



Comparación de coeficiente de rodadura de neumático mediante metodología convencional y banco de ensayos de tracción-compresión.

Idefonso F. García¹, Enrique Carabias¹, Óscar Cuadrado², Juan A. Cabrera¹, Juan J. Castillo¹, Miguel Sanchez²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos, Universidad de Málaga, igmartinez@uma.es, eca@uma.es, jcabrera@uma.es, juancas@uma.es

²Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía, Universitat Miguel Hernández, ocuadrado@umh.es, msanchez@umh.es

La resistencia a la rodadura de los neumáticos es uno de los factores de mayor influencia en el consumo de un automóvil. Por este motivo, para los usuarios y los investigadores de vehículos, poder determinar en qué categoría energética se encuentran es un dato de gran importancia. Los fabricantes de neumáticos invierten numerosos recursos en cuantificar y minimizar esta pérdida de energía por rodadura. Los métodos normalizados actuales para el etiquetado de la categoría energética de los neumáticos requieren de una gran cantidad de tiempo para la realización de los ensayos necesarios. En trabajos anteriores, analizando un neumático de motocicleta, se planteaba un método simplificado para la estimación de las pérdidas por rodadura, que se basa en un ensayo rápido de la medida de la energía de deformación utilizando un banco de tracción-compresión vertical. En este trabajo se amplía el estudio a tres neumáticos de vehículo turismo, de idénticas dimensiones, pero de diferente categoría energética. Los ensayos se realizan en diferentes condiciones de carga y de presión con objeto de validar el método anterior para clasificar neumáticos en función de la eficiencia energética. Los resultados se compararán con los obtenidos en banco de ensayo de rodadura normalizado. En este artículo se desarrolla todo el proceso llevado a cabo para la realización de los ensayos, así como las conclusiones que arrojan los resultados obtenidos.

1. Introducción

En este trabajo, se establece la relación que se obtiene entre el coeficiente de rodadura, realizado para un mismo neumático, en un ensayo normalizado y la energía de deformación del neumático en un ensayo de tracción-compresión vertical [1, 2]. Para ello, primero se tiene que escoger un modelo de neumático concreto y realizarle un ensayo convencional en un banco de rodadura. Una vez obtenido el coeficiente, se procede con la metodología alternativa propuesta aplicando al neumático una carga vertical variable midiéndose la energía consumida en la deformación. El método propuesto se basa en el modelo de «single point» [3] de Kelvin-Maxwell (Figura 1a), que tiene en cuenta el comportamiento tanto elástico como viscoelástico del neumático. El comportamiento elástico se modela mediante una variable K_s , que depende de la carga. El comportamiento viscoelástico se modela mediante la incorporación de dos variables en serie K_d y C_d . Estas dos variables dependen de la frecuencia de excitación de la carga vertical aplicada en el ensayo.

Se puede utilizar este modelo de «single point» para generar un modelo de «ring», discretizando la huella de contacto y suponiendo un comportamiento elástico y viscoelástico en la dirección radial del neumático (Figura 1b). De esta forma se considera la mayor parte de pérdida de energía que está involucrada en la resistencia de la rodadura. Según el fabricante de neumáticos Michelin [4], alrededor del 80% de esta energía está relacionada con la histéresis del neumático, es decir con la energía que consume el neumático al deformarse y que no devuelve al dejar de estar deformado. El modelo de Kelvin-Maxwell contempla adecuadamente esta energía de deformación que se produce tanto en rodadura como en un ensayo de tracción-compresión vertical.

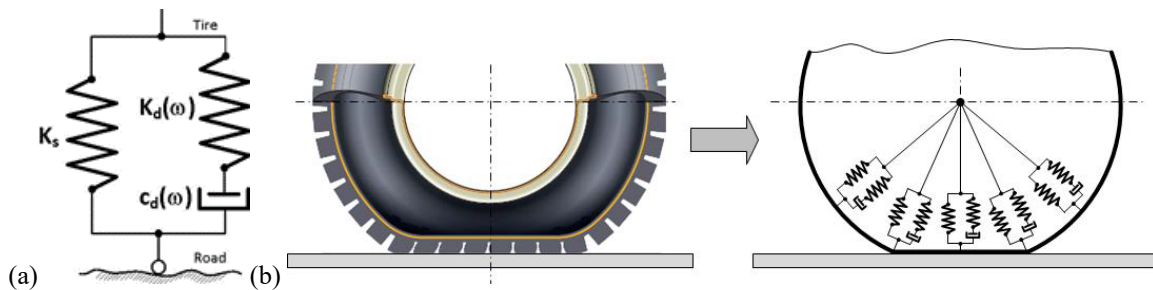


Figura 1: (a) Modelo de Kelvin-Maxwell. (b) Modelo de neumático con elementos viscoelásticos.

2. Coeficiente de rodadura y etiquetado energético.

Para calcular con exactitud el valor del coeficiente de rodadura es necesario realizar un ensayo normalizado bajo ciertas condiciones, de tal modo que nos sirva para comparar el consumo de energía entre varios neumáticos. Estas condiciones establecen la temperatura a la cual tiene que estar tanto el neumático como la sala donde se realiza el ensayo, la carga vertical aplicada, la presión de inflado del mismo, el tipo de llanta utilizada y la velocidad a la que se realiza el ensayo.

Para un neumático de vehículo turismo de medidas 205/65R15, 94H, utilizado en este trabajo, las condiciones del ensayo normalizado son:

- Temperatura ambiente, T , de 25°C.
- Carga vertical aplicada, Q , del 80% de la carga máxima del neumático. Para este en particular, el índice de carga es de 94, cuya carga máxima es de 670 kg [5], por lo que la fuerza aplicada es de 5252 N.
- Presión de inflado, P , de 2,1 bar. Esta presión debe ser tomada justo antes de realizar el ensayo y después de verificar que la temperatura ambiente de la sala y el neumático es de 25°C durante al menos las 24 horas anteriores.
- El tipo de llanta a utilizar tiene que ser del mismo diámetro que el neumático, 15", y de un ancho compatible. Para conocer los anchos compatibles, según normativa ETRTO hay varias opciones, 6.0" es el ancho recomendado, aunque sería válido desde 5.5" hasta 7.5" [5].
- La velocidad a la que se calcula el coeficiente de rodadura es de 80 km/h.

Los resultados de este ensayo, en estas condiciones concretas, nos permiten obtener el coeficiente de rodadura y asignar la categoría correspondiente en su etiquetado (Figura 2a). Esta categoría energética se representa en la etiqueta con una letra, desde la A hasta la G siendo la letra A la más eficiente.

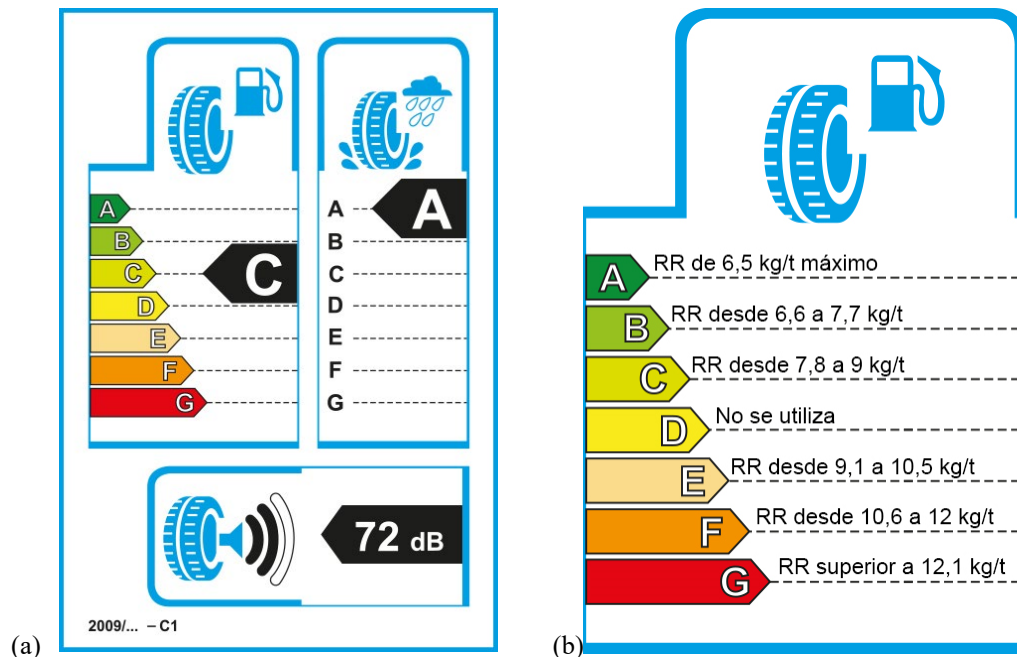


Figura 2: (a) Ejemplo de etiqueta energética de neumático de coche. (b) Rangos de coeficiente de rodadura para cada categoría energética [<https://www.blogmecanicos.com/>]

En la figura 2b, se representa la asignación del coeficiente de rodadura a la categoría energética. Este valor expresado en kg/t, hace referencia a la energía consumida por el neumático en rodadura en las condiciones particulares del ensayo. Los resultados varían sensiblemente si se cambia alguna de las condiciones, siendo las más influyentes la presión de inflado, la carga vertical y la velocidad. Por este motivo, para realizar una buena medición hay que ser muy precisos y repetitivos en los ensayos ya que la variación de una décima de kg/t puede provocar que pase de una categoría energética a otra inferior o superior.

3. Ensayo en banco de rodadura de Universitat Miguel Hernández de Elche (UMH)

Para la realización de este artículo, se han ensayado tres neumáticos diferentes, para poder determinar las siguientes cuestiones sobre el coeficiente de rodadura:

- Conocer su valor real para cada uno de los neumáticos y compararlo con el que viene en su etiqueta.
- Conocer la relación que hay entre el coeficiente de rodadura para cada uno de los ensayos y la energía de deformación del neumático medido en el banco de tracción-compresión.

Los neumáticos ensayados tienen las mismas medidas de 205/65R15 94H, pero han sido escogidos de distintos fabricantes y con diferentes categorías energéticas con objeto de comparar los resultados. Se nombrarán neumático 1 con etiqueta C, neumático 2 con B y neumático 3 con E.

Los ensayos se han realizado en el banco de rodadura de la UMH (Figura 3) según el método homologado ($Q=80\%$, $P=2.1\text{bar}$, $V=80\text{km/h}$ y $T=25^\circ\text{C}$). El procedimiento de obtención del coeficiente de rodadura es el que se contempla en la norma ISO 28580 [6] para un banco inercial. El ensayo realiza varias aceleraciones y deceleraciones desde los 130 km/h hasta los 20 km/h, y se registra el valor obtenido al pasar por la velocidad de 80 km/h.



Figura 3: Banco de rodadura del Laboratorio de Vehículo de la UMH.

Se muestra a continuación el coeficiente de rodadura, C_{rr} , obtenido mediante el ensayo estándar para cada uno de los tres neumáticos:

- Neumático 1: $C_{rr1} = 8.28$ kg/t (etiqueta C)
- Neumático 2: $C_{rr2} = 7.14$ kg/t (etiqueta B)
- Neumático 3: $C_{rr3} = 10.26$ kg/t (etiqueta E)

Por lo tanto, se comprueba no solo que el valor obtenido en los ensayos corresponde con el rango de la categoría de su etiqueta, sino que también se determina su posición dentro de ese rango.

4. Ensayo en banco de tracción-compresión vertical Universidad de Málaga (UMA)

Una vez realizados los ensayos en el banco de rodadura, los neumáticos se ensayan en el banco de tracción-compresión. Este banco no puede ser configurado exactamente igual en todas las variables ya que no se dispone de regulación de temperatura de la sala, el neumático no está girando y la zona de contacto neumático-plataforma es completamente plana. No obstante, los ensayos se han realizado en días en los que la temperatura ambiente estaba en torno a los 25°C y la zona de contacto plana se parece más a la realidad que la de un rodillo de 2 metros de diámetro.

Los ensayos se realizan montando los neumáticos en llantas equivalentes a los del banco de rodadura, en este caso en medidas de 15x6.5J, los cuales son admisibles para la medida 205/65R15. Las llantas se colocan en el utillaje diseñado específicamente para la realización de este ensayo respetando las zonas de deformación del neumático, para evitar que haya algún contacto que pueda alterar el valor medido (Figura 4).



Figura 4: Banco de ensayo de carga vertical del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UMA.

La metodología de trabajo consiste en primer lugar en regular la presión a la deseada para cada ensayo e iniciarlo con una carga senoidal a la frecuencia de 1 Hz hasta la Q deseada. Una vez se estabilizan los valores de Q_{\max} y Q_{\min} , siendo Q_{\min} siempre 0 N (Figura 5) se obtienen los valores de deformación vertical y de energía de deformación (área de histéresis).

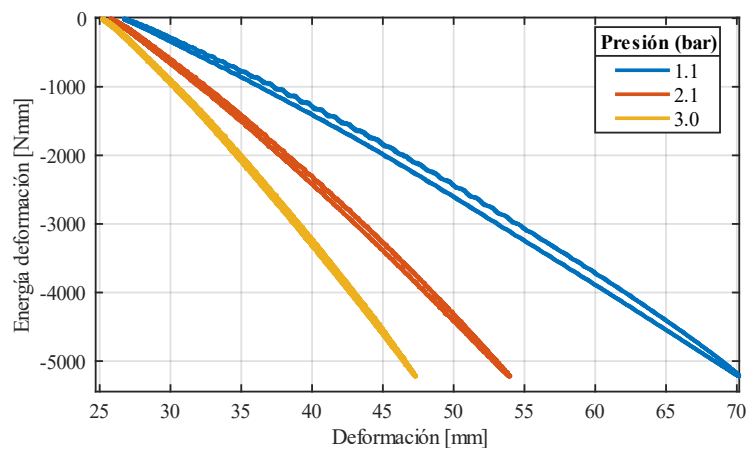


Figura 5: Gráfica ejemplo de ciclo de carga y descarga para neumático 2 ($Q=80\%$).

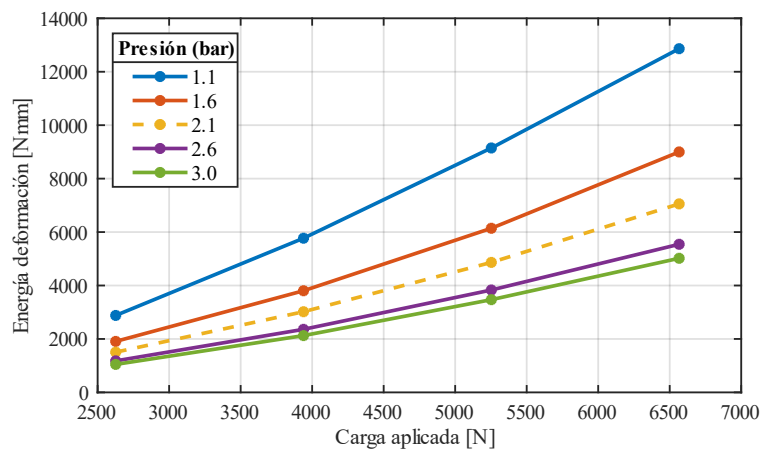


Figura 6: Gráfica ejemplo con resultados del neumático 2.

Se realizan veinte ensayos (Figura 6) para cada uno de los neumáticos según el método descrito en las siguientes condiciones:

- Ensayos a diferentes cargas ($Q=40\%$, 60% , 80% y 100%).
- Ensayos a diferentes presiones para cada una de las cargas anteriores ($P = 1.1\text{bar}$, 1.6bar , 2.1bar , 2.6bar y 3.0bar).

5. Discusión de resultados

A continuación, se muestran gráficas comparativas con los resultados de los tres neumáticos. La figura 7 para carga 80% a diferentes presiones de ensayo, y la figura 8 para una misma presión con diferentes cargas.

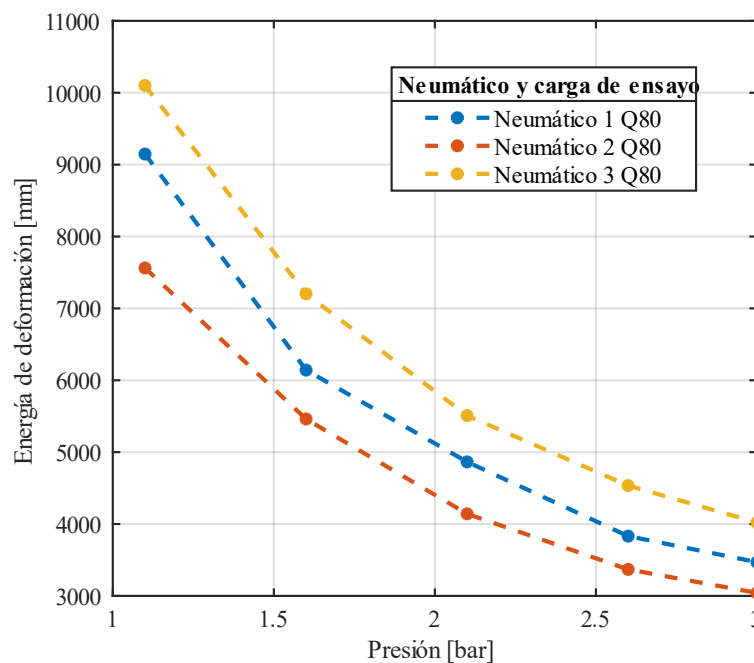


Figura 7: Energía de deformación en función de la presión para $Q=80\%$.

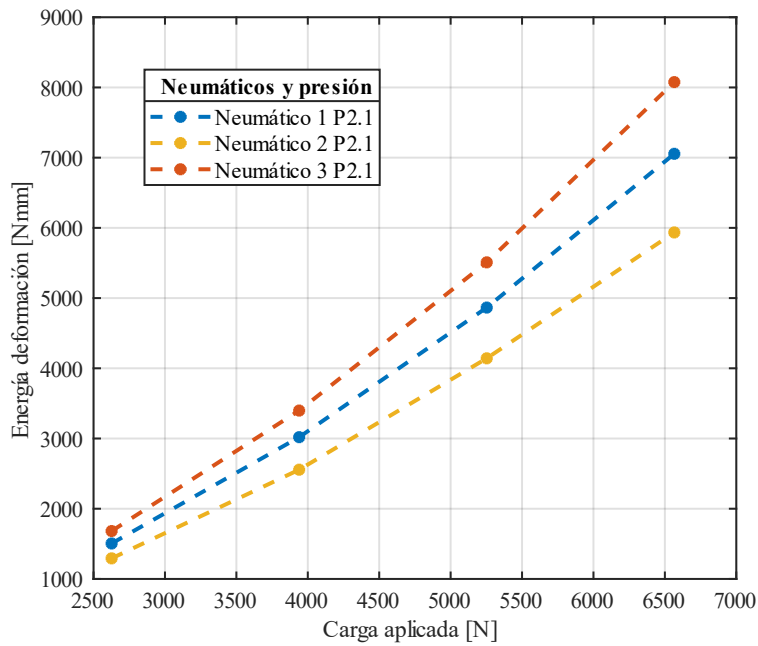


Figura 8: Energía de deformación en función de la carga para P=2,1 bar.

Se puede observar que la metodología propuesta permite diferenciar claramente entre neumáticos la energía consumida en deformación en función de su categoría.

En la figura 9, si comparamos la energía obtenida en los ensayos por esta metodología, para las presiones y cargas normalizadas, con los valores de coeficiente de rodadura obtenidos en el ensayo normalizado, se puede ver cómo están relacionados los dos valores. Las líneas horizontales negras delimitan los rangos de los valores de coeficiente de rodadura para las categorías energéticas, los cuales se corresponden a los indicados en la figura 2b.

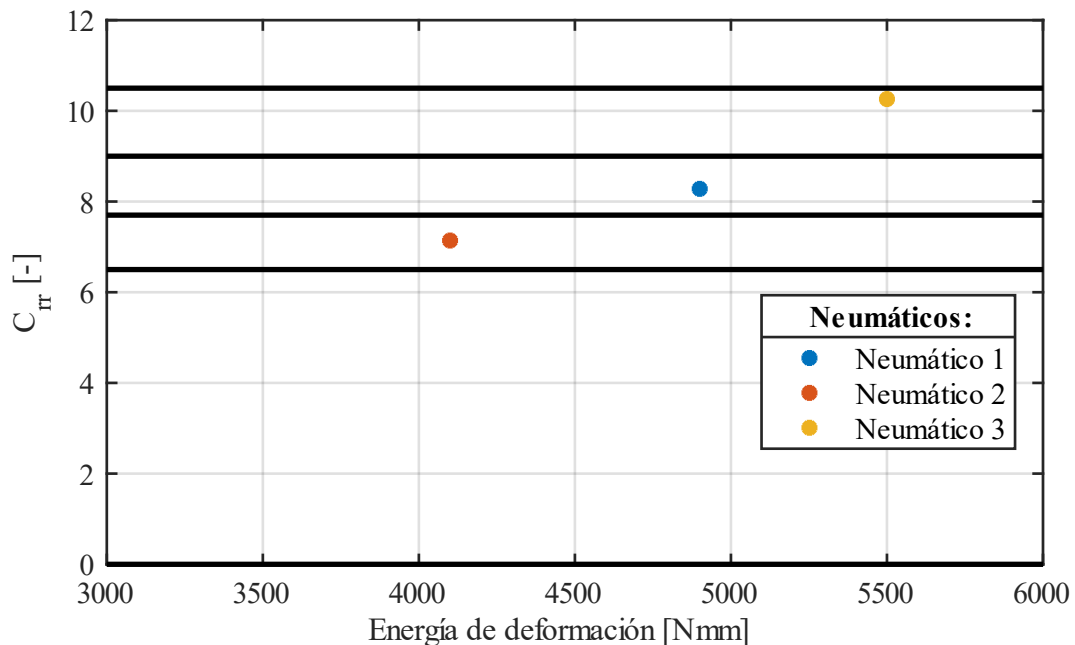


Figura 9: Relación entre coeficiente de rodadura normalizado, C_{rr} , y la energía de deformación.

Analizando las deformaciones en los ensayos (Figura 10) se puede apreciar que el neumático 3, con una deformación menor a igualdad de carga que los otros neumáticos, es más rígido; lo que podría suponer a priori menor resistencia a la rodadura, sin embargo, es justo el que menor eficiencia energética tiene. De igual manera, si se compara los neumáticos 1 y 2 presentan rigideces similares, y la metodología propuesta permite distinguir cual de ellos es más eficiente a la rodadura.

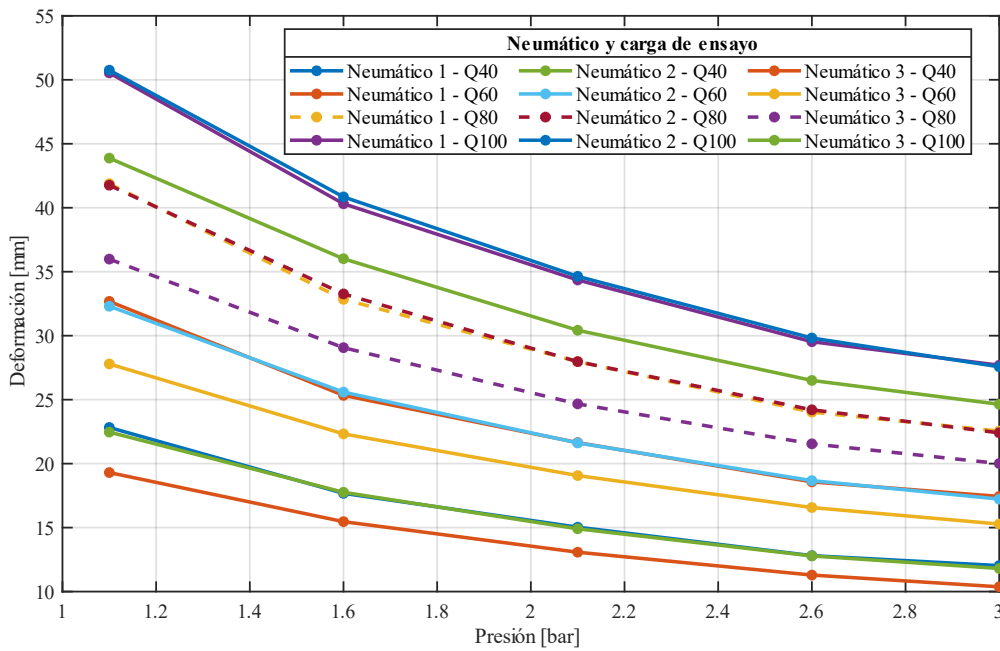


Figura 10: Deformación vertical medida en función de la presión y carga para todos los neumáticos.

6. Conclusiones

Una vez estudiados los resultados de todos los ensayos, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La metodología propuesta permite distinguir perfectamente entre distintos neumáticos cual tiene la mejor eficiencia energética, independientemente de la presión y de la carga. Si dispusiéramos entre dos neumáticos de idénticas características, se podría distinguir cuál de los dos es más eficiente, como se muestra en la figura 11, superponiendo todos los ensayos.
- Relación de la energía de deformación con el coeficiente de rodadura: cómo podemos ver en la figura 11 se puede estimar la energía disipada en la rodadura a una determinada carga y presión de inflado.

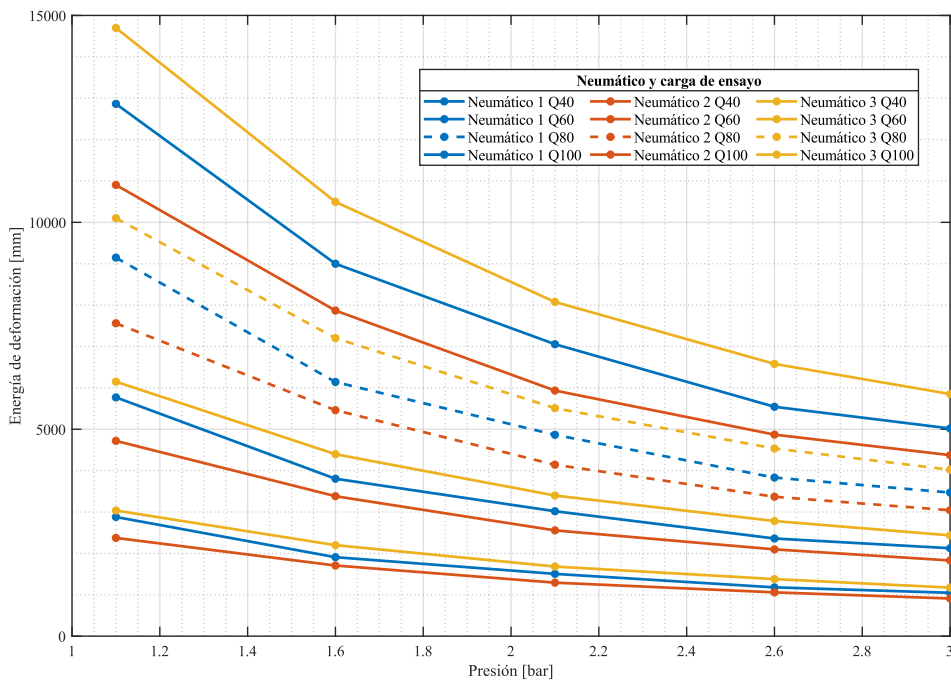


Figura 11: Energía de deformación medida en función de la presión y carga para todos los neumáticos.

En trabajos futuros, se propone la realización de más ensayos en el banco de rodadura con un mayor número de neumáticos, de diferentes medidas y de diferentes tipologías a los estudiados en este trabajo. Sería interesante estudiar cómo afectan los cambios en las variables del ensayo al coeficiente de rodadura. Por otro lado, habría que medir la huella del neumático y la deformación en los flancos para cada caso, de tal modo que se pueda establecer una relación entre la energía de deformación con el coeficiente de rodadura. También se propone ensayar varios neumáticos idénticos y ordenarlos en función de su eficiencia energética para posteriormente verificar mediante ensayos normalizados si ese orden es el mismo que el de sus coeficientes de rodadura.

7. Referencias

- [1] Gent, Alan Neville, Walter, Joseph D., "Pneumatic Tire" (2006). *US Department of Transportation*.
- [2] Alcazar, Manuel & Fernández, Ignacio & Acosta, Enrique & Cabrera, Juan & Castillo, Juan. (2021). Estimación de la resistencia a la rodadura en neumáticos mediante banco de ensayos de tracción-compresión. "Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica".
- [3] D. Mohammad et al. "A Multi-Line Brush Based Tyre Model to Study the Rolling Resistance and Energy Loss", Proceedings of the 4th International Tyre Colloquim, April 2015, pp. 159-167
- [4] The tyre: Rolling resistance and fuel savings, Société de Technologie Michelin, 2003
- [5] ERTRO, "ERTRO Standards Manual 2011," ERTRO, 2011.
- [6] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 28580:2009: Passenger car, truck and bus tyres — Single point test and correlation of measurement results*, 2009.