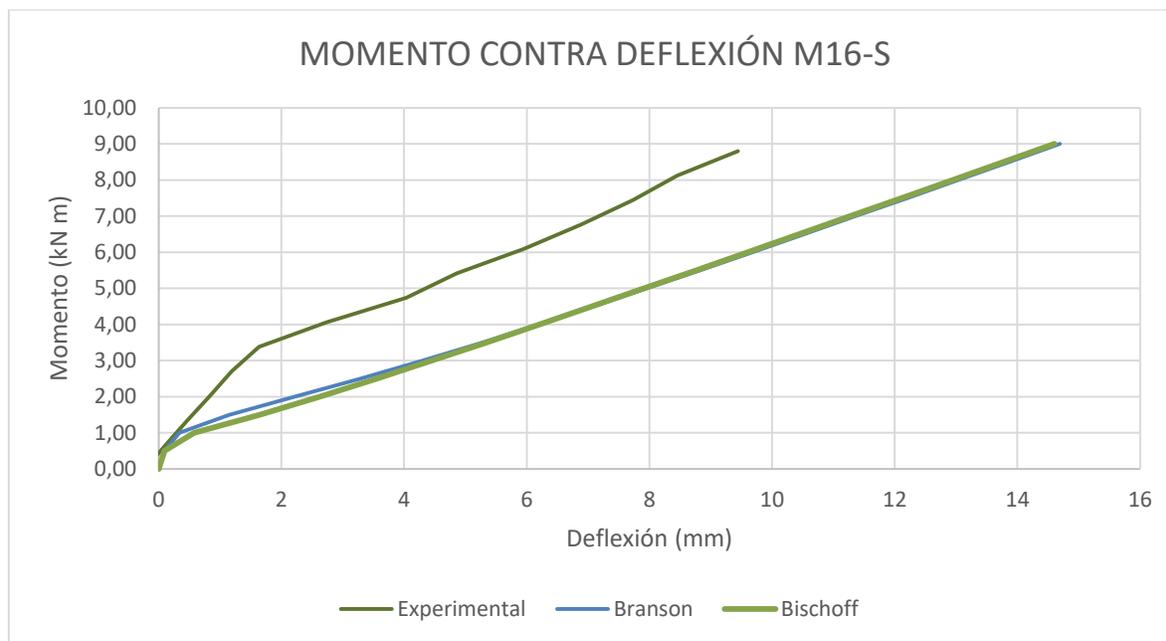


Figura 10-49 Curva de momento contra deformación muro M16-S. Fuente: el autor

En la Tabla 10-43 se presentan los resultados máximos que se alcanzaron en el ensayo en cuanto a deformaciones, cargas y momentos

Tabla 10-43 Valores máximos obtenidos de las gráficas muro M16-S. Fuente: el autor

| Valores máximos muro M16-S       |        |       |
|----------------------------------|--------|-------|
| Carga máxima                     | 6885   | kg    |
| Deformación máxima               | 45     | mm    |
| Momento máximo                   | 23,29  | kN m  |
| Deformación unitaria FRP         | 0,0048 | mm/mm |
| Deformación unitaria Mampostería | 0,0029 | mm/mm |

En la Figura 10-50 se presenta el ensayo del muro M16-S



1.) Montaje del muro M16-S



2.) Fisuras en la cara de tensión del muro M16-S.



3.) Deformada bajo carga del muro M16-S.

Figura 10-50 Ensayo muro M16-S. Fuente: el autor

La falla del muro ocurrió por fluencia en el acero.