

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1.- INTRODUCCIÓN.

Una vez obtenidos y presentados convenientemente todos los resultados se procedió a el análisis de éstos para poder sacar las correspondientes conclusiones. En lo que sigue se dará un tratamiento adecuado a lo desprendido de los experimentos, tanto de los estáticos como de los dinámicos.

En primer lugar se analizarán detalladamente los resultados obtenidos en los ensayos estáticos para los tres casos bajo estudio. De éstos se desprendió cierta divergencia en los valores de tensión última media que se obtuvieron fruto de aplicar las ecuaciones del modelo de vigas a los valores de carga última de cada ensayo y sacar el promedio. Mientras en el caso empotrado se obtuvo un valor de **923,54 MPa**, en el articulado éste fue igual a **1207,53 MPa**, y en el ensayo de flexión convencional en tres puntos la tensión media se encontraba entre ambos, era **1025,12 MPa**.

Para analizar la validez del modelo de vigas se crearon una serie de modelos de elementos finitos con el programa Patran. Pese a tratarse de modelos sencillos, se intentó que se aproximaran lo máximo posible a la realidad y se fijó un tamaño de elementos de 0,1 mm. Se buscaría que en la zona de interés, la que se encuentra alrededor del centro de la probeta, las tensiones estuvieran regularizadas y dependieran de a qué altura se encontraran del espesor. Ciertamente es imposible conocer con exactitud el estado tensional que tuvo lugar en las diferentes probetas ensayadas, pero estos modelos nos permitirían saber cuan fidedignas eran las aproximaciones realizadas.

Los modelos fueron representaciones en el plano xy donde se mostraba el espesor junto a la longitud del tramo de espécimen de interés. Esa superficie sería mallada con las dimensiones antes comentadas con elementos del tipo "quad4". Seguidamente se crearía un material ortotrópico en 2D con los siguientes valores de rigidez:

- **Módulo elástico longitudinal** $E_{11} = 62$ GPa, valor medio entre los límites inferior y superior encontrados en la ficha técnica del material, 56 y 67 GPa respectivamente.
- **Módulo elástico transversal** $E_{33} = 10$ GPa. Éste se halló buscando el valor del módulo en tablas de propiedades de la matriz, pues es ésta quien dirige este tipo de fallo. Se encontró como el módulo transversal en el plano $E_2 = 1,5$ Msi. [18]
- **Coefficiente de Poisson** $\nu_{13} = 0.3$, valor usual en material compuestos.
- **Módulo a cortadura intralaminar** $G_{13} = 4$ GPa.

Con este material y dándole la orientación adecuada se crearían las propiedades de un sólido en dos dimensiones ("2D solid") en deformación plana ("plane strain"). Se introducirían los casos de carga correspondientes a las diferentes condiciones de contorno en desplazamiento y se procedería a llevar a cabo los análisis. Antes de hacerlo de esta forma se había creado un elemento placa sobre el que se realizaba el apilado de las láminas, pero dado

que eran todas idénticas y que lo que convenía era estudiar qué ocurría a lo largo del espesor, se optó por este modus operandi.

Una vez sacadas las correspondientes conclusiones de los casos estáticos, se procederá a analizar los resultados dinámicos. Lo primero que se hará será representar los puntos obtenidos (tensión máxima y número de ciclos) en una gráfica S-N, aproximándolos a continuación con las pertinentes rectas de regresión lineal, una en cada caso. Éstas reflejarán lo más fielmente posible la distribución y la tendencia de estos valores. Asimismo se tratarán estos datos adimensionalizando las tensiones del eje de ordenadas con la tensión última para cada tipo de ensayo, pasando a representarse los ciclos soportados para cada nivel de carga y aproximando igualmente con rectas.

El objeto de la obtención de estas rectas será la verdadera razón de ser de este proyecto, es decir, la comparación de las halladas en ambos casos de Tracción-Compresión con la procedente del ensayo de flexión convencional en tres puntos, que se correspondería con el caso de Compresión-Compresión. Para realizar el estudio comparativo habrá que superponerlas tanto en el caso dimensional como en el adimensional, llegando a la conclusión de cuál será la más representativa del caso de Tracción-Compresión. También se comprobará la influencia de la tensión media en la vida a fatiga, pues cuando R sea igual a -1 la componente media será nula, y ya es sabido según se ha expresado en la sección 2.2.4 que a medida que el valor medio es más insignificante, la sensibilidad a fatiga se hace más grande y la pendiente de la recta es más pronunciada. Este efecto también se hacía visible en los Diagramas de vida constante, donde la separación entre las curvas es mayor en las zonas cercanas al eje de ordenadas.

Los puntos y las rectas en las gráficas serán hallados y representados con Excel en escala semilogarítmica.

6.2.- ENSAYOS ESTÁTICOS.

6.2.1.- Caso empotrado.

Los resultados de los ensayos estáticos correspondientes al caso con extremos empotrados se resumen en la tabla 6.1 para una mayor facilidad de análisis de los resultados obtenidos. Las características geométricas ya se mostraron en tablas anteriores, pero a pesar de ello vuelven a recogerse aquí. Además, la carga última en Newtons “P”, la tensión asociada en MegaPascales “S” y la flecha en mm “ δ ” para ese primer pico de carga.

ID	b (mm)	e (mm)	A (mm^2)	P (N)	S (MPa)	δ (mm)
Emp_1	25,05	2,33	58,36	3257,9	898,35	2,15
Emp_2	24,94	2,35	58,6	3484,51	948,72	2,4

Tabla 6.1: Resultados de los ensayos estáticos para el caso con extremos empotrados.

Seguidamente se muestran los resultados del análisis estructural llevado a cabo con Patran. La situación correspondiente al caso empotrado se modeló como la mitad de la sección frontal de la probeta, con 2,3 mm de espesor y 50 mm de largo. En ella se colocaron las condiciones de contorno en desplazamiento pertinentes: una zona de empotramientos en los nodos más superficiales a lo largo de 10 mm que representa las zonas de agarre en los extremos, con prohibición de todos los grados de libertad, y la condición de simetría en lo que sería el centro del espécimen, con prohibición de todos los grados de libertad exceptuando el movimiento de traslación en el eje “y”, donde se impondría un desplazamiento. Éste sería de 2,25 mm, media entre las flechas correspondientes a los picos de carga en las dos probetas ensayadas en el caso estático, de 2,15 y 2,4 mm.

Se habían intentado antes otras configuraciones para reproducir el empotramiento, como por ejemplo modelar sólo un cuarto de probeta y anular los grados de libertad de los nodos de las esquinas anteriores superior e inferior, pero claramente se trataba de un modelo mucho menos restrictivo, con lo que se concluyó que este era el más fidedigno.

Los diferentes colores corresponden a los diferentes intervalos de valores en MPa de la componente de tensión según el eje longitudinal a través del espesor, pudiéndose ver también la deformada del espécimen.

Aquí, debido a las restricciones que impedían el deslizamiento y el giro según z, aparecen tensiones de membrana en las zonas cercanas a los apoyos, de tracción arriba y de compresión abajo, alcanzándose ahí los valores más altos como puede comprobarse en la figura 6.1. Esto está relacionado con el cambio producido en el diagrama de momentos

flectores, que varía linealmente entre un mínimo en la zona de empotramiento y un máximo en el centro del espécimen. Es por ello por lo que aparecen tensiones nulas en toda la zona central del dibujo, correspondiéndose así mismo con un cambio en la curvatura de la deformada.

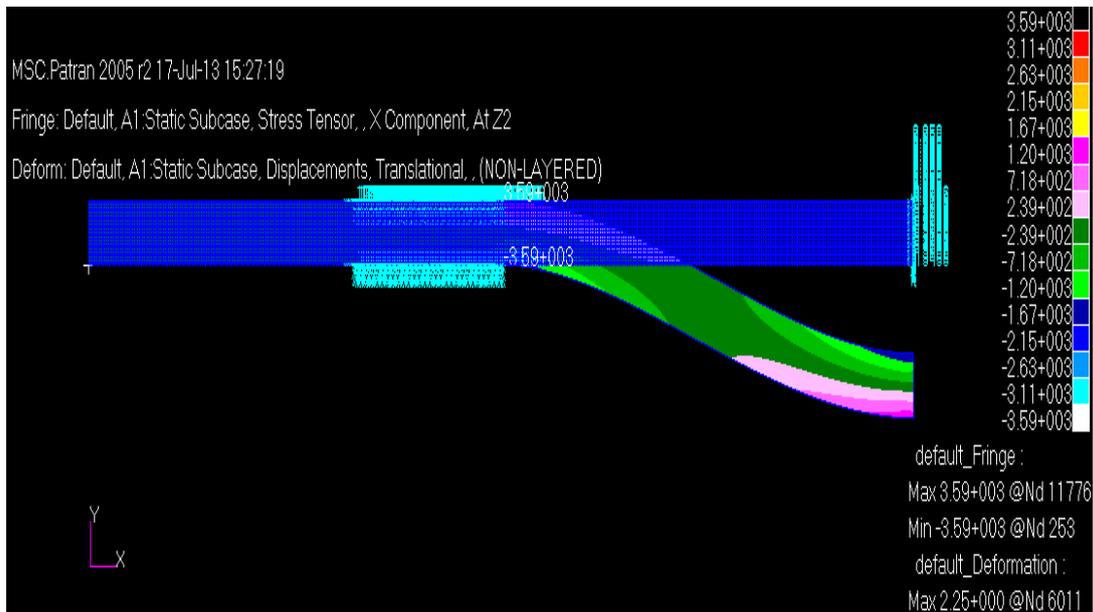


Figura 6.1: Modelo y resultados del análisis con Patran para el caso de flexión estática con extremos empotrados.

Se ha comentado que los valores más altos de tensión eran hallados en la zona de agarre, y se considera necesario aclarar un poco esta cuestión. Los valores hallados se corresponden con puntos singulares en los que la tracción y la compresión respectivamente tienden a infinito. Esas concentraciones de tensión no se corresponden con la realidad y no son tenidas en cuenta por el modelo de vigas, por lo que deben ser ignoradas al tratarse al mismo tiempo de un área despreciable en comparación con las dimensiones de la probeta. De todas formas siempre se puede recordar lo observado en los ensayos: la rotura se inicia y desarrolla en el centro de la probeta, y es sólo cuando se supera el primer pico de carga y se continúa haciendo descender a las mordazas cuando empieza a dañarse el espécimen por los laterales. Se ve en la figura 6.2 como se concentra la tensión en una de estas zonas, apreciando el elevado gradiente que tiene lugar.

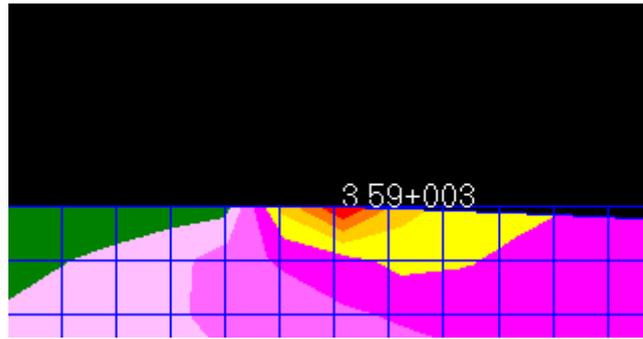


Figura 6.2: Detalle de la elevada concentración de tensiones en la singularidad localizada en la zona de agarre.

Los picos de tensión en la zona de agarre impedían estudiar con detalle lo que sucedía en el centro de la probeta, ya que los intervalos se veían modificados. Por tanto se seleccionó el área de interés, que no era otro que el central, y se analizó lo que sucedía en esa zona (figura 6.3).

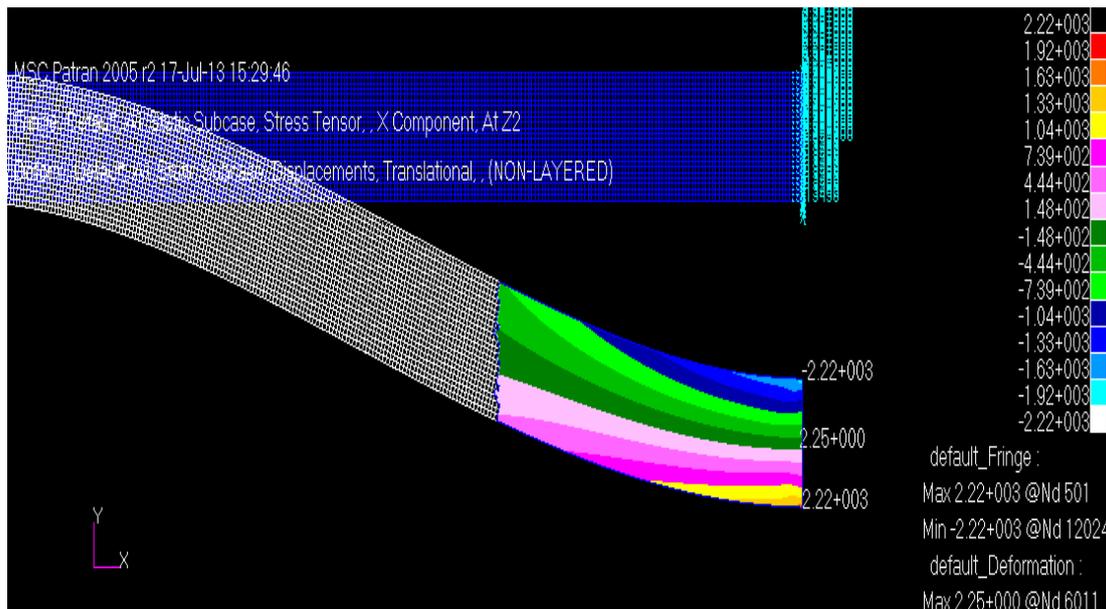


Figura 6.3: Distribución del estado tensional en la zona central del espécimen.

Mirando la imagen de la figura 6.3 se observan franjas de colores correspondientes a los diferentes intervalos de tensión. Se ve por lo tanto como las tensiones están completamente regularizadas en la zona de interés para cada nivel del espesor. Esto es acorde con el modelo de vigas empleado para calcular las tensiones a partir de la carga última, según el cual la tensión sólo dependería de la coordenada “y” en el caso en el que nos encontramos. La fórmula para la que se halla la tensión, al no existir momento según “y” ni esfuerzos axiales, queda como sigue:

$$\sigma = -\frac{M_z * y}{I_z} \quad (11)$$

A pesar de todo hay que aclarar qué valores deben escogerse como de tensión última, ya que ahora también se aprecian singularidades con picos de tensión en las esquinas superior e inferior. Debe quedar claro que esos puntos de tensión máxima no son representativos, y que los resultados obtenidos con el modelo de vigas serán contrastables con los procedentes del modelo de elementos finitos cuando las franjas de colores empiecen a alargarse una longitud considerable, ya que esto significaría que las tensiones están regularizadas para cada valor de y en una zona con las dimensiones suficientes como para considerar concluyentes nuestros resultados.

Tras analizar el dibujo se aprecia que la franja ámbar, a partir de 1330 MPa, es la primera visible, si bien se extiende una longitud mínima en comparación a lo que lo hará en casos posteriores. Más arriba se encuentra la amarilla, con valores de tensión entre 1040 MPa y el anterior, ésta ya ocupando una zona verdaderamente representativa. Por tanto se va a considerar como resultado un valor de tensión última igual a **1150 MPa**.

También se aprecia que la distribución de tensiones es antisimétrica, es decir, el valor de las tensiones de compresión en las capas más altas es el mismo que el de tracción en las inferiores que se encuentran a una distancia igual del espesor medio. Sin embargo, la rotura tenía lugar en la parte de debajo de la probeta, que es la que se encuentra a tracción.

Comparando los valores de resistencia y módulo elástico en el documento donde aparecen las características del material, se observa que mientras la resistencia media pasa de 640 MPa en tracción a 680 MPa en compresión, el módulo elástico se encuentra entre 56 y 67 GPa en tracción y entre 50 y 60 GPa en compresión, todos estos valores a temperatura ambiente.

Teniendo en cuenta que el pandeo no tiene lugar en un ensayo de flexión, puede ser que mecanismos de daño como el agrietamiento de la matriz tengan más tendencia a darse en el caso de tracción, y a ello puede deberse la diferencia entre los valores de resistencia última. Con respecto a la diferencia en los módulos elásticos, hay que recordar que el ensayo es con control en desplazamiento, con lo cual para uno dado las láminas de abajo estarían soportando más carga que las de arriba por ser mayor el módulo de Young. Por tanto aquí se encuentra una explicación al hecho de que la rotura se originara y desarrollara en la parte inferior del espécimen. No obstante no se debe olvidar que en la cara superior también se observaron algunos daños, aunque de menor calibre.

6.2.2.- Caso articulado.

En primer lugar, los resultados y valores relevantes de ambos ensayos se suman en la tabla 6.2, donde se muestran los valores de las mismas variables citadas en el apartado 6.2.1 para el caso empotrado.

ID	b (mm)	e (mm)	A (mm^2)	P (N)	S (MPa)	δ (mm)
Art_1	25,39	2	50,78	1603	1183,78	3,6
Art_2	25,37	2	50,74	1666	1231,27	3,5

Tabla 6.2: Resultados de los ensayos estáticos para el caso con extremos articulados.

A continuación se mostrarán los resultados de los modelos correspondientes realizados con Patran. Se hizo uno con apoyos articulados móviles, muy similar al de tres puntos, y a continuación otro con apoyos articulados fijos, bastante cercano al caso empotrado. La situación en la realidad no era exactamente ni una ni otra, ya que el desplazamiento horizontal estaba impedido pero sí existía cierto deslizamiento en los apoyos. Por ende se llegó a una situación intermedia que será descrita al final de este apartado.

Sólo se modeló en este caso el cuarto de la longitud correspondiente a la zona entre el apoyo y el centro, ya que se aplicaron condiciones de simetría y el cuarto libre de la probeta no se tuvo en cuenta, puesto que únicamente experimenta un giro como sólido rígido y en él las tensiones son nulas. El espesor era, al igual que en la realidad, de 2 mm.

Las condiciones del **apoyo articulado móvil** se modelaron como restricciones que sólo permitían el desplazamiento longitudinal y el giro alrededor de "z". Se aplicaron en los nodos externos situados a 25 mm del centro, en este caso los que se encontraban en las esquinas superior e inferior izquierda. La simetría se aplicó en el lado opuesto, restringiéndose todos los grados de libertad excepto el movimiento vertical según "y", en el que se introdujo un desplazamiento igual a la flecha a la que se alcanzó el pico de carga en las probetas. En este caso eran muy parecidas y se escogió una igual a 3,6 mm.

Como se observa en la imagen de la figura 6.4, en este primer modelo las tensiones aparecen regularizadas en toda la longitud prácticamente, y la tensión de la capa más baja estaría alrededor de 900 MPa en la rotura. El momento flector cambia desde un valor nulo hasta el máximo en el centro de la probeta.

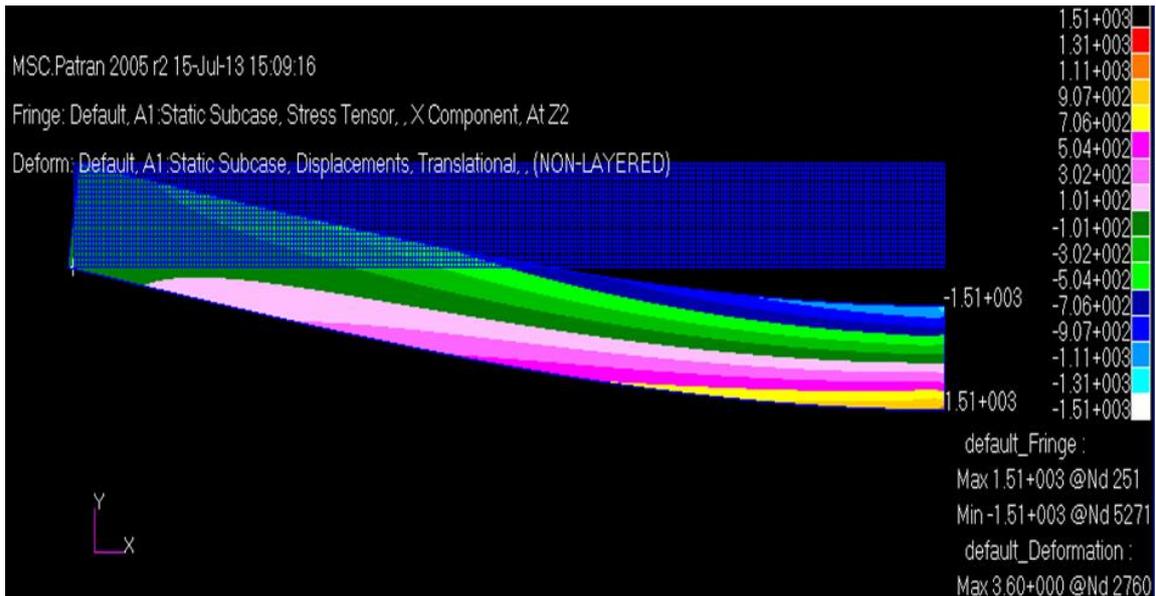


Figura 6.4: Modelo y resultados del análisis con Patran para flexión estática con apoyos articulados móviles.

Con respecto a los **apoyos articulados fijos**, éstos tan sólo permitían el giro alrededor de “z”, y se impusieron estas condiciones en los nodos superior e inferior izquierdos, siendo las condiciones de simetría las mismas que en el caso anterior. En la figura 6.5 se muestran las tensiones en casi toda la probeta exceptuando el extremo izquierdo, ya que es ahí donde aparecían los picos de tensión más elevados que impedían analizar con detalle el centro del espécimen.

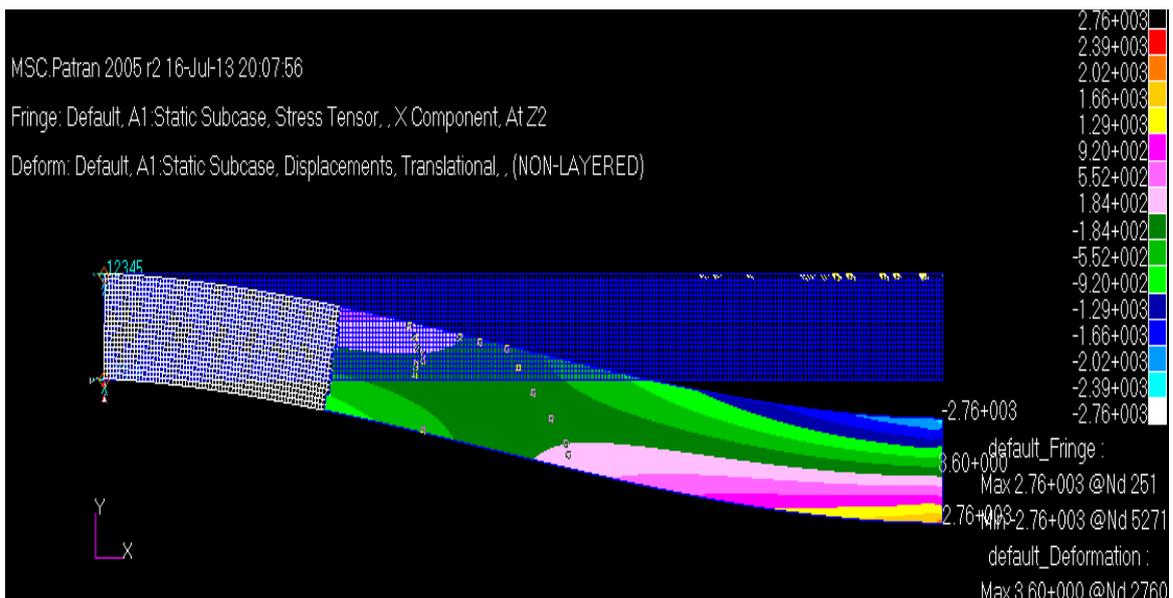


Figura 6.5: Modelo y resultados del análisis con Patran para flexión estática con apoyos articulados fijos.

Observando la figura 6.5 se observa también esa zona central de tensiones nulas, ya que los esfuerzos flectores se hacen nulos a ese nivel al igual que en el caso empotrado, viéndose también el cambio de curvatura antes mencionado. La tensión de rotura rondaría los 1600 MPa, y se aprecia como las tensiones de membrana por las condiciones antideslizantes hacen que aumenten los esfuerzos flectores y cortantes, y con ellos las tensiones (tal como se expresa en la sección 2.3.4). Hay que señalar que en la zona alrededor del centro de la probeta, parte derecha del dibujo, ya sí estaban regularizadas. Aunque se permitían los giros, el impedir los desplazamientos llevaba a simular casi un empotramiento, aunque obviamente con más libertades.

Finalmente se realizó el modelo intermedio, más realista. El nodo de la esquina inferior izquierda sólo tenía permitido el giro alrededor de z, mientras al superior se le aplicó un desplazamiento de 0,1 mm en el sentido positivo de x además de permitírsele el giro. Los resultados fueron los mostrados en la figura 6.6.

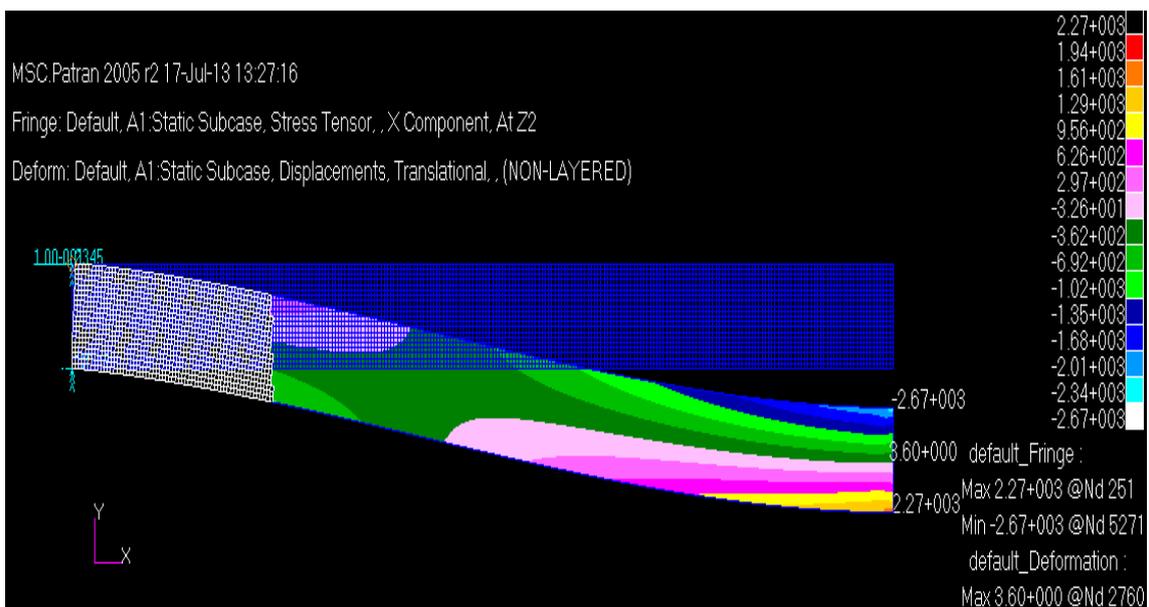


Figura 6.6: Modelo y resultados del análisis con Patran para flexión estática con el apoyo articulado inferior fijo y el superior con un desplazamiento horizontal impuesto de 0,1 mm.

Con respecto al porqué se eligió este valor para el deslizamiento, hay que decir que se probó con otros valores, imponiendo un desplazamiento de 0,5 mm primero en el nodo superior y luego en ambos. Lo que se sacó en conclusión de sendos modelos fue que para esos valores casi toda la probeta se hallaba en compresión y sólo en la zona inferior se alcanzaban valores positivos de tensión, siendo éstos no superiores a 500 MPa y por tanto insuficientes para llegar a la rotura. Hay que resaltar que durante el experimento no se observó ningún deslizamiento, con lo cual éste, que se presupone dado el tipo de apoyo, tuvo que ser

inapreciable. Por tanto se pasó a prescribir ese desplazamiento de 0,1 mm en el citado nodo, observándose resultados muy satisfactorios y verosímiles.

En este caso las tensiones de membrana en las zonas de agarre se han reducido, aunque las condiciones impuestas llevan a una distribución de tensiones parecida a la anterior.

Por último se debería observar la distribución de colores en la probeta deformada. En este caso la franja ámbar, que comienza a partir de los **1290 MPa**, se extiende una longitud bastante mayor que en el caso empotrado y marca el límite superior de la amarilla. Por tanto se va a escoger ese valor para la tensión de rotura, encontrándose bastante cerca de los 1205 MPa que dieron los resultados experimentales.

Como excepción hay que añadir que la distribución de tensiones no es antisimétrica, siendo los valores de compresión en las capas superiores algo mayores en valor absoluto que los de tracción en las inferiores. Esto es debido al desplazamiento impuesto de 0,1 mm. A pesar de ello la diferencia no va a considerarse significativa a la hora de dar validez al modelo de vigas.

6.2.3.- Flexión convencional en tres puntos.

Al igual que se ha hecho en los apartados anteriores, se recogen en la tabla 6.3 los datos y resultados de los dos ensayos llevados a cabo.

ID	b (mm)	e (mm)	A (mm^2)	P (N)	S (MPa)	δ (mm)
3ptos_1	25,13	2,33	58,55	1972,79	1084,52	3,5
3ptos_2	25,29	2,3	58,16	1722,64	965,72	3,3

Tabla 6.3: Resultados de los ensayos estáticos para el caso de flexión en tres puntos.

En este caso se modeló la flexión en tres puntos permitiendo los giros sobre z y el desplazamiento según x en los dos nodos extremos de la izquierda. Se modeló la parte del espécimen situado entre los apoyos y el centro, ya que la parte más externa no ejercía influencia alguna. En cuanto a condiciones de simetría se impuso un desplazamiento vertical hacia abajo de 3,4 mm, media entre las dos flechas registradas. El espesor en este caso fue de 2,3 mm y la longitud, por ser una cuarta parte de la total, de 25 mm.

Al llevar a cabo este ensayo realmente el apoyo central sólo debe ejercer la fuerza desde arriba, tangencialmente a la probeta. Aquí el desplazamiento hacia abajo fue aplicado en la zona central al igual que en los demás casos, mediante los dos semicilindros enfrentados que agarraban la probeta tanto por arriba como por abajo. Si bien es cierto que este sistema

de sujeción podría introducir ciertas tensiones frente al caso estándar de flexión en tres puntos, éstas serían despreciables y así se van a considerar.

Tal como se representa en la figura 6.6, en el ensayo de flexión en tres puntos las tensiones están regularizadas y sólo dependen de la coordenada “y” a lo largo de casi todo el tramo representado. La franja ámbar comienza aquí a partir de los **1020 MPa**, que es cuando termina la amarilla. Por lo tanto, al extenderse esta banda una longitud considerable, se decide coger este valor como representativo de la rotura a tracción de la capa inferior de la probeta, siendo casi igual al obtenido en los ensayos experimentales, que era 1025,12 MPa. La distribución de tensiones es antisimétrica.

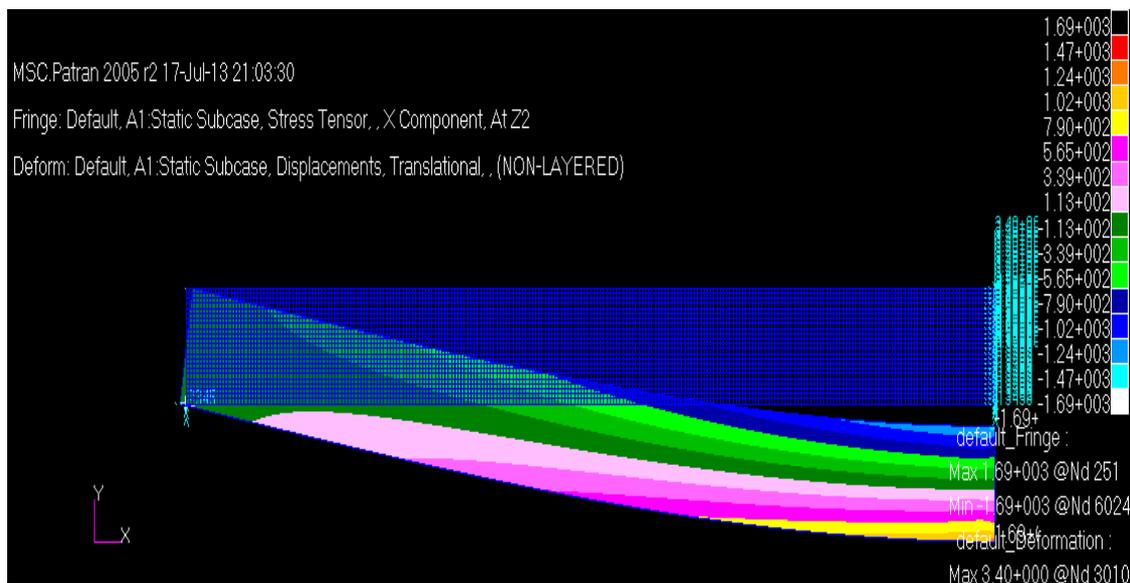


Figura 6.6: Modelo y resultados del análisis con Patran para flexión estática en tres puntos.

Por último, es importante analizar la diferencia entre estos valores hallados de resistencia a tracción en ensayos de flexión y los hallados en los ensayos estáticos longitudinales. En éstos últimos el estado tensional es uniforme, es decir, toda la sección transversal de la probeta está sometida a la misma tracción. Suponiendo el espesor formado por infinitas láminas, todas rompen a la vez. En esos casos los valores resultantes se encontraban entre **700 y 800 MPa**.

Lo que ocurre en los ensayos de flexión estáticos es muy distinto: ahí la distribución de tensiones varía desde tracción en las capas más bajas hasta compresión en las más altas. A medida que incrementaba la carga también lo hacía la tensión, hasta que llegado un momento nacía una fisura en la parte central inferior más externa de la probeta. Esto quiere decir que se rompía la última lámina provocando una redistribución de tensiones en el espesor, cosa que no impedía que la carga siguiese aumentando hasta que el material colapsara y se alcanzara el pico máximo de carga, que siempre es el primero.

El modelo de vigas para calcular las tensiones se aplicó llegado a este punto y para la lámina que se encontraba en $-e/2$, la más externa, si bien es cierto que la fisura en el material podía estar bastante más desarrollada y el estado tensional ser diferente. Es a esto a lo que puede deberse que el valor de resistencia hallado en el ensayo longitudinal sea menor que los restantes hallados por ensayos de flexión, aunque no se debe olvidar que en anteriores pruebas con tejido hechas en el laboratorio los resultados fueron muy parejos.

6.3.- ENSAYOS DINÁMICOS.

6.3.1.- Caso empotrado.

En primer lugar se recogen en la tabla 6.4 los valores de tensión máxima junto al número de ciclos que aguantó la probeta, es decir, las coordenadas de los puntos que se representarán en la gráfica dimensional. Al principio se ha colocado el punto hallado a través de los ensayos estáticos, es decir, el de la tensión última, al que se le asocia un ciclo de carga.

Tensión máxima(MPa)	Nº de ciclos
923,54	1
646,47	2898
646,47	4700
600,3	5519
600,3	15101
600,3	9874
554,12	23971
554,12	33841
507,94	33010
507,94	45608

Tabla 6.4: Valores de tensión máxima junto a número de ciclos soportados. Caso empotrado.

La gráfica con los valores experimentales y la correspondiente recta de ajuste, de ecuación $y=-37,3\ln(x)+933,2$, se muestran en la figura 6.8.

En la tabla 6.5 aparecen los puntos correspondientes a la gráfica S_{max}/S_{ult} , y en la figura 6.9 la correspondiente representación para el caso empotrado. La recta de regresión lineal hallada en este caso fue $y=-0,04\ln(x)+1,0106$.

Tensión adimensional	Nº de ciclos
1	1
0,7	2898
0,7	4700
0,65	5519
0,65	15101
0,65	9874
0,6	23971
0,6	33841
0,55	33010
0,55	45608

Tabla 6.5: Niveles de carga junto a número de ciclos soportados. Caso empotrado.

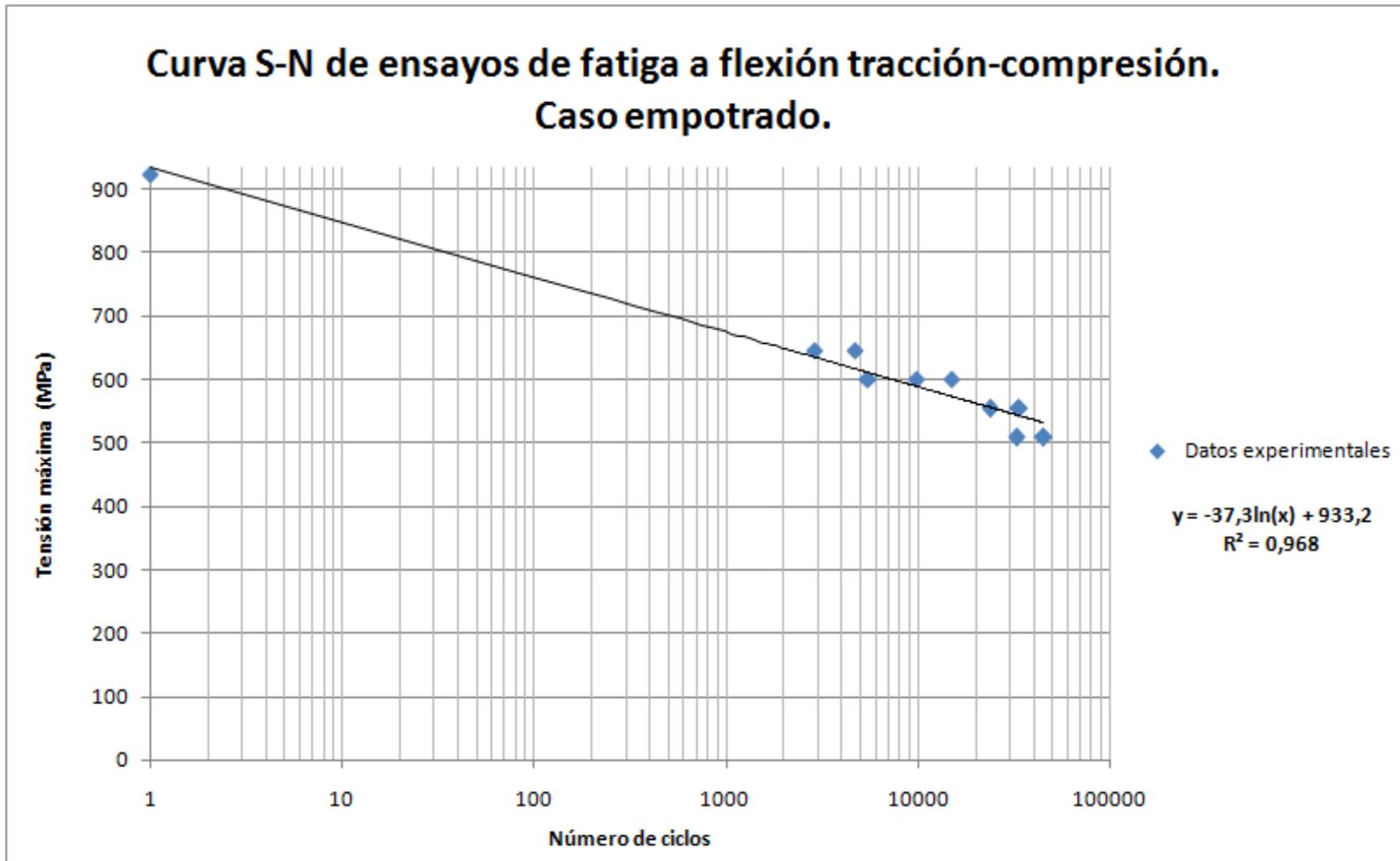


Figura 6.8: Datos experimentales y recta de ajuste dimensional. Caso empotrado.

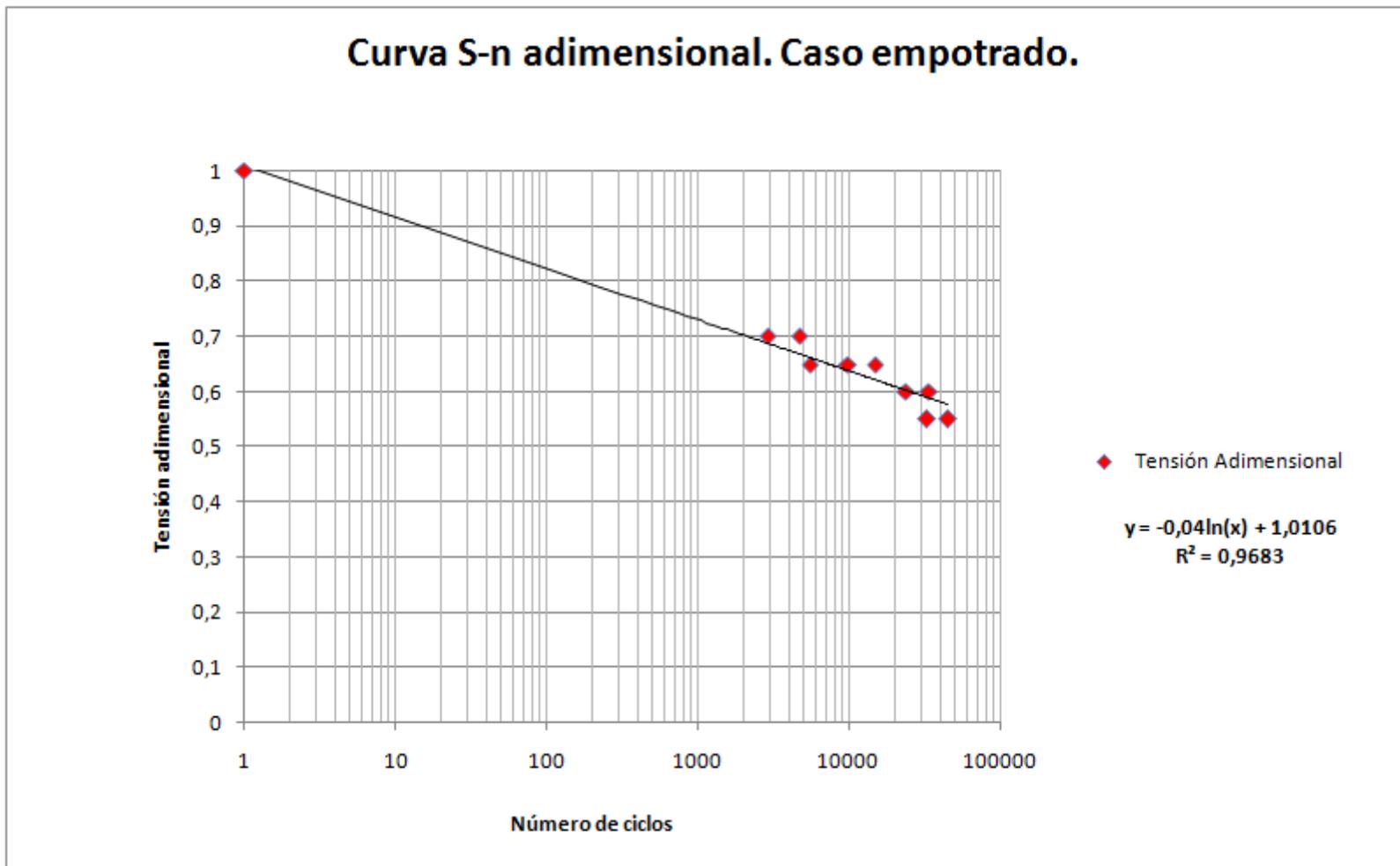


Figura 6.9: Datos experimentales adimensionalizados y recta de ajuste. Caso empotrado.

6.3.2.- Caso articulado.

En la tabla 6.6 aparecen los valores de las coordenadas de los puntos correspondientes a cada ensayo del caso articulado, es decir, tensión máxima en MPa junto a número de ciclos.

Tensión (MPa)	Nº de ciclos
1207,53	1
845,27	8295
845,27	2605
845,27	4025
784,89	24828
784,89	17495
784,89	22962
724,51	41434
724,51	58550
664,14	340258
664,14	274248

Tabla 6.6: Valores de tensión máxima junto a número de ciclos soportados. Caso articulado.

Los datos experimentales representados junto a la recta de regresión lineal, que tiene de ecuación $y = -43 \ln(x) + 1206$, se muestran en la figura 6.10.

Posteriormente se adimensionalizaron los valores de tensión y se representaron frente al número de ciclos soportados, siendo aproximados por la conveniente recta en la figura 6.11, de ecuación: $y = -0,036 \ln(x) + 0,9987$. Las coordenadas de los puntos son las que aparecen en la tabla 6.7. Se observa que, aunque el rango de porcentajes de carga fue el mismo que en el caso empotrado, para el nivel inferior, de 55%, el número de ciclos soportados incrementa muy notablemente con respecto al porcentaje de carga de 60%.

Tensión adimensional	Nº de ciclos
1	1
0,7	8295
0,7	2605
0,7	4025
0,65	24828
0,65	17495
0,65	22962
0,6	41434
0,6	58550
0,55	340258
0,55	274248

Tabla 6.7: Niveles de carga junto a número de ciclos soportados. Caso empotrado.

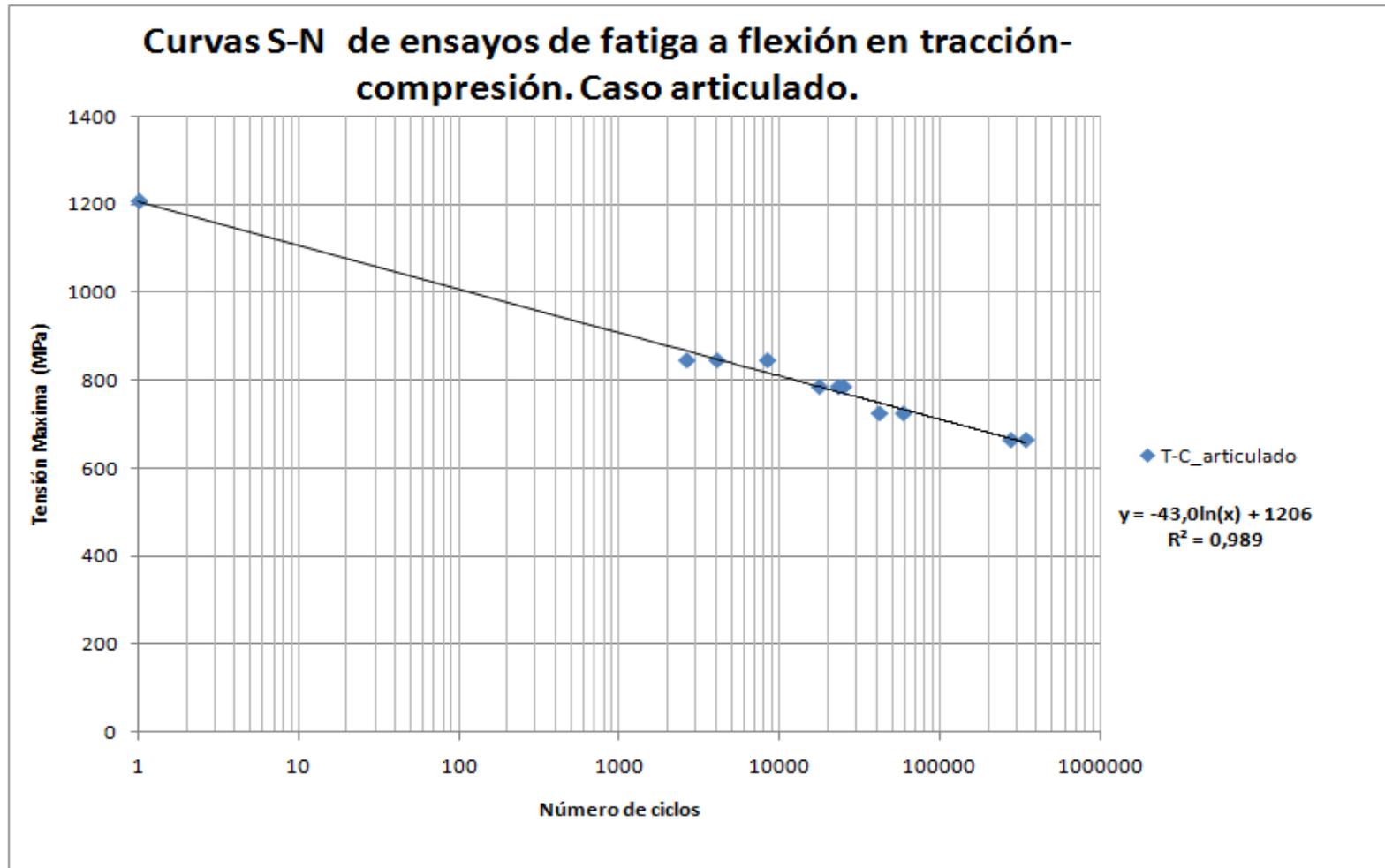


Figura 6.10: Datos experimentales y recta de ajuste dimensional. Caso articulado.

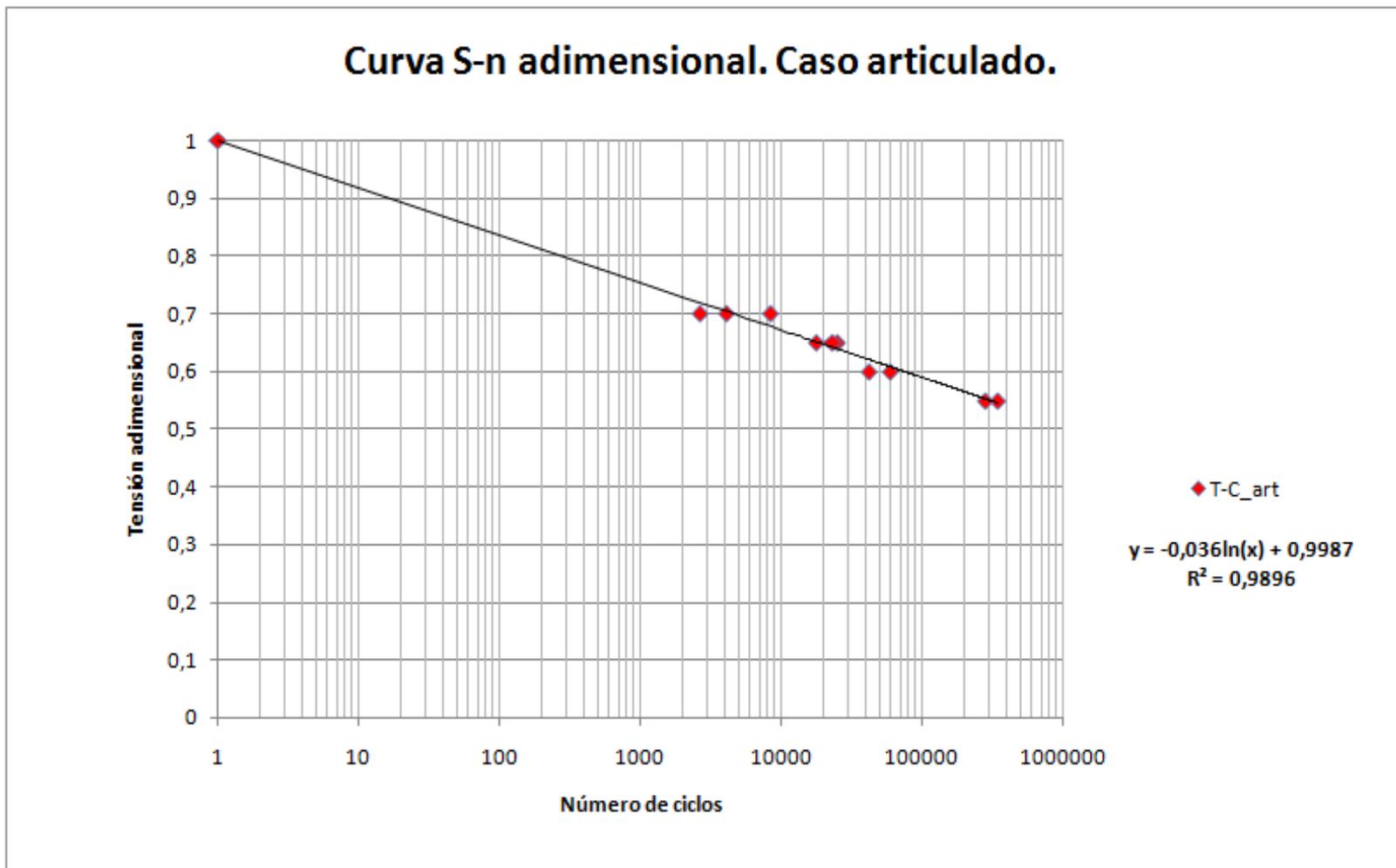


Figura 6.11: Datos experimentales adimensionalizados y recta de ajuste. Caso articulado.

6.3.3.- Flexión en tres puntos.

Con las probetas que quedaban se realizaron estos ensayos, cuyos resultados se recogen en la tabla 6.8 y en la gráfica dimensional de la figura 6.12, donde también se muestra la correspondiente recta de aproximación de ecuación: $y = -15,42 \ln(x) + 1030,7$. Hay que señalar que, dado que estas rectas representan el comportamiento en Compresión-Compresión, lo más coherente hubiera sido que el punto estático de partida fuese de resistencia a compresión, pero al ser un ensayo de flexión la rotura se produce por la cara a tracción como ya se ha comentado.

Tensión (MPa)	Nº de ciclos
1025,12	1
922,6	11413
871,35	58417
820,09	61959
717,58	1000000

Tabla 6.8: Valores de tensión máxima junto a número de ciclos soportados. Flexión en 3 puntos.

Los valores de tensión adimensionalizados se recogen a continuación junto al número de ciclos en la tabla 6.9, siendo representados estos puntos en la figura 6.13 con la correspondiente recta de ajuste.

Tensión (MPa)	Nº de ciclos
1	1
0,9	11413
0,85	58417
0,8	61959
0,7	1000000

Tabla 6.9: Niveles de carga junto a número de ciclos soportados. Flexión en 3 puntos.

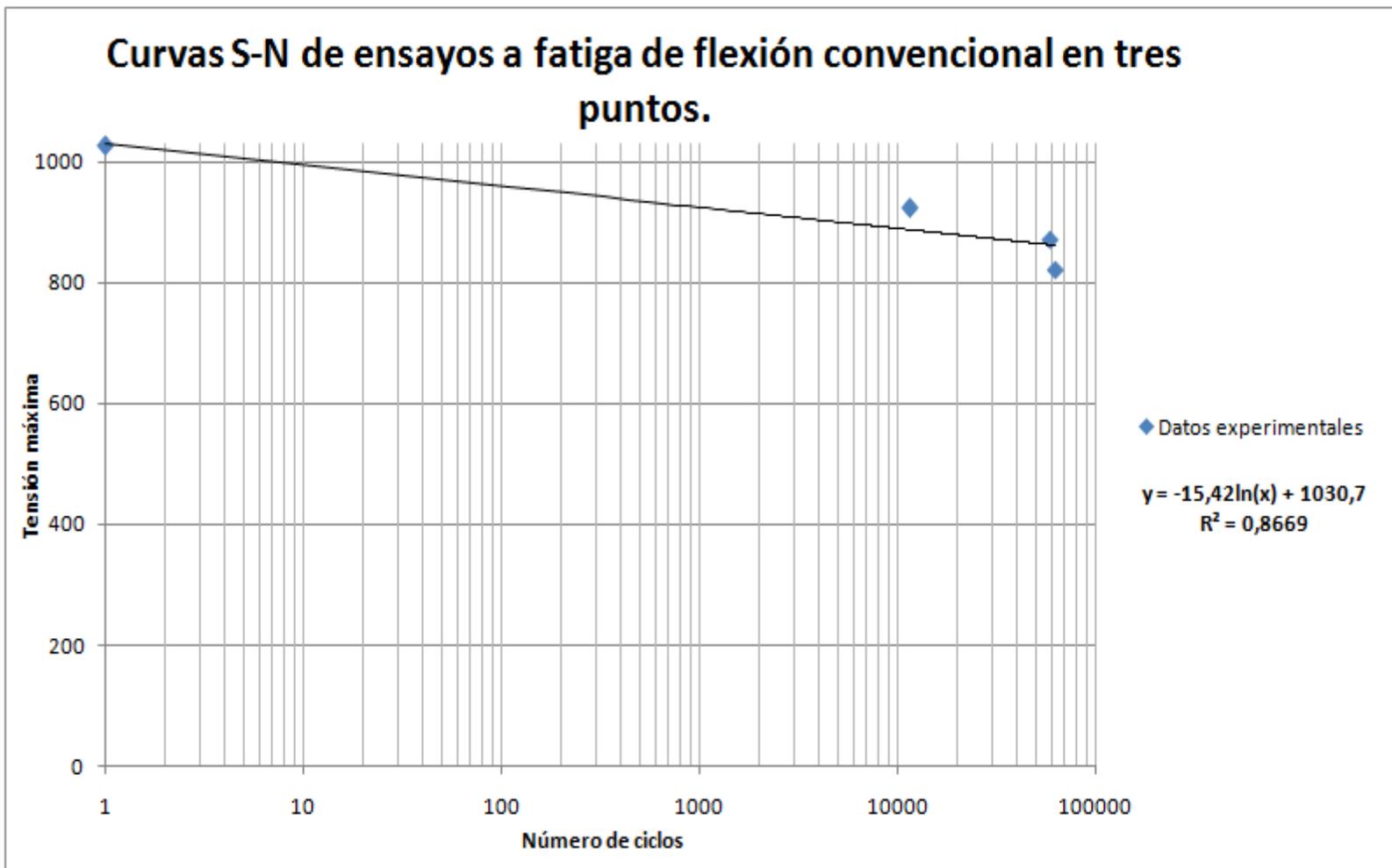


Figura 6.12: Datos experimentales y recta de ajuste dimensional. Caso de flexión convencional en tres puntos.

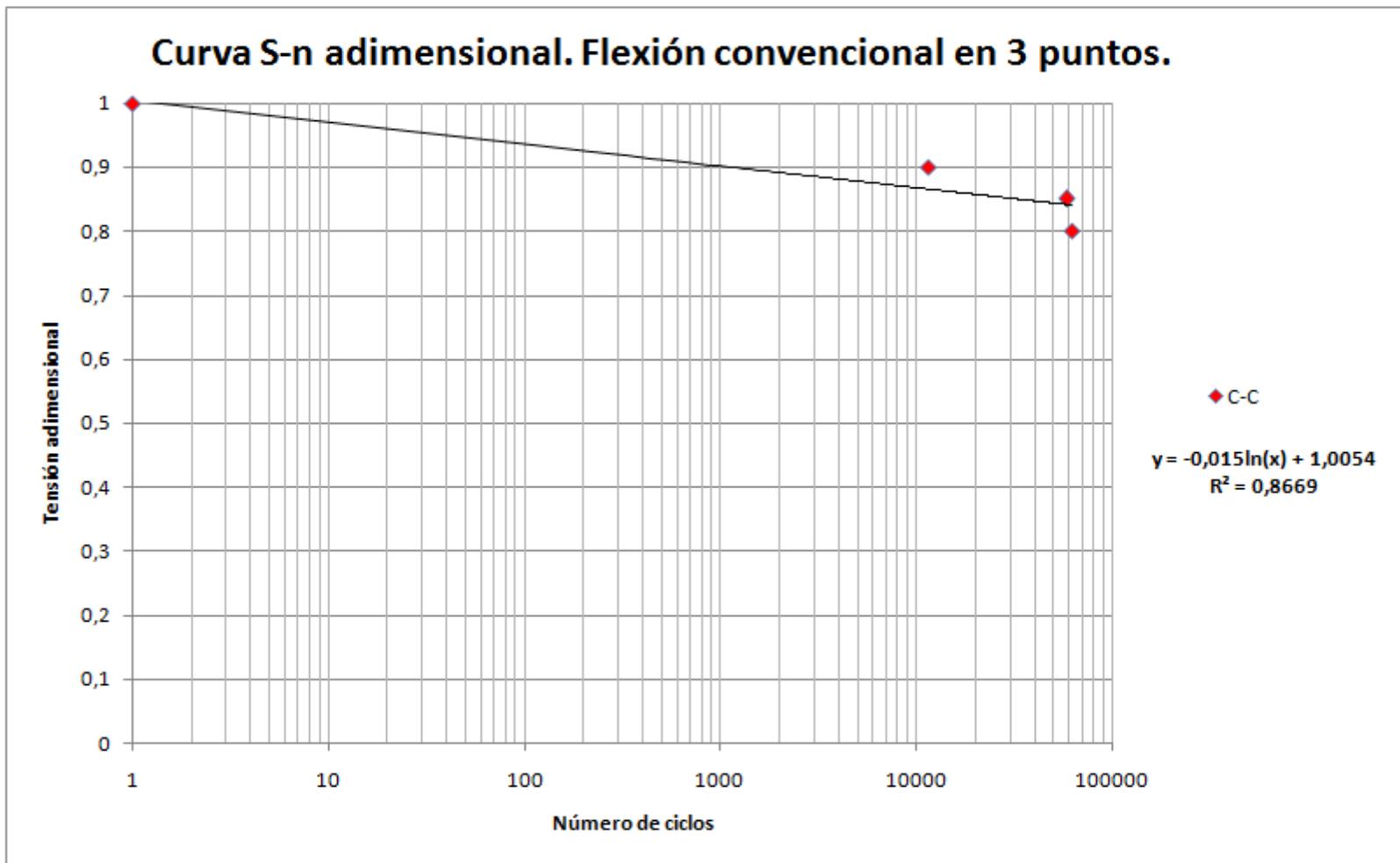


Figura 6.13: Datos experimentales adimensionalizados y recta de ajuste. Caso de flexión convencional en tres puntos.

6.3.4.- Estudio comparativo entre los tres tipos de ensayo.

En lo que sigue se van a mostrar dos gráficas que suponen el objetivo último de este proyecto, y son en las que se superponen los puntos y las rectas de ajuste correspondientes a los tres tipos de ensayo realizados.

La primera de ellas, la dimensional, que recoge valores de tensión máxima en MPa frente a número de ciclos (en escala logarítmica), se muestra en la figura 6.14. Se aprecia que, pese a las divergencias comentadas en cuanto a resistencia a tracción estática, las dos rectas de ajuste para los casos de T-C empotrado y articulado tienen pendientes muy parecidas, si bien la correspondiente al caso C-C presenta una pendiente mucho más relajada.

Se observa que, por ser las condiciones del caso empotrado las más restrictivas, es ésta la recta que se encuentra por debajo en la gráfica, siendo mucho más reducido el número de ciclos soportados para una tensión dada.

Las diferentes condiciones de ensayo llevaron a la obtención de unas tensiones de rotura estática determinadas para cada uno de los casos, lo cual daría lugar a rectas con unos valores de pendiente y ordenada en el origen que les llevaría a ser incomparables entre sí. Es por esto por lo que es necesario adimensionalizar con las tensiones últimas, con el fin de que la comparativa sea lo más objetiva posible. La gráfica correspondiente se muestra en la figura 6.15.

En primer lugar se aprecia en la gráfica que, aunque hubiera sido conveniente ensayar más probetas, sólo cuatro bastaron para demostrar que la gráfica de Compresión-Compresión quedaba por encima de las correspondientes a Tracción-Compresión, mostrando un comportamiento a fatiga mucho más favorable.

Recordemos que al observar el Diagrama de Goodman o Curvas de vida constante, la separación de éstas era mayor en torno al eje vertical, correspondiéndose con una mayor sensibilidad a fatiga que coincidía precisamente con una componente nula de la tensión media. También hay que recordar aquí que los resultados de las configuraciones de Tracción-Compresión para compuestos de fibra de Carbono han mostrado siempre esta situación como la más desfavorable y restrictiva en cuanto a comportamiento a fatiga.

Seguidamente es destacable lo cercanos que aparecen los puntos y por consiguiente las rectas de Tracción-Compresión, con pendientes de -0,03 y -0,04 para los casos articulado y empotrado respectivamente. Por tanto se concluye que ambos ensayos, cuyos puntos se encuentran englobados en una franja muy estrecha, son igualmente representativos del comportamiento a fatiga en Tracción-Compresión del material.

Se concluye por tanto que los resultados de los ensayos dinámicos han sido satisfactorios.

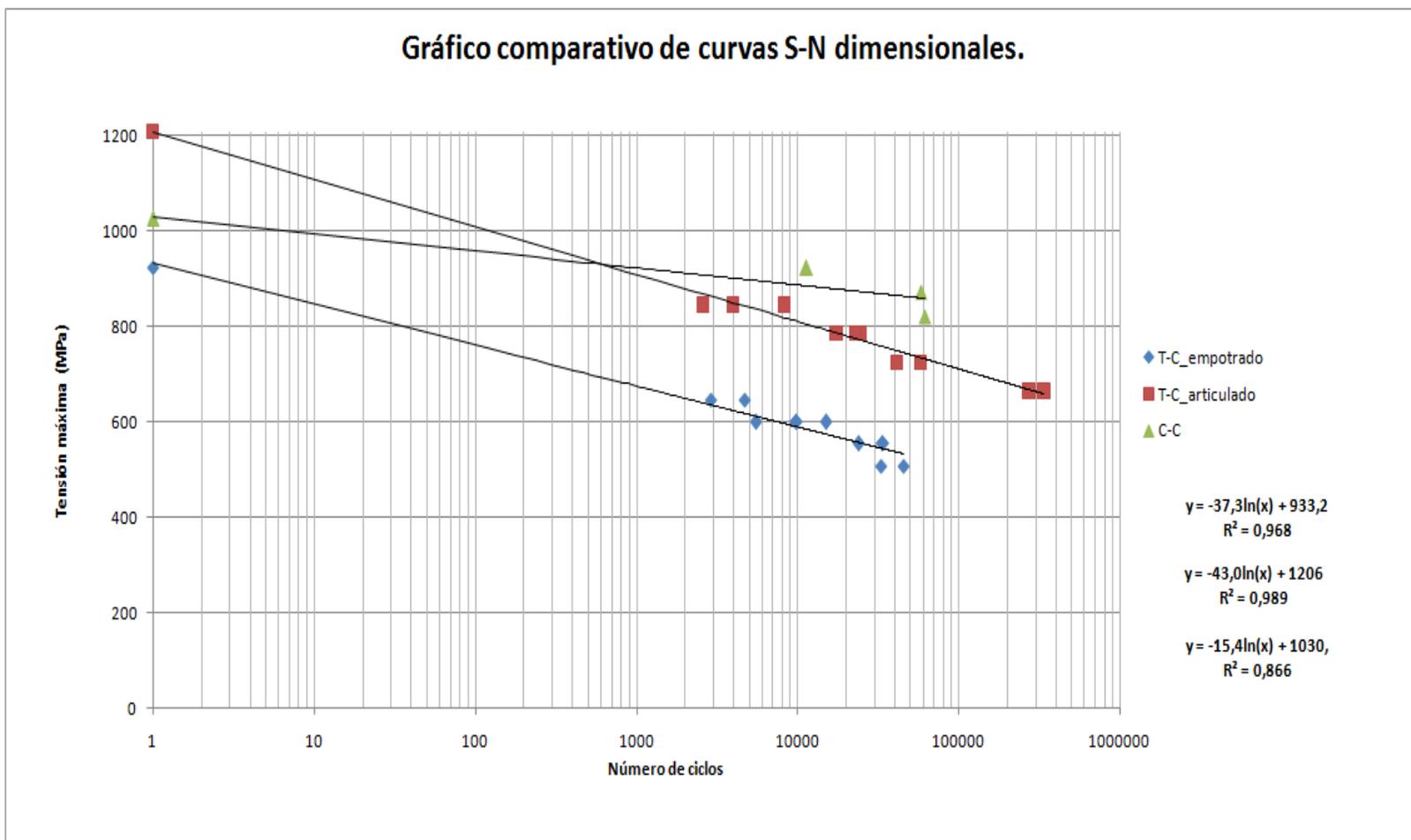


Figura 6.14: Gráfico comparativo de rectas S-N dimensionales.

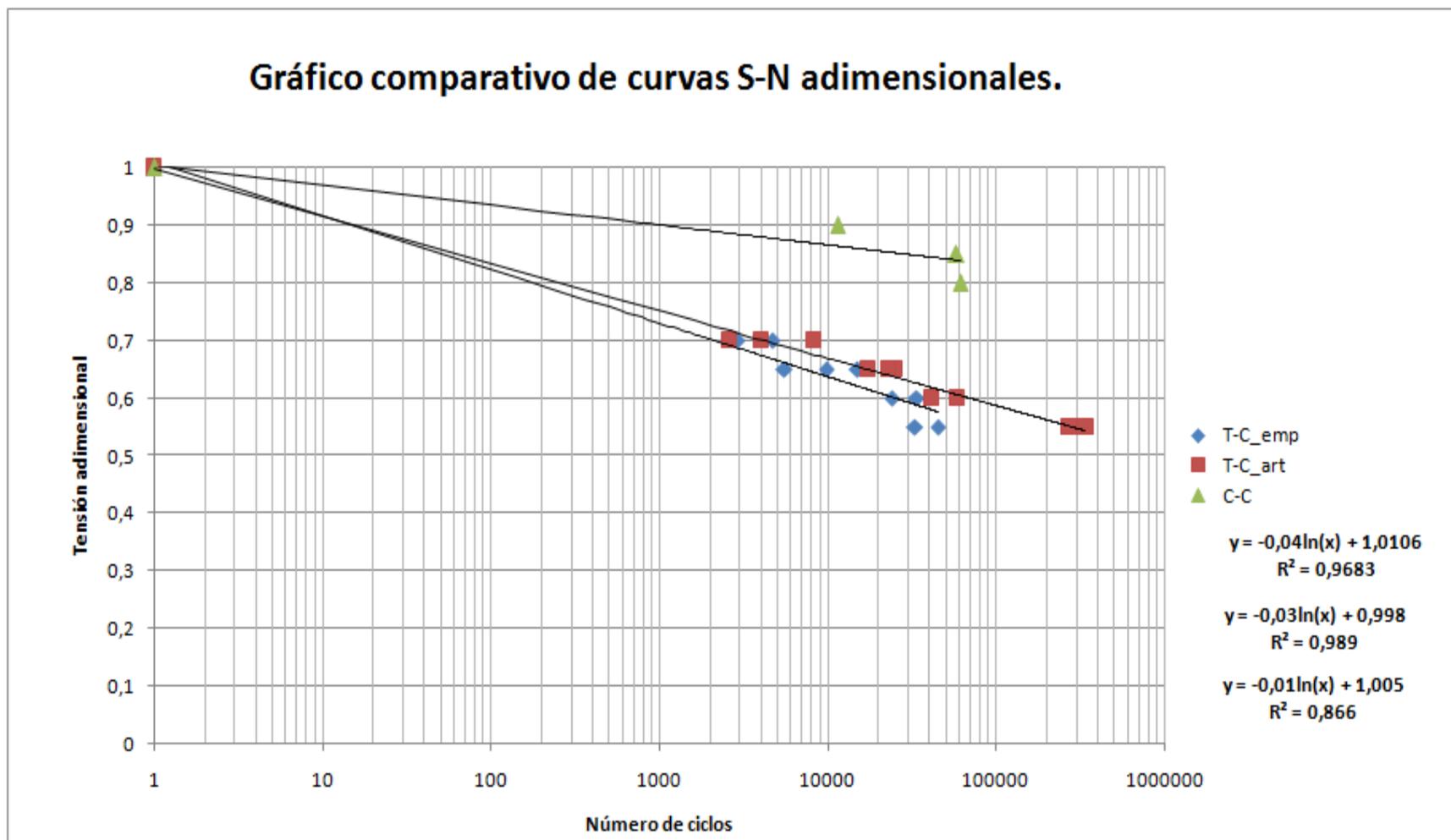


Figura 6.15: Gráfico comparativo de rectas adimensionales.