

Capítulo 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

En el presente capítulo serán analizados los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos estáticos y dinámicos.

En primer lugar se estudiará la validez de los resultados estáticos y las posibles incidencias ocurridas durante la realización de los mismos.

Posteriormente se tratarán los resultados obtenidos en los ensayos dinámicos. Se llevarán a cabo las representaciones gráficas S-N (tensión máxima frente a número de ciclos hasta el fallo) para cada una de las tandas de ensayos realizadas. Tras esto, se representarán estos valores pero de forma adimensional, lo cual nos permitirá, por último, establecer comparaciones entre el comportamiento a fatiga del laminado de tejido de fibra de carbono empleado dependiendo de la orientación del refuerzo y de la frecuencia de ensayo.

Por último se analizará la evolución de la temperatura alcanzada por las probetas durante el desarrollo de los ensayos dinámicos, dependiendo de la orientación del refuerzo, la frecuencia de ensayo y el nivel de carga aplicado.

5.2 Análisis de resultados de ensayos estáticos

Los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos estáticos de tracción han sido satisfactorios. A continuación se presentan una serie de aclaraciones relativas a los valores de resistencia estática hallados y a la morfología del fallo de cada uno de los especímenes ensayados, tanto para los ensayos on-axis como off-axis.

5.2.1 Ensayos estáticos on-axis.

5.2.1.1 Ensayos estáticos on-axis. Panel 1.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla 4.1, podemos decir que la representatividad de los resultados obtenidos es buena ya que tenemos un coeficiente de variación de 1,58% para los valores de tensión última logrados. En las gráficas de carga frente a desplazamiento de la cruceta presentes en las figuras 4.8 y 4.9 podemos observar que para las dos probetas ensayadas existe una zona (al principio de la aplicación de la carga) en la que la relación no es lineal. Esto es debido a que al comienzo de la aplicación de la carga, debido a los ajustes mecánicos necesarios, la carga no se aplica con la velocidad constante correcta de 1 mm/min. Posteriormente la carga fue aplicada correctamente obteniéndose la relación lineal esperada, por lo que el efecto comentado no resta validez a los ensayos. Debido a esta problemática es mucho más fiable tomar los datos procedentes del extensómetro para calcular el módulo elástico, ya que éste sólo recoge las deformaciones de la probeta, sin tener en cuenta el movimiento de la cruceta asociado a los elementos mecánicos de la máquina de ensayos.

En cuanto a la morfología del fallo, en las figuras 5.1 y 5.2 podemos observar un detalle de la zona de rotura de ambos especímenes.

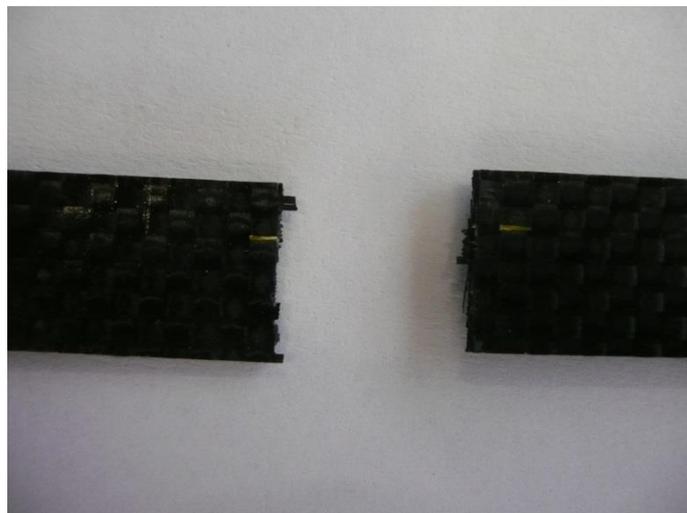


Figura 5.1. Detalle de la zona de rotura. Ensayo estático on-axis. Especímen 1 del panel 1.

Observamos que la rotura se ha producido de forma perpendicular a la dirección de aplicación de la carga, coincidiendo esta dirección con una de las dos direcciones del refuerzo de fibra. En el caso de la probeta número 2 (figura 5.2) apreciamos que la rotura se ha producido en 2 puntos y, aunque están relativamente cerca de la zona de los tacones, el material no se ha roto por la parte que se encuentra fijada a las mordazas por lo que, teniendo además presente la poca variación con respecto al primer ensayo, el resultado puede considerarse válido. El hecho de que la probeta se fracture por dos secciones puede ser debido a que el material se haya dañado durante el ensayo en dos puntos diferentes debido a la presencia de alguna imperfección. La rotura final se produce primero en una de las dos secciones e inmediatamente, debido a la brusquedad del momento del fallo, se rompe también la otra sección.

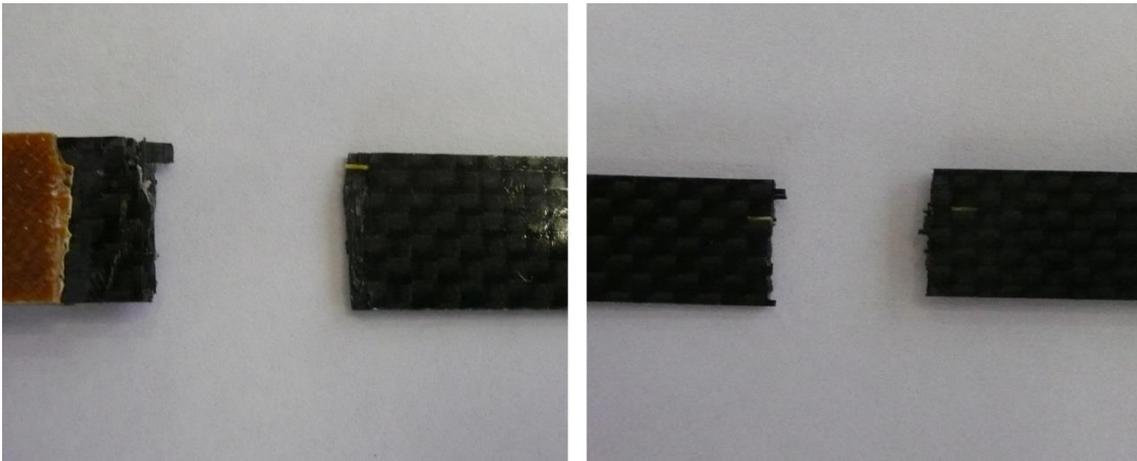


Figura 5.2. Detalle de las dos zonas de rotura. Ensayo estático on-axis. Espécimen 2 del panel 1.

5.2.1.2 Ensayos estáticos on-axis. Panel 2.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla 4.2, podemos decir que la representatividad de los resultados obtenidos es buena ya que tenemos un coeficiente de variación de 3,37 % para los valores de tensión última logrados. En las gráficas de carga frente a desplazamiento de la cruceta presentes en las figuras 4.10 y 4.11 podemos observar que para las dos probetas ensayadas, al igual que ocurrió con las probetas del panel 1, existe un pequeño resbalamiento de la probeta en las mordazas durante el ensayo. Este efecto se aprecia en dichas gráficas al existir una zona en la que la relación no es lineal. Para ambos ensayos esto ocurre al principio de la aplicación de la carga, lo cual nos indica que posteriormente no hubo más resbalamiento por lo que el valor de carga última y tensión última es válido. Podemos apreciar que en este caso este resbalamiento es menor que en los ensayos del panel 1. Por otro lado en dichas gráficas también podemos apreciar pequeños picos. Esto es debido a que durante su desarrollo el ensayo fue parado para poder retirar el extensómetro y así no sufriera daño alguno tras la rotura de la probeta. Tras retirar el extensómetro el ensayo continuó correctamente por lo que esta parada no supone problema alguno para la validez de los ensayos.

En cuanto a la morfología del fallo, en las figuras 5.3 y 5.4 podemos observar un detalle de la zona de rotura de ambos especímenes.



Figura 5.3: Detalle de la zona de rotura. Ensayo estático on-axis. Especímen 1 del panel 2.

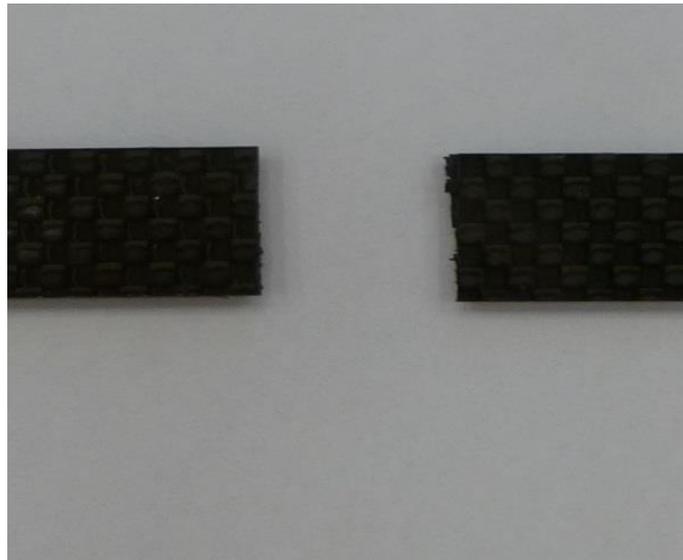


Figura 5.4: Detalle de la zona de rotura. Ensayo estático on-axis. Especímen 2 del panel 2.

5.2.2 Ensayos estáticos off-axis.

5.2.2.1 Ensayos estáticos off-axis. Panel 3.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla 4.3, podemos decir que la representatividad de los resultados obtenidos es buena ya que tenemos un coeficiente de variación de 1,07% para los valores de tensión última logrados. En las gráficas de carga frente a desplazamiento de la cruceta presentes en las figuras 4.12 y 4.13 podemos apreciar que la relación no es lineal como ocurría en los ensayos on-axis, sino que obtenemos una curva. Al encontrarse el refuerzo en las direcciones a 45° y a -45° , cuando se aplica la carga las fibras (que son las que soportan dicha carga) tienden a reorientarse hacia 0° para trabajar mejor. Esto hace que la resina de la matriz y la interfase con la fibra jueguen un papel más importante en la resistencia de dichas probetas. El comportamiento no lineal de la resina queda reflejado en la falta de linealidad de las gráficas de carga frente a desplazamiento.

En cuanto a la morfología del fallo, en las figuras 5.5 y 5.6 podemos observar un detalle de la zona de rotura de ambos especímenes ensayados. Observamos claramente cómo la rotura se produce en la dirección del refuerzo fibroso a 45° .

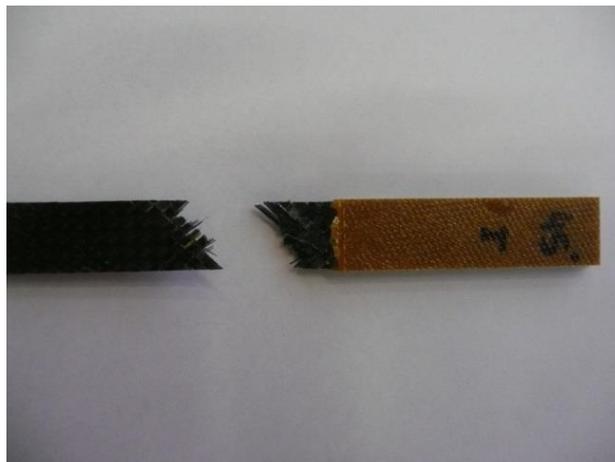


Figura 5.5: Detalle de la zona de rotura. Ensayo estático off-axis. Especímen 1 del panel 3.

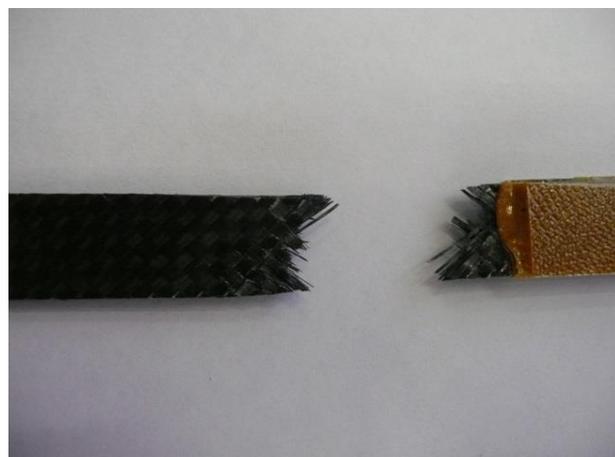


Figura 5.6: Detalle de la zona de rotura. Ensayo estático off-axis. Especímen 2 del panel 3

Aunque la zona de rotura se encuentra relativamente cerca de la zona sujeta por las mordazas consideramos aceptables ambos ensayos. Se puede observar claramente cómo la rotura se produce en una sección a 45°, esto es, la dirección del refuerzo fibroso.

5.2.2.2 Ensayos estáticos off-axis. Panel 4.

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla 4.4, podemos decir que la representatividad de los resultados obtenidos es buena ya que tenemos un coeficiente de variación de 3,39% para los valores de tensión última logrados. En las gráficas de carga frente a desplazamiento de la cruceta presentes en las figuras 4.14 y 4.15 podemos apreciar claramente la no linealidad comentada anteriormente.

En las figuras 5.7 y 5.8 podemos observar la morfología de fallo de los dos especímenes ensayados. Como era esperable la rotura se ha producido en la dirección de 45°.



Figura 5.7: Detalle de la zona de rotura. Ensayo estático off-axis. Especímen 1 del panel 4.



Figura 5.8: Detalle de la zona de rotura. Ensayo estático off-axis. Especímen 2 del panel 4.

5.3 Análisis de resultados de ensayos dinámicos

En el presente apartado se mostrará el comportamiento a fatiga de los laminados desarrollados. Para ello se representará para cada uno de los tipos de ensayos efectuados el número de ciclos soportados por cada probeta hasta el fallo en función de la tensión máxima aplicada durante el ensayo de fatiga, es decir, las gráficas S-N. Se empleará una escala logarítmica para el eje horizontal donde se representa el número de ciclos hasta la rotura.

A continuación las gráficas serán adimensionalizadas con la resistencia estática a tracción de cada panel para que los resultados de los distintos tipos de ensayos puedan ser comparados. Observaremos la influencia de la orientación del refuerzo y de la frecuencia de ensayo.

Posteriormente serán analizadas las variaciones de temperatura de las probetas durante los ensayos de fatiga, para así tratar de ver la influencia del calentamiento en la pérdida de resistencia de los especímenes.

5.3.1 Ensayos dinámicos on-axis

Debido a la discrepancia de valores de resistencia estática a tracción del panel 1 y 2, trataremos los resultados obtenidos de manera independiente. En primer lugar se muestran las gráficas S-N para cada panel y frecuencia. Posteriormente, adimensionalizaremos las gráficas obtenidas con el valor de resistencia estática de cada probeta, por lo que se representará el nivel de carga aplicado frente al número de ciclos alcanzado.

Panel 1

En las tablas 5.1 y 5.2 se presentan los resultados necesarios para la obtención de las gráficas S-N correspondientes a los ensayos dinámicos sobre especímenes procedentes del panel 1, esto es, tensión máxima aplicada durante el ensayo y número de ciclos soportados por cada probeta hasta el fallo. No se presenta aquí el resultado de la probeta P0_06 ya que no se produjo el fallo tras superar tras superar $2 \cdot 10^6$ ciclos, por lo que no será incluida en la gráfica S-N correspondiente.

Frecuencia 10 Hz.

Tensión máxima (MPa)	Número de ciclos
547,153	2306669*
583,630	1067981
583,630	909303
598,221	345536
620,107	238736
620,107	89607
656,584	61446
693,061	450
729,538	1

Tabla 5.1: Valores S-N panel 1 (Frecuencia 10 Hz)

Frecuencia 15 Hz.

Tensión máxima (MPa)	Número de ciclos
583,630	1086969
598,221	1008105
620,107	135594
656,584	39005
693,061	325
729,538	1

Tabla 5.2: Valores S-N panel 1 (Frecuencia 15 Hz)

En las gráficas siguientes (figura 5.9 y figura 5.10) podemos observar el comportamiento a fatiga del panel 1. Para las dos frecuencias de ensayo podemos apreciar que el comportamiento se ajusta bastante a una progresión lineal logarítmica. Este comportamiento será reafirmado posteriormente, cuando comparemos los resultados procedentes del panel 2.

En la figura 5.11 podemos comprobar que el incremento de frecuencia de 10 a 15 Hz no ha conllevado una importante disminución del número de ciclos soportados por los especímenes, por lo tanto podemos considerar que, para los ensayos llevados a cabo, la influencia de la frecuencia no es significativa.

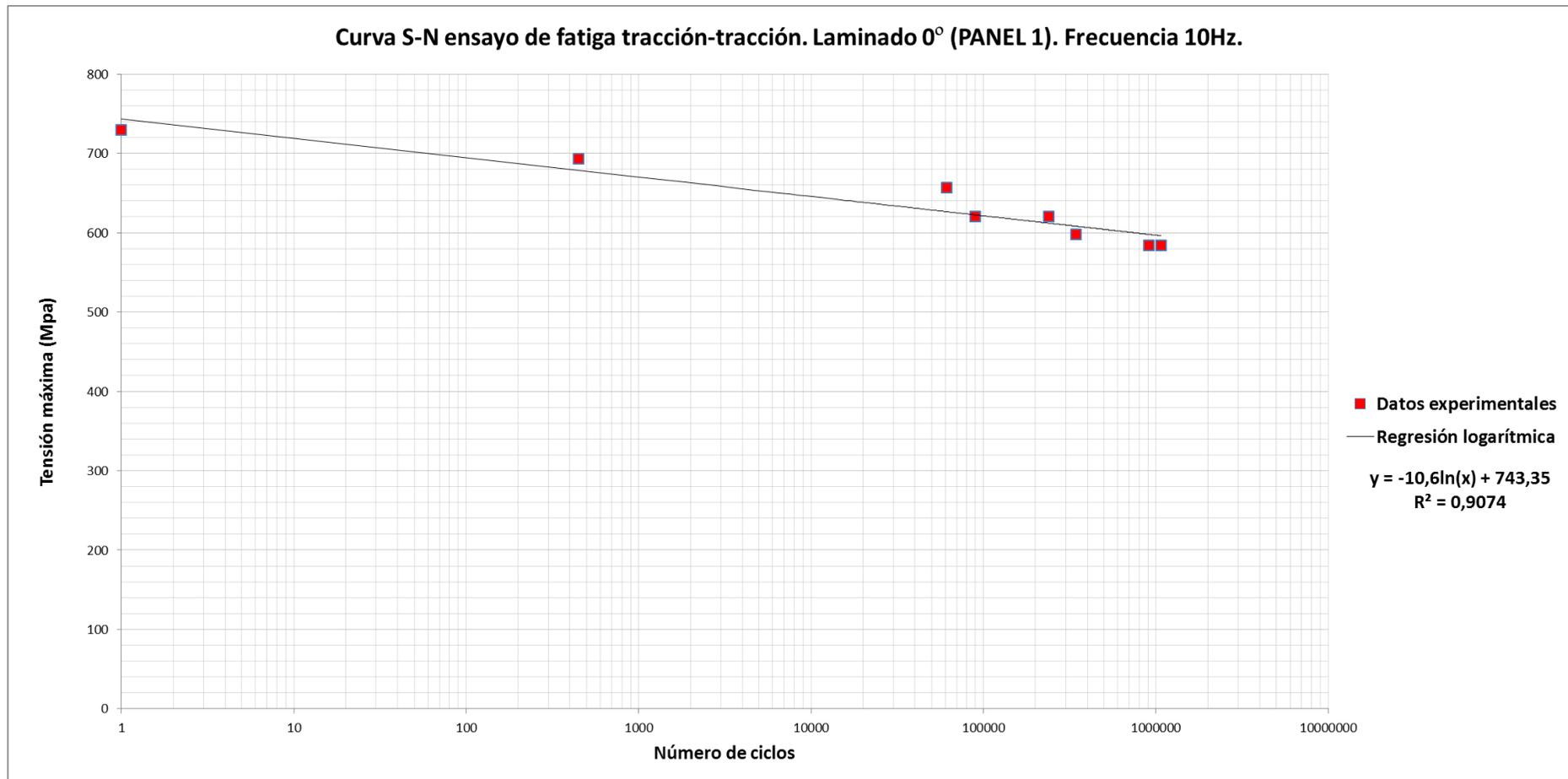


Figura 5.9: Curva S-N ensayo de fatiga tracción - tracción on-axis. Panel 1. Frecuencia 10 Hz.

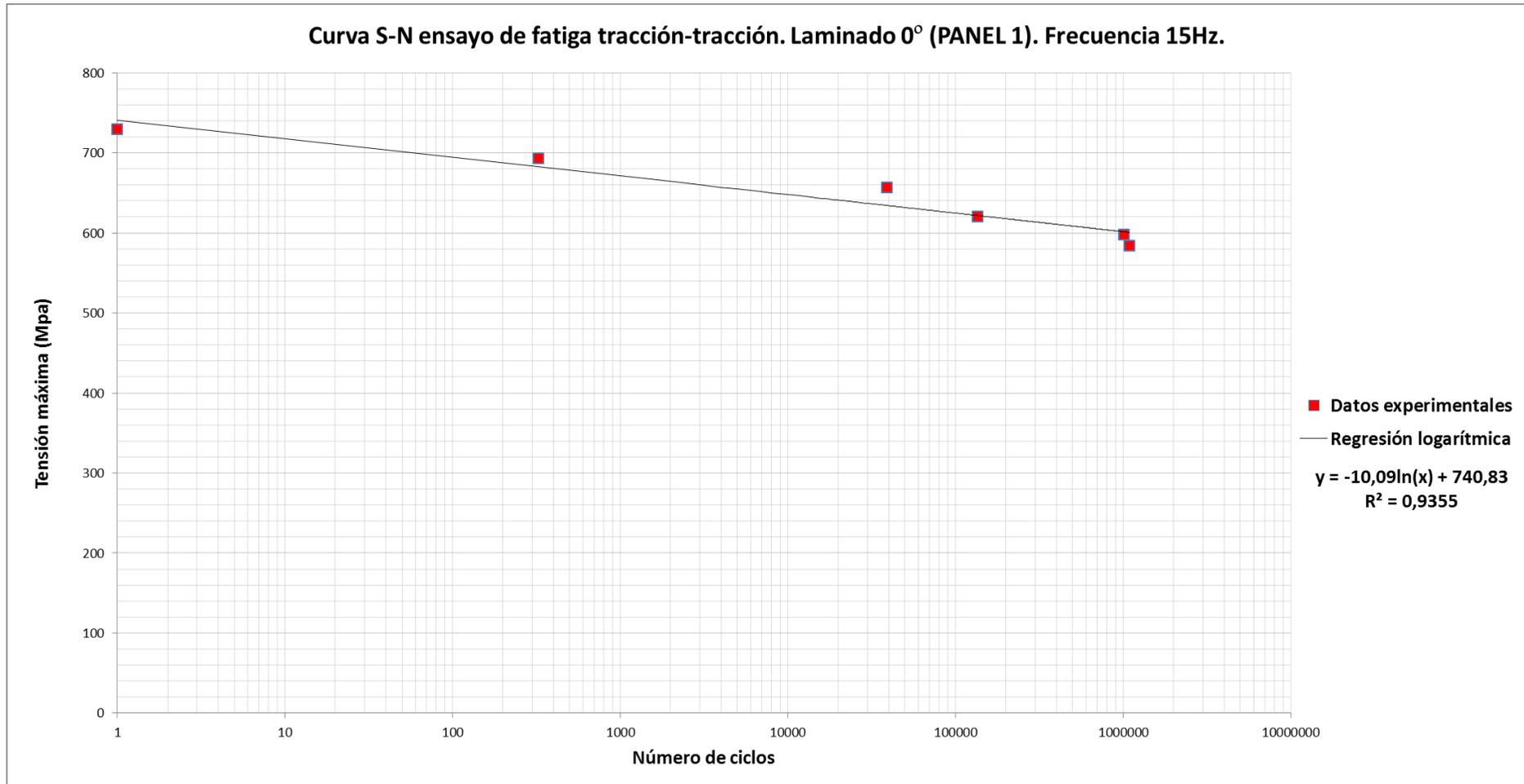


Figura 5.10: Curva S-N ensayo de fatiga tracción – tracción on-axis. Panel 1. Frecuencia 15 Hz.

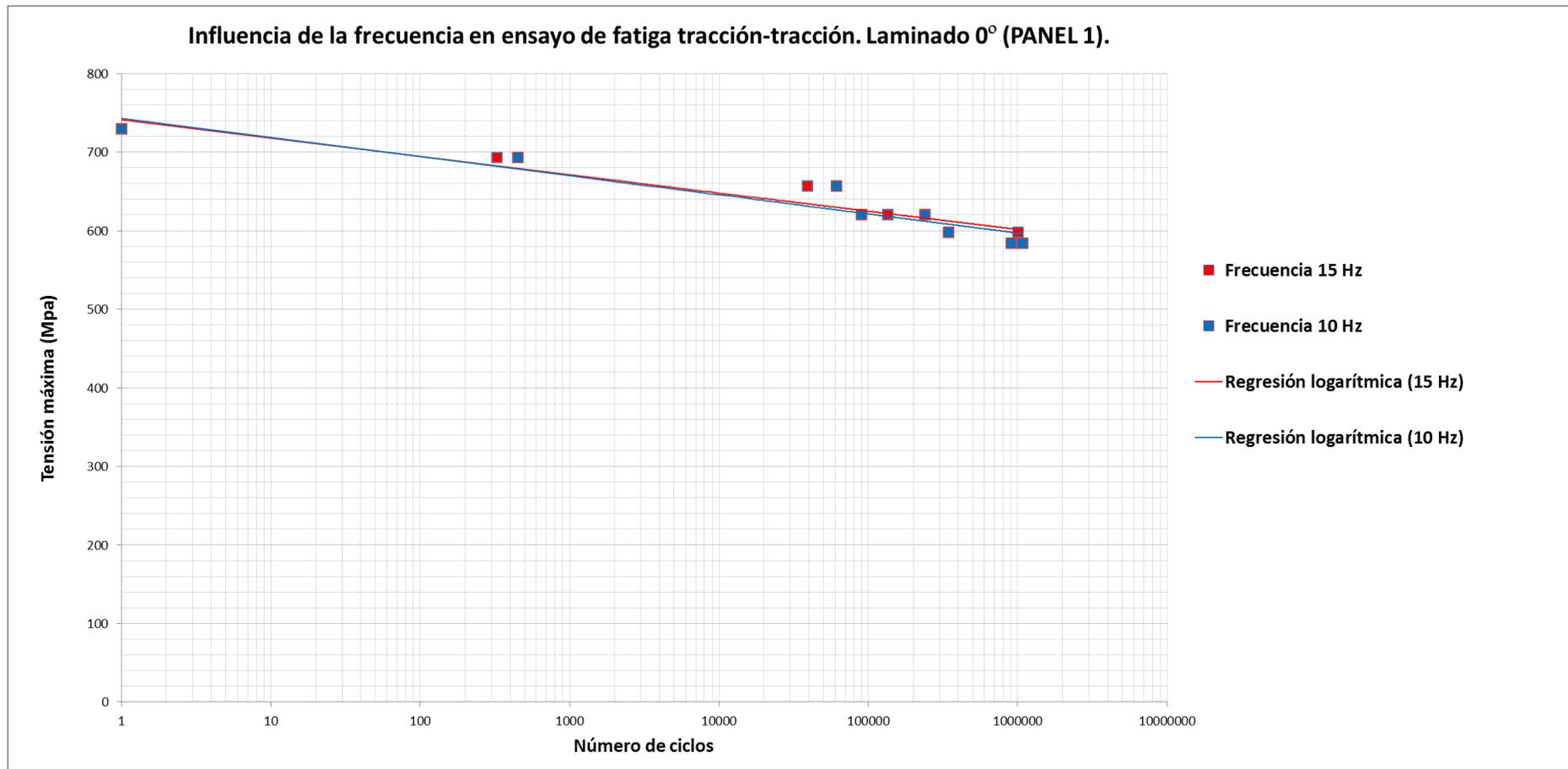


Figura 5.11: Influencia de la frecuencia en el ensayo de fatiga tracción – tracción on-axis. Panel 1.

Panel 2

En las tablas 5.3 y 5.4 se presentan los resultados necesarios para la obtención de las gráficas S-N correspondientes a los ensayos dinámicos sobre especímenes procedentes del panel 2, esto es, tensión máxima aplicada durante el ensayo y número de ciclos soportados por cada probeta hasta el fallo.

Frecuencia 10 Hz.

Tensión máxima (MPa)	Número de ciclos
654,955	400812
671,329	113156
671,329	1167040
695,889	61907
736,824	4047
777,759	89
818,693	1

Tabla 5.3: Valores S-N panel 2 (Frecuencia 10 Hz)

Frecuencia 15 Hz.

Tensión máxima (MPa)	Número de ciclos
654,955	419000
654,955	892100
671,329	154115
671,329	680714
695,889	473739
736,824	5488
818,693	1

Tabla 5.4: Valores S-N panel 2 (Frecuencia 15 Hz)

Podemos apreciar las gráficas S- N correspondientes al panel 2 en las figuras 5.12 y 5.13. El comportamiento también se ajusta bastante bien a una tendencia lineal logarítmica. Al igual que en el panel 1, en el segundo panel tampoco encontramos una influencia significativa de la frecuencia en el número de ciclos soportados por cada espécimen tal y como puede observarse en la figura 5.14.

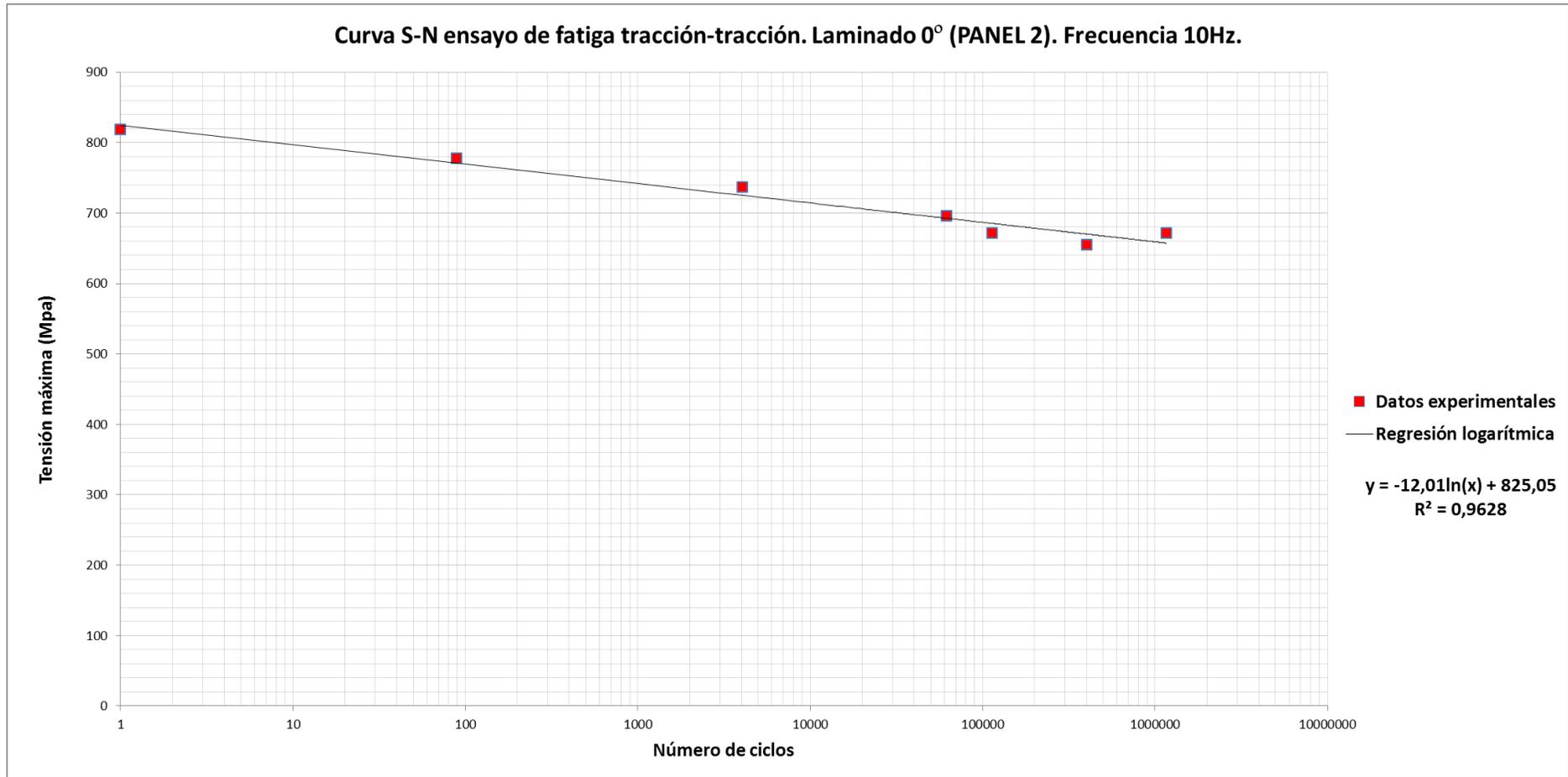


Figura 5.12: Curva S-N ensayo de fatiga tracción - tracción on-axis. Panel 2. Frecuencia 10 Hz.

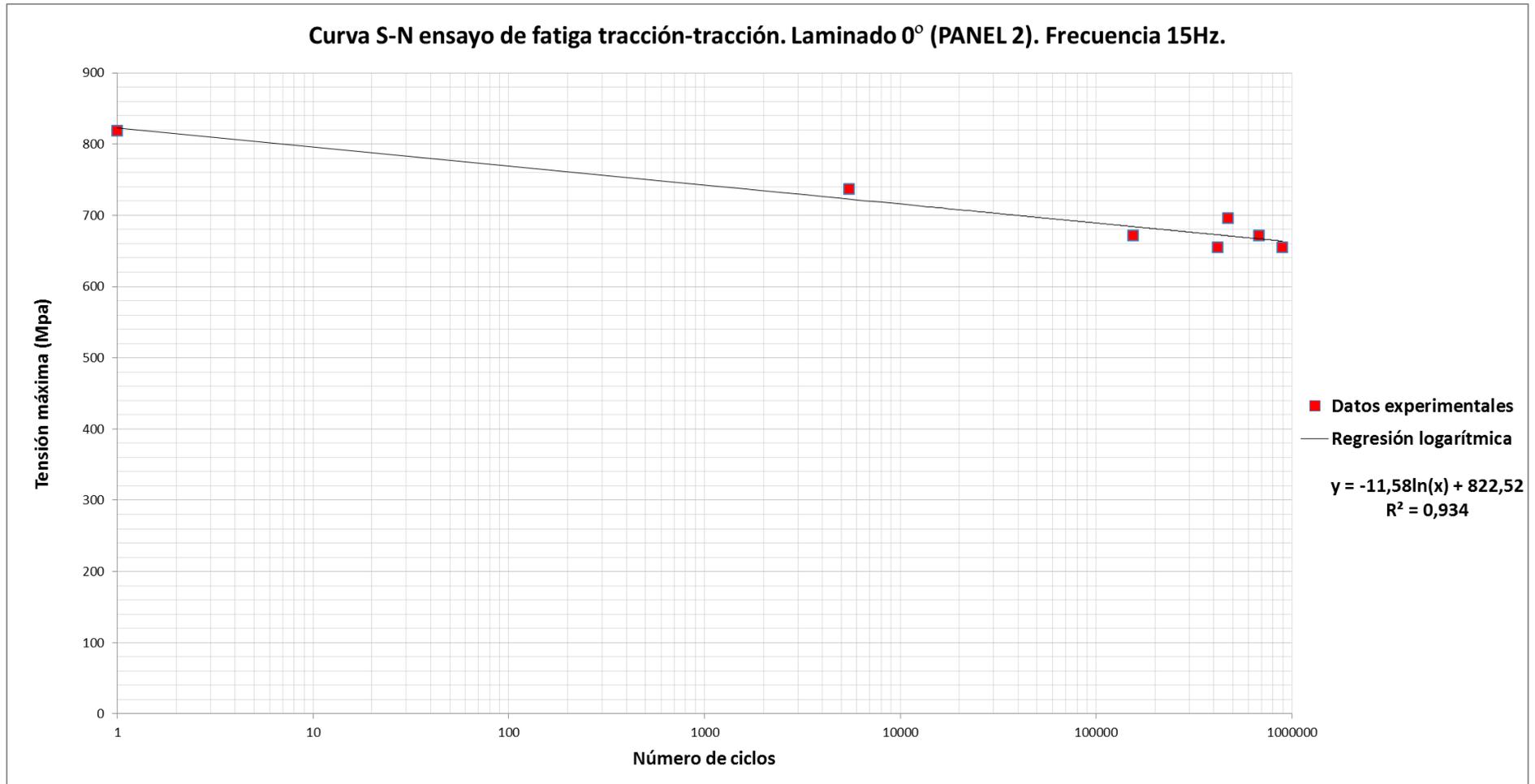


Figura 5.13: Curva S-N ensayo de fatiga tracción - tracción on-axis. Panel 2. Frecuencia 15 Hz.

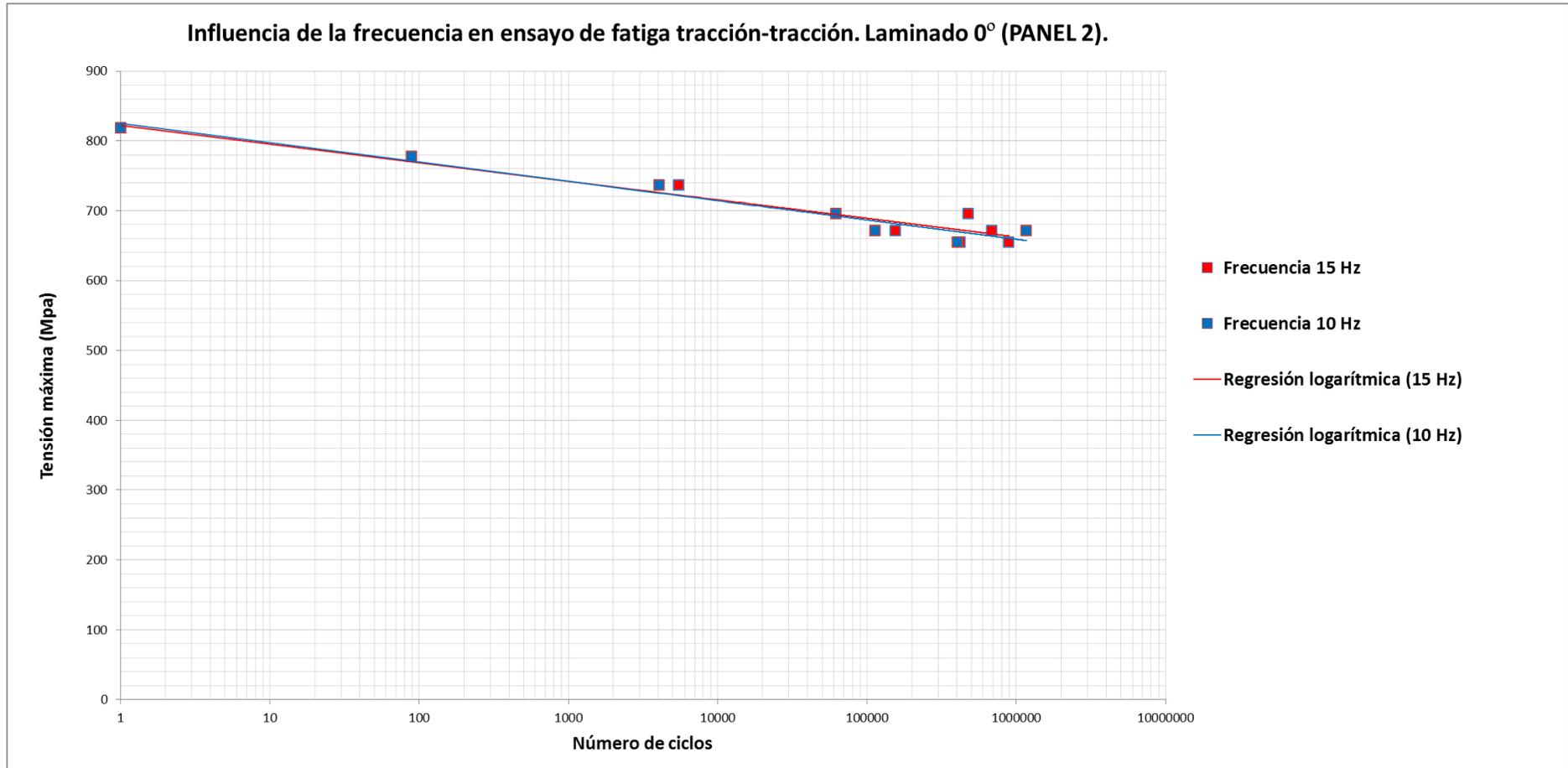


Figura 5.14: Influencia de la frecuencia en el ensayo de fatiga tracción – tracción on-axis. Panel 2.

El comportamiento descrito anteriormente puede apreciarse de una manera más significativa si tomamos todos los datos de los ensayos on-axis, es decir, tanto los del panel 1 como los del panel 2. Para poder representarlos de manera que sean representativos del comportamiento del material, adimensionalizamos la tensión máxima soportada por cada espécimen con su resistencia estática a tracción. El resultado es el nivel de carga soportado.

Para la frecuencia de 10 Hz contamos con 3 ensayos con un nivel de carga del 80%, 3 ensayos con el 82% de carga, 3 ensayos con el 85% de carga, 2 ensayos con el 90% de carga y 2 ensayos con el 95% de carga.

Para la frecuencia de 15 Hz contamos con 3 ensayos con un nivel de carga del 80%, 3 ensayos con el 82% de carga, 2 ensayos con el 85% de carga, 2 ensayos con el 90% de carga y 1 ensayos con el 95% de carga.

El nivel de carga 100% corresponde al ensayo estático de tracción y será incluido en las gráficas como 1 ciclo de carga.

En las tablas 5.5 y 5.6 se presentan los valores de números de ciclos soportados hasta el fallo para cada nivel de carga ensayado a las dos frecuencias bajo estudio.

Frecuencia 10 Hz.

Nivel de carga ($\sigma_{\max} / \sigma_{ut}$)	Número de ciclos hasta el fallo
0,80	1067981
0,80	909303
0,80	400812
0,82	1167040
0,82	345536
0,82	113156
0,85	238736
0,85	89607
0,85	61907
0,90	61446
0,90	4047
0,95	450
0,95	89
1	1

Tabla 5.5: Resultados ensayos on-axis (Frecuencia 10 Hz).

Frecuencia 15 Hz.

Nivel de carga ($\sigma_{\max} / \sigma_{ut}$)	Número de ciclos hasta el fallo
0,80	1086969
0,80	892100
0,80	419000
0,82	1008105
0,82	680714
0,82	154115
0,85	135594
0,85	473739
0,90	39005
0,90	5488
0,95	325
1	1

Tabla 5.6: Resultados ensayos on-axis (Frecuencia 15 Hz).

En las siguientes gráficas (figuras 5.15 y 5.16) podemos observar el número de ciclos soportados por las probetas ensayadas frente al nivel de carga aplicado. Se diferencia el comportamiento a 10 Hz y a 15 Hz y por último en la figura 5.17 se muestra sobre el mismo gráfico las tendencias a ambas frecuencias para que sea más sencilla su comparación.

En la figura 5.17 podemos comprobar lo que se intuía en el comportamiento de ambos paneles por separado. Ahora sí contamos con un número mayor de datos que nos indica que el incremento de frecuencia de 10 a 15 Hz no conlleva una disminución de la vida a fatiga del material compuesto ensayado. Esto no quiere decir que la frecuencia no tenga influencia sino que es mucho menor que la influencia del estado de cargas o que la influencia de la orientación del refuerzo, como veremos posteriormente.

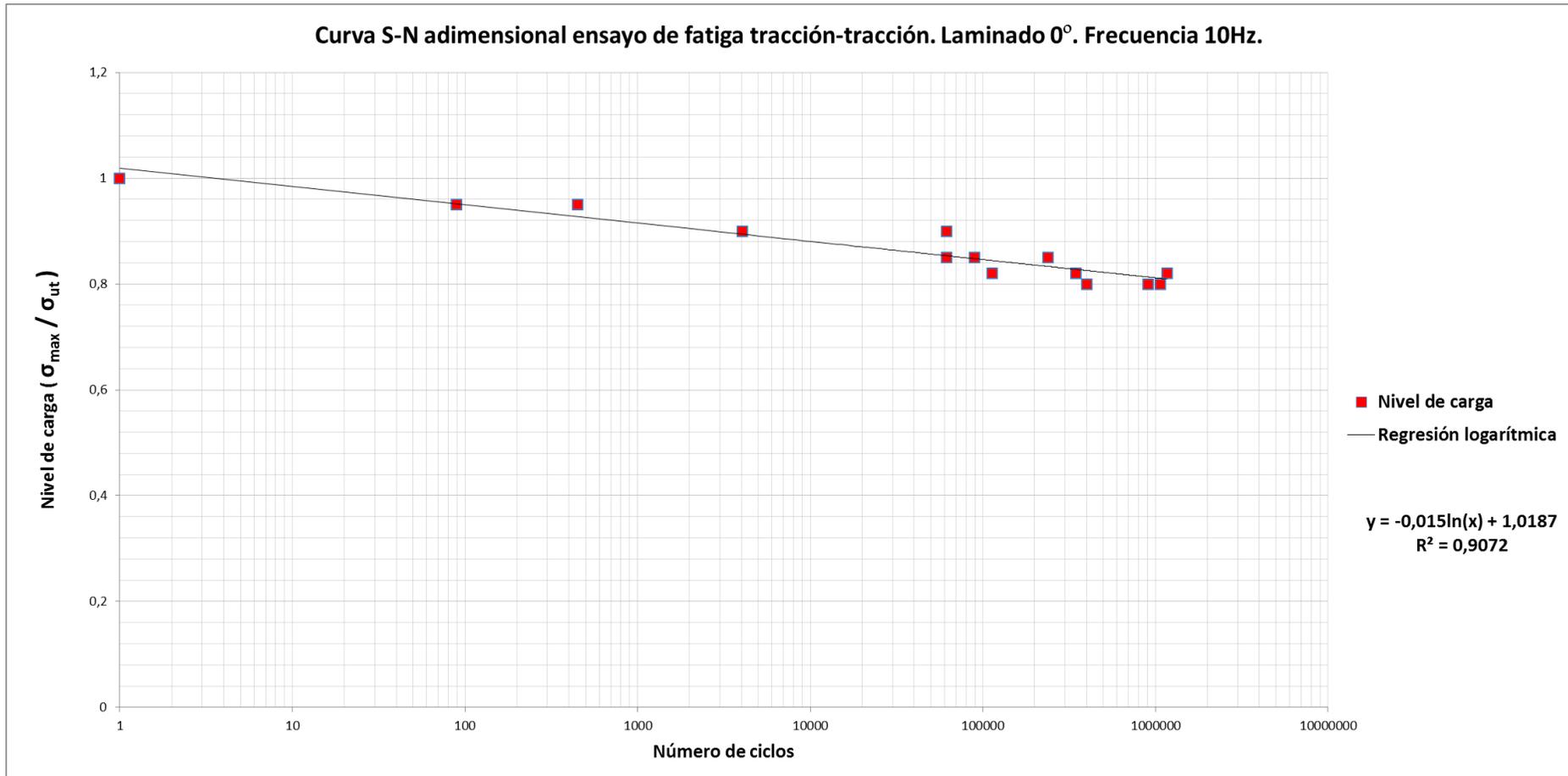


Figura 5.15: Número de ciclos hasta el fallo frente al nivel de carga en el ensayo de fatiga tracción – tracción on-axis. Frecuencia 10 Hz.

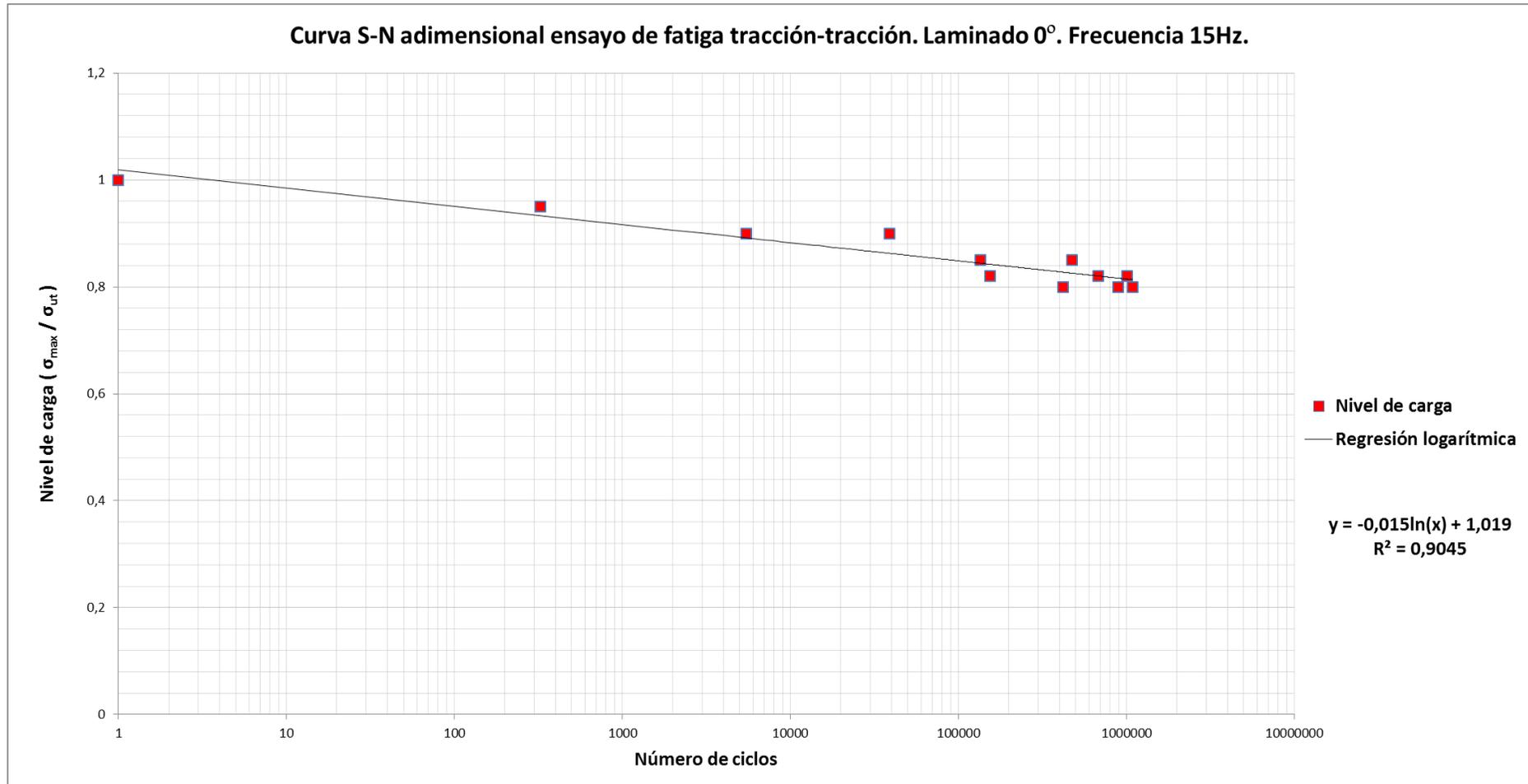


Figura 5.16: Número de ciclos hasta el fallo frente al nivel de carga en el ensayo de fatiga tracción – tracción on-axis. Frecuencia 15 Hz.

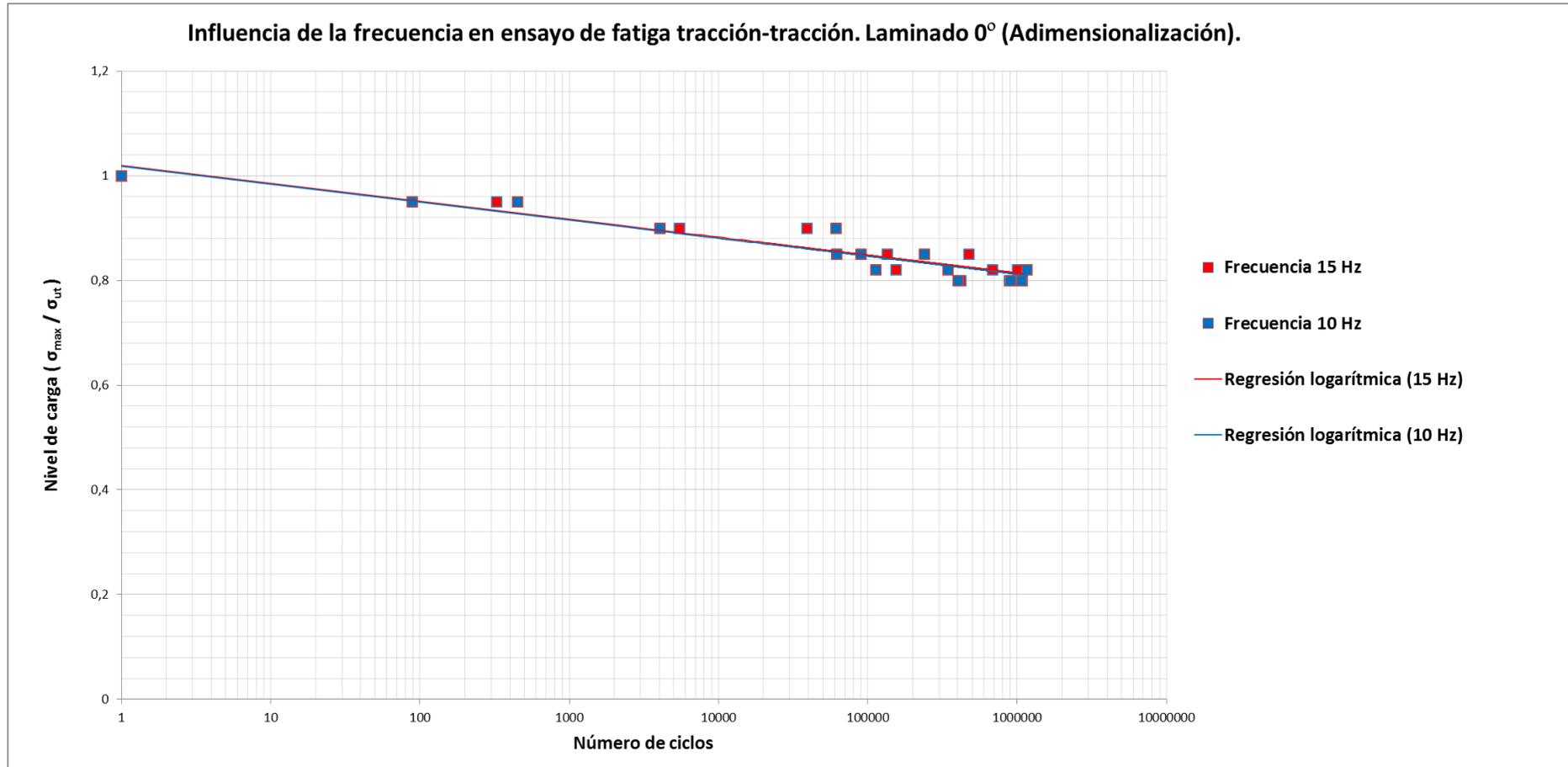


Figura 5.17: Influencia de la frecuencia en el comportamiento a fatiga tracción – tracción on-axis (refuerzo 0/90°)

5.3.2 Ensayos dinámicos off-axis

Debido a la similitud de los valores de resistencia estática a tracción de los paneles con orientación del refuerzo 45/-45° (paneles 3 y 4) los niveles de carga para los ensayos off-axis han sido definidos en base a la resistencia estática media de ambos paneles.

Las frecuencias de ensayo han sido 2 Hz y 8 Hz. Hubiera sido interesante ensayar los especímenes off-axis a las mismas frecuencias que en los ensayos on-axis, pero sin embargo se ha optado por frecuencias menores debido al siguiente problema:

La máquina de ensayos empleada es una Instron 8801 con capacidad de actuación de hasta 100 KN. Los especímenes con el refuerzo a 45/-45° tienen una resistencia a tracción considerablemente menor que los especímenes con el refuerzo a 0/90°. Además, la carga mínima aplicada es un 10% de la carga máxima. Todo esto se traduce en que se debe aplicar a la frecuencia de ensayo una carga mínima de entre 0,2 y 0,4 KN. Siendo la capacidad de la máquina de ensayos de 100 KN, aplicar dichas cargas a frecuencias altas se convierte en prácticamente imposible, ya que es necesario controlar todo el caudal de aceite para variaciones de carga mínimas. Tras llevar a cabo diversas pruebas fallidas a 10 Hz se tomó la determinación de ensayar los especímenes con el refuerzo a 45/-45° a frecuencias de 8 Hz y 2 Hz, ya que para éstas la máquina alcanzaba bien las cargas máxima y mínima.

En las tablas 5.7 y 5.8 se presentan los valores de tensión máxima aplicada durante cada ensayo, tensión última (resistencia estática a tracción), nivel de carga y número de ciclos soportados por cada probeta hasta el fallo.

Frecuencia 2 Hz.

Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión última (σ_{ut}) (MPa)	Nivel de carga ($\sigma_{max} / \sigma_{ut}$)	Número de ciclos hasta el fallo
135,977	209,195	0,65	11225
146,437	209,195	0,70	5514
146,437	209,195	0,70	3769
156,896	209,195	0,75	3504
156,896	209,195	0,75	785
167,356	209,195	0,80	671
167,356	209,195	0,80	236
177,816	209,195	0,85	627
177,816	209,195	0,85	559
188,276	209,195	0,90	212
188,276	209,195	0,90	203
209,195	209,195	1	1

Tabla 5.7: Resultados ensayos off-axis (Frecuencia 2 Hz).

Frecuencia 8 Hz.

Tensión Máxima (σ_{\max}) (MPa)	Tensión última (σ_{ut}) (MPa)	Nivel de carga ($\sigma_{\max} / \sigma_{\text{ut}}$)	Número de ciclos hasta el fallo
135,977	209,195	0,65	3507
135,977	209,195	0,65	2899
146,437	209,195	0,70	1989
146,437	209,195	0,70	7451
156,896	209,195	0,75	630
156,896	209,195	0,75	492
167,356	209,195	0,80	461
167,356	209,195	0,80	308
177,816	209,195	0,85	234
177,816	209,195	0,85	231
188,276	209,195	0,90	190
209,195	209,195	1	1

Tabla 5.8: Resultados ensayos off-axis (Frecuencia 8 Hz).

Los valores mostrados en las tablas 5.7 y 5.8 serán representados en las gráficas S-N de las figuras 5.18 y 5.19. Como se ha hecho en los ensayos on-axis representaremos también dichas curvas adimensionalizadas con la resistencia estática a tracción de los especímenes con refuerzo a 45/-45° obteniéndose el número de ciclos hasta el fallo frente al nivel de carga. Estas gráficas se encuentran representadas en las figuras 5.20 y 5.21.

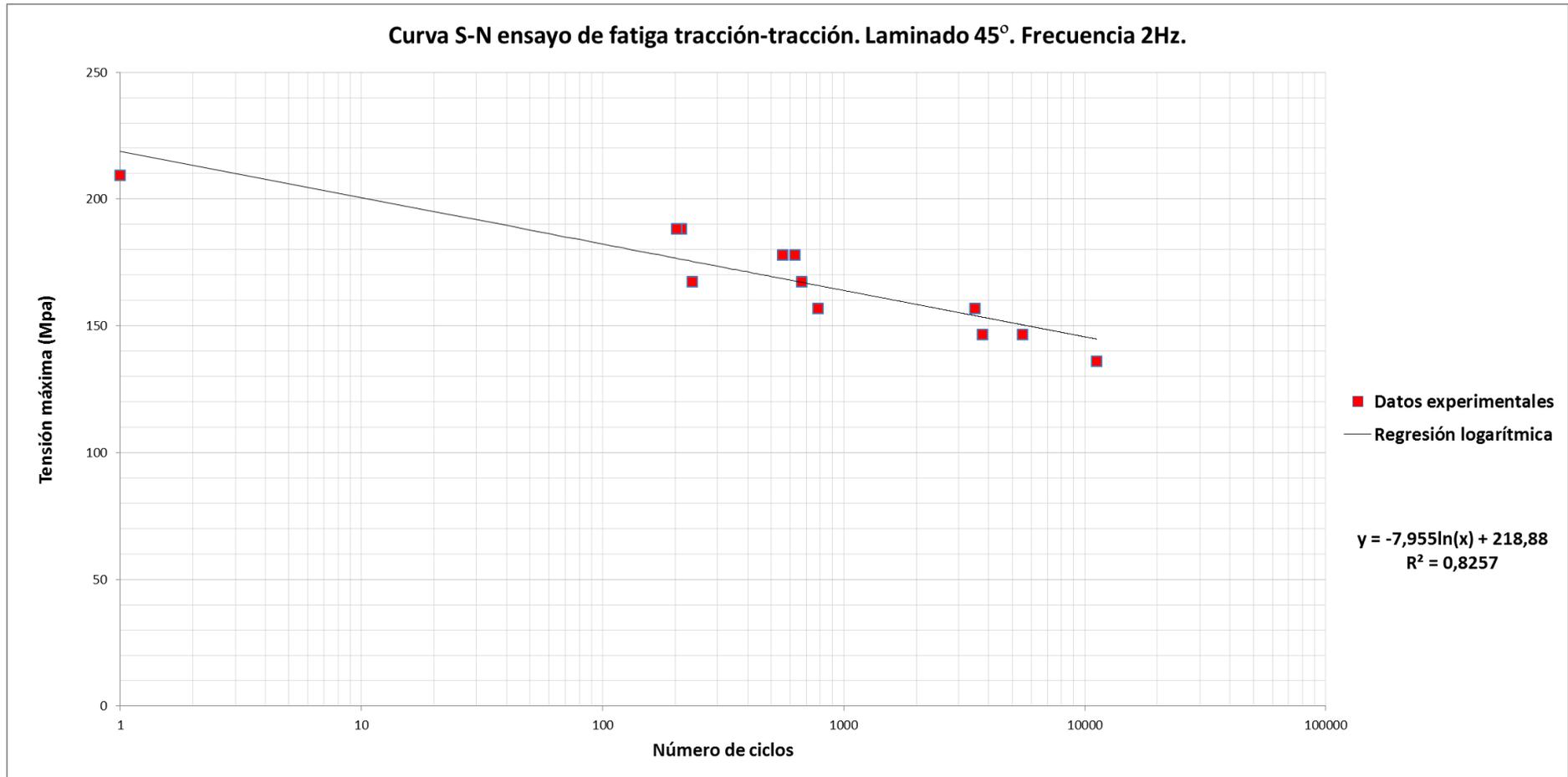


Figura 5.18: Curva S-N ensayo de fatiga tracción - tracción off-axis. Frecuencia 2 Hz.

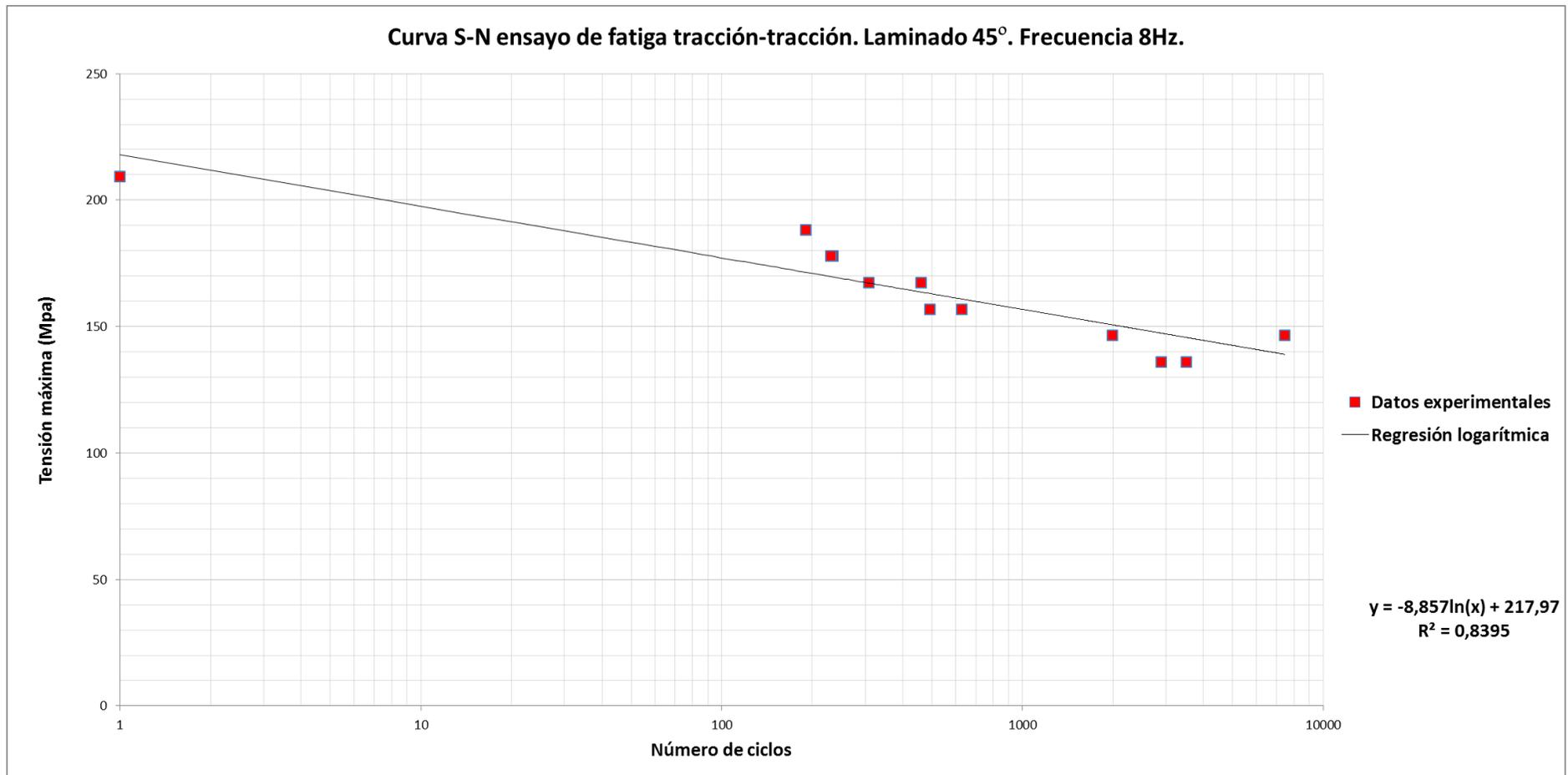


Figura 5.19: Curva S-N ensayo de fatiga tracción - tracción off-axis. Frecuencia 8 Hz.

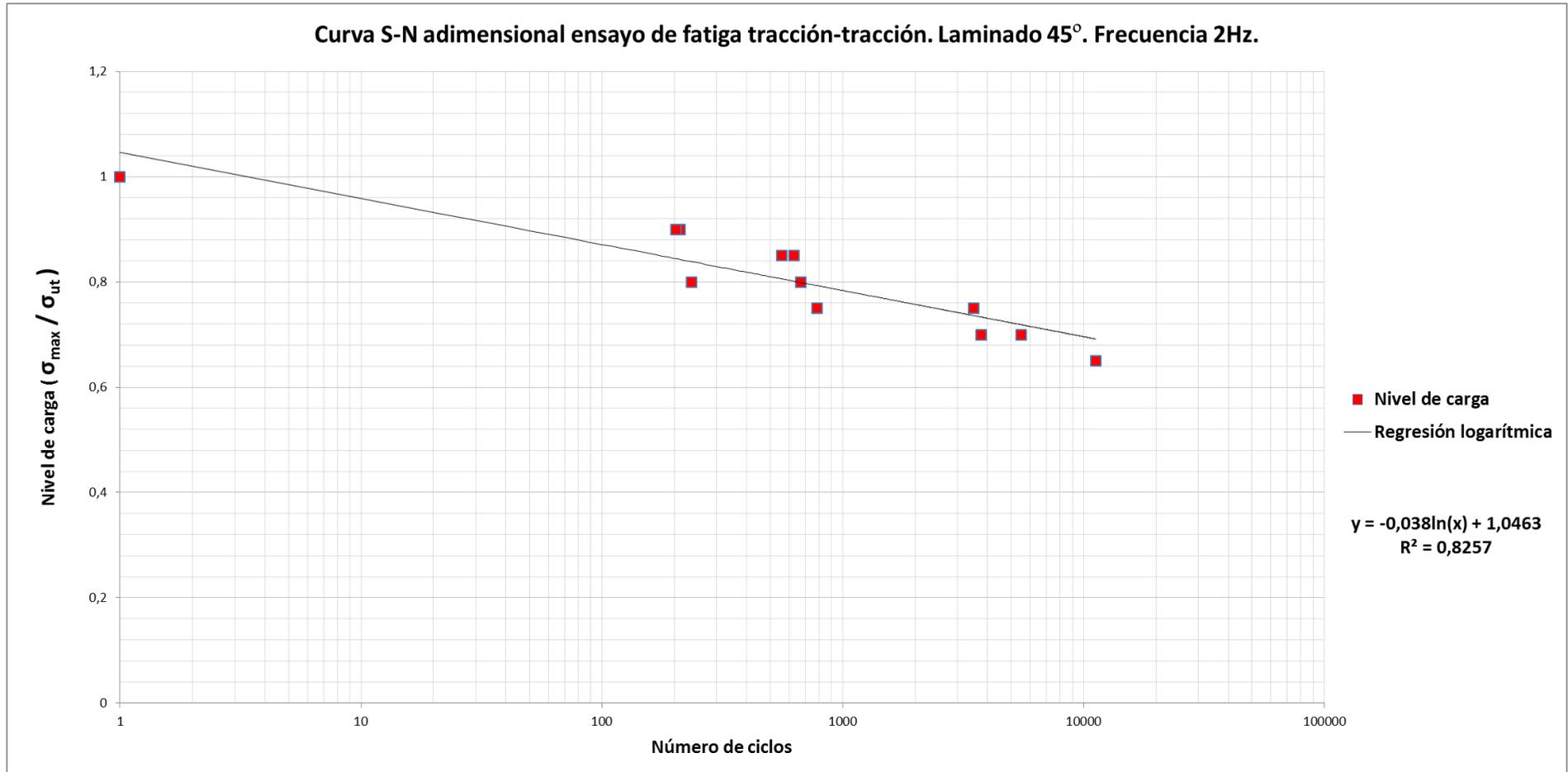


Figura 5.20: Número de ciclos hasta el fallo frente al nivel de carga en el ensayo de fatiga tracción – tracción off-axis. Frecuencia 2 Hz.

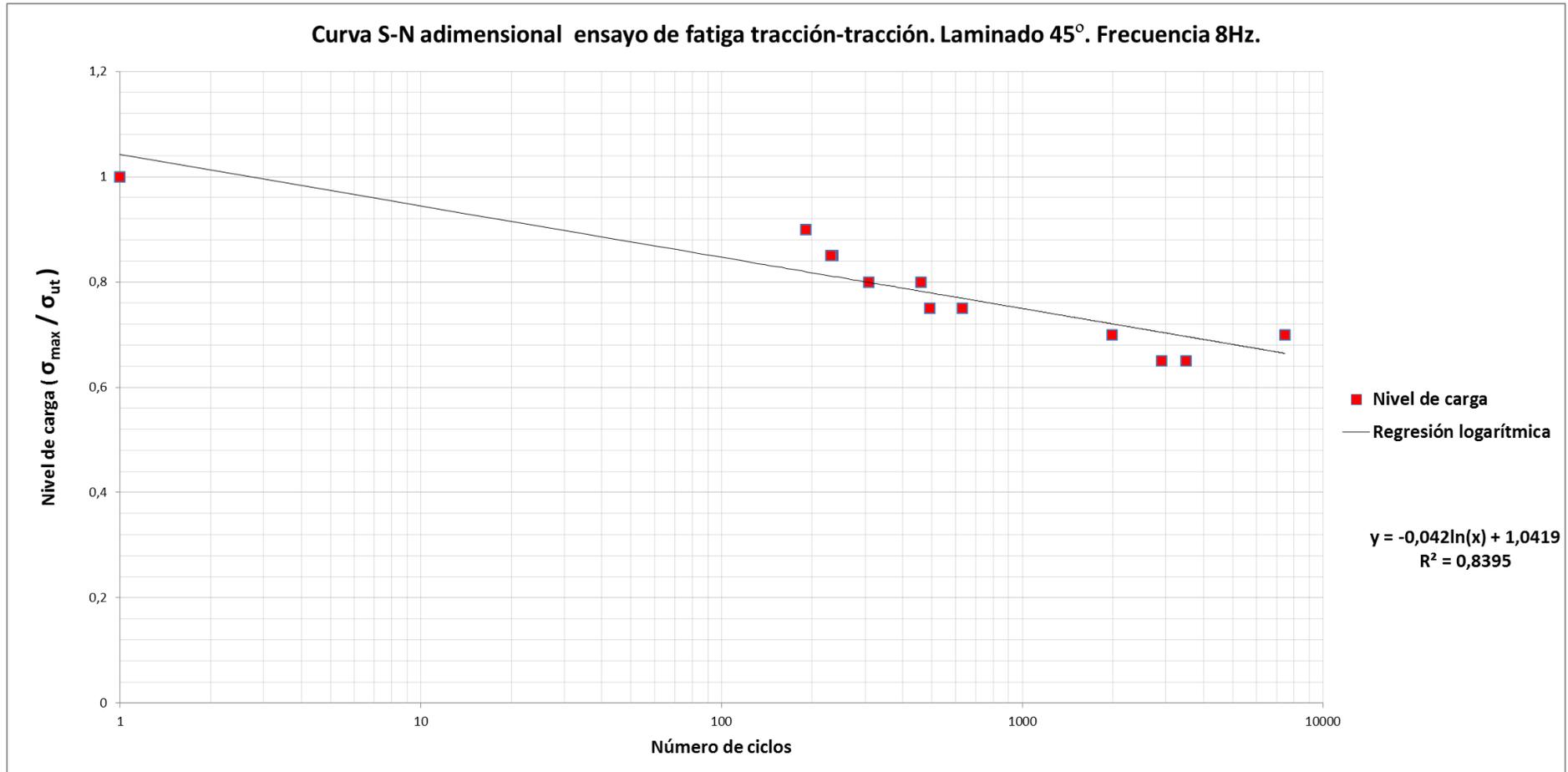


Figura 5.21: Número de ciclos hasta el fallo frente al nivel de carga en el ensayo de fatiga tracción – tracción off-axis. Frecuencia 8 Hz.

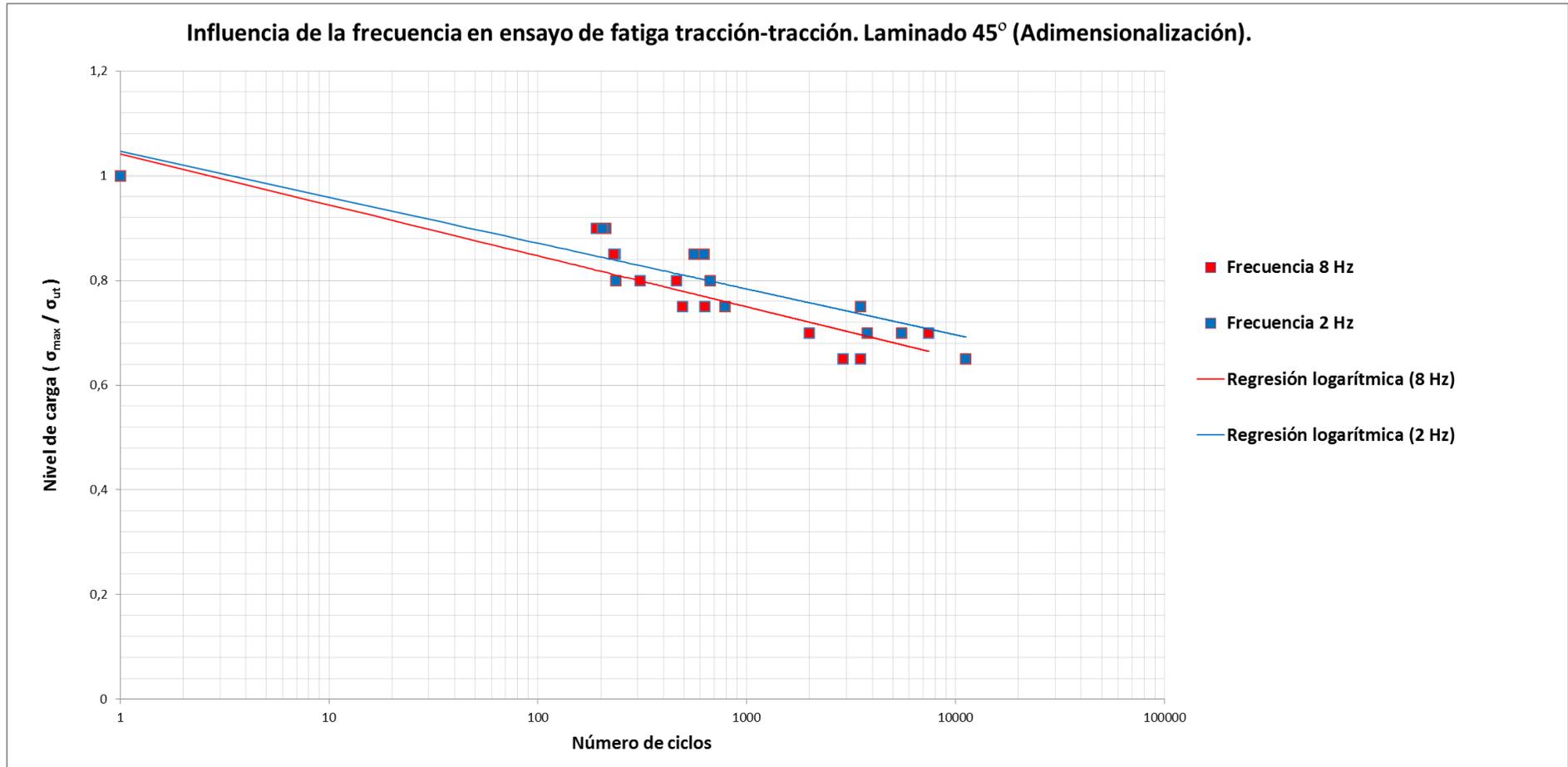


Figura 5.22: Influencia de la frecuencia en el comportamiento a fatiga en tracción – tracción off-axis (Refuerzo 45°/-45°)

En las gráficas anteriores (figuras 5.18 a 5.21) podemos observar que los datos no se ajustan correctamente a una tendencia lineal logarítmica para el caso de los ensayos off-axis. Mientras que para los ensayos on-axis obteníamos un índice R^2 cercano al 0,95, para los ensayos off-axis este índice se queda en torno al 0,8. Además, en la figura 5.22 podemos observar que la influencia de la frecuencia en los ensayos off-axis es un poco más importante que para los ensayos on-axis. No obstante tampoco podemos afirmar que el aumento de frecuencia suponga una disminución de la vida a fatiga ya que sería necesario realizar ensayos a diferentes valores de la frecuencia como 10, 15 y 20 Hz para realizar un estudio completo de su influencia.

En la figura 5.23 podemos observar un gráfico en el que se compara el comportamiento a fatiga de los dos tipos de laminados ensayados y a las dos frecuencias distintas ensayadas cada uno de ellos. Para poderlo representar se ha adimensionalizado la tensión máxima de cada ensayo en particular con la resistencia estática a tracción del panel al que pertenece la probeta ensayada. En dicha gráfica podemos apreciar cómo el comportamiento de los especímenes con refuerzo a $0/90^\circ$ puede caracterizarse mediante una tendencia lineal logarítmica. Sin embargo, la representación de los puntos correspondientes a los especímenes con refuerzo a $45/-45^\circ$ adquiere una forma de S. Dicha representación ya había sido observada en los estudios de Kawai y otros colaboradores [15].

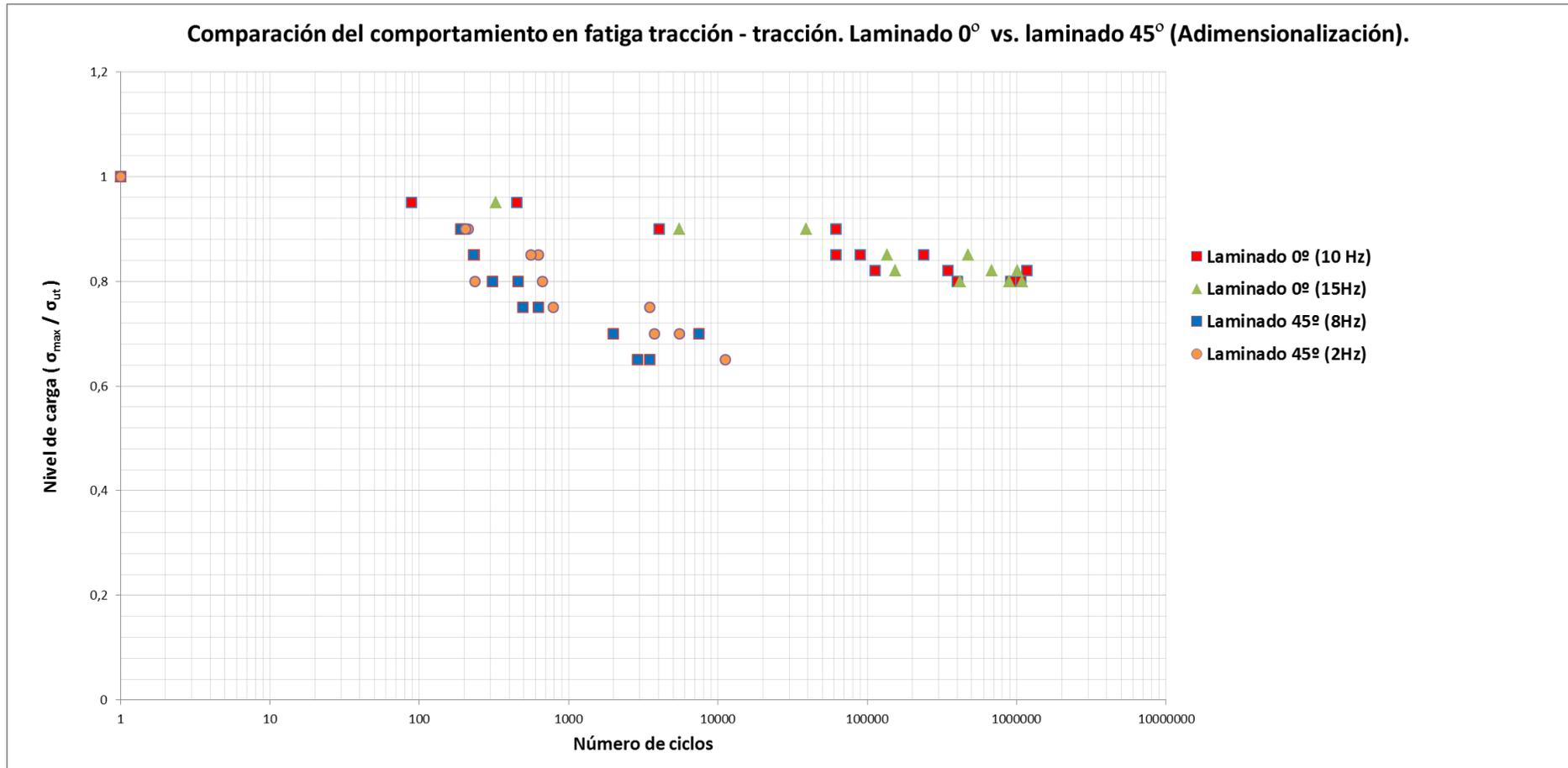


Figura 5.23: Comparación del comportamiento a fatiga on-axis y off-axis a distintas frecuencias de ensayo.

5.3.3 Morfología de la zona de rotura en ensayos dinámicos

Si observamos las figuras 4.16 a 4.19 podemos apreciar que para altos niveles de carga la rotura es más limpia que para bajos niveles de carga, siendo la zona de rotura más parecida a la resultante de los ensayos estáticos. Este comportamiento ocurre tanto en los especímenes con refuerzo a $0/90^\circ$ como en los especímenes con refuerzo a $45/-45^\circ$. En los ensayos en los que se alcanza un elevado número de ciclos antes de la rotura (ensayos a bajo nivel de carga) podemos apreciar una mayor delaminación y una zona afectada mayor.

En las figuras 5.24 a 5.27 podemos apreciar este comportamiento:



Figura 5.24: Detalle de la rotura de la probeta P0_12 (95% de carga, 10 Hz)

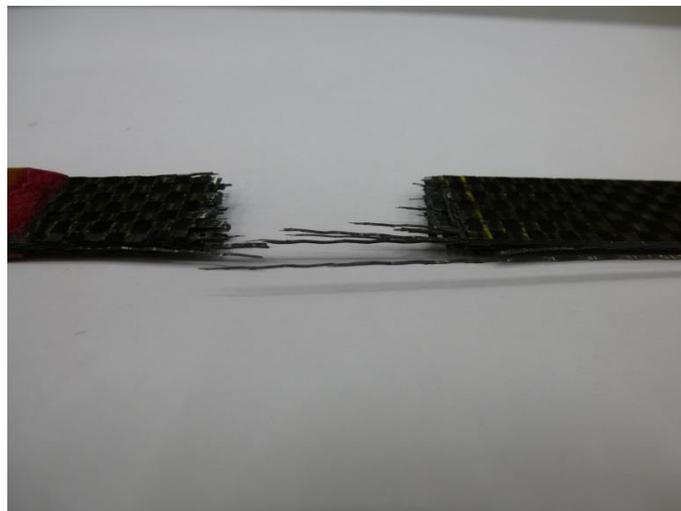


Figura 5.25: Detalle de la rotura de la probeta P0_20 (80% de carga, 10 Hz)

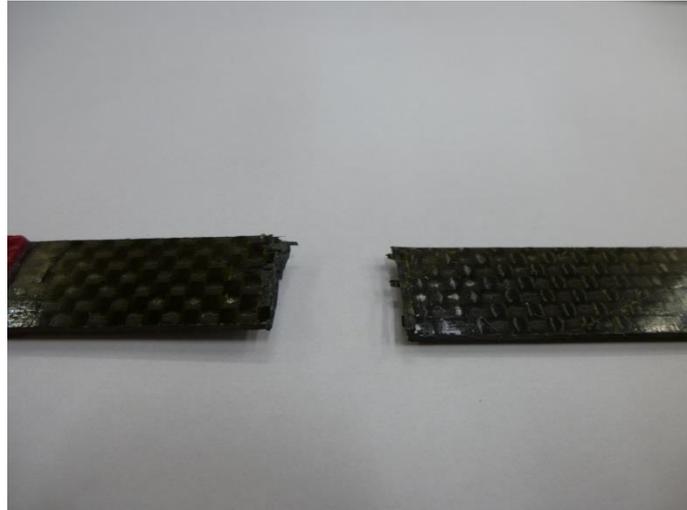


Figura 5.26: Detalle de la rotura de la probeta P0_32 (90% de carga, 15 Hz)

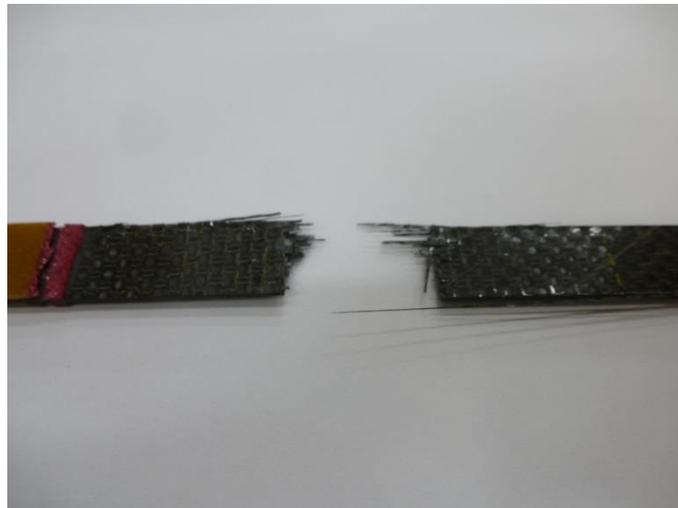


Figura 5.27: Detalle de la rotura de la probeta P0_27 (80% de carga, 15 Hz)

En los especímenes con refuerzo a $45/-45^\circ$ podemos apreciar también una leve estricción en la zona de rotura de la probeta. Esto es debido a que para soportar mejor la carga aplicada las fibras intentan reorientarse en la dirección de tracción, esto es, a 0° . Podemos apreciar este fenómeno en la figura 5.28.

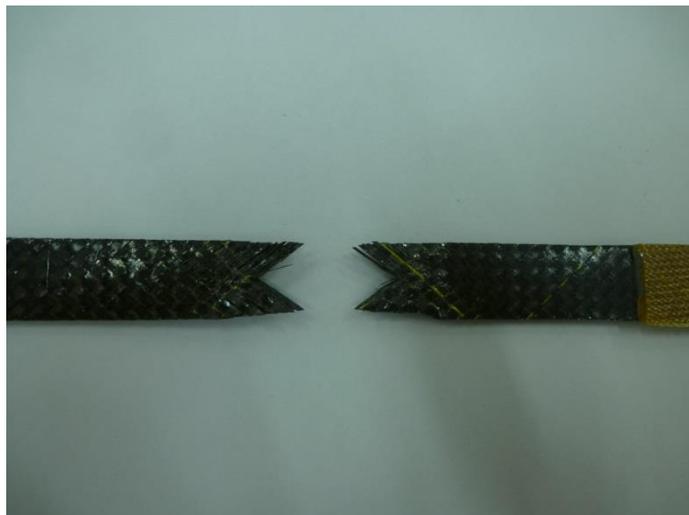


Figura 5.28: Detalle de la rotura de la probeta P45_05 (75% de carga, 8 Hz)

5.3.4 Evolución de la temperatura en los ensayos dinámicos

Tal como se indicó en el apartado 4.3, para analizar el calentamiento de las probetas durante el desarrollo de los ensayos de fatiga se ha empleado un termopar.

Es preciso comentar que durante dichos ensayos, en ciertas ocasiones, la máquina de ensayos sufrió algunas paradas de funcionamiento. Esto fue debido a problemas con el suministro de aceite (falta del calentamiento necesario del aceite para el correcto funcionamiento) y problemas con el filtro del aceite. Dichas paradas no afectaron al número de ciclos soportados por los especímenes, ya que las grietas formadas en las fibras continuaron estando presentes, es decir, el deterioro por fatiga es un proceso acumulativo. Sin embargo, estas paradas sí afectaron a la evolución de la temperatura de las probetas. Conforme las probetas van soportando ciclos de carga, éstas comienzan a calentarse hasta el momento de su rotura; pero al interrumpirse los ensayos, la temperatura decrece rápidamente, por lo que el deterioro de la matriz derivado del calentamiento no es el mismo.

Por lo tanto, el estudio de la evolución de la temperatura durante los ensayos de fatiga no es lo suficientemente fiable como deseáramos. Sin embargo podemos obtener ciertas conclusiones cualitativas del calentamiento sufrido por las probetas dependiendo del nivel de carga al que están sometidas y la frecuencia de ensayo.

A continuación se muestran las temperaturas alcanzadas por los especímenes para cada nivel de carga ensayado. Se diferencia cada tipo de ensayo, esto es, para cada tipo de laminado y para cada frecuencia de ensayo. La temperatura ambiente durante el ensayo y, por tanto, la temperatura de las probetas antes de comenzar el ensayo ha sido en todos los casos 23 °C.

Ensayos on-axis. Frecuencia 10 Hz.

Se han producido incrementos de temperatura de entre 5 y 8 °C. La temperatura máxima alcanzada se produjo en la probeta PO_23 (85% de carga), llegando a los 31 °C a los 40000 ciclos y manteniéndose esta temperatura hasta la rotura a los 61000 ciclos. En la figura 5.29 podemos observar las temperaturas alcanzadas por las probetas según el nivel de carga al que han sido ensayadas.

Ensayos on-axis. Frecuencia 15 Hz.

Se han producido incrementos de temperatura de entre 5 y 23 °C. La temperatura máxima alcanzada se produjo en la probeta PO_14 (82% de carga), llegando a los 46 °C a los 100000 ciclos justo antes de la rotura. En la figura 5.30 podemos observar las temperaturas alcanzadas por los especímenes ensayados a 15 Hz según el nivel de carga al que han sido sometidos.

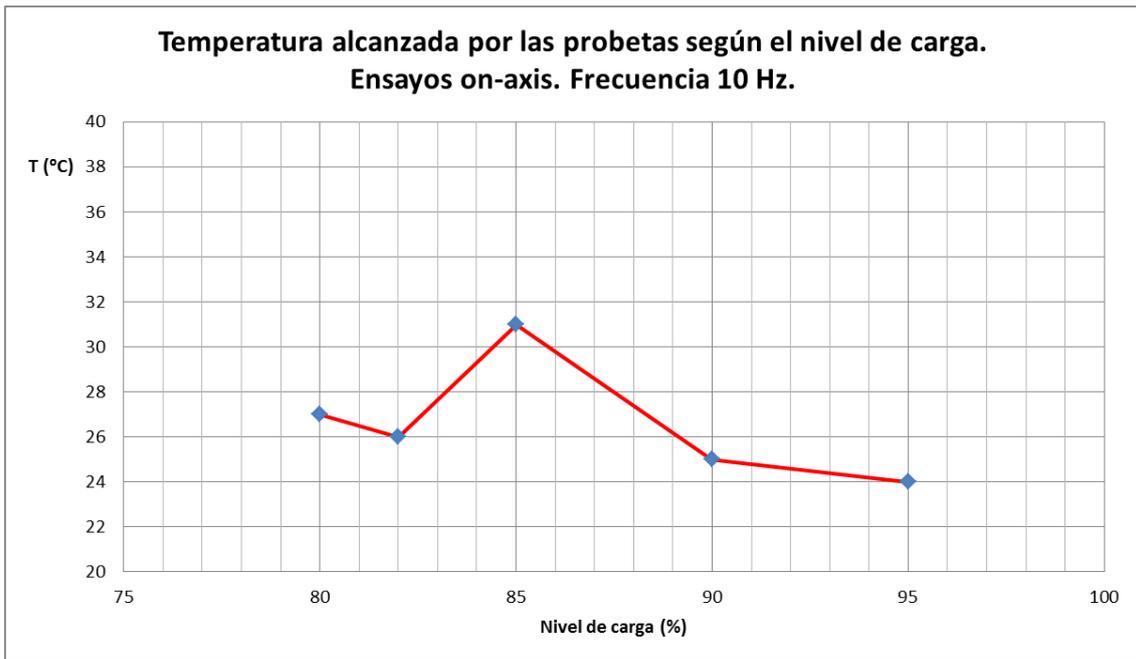


Figura 5.29: Temperatura alcanzada por las probetas según el nivel de carga.
Ensayos on-axis. Frecuencia 10 Hz.

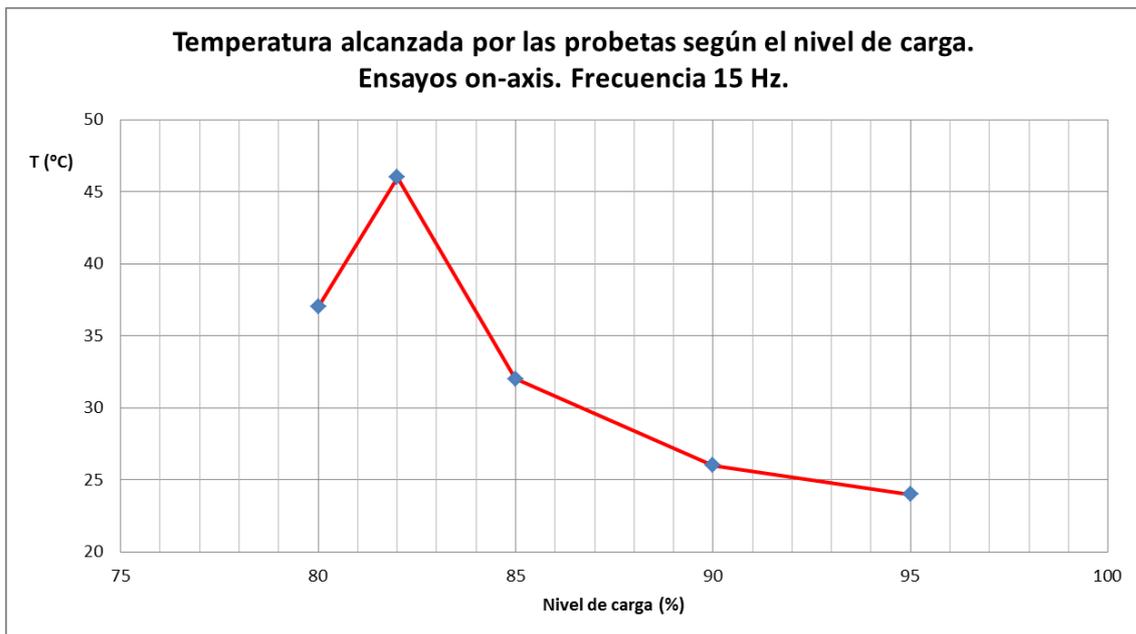


Figura 5.30: Temperatura alcanzada por las probetas según el nivel de carga.
Ensayos on-axis. Frecuencia 15 Hz.

Ensayos off-axis. Frecuencia 2 Hz.

Se han producido incrementos de temperatura de entre 5 y 20 °C. La temperatura máxima alcanzada se produjo en la probeta P45_13 (82% de carga), llegando a los 44 °C a los 700 ciclos justo antes de la rotura. En la figura 5.31 podemos observar las temperaturas alcanzadas por los especímenes ensayados a 2 Hz según el nivel de carga al que han sido sometidos.

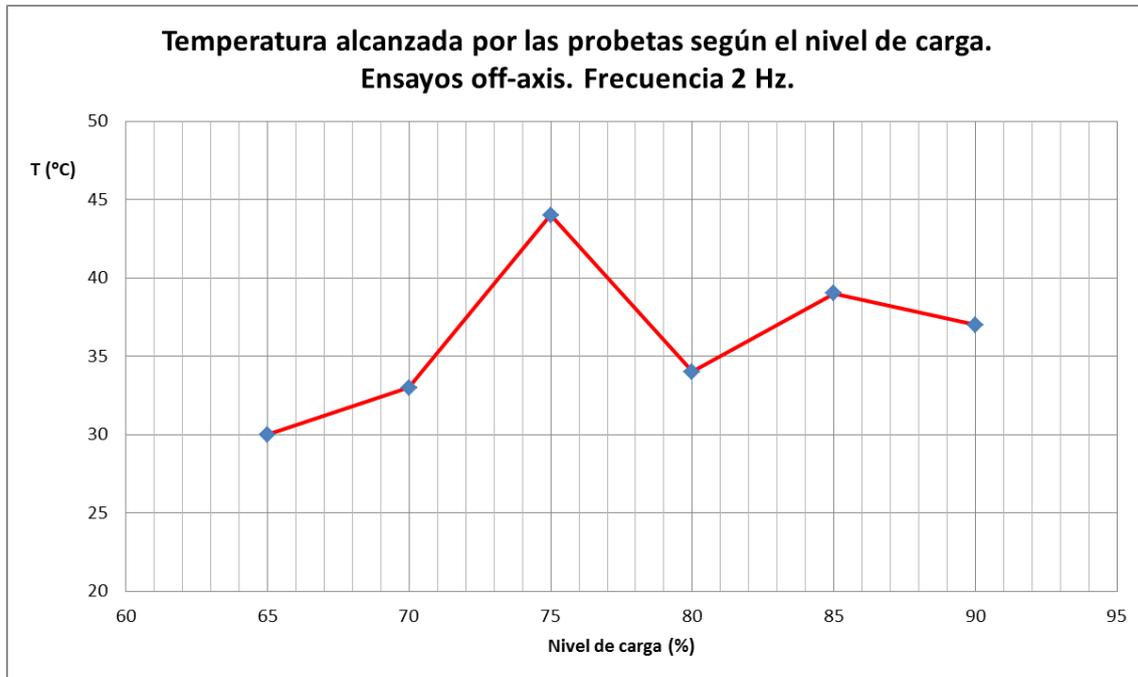


Figura 5.31: Temperatura alcanzada por las probetas según el nivel de carga.
Ensayos off-axis. Frecuencia 2 Hz.

Ensayos off-axis. Frecuencia 8 Hz.

Se han producido incrementos de temperatura de entre 20 y 40 °C. La temperatura máxima alcanzada se produjo en las probetas P45_19 (65% de carga) y P45_05 (75% de carga) llegando ambas a los 67 °C instantes antes de la rotura. En la figura 5.32 podemos observar las temperaturas alcanzadas por los especímenes ensayados a 8 Hz según el nivel de carga al que han sido sometidos.

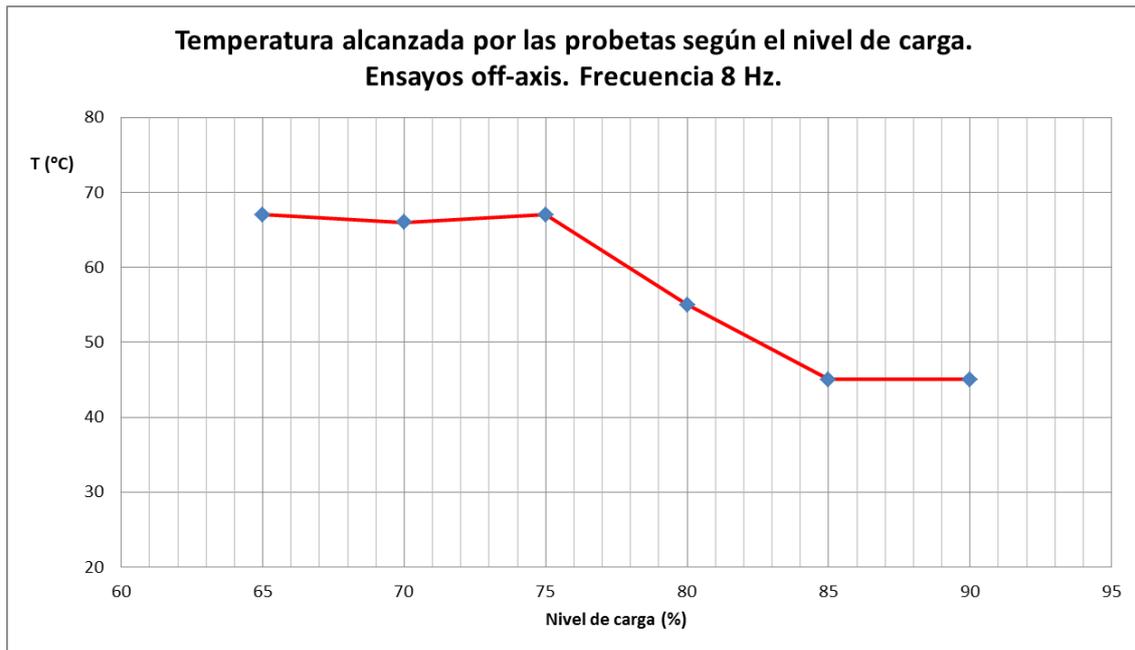


Figura 5.32: Temperatura alcanzada por las probetas según el nivel de carga.
Ensayos off-axis. Frecuencia 8 Hz.

Tras el estudio del calentamiento de los especímenes podemos observar varias conclusiones:

- Las probetas con el refuerzo a 45/-45° sufren un calentamiento superior a las probetas con el refuerzo a 0/90°.
- El calentamiento sufrido es mayor a mayores frecuencias de ensayo.
- Las probetas que más se calientan son las ensayadas a niveles medios de carga, en los que se alcanza un número elevado de ciclos a una tensión máxima de valor medio (ni muy bajas ni cercanas a la resistencia estática a tracción).