

## 2. ESTUDIO PRELIMINAR DE UNA SUSPENSIÓN NEUMÁTICA

### 2.1 Conceptos previos

Las suspensiones pasivas en vehículos se han ido desarrollando durante estos últimos 100 años hasta grandes niveles de sofisticación. La mayoría de fabricantes han mejorado los muelles metálicos pero algunos, más específicamente Citroën en Francia, utilizan elementos hidroneumáticos o neumáticos para aislar el vehículo de las irregularidades del terreno.

Tradicionalmente los diseños de suspensiones en automoción han sido un compromiso entre tres criterios en conflicto: características del terreno, carga del vehículo y el confort de sus ocupantes.

Por eso al diseñar una suspensión hay que tener en cuenta una larga lista de requisitos contradictorios:

- Confort
- Seguridad
- Maniobrabilidad
- Nivel de la altura de la carrocería
- Ruido

El confort viene determinado por la aceleración del cuerpo. Los pasajeros experimentan las fuerzas de aceleración como una perturbación y éstas fijan las exigencias del vehículo y de la carga. La suspensión tiene la tarea de aislar estas perturbaciones, que resultan de las diferentes condiciones de la carretera y de la carrocería. Cuánto menor es la aceleración mejor es el confort.

La seguridad depende de la habilidad de las ruedas de transferir las fuerzas longitudinales y laterales al terreno. La suspensión tiene la tarea de mantener las ruedas tan cerca de la carretera como sea posible (adherencia). Las vibraciones de las ruedas deben amortiguarse y se han de evitar sus peligrosas elevaciones. Si las fuerzas dinámicas entre las ruedas y la superficie del terreno son pequeñas, las fuerzas de frenado, “driving” y laterales pueden transferirse a la carretera de manera óptima. La necesidad de amortiguar el sistema rueda/neumático es la razón del conocido conflicto entre el ajuste del confort y la seguridad, dado que las fuerzas de amortiguación necesarias trabajan sobre la carrocería y producen el disconfort.

Se podría afirmar que la maniobrabilidad depende de las variaciones de la carga lateral en el neumático y de la distribución de su transferencia, la cuál es resultado de los movimientos dinámicos de la carrocería. La maniobrabilidad se mejora con la adherencia.

Cuando se dan variaciones en la carga, es tarea de la suspensión mantener la altura del vehículo tan constante como sea posible, de manera que la carrera completa de la suspensión esté disponible para los movimientos de la rueda. Por otra parte podría ser sensible por razones aerodinámicas, por ejemplo, variar la posición estática de la carrocería mediante el sistema de nivelación de la carrocería dependiendo por ejemplo de la velocidad. La suspensión también se asegura de que el vehículo siga unas condiciones del terreno desiguales y de onda larga, por ejemplo montañas y colinas.

Otra tarea de la suspensión es el aislamiento de la carrocería de perturbaciones de alta frecuencia provenientes de la carretera. Los pasajeros del vehículo notan estas perturbaciones acústicamente y de este modo aumenta el ruido.

Para poder cumplir todas estas tareas y requisitos deben hacerse unas ciertas consideraciones mínimas. Por poner un ejemplo, la carrera de la suspensión debe ser limitada y el consumo no debe ser muy grande.

En resumen, 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.

A causa de estas demandas en conflicto, el diseño de la suspensión debe tener una solución de compromiso, mayoritariamente determinada por el tipo de uso para el cuál el vehículo se diseña. Los fabricantes de vehículos deportivos seleccionan suspensiones bajo la base de la maniobrabilidad antes que el traqueteo mientras que los fabricantes de automóviles de lujo escogen justo lo contrario. En ambas opciones debe llegarse a una solución de compromiso.

Entre los diferentes tipos de suspensiones hay que destacar dos por encima de los demás:

- Suspensiones pasivas
- Suspensiones activas

Una suspensión pasiva tiene la habilidad de almacenar energía mediante un muelle y de disiparla mediante un amortiguador. Sus parámetros vienen normalmente fijados y se escogen para asumir un cierto nivel de compromiso entre las características del terreno, la carga soportada y el confort.

Una suspensión activa tiene la habilidad de almacenar, disipar e introducir la energía al sistema. Puede variar sus parámetros dependiendo de las condiciones de funcionamiento y puede tener otros conocimientos a parte de la compresión/expansión a la cual está limitado el sistema pasivo.

Las suspensiones activas se consideran una manera de aumentar la libertad de cada uno para especificar independientemente las características de la carga a soportar, maniobrabilidad y traqueteo.

Esta Tesis Doctoral se centra en una suspensión neumática, la cuál puede clasificarse a medio camino entre las suspensiones pasivas y las activas.

## 2.2 Metodología clásica

Una vez introducidos estos conceptos mínimos que ayudarán a entender lo que es el funcionamiento de una suspensión, es importante conocer la metodología más utilizada a la hora de diseñar una suspensión neumática y definir su constante de rigidez.

La aproximación clásica para determinar la constante del muelle de una suspensión neumática, se basa en asumir que el gas se comporta como un gas ideal y que el proceso es politrópico. Las ecuaciones que intervienen en dicho proceso son:

La ecuación de los gases ideales:

$$pV = mRT \quad (2.1)$$

Proceso politrópico:

$$pV^n = Cte. \quad (2.2)$$

Con  $n = 1$  para compresión isotérmica (temperatura constante) y  $n = \gamma = 1.4$  para compresión adiabática (no hay transferencia de calor).

$$W = p dV/dt \quad (2.3)$$

donde

$p$ : Presión del gas

$V$ : Volumen del gas

$m$ : Masa del gas

$R$ : Constante del gas

$T$ : Temperatura absoluta del gas

$dV/dt$ : Variación del volumen del gas respecto al tiempo.

La constante elástica de dicha suspensión puede ser evaluada a partir de su propia definición:

$$k = \frac{dF}{dh} \quad (2.4)$$

Por una parte la fuerza  $F$  que solicita a la suspensión puede ser expresada en términos del área transversal  $A$  del émbolo y de la diferencia de presiones entre la cámara y el ambiente:

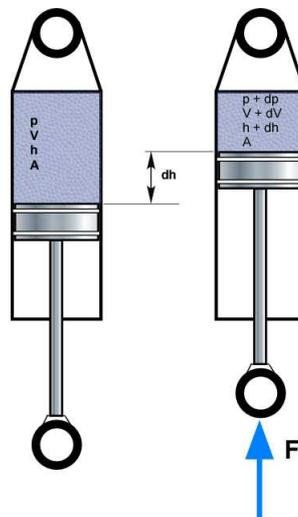
$$F = (p - p_{\text{atm}}) A \quad (2.5)$$

y su diferencial

$$dF = A dp \quad (2.6)$$

Puesto que  $A$  permanece constante. La constante elástica, se podrá expresar mediante:

$$k = A \frac{dp}{dh} \quad (2.7)$$



**Fig. 5:** Comparación entre una suspensión neumática en reposo frente a otra sometida a un diferencial de carga adicional.

Por otra parte, la variación de altura puede ser relacionada con la variación de volumen experimentada por la cámara de la suspensión, de forma que:

$$dh = \frac{dV}{A} \quad (2.8)$$

Debido a que las oscilaciones son suficientemente rápidas para que no haya tiempo para el intercambio de calor entre el gas contenido en la cámara y el exterior, no se cometerá error en suponer que el gas sigue un proceso adiabático, con lo que la relación entre presión y volumen quedará establecida por:

$$p V^\gamma = \text{cte} \quad (2.9)$$

Una pequeña variación respecto al estado inicial se obtendrá con solo diferenciar la anterior expresión:

$$dp = -\gamma \frac{p}{V} dV \quad (2.10)$$

La constante elástica quedará definitivamente:

$$k = -A^2 \gamma \frac{p}{V} \quad (2.11)$$

Recalcar que la rigidez depende del estado de carga, aumentando al disminuir la altura del resorte. El signo menos de la expresión precisamente indica esta variación. Se entiende que al elegir la suspensión neumática, la rigidez se elegirá para un valor intermedio del estado de carga que pueda solicitar al vehículo, puesto que éste varía con aquel.

### 2.3 Estudio comparativo

La configuración geométrica de todos los componentes de la suspensión, la selección del material, los ajustes de las válvulas de los amortiguadores y el tamaño de todos los componentes son las claves del diseño de una suspensión. Estos parámetros, además de otros como la rigidez de los neumáticos, la carrera de la suspensión, masa del conjunto rueda-neumático, definen la respuesta del vehículo frente a una estimulación externa. Frecuentemente el comportamiento de los componentes se desconoce analíticamente, pero el interés está mayoritariamente en la respuesta del vehículo y no en el modelo matemático del sistema. Para la optimización de los componentes, los fabricantes normalmente comprueban la respuesta de sistemas ajustados empíricamente con la experiencia de pilotos de pruebas, y modifican las características de amortiguadores, muelles y otros componentes para obtener una respuesta satisfactoria del sistema.

Sin embargo Meirelles [5], indica que algunos parámetros deben ajustarse a unos valores iniciales cercanos al valor adecuado para una aplicación determinada, es el caso de la rigidez del muelle en una suspensión convencional. Para las suspensiones

hidroneumáticas, asumiendo que ya se ha especificado el área del cilindro, la rigidez no lineal es función de la presión y del volumen inicial de la cámara.

Los vehículos pesados, en general, experimentan unos esfuerzos en sus ejes muy cercanos a los límites permitidos, efecto que se hace mucho más acentuado en carreteras irregulares y en las maniobras de frenado en curva (cornering). En estos casos la utilización de una suspensión convencional puede incrementar el fenómeno de sobrecarga en los ejes. La suspensión hidroneumática cuando se utiliza en este tipo de vehículos, le saca ventaja para llevar a cabo una mejor distribución de la carga por eje, disminuyendo el problema de sobrecarga y mejorando el confort. En lo referente al conocido problema de las variaciones del coeficiente de amortiguación, causado por las variaciones de la carga en vehículos de suspensiones convencionales, según [5] se puede observar con mayor claridad cuando se utiliza un muelle hidroneumático a causa de su no linealidad, oponiéndose así a varias de las ventajas que ofrece este tipo de muelle. Este problema es más acentuado en vehículos con un amplio rango de masas cuando pasan de unas condiciones de vacío a plena carga.

Para este problema, la suspensión hidroneumática ofrece una solución a parte del posible control activo del amortiguador (e inferir así sobre las variaciones del coeficiente de amortiguamiento), esta solución podría ser un dispositivo autonivelante [7] el cual permitiría a la suspensión operar en el espacio de trabajo de diseño una vez estabilizada la carga.

En esta Tesis Doctoral se ha estimado conveniente la realización de un estudio comparativo entre el comportamiento dinámico del muelle neumático y del muelle convencional, con el propósito de determinar el funcionamiento de la suspensión neumática y tras su comparación con una suspensión convencional identificar qué parámetros tienen una influencia significativa en su funcionamiento.

El modelo matemático adoptado es el de  $\frac{1}{4}$  de vehículo (Fig. 6). Este modelo es el mismo en ambas clases de suspensión, siendo la rigidez del muelle  $K_s$ . La única diferencia estriba en que dicha rigidez, será constante para la suspensión convencional mientras que para el muelle neumático vendrá dada por una expresión deducida en el apartado anterior según la metodología clásica, véase ecuación (2.11).

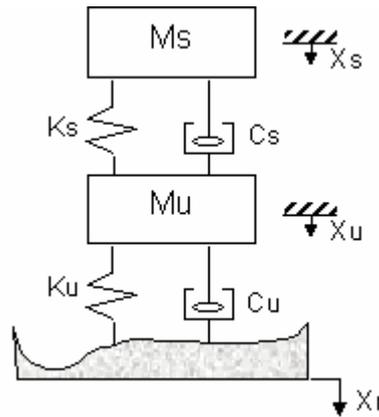


Fig. 6: Modelo de 1/4 de vehículo

Las ecuaciones que describen el modelo de la figura anterior (Fig. 6), se describen a continuación en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s + c_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_u \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_u \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ c_u \dot{x}_r + k_u x_r \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

La variable  $x_r$  hace referencia al desplazamiento de la rueda debido a las irregularidades del terreno (Fig. 6) y la ecuación (2.12) tiene en cuenta los esfuerzos transferidos al sistema como resultado de estas irregularidades. Se asume que son las únicas perturbaciones externas que actúan sobre el modelo y por esta razón aparece un cero en la primera coordenada del vector de términos independientes. Dicha ecuación no tiene en cuenta el desplazamiento inicial provocado por la masa del vehículo, ya que éste no tiene influencia en el comportamiento dinámico de la suspensión. Lo que significa que los desplazamientos son medidos desde la posición de equilibrio.

La elección de la amortiguación para el sistema es extremadamente importante para asegurar las características diseñadas de seguridad y confort del vehículo. El coeficiente de amortiguación viene definido por la expresión:

$$\xi = \frac{c_s}{2m_s \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}} \quad (2.13)$$

En la ecuación (2.13) se puede observar que el coeficiente de amortiguación puede manipularse mediante tres variables: la masa del vehículo, el amortiguador y la rigidez de la suspensión. Hay que tener en cuenta que en la suspensión hidroneumática una

variación en la carga, a diferencia de la suspensión convencional, significa una variación en la rigidez del muelle, véase ecuación (2.11).

A continuación se realizará un estudio comparativo entre un muelle neumático y uno convencional (mecánico), teniendo en cuenta únicamente el efecto de la masa suspendida, según la ecuación (2.12).

La suspensión neumática ofrece un potencial de ventajas respecto a la suspensión de resorte convencional. Para ello y en aras de una mayor simplicidad, considérese una suspensión neumática de una sola cámara en la que la constante de rigidez, como ya se ha visto anteriormente (sección constante y sin transmisión de calor al ambiente) viene dada por la expresión definida en la ecuación (2.11).

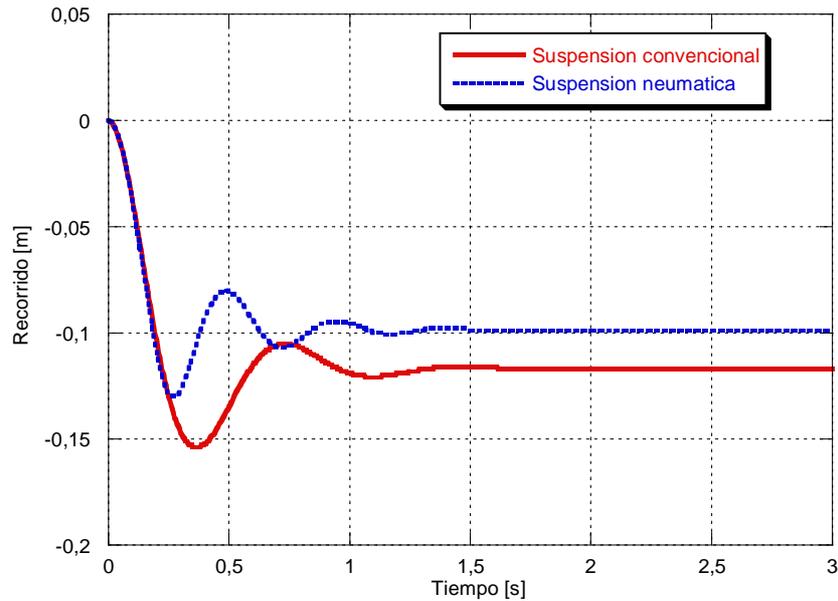
Una primera ventaja es que ésta es susceptible de adecuar sus características al estado de carga del vehículo, gracias a que puede ser modificada la presión en su interior. Téngase en cuenta que un vehículo puede circular en vacío, a plena carga o a carga parcial y la rigidez de su suspensión viene supeditada a que la frecuencia de oscilación de la masa suspendida esté en torno a 1 Hz y a su vez ésta, dependa de la masa suspendida. En un vehículo dotado de suspensión convencional se deberá buscar una solución de compromiso entre la carga y la rigidez del resorte. Se elegirá la rigidez para que en un estado intermedio de carga su frecuencia sea de 1 Hz, apartándose por consiguiente de este valor cuando el vehículo circule a plena carga o en vacío. En contrapartida en una suspensión neumática, la rigidez puede ser adecuada al estado de carga del vehículo incrementando o disminuyendo la presión de acuerdo con la anterior ecuación.

En el gráfico de la Fig. 7, puede verse la respuesta (desplazamiento vertical) proporcionada por los respectivos modelos de  $\frac{1}{4}$  de vehículo de dos suspensiones una convencional y otra neumática ambas con idéntica rigidez inicial diseñadas para un estado intermedio de carga. Inicialmente es costumbre resolver el modelo sin más excitación que los pesos propios de sus masas. Así puede inicialmente comprobarse si el planteamiento y desarrollo del modelo son correctos, ya que el resultado permanente que debe obtenerse es alcanzable fácilmente mediante un cálculo manual. En la siguiente figura, véase Fig. 8, se muestran las aceleraciones verticales de ambas masas, puede observarse como, al principio, en los dos casos se alcanzan valores muy próximos a los  $9.8 \text{ m/s}^2$ . Esto se debe a que en el instante inicial, nada más soltar las masas, como la reacción de los muelles es nula, caen libremente y durante unos pocos milisegundos la aceleración alcanza el valor de la gravedad. Si ambas suspensiones convencional y neumática se suponen con la misma rigidez inicial y se estudia la respuesta transitoria de una idéntica carga, se obtendrá una respuesta como las representadas en las Fig. 7 y Fig. 8. En ellas se manifiesta que los desplazamientos experimentados por la suspensión neumática son menores y el movimiento transitorio, hasta la nueva posición de régimen

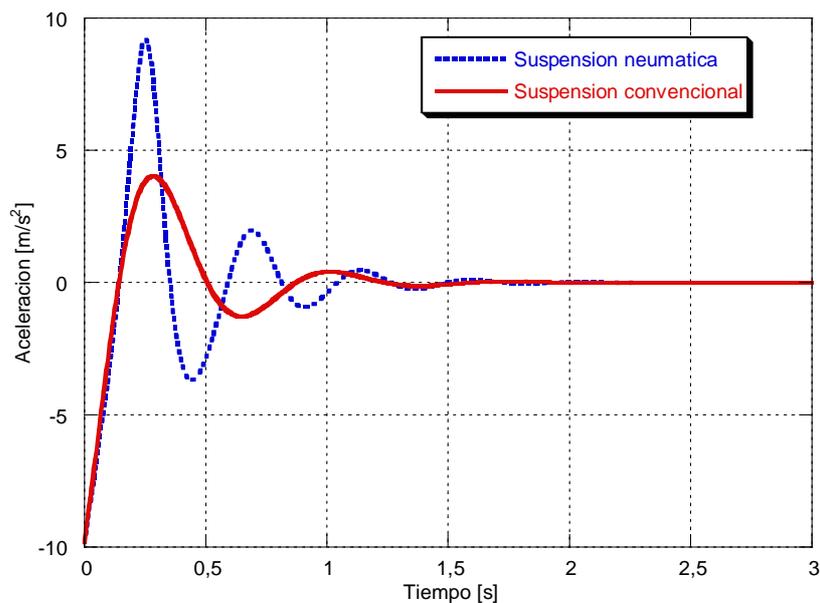
permanente, es más amortiguado. La explicación es sencilla, aunque la suspensión neumática está dimensionada con la misma rigidez inicial, ésta es variable, aumentando a medida que se comprime y en consecuencia aumenta la frecuencia de oscilación.

**Tabla 1:** Datos para las Fig. 7 y Fig. 8

Coefficiente amortiguación ( $C_m$ )	12566.36 [N·s/m]
Constante elástica ( $K_m$ )	167782.7 [N/m]
Masa ( $m$ )	2000 [kg]



**Fig. 7:** Desplazamiento vertical. Idéntica rigidez inicial, diseñadas para un estado intermedio de carga y para que la frecuencia natural de la masa suspendida sea de 1 Hz. Nota: Únicamente actúa el peso.

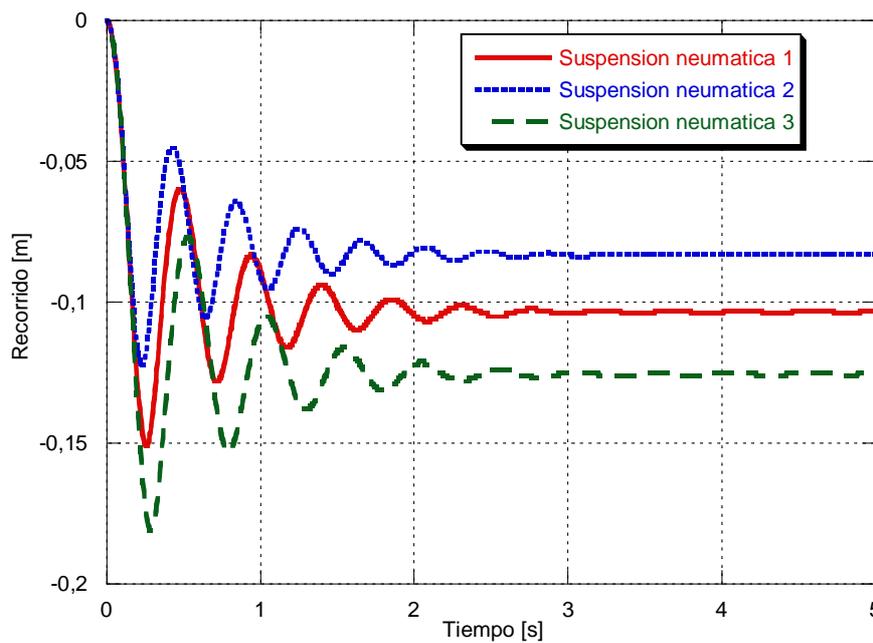


**Fig. 8:** Aceleración vertical de la masa suspendida de una suspensión convencional y otra neumática. Idéntica rigidez inicial, diseñadas para un estado intermedio de carga y para que la frecuencia natural de la masa suspendida sea de 1 Hz. Nota: Únicamente actúa el peso.

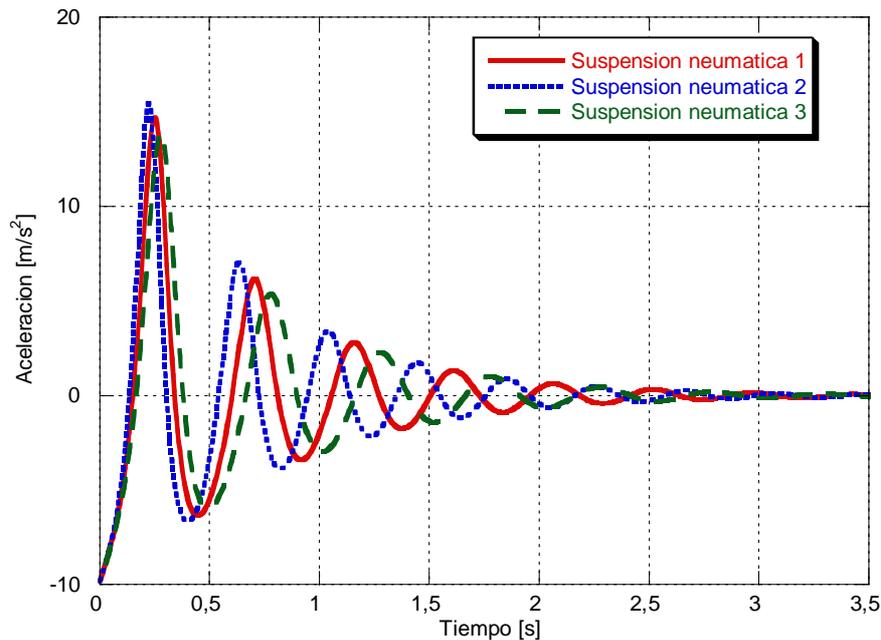
En las figuras siguientes, véanse Fig. 9 y Fig. 10, se coteja la misma respuesta, ahora con tres suspensiones neumáticas en las que se han modificado convenientemente sus características (Tabla 2) para ver la influencia de distintos parámetros de diseño o variables de operación y que pueden ser fácilmente interpretadas con la ecuación (2.11) referente a la constante de rigidez del muelle neumático.

**Tabla 2:** Parámetros geométricos y de funcionamiento de tres suspensiones neumáticas

Susp N°	m [kg]	d [m]	S [m <sup>2</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ]	h [m]	p [bar]	K [N/m]	C [Ns/m]	f [Hz]
1	4000	0,353	0,098	0,0336	0,3426	4	160209,711	12566,36	1,007
2	4000	0,353	0,098	0,0270	0,2755	4	199194,074	12566,36	1,123
3	4000	0,319	0,08	0,0336	0,4196	5	133452,487	12566,36	0,919



**Fig. 9:** Desplazamiento vertical de tres suspensiones neumáticas ante una idéntica carga. (1) Suspensión de referencia ( $p_0$ ,  $V_0$ ,  $S_0$ ). (2) Suspensión  $p = p_0$ ,  $V < V_0$  y  $S_0$ . (3)  $p > p_0$ ,  $V_0$ ,  $S < S_0$ .

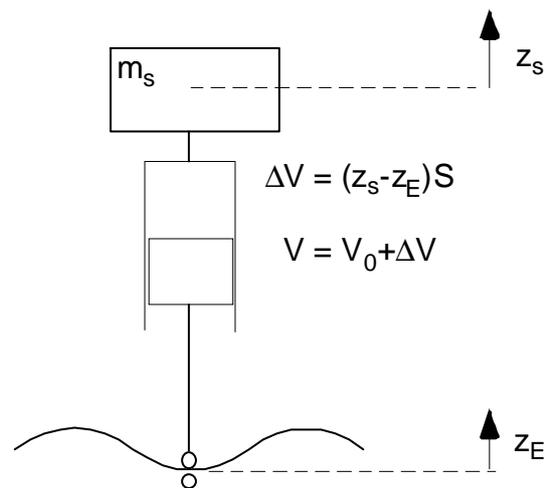


**Fig. 10:** Aceleración vertical de tres suspensiones neumáticas ante una idéntica carga. (1) Suspensión de referencia ( $p_0, V_0, S_0$ ). (2) Suspensión  $p = p_0, V < V_0$  y  $S_0$ . (3)  $p > p_0, V_0, S < S_0$ .

Si se analiza el comportamiento del vehículo en vacío ( $m_v = 2000$  kg) frente a una excitación externa senoidal (carretera ondulada) de amplitud 0.1 m y de frecuencia 1 Hz, con una suspensión convencional o una suspensión neumática.

Suponiendo que la rigidez ( $K$ ) de ambas suspensiones se ha escogido para una frecuencia natural de la masa suspendida de 1 Hz, operando a cargas intermedias ( $m_o = 4000$  kg) y que la presión en la cámara neumática en estas condiciones es  $p_o = 4$  bar. Así mismo, se considerará que la suspensión neumática regula la presión para que la suspensión adquiriera la misma altura que operando a carga intermedia.

Por lo tanto, la presión funcionando en vacío se deberá regular a  $p_v$  para mantener la altura de la masa suspendida inalterada. Puesto que el valor de la constante elástica de la suspensión es función del volumen instantáneo de la suspensión, este deberá ser evaluado tal como se muestra en la figura siguiente (Fig. 11).



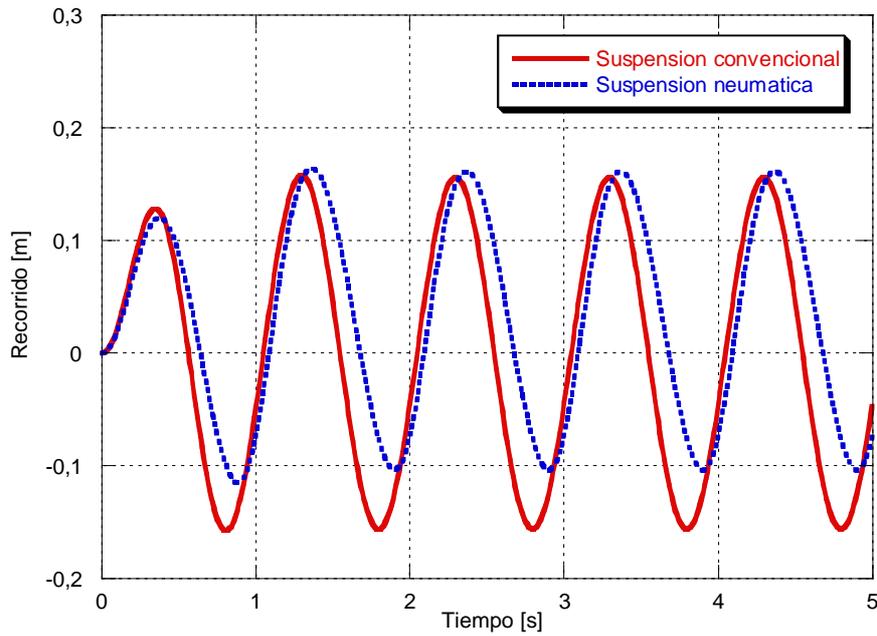
**Fig. 11:** Cálculo de volumen de la suspensión neumática en función de la posición

En la Fig. 12 se muestra el recorrido que experimenta la masa suspendida de ambas suspensiones en función del tiempo, con las condiciones anteriormente citadas. En la Fig. 13 se muestra como respuesta la aceleración de dicha masa.

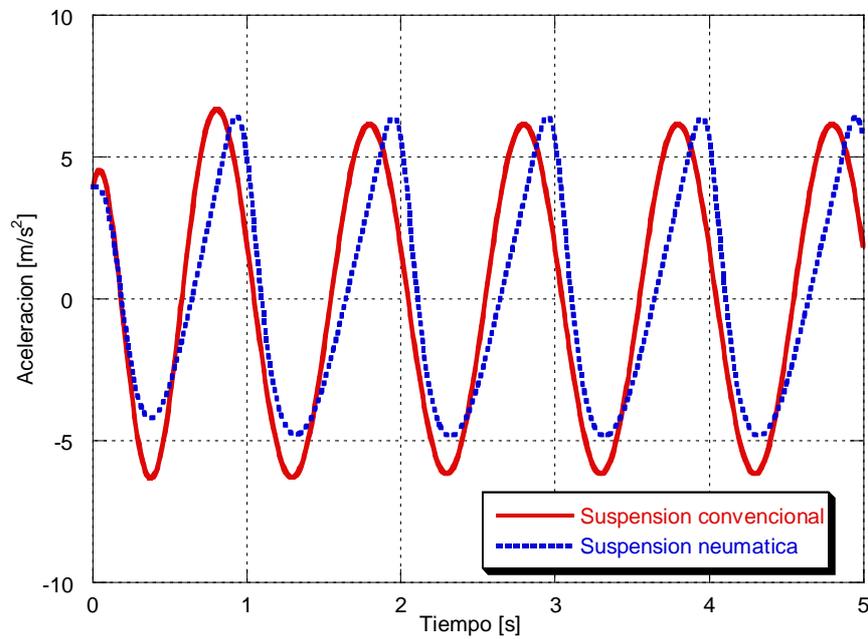
Se constata que la amplitud de la aceleración de la suspensión neumática es más pequeña, magnitud íntimamente ligada con el confort. De la misma manera puede observarse que en el caso de la suspensión neumática el comportamiento es más rígido a compresión y más blando en la expansión, mientras que la suspensión convencional se comporta de forma idéntica tanto a compresión como a expansión.

**Tabla 3:** Datos para las Fig. 12 y Fig. 13

Coefficiente amortiguación ( $C_m$ )	12566.36 [N·s/m]
Constante elástica ( $K_m$ )	167782.7 [N/m]
Masa ( $m$ )	2000 [kg]
Amplitud ( $Z_E$ )	0.1 [m]
Frecuencia ( $f$ )	1 [Hz]



**Fig. 12:** Desplazamiento vertical de la suspensión neumática y convencional frente a una perturbación senoidal. Nota: Únicamente actúa perturbación de la carretera ( $Z_E \text{ sen}(wt)$ ).



**Fig. 13:** Aceleración de la suspensión neumática y convencional frente a una perturbación senoidal. Nota: Únicamente actúa perturbación de la carretera ( $Z_E \text{ sen}(wt)$ ).