

CAPITULO IV

PROBETAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

Para poder determinar el aporte real que podrían hacer las fibras obtenidas del PET reciclado dentro de un material compuesto, se decide hacer unas probetas de resina reforzada con fibras de RPET.

4.1 Elemento patrón para análisis comparativo de las fibras de RPET como material de refuerzo dentro de un material compuesto.

La mejor forma de determinar si un nuevo material podría convertirse en sustituto del utilizado tradicionalmente, presentar características similares o superiores para una determinada aplicación, es comparando su desempeño en esta aplicación con respecto al elemento tradicional. Tomando en cuenta esto, se decide utilizar como patrón de referencia, un material que ha sido muy empleado en aplicaciones como refuerzo dentro de un material compuesto con base de resina, la fibra de vidrio; aplicaciones como las señaladas en el *capítulo 2.3*.

4.2 DISEÑO DE LAS PROBETAS.

El diseño de la probeta debe corresponder al tipo de ensayo al que se la va a someter y los instrumentos que se utilizará para el efecto.

Para este caso particular, el ensayo es de flexión y el elemento más adecuado para evaluar el comportamiento a flexión de determinado material es la viga.

Para los ensayos se utiliza la máquina de ensayos para vigas, para determinar el módulo de elasticidad de cada probeta y la máquina de ensayos universales, para determinar la resistencia última a la flexión.

4.2.1 DIMENSIONAMIENTO.

Para determinar la geometría y dimensiones de las probetas se toma en cuenta los siguientes parámetros:

- Un elemento para ser considerado una viga debe poseer una longitud apreciablemente mayor a sus otras 2 dimensiones.
- Las dimensiones de las vigas que se utilicen como probetas deben ser las idóneas para el tipo de máquinas en que se realizan los ensayos.

Tomando en cuenta esto, se determina que las vigas a ser empleadas como probetas deben tener las siguientes dimensiones: 600 mm de longitud, 40 mm de ancho y 20 mm de espesor.

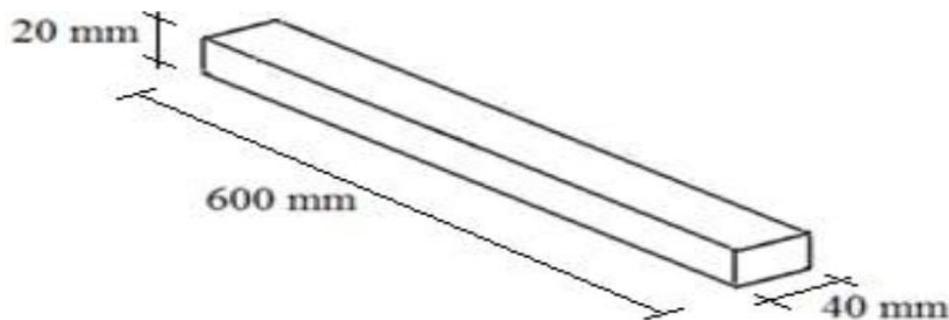


Figura 4.1.- Dimensiones adoptadas para las vigas probetas.

4.2.2 SELECCIÓN DE MATERIALES.

Como ya se ha determinado anteriormente, las vigas que se utilizan para los ensayos a flexión están constituidas por un material compuesto de resina reforzada con fibras de vidrio y fibras de RPET.

4.2.2.1 Selección de la matriz.

Un material compuesto regularmente tiene una matriz polimérica y un refuerzo de fibra, ya sea esta orgánica, inorgánica, metálicas o cerámicas. Como se señala en el *capítulo 2.4.5*, para cada tipo de refuerzo existe una matriz adecuada; para el caso de este estudio experimental se piensa reforzar una matriz polimérica con fibras de otro polímero, por lo que no existe una matriz recomendada para este tipo de fibras y tomando en cuenta que el estudio es comparativo con fibras de vidrio, se opta por utilizar la matriz adecuada y

comercialmente más utilizada para la fabricación de elementos en fibra de vidrio, Resina Poliéster *figura 4.2*.

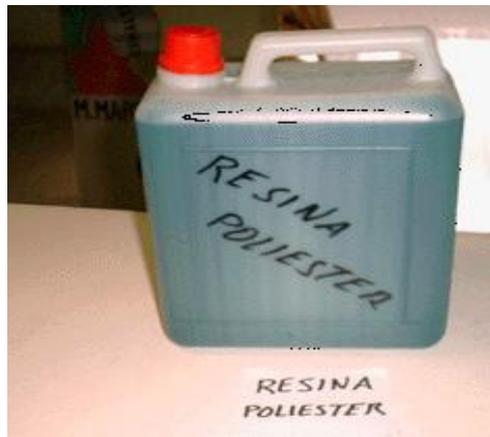


Figura 4.2 .- Resina poliéster.

4.2.2.2 Selección del material de refuerzo.

Como fue planteado desde un inicio, el estudio experimental se hará con las fibras de RPET obtenidas de la máquina extrusora del laboratorio de mecánica de materiales y se comparará con la fibra de vidrio.

Las fibras de RPET utilizadas como refuerzo de las probetas *figura 4.3*, son las fabricadas bajo los parámetros determinados como ideales de fabricación.

La fibra de vidrio a utilizar para el refuerzo de las probetas patrón, es la fibra de vidrio E tipo malla, que es la comercialmente más utilizadas para trabajos artesanales *figura 4.3*.



Figura 4.3.- Material de refuerzo de las probetas (fibra de vidrio, fibra de RPET).

4.2.2.3 Aditivos utilizados durante la fabricación de las probetas de material compuesto.

La resina poliéster que se utiliza como matriz de las probetas fabricadas, requiere de determinados aditivos que facilitan su manejo.

Los aditivos necesarios para la fabricación de las probetas de material compuesto son los indicados en la siguiente tabla:

Tabla 4.1.- Aditivos utilizados para la fabricación de las probetas

FUNCION	ELEMENTO UTILIZADO	IMAGEN
Diluyente	Monómero de estireno	
Catalizador	Peróxido metil etil cetona (Meck)	
Acelerante	Octato de cobalto	
Pigmento	Tinte negro	
Desmoldante	Cera desmoldante	

Fuente: Propia

4.2.3 PORCENTAJES DE CONSTITUCIÓN.

Como podemos observar en la *Figura 4.3*, la fibra de vidrio seleccionada para reforzar nuestras probetas viene a manera de láminas, por lo que usualmente, cualquier material trabajado en fibra de vidrio es reforzado por capas de esta. Se decide, para este estudio, fabricar tres tipos de probetas, la primera reforzada con una capa de fibra de vidrio, la segunda con dos capas y una tercera con tres.

Se debe fabricar entonces tres probetas con un refuerzo de fibra de RPET en iguales proporciones que las reforzadas por fibra de vidrio; para esto es necesario calcular a cuantas fibras de RPET corresponde una capa de fibra de vidrio.

Con el porcentaje calculado podremos aplicar la “*regla de las mezclas*” mencionada en la teoría para “*materiales compuestos*” (Capítulo 2.4.11.1)

4.2.3.1 Volumen de fibra de vidrio empleado en las probetas.

La capa de refuerzo que se coloca en las probetas de fibra de vidrio es externa, es decir, su volumen correspondería a la suma de las áreas de las 6 caras del prisma multiplicado por el espesor de la fibra de vidrio.

Tabla 4.2.- Dimensiones de la viga probeta.

DIMENSIONES DE LA PROBETA		
a	b	c
Espesor (mm)	Ancho (mm)	Largo (mm)
20	40	600

Fuente: Propia

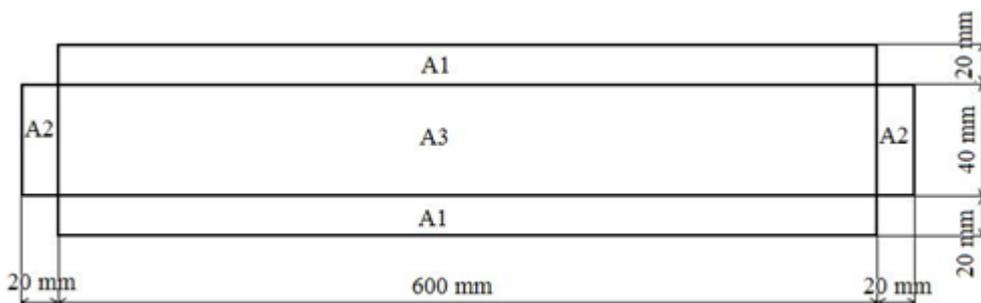


Figura 4.4.- Áreas que componen el prisma de la probeta

Área cubierta por una capa de fibra de vidrio.

$$A1 = (20 * 600) \text{ mm}^2$$

$$A2 = (20 * 40) \text{ mm}^2$$

$$A3 = (40 * 600) \text{ mm}^2$$

$$AT = 2 * (A1 + A2 + A3) \text{ mm}^2$$

$$AT = 73600 \text{ mm}^2$$

Una vez calculada el área cubierta por una capa de fibra de vidrio, es necesario saber el espesor medio de una lámina de este material, para así conocer a que volumen corresponde una capa de refuerzo.

Para obtener el valor del espesor medio de una lámina de fibra de vidrio, se toman, con la ayuda de un micrómetro, 20 medidas en distintos puntos de las láminas a utilizar en la fabricación de las probetas, para posteriormente obtener un promedio.

Tabla 4.3.- Valores para el cálculo del espesor medio de la lámina de fibra de vidrio.

Medición	Material Fibra de vidrio
1	0,61
2	0,58
3	0,57
4	0,56
5	0,57
6	0,56
7	0,57
8	0,58
9	0,57
10	0,58
11	0,55
12	0,54
13	0,55
14	0,57
15	0,58
16	0,6
17	0,59
18	0,57
19	0,57
20	0,58
$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^{20} e_i}{20}$	0,5725

Fuente: Propia

$$\bar{e} = 0,57$$

Con el espesor promedio de las láminas de fibra de vidrio se procede a calcular el volumen correspondiente a una capa de refuerzo.

Volumen de una capa de refuerzo.

$$V1CFV = AT * \bar{e}$$

$$V1CFV = 42170 \text{ mm}^3$$

4.2.3.2 Volumen de fibra de vidrio empleado en las probetas.

El volumen de fibra de vidrio a utilizar para reforzar una de las probetas, debe ser igual al volumen de fibra de RPET que se coloque como refuerzo en otra probeta, para un adecuado estudio comparativo.

Para determinar el número de fibras de RPET que se deben utilizar para la probeta reforzada con una capa, es necesario calcular el diámetro medio de las fibras a ser utilizadas; para lo que se toma 20 medidas en distintos puntos de éstas fibras y se procede a calcular el diámetro medio y con éste diámetro medio se hace el cálculo del número de fibras de RPET correspondiente al volumen de una capa de fibra de vidrio, tomando en cuenta que la longitud requerida para la fabricación de las probetas es de 600 mm, ya que son las cuatro caras que poseen esta longitud, las que trabajan durante el ensayo de flexión y no así las dos restantes. Este valor se lo obtiene dividiendo el volumen de una capa de refuerzo para el volumen de una fibra de RPET.

Tabla 4.4 .- Valores para el cálculo del diámetro medio de las fibras de RPET.

Medición	Material Diámetro RPET
1	0.61
2	0.65
3	0.67
4	0.63
5	0.67
6	0.65
7	0.64
8	0.65
9	0.65
10	0.62
11	0.64
12	0.65
13	0.64
14	0.61
15	0.58
16	0.61
17	0.61
18	0.62
19	0.63
20	0.64
$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{20} d}{20}$	0,6335

Fuente: Propia

$$\bar{d} = 0,63 \text{ mm}$$

Volumen de una fibra de RPET

$$V1FRPET = \frac{\pi * d^2}{4} * C$$

$$V1FRPET = 187 \text{ mm}^3$$

Numero de fibras de RPET equivalente a una capa de fibra de vidrio.

$$V_{pet} := V1c \qquad V_{pet} = 42.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$Numfibras := \frac{V_{pet}}{\left(c \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)} \qquad Numfibras = 225.48$$

Con el volumen de material de refuerzo calculado, se puede saber a qué porcentaje, del volumen total de la probeta, corresponde éste y así determinar el porcentaje de constitución del material compuesto.

Volumen de la probeta

$$V_t := a \cdot b \cdot c$$

$$V_t = 480 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Volumen de una capa de refuerzo

$$V1c = 42.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Porcentaje de refuerzo de una capa

$$Porc1 := \frac{V1c \cdot 100}{V_t} \qquad Porc1 = 8.79 \%$$

Volumen de dos capas de refuerzo

$$V2c := 2 \cdot V1c$$

$$V2c = 84.35 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Porcentaje de refuerzo de dos capas

$$Porc2 := \frac{V2c \cdot 100}{V_t} \qquad Porc2 = 17.57 \%$$

Volumen de tres capas de refuerzo

$$V3c := 3 \cdot V1c$$

$$V3c = 126.52 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Porcentaje de refuerzo de tres capas

$$Porc3 := \frac{V3c \cdot 100}{V_t} \qquad Porc3 = 26.36 \%$$

En base a los resultados obtenidos, se puede hacer la siguiente tabla:

Tabla 4.5.- Nomenclatura de las diferentes probetas a fabricar.

# CAPAS DE FIBRA DE VIDRIO	# FIBRAS DE RPET	% REAL DE MATERIAL DE APORTE	% APROXIMADO REFERENCIAL	NOMENCLATURA
0	0	0 %	0%	Probeta 100% resina
1	0	8.79 %	10 %	Probeta 10% de fibra de vidrio
2	0	17.57 %	20 %	Probeta 20% de fibra de vidrio
3	0	26.36 %	30 %	Probeta 30% de fibra de vidrio
0	226	8.79 %	10 %	Probeta 10% de fibras de RPET
0	451	17.57 %	20 %	Probeta 20% de fibras de RPET
0	677	26.36 %	30 %	Probeta 30% de fibras de RPET

Fuente: Propia

4.2.3.3 Propiedades teóricas de las probetas a fabricar.

Densidad del material compuesto a fabricar

Regla de las mezclas

$$\rho = f_m \rho_m + f_f \rho_f$$

Ecuación 2.1

Donde:

ρ = densidad del material fibroso

f_m = fracción volumétrica de la matriz

ρ_m = densidad de la matriz

f_f = fracción volumétrica de las fibras

ρ_f = densidad de las fibras

Ejemplo de cálculo:

Probeta 30% fibra de vidrio

$$\rho = f_m \rho_m + f_f \rho_f$$

$$\rho = 0.7 * 1.5 + 0.3 * 0.85 = 1.305 \text{g/cm}^3$$

Tabla 4.6.- Densidades esperadas de las probetas a fabricar.

	Fracción volumétrica de la matriz f_m	Densidad de la matriz ρ_m (g/cm ³)	Fracción volumétrica de las fibras f_f	Densidad de las fibras ρ_f (g/cm ³)	Densidad del material fibroso ρ (g/cm ³)
Probeta 30% fibra de RPET	0.7	1.5	0.3	0.85	1.305
Probeta 20% fibra de RPET	0.8	1.5	0.2	0.85	1.37
Probeta 10% fibra de RPET	0.9	1.5	0.1	0.85	1.435
Probeta 30% fibra de vidrio	0.7	1.5	0.3	1.6	1.53
Probeta 20% fibra de vidrio	0.8	1.5	0.2	1.7	1.54
Probeta 10% fibra de vidrio	0.9	1.5	0.1	1.8	1.53

Fuente: Propia

Módulo de elasticidad del material a obtener

$$1/E = (f_m / E_m) + (f_f / E_f)$$

Ecuación 2.3

Donde:

E = módulo de la elasticidad

f_f = fracción volumétrica de las fibras

E_f = módulo de la elasticidad de las fibras

E_m = módulo de la elasticidad de la matriz

f_m = fracción volumétrica de la matriz

Ejemplo de cálculo:

$$E_{\text{probeta 30\% rpel}} = ((0.3/891.4\text{MPa}) + (0.7/1300))^{-1} = 1142.84 \text{ MPa}$$

Tabla 4.7.- Módulos de elasticidad esperados de las probetas a fabricar.

	Fracción volumétrica de las fibras f_f	Fracción volumétrica de la matriz f_m	Módulo de la elasticidad de las fibras E_f (MPa)	Módulo de la elasticidad de la matriz E_m (MPa)	Módulo de la elasticidad esperado del material a fabricar E (MPa)
Probeta 30% fibra de RPET	0.30	0.70	891.40	1300.00	1142.84
Probeta 20% fibra de RPET	0.20	0.80	891.40	1300.00	1190.83
Probeta 10% fibra de RPET	0.10	0.90	891.40	1300.00	1243.02
Probeta 30% fibra de vidrio	0.30	0.70	1100.00	1300.00	1232.76
Probeta 20% fibra de vidrio	0.20	0.80	1100.00	1300.00	1254.39
Probeta 10% fibra de vidrio	0.10	0.90	1100.00	1300.00	1276.79

Fuente: Propia

4.2.4 PROCESO DE FABRICACIÓN.

El primer paso para la fabricación de las probetas, es la construcción de un molde (*figura 4.5*) que permita que la viga cumpla con las dimensiones previamente determinadas. El molde se construye de tabla triplex de 3 mm, se lo lija bien para evitar la presencia de astillas o rugosidades donde se pudiera alojar la resina y así adherirse al molde.



Figura 4.5.- Molde de tabla triplex para fabricación de probetas.

Una vez que se tienen los moldes, se procede a aplicar la cera desmoldante (*figura 4.6*) necesaria para cubrir absolutamente toda la superficie del molde que va a tener contacto con la resina, para evitar que ésta se adhiera al molde y dificulte el proceso de desmoldeo.



Figura 4.6.- Aplicación de cera desmoldante al molde de las probetas.

Posterior a la aplicación del desmoldante se prepara la resina que se utilizará como matriz del material compuesto (*figura 4.7*), en este paso se agregan todos los aditivos numerados en la *tabla 4.1* en los siguientes porcentajes: 3 a 5% de catalizados, 5 a 7% de acelerante y diluyente dependiendo hasta que alcance la viscosidad deseada.



Figura 4.7.- Preparación de la resina poliéster con los diferentes aditivos.

Una vez lista la resina, con la ayuda de una brocha se coloca una primera y fina capa de esta sobre las paredes del molde (*figura 4.8*), ésta capa es la que va a permitir la adherencia del material de refuerzo.



Figura 4.8.-.Primera capa de resina en los moldes.

4.2.4.1 Fabricación de las probetas de fibra de vidrio.

Para la fibra de vidrio, sobre esta capa inicial de resina se coloca una capa de material de refuerzo y se la cubre con otra capa de resina (*figura 4.9*), por facilidad, se la deja fraguar por alrededor de 6 horas antes de desmoldar y retirar las rebabas, obteniendo lo indicado en la siguiente figura.



Figura 4.9.-.Probeta hueca desmoldada con una capa de fibra de vidrio.

Si tan solo se va a utilizar una capa de refuerzo, se procede a rellenar el resto de la probeta con resina (*figura 4.10*), en caso de que se vaya a reforzar el material con más capas, se coloca con la brocha una nueva capa delgada de resina y la siguiente capa de refuerzo y así sucesivamente, con lapsos de 10 minutos entre capa y capa, hasta completar el número de capas deseadas; cuando se ha colocado todas, se rellena la probeta con resina y se la deja reposar por unos 30 minutos antes de colocar las capas de refuerzo correspondientes a la superficie superior, para posteriormente dejarlas fraguar por alrededor de 6 horas.



Figura 4.10.- Relleno de resina en las probetas de fibra de vidrio.



Figura 4.11.- Colocación de la última capa de fibra de vidrio en la probeta.

Una vez que la probeta ha fraguado por completo, con la ayuda de una amoladora pequeña se retiran las rebabas existentes quedando así lista para los ensayos (*figura 4.12*).



Figura 4.12.- Eliminación de rebabas de las probetas de fibra de vidrio.

4.2.4.2 Fabricación de las probetas de fibra de RPET.

El proceso de fabricación de las probetas reforzadas con RPET, difiere de las reforzadas con fibra de vidrio pues las fibras de RPET no brindan las mismas facilidades que la fibra de vidrio durante la fabricación.

Para las probetas con fibras de RPET se coloca una capa inicial de resina y sobre esta se coloca la fibra de refuerzo previamente ordenada de manera que quede estirada para un mejor aporte frente al ensayo de flexión (*figura 4.13*).



Figura 4.13.- Fibras de RPET estiradas y ordenadas para ser colocadas en el molde de las probetas.

A diferencia de la fibra de vidrio que adopta la geometría del molde y permanece así con la ayuda de la resina, las fibras de RPET tienden a conservar la forma que mantenían durante el período de almacenamiento, lo que dificulta su manipulación y obliga a sujetar las fibras en la posición deseada hasta que la resina fragüe (*figura 4.14*).



Figura 4.14 .- Fibras sujetas al molde antes de verter la resina.



Figura 4.15.- Disposición de las fibras de RPET dentro del molde.

Por facilidad durante el proceso de construcción de las probetas reforzadas con fibra de vidrio se desmolda después de que fragüe la resina con la primera capa, esto no es factible de hacer con las fibras de RPET, por lo que para estas, una vez colocadas las fibras requeridas, se las mantiene sujetas al molde y se procede a rellenar este por completo con la resina.



Figura 4.16.- Vertido de resina posterior a la ubicación de las fibras de RPET.

Posterior a esto se deja fraguar completamente por un lapso de 6 horas, para retirar las rebabas presentes y se procede a desmoldarlo quedando esta lista para los ensayos.



Figura 4.17.- Eliminación de rebabas en probetas de RPET.

4.2.5 IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Es fundamental para el buen desarrollo del proyecto, el etiquetar las probetas antes durante y una vez terminado el proceso de producción; de esta manera se evita confundirlas y obtener resultados completamente alejados de la realidad.



Figura 4.18.- Probetas etiquetadas.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS.

Previo a la realización de los ensayos, es fundamental el determinar las dimensiones y características de todas y cada una de las probetas con las que se trabajaran.

4.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS.

Una vez desmoldadas y claramente etiquetadas todas la probetas, se procede a determinar sus características físicas.

Tabla 4.8.- Propiedades físicas fundamentales de las probetas.

DIMENSIONES Y PESOS DE LAS PROBETAS OBTENIDAS				
Material	Peso (g)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Resina	743	600,0	40,0	20,2
Resina con aporte 30% RPET	561	600,0	40,1	20,0
Resina con aporte 20% RPET	596	600,0	40,0	20,1
Resina con aporte 10% RPET	654	600,0	40,1	20,0
Resina con aporte 30% de Fib. de vidrio	581	600,0	40,0	20,2
Resina con aporte 20% de Fib. de vidrio	609	600,0	40,1	20,3
Resina con aporte 10% de Fib. de vidrio	658	600,0	40,2	20,0

Fuente: Propia

Tabla 4.9.- Comparación de densidad en base al peso y densidad calculada

Material	Peso (g)	Volumen cm ³	Densidad obtenida g/cm ³	Densidad Esperada g/cm ³	Error %
Resina con aporte 30% RPET	561.00	480.00	1.17	1.31	-11.66
Resina con aporte 20% RPET	596.00	480.00	1.24	1.37	-10.34
Resina con aporte 10% RPET	654.00	480.00	1.36	1.44	-5.32

Tabla 4.9.- (Continuación)

Material	Peso (g)	Volumen cm ³	Densidad obtenida g/cm ³	Densidad Esperada g/cm ³	Error %
Resina con aporte 30% de Fib. de vidrio	581.00	480.00	1.21	1.53	-26.40
Resina con aporte 20% de Fib. de vidrio	609.00	480.00	1.27	1.54	-21.38
Resina con aporte 10% de Fib. de vidrio	658	480.00	1.37	1.53	-11.61

Fuente: Propia

La *tabla 4.8* y *tabla 4.9* nos permite ver que existe una aceptable homogeneidad en las dimensiones de todas las probetas y a la vez advertir las variaciones en cuanto a masa que se dan entre cada una de ellas, dependiendo de la cantidad y tipo de refuerzo que poseen.

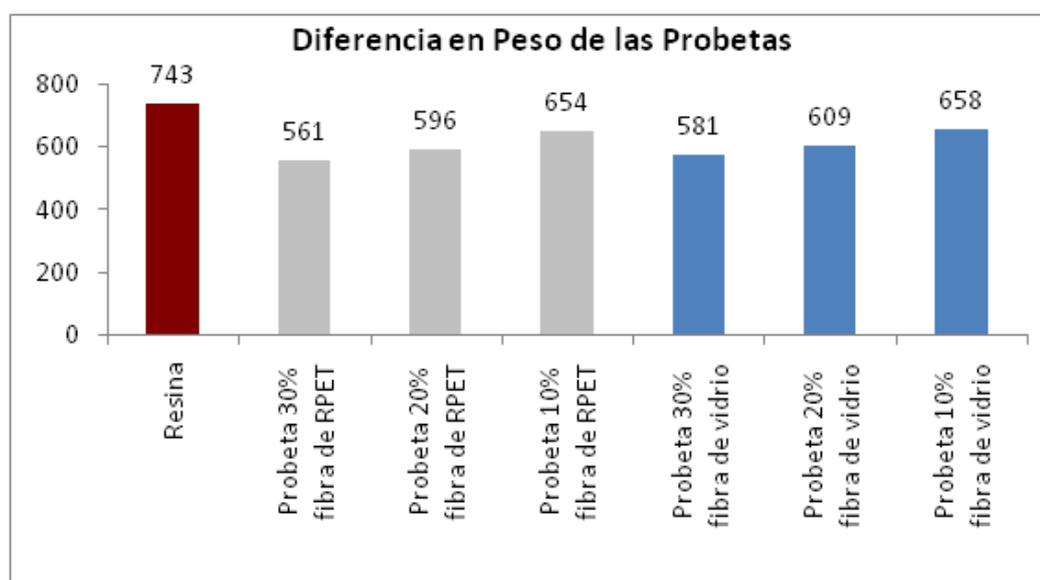


Figura 4.19.- Comparación de peso entre las diferentes probetas.

En base a la *figura 4.19* se puede apreciar que el material de refuerzo posee un valor de densidad menor al de la resina, pues a medida que aumenta la cantidad de material de refuerzo en las probetas, disminuye el peso de estas respecto a la probeta de 100% resina; es evidente también que para una misma proporción volumétrica de material de refuerzo, las fibras de RPET alivianan más el material reforzado que las fibras de vidrio.

4.4 ENSAYOS DE FLEXIÓN.

Para obtener la información necesaria para un estudio a flexión de las probetas, se plantea dos tipos de ensayos.

4.4.1 ENSAYO DE FLEXIÓN NO DESTRUCTIVO.

Este ensayo se hace con el fin de obtener los datos necesarios para calcular el módulo de elasticidad de cada viga, su capacidad de deformación y recuperación elástica. Para esto se emplea la máquina de ensayos para vigas (*figura 4.20*) con el siguiente procedimiento:



Figura 4.20.- Máquina de ensayos para vigas.

- Se ubican 2 dinamómetros con una separación entre ellos de 500 mm, de manera que al ubicar la viga en la máquina quede 25 mm en voladizo a cada extremo de la viga.
- Una vez ubicada la viga en la máquina, se colocan tres comparadores de reloj, uno en cada punto de apoyo de la viga y otro en el centro de ésta, de manera que el vástago de cada comparador tenga contacto con la probeta.

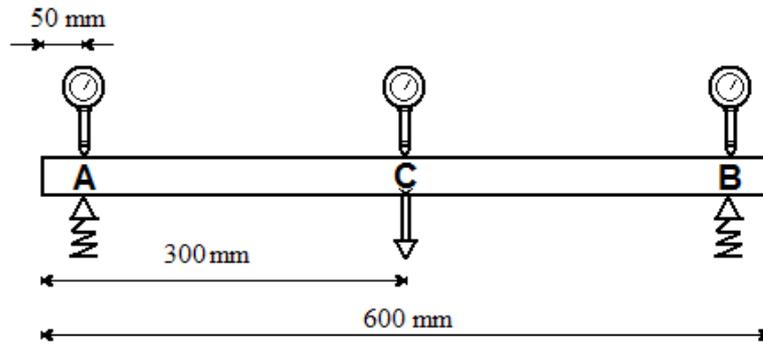


Figura 4.21.- Esquema del ensayo de flexión no destructivo.

- Se coloca un accesorio en el punto C (*figura 4.21*), de masa despreciable para el ensayo y se procede a encerrar los instrumentos, dinamómetros y comparadores de reloj.
- Con los instrumentos encerrados, se coloca el portapesas y se le añade progresivamente pesas de 0.5 Kg hasta completar 3 Kg, tomando los datos de los instrumentos para cada variación.



Figura 4.22.- Pesas utilizadas en el ensayo de flexión no destructivo.

4.4.2 ENSAYO DE FLEXIÓN DESTRUCTIVO.

Este ensayo se lo realiza con el fin de determinar la resistencia última a la flexión de las probetas construidas, para este ensayo se selecciona inicialmente la máquina para ensayos universales (*figura 4.23*).



Figura 4.23.- Máquina para ensayos universales.

Al intentar realizar los ensayos destructivos en la máquina para ensayos universales, se puede advertir que aun seleccionando la escala más baja que ésta máquina posee, la apreciación (1 kg) resulta muy grande para poder censar las variaciones de resistencia generadas en la probeta. Tomando en cuenta esto, se opta por realizar estos ensayos en la máquina de ensayos cíclicos (*figura 4.24*), con la gran ventaja de que ésta arroja los datos directamente a un computador, gracias a que se la automatizó en un proyecto de tesis anterior.



Figura 4.24.- Máquina de ensayos cíclicos.

Debido a que la distancia máxima entre los puntos de apoyo de la máquina de ensayos cíclicos es de 300 mm y la longitud de las probetas es 600 mm, se opta por cortar las probetas, obteniendo así dos probetas de 300 mm de longitud para cada tipo de refuerzo. Esto brinda la ventaja de obtener 2 tablas de datos, posterior al ensayo, para cada tipo de probeta, lo que implica un aporte favorable al estudio.

El procedimiento adoptado para estos ensayos es el siguiente:

- Se ubica los puntos de apoyo de la máquina de manera que exista una distancia de 250 mm entre ellos.
- Se coloca las vigas de manera que exista una misma distancia en voladizo a cada lado de las probetas, como se esquematiza en la *figura 4.25*.

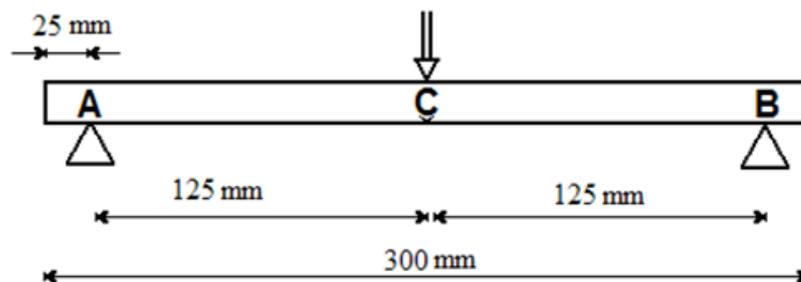


Figura 4.25.- Esquema ensayo a flexión destructivo.

- Los puntos de apoyo A y B de la *figura 4.25* son fijos, mientras que en el punto C la máquina se ejerce una fuerza puntual progresiva descendente, hasta conseguir que la viga falle.
- Una vez ubicada la viga sobre los soportes, se hace descender el rodillo que ejerce la presión en el punto C hasta conseguir que éste haga un mínimo contacto con la probeta, se encera los valores en el computador, se selecciona la velocidad de descenso del rodillo y se enciende la máquina para dar inicio al ensayo.
- Los valores de desplazamiento y variaciones de fuerza durante el ensayo son registrados, cada 0.25 segundos, en un computador anexo a la máquina de ensayos cíclicos.
- El ensayo termina una vez que la probeta falla, es decir, se rompe (*figura 4.26*).

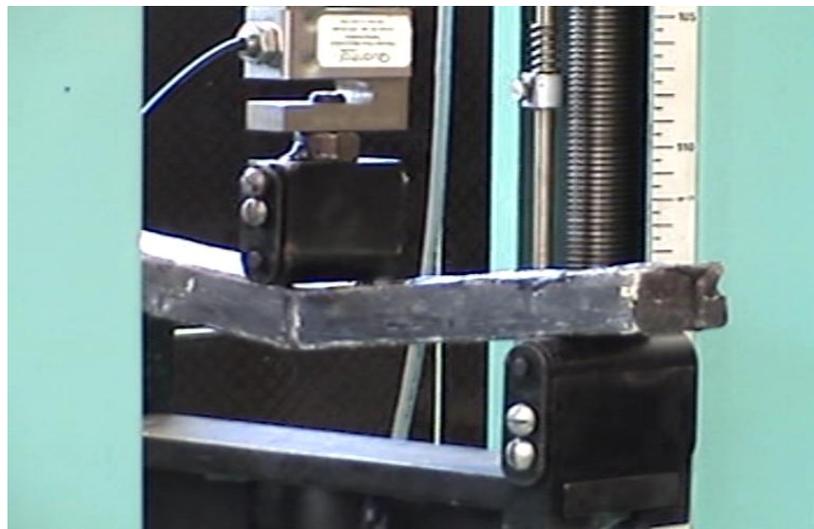


Figura 4.26.- Falla de la viga durante el ensayo destructivo.

4.5 Datos obtenidos de los ensayos de flexión.

Los valores que se obtienen de los dos ensayos realizados a las probetas, son recopilados para posteriormente utilizarlos en el estudio del comportamiento de éstas.

4.5.1 Datos obtenidos del ensayo no destructivo.

Tabla 4.10.- Datos del ensayo no destructivo a la probeta 100% resina.

PROBETA 100% Resina							
Peso (Kg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	<i>Al término del ensayo se retira las pesas y el comparador de reloj en el punto C marca 0,4 mm</i>
Medida del comparador en el punto A (mm) ΔA	0,6	1,5	2,3	3,2	4,1	5	
Medida del comparador en el punto C(mm) ΔC	0,8	1,9	2,9	4	5,1	6,2	
Medida del comparador en el punto B(mm) ΔB	0,7	1,5	2,4	3,2	4,1	5	

Fuente: Propia

Tabla 4.11.- Datos del ensayo no destructivo a la probeta 10% fibra de vidrio.

PROBETA 10% fibra de vidrio							
Peso (Kg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	<i>Al término del ensayo se retira las pesas y el comparador de reloj en el punto C marca 0,2 mm</i>
Medida del comparador en el punto A (mm) ΔA	0,5	1,5	2,4	3,2	4,1	5	
Medida del comparador en el punto C(mm) ΔC	0,9	2	3,1	4,1	5,4	6,6	
Medida del comparador en el punto B(mm) ΔB	0,8	1,6	2,3	3	4,1	5	

Fuente: Propia

Tabla 4.12.- Datos del ensayo no destructivo a la probeta 20% fibra de vidrio.

PROBETA 20% fibra de vidrio							
Peso (Kg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	<i>Al término del ensayo se retira las pesas y el comparador de reloj en el punto C marca 0,1 mm</i>
Medida del comparador en el punto A (mm) ΔA	1	1,9	3,2	3,7	4,2	5,1	
Medida del comparador en el punto C(mm) ΔC	1	2,2	4,1	4,5	5,5	6,4	
Medida del comparador en el punto B(mm) ΔB	0,8	1,9	3,2	3,6	4,2	5	

Fuente: Propia

Tabla 4.13.- Datos del ensayo no destructivo a la probeta 30% fibra de vidrio.

PROBETA 30% fibra de vidrio							
Peso (Kg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	<i>Al término del ensayo se retira las pesas y el comparador de reloj en el punto C marca 0,2 mm</i>
Medida del comparador en el punto A (mm) ΔA	0,7	1,5	2,4	3,2	4	4,5	
Medida del comparador en el punto C(mm) ΔC	1	2	3,1	4,4	5,3	6,3	
Medida del comparador en el punto B(mm) ΔB	0,8	1,8	2,6	3,7	4,5	5,4	

Fuente: Propia

Tabla 4.14.- Datos del ensayo no destructivo a la probeta 10% fibra de RPET.

PROBETA 10% fibra de RPET							
Peso (Kg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	<i>Al término del ensayo se retira las pesas y el comparador de reloj en el punto C marca 0,5 mm</i>
Medida del comparador en el punto A (mm) ΔA	0,5	1,3	2,2	3,1	4	4,8	
Medida del comparador en el punto C(mm) ΔC	0,8	1,9	2,3	4,1	5,2	6,4	
Medida del comparador en el punto B(mm) ΔB	0,7	1,5	2,4	3,2	4,2	5	

Fuente: Propia

Tabla 4.15.- Datos del ensayo no destructivo a la probeta 20% fibra de RPET.

PROBETA 20% fibra de RPET							
Peso (Kg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	<i>Al término del ensayo se retira las pesas y el comparador de reloj en el punto C marca 0,4</i>
Medida del comparador en el punto A (mm) ΔA	0,8	1,7	2,6	3,4	4,3	5,2	
Medida del comparador en el punto C(mm) ΔC	1,4	3	4,5	5,7	7,7	9,2	
Medida del comparador en el punto B(mm) ΔB	0,7	1,5	2,4	3,4	4	5	

Fuente: Propia

Tabla 4.16.- Datos del ensayo no destructivo a la probeta 30% fibra de RPET.

PROBETA 30% fibra de RPET							
Peso (Kg)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	<i>Al término del ensayo se retira las pesas y el comparador de reloj en el punto C marca 0,4</i>
Medida del comparador en el punto A (mm) ΔA	0,8	1,2	2,6	3,4	4,3	5,2	
Medida del comparador en el punto C(mm) ΔC	1,2	2,7	4,5	6,2	7,6	9,2	
Medida del comparador en el punto B(mm) ΔB	0,7	1,1	2,5	3,3	4,2	5	

Fuente: Propia

4.5.2 DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DESTRUCTIVO.

Debido a que la máquina de ensayos cíclicos registra las variaciones de datos cada 0,25 segundos, la tabla de datos completa, para cada probeta, es extensa; por lo que estas tablas se las presenta en los anexos (*Anexo B al Anexo O*) de éste proyecto.

A continuación se muestra la *tabla 4.17* que registra los valores en el momento en que fallan las probetas.

Tabla 4.17.- Datos del ensayo destructivo en el momento en que fallan las probetas.

Descripción del material	Tiempo (segundos)	Deformación (mm)	Fuerza (N)
100% Resina	5,00	3,66	1070
	5,25	5,04	0
100% Resina	5,00	4,55	1047
	5,25	5,80	0
10% fibra de vidrio	16,50	1,39	1756
	16,75	2,39	195
10% fibra de vidrio	17,50	1,31	1737
	17,75	1,41	214
10% fibra de RPET	7,50	2,01	803
	7,75	3,01	115
10% fibra de RPET	8,75	7,70	881
	9,00	8,70	140
20% fibra de vidrio	14,75	5,82	1782
	15,00	7,82	718
20% fibra de vidrio	14,25	7,85	1763
	14,75	9,56	680
20% fibra de RPET	19,00	14,00	698
	19,75	14,00	0
20% fibra de RPET	19,00	13,98	705
	19,75	13,98	0
30% fibra de vidrio	20,00	1,50	2160
	20,25	1,50	161
30% fibra de vidrio	20,25	8,31	2154
	20,50	8,48	0
30% fibra de RPET	9,50	2,47	415
	9,75	3,29	165
30% fibra de RPET	5,25	8,02	442
	5,50	3,05	0

Fuente: Propia

4.6 CÁLCULOS Y RESULTADOS OBTENIDOS.

Los valores presentados en las tablas anteriores como datos obtenidos, son utilizados para realizar los cálculos que permiten advertir las propiedades de cada probeta frente a la flexión.

4.6.1 PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Cálculo del Momento de Inercia de las probetas

$$I = \frac{1}{12} * b * a^3$$

Ecuación 4.1

Donde:

I = Momento de inercia de la probeta respecto al eje z

b = Base de la sección transversal

a = Altura de la sección transversal

$$a = 20 \text{ mm}$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$I = 26667 \text{ mm}^4$$

Cálculo de la deformación Neta

$$\delta = \Delta C - \frac{(\Delta A + \Delta B)}{2}$$

Ecuación 4.2

Donde:

δ = Deformación neta

ΔC = Desplazamiento en el punto C

ΔA = Desplazamiento en el punto A

ΔB = Desplazamiento en el punto B

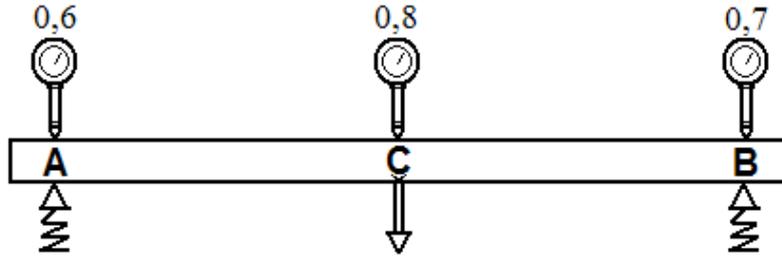


Figura 4.27.- Ensayo no destructivo con 0,5 kg a la probeta de 100% resina.

Ejemplo de cálculo:

$$\delta_p = 0,8 - \left(\frac{0,6 + 0,7}{2} \right) = 0,15$$

Tabla 4.18.- Deformación neta de las probetas.

		PESO APLICADO (Kg)					
		0,5	1	1,5	2	2,5	3
DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA	100% Resina	0,15	0,4	0,55	0,8	1	1,2
	10% fibra de vidrio	0,25	0,45	0,75	1	1,3	1,6
	20% fibra de vidrio	0,1	0,3	0,9	0,85	1,3	1,35
	30% fibra de vidrio	0,25	0,35	0,6	0,95	1,05	1,35
	10% fibra de RPET	0,2	0,5	0	0,95	1,1	1,5
	20% fibra de RPET	0,65	1,4	2	2,3	3,55	4,1
	30% fibra de RPET	0,45	1,55	1,95	2,85	3,35	4,1
DEFORMACIÓN NETA δ (mm)							

Fuente: Propia

Cálculo del porcentaje de recuperación elástica.

$$\% \text{ Recuperación_Elástica} = 100 - \left[\frac{\Delta Cf * 100}{\delta_{\max}} \right]$$

Ecuación 4.3

Donde:

ΔC_f = Desplazamiento en el punto C posterior a la culminación del ensayo.

Δ_{max} = Deformación máxima alcanzada en el punto C con 3kg de peso.

Ejemplo de cálculo:

$$\% \text{ recuperación elástica} = 100 - \left[\frac{0,5 * 100}{1,5} \right] = 66,66\% \cong 67\%$$

Tabla 4.19.- Recuperación elástica de las probetas.

		DEFORMACIÓN MÁXIMA Δ_{max} (mm).	DESPLAZAMIENTO POSTERIOR AL ENSAYO ΔC_f (mm).	RECUPERACIÓN ELÁSTICA (%)
DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA	100% Resina	1,2	0,4	67
	10% fibra de vidrio	1,6	0,2	88
	20% fibra de vidrio	1,35	0,1	93
	30% fibra de vidrio	1,35	0,2	85
	10% fibra de RPET	1,5	0,6	60
	20% fibra de RPET	4,1	1,8	56
	30% fibra de RPET	4,1	1,7	59

Fuente: Propia

Cálculo del Módulo de Elasticidad

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I}$$

Ecuación 4.4

Despejando:

$$E = \frac{P * L^3}{48 * \delta * I}$$

Ecuación 4.4.1

Donde:

E = Módulo de elasticidad del material.

P = Fuerza aplicada.

L = Longitud de la viga.

I = Momento de inercia de la viga respecto al eje z.

δ = Deformación neta.

Ejemplo de cálculo:

$$P = 0,5 \text{ kg}$$

$$L = 600 \text{ mm}$$

$$\delta_p = 0,25 \text{ mm}$$

$$E = \frac{9,8 * 0,5 * 600^3}{48 * 0,25 * 26667} = 3307,45 \text{ MPa}$$

Tabla 4.20.- Módulo de elasticidad promedio probeta 10% fibra de vidrio.

PESO APLICADO (Kg)	DEFORMACIÓN NETA δ (mm)	MOMENTO DE INERCIA I (mm ⁴)	MÓDULO DE ELASTICIDAD E (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO \bar{E} (MPa)
0,5	0,25	26667	3307,45	3313,05
1,0	0,45	26667	3674,95	
1,5	0,75	26667	3307,46	
2,0	1,00	26667	3307,46	
2,5	1,30	26667	3180,25	
3,0	1,60	26667	3100,74	

Fuente: Propia

Tablas de módulo de elasticidad promedio del resto de probetas en el ANEXO

P.

Tabla 4.21.- Módulos de elasticidad promedio de todas las probetas.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA	MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO (MPa)
100% Resina	4427
10% fibra de vidrio	3313
20% fibra de vidrio	4547
30% fibra de vidrio	3877
10% RPET fibra de RPET	3687
20% RPET fibra de RPET	1251
30% RPET fibra de RPET	1297

Fuente: Propia

Tabla 4.22 Módulos de elasticidad esperados, obtenidos y error porcentual

	Módulo de la elasticidad teórico E_1 (MPa)	Módulo de elasticidad Obtenido en ensayos E_2 (MPa)	Error Porcentual %
Probeta 30% fibra de RPET	1142.84	1297.00	11.89
Probeta 20% fibra de RPET	1190.83	1251.00	4.81
Probeta 10% fibra de RPET	1243.02	3687.00	66.29
Probeta 30% fibra de vidrio	1232.76	3877.00	68.20
Probeta 20% fibra de vidrio	1254.39	4547.00	72.41
Probeta 10% fibra de vidrio	1276.79	3313.00	61.46

Fuente: Propia

4.6.2 PARA ENSAYOS DESTRUCTIVOS.

En base al análisis de los datos arrojados por la máquina de cargas cíclicas, se puede estructurar la siguiente tabla de resultados.

Tabla 4.23 .- Esfuerzo en el límite elástico, de fluencia y ruptura de todas las probetas.

Esfuerzos	RESINA POLYESTER 100%	RESINA REFORZADA					
		FIBRA DE VIDRIO			FIBRAS DE RPET		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%
En el límite elástico (MPa)	0.87	2.00	1.80	2.37	0.18	0.16	0.20
En el límite de fluencia (MPa)	1.03	2.14	2.04	2.44	0.91	0.59	0.44
En la ruptura (MPa)	1.35	2.26	2.23	2.75	1.07	0.93	0.55

Fuente: Propia

4.7 GRÁFICOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Los gráficos se constituyen en una de las herramientas que permiten analizar, con mayor claridad, los resultados obtenidos, más aun cuando se trata de un análisis comparativo.

4.7.1 DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

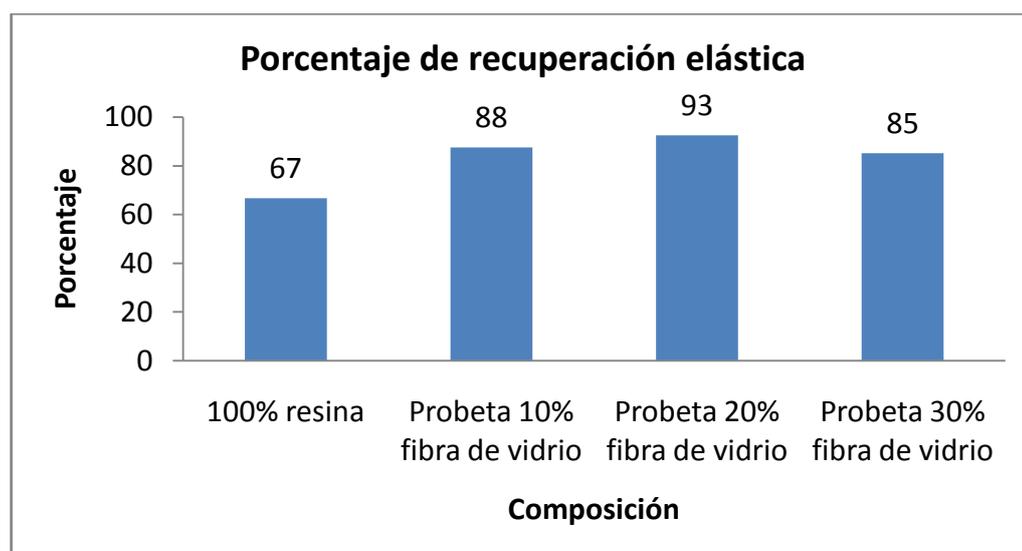


Figura 4.28.- Porcentajes de recuperación elástica de probetas reforzadas con fibra de vidrio.

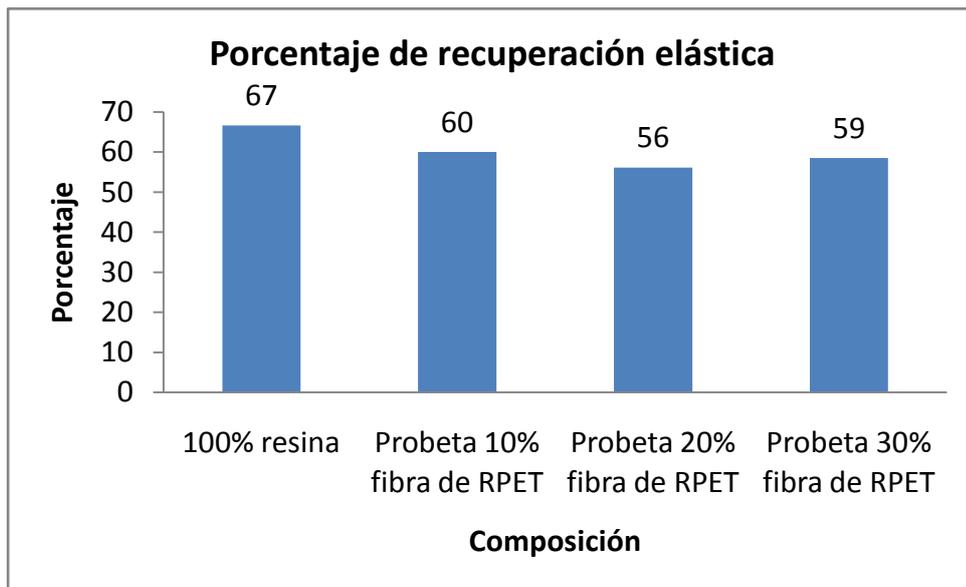


Figura 4.29.- Porcentajes de recuperación elástica de probetas reforzadas con fibras de RPET.

En base a la información presentada en los cuadros anteriores, se puede advertir que el aporte dado por la fibra de vidrio mejora la características elástica de las probetas; al contrario de la fibras de RPET que lejos de colaborar le resta propiedades elásticas a la resina.

4.7.2 DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS.

En las *figuras 4.30 y 4.31*, se puede apreciar que en los primeros 2 segundos la fuerza necesaria para deformar la probeta de 100% resina es inferior a la necesaria para deformar las probetas reforzadas con fibras, posterior a este tiempo, ésta se endurece, requiriendo para fallar una fuerza superior a la reforzada con fibras de RPET, pero inferior a la reforzada con fibra de vidrio.

En resumen, para un refuerzo del 10%, el RPET le resta resistencia a la resina, a diferencia de la fibra de vidrio que brinda un gran aporte para la resistencia de la probeta.

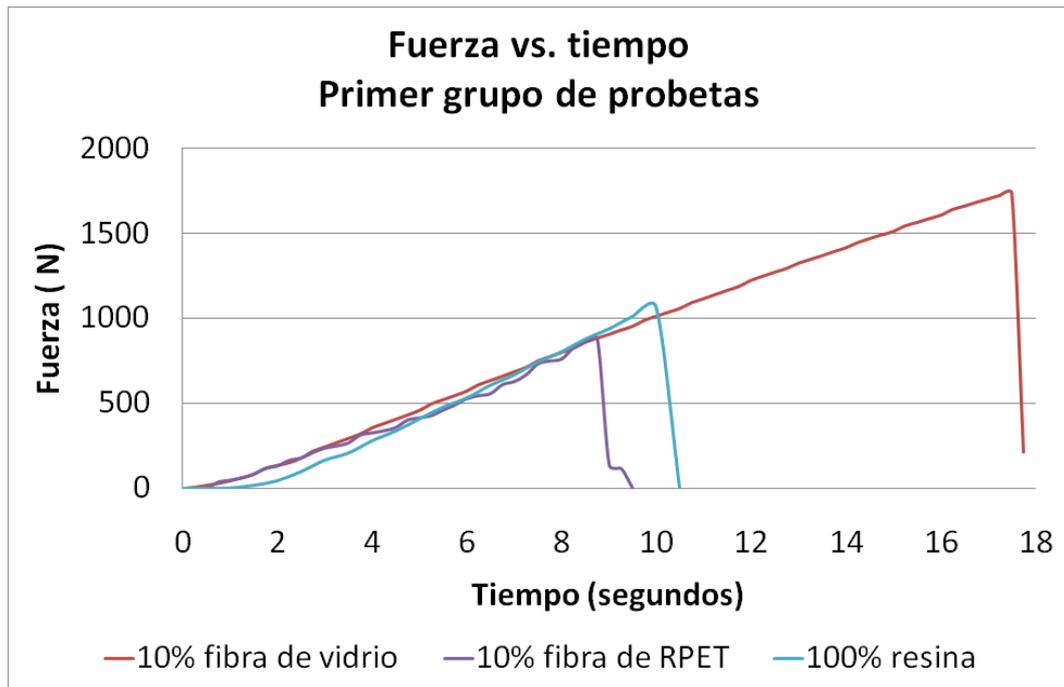


Figura 4.30.- Diagrama fuerza vs tiempo probetas 10% material de refuerzo, primer grupo de probetas.

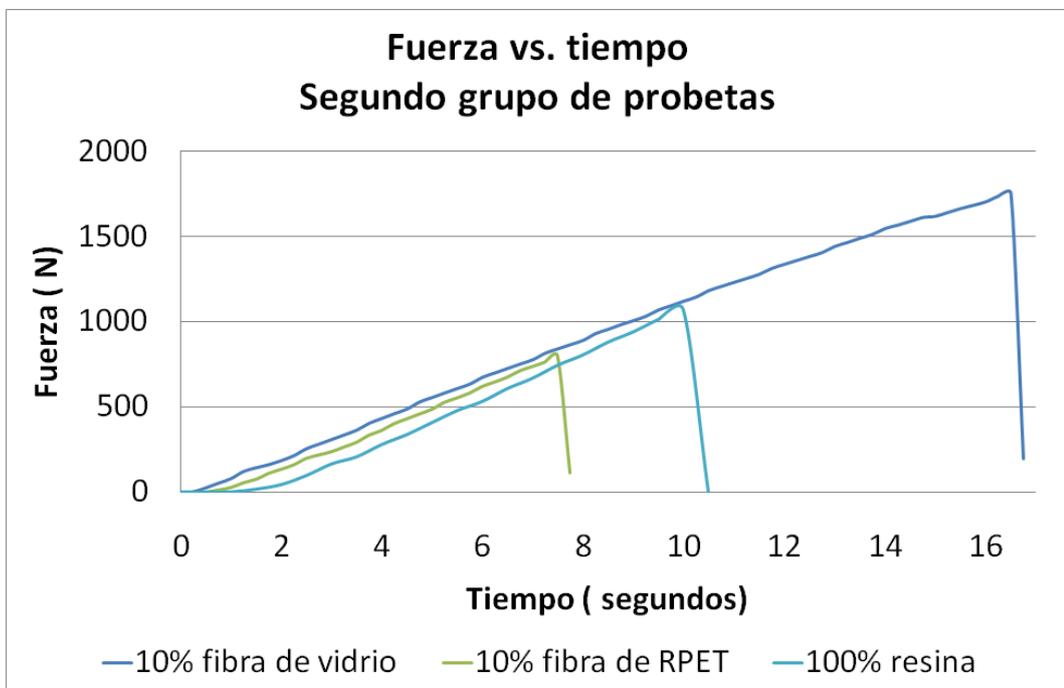


Figura 4.31.- Diagrama fuerza vs tiempo probetas 10% material de refuerzo, segundo grupo de probetas.

Las *figuras 4.32* y *4.33*, evidencian que las probetas reforzadas con fibra de vidrio presentan una resistencia a la deformación mayor a las otras, se aprecia claramente como la probeta de 100% resina se deforma más rápidamente en los 3 primeros segundos, pasado este tiempo disminuye su velocidad de deformación y la fuerza necesaria para deformarla se incrementa progresivamente (*figura 4.34*), dejando saber que el material tiende a endurecerse antes de fallar.

La probeta con 10% de RPET se rompe en menos tiempo que la probeta que no tiene fibras de refuerzo, en cambio la probeta reforzada con fibra de vidrio se opone notoriamente a la deformación, y prolonga apreciablemente, el tiempo que la probeta es capaz de estar sometida a cargas perpendiculares a la dirección de las fibras.

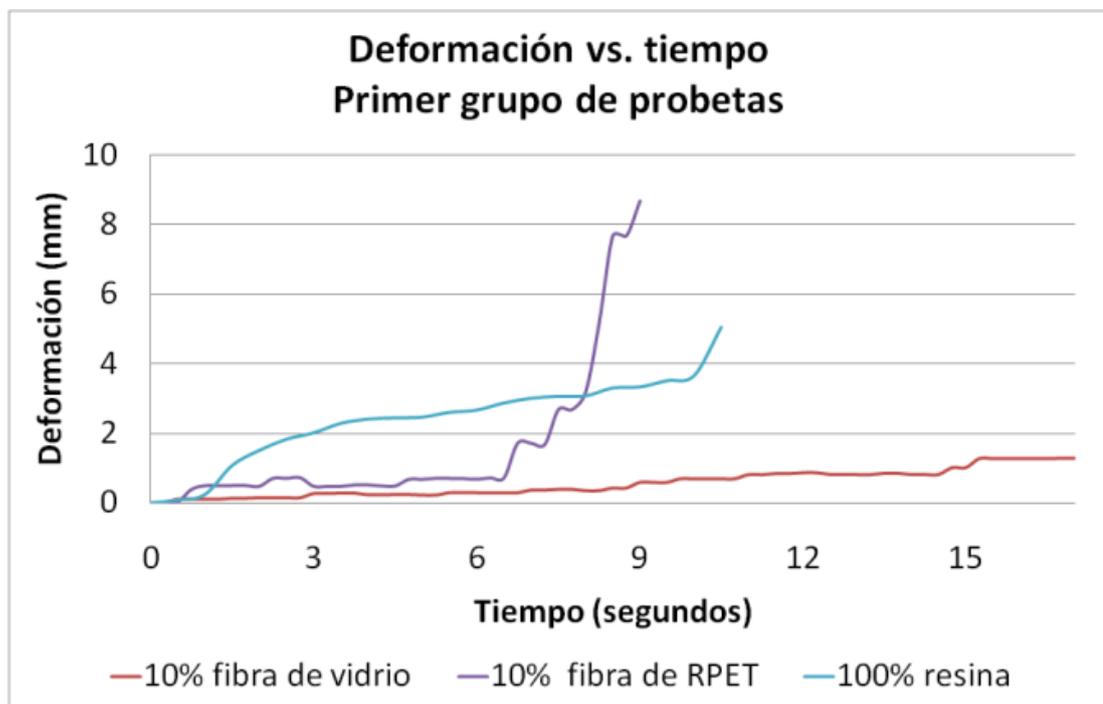


Figura 4.32.- Diagrama deformación vs tiempo de probetas con 10% material de refuerzo, primer grupo de probetas.

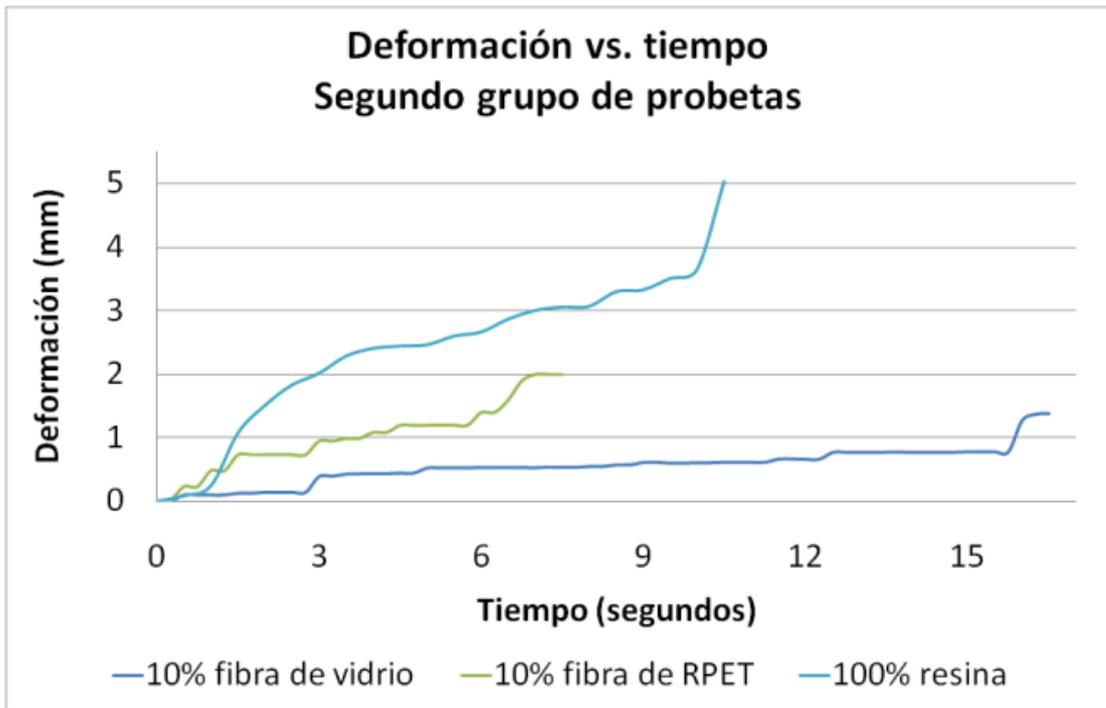


Figura 4.33.- Diagrama deformación vs tiempo de probetas con 10% material de refuerzo, segundo grupo de probetas.

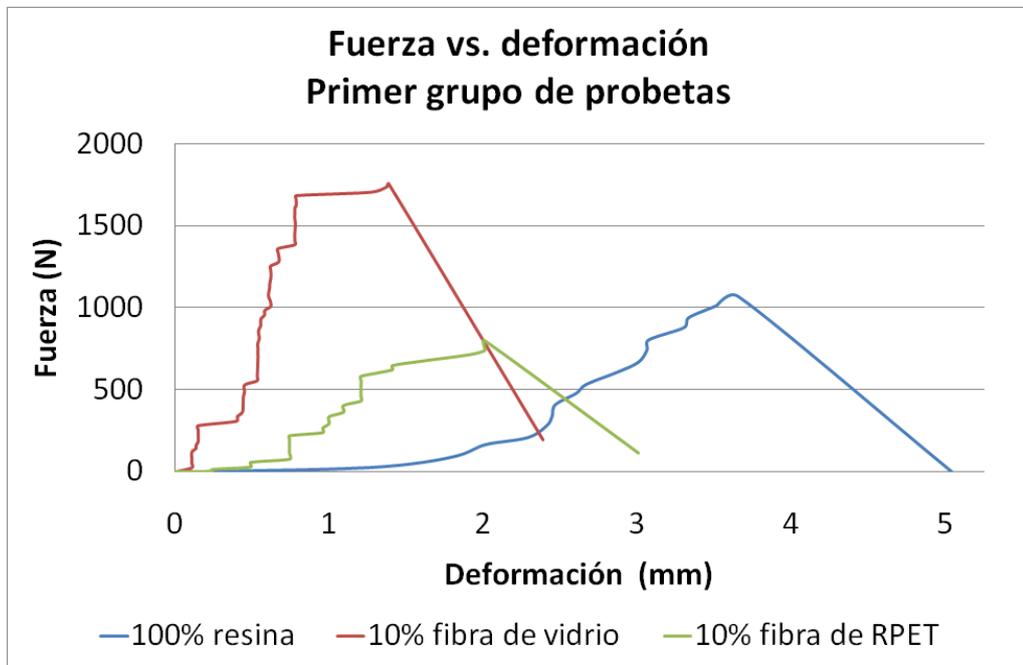


Figura 4.34.- Diagrama fuerza vs deformación probetas con 10% material de refuerzo, primer grupo de probetas.

Comparando, en base a las *figuras 4.34 y 4.35*, la fuerza con la deformación, se aprecia que la probeta reforzada con fibra de vidrio se deforma menos y ofrece mayor resistencia, es decir, la fuerza necesaria para romperla es mayor. La probeta con RPET se deforma más que la reforzada con fibra de vidrio y la fuerza necesaria para romperla es menor que la de las otras probetas. La probeta de 100% resina se deforma más fácilmente en los primeros 2 segundos, entonces, empieza a requerir una mayor fuerza para ser deformada, alcanzando una resistencia última mayor que la probeta resforzada con RPET.

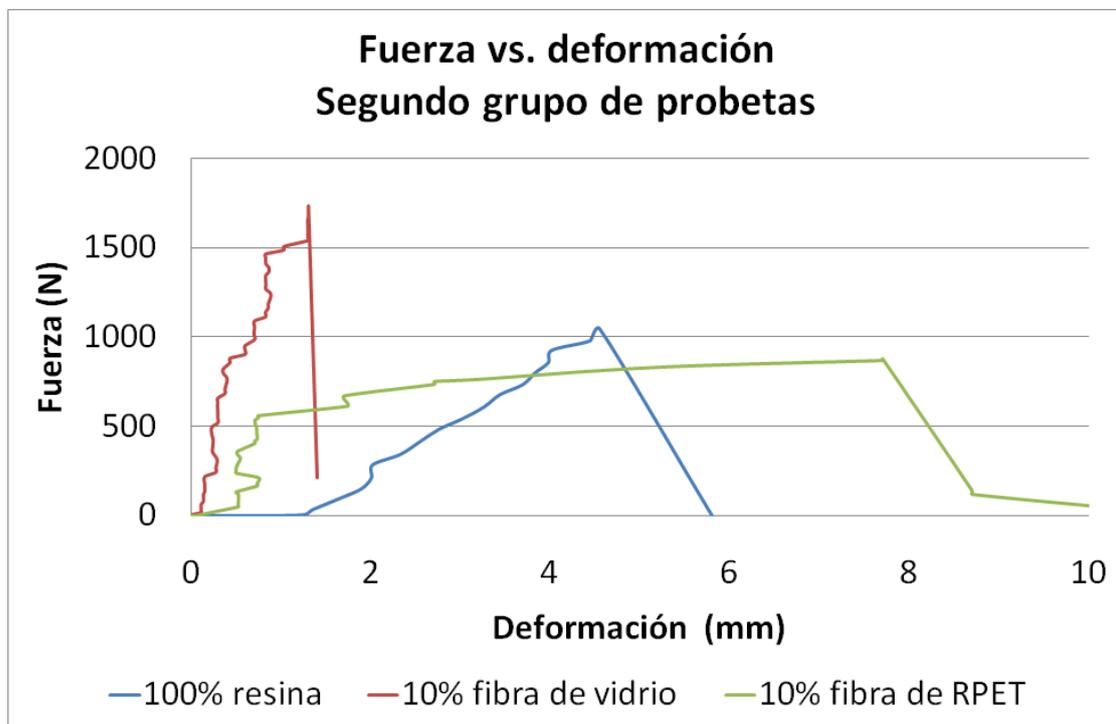


Figura 4.35.- Diagrama fuerza vs deformación probetas con 10% material de refuerzo, segundo grupo de probetas.

En las *figuras 4.36 y 4.37*, las probetas reforzadas con un 20 % de fibra de vidrio resisten más del doble de lo que las probetas reforzadas con fibras de RPET, al parecer el RPET debilita a la matriz.

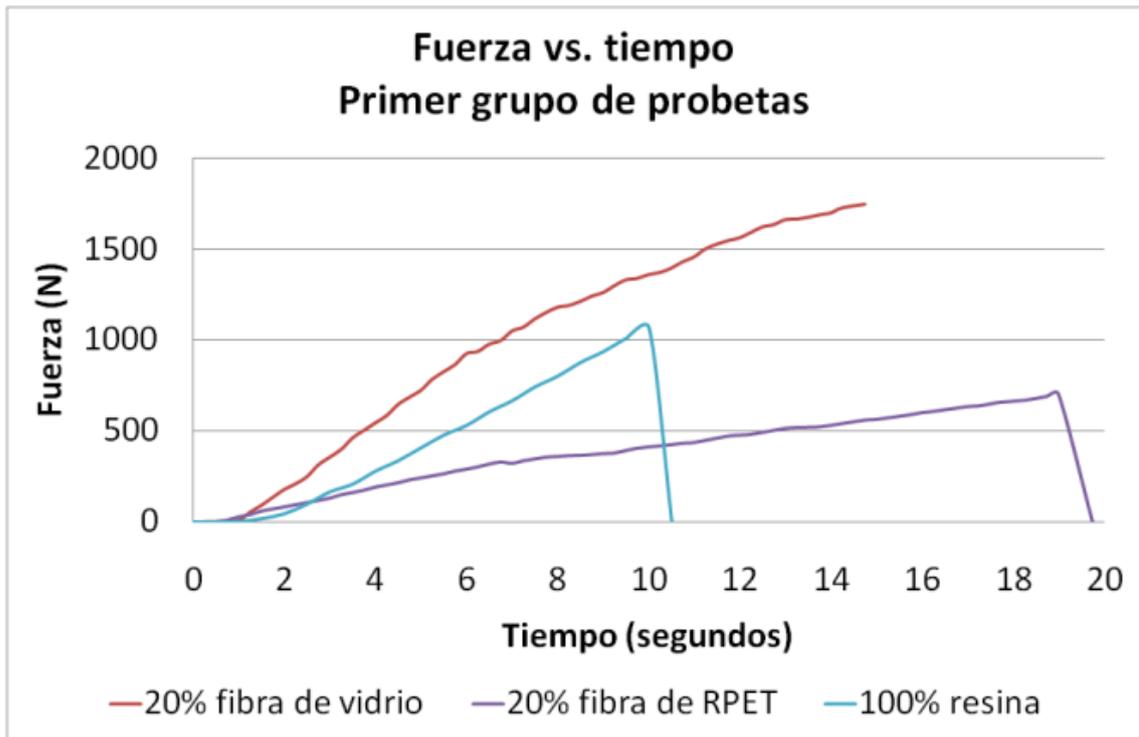


Figura 4.36.- Diagrama fuerza vs deformación probetas con 20% material de aporte, primer grupo de probetas.

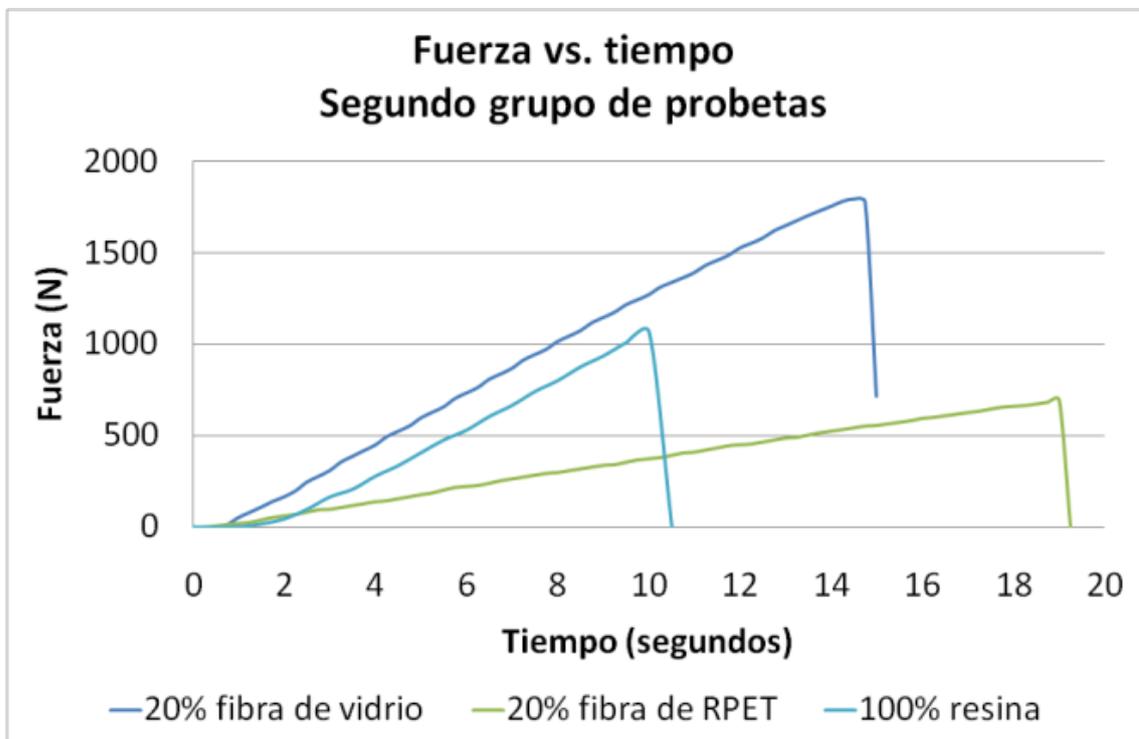


Figura 4.37.- Diagrama fuerza vs deformación probetas con 20% material de aporte, segundo grupo de probetas.

Analizando las *figuras 4.38 y 4.39*, la fibra de vidrio incrementa la resistencia de la viga, el RPET le brinda mayor flexibilidad prolongando su falla, pero disminuyendo su resistencia.

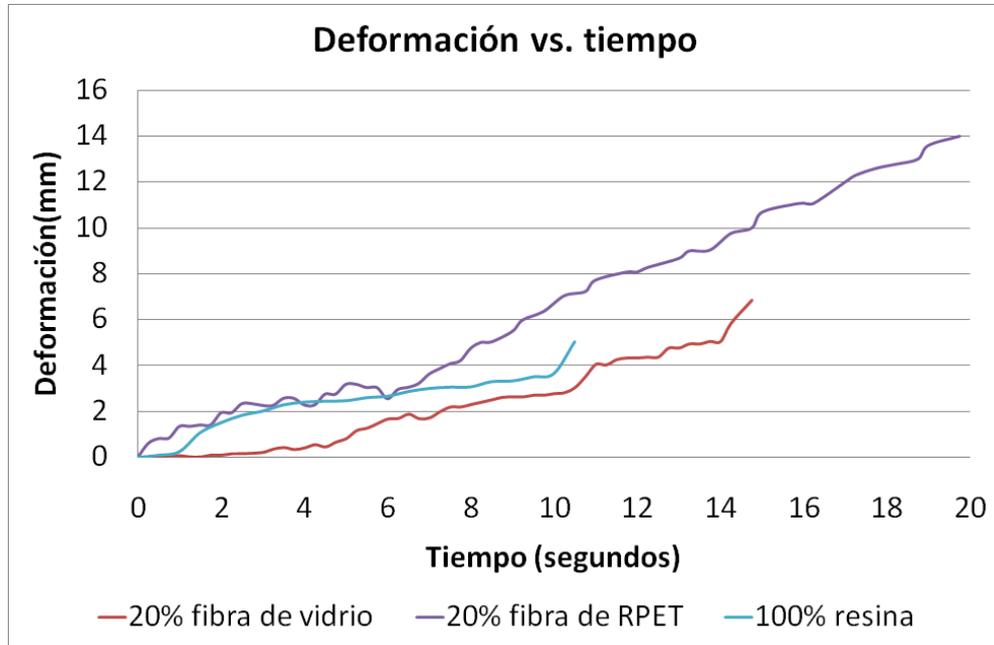


Figura 4.38.- Diagrama deformación vs tiempo probetas con 20% material de refuerzo, primer grupo de probetas.

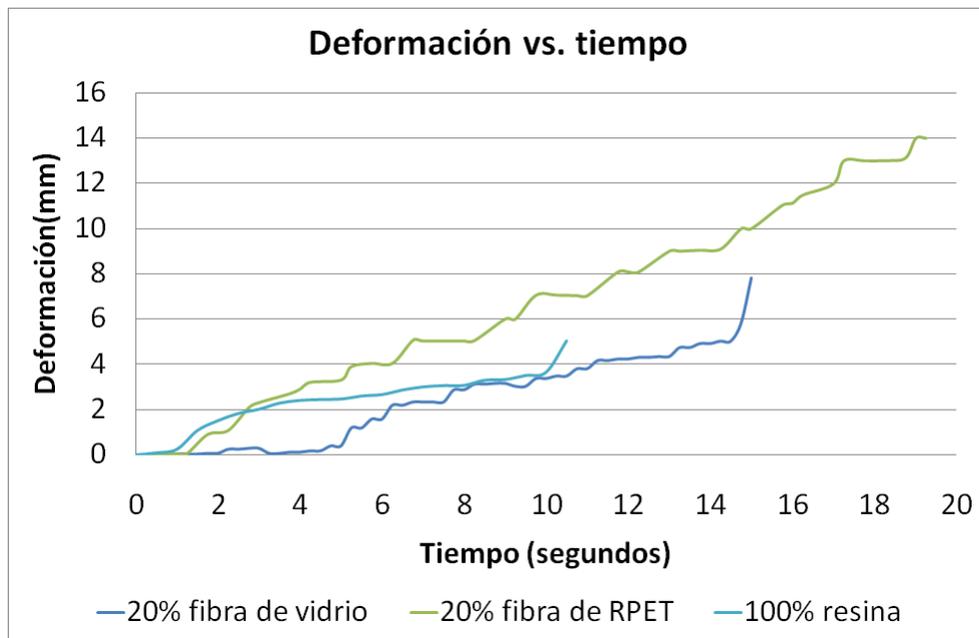


Figura 4.39.- Diagrama deformación vs tiempo probetas con 20% material de refuerzo, segundo grupo de probetas.

Según las *figuras 4.40 y 4.41* la resistencia de las probetas reforzadas con fibra de vidrio, incrementa con una mayor cantidad de material de refuerzo.

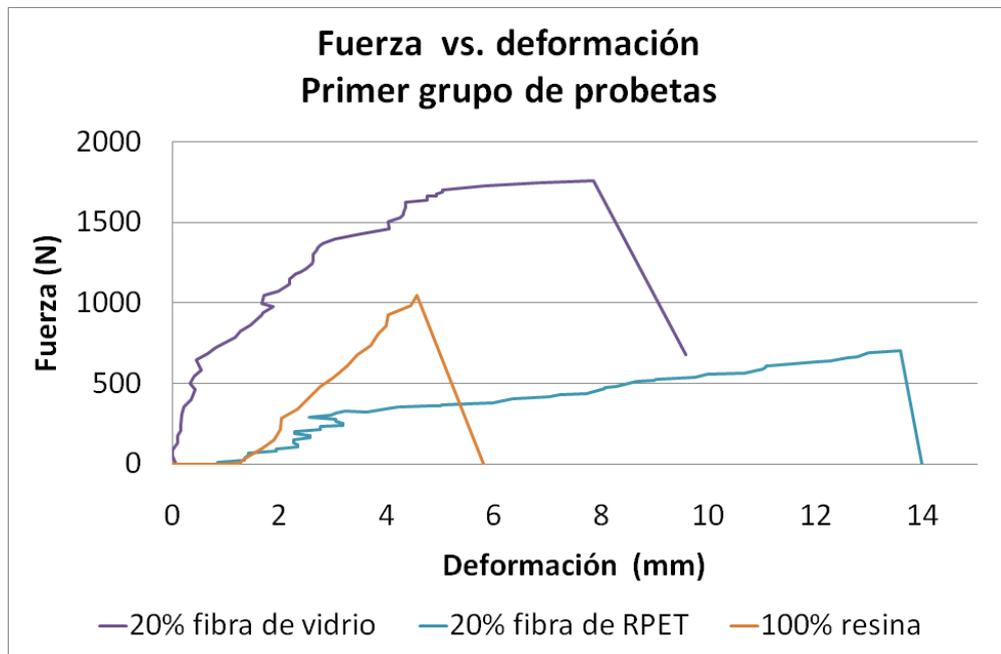


Figura 4.40.- Diagrama fuerza vs deformación probetas con 20% material de refuerzo, primer grupo de probetas.

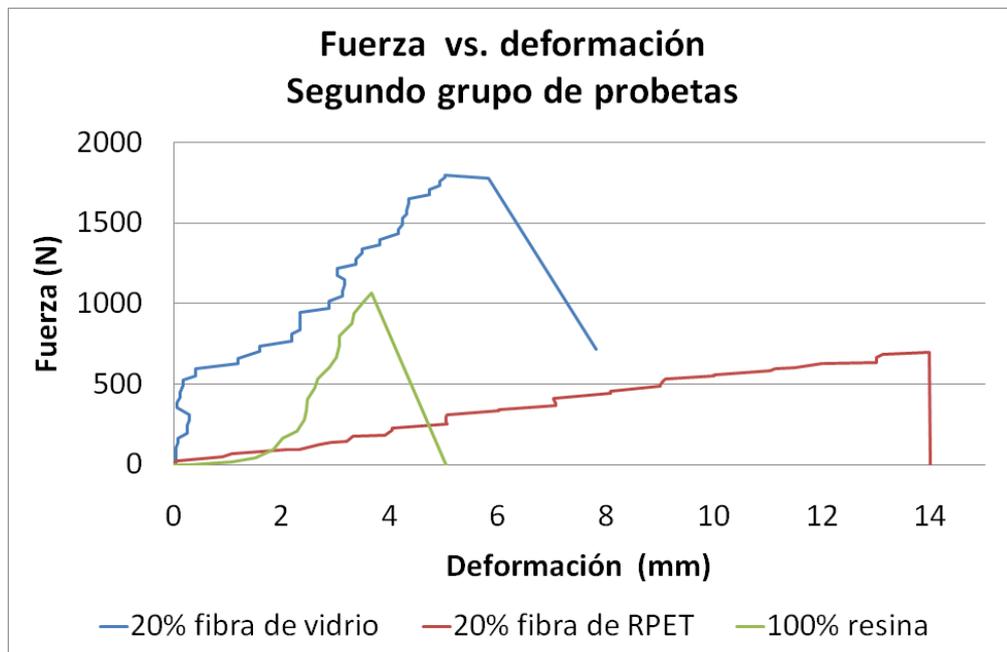


Figura 4.41.- Diagrama fuerza vs deformación probetas con 20% material de refuerzo, segundo grupo de probetas.

Las figuras 4.42 y 4.43, muestran como las probetas reforzadas resisten incrementos similares de fuerza en los 4 primeros segundos, es decir, se comportan de forma similar, al finalizar este tiempo, las probetas reforzadas con fibras de RPET empiezan a fallar.

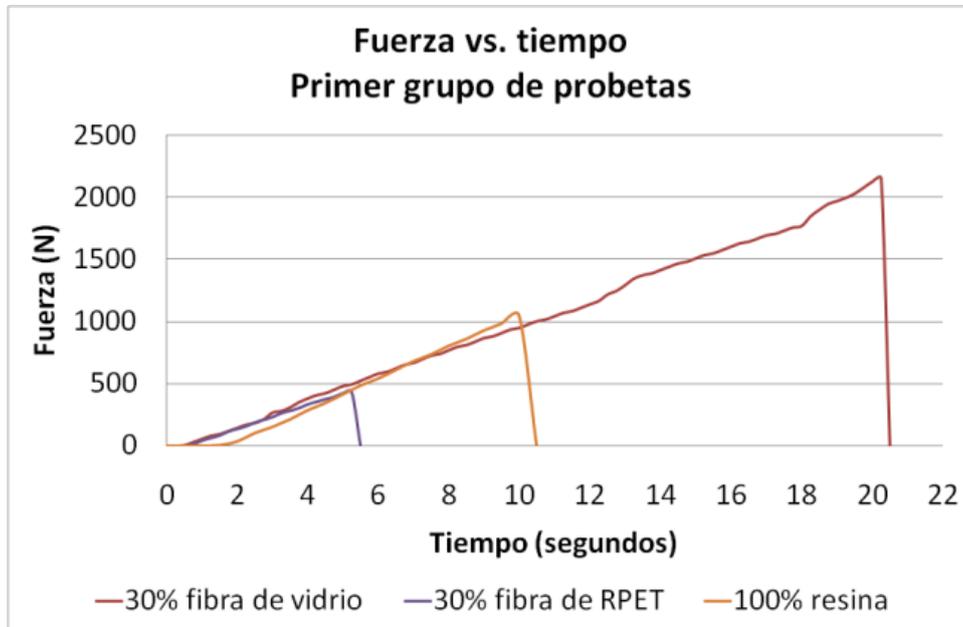


Figura 4.42.- Diagrama fuerza vs tiempo probetas con 20% material de aporte, primer grupo de probetas.

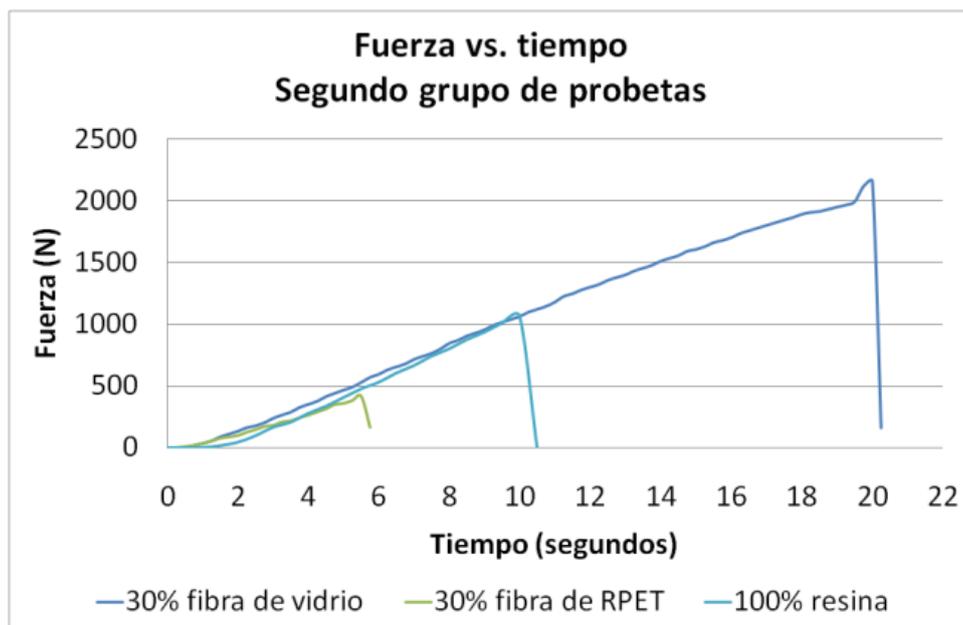


Figura 4.43.- Diagrama fuerza vs tiempo probetas con 20% material de aporte, segundo grupo de probetas.

Las figuras 4.44 y 4.45, muestra como una concentración del 30 % de material de refuerzo aumenta la resistencia de las vigas, en proporciones distintas para cada material.

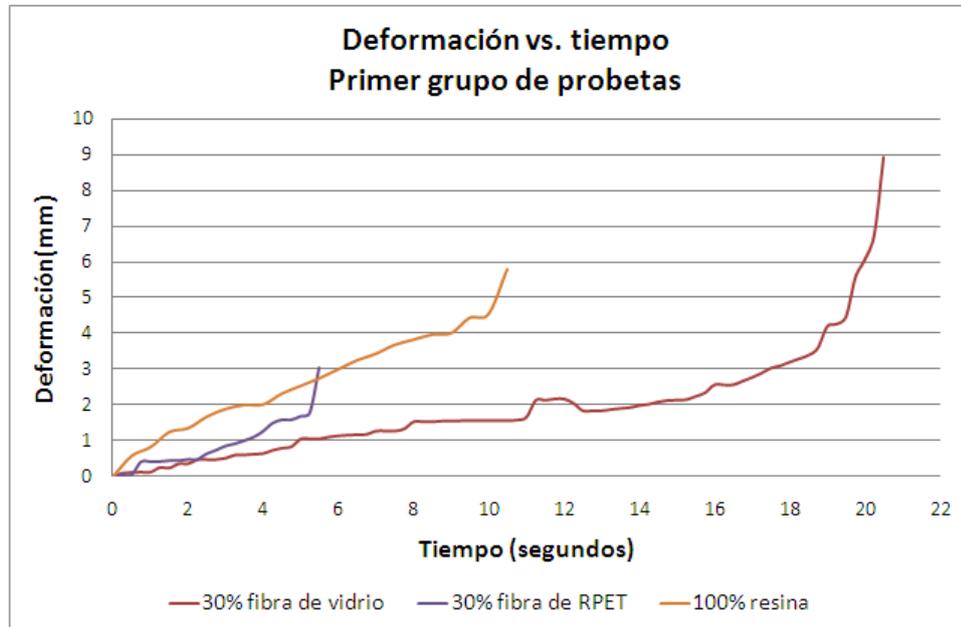


Figura 4.44.- Diagrama deformación vs tiempo probetas con 30% material de refuerzo, primer grupo de probetas.

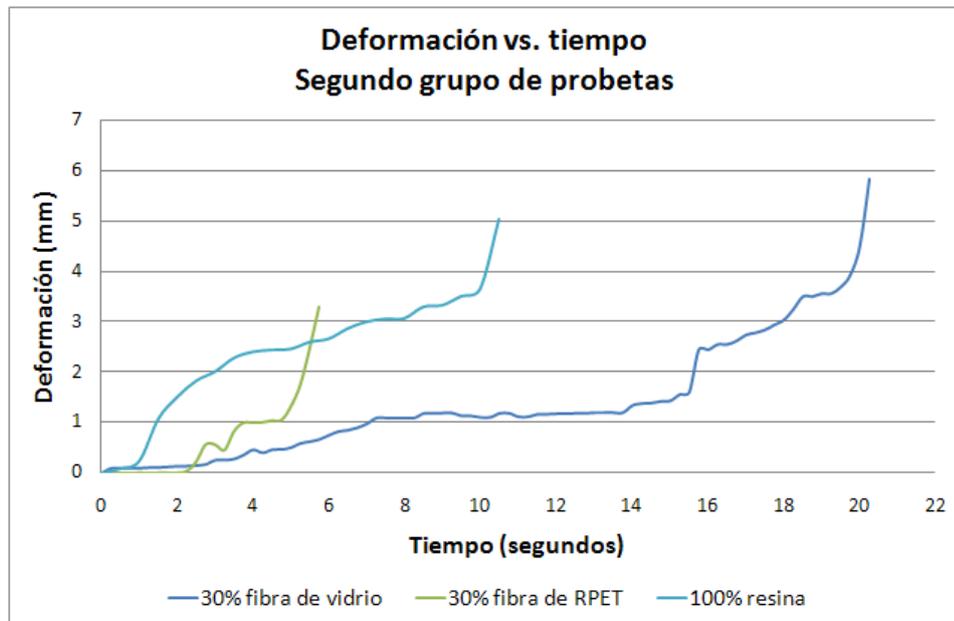


Figura 4.45.- Diagrama deformación vs tiempo probetas con 30% material de refuerzo, segundo grupo de probetas.

En la *figura 4.46* y *4.47*, la fibra de vidrio permite que el material sea más flexible y resistente.

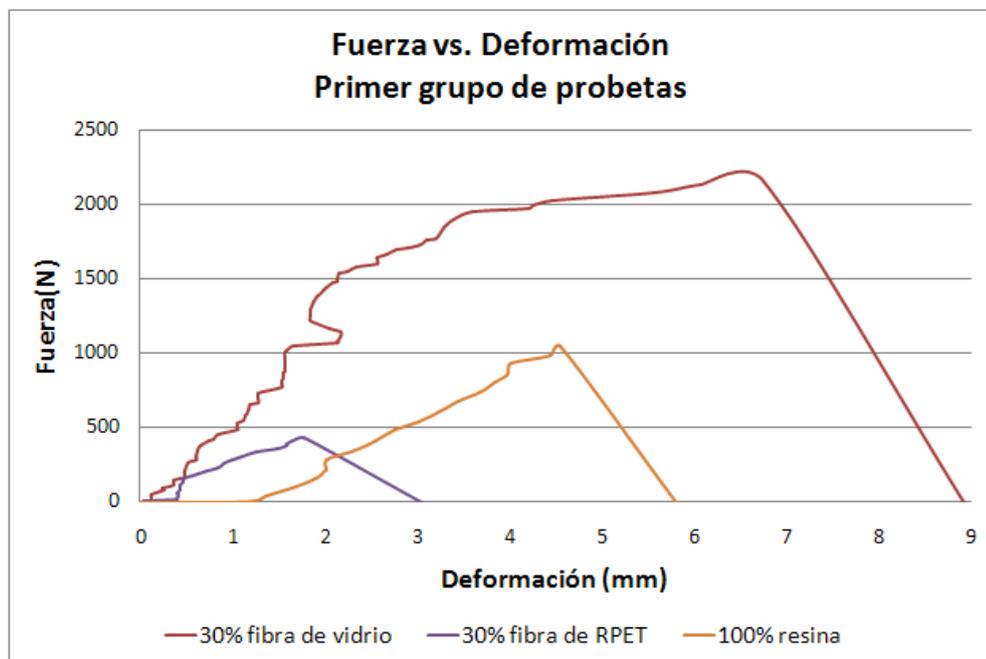


Figura 4.46.- Diagrama fuerza vs tiempo probetas con 30% material de aporte, primer grupo de probetas.

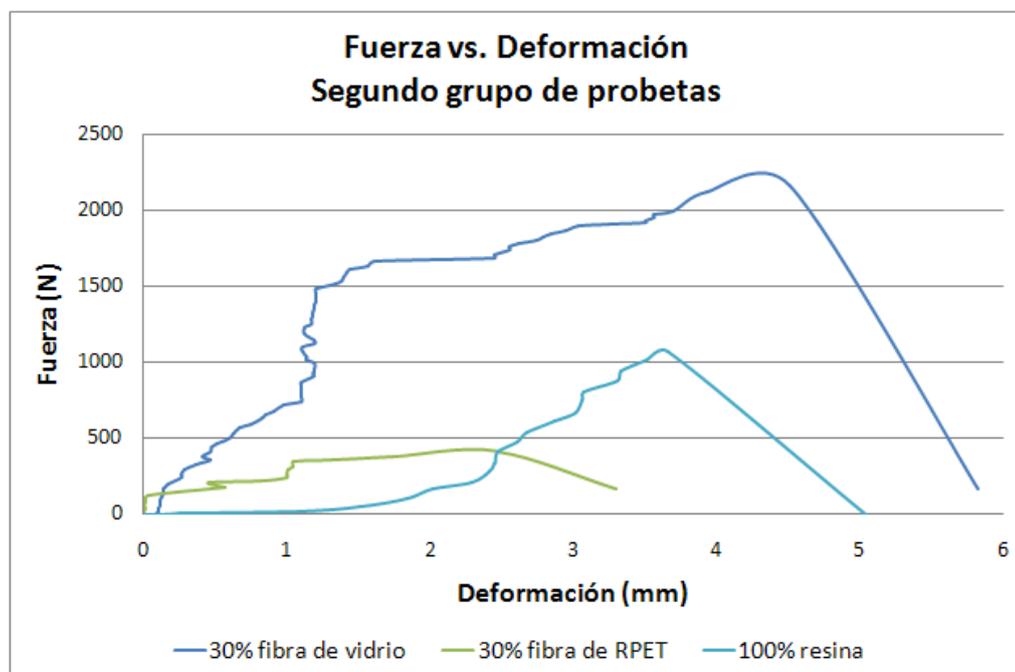


Figura 4.47.- Diagrama fuerza vs tiempo probetas con 30% material de aporte, segundo grupo de probetas.

En la *figura 4.48* y *4.49*, los porcentajes de fibra de vidrio como material de aporte, incrementa la resistencia y la flexibilidad del material.

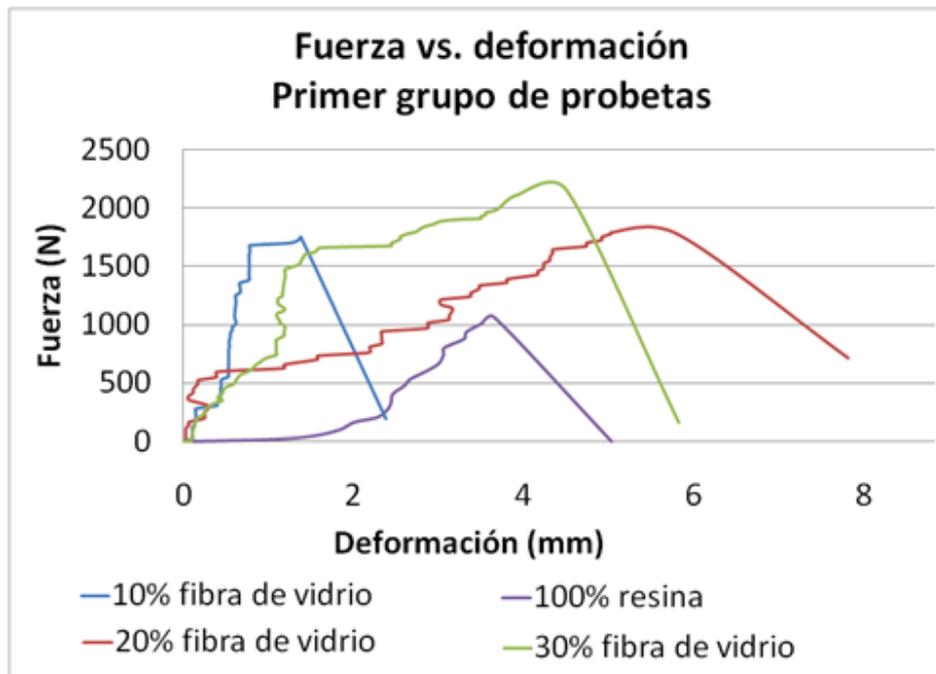


Figura 4.48.- Diagrama comparativo fuerza vs deformación probetas con distinto porcentaje de fibra de vidrio como material de refuerzo, primer grupo de probetas.

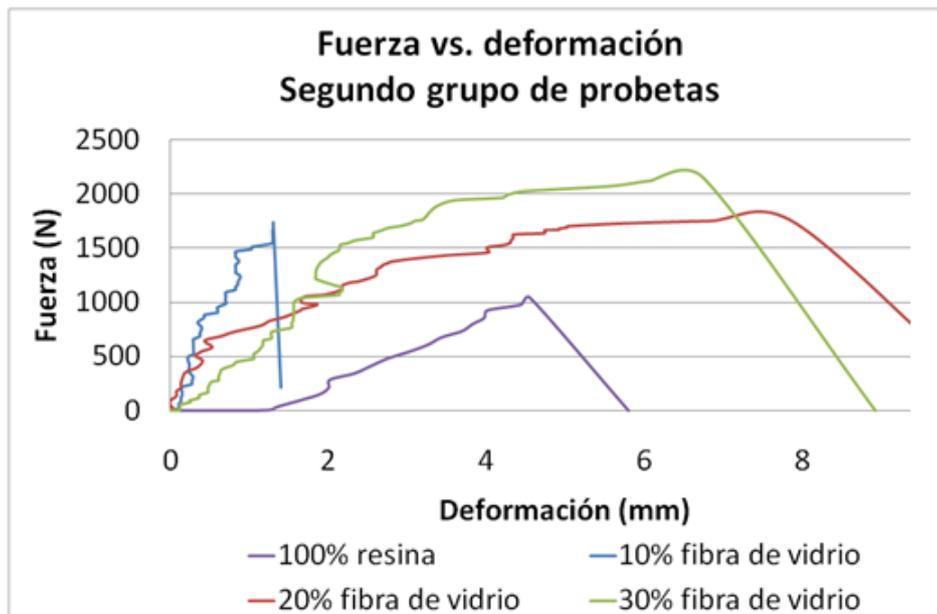


Figura 4.49.- Diagrama comparativo fuerza vs deformación probetas con distinto porcentaje de fibra de vidrio como material de refuerzo, segundo grupo de probetas.

En la *figura 4.50* y *4.51*, un 20 % de aporte de fibras de RPET le proporciona flexibilidad a la probeta.

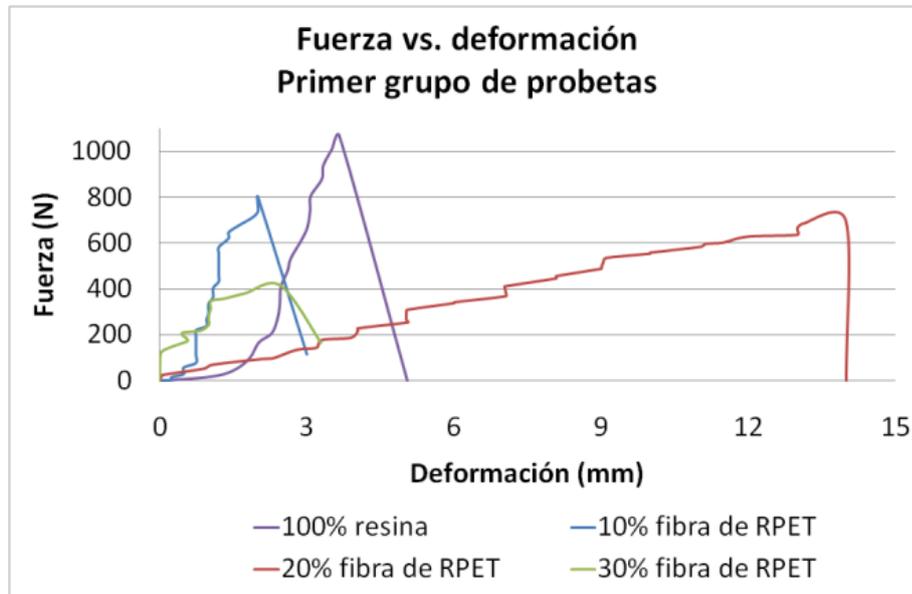


Figura 4.50.- Diagrama comparativo fuerza vs deformación probetas con distinto porcentaje de fibra de RPET como material de refuerzo, primer grupo de probetas.

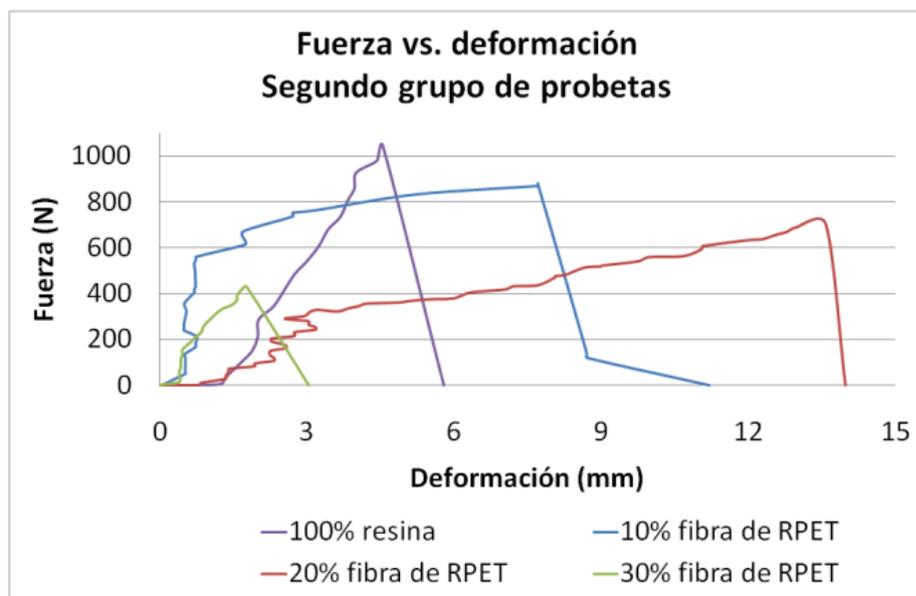


Figura 4.51.- Diagrama comparativo fuerza vs deformación probetas con distinto porcentaje de fibra de RPET como materila de refuerzo, segundo grupo de probetas.

Las *figuras 4.48, 4.49, 4.50 y 4.51* muestran que mientras mayor es el porcentaje de RPET, el material se debilita y su capacidad de deformación aumenta, el RPET le concede flexibilidad al material, pero disminuye notablemente su resistencia.