

MODELO FUERZA - DEFLEXIÓN DE VIGAS I FABRICADAS CON RESINA POLIÉSTER Y CASCARILLA DE ARROZ Y SOMETIDAS A CARGAS VERTICALES PUNTUALES

José Christian Chanchí Golondrino*, Cristhian Fernando González Lozano

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Manizales, Caldas. Colombia.

*e-mail: jcchanchigo@unal.edu.co



RESUMEN

La resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz ha sido propuesta como material compuesto con potenciales aplicaciones en elementos estructurales. A la fecha, son escasas las validaciones experimentales y numéricas de elementos estructurales con este material compuesto. Este artículo describe el comportamiento fuerza-deflexión de vigas I fabricadas con resina poliéster y cascarilla de arroz y sometidas a cargas verticales puntuales. 13 vigas I fueron ensayadas con cargas verticales puntuales en los tercios de la luz y 3 probetas prismáticas del mismo material de las vigas fueron ensayadas a compresión. Los resultados muestran que la curva fuerza-deflexión de las vigas I es trilineal y que las tres zonas de esta curva corresponden a los casos: viga con primeras fisuras, viga con fisuras estabilizadas y viga en la falla. El mecanismo de falla de las vigas I es atribuido a momento flector o a una combinación de cortante y momento flector. El mecanismo de falla de las vigas I inicia con fisuras en la aleta inferior a tensión; estas fisuras se propagan a través del alma de la viga hasta alcanzar la aleta a compresión produciendo la falla de la viga. Este mecanismo de falla se considera semi-dúctil debido a que las deflexiones son fácilmente observables antes de la falla de la viga. La semi-ductilidad de este mecanismo se atribuye la adición de la cascarilla de arroz a la resina poliéster, la cual disminuye la fragilidad de la resina poliéster. Los resultados también muestran que el módulo de elasticidad de la resina poliéster con cascarilla de arroz puede considerarse de 7.250 MPa para esfuerzos axiales compresivos inferiores a 200 MPa y de 18.205 MPa para esfuerzos axiales compresivos entre 200 MPa y 1.000 MPa. Un modelo para predecir la curva fuerza-deflexión de las vigas I fue propuesto basado en las 3 zonas observadas experimentalmente de esta curva. Con la variación de los parámetros del modelo, dos curvas teóricas que envuelven el 70 % de las curvas fuerza-deflexión experimentales, fueron propuestas.

Palabras Claves: Material polimérico, viga I, cascarilla de arroz, resina poliéster.

FORCE – DEFLECTION MODEL FOR I BEAMS MADE OF POLYESTER RESIN AND RICE HUSK AND UNDER VERTICAL JOINT LOADS**ABSTRACT**

The polyester resin reinforced with rice husk has been proposed as a composite material with potential applications on structural elements. To date, experimental and numerical validations of structural elements with this composite material are scarce. This paper describes the force-deflection behaviour for I beams made of polyester resin and rice husk, and under vertical joint loads. 13 I beams were tested under joint loads at the thirds of the beam span, and 3 prismatic coupons of the beam material were tested in compression. Results show the force – deflection curve for the I beams is trilinear, and the three zones of the curve correspond to the cases: beam with first cracks, beam with stabilized cracks, and beam at the failure. The collapse mechanism for the I beams is attributed to bending moment or a combination between bending moment and shear. The collapse mechanism of the beams starts with cracks on the beam bottom flange in tension, and these cracks spread through the beam web until reaching the beam top flange in compression, thus producing the beam failure. This collapse mechanism is considered as semi-ductile since the deflections can be easily observed before the beam failure. The semi-ductility of this mechanism is attributed to the addition of rice husk to the polyester resin, which reduced the fragility of the polyester resin. Results also show the elastic modulus of the polyester resin with rice husk can be considered of 7.250 MPa for compressive stresses less than 200 MPa, and of 18.205 MPa for compressive stresses of 200 MPa – 1000 MPa. A model for predicting the I beam force – deflection curve based on the 3 zones experimentally observed was proposed. By the variation of the parameters in the model, two theoretical curves that envelope 70 % of the force – deflection curves experimentally obtained, were proposed.

Keywords: *Polymeric material, I beam, rice husk, polyester resin.*

1. INTRODUCCIÓN

En la última década la aplicación de materiales compuestos en campos de la ingeniería tales como civil, aeronáutica, automotriz, mecánica y minera, ha venido ganando importancia [1, 2]. Esto es debido a que los materiales compuestos se han considerado como un posible sustituto de materiales convencionales como la madera, el hormigón, el acero y el aluminio [1]. Esta sustitución es posible debido a que los materiales compuestos se caracterizan por densidades bajas, resistencias altas, son resistentes a la intemperie, pueden producirse de manera industrializada y económica [2]. Entre los materiales compuestos promisorios para sustituir materiales convencionales se encuentran los plásticos reforzados, los cuales se obtienen impregnando un refuerzo fibroso con una resina que se solidifica bajo la acción de un sistema catalítico [3]. Las resinas poliéster pueden considerarse como una posibilidad versátil para ensamblar materiales compuestos, debido a que solo requieren la adición de un catalizador y fibra para producir un plástico reforzado termoestable [1, 3, 4].

Adicionalmente, los plásticos reforzados hechos a base de resina poliéster se caracterizan por un tiempo de curado rápido a temperatura ambiente y pueden generar relaciones resistencia/peso altas [5].

Entre las fibras que han sido consideradas para producir plásticos reforzados a partir de resina poliéster, se pueden mencionar la fibra de vidrio y fibras vegetales [6]. La fibra de vidrio es deseable por su alta resistencia, su baja densidad, buen comportamiento a la intemperie, buenas propiedades aislantes eléctricas y facilidad de procesamiento y ensamblaje de distintas formas [5], [7, 8]. Sin embargo, su alto costo de producción, la emisión de compuestos volátiles en su producción, la generación de plásticos reforzados de baja reciclabilidad y los altos valores de energía para producción y extracción de la fibra de vidrio, han hecho que su preferencia en la producción de plásticos reforzados se haya ido disminuyendo [6], [8-10]. Entre las aplicaciones de plásticos reforzados hechos a base de resina poliéster y fibra de vidrio que se han implementado a la fecha con satisfactorio funcionamiento, se pueden mencionar: cubiertas, paneles de fachada, marcos de puertas y ventanas, mobiliario interior, depósitos, tubos,

elementos prefabricados para edificios, y elementos estructurales como vigas, escaleras y barandas, [5,11].

Como sustituto a la fibra de vidrio, el uso de fibras vegetales como refuerzo de la resina poliéster ha ido ganando importancia. Esto es debido a que las fibras vegetales se caracterizan por: buena resistencia mecánica, baja densidad, generan aislamiento térmico y acústico, bajo costo, facilidad de obtención, biodegradabilidad, y reducen el impacto ambiental en el proceso de producción del plástico reforzado [6, 9, 12]. A la fecha, entre las fibras vegetales que se han propuesto exitosamente como refuerzo de la resina poliéster se pueden mencionar [8-13]: bagazo de caña de azúcar, tronco de la planta del banano, fibra de coco, rastrojo de piña, yute, sisal, abarca, olmo, palma de cera, kenaf, trigo, bambú, lino, henequén, algodón, fique, hojas de plátano y sábila. Para todas estas fibras vegetales, estudios experimentales tendientes a obtener las propiedades mecánicas y los beneficios de reforzar la resina poliéster con estas fibras han sido conducidos. Estos estudios encontraron que las fibras vegetales adolecen de adecuada adherencia con la resina poliéster. Razón por la cual, las fibras vegetales deben ser tratadas químicamente y su contenido de humedad debe ser reducido con el fin de producir propiedades mecánicas comparables o ligeramente superiores a las de la resina poliéster reforzada con fibra de vidrio [8, 9].

Recientemente, una de las fibras vegetales que se ha propuesto como refuerzo de la resina poliéster es la cascarilla de arroz [14-17]. Esta aplicación se basa en que, a nivel mundial, el arroz es un producto de consumo común y que su cascarilla es un desecho que puede obtenerse a bajo costo y su proceso de reducción de contenido de humedad es rápido y económico [14]. La validación experimental de la resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz, como material compuesto, fue realizada a través de ensayos de tensión y ensayos de flexión con probetas fabricadas con volúmenes de la cascarilla de arroz que variaron entre el 5 % y 25 % de la dosificación del material compuesto [14-17]. Los resultados de estos ensayos mostraron que, sin importar el porcentaje en volumen de la cascarilla de arroz, ella reduce la fragilidad de la resina poliéster. Los resultados también mostraron que para porcentajes en volumen hasta del 10 % de

cascarilla de arroz, la resistencia a tensión y la resistencia a tensión del material compuesto son iguales o ligeramente superiores al de la resina poliéster sin cascarilla de arroz. Estos resultados permitieron proponer la resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz como material compuesto y posible sustituto de materiales convencionales en aplicaciones estructurales en el campo de la ingeniería civil [14-17].

A la fecha, son escasos los estudios experimentales conducentes a usar la resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz en aplicaciones estructurales en el campo de la ingeniería civil. Entre las aplicaciones exploradas en este campo se pueden mencionar vigas I, columnas I, y marcos hechos a base de vigas y columnas de sección I [18-20]. Estos trabajos investigativos muestran que la resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz genera perfiles I de baja densidad y de comportamiento semi-dúctil, indicando de esta manera, que este material podría usarse potencialmente como sustituto del acero en construcciones en zonas activas sísmicamente. Otras aplicaciones exploradas de la resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz en el campo de la ingeniería civil, corresponde a vigas de sección rectangular para sustituir el uso de vigas de madera en la conformación de estibas [21] y a paneles para sustituir el uso de paneles de yeso en la conformación de cielos rasos [22]. Estos trabajos investigativos muestran que los elementos estructurales propuestos en resina poliéster y cascarilla de arroz desarrollan resistencias ligeramente inferiores a las de los elementos estructurales ensamblados con madera y yeso. Sin embargo, el ciclo de vida de los elementos estructurales hechos a base de resina poliéster y cascarilla de arroz es superior a la de los elementos estructurales hechos a base de madera y yeso, de esta manera, el material compuesto se constituye en una alternativa económica sostenible a largo plazo [21, 22].

No obstante, el comportamiento de vigas hechas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz ha sido descrito experimentalmente [18, 20, 21], pero a la fecha, no existe un modelo numérico predictor de la curva fuerza – deflexión de vigas hechas a base de este material compuesto. Tampoco existe un modelo que explique el mecanismo de falla de estas

vigas considerando las propiedades mecánicas del material y la variación de esfuerzos en la sección de la viga en cada una de las etapas que constituyen la curva fuerza – deflexión. Este artículo propone un modelo para predecir el comportamiento a flexión de vigas I hechas a base de resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz. El modelo propuesto es validado a partir del ensayo cuasi-estático de vigas I sometidas a cargas verticales puntuales en los tercios de la luz. Este artículo pretende responder las siguientes preguntas:

- i. ¿Cuál es el módulo de elasticidad de un material fabricado a base de resina poliéster y cascarilla de arroz?
- ii. ¿Cuál es el comportamiento experimental fuerza-deflexión de vigas I sometidas a carga vertical puntual y fabricadas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz?
- iii. ¿Cuál es el mecanismo de falla de vigas I sometidas a carga vertical puntual y fabricadas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz?
- iv. ¿Cuál es un modelo simple que represente el comportamiento fuerza-deflexión de vigas I sometidas a carga vertical puntual y fabricada a base de resina poliéster y cascarilla de arroz?
- v. ¿Con qué efectividad el modelo propuesto fuerza - deflexión de vigas I predice los resultados experimentales?

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Material para la elaboración de probetas prismáticas y vigas de sección I

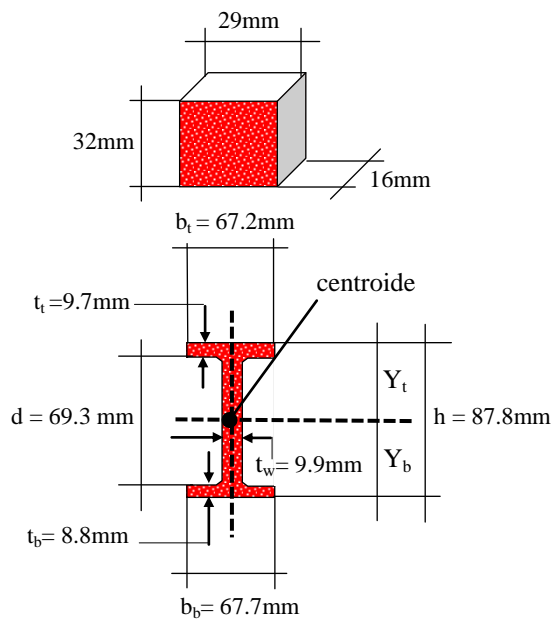
Las probetas prismáticas y las vigas de sección I se elaboraron con un material compuesto constituido por resina poliéster insaturada y cascarilla de arroz. Previo a la elaboración del material compuesto, la cascarilla de arroz se secó a 293.15 °K hasta lograr peso constante. La resina poliéster se adicionó con octoato de cobalto y metil-etil-cetona peróxido, los cuales corresponden al acelerante y al catalizador, respectivamente. Estos componentes generaron la reacción química que convirtió la resina poliéster de estado líquido a estado sólido. Durante el proceso de mezclado de todos los componentes del material compuesto, la cascarilla de arroz se adicionó y mezcló al azar. La resina poliéster, la cascarilla de arroz, el catalizador y el acelerante se

dosificaron en porcentajes en peso de 96.00, 2.68, 0.53 y 0.79, respectivamente.

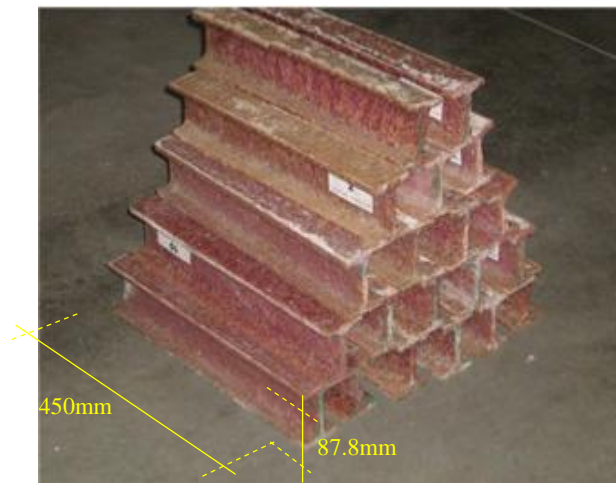
2.2 Proceso de elaboración de probetas prismáticas y vigas de sección I

3 probetas prismáticas y 13 vigas de sección I de longitud 450 mm se vaciaron con el material compuesto. El material compuesto en estado líquido se agitó manualmente durante dos minutos para remover el aire atrapado y posteriormente se vació en formaletas desmontables de madera. Mientras el proceso de vaciado de las probetas

prismáticas se realizó en una sola capa, el de las vigas se realizó en tres capas. Tanto para las probetas prismáticas como para las vigas se empleó un tiempo máximo de vaciado de quince minutos, el cual equivale al tiempo en el que el material compuesto inicia su endurecimiento (tiempo gel). Las probetas y las vigas se desencofraron después de ser curadas a una temperatura constante de 293.15 °K durante 48 h. Las dimensiones de las probetas prismáticas, y las dimensiones promedio de las vigas se muestran en la Figura 1.



a. Probetas prismáticas y denominación de las dimensiones de la sección de las vigas I



b. Vigas de sección I

Figura 1. Probetas prismáticas, denominación de las dimensiones de la sección de las vigas I y vigas I.

Las dimensiones de la sección I de acuerdo con la nomenclatura establecida en la Figura 1 y sus

propiedades geométricas, se presentan para las 13 vigas en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones y propiedades geométricas de la sección de las vigas I.

Viga No.	Altura viga <i>h</i> mm	Ancho aleta superior <i>b_t</i> mm	Ancho aleta inferior <i>b_b</i> mm	Espesor aleta superior <i>t_t</i> mm	Espesor aleta inferior <i>t_b</i> mm	Altura alma <i>d</i> mm	Espesor alma <i>t_w</i> mm	Distancia centroide a la fibra inferior <i>Y_b</i> mm	Distancia del centroide a la fibra superior <i>Y_t</i> mm	Inercia <i>I</i> mm ⁴
1	86.5	67.5	68.4	8.9	9.1	68.5	10.3	42.9	43.6	2,118,500
2	89.0	67.9	69.7	11.4	8.9	68.8	11.5	46.4	42.6	2,472,833
3	88.0	68.0	68.3	10.5	8.8	68.8	10.9	45.6	42.4	2,311,786
4	89.3	67.4	68.5	11.5	9.0	68.8	10.5	46.8	42.5	2,456,460
5	88.2	68.6	68.8	10.7	9.3	68.3	10.8	45.4	42.8	2,385,100
6	86.5	67.3	68.0	8.0	8.6	69.9	10.6	42.5	44.0	2,023,782
7	86.8	67.2	67.8	8.5	8.4	69.9	9.9	43.4	43.4	2,039,191
8	89.3	67.9	66.3	10.4	9.0	69.9	9.4	46.4	42.9	2,333,100
9	88.5	68.7	66.3	8.7	8.9	70.9	11.2	44.5	44.0	2,226,437
10	87.5	65.5	66.8	9.3	8.8	69.4	8.9	44.0	43.5	2,097,472
11	85.8	65.5	66.7	8.8	8.7	68.3	8.5	43.0	42.8	1,962,894
12	88.0	66.7	67.5	10.7	8.4	68.9	8.7	46.3	41.7	2,202,384
13	88.0	65.3	67.0	9.0	8.6	70.4	8.4	44.1	43.9	2,076,855
ρ	87.8	67.2	67.7	9.7	8.8	69.3	9.9	44.7	43.1	2,208,215
σ	1.08	1.01	1.00	1.13	0.25	0.80	1.03	1.50	0.68	164,073
β	1.2	1.5	1.5	11.6	2.8	1.2	10.4	3.4	1.6	7.4

a. ρ : Promedio, σ : Desviación estándar, β : Relación entre promedio y desviación estándar expresada en porcentaje

En la Tabla 1, para todas las dimensiones y propiedades geométricas de la sección I de las 13 vigas, se presenta el promedio, ρ , la desviación estándar, σ , y la relación entre la desviación estándar y el promedio expresada en porcentaje, β . Los valores de β son inferiores al 12%, indicando que la dispersión respecto al promedio de las dimensiones y propiedades geométricas de la sección I de las 13 vigas es baja.

2.3 Ensayo a flexión de vigas I y ensayo a compresión de probetas prismáticas

Las vigas I fueron ensayadas cuasi-estáticamente en un montaje horizontal. El montaje consistió en apoyar cada extremo de las vigas en un soporte rígido que permitió el giro a flexión en el plano vertical de la viga, como se muestra en la Figura 2a.

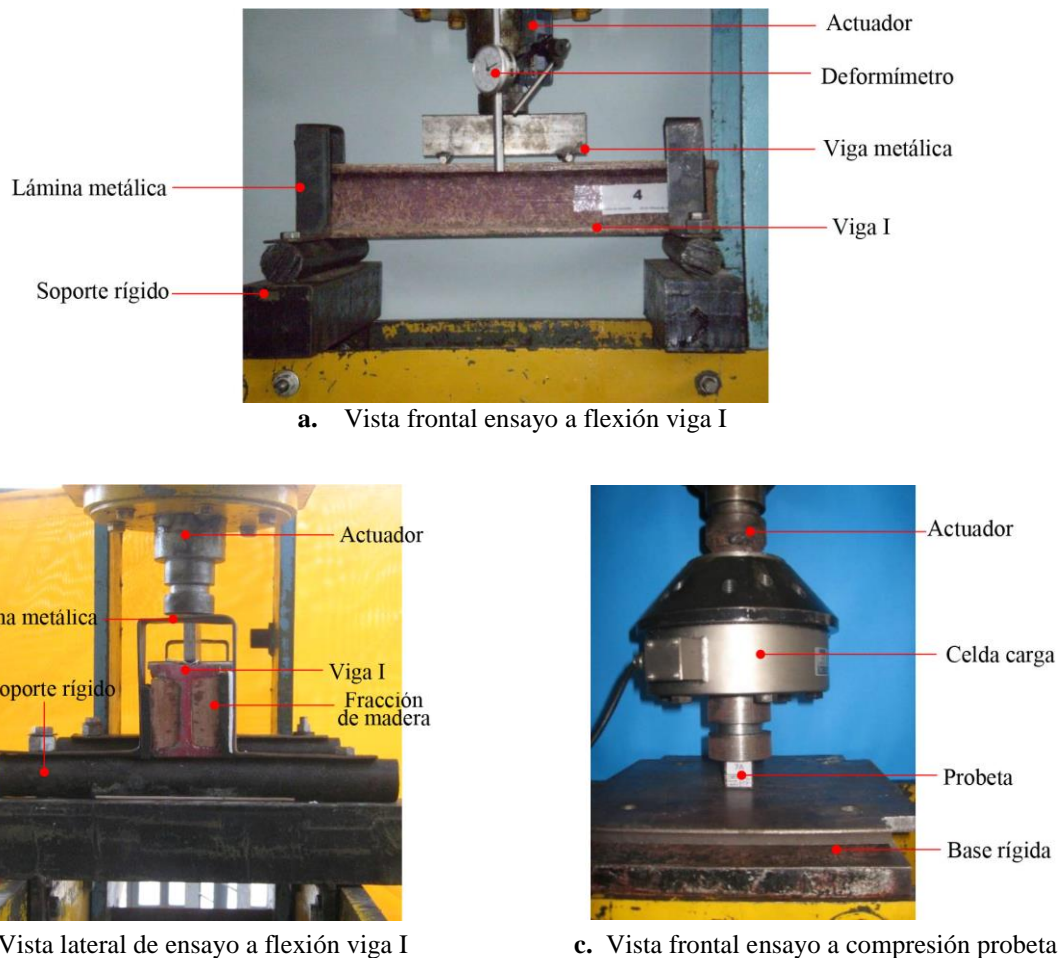


Figura 2. Montaje de ensayo a flexión de viga I y de ensayo a compresión de probeta.

En cada soporte, el giro alrededor del eje axial de la viga fue restringido con dos fracciones de madera confinadas al alma de la viga I a través de una lámina metálica en forma de U invertida y apernada al apoyo rígido, como se muestra en la Figura 2b. Las vigas I fueron sometidas a dos cargas puntuales en los tercios de la luz a través de una viga metálica cargada con un actuador equipado con una celda de carga, como se muestra en la Figura 2a. Las deflexiones de la viga fueron registradas en el centro de la luz con un deformímetro localizado en serie con el actuador, como se muestra en la Figura 2a. Las probetas fueron cuasi-estáticamente ensayadas a compresión con su lado más largo dispuesto verticalmente. En este montaje, uno de los extremos de la probeta estuvo en contacto con una base rígida y el otro extremo con un actuador equipado con una celda de carga, como se muestra

en la Figura 2c. Las elongaciones verticales de la probeta fueron medidas con un extensómetro adosado al actuador. Ambos ensayos, los de las vigas I y los de las probetas fueron ejecutados en un marco de reacción equipado con un actuador hidráulico con celda de carga de capacidad de 300 kN y un extensómetro de rango 10 mm. Las cargas para ambos ensayos fueron cuasi-estáticamente aplicadas a una velocidad de 0.025 mm/s desde una carga nula y hasta lograr la falla. La norma ASTM D695 – 15 [23] y la norma ASTM D790 – 03 [24] se usaron como referencia para proponer el ensayo de las probetas y el ensayo de las vigas, respectivamente.

2.4 Deflexión máxima de una viga sometida a carga puntual en los tercios de la luz

La máxima deflexión δ de una viga sometida a

carga puntual simétrica en los tercios, ocurre en el centro de la luz, como se muestra en la Figura 3.

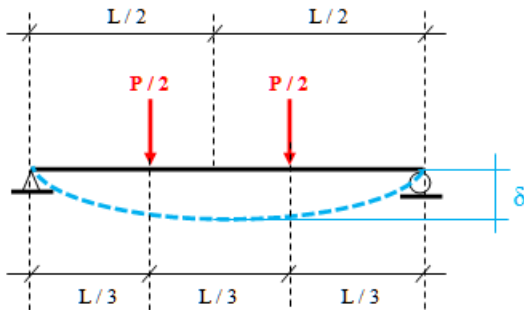


Figura 3. Deflexión máxima de una viga sometida a carga puntual simétrica en los tercios de la luz.

La máxima deflexión δ de la viga en el centro de la luz y en la Figura 3 es calculada por [25] como:

$$\delta = \frac{23 \times P \times L^3}{648 \times E \times I} \quad (1)$$

Donde, P es la fuerza vertical total sobre la viga, L es la luz de la viga, E es el módulo de elasticidad del material de la viga e I es la inercia de la sección de la viga.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Módulo de elasticidad de la resina poliéster con cascarilla de arroz

La Figura 4a muestra el módulo de elasticidad de la resina poliéster con cascarilla de arroz. Este módulo de elasticidad fue obtenido a partir de los ensayos a flexión de vigas I y de los ensayos a compresión de probetas prismáticas definidos en la Sección 2.3.

Desde los ensayos de compresión, 6 módulos de elasticidad fueron obtenidos, 2 para cada una de las 3 probetas prismáticas descritas en la Sección 2.2, como se muestra en la Figura 4a. Para cada probeta prismática, los 2 módulos fueron obtenidos como las pendientes de la zona 1 y zona 2 de la curva experimental esfuerzo axial – deformación unitaria axial, como se muestra en las Figura 4b, d, f. Desde los ensayos a flexión de vigas I, 10 módulos de elasticidad fueron obtenidos, 1 para cada una de las 10 vigas I descritas en la Sección 2.2, como se muestra en la Figura 4a. Para cada viga, el módulo de elasticidad se obtuvo usando la Ecuación 1 de la Sección 2.4 y la fuerza y la deflexión en la zona 1

de la curva experimental fuerza – deflexión, como se muestra en la Figura 4c, e, g.

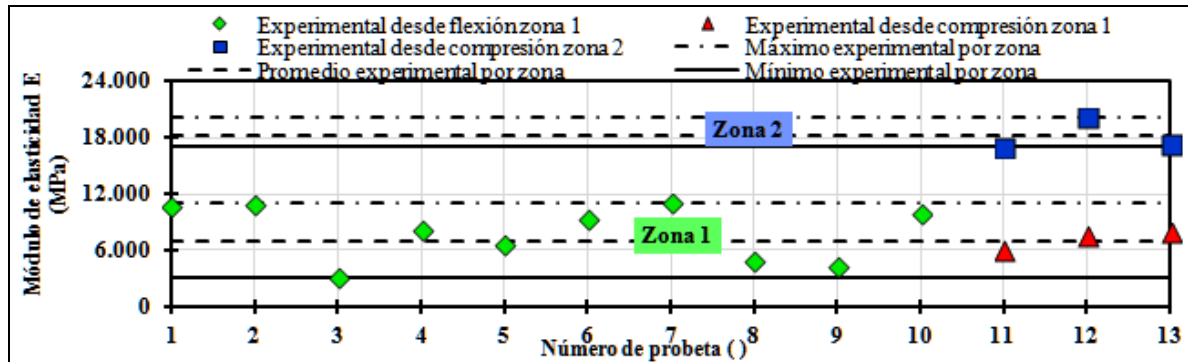
La Figura 4a muestra que para los ensayos de compresión de probetas y los ensayos de flexión de vigas I, el módulo de elasticidad de la zona 1 varió en el rango 3.000 MPa – 11.500 MPa. Para esta zona 1, el módulo de elasticidad promedio correspondió 7.250 MPa y es válido para esfuerzos de compresión axiales inferiores a 200 MPa. Debe notarse que los valores del módulo de elasticidad obtenidos a partir del ensayo de flexión de vigas I son más dispersos que los obtenidos a partir del ensayo a compresión de probetas. Esto es debido a que las probetas prismáticas fueron confeccionadas con menor volumen de material compuesto que el de las vigas I, lo cual redujo la cantidad de vacíos y/o discontinuidades del material produciendo valores de módulo de elasticidad más repetibles. La Figura 4a también muestra que, para los ensayos de compresión de probetas, el módulo de elasticidad de la zona 2 varió en el rango 17.010 MPa – 19.400 MPa. Para esta zona 2, el módulo de elasticidad promedio correspondió a 18.205 MPa y es válido para esfuerzos de compresión axiales de 200MPa - 1.000 MPa.

Un rango de valores del módulo de elasticidad de 5020 MPa – 7160 MPa fue reportado [14] como resultado de ensayos de tensión ejecutados sobre probetas prismáticas de sección rectangular y elaboradas con dosificaciones de cascarilla de arroz y resina poliéster similares a la aquí propuesta. Puede notarse que el módulo de elasticidad promedio de 7.250 MPa y reportado para esfuerzos de compresión axiales inferiores a 200 MPa es mayor al rango reportado por [14]. Las discrepancias entre estos resultados son atribuidas a las leves diferencias entre las dosificaciones usadas para la elaboración de las probetas de ensayo y al tipo de esfuerzo inducido durante el ensayo (tensión o compresión). Esto es debido a que el comportamiento de la resina poliéster a tensión difiere del comportamiento a compresión. Este resultado indica que el módulo de elasticidad es sensible a la dosificación de resina poliéster y cascarilla de arroz y al tipo de esfuerzo inducido durante el ensayo. Por tal razón, los valores de módulo de elasticidad aquí reportados solo aplican a la dosificación propuesta en esta investigación y para esfuerzos compresivos.

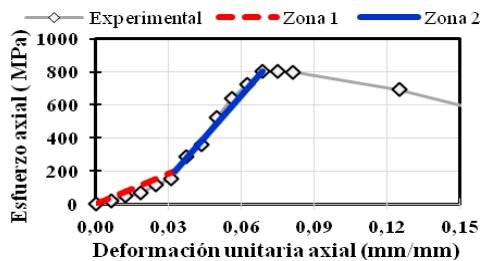
3.2 Comportamiento experimental fuerza – deflexión de vigas I

La Figura 5a muestra las curvas experimentales

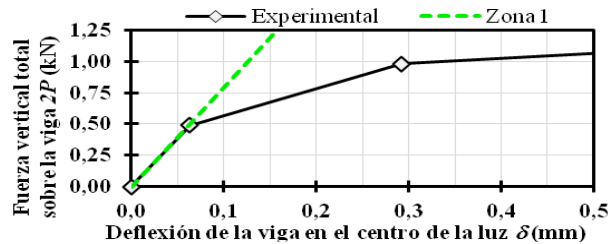
fuerza vertical – deflexión en el centro de la luz para las 13 vigas I ensayadas y la tendencia experimental promedio observada de estas curvas.



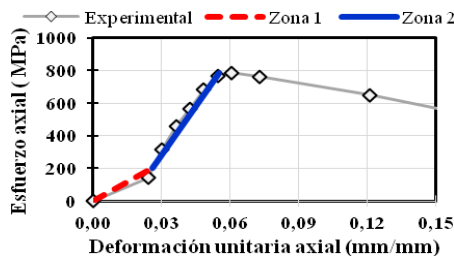
a. Valores del módulo de elasticidad desde el ensayo de compresión y el ensayo de flexión



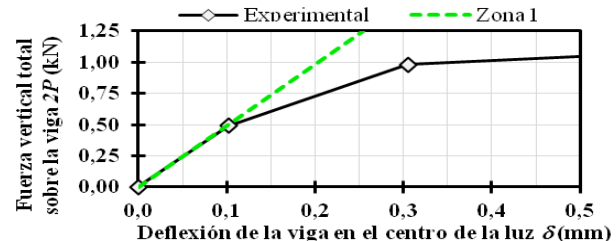
b. Probeta prismática No.1 a compresión



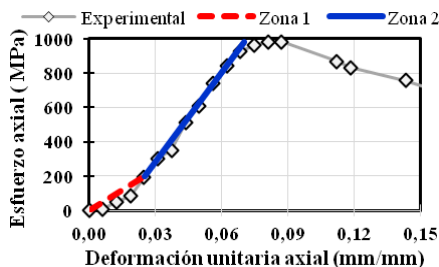
c. Viga I No.2 en flexión



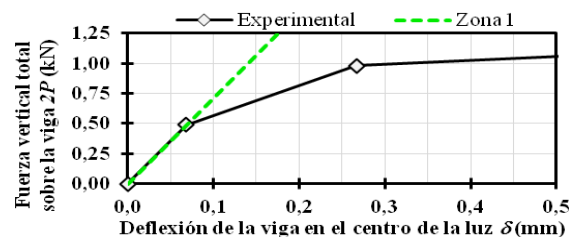
d. Probeta prismática No.2 a compresión



e. Viga I No.9 en flexión

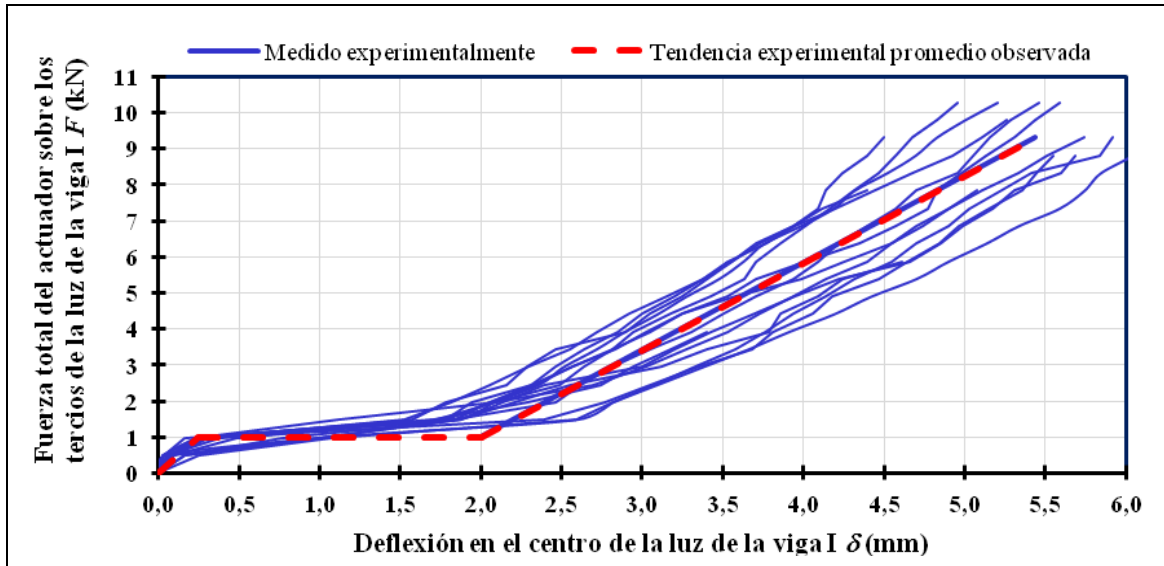


f. Probeta prismática No.3 a compresión

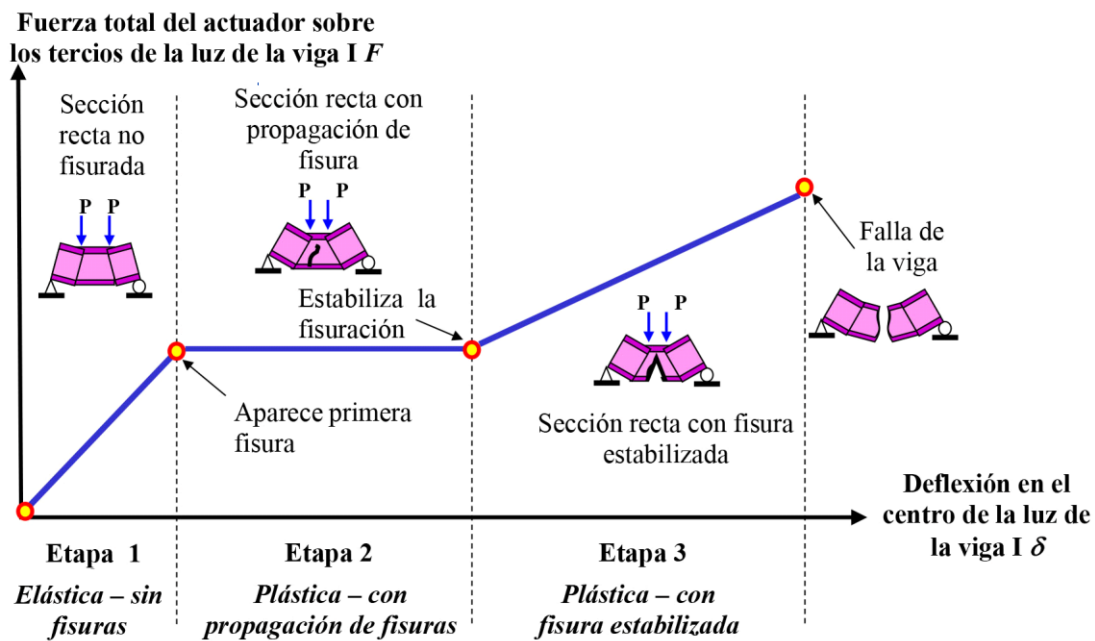


g. Viga I No.11 en flexión

Figura 4. (a) Módulo de elasticidad de resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz, (b-g) Curvas esfuerzo – deformación para probetas prismáticas y curvas fuerza – de flexión para vigas I.



a. Resultados experimentales y promedio observado



b. representación teórica propuesta

Figura 5. Resultados experimental y teórica propuesta de la curva fuerza vertical - deflexión en el centro de la luz, para vigas I sometidas a carga puntual en los tercios de la luz.

La Figura 5b muestra la representación teórica propuesta de las curvas fuerza vertical – deflexión en el centro de la luz de las vigas I.

La Figura 5a muestra que la curva fuerza vertical – deflexión en el centro de la luz, para vigas I está

conformada por 3 etapas de tendencia cuasi – lineal:

i. En la primera etapa entre la deflexión nula y la aparición de las primeras fisuras, la fuerza vertical y la deflexión en el centro de la luz de la viga se incrementaron proporcionalmente, como se muestra en las Figuras 5a-b. La fuerza vertical se incrementó hasta que las primeras fisuras aparecieron en la aleta inferior y en el tercio central de la luz de la viga, como se muestra en la Figura 5b. Antes de la aparición de las primeras fisuras, no se observó daño alguno a lo largo de la luz de la viga, por tal razón, la viga se comportó con secciones rectas no fisuradas, como se muestra en la Figura 5b.

ii. En la segunda etapa, entre la aparición de las primeras fisuras y la estabilización de las fisuras, la fuerza vertical se mantuvo constante e igual a aquella que produjo las primeras fisuras y la deflexión en el centro de la luz de la viga se incrementó significativamente, como se muestra en las Figuras 5a-b. Las fisuras en el tercio central de la luz de la viga se propagaron en la medida que la deflexión en el centro de la luz de la viga se incrementó. Estas fisuras se propagaron desde la aleta inferior y hasta el alma de la viga, estabilizándose aproximadamente en la mitad de la altura de la viga, como se muestra en la Figura 5b.

iii. En la tercera etapa, entre la estabilización de fisuras y la falla de la sección, la fuerza vertical y la deflexión en el centro de la luz se incrementaron en proporción inferior a la observada en la etapa inicial, como se muestra en las Figuras 5a-b. Las fisuras en el tercio central de la luz de la viga no se propagaron verticalmente con el incremento de la fuerza vertical y la deflexión en el centro de la luz. Sin embargo, la separación horizontal de las dos fracciones de viga a ambos lados de las fisuras en el tercio central se incrementó, como se muestra en la Figura 5b. Cuando la fuerza vertical alcanza su máximo valor, las fisuras en el tercio central de la luz se propagaron súbitamente produciendo la falla de la viga como se muestra en la Figura 5b.

3.3 Mecanismo de falla de vigas I

La Figura 6 muestra los mecanismos típicos de falla de vigas I en resina poliéster y cascarilla de arroz sometidas a carga vertical simétrica en los tercios de la luz. Tres tipos de mecanismos de falla

fueron observados, como se muestra en las Figuras 6a-c.

Los dos primeros mecanismos de falla de vigas I se muestran en las Figuras 6a-b y estos fueron asociados a momento flector. Estos mecanismos de falla fueron causados por momento flector debido a que la falla se presentó en el tercio central de la viga, donde sólo actúa el momento flector, como lo muestra el diagrama de momento de la viga mostrada en la Figura 6d. Los dos mecanismos de falla a momento flector se caracterizaron por una falla vertical que inició en la aleta inferior sometida a esfuerzos de tensión y que se propagó en el alma hasta la mitad de la altura de la viga I, como se muestra en las Figuras 6a-b. En el mecanismo de falla a momento flector tipo 1, la falla vertical se desvió a 45° hasta alcanzar la aleta superior sometida a esfuerzos de compresión, como se muestra en la Figura 6a. En el mecanismo de falla a momento flector tipo 2, la falla se bifurcó en un ramal que continuó la tendencia vertical de la falla inicial y en otro ramal que se desvió 45° ; ambos ramales alcanzaron la aleta superior sometida a esfuerzos de compresión, como se muestra en la Figura 6b.

El tercer mecanismo de falla de vigas I se muestra en la Figura 6c y este fue asociado a fuerzas de corte combinadas con momento flector. Este mecanismo de falla fue causado por fuerzas de corte y momento flector debido a que la falla se presentó en el límite entre los tercios izquierdo y central, donde actúa simultáneamente la fuerza de corte y el momento flector, como lo muestra los diagramas de corte y momento de la viga mostrada en la Figura 6d. Este mecanismo de falla se caracterizó por una falla orientada a 80° de la aleta inferior. Esta falla inició en la aleta inferior sometida a esfuerzos de tensión y terminó en la aleta superior sometida a esfuerzos de compresión, como se muestra en la Figura 6c.

En los dos mecanismos de momento y en el mecanismo combinado de corte y momento descritos anteriormente, se observó que las fallas asociadas son semidúctiles debido a que las vigas ensayadas mostraron deflexión antes de fallar. La naturalidad semidúctil de estas fallas es atribuida a la presencia de la cascarilla de arroz, debido a que ensayos de vigas I en condiciones geométricas y de carga similares mostraron los mismos mecanismos

de falla, pero con naturalidad frágil o explosiva.

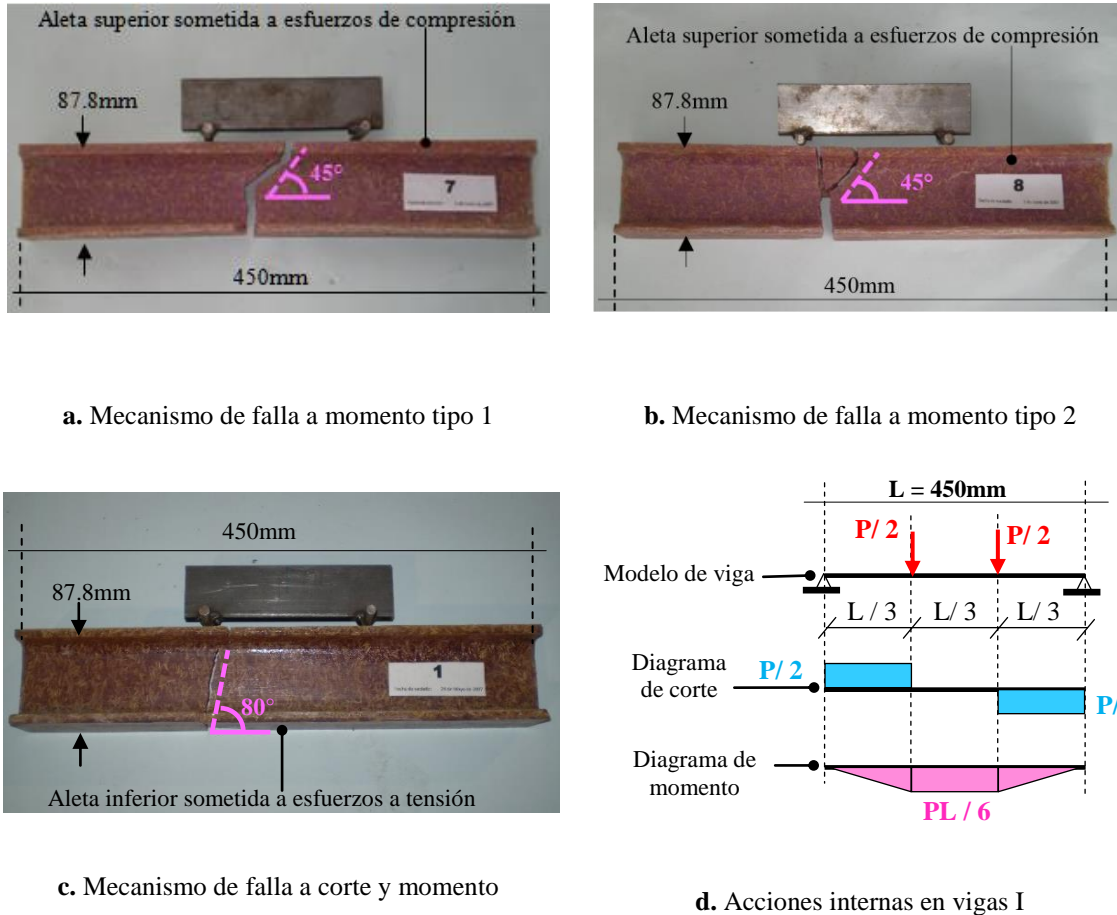


Figura 6. Mecanismos de falla y acciones internas en vigas I.

3.4 Modelo propuesto Fuerza - Deflexión de vigas I

3.4.1. Idealización de la curva fuerza - deflexión de vigas I

La curva fuerza - deflexión de vigas I se idealizó con un modelo tri - lineal, como se muestra en la Figura 7. Las tres zonas de este modelo están asociadas al comportamiento de la sección en el

centro de la luz de la viga I y corresponden a los siguientes casos:

- i. Zona 1: Entre la deflexión nula y la aparición de la primera fisura.
- ii. Zona 2: Entre la aparición de la primera fisura y la estabilización de fisuras.
- iii. Zona 3. Entre la estabilización de fisuras y la falla de la sección.

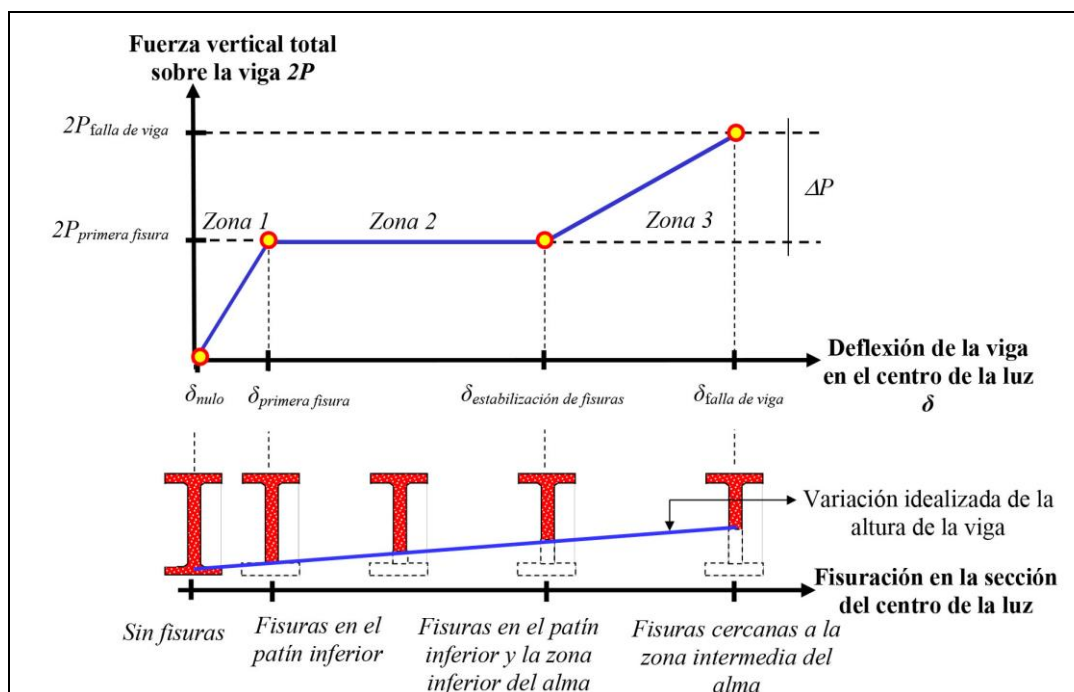


Figura 7. Idealización de la curva fuerza - deflexión de vigas I e idealización de la fisuración de la sección I en el centro de la luz de la viga.

La Figura 7 también muestra una idealización de la variación de la sección I debida a la fisuración y para el centro de la luz de la viga. En esta idealización, la sección I en el centro de la luz de la viga y a través de las tres zonas descritas anteriormente, varía desde una sección I y hasta una sección T con un alma de poca altura.

3.4.2. Idealización de la variación de la altura de la sección I de la viga

La variación de la altura de la sección recta I en el centro de la luz de la viga, debida a la aparición de fisuras y en las tres zonas de la curva fuerza – deflexión idealizada de acuerdo con la Sección 4.1, es mostrada en la Figura 8. Esta variación se representó a través de un factor denominado coeficiente de sección, K , el cual es un valor no dimensional que varía entre 0 y 1, y calculado como:

$$K = \frac{h_i}{h} \quad (2)$$

Donde, h_i es la porción de altura de la sección I que

no se encuentra fisurada en el centro de la luz de la viga y h es la altura total de la sección I de la viga, como se muestra en la Figura 8. La Ecuación 2 indica que el coeficiente de sección K representa la porción de altura de la viga que no se encuentra fisurada en el centro de la luz. La variación propuesta de K es mostrada en la Figura 8.

En la Zona 1 “entre la deflexión nula y la aparición de la primera fisura”, el factor K es igual a la unidad hasta que el esfuerzo de tensión en la aleta inferior de la viga es igual al 2.5 % de la resistencia a tensión del material de la viga. Este valor unitario de K significa que la viga no tiene fisuras, y por tal razón, en el análisis debe considerarse el 100 % de su altura, como se muestra en la Figura 8. Para esfuerzos a tensión en la aleta inferior de la viga superiores al 2.5 % de la resistencia a tensión del material de la viga y hasta que la primera fisura sea visible, se asumió que el factor K se reduce hasta 0.9, como se muestra en la Figura 8. Este valor de 0.9 significa que el 10 % de la altura de la viga se fisuró. Debido a que la altura de la aleta inferior correspondió aproximadamente al 10 % de la altura de la viga, como se muestra en la Tabla 1, la nueva sección de la viga en el centro de la luz es una sección T con el alma igual a la de la viga I sin

fisurarse, como se muestra en la Figura 8.

En la Zona 2 y 3 “entre la aparición de la primera fisura y la falla de la sección”, se asume que el

factor K reduce linealmente desde un valor de 0.9 y hasta 0.6, como se muestra en la Figura 8.

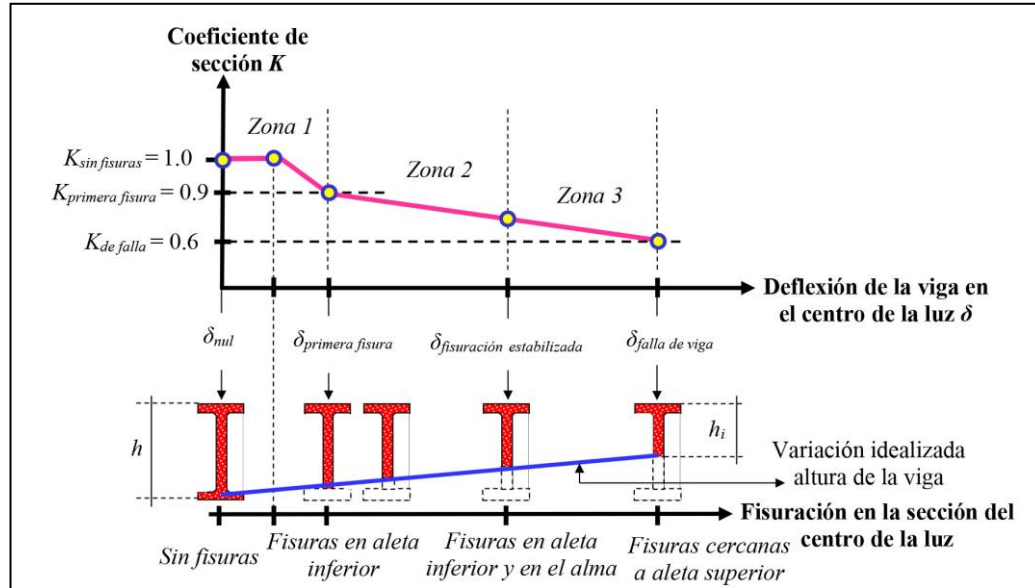


Figura 8. Variación de coeficiente de sección K y variación de la altura de la sección I en el centro de la luz, para las tres zonas de la curva fuerza – deflexión idealizada.

Esta reducción en el factor K significa que la sección de la viga se fisura progresivamente partiendo desde una sección T con alma igual a la de la viga I sin fisurarse y hasta una viga T con alma igual a aproximadamente a la mitad de la altura de la viga I sin fisurarse, como se muestra en la Figura 8. Debe notarse que la reducción lineal del factor K en la Zona 2 y 3 es una aproximación para facilitar el cálculo de este factor. En realidad, la función que define la reducción del factor K debería ser no lineal debido a que la fisuración del material es un fenómeno complejo que depende de la continuidad del material.

3.4.3. Modelo fuerza – deflexión de vigas I

El modelo de fuerza - deflexión se basó en considerar la sección en el centro de la luz de la viga I en las condiciones: “no fisurada”, “con primera fisura”, “con estabilización de fisuras” y “en la falla”. Estas cuatro condiciones representan las tres zonas de la curva fuerza – deflexión de la viga I descritas en la Sección 4.1. La variación de la sección de la viga I en el centro de la luz debido a la fisuración, la distribución de esfuerzos debidos a momento sobre esta sección y las fuerzas

resultantes de los esfuerzos a momento sobre esta sección, se muestran en la Figura 9.

Para las cuatro condiciones de la sección de la viga en el centro de la luz mencionadas anteriormente, se asumió:

- i. Una distribución lineal de esfuerzos a momento en la altura de la sección. Esta distribución de esfuerzos lineal es aplicable para el caso elástico y plástico, como se demostró en la Sección 3.1.
- ii. Las fuerzas resultantes de los esfuerzos a momento sobre la sección corresponden a un par de fuerzas conformado por una fuerza de compresión y una fuerza de tensión. Estas fuerzas son obtenidas como el volumen del prisma de esfuerzos a momento actuante sobre la sección.

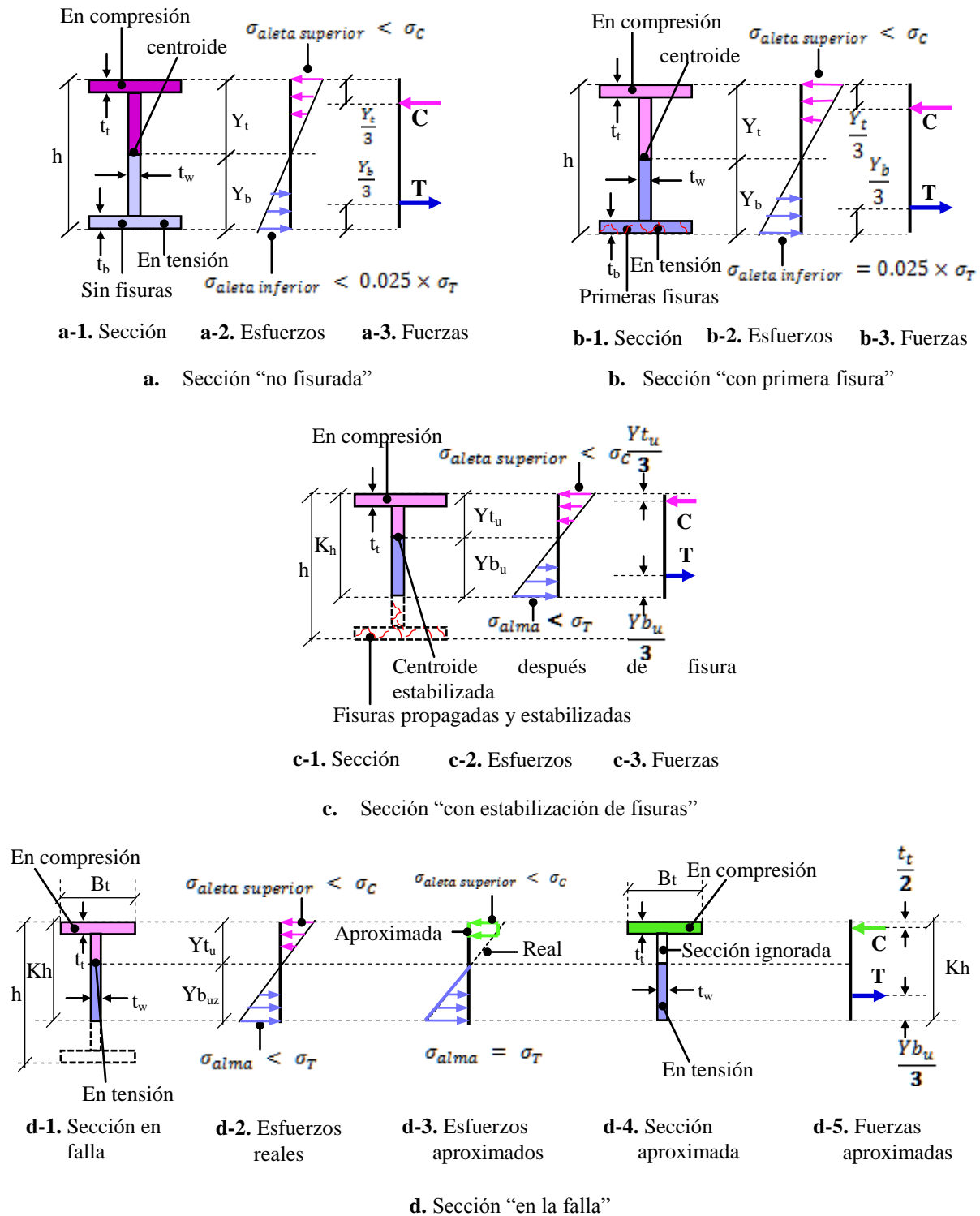


Figura 9. Distribución de esfuerzos y fuerzas, para la sección de la viga en el centro de la luz en las condiciones: "no fisurada", "con primeras fisuras", "con estabilización de fisuras" y "en la falla".

iii. La deflexión en el centro de la luz de la viga en cada una de las cuatro condiciones se calcula con la Ecuación 1 definida en la Sección 2.4 y usando los valores de fuerza, módulo de elasticidad e inercia apropiados para cada condición.

La sección de la viga se considera en la condición “no fisurada” cuando el esfuerzo a tensión en la aleta inferior es menor que el 2.5 % de la resistencia a tensión del material de la viga, σ_t , como se muestra en la Figura 9a. Para la condición “no fisurada”, la sección de la viga en el centro de la luz es I y su altura no se reduce. La fuerza de compresión C y la fuerza de tensión T , las dos resultantes de la distribución de esfuerzos a momento sobre la sección de la viga, se localizan en el tercio de la distancia desde el centroide a la fibra extrema de la aleta superior e inferior, Y_t y Y_b , respectivamente, como se muestra en la Figura 9a.

Para la sección en la condición “con primera fisura”, al incrementar la carga externa sobre la viga, la primera fisura ocurre cuando el esfuerzo en la aleta inferior es igual al 2.5 % de la resistencia a tensión del material de la viga, σ_t , como se muestra en la Figura 9b y en la Ecuación 3. A este bajo nivel de esfuerzo de tensión, solo ocurre una pequeña reducción de la altura de la viga como resultado de la baja fisuración. Por tal razón, la ubicación de las fuerzas de compresión y tensión C y T es aproximadamente igual al de la condición “no fisurada”, como se muestra en la Figura 9b. El esfuerzo a tensión en la aleta inferior es igual al esfuerzo producido por el momento externo en el centro de la luz de la viga y definido por la Ecuación 4. Reemplazando en la Ecuación 4, el momento externo en el centro de la luz de la viga definido desde la Figura 6d y por la Ecuación 5, se puede obtener la fuerza que produce la primera fisura en el centro de la luz de la viga (Ecuación 6). La deflexión de la viga para la sección en la condición “con primera fisura” es definida por la Ecuación 7, obtenida a partir de la Ecuación 1.

$$\sigma_{aleta\ inferior} = 0.025 \times \sigma_t \quad (3)$$

$$\sigma_{aleta\ inferior} = \frac{M_{primera\ fisura} \times Y_b}{I_{sf}} \quad (4)$$

$$M_{primera\ fisura} = \frac{P_{primera\ fisura} \times L}{6} \quad (5)$$

$$P_{primera\ fisura} = \frac{6 \times 0.025 \times \sigma_t \times I_{sf}}{L \times Y_b} \quad (6)$$

$$\delta_{primera\ fisura} = \frac{23 \times P_{primera\ fisura} \times L^3}{648 \times E_1 \times I_{sf}} \quad (7)$$

Donde, σ_t es la resistencia a tensión del material de la viga, $M_{primera\ fisura}$ es el momento externo que produce la primera fisura, $P_{primera\ fisura}$ es la fuerza que produce la primera fisura, I_{sf} es la inercia de la sección de la viga sin fisurar, L es la luz de la viga y Y_b es la distancia desde el centroide de la sección sin fisurar a la fibra extrema de la aleta inferior, como se muestra en la Figura 9b, $\delta_{primera\ fisura}$ es la deflexión de la viga en el centro de la luz cuando se produce la primera fisura, E_1 es el módulo de elasticidad del material de la viga en la zona 1 y definido en la Sección 3.1.

Para la sección en la condición “con fisuras estabilizadas”, después de la primera fisura, nuevas fisuras aparecen en la aleta inferior y se propagan hasta detenerse o estabilizarse en el alma de la viga, cambiando la sección de la viga de I a T, como se muestra en la Figura 9c. La propagación y estabilización de las nuevas fisuras es debida a las discontinuidades del material y ocurre a una carga externa constante e igual a la carga que produjo la primera fisura. Las fisuras logran llegar hasta una altura en donde el esfuerzo a tensión en el alma de la viga es inferior a la resistencia a tensión del material de la viga σ_t , como se muestra en la Figura 9c. La fuerza de compresión C y la fuerza de tensión T actuantes sobre la sección se reubican en altura. Esto es debido a que la altura total de la sección se redujo de un valor h a un valor Kh denominado altura efectiva de la sección después de la estabilización de fisuras, como se muestra en la Figura 9c. La deflexión de la viga para la sección en la condición “con estabilización de fisuras” es definida por la Ecuación 8, obtenida a partir de la Ecuación 1.

$$\delta_{con\ fisuras\ estabilizadas} = \frac{23 \times P_{primera\ fisura} \times L^3}{648 \times E_1 \times I_f} \quad (8)$$

Donde $\delta_{con\ fisuras\ estabilizadas}$ es la deflexión de la viga en el centro de la luz cuando las fisuras se estabilizan, $P_{primera\ fisura}$ es la fuerza que produce la

primera fisura, L es la luz de la viga, I_f es la inercia de la sección de la viga después de que las fisuras se estabilizan y E_1 es el módulo de elasticidad del material de la viga en la zona 1 y definido en la Sección 3.1.

Para la sección en la condición “en la falla”, después de que las fisuras en la sección se estabilizaron, la fuerza externa sobre la viga se incrementa hasta la fuerza que falla de la viga por esfuerzos debidos a momento. El incremento de fuerza externa desde la estabilización de las fisuras y hasta la falla de la viga, ΔP , es posible mientras los esfuerzos de compresión y tensión sean inferiores a la resistencia a compresión y tensión del material de la viga σ_c y σ_t , respectivamente, como se muestra en la Figura 9d-2. Este incremento ΔP se calculó considerando los esfuerzos de tensión del alma, los esfuerzos de compresión de la aleta superior e ignorando los esfuerzos de compresión en el alma, como lo muestran las Figuras 9d-3 y 9d-4. Esta aproximación es válida debido a que la aleta superior está sometida a esfuerzos de compresión mayores que los de la fracción del área del alma sometida a compresión y el área de la aleta superior es considerablemente mayor que la de la fracción del alma sometida a compresión, como se muestra en la Figura 9d-3 y 9d-4. Como resultado de esta aproximación, la fuerza de compresión C queda ubicada en el centroide de la aleta superior y la fuerza de tensión T en el centroide de la fracción del alma sometida a tensión, como se muestra en la Figura 9d-5.

Para la sección en la condición “en la falla” mostrada en la Figura 9d, las fuerzas de tensión T y compresión C actuantes sobre la sección, pueden calcularse con las Ecuaciones 9 – 10. El momento interno que produce la falla de la viga, $M_{\text{interno en la falla}}$, se calculó en la Ecuación 11 como el producto entre la fuerza de tensión definida por la Ecuación 9 y la distancia entre las fuerzas de tensión y compresión actuantes sobre la sección y mostrada en la Figura 9d-5. Igualando el momento interno que produce la falla de la viga definido por la Ecuación 11 con el momento externo producido por el incremento de fuerza desde la estabilización de las fisuras y hasta la falla de la viga, ΔP , definido por la Ecuación 12 y desde la Figura 6d, se obtiene ΔP definido por la Ecuación 13. La fuerza externa que produce la falla de la viga se obtuvo como la

adición de la fuerza que produjo la primera fisura definida por la Ecuación 6 y el incremento de fuerza ΔP , como se muestra en la Ecuaciones 14-15. La deflexión de la viga producida por el incremento de fuerza ΔP es definida por la Ecuación 16 obtenida a partir de la Ecuación 1. Debe notarse que esta deflexión debe ser calculada con el módulo de elasticidad de la viga en la Zona 2, E_2 . Esto es debido a que el material de la viga en la condición “en la falla”, se encuentra en el campo plástico definido como la Zona 2 en la Sección 3.1. La deflexión total de la viga en la condición “en la falla”, se calcula como la adición de las deflexiones en la condición “primera fisura”, en la condición “con fisuras estabilizadas” y la deflexión producida por el incremento de fuerza ΔP , $\delta_{\Delta P}$, como esta definido por la Ecuación 17.

Donde en las Ecuaciones 9-17 y en la Figura 9d, T es la fuerza a tensión en la sección de la viga, σ_t es la resistencia a tensión del material de la viga, Y_{bu} es la distancia desde el centroide a la fibra extrema en tensión de la sección en la condición “en falla”, t_w es el espesor del alma de la sección de la viga, C es la fuerza a compresión en la sección de la viga, $M_{\text{interno en la falla}}$ es el momento interno que produce la falla de la viga, Kh es la altura efectiva de la sección en la falla, t_t es el espesor de la aleta superior, $M_{\text{externo en la falla}}$ es el momento producido por el incremento de fuerza ΔP , siendo ΔP el incremento en la fuerza externa desde la estabilización de las fisuras y hasta la falla de la viga, L es la luz de la viga, $P_{\text{primera fisura}}$ es la fuerza que produce la primera fisura, I_f es la inercia de la sección de la viga sin fisurar, Y_b es la distancia desde el centroide de la sección sin fisurar a la fibra extrema de la aleta inferior, mostrada en la Figura 9b, $P_{\text{en la falla}}$ es la fuerza externa que produce la falla de la viga, $\delta_{\Delta P}$ es el incremento en la deflexión de la viga en el centro de la luz producido por ΔP , E_2 es el módulo de elasticidad del material de la viga en la Zona 2 y definido en la Sección 3.1, I_f es la inercia de la sección de la viga después de que las fisuras se estabilizan, $\delta_{\text{en la falla}}$ es la deflexión de la viga en el centro de la luz cuando se produce la falla, $\delta_{\text{primera fisura}}$ es la deflexión de la viga en el centro de la luz cuando se produce la primera fisura, $\delta_{\text{estabilización de fisuras}}$ es la deflexión de la viga en el centro de la luz cuando las fisuras se estabilizan.

$$T = \frac{\sigma_t \times Y_{bu} \times t_w}{2} \quad (9)$$

$$C = T \quad (10)$$

$$M_{\text{interno en la falla}} = T \times \left[Kh - \frac{Y_{bu}}{3} - \frac{t_t}{2} \right] \quad (11)$$

$$M_{\text{externo en la falla}} = \frac{\Delta P \times L}{6} \quad (12)$$

$$\Delta P = \left[\frac{6}{L} \right] \times \left[\frac{\sigma_t \times Y_{bu} \times t_w}{2} \right] \times \left[Kh - \frac{Y_{bu}}{3} - \frac{t_t}{2} \right] \quad (13)$$

$$P_{\text{en la falla}} = P_{\text{primera fisura}} + \Delta P \quad (14)$$

$$P_{\text{en la falla}} = \left[\frac{6 \times \sigma_t}{L} \right] \times \left[\left[\frac{I_{sf}}{Y_b} \right] + \left[\left[\frac{Y_{bu} \times t_w}{2} \right] \times \left[Kh - \frac{Y_{bu}}{3} - \frac{t_t}{2} \right] \right] \right] \quad (15)$$

$$\delta_{\Delta P} = \frac{23 \times \Delta P \times L^3}{648 \times E_2 \times I_f} \quad (16)$$

$$\delta_{\text{en la falla}} = \delta_{\text{primera fisura}} + \delta_{\text{con estabilización de fisuras}} + \delta_{\Delta P} \quad (17)$$

3.5 Comparación entre modelo propuesto y resultados experimentales

El modelo Fuerza – Deflexión de las vigas I, propuesto y definido en las Secciones 4.2 - 4.3 y a través de las Ecuaciones 2 – 17, fue comparado con las curvas fuerza – deflexiones experimentales presentadas en la Figura 5a y correspondientes a las 13 vigas I ensayadas. La Tabla 2 resume la fuerza y la deflexión calculadas con el modelo propuesto y para una viga con las dimensiones promedio de la sección I de las 13 vigas listadas en la Tabla 1. Estos valores de fuerza y deflexión se presentan para la sección de la viga I en el centro de la luz y para las condiciones: “no fisurada”, “con primeras fisuras”, “con estabilización de fisuras” y “en la falla”. Los valores reportados en la Tabla 2 fueron calculados para una resistencia a tensión del

material de la viga $\sigma_t = 65$ MPa y considerando coeficiente de sección $K = 0.60, 0.65$ y 0.70 . El valor de σ_t fue definido como el promedio del rango 40 - 90 MPa, definido por [26] para la resina poliéster sin refuerzo. Los valores de K fueron obtenidos usando metodología prueba - error, de tal manera que los valores mínimo y máximo involucran la mayoría de las curvas experimentales fuerza – deflexión de las 13 vigas I. En la Figura 10 se comparan las 3 curvas fuerza – deflexión calculadas con el modelo propuesto con las curvas fuerza – deflexión experimentales obtenidas de las 13 vigas I ensayadas y presentadas en la Figura 5a. Las 3 curvas fuerza - deflexión calculadas con el modelo corresponden a los coeficientes de sección K de 0.60, 0.65 y 0.70, y las parejas ordenadas fuerza, deflexión se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Predicción de la deflexión de la viga I en el centro de la luz usando el modelo propuesto.

Condición viga	Altura viga	Coefficiente sección	Sección tipo	Inercia	Distancia desde el centroide a la fibra extrema de la aleta inferior	Espesor alma	Espesor aleta superior	Módulo elasticidad	Fuerza total en los tercios de la luz de la viga	Deflexión en el centro de la luz de la viga
	h	K		I_{sf} o I_f	Y_b o Y_{bu}	t_w	t_t	E_1 o E_2	F	δ
	mm	---	---	mm ⁴	mm	mm	mm	MPa	kN	mm
“No fisurada”	87.80	1.00	I	2,213,961	44.70	9.0	9.7	7,250	1.07	0.22
“Con primeras fisuras”	87.80	1.00	I	2,213,961	44.70	9.0	9.7	7,250	1.07	0.22
“Con estabilización de fisuras”	56.97	0.65	T	315,903	70.99	9.0	9.7	7,250	1.07	1.73
	61.47	0.70	T	393,851	69.38	9.0	9.7	7,250	1.07	1.44
	65.97	0.75	T	482,824	67.69	9.0	9.7	7,250	1.07	1.21
“En la falla”	56.97	0.65	T	315,903	70.99	9.0	9.7	18,205	7.74	5.70
	61.47	0.70	T	393,851	69.38	9.0	9.7	18,205	8.88	5.20
	65.97	0.75	T	482,824	67.69	9.0	9.7	18,205	10.09	4.74

La Figura 10 muestra que el modelo propuesto captura la tendencia de las curvas experimentales. La Figura 10 también muestra que mientras para valores de $K = 0.65$ el modelo refleja la tendencia promedio de las curvas experimentales, para valores de $K = 0.60$ y $K = 0.70$ el modelo envuelve el 70 % de las curvas experimentales. Estos resultados indican que el modelo propuesto predice la curva Fuerza – Deflexión de las vigas de manera satisfactoria. Discrepancias entre el modelo propuesto y las curvas experimentales son debidas a las siguientes consideraciones en el modelo:

i. La resistencia a tensión de la resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz fue asumida igual al valor de la resistencia a tensión de la resina poliéster sin refuerzo. Esto es debido a que, a la fecha no existe información experimental disponible de la resistencia a tensión de la de la resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz.

ii. La distribución de esfuerzos a momento sobre la sección I se consideró lineal en la condición “en la falla” de la viga. Esta suposición es aproximada debido a que la distribución de esfuerzos es no lineal para esfuerzos compresivos altos, como se muestra en la Zona 2 de las Figuras 4b, 4d y 4f. Aunque la distribución de esfuerzos compresivos mostrados en las Figura 4b, 4d y 4f es axial, se espera que esta distribución sea similar a la de las compresiones producidas por los esfuerzos de momento.

El método propuesto es de fácil adopción y podría expandirse a la obtención de la capacidad de vigas sometidas a carga distribuida uniforme. Debe tenerse en cuenta que los factores experimentales aquí propuestos requieren verificación para otros casos de carga.

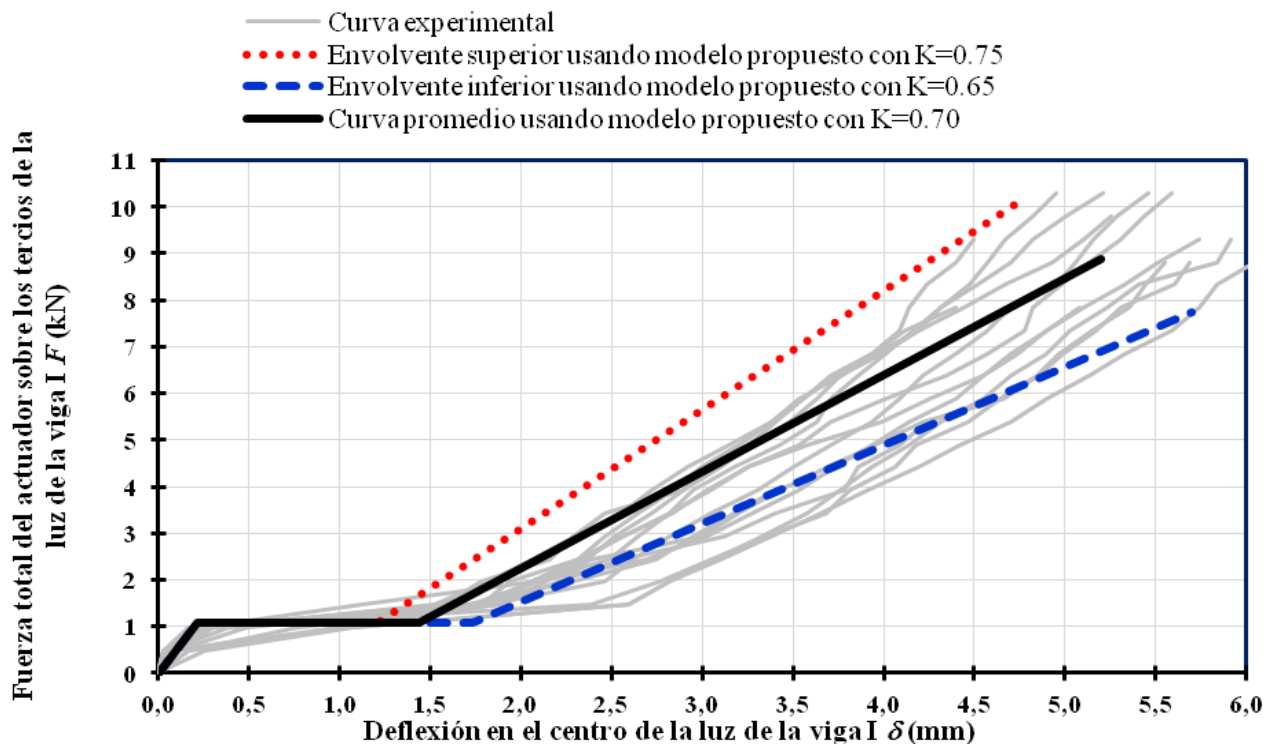


Figura 10. Comparación de curvas experimentales fuerza-deflexión de vigas I contra modelo propuesto.

4. CONCLUSIONES

Este artículo describe el comportamiento experimental y propone un modelo de la curva fuerza-deflexión de vigas I hechas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz sometidas a carga vertical puntual. Se demostró que:

- i. El módulo de elasticidad de un material fabricado a base de resina poliéster y cascarilla de arroz depende del nivel del esfuerzo axial compresivo. Para esfuerzos axiales compresivos inferiores a 200 MPa, el módulo de elasticidad promedio es de 7.250 MPa y para esfuerzos axiales compresivos entre 200 MPa y 1.000 MPa, el módulo de elasticidad promedio es de 18.205 MPa. Valores inferiores fueron reportados en trabajos investigativos que obtuvieron el módulo de elasticidad a partir de ensayos de tensión con dosificaciones de resina poliéster y cascarilla de arroz similares a la aquí propuesta, indicando que el módulo de elasticidad es sensible a la dosificación y al tipo de esfuerzo

(tensivo o compresivo). Por tal razón, los valores de módulo de elasticidad aquí reportados solo aplican a la dosificación propuesta en esta investigación y para esfuerzos compresivos.

- ii. El comportamiento fuerza – deflexión de vigas I sometidas a carga vertical puntual y fabricadas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz, se puede describir a través de 3 etapas cuasi-lineales. En la primera etapa, la fuerza vertical y la deflexión se incrementan hasta que aparece las primeras fisuras en la aleta a tensión de la viga. En la segunda etapa, la fuerza se mantiene constante, la deflexión se incrementa, y las fisuras se propagan hasta estabilizarse en el alma de la viga. En la tercera etapa, la fuerza vertical y la deflexión se incrementan nuevamente hasta que las fisuras se propagan súbitamente hasta producir la falla de la viga.
- iii. Dos mecanismos de falla de vigas I sometidas a carga vertical puntual y fabricadas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz fueron

observados. Estos mecanismos correspondieron a falla a momento flector y falla por la combinación de momento flector y cortante. Ambos mecanismos de falla se caracterizaron por la aparición de fisuras en la aleta inferior a tensión y que se propagaron verticalmente en el alma de la viga, hasta inclinarse en la fracción de alma y aleta en compresión de la viga. Estos mecanismos de falla se consideran semi-dúctiles debido a que la viga I exhibe deflexiones observables a simple vista antes de la falla total. La semi-ductilidad de los mecanismos de falla fue atribuida a la adición de la cascarilla de arroz a la resina poliéster, la cual disminuye la fragilidad de la resina poliéster.

- iv. Un modelo que representa el comportamiento fuerza-deflexión de vigas I sometidas a carga puntual y fabricadas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz fue propuesto. El modelo propuesto se basa en considerar una distribución lineal de esfuerzos debida a momento sobre la sección de la viga I y en considerar que la altura de la sección de la viga I disminuye como resultado de la propagación de las fisuras inducida por el incremento de los esfuerzos a momento. La disminución de altura con el incremento del esfuerzo a momento se consideró con un factor no dimensional denominado coeficiente de sección, el cual varía entre 0.6 y 1.0. El factor es igual a la unidad cuando la viga I no presenta fisuras y menor que la unidad cuando en la viga I se estabilizan las fisuras o la sección alcanza su máxima resistencia. El método propuesto es de fácil adopción y podría expandirse a la obtención de la capacidad de vigas sometidas a carga distribuida uniforme.
- v. El modelo propuesto fuerza - deflexión para vigas I sometidas a carga vertical puntual y fabricadas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz, predice con buena aproximación la tendencia de las curvas experimentales. El ajuste del modelo propuesto a los datos experimentales se logró usando un rango de coeficiente de sección de 0.6 - 0.7. Usando los valores extremos de este rango de coeficiente de sección, el modelo propuesto envolvió el 70%

de las curvas experimentales. Discrepancias entre el modelo propuesto y los resultados experimentales se atribuyen a la ausencia de datos experimentales de la resistencia a tensión de la resina poliéster con cascarilla de arroz y a la suposición de una distribución de esfuerzos lineal debida a momento sobre la sección I de la viga.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos son expresados a los Ingenieros Civiles egresados de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales: Alejandra Salazar, Angélica Jaramillo, Mario Alberto Villada Ríos, Jorge Hernán Correa, María Elisa Bedoya Vélez y Gilson Quintero, quienes contribuyeron en el desarrollo experimental de este proyecto.

6. REFERENCIAS

- [1]. Lara LA. I+D. 2010; 10 (1): 64-70.
- [2]. Aperador W, Delgado A, Bautista Ruiz JH. Respuestas. 2010; 15 (2).
- [3]. Jaramillo Zapata LY, Patiño Arcila ID. Rev. Tecno Lógicas. 2012; 28: 109-127.
- [4]. Rodríguez NJ, Rojas B, Atuesta Sicacha JA, Rivera Moreno AP. Tecnología y Productividad. 2017; 3 (3): 79-90.
- [5]. Olivares Santiago M, Galán Marín C, Roa Fernández J. Informes de la Construcción (Revistas CSIC). 2003; 54 (484): 45-62.
- [6]. López Arraiza A, Valencia FR, Castillo Lopez G, Bermúdez A, Montoya C, Ramón JL. Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos. 2017; 3 (2): 1-4.
- [7]. Miravete A, Mieres JM, Calvo I, Comino P, Chiminelli A, Cuartero J, Tolosana N. Materiales de Construcción (CSIC). 2005; 55 (280): 63-69
- [8]. Gómez JS. Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio, Tesis no publicada. Medellín (Colombia): Universidad Eafit, 2009.

- [9]. Trejos Taborda JD. Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio, Tesis no publicada. Pereira (Colombia): Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [10]. Taborda-Ríos JA, Cañas-Mendoza LA, Trisancho-Reyes JL. *DYNA*. 2017; 84 (202): 35-41.
- [11]. García Diez S. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 2011; 12 (5): 268-282.
- [12]. Parra Páez DA, Sánchez Zarate MA. Desarrollo material polimérico reforzado con fibras naturales, Tesis no publicada. Bogotá (Colombia): Universidad EAN, 2012.
- [13]. Alvarado Castiblanco AM. Obtención y caracterización mecánica de material compuesto resina poliéster - fibra de piña, Tesis no publicada. Bogotá (Colombia): Universidad Libre, 2017.
- [14]. Lalaleo EF. Caracterización Mecánica del Material Compuesto de Matriz Poliéster Reforzada con Cascarilla de Arroz para Determinar las Propiedades Mecánicas en Aplicaciones Industriales, Tesis no publicada. Ambato (Ecuador): Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [15]. Viswanath SB, Sathees S, Sudarsan D, Muthalagu R. *Mechanical. Materials Today: Proceedings*. Science Direct. 2021; 46: 874-877
- [16]. Ahire MK, Sonawane DD, Phase SS. *Journal on Material Science*. 2018; 5(4): 36-39.
- [17]. Ismail M, Rejab MRM, Siregar JP, Mohamad Z, Quanjin M. *Materials Today: Proceedings*. Science Direct. 2020; 27: 2749-1755.
- [18]. Chanchí Golondrino JC, Salazar A, Jaramillo A, Villada M, Correa J, Bedoya M, Quintero G, "Caracterización Comportamental de Vigas I Hechas de un Material Constituido por una Matriz Polimérica de Resina Poliéster y un Llenante de Cascarilla de Arroz". 12th International Conference on Project Engineering. Zaragoza (España). 2007.
- [19]. Chanchí Golondrino JC, Duque JL. *Ingeniería civil*. 2015; 1(180): 77-84
- [20]. Chanchí Golondrino JC, Gómez J. *Revista de plásticos modernos*. 2017; 115 (733).
- [21]. Salamanca SJ, Nieves N. Desarrollo de un Material a Base de Cascarilla de Arroz y Resina Poliéster para Sustituir Estibas de Madera. *Revista caribeña de ciencias sociales*. 2018; 9: 1-17
- [22]. Madu OG, Nwankwojike BN, Ani OI. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2018; 7(6): 11-16.
- [23]. Norma ASTM D695-15, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, Vol. 08.01, Philadelphia - USA: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [24]. Norma ASTM D790-03, Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Philadelphia - USA: American Society for Testing and Materials, 2003.
- [25]. Young WC, Budynas RG. *Roark's Formulas for Stress and Strain*, 7th Ed. United States of America: McGraw-Hill book, 2002.
- [26]. Mohanty A, Misra M, Drzal L, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. New York (United States of America): Taylor & Francis Group, 2005, p. 275 y 297.

7. MINIBIOGRAFÍA DE AUTORES



JOSE CHRISTIAN CHANCHI GOLONDRINO

Ingeniero Civil egresado de la Universidad del Cauca – Colombia, con Maestría en Estructuras de la Universidad de los Andes – Colombia y con Doctorado en Estructuras de University of Canterbury – New Zealand. Se desempeña como Profesor Asociado al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. Su interés investigativo y publicaciones se orientan a áreas como nuevos materiales, nuevos sistemas estructurales, puentes, estructuras de concreto, estructuras metálicas, disipación sísmica y rehabilitación sísmica.

(ORCID: 0000-0003-2706-3856)



CRISTHIAN FERNANDO GONZÁLEZ LOZANO

Ingeniero Civil egresado de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. En la actualidad se desempeña como ingeniero contratista del sector público y privado colombiano. Se vinculó al área investigativa aproximadamente 5 años, en los cuales ha realizado investigaciones y publicaciones relacionadas con nuevos materiales y sistemas constructivos.

(ORCID: 0000-0002-5101-7870)