

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1.- RESUMEN Y CONCLUSIONES.

El objetivo del proyecto ha sido en primer lugar la modificación del útil de flexión existente en el laboratorio para la realización de ensayos de fatiga en Tracción-Compresión con probetas de tejido de material compuesto y dos condiciones impuestas en los extremos: empotramiento y articulación. Luego las rectas procedentes de estos experimentos serían comparadas entre sí, y con otra de Compresión-Compresión obtenida mediante ensayos de flexión en tres puntos.

Con respecto a la **modificación del útil de flexión**:

- Se pensó que la forma más apropiada de posibilitar el nuevo tipo de ensayo era agarrando el espécimen por ambas partes, superior e inferior, tanto en el centro como en los extremos.
- Asimismo, la mejor manera de reproducir las dos configuraciones deseadas en los extremos fue empleando unos pequeños cilindros de aluminio que se cortaron por la mitad aproximadamente: en el caso articulado se dispondrían uno frente a otro por su zona de tangencia, estando los extremos de la probeta entre ambos; en el empotrado, los extremos del espécimen se situarían entre el soporte y la cara plana de uno de los rodillos.
- Tras realizar el correspondiente diseño con CATIA y recibir la conveniente ayuda en el laboratorio, se procedió a la mecanización de las piezas.
- Una vez integrados todos los elementos necesarios, se observó en el primer ensayo dinámico que la sujeción de los rodillos era insuficiente, con lo que hubo que mecanizar los soportes a los que éstos se fijaban en su totalidad. Con la modificación el útil funcionó apropiadamente.

En relación a las **probetas**:

- Se construyeron dos paneles, el primero apilando once capas de tejido Z 19760 de donde se obtuvieron las probetas para el caso empotrado, y el segundo de diez capas del mismo, del cual se sacaron las probetas para el caso articulado. Los ensayos de flexión en tres puntos se hicieron con probetas restantes de uno y otro tipo.
- Los especímenes extraídos fueron todos rectangulares de dimensiones 25 mm x 100 mm, los primeros de espesor 2,3 mm y los segundos de espesor 2,1 mm aproximadamente. El ancho se escogió el máximo permitido por la distancia entre

tornillos para conseguir una mayor carga y una mejor adaptación al elevado rango de la máquina de ensayos, que era de 100 KN y se temía que hubiera fallos de precisión.

En relación a los **ensayos estáticos**:

. Procedimiento

- Se realizaron con control en desplazamiento a velocidad de 1mm/min, temperatura de 23º y luz o distancia entre apoyos de 50 mm, que sería la fijada para todos los ensayos.
- Se registró la evolución de la carga frente al desplazamiento, tomándose como valor representativo de carga última la correspondiente al primer pico y observándose pérdida de rigidez tras superarse cada pico relativo de carga.

. Resultados

La rotura siempre se originó y comenzó a desarrollarse en la parte inferior, que era la sometida a tracción. Esto se debió a que el módulo de Young longitudinal a tracción era mayor que el de compresión, mientras que la resistencia era más alta en el segundo caso.

- En el caso empotrado las cargas fueron más elevadas, superando los 3 KN, y la flecha a la que se alcanzaron éstas menores, de 2,3 mm de media. Para el caso apoyado se obtuvieron valores de 1,8 KN y 3,3 mm aproximadamente, y en el articulado, realizado con probetas de menor espesor, la carga rondó los 1,6 KN y la flecha alcanzada los 3,6 mm. Esta diferencia es debida a las mayores restricciones que impone el caso empotrado, permitiendo mucha menos libertad y generando que las cargas necesarias para la rotura sean mucho mayores.
- Los valores de tensión última que se obtuvieron tras aplicar a las cargas halladas las fórmulas correspondientes al modelo de vigas fueron de 923,54 MPa, 1025,12 MPa y 1207,53 MPa para los casos empotrado, apoyado en tres puntos y articulado respectivamente. Esta divergencia se consideró excesiva, con lo cual se intentó explicar realizando convenientes modelos de elementos finitos que aproximaran lo que sucedió en la realidad y permitieran validar el modelo de vigas.

. Conclusiones del análisis

- Se puede decir que se ha dado validez al uso del modelo de vigas, ya que así lo ha confirmado la regularización de las tensiones en la zona central que nos han mostrado los análisis hechos con Patran. Con respecto a los valores de las tensiones últimas, hay veces que los valores se acercaban más, como en los casos articulado y en tres puntos, y otras menos como en el empotrado. Lo que no se ha podido explicar es la diferencia entre los 1205 MPa del caso articulado y los 923 MPa del empotrado.
- Por último hay que mencionar la diferencia entre los valores de tensión última hallados en ensayos de tracción longitudinales, entre 700 y 800 MPa, y los obtenidos en ensayos de flexión, bastante mayores. Esto pudo deberse a que en el primero todas las “subcapas” del espesor rompen a la vez a la misma tensión, mientras que en los segundos a medida que se desarrolla la grieta inferior y las “subcapas” más externas van rompiendo, las tensiones se van redistribuyendo hasta llegar a ese primer colapso correspondiente al primer pico de carga. Como ese pico de carga fue el que se relacionó con la rotura de la “subcapa” más externa, es posible que se haya producido una sobreestimación de las tensiones últimas.

En relación a los **ensayos dinámicos**:

. Procedimiento

- Tras la obtención de las tensiones de referencia, se aplicaron a éstas los porcentajes correspondientes y se hallaron las cargas que debían aplicarse en los diferentes experimentos.
- Mientras que en el caso empotrado las cargas de ensayo, en este caso semiamplitudes de la onda senoidal introducida, rondaron los 2 KN y la amplitud de los desplazamientos los 2 mm, en el articulado los valores estuvieron en torno a 1 KN y 4 mm. Con respecto al caso apoyado en tres puntos, las cargas estuvieron cercanas a 1,3 KN y los desplazamientos a 2,5 mm. Es lógico que los valores de carga fueran más altos y los de desplazamiento más bajos en el empotramiento, ya que se trata de condiciones mucho más restrictivas.
- El criterio para considerar que la probeta estaba rota fue que ya no soportara la carga que se había fijado en el ensayo. Ahora bien, en el caso empotrado se empleó como

condición para que terminase el ensayo que la amplitud de los desplazamientos superara el 50% de la existente en régimen permanente. Para los ensayos del caso articulado, por ser las amplitudes de desplazamiento mucho mayores, era inviable que se superara ese 50%, con lo cual el espécimen se consideró roto cuando ya, tras probar con varios “subensayos”, no alcanzaba la carga establecida.

- La amplitud de los desplazamientos de las mordazas, y por tanto de los extremos de las probetas, también estuvo directamente relacionada con la frecuencia. Las empotradas se ensayaron a 5 Hz, mientras que las articuladas y las apoyadas a 3 Hz. Hubo que reducir el número de ciclos por unidad de tiempo, ya que si no era imposible alcanzar las amplitudes de desplazamiento necesarias para llegar a las cargas deseadas.

. Resultados

- Con respecto a los desplazamientos se apreció que, según aumentaba el nivel de carga, la amplitud de éstos también aumentaban por lo general. Esto se debía a que para que la probeta alcanzara una carga mayor sus extremos tenían que desplazarse una longitud más grande y ésta por tanto someterse a una mayor flexión. También se observó, como ya se ha mencionado, que la amplitud de desplazamiento necesaria de las mordazas aumentaba a medida que la probeta se iba fragilizando.
- Con respecto a daños externos mostrados por los especímenes, en general éstos no eran muchos, sólo zonas astilladas e irregularidades en la superficie (superior e inferior) sobre la que se produjo la flexión continuada. Las probetas del caso articulado mostraban más signos externos de daño que las del empotrado.
- También se observaron al microscopio con aumentos x15 y x20 probetas pertenecientes a todos los niveles de carga, tanto para el caso empotrado como para el articulado. Los mecanismos de degradación observados fueron básicamente agrietamientos en la matriz y delaminaciones, aunque en algún caso se observó rotura de fibras. Hubo una tendencia común en ambos casos, y es que para el nivel más bajo de carga, 55%, se redujeron notablemente. En el caso articulado se vio un mayor número de grietas, ya que la flexión era mucho más acentuada que en el empotrado. Éstas se encontraban situadas en zonas más cercanas a la superficie en el caso articulado por estar sometidas a tensiones más extremas, aunque en el empotrado no ocurrió lo mismo y las grietas atravesaban la probeta por su zona central. De todas formas lo que se observó es lo que ocurría a través del espesor en las caras externas, sin poder saberse cuál era el estado interno de las probetas.

- En el caso de flexión en tres puntos, las pocas probetas que se ensayaron presentaron diferentes formas de rotura. Una de ellas, al 70% de la carga última, aguantó un millón de ciclos y se consideró vida a fatiga infinita.
- De los ensayos se obtuvieron los puntos que se representarían en gráficas S-N, una para cada caso. Luego se sacarían las rectas de regresión lineal, tanto dimensionales como adimensionales, que serían finalmente superpuestas.

. Conclusiones del análisis

- De la comparativa entre rectas dimensionales no se sacó mucho en claro, sólo que las pendientes de ambos casos de Tracción-Compresión eran muy parecidas, y que la del caso empotrado se encontraba bastante por debajo por presentar condiciones más restrictivas, con un número de ciclos menor para una tensión dada.
- Con respecto a las adimensionales, lo primero es que sólo bastaron cuatro probetas ensayadas a flexión en tres puntos para corroborar que la recta de Compresión-Compresión se encontraba por arriba de las otras dos. El hecho de que la pendiente fuera más pronunciada en Tracción-Compresión es debido a que la sensibilidad a fatiga aumenta a medida que la tensión media es más insignificante, viéndose este hecho en la mayor separación existente entre las curvas de vida constante en torno al eje de ordenadas.
- Asimismo, las rectas de Tracción-Compresión adimensionales se encontraban muy cerca la una de la otra, con pendientes muy similares. Esto quiere decir que tan representativa es una como otra para mostrar el comportamiento a fatiga correspondiente a un valor de R igual a -1.

7.2.- TRABAJOS FUTUROS.

Después de finalizar este proyecto, cumpliendo los objetivos establecidos y sacando un provechoso conocimiento, es procedente mencionar algunas líneas de trabajo futuro así como mejoras que se estiman oportunas:

En primer lugar se cree conveniente que se perfeccionara el modelado de los apoyos articulados, para que esa libertad de giro que los caracteriza estuviera más lograda y la comparativa entre los casos empotrado y articulado fuera más realista. Esto se podría hacer por ejemplo con rodillos giratorios, según se ha visto que es posible en estudios sobre las diferentes configuraciones en ensayos de flexión.

También se deberían repetir algunos ensayos que, por falta de probetas, no pudieron llevarse a cabo. Por ejemplo deberían hacerse más ensayos estáticos para aclarar la diferencia existente entre las tensiones de rotura estática. También habría que ensayar en flexión convencional en tres puntos a fatiga algunas probetas más para que la recta que representara su comportamiento fuera más fidedigna.

Asimismo se deberían construir unas curvas de diseño fiables por el lado de la seguridad, explicándose a continuación en qué consiste su construcción y finalidad.

Las rectas de ajuste, como se ha ido observando, indican una predicción del comportamiento medio del material en las distintas configuraciones. Sin embargo, los puntos correspondientes a los ensayos representan fallos ocurridos a niveles de tensión superiores e inferiores a los medios representados por las rectas. Por lo tanto es preciso establecer unos límites que contengan los intervalos donde es probable que se sitúen los puntos, siendo necesarias unas curvas de diseño fiable por el lado de la seguridad.

Según el tamaño de las muestras se usan un tipo u otro de límite, con rangos más conservadores a medida que disminuye el tamaño de la muestra. En el caso de muestras medianas (de 9 a 11) se emplean los límites de predicción, los cuales vienen dados por ecuaciones de rectas que dependen del porcentaje de probabilidad que se fije. Como curvas S-N de diseño se tomarían los límites inferiores, que suponen una predicción del fallo a fatiga por el lado de la seguridad.

Al mismo tiempo, existe otra forma más simple de obtener las curvas de diseño, y sería la siguiente: halladas las rectas adimensionales, éstas serían multiplicadas por el mínimo valor de resistencia estática a tracción que se hubiera obtenido. Para obtener la curva de diseño correspondiente al caso de Tracción-Compresión sería indiferente la recta que eligiéramos, ya que ambas serían satisfactorias para diseñar por el lado de la seguridad un elemento estructural hecho de este tipo de tejido que se encontrara sometido a un estado de fatiga con una configuración de $R=-1$.

Finalmente, para terminar de caracterizar a fatiga este tejido, se deberían cotejar los resultados obtenidos en ensayos de fatiga en Tracción-Tracción con los de este proyecto, haciendo algunos ensayos más con otros valores de R para obtener así el Diagrama de Vida Constante completo.