



Santiago de Cali, 14 de octubre de 2014.

Señor

GUSTAVO MOLINA V.

Gerente Comercial

Cartontubos S.A.S.

Calle 13 # 27B-41 Bl. 8 Bodega 22

Cali

Asunto: Entrega de ensayos de laboratorio

Por medio de este documento se hace entrega de los resultados de los ensayos de Compresión axial, efectuados sobre 6 muestras cilíndricas de cartón, con las referencias que se citan a seguir:

| Muestras ensayadas | Referencia | Unidades |
|---------------------------|-------------------|-----------------|
| 3 | 305x152.4x4 | mm |
| 3 | 406x203.2x5 | mm |

Los resultados de estos ensayos serán empleados en la simulación numérica del comportamiento mecánico del material a escala real.

Atentamente,

IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE

Coordinador Laboratorio de Ingeniería Civil

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Facultad de Ingeniería

Extensión 8355

Facultad de Ingeniería



ENSAYOS DE COMPRESIÓN AXIAL

Los Ensayos de compresión axial se efectuaron en una prensa universal WAW-1000D con capacidad de 1000kN (ver Figura 1). Las muestras fueron ensayadas a compresión axial a una velocidad de 3.0 mm/min para la referencia 305x152.4x4, y a 4.0 mm/min en la referencia 406x203.2x5 llevándolas a una deformación equivalente al 10% de la longitud de la muestra. La Figura 2, muestra de forma detallada el montaje de la muestra en el equipo.

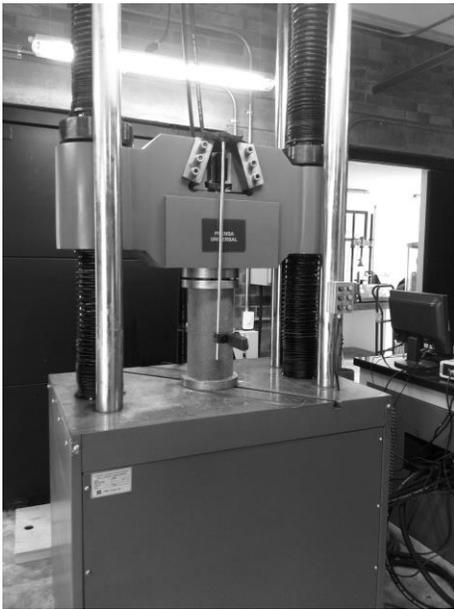


Figura 1. Prensa empleada en los ensayos

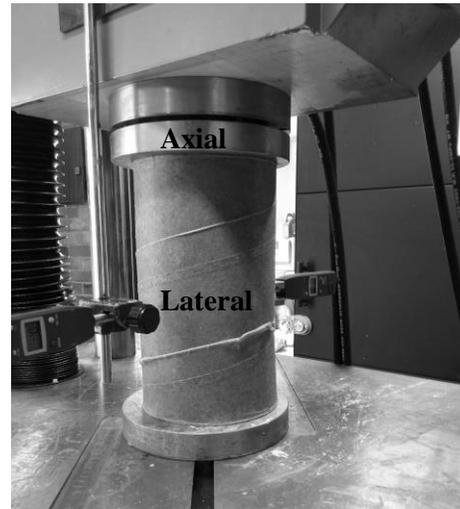


Figura 2. Detalle del montaje del ensayo de compresión axial

A fin de caracterizar de forma detallada las deformaciones laterales generadas por la fuerza de compresión aplicada sobre la muestra, se instalaron dos medidores de desplazamiento digitales como se observa en la Figura 2, sin embargo los datos obtenidos para medir este parámetro no fueron consistentes y por tanto no se presentan en este informe. La deformación axial del espécimen fue medida directamente a través del LVDT ubicado en la celda de carga del equipo.

A continuación se presentan los datos de las muestras ensayadas así como los resultados obtenidos a partir de los ensayos de compresión axial efectuados.



COMPRESIÓN AXIAL SOBRE MUESTRAS DE LA REFERENCIA 305x152.4x4

Identificación de la muestra: ECA-M1

Tabla 1. Datos de la muestra M1

| | 1 | 2 | 3 | Media |
|-------------------------|----------|--------|--------|---------|
| Altura (mm) | 300.40 | 300.40 | 300.40 | 300.40 |
| Diámetro exterior (mm) | 160.75 | 161.50 | 161.50 | 161.25 |
| Diámetro interior (mm) | 151.30 | 152.40 | 152.20 | 151.97 |
| Espesor (mm) | 4.90 | 4.60 | 4.50 | 4.67 |
| Peso (g) | 527.50 | | | 527.50 |
| Área (mm ²) | 2300.000 | | | 2300.00 |

Tabla 2. Datos del ensayo

| Tiempo (s) | Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|------------|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00230 | 0.00 | 0.00 |
| 30.00 | 0.50 | 5.79 | 1.50 | 0.00231 | 2.50 | 0.50 |
| 60.00 | 1.00 | 6.00 | 3.00 | 0.00232 | 2.58 | 1.00 |
| 90.00 | 1.50 | 6.04 | 4.50 | 0.00233 | 2.59 | 1.50 |
| 120.00 | 2.00 | 4.12 | 6.00 | 0.00235 | 1.76 | 2.00 |
| 150.00 | 2.50 | 3.10 | 7.50 | 0.00236 | 1.31 | 2.50 |
| 180.00 | 3.00 | 2.49 | 9.00 | 0.00237 | 1.05 | 3.00 |
| 210.00 | 3.50 | 2.46 | 10.50 | 0.00238 | 1.03 | 3.50 |
| 240.00 | 4.00 | 2.47 | 12.00 | 0.00240 | 1.03 | 4.00 |
| 270.00 | 4.50 | 2.57 | 13.50 | 0.00241 | 1.07 | 4.50 |
| 300.00 | 5.00 | 2.72 | 15.00 | 0.00242 | 1.12 | 4.99 |
| 330.00 | 5.50 | 2.79 | 16.50 | 0.00243 | 1.15 | 5.49 |
| 360.00 | 6.00 | 2.80 | 18.00 | 0.00245 | 1.14 | 5.99 |
| 390.00 | 6.50 | 3.12 | 19.51 | 0.00246 | 1.27 | 6.49 |
| 420.00 | 7.00 | 3.39 | 21.01 | 0.00247 | 1.37 | 6.99 |
| 450.00 | 7.50 | 3.76 | 22.51 | 0.00249 | 1.51 | 7.49 |
| 480.00 | 8.00 | 3.74 | 24.01 | 0.00250 | 1.50 | 7.99 |
| 509.99 | 8.50 | 3.26 | 25.51 | 0.00251 | 1.30 | 8.49 |
| 540.00 | 9.00 | 2.79 | 27.01 | 0.00253 | 1.10 | 8.99 |
| 570.00 | 9.50 | 2.22 | 28.51 | 0.00254 | 0.87 | 9.49 |
| 600.00 | 10.00 | 1.66 | 29.94 | 0.00255 | 0.65 | 9.97 |

Facultad de Ingeniería



Resultados gráficos

La Figura 3, presenta la curva esfuerzo deformación axial de la muestra ECA-M1. En esta figura es posible observar un incremento lineal de la tensión y la deformación al inicio de la curva. Luego al llegar a 0.5% de deformación aparece un primer pico de tensión seguido de dos más de la misma magnitud. Estos picos se relacionan con la ruptura de las capas que componen el material. Debido a que durante la fabricación del tubo las fibras de cartón se superponen, no se espera una ruptura súbita y si varios picos de ruptura a medida que se vence la resistencia del material. Este fenómeno se observa de forma clara en la Figura 3.

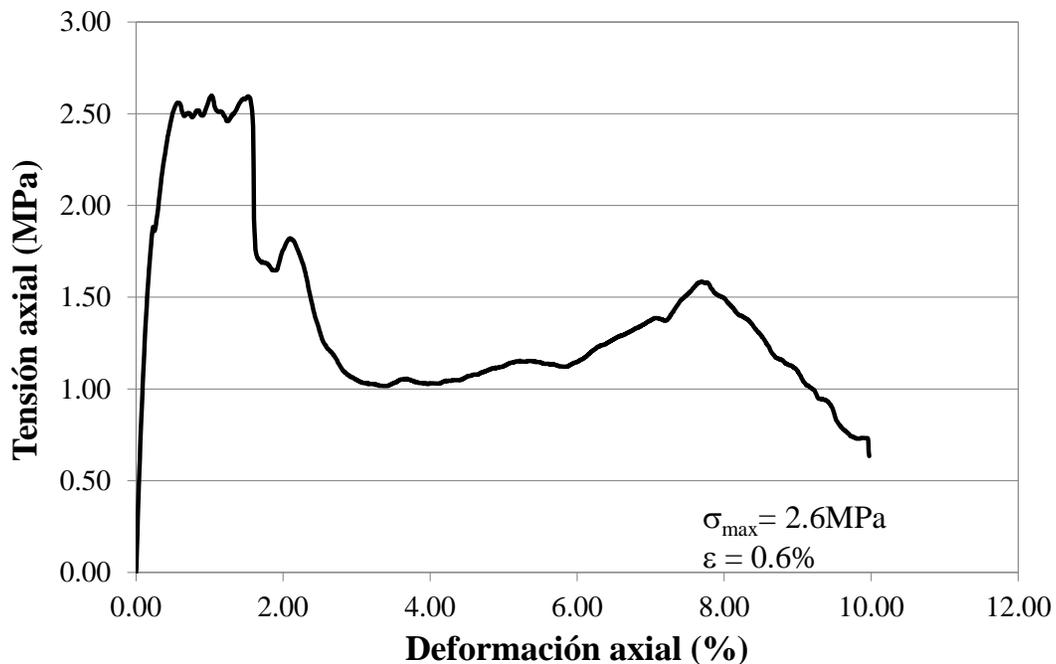


Figura 3. Curva Esfuerzo vs. Deformación, muestra ECA-M1

La resistencia a la compresión axial máxima alcanzada para esta muestra fue de 2.6 MPa equivalentes a 26.5 kgf/cm². La deformación unitaria correspondiente a la tensión máxima alcanzada fue de 2.5%. La muestra se llevó a una deformación del 10% de la altura de la muestra y



otros picos de resistencia fueron observados, como consecuencia de la ruptura de las fibras antes mencionadas, sin embargo la resistencia a compresión de los mismos fue menor al pico inicial, evidenciando la ruptura y consecuente pérdida de resistencia del cuerpo de prueba.

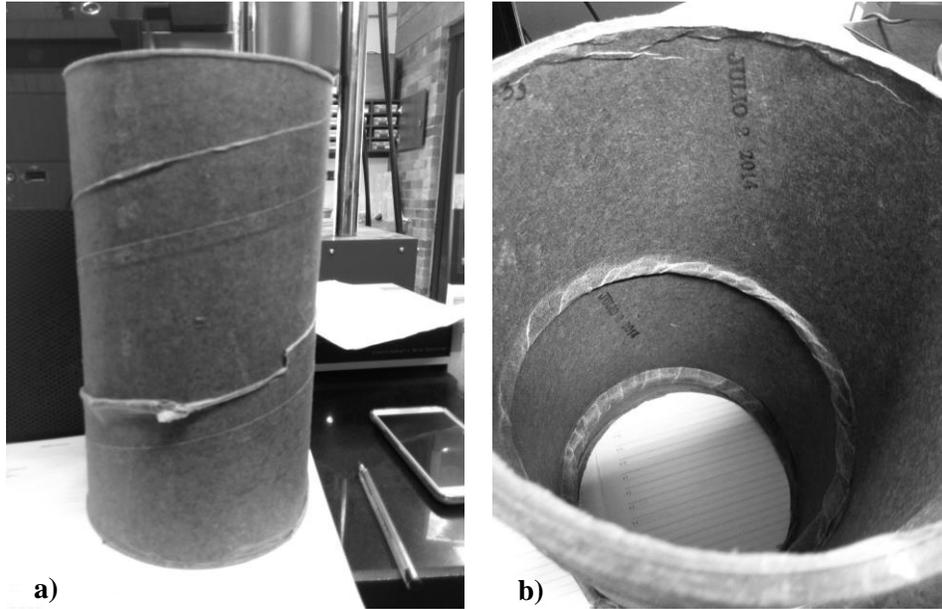


Figura 4. Cuerpo de prueba después del ensayo: a) Superposición de fibras en el exterior del tubo de ensayo; b) superposición de fibras en el interior

Identificación de la muestra: ECA-M3

Tabla 3. Datos de la muestra M3

| | 1 | 2 | 3 | Media |
|-------------------------|---------|--------|--------|---------|
| Altura (mm) | 300.40 | 300.40 | 300.40 | 300.40 |
| Diámetro exterior (mm) | 161.7 | 160.30 | 160.30 | 160.77 |
| Diámetro interior (mm) | 152.40 | 152.20 | 152.30 | 152.30 |
| Espesor (mm) | 4.70 | 4.60 | 4.70 | 4.67 |
| Peso (g) | 523.30 | | | 523.30 |
| Área (mm ²) | 2274.00 | | | 2274.00 |



[Tabla 4. Datos del ensayo

| Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|--------------|-------------|---------------------|------------------------|---------------|-----------------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.002274 | 0.00 | 0.00 |
| 0.51 | 0.19 | 1.52 | 0.002274 | 0.08 | 0.00 |
| 1.00 | 4.04 | 3.00 | 0.002283 | 1.77 | 0.40 |
| 1.50 | 9.08 | 4.50 | 0.002295 | 3.96 | 0.90 |
| 2.00 | 9.85 | 6.00 | 0.002306 | 4.27 | 1.40 |
| 2.50 | 10.24 | 7.51 | 0.002318 | 4.42 | 1.90 |
| 3.00 | 8.59 | 9.01 | 0.002330 | 3.69 | 2.40 |
| 3.50 | 8.39 | 10.51 | 0.002342 | 3.58 | 2.90 |
| 4.00 | 7.62 | 12.01 | 0.002354 | 3.24 | 3.40 |
| 4.50 | 7.55 | 13.51 | 0.002366 | 3.19 | 3.90 |
| 5.00 | 7.50 | 15.01 | 0.002379 | 3.15 | 4.40 |
| 5.50 | 7.56 | 16.51 | 0.002391 | 3.16 | 4.90 |
| 6.00 | 7.63 | 18.01 | 0.002404 | 3.17 | 5.40 |
| 6.50 | 7.80 | 19.51 | 0.002416 | 3.23 | 5.89 |
| 7.00 | 7.88 | 21.01 | 0.002429 | 3.24 | 6.39 |
| 7.50 | 7.67 | 22.51 | 0.002442 | 3.14 | 6.89 |
| 8.00 | 7.87 | 24.01 | 0.002456 | 3.20 | 7.39 |
| 8.50 | 8.23 | 25.51 | 0.002469 | 3.33 | 7.89 |
| 9.00 | 8.24 | 27.01 | 0.002482 | 3.32 | 8.39 |
| 9.50 | 8.21 | 28.51 | 0.002496 | 3.29 | 8.89 |
| 9.67 | 8.24 | 29.01 | 0.002501 | 3.30 | 9.06 |

Resultados gráficos

Los resultados muestran que en el caso de la muestra 3, la ruptura se presenta a una deformación de 0.7% bajo una tensión igual a 4.4 MPa equivalentes a 44.9 kgf/cm². La tensión máxima alcanzada se presentó en 2.0% de deformación con una tensión de 4.5 MPa. La Figura 5, presenta el comportamiento tensión – deformación de la muestra ensayada. El inicio de la curva es una línea recta, que muestra el comportamiento elástico del material, esta línea termina en un pico que evidencia una ruptura inicial de las fibras de cartón que componen el tubo. Otros picos de menor



resistencia se evidencian a lo largo del ensayo. La deformación en la muestra se llevó hasta el 10% en relación a la altura del espécimen fallado.

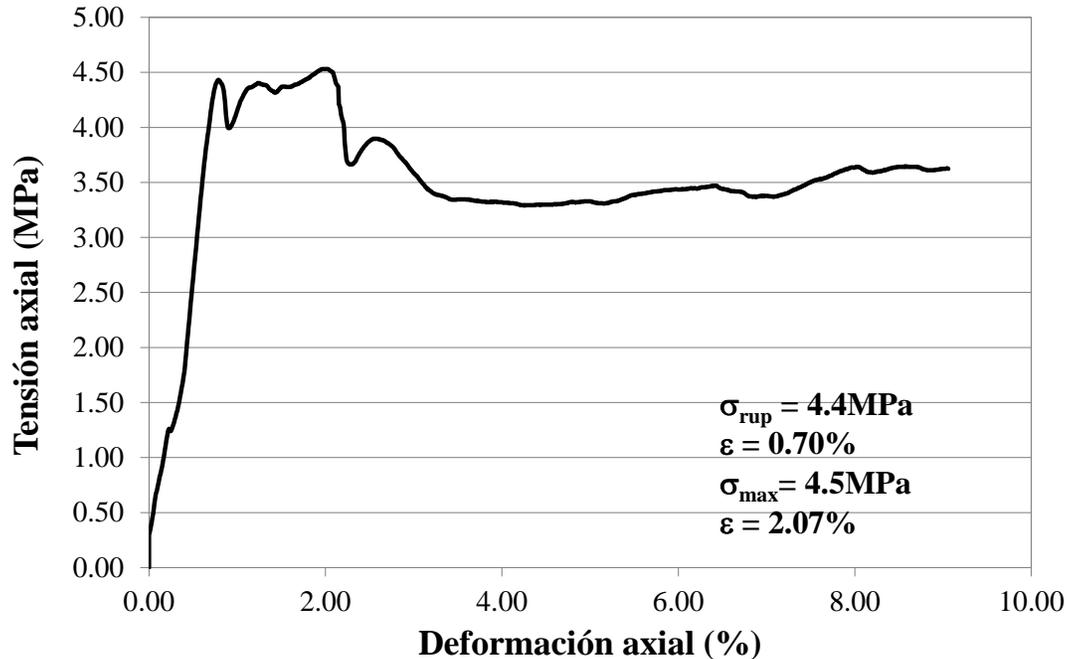


Figura 5. Curvas Esfuerzo vs. Deformación, muestra ECA-M3

La Figura 6, muestra el cuerpo de prueba al final del ensayo de compresión axial, es evidente la deformación y consecuente ruptura del material. Además se observa claramente la superposición de fibras de cartón que generan los diferentes picos de ruptura expuestos anteriormente.

Es de anotar que la resistencia a la compresión axial alcanzada por ese espécimen es superior en un 50% a la primera muestra ensayada, para concluir sobre este resultado, una tercera muestra con las mismas condiciones fue ensayada y sus resultados serán presentados a continuación.



Figura 6. Cuerpo de prueba después del ensayo: a) Superposición de fibras en el exterior del tubo de ensayo; b) superposición de fibras en el interior

Identificación de la muestra: ECA-M4

Tabla 5. Datos de la muestra M4

| | 1 | 2 | 3 | Media |
|-------------------------------|----------|----------|----------|--------------|
| Altura (mm) | 300.40 | 300.40 | 300.40 | 300.40 |
| Diámetro exterior (mm) | 161.01 | 161.01 | 161.01 | 161.01 |
| Diámetro interior (mm) | 156.23 | 156.23 | 156.23 | 156.23 |
| Espesor (mm) | 4.78 | 4.78 | 4.78 | 4.78 |
| Peso (g) | 523.30 | | | 523.30 |
| Área (mm²) | 2346.080 | | | 2346.08 |

Tabla 6. Datos del ensayo

| Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|---------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00235 | 0.00 | 0.00 |
| 0.50 | 0.04 | 1.35 | 0.00235 | 0.02 | 0.00 |
| 1.00 | 0.57 | 2.85 | 0.00235 | 0.24 | 0.10 |
| 1.50 | 4.60 | 4.36 | 0.00236 | 1.96 | 0.60 |

Facultad de Ingeniería



| Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 2.00 | 9.48 | 5.86 | 0.00237 | 4.04 | 1.10 |
| 2.50 | 9.81 | 7.36 | 0.00238 | 4.18 | 1.60 |
| 3.00 | 10.25 | 8.86 | 0.00240 | 4.37 | 2.10 |
| 3.50 | 9.50 | 10.36 | 0.00241 | 4.05 | 2.60 |
| 4.00 | 8.72 | 11.86 | 0.00242 | 3.72 | 3.10 |
| 4.50 | 8.80 | 13.36 | 0.00243 | 3.75 | 3.60 |
| 5.00 | 9.09 | 14.86 | 0.00245 | 3.87 | 4.10 |
| 5.50 | 9.27 | 16.36 | 0.00246 | 3.95 | 4.60 |
| 6.00 | 9.10 | 17.86 | 0.00247 | 3.88 | 5.09 |
| 6.50 | 8.91 | 19.36 | 0.00249 | 3.80 | 5.59 |
| 7.00 | 8.14 | 20.86 | 0.00250 | 3.47 | 6.09 |
| 7.50 | 7.57 | 22.36 | 0.00251 | 3.23 | 6.59 |
| 8.00 | 7.08 | 23.86 | 0.00253 | 3.02 | 7.09 |
| 8.50 | 6.89 | 25.36 | 0.00254 | 2.94 | 7.59 |
| 9.00 | 7.21 | 26.86 | 0.00255 | 3.07 | 8.09 |
| 9.50 | 7.46 | 28.36 | 0.00257 | 3.18 | 8.59 |
| 9.91 | 7.75 | 29.58 | 0.00258 | 3.30 | 9.00 |

Resultados gráficos

La Figura 7, presenta los resultados gráficos del ensayo de compresión axial efectuados sobre la muestra M4. Es posible observar que el comportamiento del cuerpo de prueba es muy similar al de la muestra M3, en cuanto a los valores de tensión máxima alcanzados en el instante de la ruptura. La deformación total alcanzada por la muestra equivale al 10% de la longitud de la misma, la ruptura se alcanzó en el 1.0% de deformación alcanzando una tensión de ruptura igual a 4.5 MPa, lo que equivale a 45.9 kgf/cm². Igual que lo sucedido con las muestras M1 y M3, la ruptura del cuerpo de prueba evidencia diferentes picos, asociados a los desplazamientos de las fibras de cartón que se superponen durante el proceso de manufactura. La Figura 8, presenta la deformación durante el ensayo, allí se hace evidente la superposición de las fibras en el traslapo del cartón.

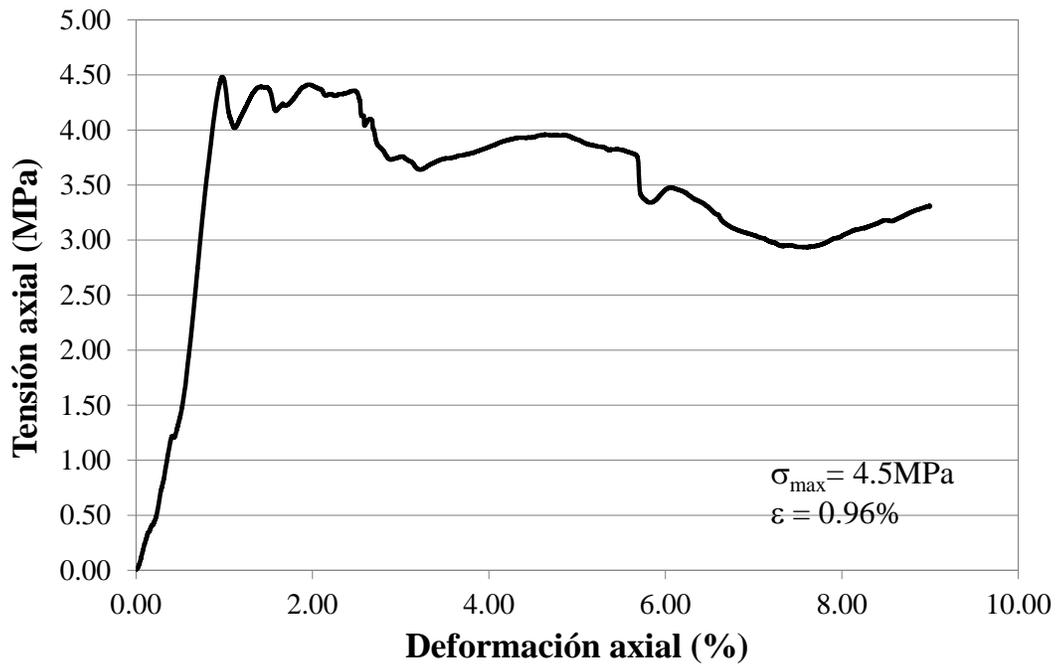


Figura 7. Curvas Esfuerzo vs. Deformación, muestra ECA-M4



Figura 8. Cuerpo de prueba después del ensayo



Como se mencionó anteriormente, la muestra M1 se rompió cuando alcanzó una tensión igual a 2.6 MPa. Los cuerpos de prueba M3 y M4 rompieron en tensiones superiores a este valor: 4.4 MPa y 4.5 MPa respectivamente. Por esta razón se concluye que la muestra M1 es atípica y no se debe tener en cuenta para generar conclusiones en el transcurso de la simulación numérica. La Figura 9, presenta las curvas tensión-deformación para la tres muestras ensayadas. En ella se ve claramente que las muestras M3 y M4 tienen el mismo comportamiento en relación a su tensión de ruptura y la deformación asociada, mientras que la muestra M1, rompió en una tensión 50% menor.

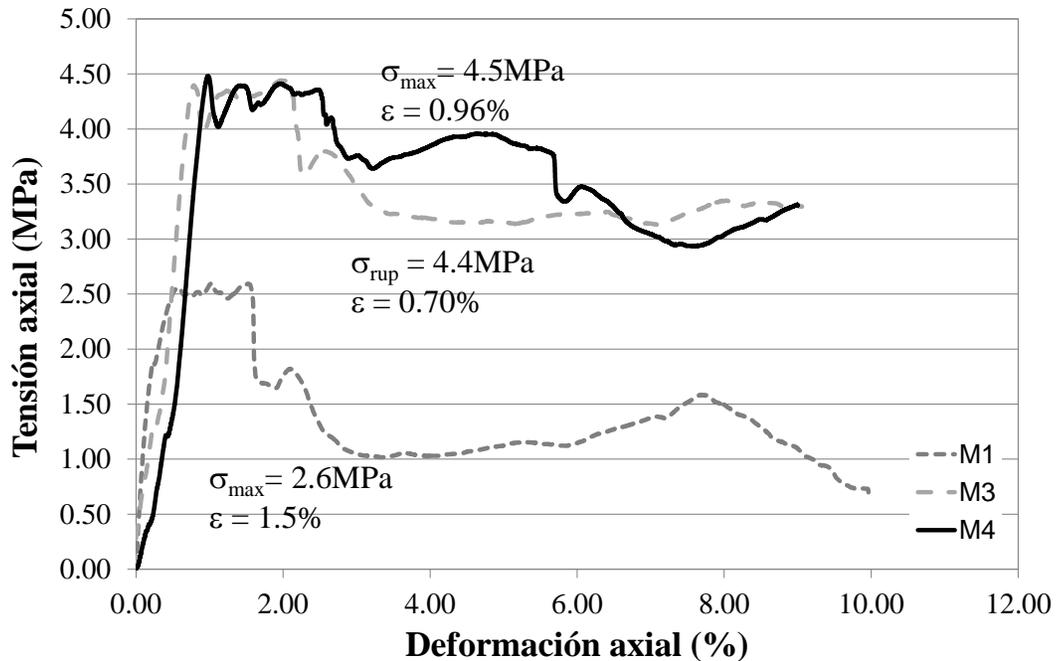


Figura 9. Comparación de las curvas Tensión – Deformación obtenidas para los diferentes ensayos ECA aplicados en la referencia 305x152.4x4



COMPRESIÓN AXIAL SOBRE MUESTRAS DE LA REFERENCIA 406x203.2x5

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a la referencia 406x203.2x5. Esos datos fueron entregados por el fabricante de las muestras y corresponden a la altura, diámetro interior y espesor de las mismas. Un total de 3 muestras identificadas de esta forma fueron ensayadas en el laboratorio de Mezclas de la Pontificia Universidad Javeriana. La aplicación de la carga se hizo proporcional a la altura total de la muestra, deformando 4.00 mm/min, hasta alcanzar 10% de deformación. A continuación se presentan los datos obtenidos de estos ensayos.

Identificación de la muestra: ECAG-M3

Los datos que se presentan a continuación, pertenecen a la muestra M3, este cuerpo de prueba fue el primero en ensayarse y por tal motivo la aplicación de la carga se hizo a una velocidad igual a 3.00 mm/min, posterior a los resultados obtenidos en este ensayo, se decidió hacer el ensayo con la velocidad a la que se hace referencia en el párrafo anterior. Los datos iniciales de la muestra se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos de la muestra M3

| | Datos de la muestra | | | Promedio |
|-------------------------|---------------------|--------|--------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | Media |
| Altura (mm) | 400.40 | 400.40 | 400.40 | 400.40 |
| Diámetro exterior (mm) | 206.85 | 206.50 | 206.20 | 206.52 |
| Diámetro interior (mm) | 203.60 | 203.35 | 203.15 | 203.37 |
| Espesor (mm) | 4.75 | 5.20 | 4.60 | 4.85 |
| Peso (g) | 941.50 | | | 941.50 |
| Área (mm ²) | 3162.960 | | | 3162.96 |

Tabla 8. Datos del ensayo

| Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.003163 | 0.00 | 0.00 |
| 0.50 | 11.97 | 2.14 | 0.003180 | 3.76 | 0.52 |
| 1.00 | 13.85 | 4.64 | 0.003200 | 4.33 | 1.15 |

Facultad de Ingeniería



| Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 1.50 | 12.54 | 7.15 | 0.003220 | 3.89 | 1.77 |
| 2.00 | 13.50 | 9.65 | 0.003241 | 4.17 | 2.40 |
| 2.50 | 12.55 | 12.15 | 0.003261 | 3.85 | 3.02 |
| 3.00 | 10.83 | 14.65 | 0.003283 | 3.30 | 3.65 |
| 3.50 | 11.51 | 17.15 | 0.003304 | 3.48 | 4.27 |
| 4.00 | 11.84 | 19.65 | 0.003326 | 3.56 | 4.89 |
| 4.50 | 11.41 | 22.15 | 0.003348 | 3.41 | 5.52 |
| 5.00 | 10.04 | 24.65 | 0.003370 | 2.98 | 6.14 |
| 5.50 | 10.46 | 27.15 | 0.003393 | 3.08 | 6.77 |
| 5.61 | 10.45 | 27.73 | 0.003398 | 3.08 | 6.91 |

Resultados gráficos

La deformación total alcanzada durante el ensayo fue 7.0% aproximadamente. La muestra ensayada es de mayor diámetro y altura a las presentadas al inicio de este informe. Sin embargo, el comportamiento del tubo en relación a la curva tensión vs. deformación es similar al de las muestras anteriormente citadas. La Figura 10, presenta la curva esfuerzo – deformación de la muestra M3, en esta figura se observa cómo el cuerpo de prueba llega rápidamente a la ruptura la cual tiene un valor de aproximadamente 4.0 MPa, equivalentes a 40.0 kgf/cm², para una deformación de 0.6%. Posterior a este primer pico de rotura, se encuentran otros con aproximadamente 4.5 MPa de resistencia, y otros por debajo de este valor. Es de anotar que en ninguno de los casos se presentó una ruptura súbita, por el contrario, el material presenta una ruptura gradual, correspondiente con la aplicación de la carga y los picos de resistencia aparecen a medida que se van encontrando las diferentes fibras de cartón superpuestas en la fabricación del espécimen. La Figura 11 presenta la evolución de la deformación mencionada.

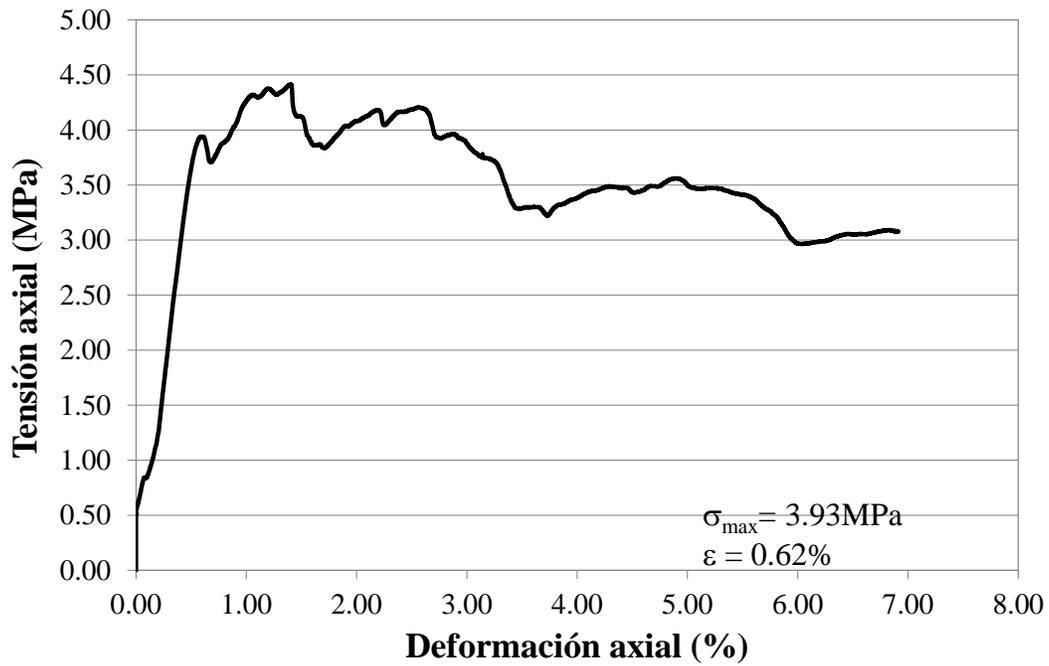


Figura 10. Curvas Esfuerzo vs. Deformación, muestra ECAG-M3



Figura 11. Deformación de la muestra M3, al finalizar el ensayo de compresión axial.



Identificación de la muestra: ECAG-M1

Reformulando la aplicación de la carga, se fallaron las probetas M1 y M2 a una velocidad igual a 4.00 mm/min. Los datos y resultados obtenidos para esta muestra se presentan a seguir:

Tabla 9. Datos de la muestra M1

| Datos de la muestra | | | | Promedio |
|-------------------------|----------|--------|--------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | Media |
| Altura (mm) | 400.80 | 400.80 | 400.90 | 400.83 |
| Diámetro exterior (mm) | 207.65 | 207.90 | 207.35 | 207.63 |
| Diámetro interior (mm) | 202.90 | 202.70 | 202.75 | 202.78 |
| Espesor (mm) | 4.75 | 5.20 | 4.60 | 4.85 |
| Peso (g) | 943.10 | | | 943.10 |
| Área (mm ²) | 3162.960 | | | 3162.96 |

Tabla 10. Datos del ensayo

| Tiempo (s) | Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|------------|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.003163 | 0.00 | 0.00 |
| 30.00 | 0.50 | 11.24 | 0.00 | 0.003163 | 3.55 | 0.00 |
| 60.00 | 1.00 | 11.76 | 1.77 | 0.003176 | 3.70 | 0.42 |
| 90.00 | 1.50 | 12.60 | 4.27 | 0.003196 | 3.94 | 1.05 |
| 120.00 | 2.00 | 11.97 | 6.77 | 0.003217 | 3.72 | 1.67 |
| 150.00 | 2.50 | 11.58 | 9.27 | 0.003237 | 3.58 | 2.30 |
| 180.00 | 3.00 | 11.12 | 11.77 | 0.003258 | 3.41 | 2.92 |
| 210.00 | 3.50 | 10.93 | 14.27 | 0.003279 | 3.33 | 3.54 |
| 240.00 | 4.00 | 10.57 | 16.77 | 0.003301 | 3.20 | 4.17 |
| 270.00 | 4.50 | 9.32 | 19.27 | 0.003322 | 2.81 | 4.79 |
| 300.00 | 5.00 | 8.94 | 21.78 | 0.003344 | 2.67 | 5.42 |
| 330.00 | 5.50 | 8.86 | 24.28 | 0.003366 | 2.63 | 6.04 |
| 360.00 | 6.00 | 8.11 | 26.78 | 0.003389 | 2.39 | 6.66 |
| 390.00 | 6.50 | 7.34 | 29.28 | 0.003412 | 2.15 | 7.29 |
| 420.00 | 7.00 | 7.17 | 31.78 | 0.003435 | 2.09 | 7.91 |
| 430.00 | 7.17 | 7.22 | 32.61 | 0.003443 | 2.10 | 8.12 |
| 450.00 | 7.50 | 7.61 | 34.28 | 0.003458 | 2.20 | 8.54 |
| 471.20 | 7.85 | 8.17 | 36.05 | 0.003475 | 2.35 | 8.98 |

Facultad de Ingeniería



Resultados gráficos

La deformación total alcanzada durante el ensayo fue aproximadamente 9.0%. El comportamiento del tubo frente a la aplicación axial de cargas es similar al presentado en la Figura 10. La Figura 12, presenta la curva esfuerzo – deformación de la muestra M1, en esta figura se observa cómo el cuerpo de prueba llega rápidamente a la ruptura la cual tiene un valor de aproximadamente 3.80 MPa, equivalentes a 38.7 kgf/cm², para una deformación de 0.2%, que es aproximadamente la misma resistencia que se observó en el primer cuerpo de prueba aunque este valor se dio en una deformación inferior a la de la muestra M3, la resistencia en la ruptura del cuerpo de prueba es consistente por lo que se garantiza la reproducibilidad del ensayo y la consistencia del comportamiento mecánico del material.

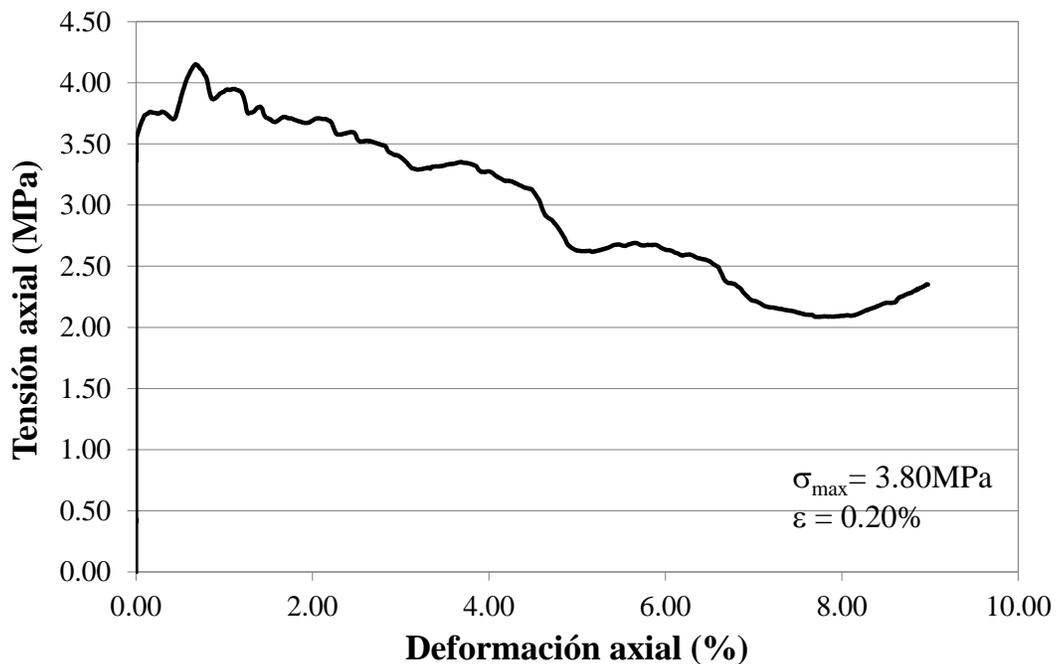


Figura 12. Curva tensión deformación para la muestra ECAG-M1

La Figura 13 presenta el estado del cuerpo de prueba después del ensayo. En este caso, además de la superposición de las fibras del cartón, se ve un aplastamiento en los bordes superior e inferior del cuerpo de prueba, esto explicaría el inicio de la curva tensión deformación, de la Figura 12.

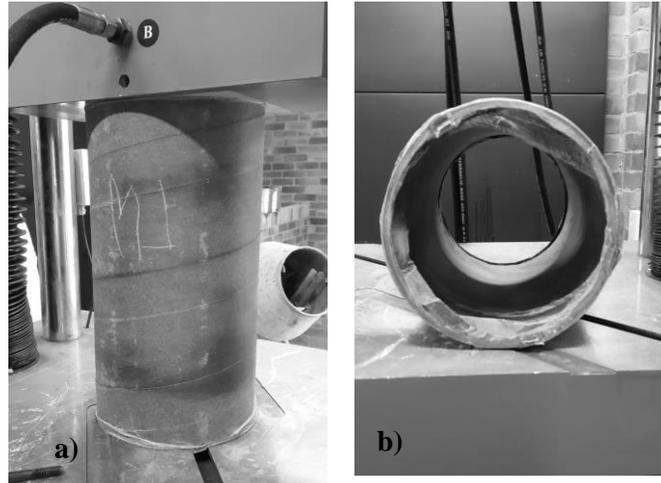


Figura 13. Cuerpo de prueba después del ensayo: a) Superposición de fibras en el exterior del tubo de ensayo; b) Deformación en la parte inferior del tubo

Identificación de la muestra: ECAG-M2

Tabla 11. Datos de la muestra M2

| | 1 | 2 | 3 | Media |
|-------------------------|--------|---------|--------|---------|
| Altura (mm) | 409.00 | 409.00 | 409.00 | 409.00 |
| Diámetro exterior (mm) | 207.60 | 206.75 | 208.40 | 207.58 |
| Diámetro interior (mm) | 202.70 | 202.10 | 203.40 | 202.73 |
| Espesor (mm) | 4.90 | 4.65 | 5.00 | 5.20 |
| Peso (g) | | 937.50 | | 937.50 |
| Área (mm ²) | | 3067.00 | | 3067.00 |

Tabla 12. Datos del ensayo

| Tiempo (s) | Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|------------|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00307 | 0.00 | 0.00 |
| 30.00 | 0.50 | 11.51 | 2.36 | 0.00308 | 3.73 | 0.58 |
| 60.00 | 1.00 | 12.68 | 4.86 | 0.00310 | 4.09 | 1.19 |

Facultad de Ingeniería



| Tiempo (s) | Tiempo (min) | Fuerza (kN) | Desplazamiento (mm) | Área corregida (m ²) | Tensión (MPa) | Deformación (%) |
|------------|--------------|-------------|---------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| 90.00 | 1.50 | 10.51 | 7.36 | 0.00312 | 3.37 | 1.80 |
| 120.00 | 2.00 | 9.94 | 9.86 | 0.00314 | 3.16 | 2.41 |
| 150.00 | 2.50 | 9.45 | 12.36 | 0.00316 | 2.99 | 3.02 |
| 180.00 | 3.00 | 9.39 | 14.87 | 0.00318 | 2.95 | 3.63 |
| 210.00 | 3.50 | 9.00 | 17.37 | 0.00320 | 2.81 | 4.25 |
| 240.00 | 4.00 | 8.79 | 19.87 | 0.00322 | 2.73 | 4.86 |
| 270.00 | 4.50 | 8.57 | 22.37 | 0.00324 | 2.64 | 5.47 |
| 300.00 | 5.00 | 8.60 | 24.87 | 0.00327 | 2.63 | 6.08 |
| 330.00 | 5.50 | 8.74 | 27.37 | 0.00329 | 2.66 | 6.69 |
| 370.00 | 6.17 | 9.05 | 30.71 | 0.00332 | 2.73 | 7.51 |
| 400.00 | 6.67 | 9.23 | 33.21 | 0.00334 | 2.77 | 8.12 |
| 430.00 | 7.17 | 9.42 | 35.71 | 0.00336 | 2.80 | 8.73 |
| 460.00 | 7.67 | 9.06 | 38.21 | 0.00338 | 2.68 | 9.34 |
| 489.99 | 8.17 | 9.10 | 40.71 | 0.00341 | 2.67 | 9.95 |
| 520.00 | 8.67 | 8.76 | 43.21 | 0.00343 | 2.55 | 10.57 |
| 550.00 | 9.17 | 8.50 | 45.71 | 0.00345 | 2.46 | 11.18 |
| 580.00 | 9.67 | 8.32 | 48.21 | 0.00348 | 2.39 | 11.79 |
| 584.00 | 9.73 | 8.31 | 48.55 | 0.00348 | 2.39 | 11.87 |

Resultados gráficos

La deformación total alcanzada durante el ensayo fue aproximadamente 11.0%. El comportamiento del tubo frente a la aplicación axial de cargas es similar al presentado en la Figura 12. La deformación axial asociada a la tensión de ruptura fue igual a 0.65%, la tensión fue de 4.15 MPa, que corresponde a 40.2 kgf/cm². La Figura 14 presenta la curva esfuerzo – deformación de la muestra M2. La Figura 15 presenta el estado del cuerpo de prueba después del ensayo. En este caso, además de la superposición de las fibras del cartón, se ve un aplastamiento en los bordes superior e inferior del cuerpo de prueba al igual que lo mostrado en Figura 12.

La Figura 16 presenta las curvas tensión – deformación de las muestras correspondientes a la referencia 406x203.2x5. Es posible observar que todas las muestras tienen un pico de resistencia alrededor de los 4.0 MPa es decir alrededor de los 40 kgf/cm². Esto demuestra que el comportamiento del tubo es homogéneo, además de que las fibras son resistentes y evitan una ruptura súbita del material.

Facultad de Ingeniería

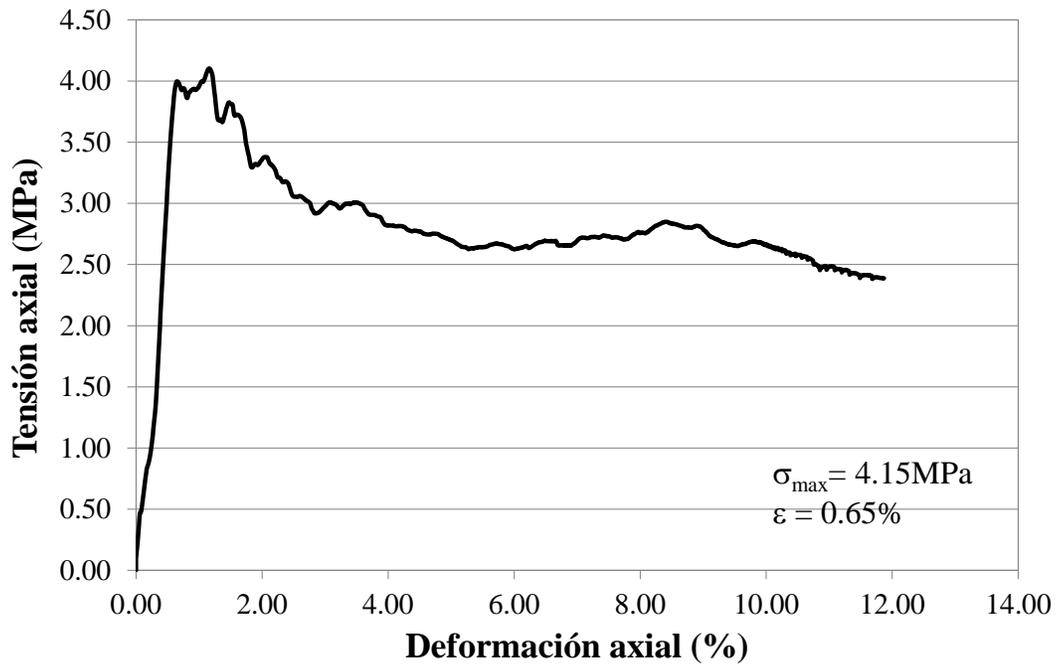


Figura 14. Curva tensión deformación para la muestra ECAG-M2

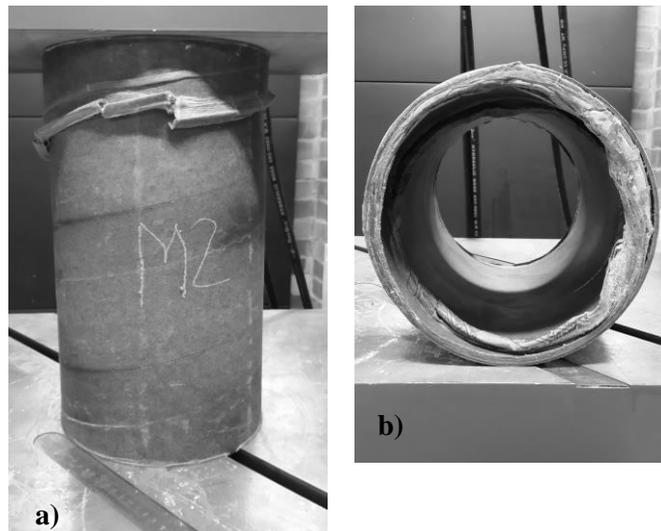


Figura 15. Cuerpo de prueba después del ensayo: a) Superposición de fibras en el exterior del tubo de ensayo; b) Deformación en la parte inferior del tubo

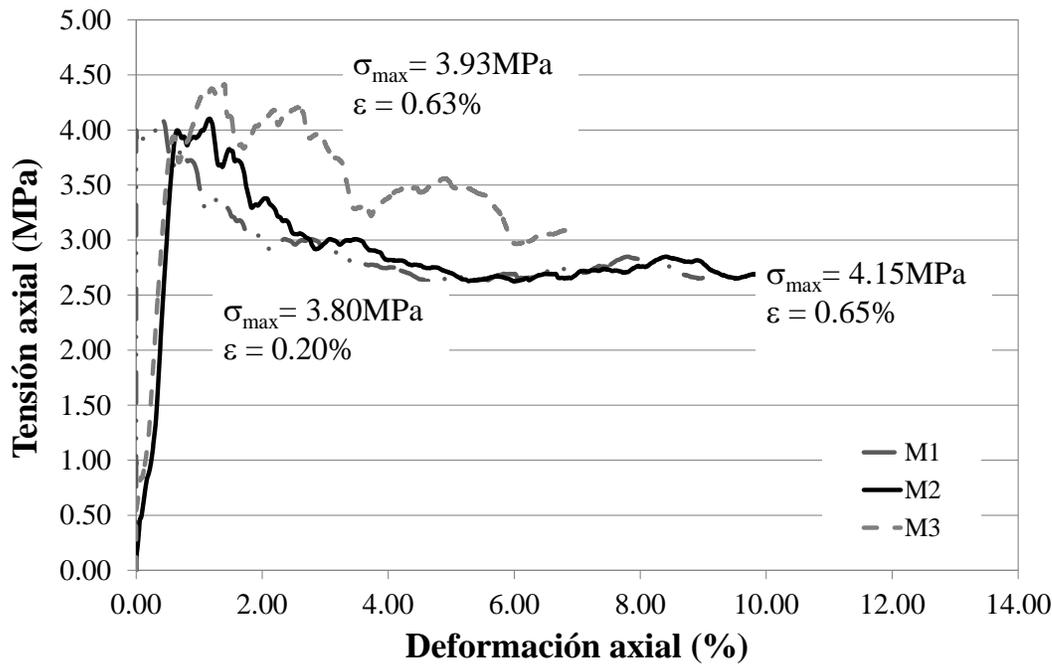


Figura 16. Curvas esfuerzo de formación para la referencia 406x203.2x5

Tabla 13. Resumen de resultados de compresión diametral para la referencia 76.2x152.4x4.

| Referencia | Muestra N° | Tensión ruptura (MPa) | Deformación axial (%) | Módulo elástico E (MPa) |
|-------------|------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| 305x152.4x4 | M1 | 2.6 | 0.60 | 465 |
| | M3 | 4.4 | 0.70 | 457 |
| | M4 | 4.5 | 0.96 | 336 |
| 406x203x5 | M1 | 3.8 | 0.20 | * |
| | M2 | 4.1 | 0.65 | 850 |
| | M3 | 3.9 | 0.62 | 793 |

*No fue posible calcular el módulo de elasticidad en esta muestra.

CONCLUSIÓN DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL

De forma general se puede concluir que los tubos ensayados, tienen un comportamiento homogéneo, resisten bien la compresión axial. Las fibras del material son resistentes y lo proveen de una resistencia residual, permitiendo que el tubo no se rompa súbitamente. Los ensayos de compresión efectuados hasta ahora sobre las muestras de cartón suministradas por la empresa CARTONTUBOS, muestran que pueden ser empleados como formaleta para vaciar o fundir concreto. Sin embargo, es de aclarar que aún se está efectuando la modelación numérica con la que Facultad de Ingeniería



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

con Acreditación
Institucional
de Alta Calidad
por **8** años

se podrán obtener conclusiones definitivas sobre el comportamiento de estos tubos cuando sean sometidos a la interacción con el concreto.

Facultad de Ingeniería

Calle 18 No. 118-250 Cali, Colombia • www.javerianacali.edu.co • PBX. (572) 321 8200