

## 9. CONCLUSIONES

Los objetivos establecidos en el apartado 1.3 han sido cubiertos ampliamente. Se ha conseguido conocer el comportamiento de la rigidez de una suspensión neumática y al mismo tiempo estudiar un número determinado y limitado de parámetros que la definen y/o afectan. Después del trabajo realizado queda un modelo capaz de predecir el comportamiento de una suspensión neumática ofreciendo una buena correlación con la experimentación y que marca el camino a seguir para controlar esta respuesta ante las perturbaciones externas.

El estudio de la rigidez neumática exigía el conocimiento preciso de los factores que influían en un proceso de compresión - expansión como el de la suspensión.

En la introducción de esta Tesis Doctoral, se consideraba un requisito imprescindible la definición y comprensión de la característica o constante de rigidez de una suspensión neumática, para poder así abordar otras temáticas en el estudio de su regulación en función de los agentes externos que pudieran perturbarle.

Para poder llevar a cabo este objetivo se ha demostrado con creces la poca precisión de la metodología clásica frente a la utilización de un modelo que tiene en cuenta los efectos no ideales del gas. Este modelo comprende el desarrollo de un algoritmo capaz de resolver la ecuación de estado de Lee-Kesler, tarea llevada a buen término mediante una subrutina desarrollada en FORTRAN.

Los efectos del gas real han sido analizados en la suspensión neumática utilizada por De las Heras [1] en su obra, donde se hacía uso del procedimiento indicado por la Norma Internacional ISO 6358 [13]. Durante el desarrollo del presente trabajo se han demostrado las razones de su descarte a la hora de construir el modelo. En el capítulo 6, se muestran las discrepancias entre las hipótesis de gas ideal y gas real para la caracterización del flujo a través de un orificio.

Para la realización del modelo ha sido necesario el desarrollo de un nuevo algoritmo capaz de definir el comportamiento del gas en la garganta de la tobera analizada. Ha sido necesaria la construcción de una unidad experimental, ver apartado 6.8, que junto a un apropiado y preciso modelo de diagnóstico han hecho posible el desarrollo de un modelo capaz de resolver el flujo entre las dos cámaras de la suspensión descrita por De las Heras [1]. Nuevamente una subrutina desarrollada en FORTRAN ha sido la encargada de proporcionar los resultados expuestos en el apartado 6.9.

En el apartado referente al estado del arte (1.2), se ha hecho hincapié en la poca información existente en cuanto a las técnicas de descripción de la transferencia de calor en la suspensión neumática. De hecho, dos autores como De las Heras [1] y Els [2], [3] utilizan la misma técnica para construir su modelo.

La técnica desarrollada por Otis [17], como ya se ha comentado en multitud de ocasiones, ha sido contrastada mediante la construcción de una unidad experimental. Se ha visto su buena correlación con los resultados obtenidos y expuestos en el apartado 7.8, para una compresión súbita.

Paralelamente, se ha desarrollado un modelo de diagnóstico alimentado por la utilización de dos técnicas de cálculo del coeficiente de transferencia de calor. Por un lado, a partir del registro experimental de presiones y de la carrera del pistón en un banco de pruebas para suspensiones, se ha aplicado la técnica del método indirecto de evaluación del flujo calorífico global e instantáneo (apartado 7.2) y de forma paralela se ha utilizado la técnica de Fourier para la evaluación del flujo calorífico instantáneo local, a partir del registro de la temperatura superficial de la pared en el mismo experimento (apartado 7.3).

Se han contrastado ambas técnicas con los registros experimentales, véase apartado 8.3, observando una mejor correlación con el modelo desarrollado en este trabajo. Un resultado que era de esperar, puesto que Otis [17] desarrolló su modelo para acumuladores hidráulicos. Como en los casos anteriores, la resolución del modelo ha sido llevada a buen término mediante una subrutina desarrollada en FORTRAN.

Finalmente con la ayuda de los submodelos formados por la resolución de la ecuación de estado, la caracterización del orificio y la evaluación de la transferencia de calor, se ha construido un modelo de predicción capaz de anticipar el comportamiento de la suspensión neumática en función de las irregularidades del terreno simuladas en un banco de pruebas para suspensiones.

Una vez cotejados los resultados con la experimentación se puede asegurar una buena correlación, tanto para el caso de una suspensión neumática de una única cámara como en el caso de la suspensión neumática de doble cámara.

Puede asegurarse, que otro de los objetivos marcados en el apartado 1.3 se ha cumplido con creces, puesto que del estudio del fluido de trabajo y su fenomenología, se conoce la interacción de éste con su entorno, es decir, se sabe de que manera el gas se ve influido por lo que le rodea y viceversa. En otras palabras, ha sido posible detallar con muy buena precisión lo que le sucede al nitrógeno, en este caso, en el interior de una suspensión neumática. Es importante indicar, también, que mediante el algoritmo desarrollado para resolver la ecuación de estado el modelo es extensible a otros fluidos no polares.

Para concluir, sería importante mostrar las pautas necesarias en la construcción de un prototipo capaz de regular el comportamiento de la suspensión en función de las variables perturbadoras de entrada.

En el primer capítulo de esta Tesis Doctoral, se ha subrayado el control de la rigidez neumática como la motivación especial para la realización de este trabajo. El estudio realizado pretende, siguiendo el trabajo realizado por De las Heras [1] y a partir del análisis del comportamiento de la suspensión de doble cámara, aportar una solución que determine como controlar la respuesta de la suspensión neumática a las diferentes e imprevisibles irregularidades que ofrece una carretera cualquiera.

Para ello es importante recordar las conclusiones obtenidas anteriormente:

- A menor diámetro del orificio, mayor rigidez.
- A menor volumen muerto y en consecuencia mayor longitud de la cámara auxiliar (recordar condición  $[L_0]_{1C} = [L_0+L_1]_{2C}$ , véase Fig. 130), mayor rigidez.

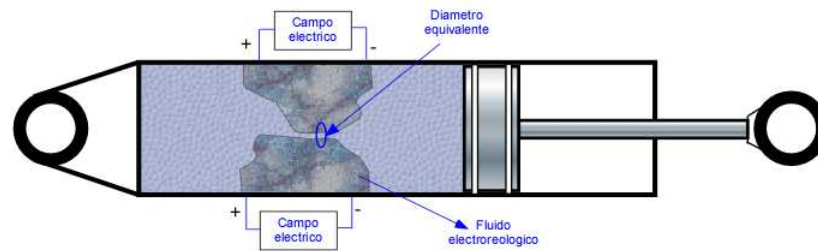
En primer lugar cabe explicar que es lo que se desea. Recordando los conceptos previos vistos en el apartado 2.1, la suspensión debe sostener el vehículo, aportar control direccional en la maniobrabilidad y aislamiento efectivo de los pasajeros/carga frente a las perturbaciones del terreno. Un buen confort en la conducción requiere una suspensión suave, mientras que una insensibilidad a las cargas aplicadas requiere una suspensión rígida. Una buena maniobrabilidad requiere una suspensión de rigidez intermedia respecto a las otras dos.

Por ejemplo, si lo que se desea es un vehículo turismo, interesará ante todo un buen confort, siempre y cuando las cargas aplicadas no sean tan elevadas que lo que interese sea aislarla. En esta situación se desearía, por ejemplo, un diámetro grande que asegurase una suavidad confortable a las irregularidades y un diámetro pequeño a amplitudes o frecuencias elevadas.

Está claro que la solución pasa por poder controlar a voluntad el diámetro del orificio que separa ambas cámaras, en función del comportamiento o tipo de vehículo deseado.

En este trabajo se plantean dos soluciones entre muchas. En primer lugar la solución “mecánica”, que consideraría un mecanismo capaz de obturar el orificio a modo de válvula dejando un área de cortina deseada. El control del obturador podría ser electrónico, por ejemplo un motor paso a paso, o un control hidráulico/neumático.

Otra solución, si cabe más elegante y más acorde con la tecnología disponible actualmente, sería la utilización de fluidos electroreológicos, capaces de estrangular el paso del nitrógeno de una cámara a otra, véase Fig. 144. Para esta solución es inevitable el uso de un controlador electrónico que le proporcione la consigna correspondiente al fluido actuador.



**Fig. 144:** Croquis del control de la rigidez de la suspensión neumática - fluido electroreológico.

Los fluidos electroreológicos son suspensiones de partículas conductoras extremadamente finas en fluidos no conductores. La viscosidad aparente de estos fluidos varía en forma reversible con la acción de un campo eléctrico. Un fluido electroreológico puede cambiar su consistencia líquida por la que podría tener, por ejemplo, un gel y en pocos milisegundos recuperar su viscosidad original. La variación de viscosidad es proporcional al potencial aplicado.

Su aplicación en la industria del automóvil ya se ha llevado a buen término en el caso de los amortiguadores. Los fluidos electroreológicos y magnetoreológicos (su viscosidad varía por el efecto de un campo magnético) se utilizan para atenuar las vibraciones en sistemas suspensión - amortiguador.

Para conseguir un buen control, es necesario haber obtenido un modelo preciso de la fuerza de amortiguación que pueda predecir la histéresis del amortiguador en cuestión.

Existen multitud de modelos para este tipo de amortiguadores en la literatura, pero sería interesante encontrar un modelo que pudiera describir el movimiento del flujo en el sistema hidráulico. Es el caso de Hong et al. [19], quienes en su obra describen un amortiguador electroreológico cilíndrico aplicable a turismos pequeños y donde comparan las características de la histéresis provocada por las fuerzas de amortiguación.

El diseño de un mecanismo o artificio equivalente capaz de regular el área eficaz de paso de flujo entre las dos cámaras es la llave para un control absoluto de la rigidez neumática de la suspensión. El mecanismo en cuestión, será capaz de convertir la suspensión neumática en un elemento rígido capaz de aislar a los pasajeros y a la masa suspendida de las irregularidades del terreno cuando la situación lo requiera. Del mismo modo, debe ser capaz de adaptar la suspensión a una característica mucho más suave para asegurar el confort de sus ocupantes, siempre manteniendo el compromiso rigidez - suavidad que asegure una buena maniobrabilidad.

El prototipo, además, podrá diseñarse en función de un rango de rigidez escogido a priori en relación al tipo de vehículo o condiciones a soportar.

Antes de concluir, sería interesante destacar la idea de una modificación del banco de pruebas para aumentar el rango de amplitudes y frecuencias de excitación, como mínimo hasta los 10 Hz a los que puede estar sometida la masa no suspendida.

Para ello es posible sustituir la válvula proporcional de control direccional por otra de sección de paso mayor. Otra solución pasa por sustituir el cilindro actuador por otro de menor tamaño. Para esta última solución, es evidente que las unidades experimentales ensayadas deberían ser más pequeñas, una condición que no afecta en absoluto a la hora de modelizar su comportamiento, siempre y cuando se mantengan los rangos de presión y temperatura ensayados.

También sería interesante colocar una célula de carga, tal y como ya se ha comentado en el apartado 7.5, para poder evaluar así el calor generado por fricción y desarrollar su correspondiente modelo.

A parte del flanco abierto en cuanto a los fluidos electroreológicos, sería muy interesante profundizar en el estudio de la turbulencia para el caso del ensayo realizado en el cálculo del coeficiente de descarga. La solución pasaría por hallar el coeficiente de transferencia de calor en función del chorro que impacta en las paredes del recinto del volumen fijo.

El autor espera haber contribuido al mejor entendimiento del comportamiento de la rigidez de una suspensión neumática, sobretodo en lo que se refiere al fluido de trabajo y su fenomenología. También desea haber dejado clara las pautas de continuidad en esta línea de investigación e invita a quien quiera sugerir, debatir o examinar alguna cuestión particular siempre en aras de la ciencia y el buen hacer.