



Proyecto de fin de estudios: Fatiga bajo solicitaciones de amplitud variable
Aplicación a los órganos del chasis
Resumen ampliado



Facultad de
Ingeniería
UNMDP
Av. Juan B.
Justo 4302
7600 Mar del
Plata, Argentina



ENSTA Bretagne
2 rue F. Verny
29806 Brest
Cedex 9, France



Site technique de
Belchamp
25420
Voujeaucourt,
France

SILVESTRI Maria Paz, CI 2019 – Option AVM
maria.silvestri@ensta-bretagne.org

Dr. Ing. FACCHINETTI Matteo, Groupe PSA
matteoluca.facchinetti@mpsa.com

Prof. DOUDARD Cédric, ENSTA Bretagne
cedric.doudard@ensta-bretagne.org

Prof. POULHALEC Alain, ENSTA Bretagne
alain.poulhalec@ensta-bretagne.org

CONTENIDO

1. Introducción.....	2
2. Presentación de la empresa ^[9]	3
3. Marco teórico	3
3.1. El chasis.....	3
3.2. Objetivo: estudio de solicitaciones de amplitud variable	3
4. Método general	4
4.1. Dimensionamiento mecánico de los órganos del chasis ^{[20][4][7]}	4
4.2. Obtención de las señales de pista	5
4.3. Análisis de las señales obtenidas.....	5
5. Resultados	7
6. Conclusiones	8
6.1. Conclusiones técnicas.....	8
6.2. Conclusiones personales.....	9
7. Perspectivas.....	9
8. Bibliografía.....	10

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio implica cuantificar el daño por fatiga generado por un circuito de prueba operado por el Grupo PSA, para dimensionar los trenes motrices de sus vehículos. Si bien el funcionamiento de los mismos ha estado operativo durante varias décadas y existen estudios previos que permiten su calificación, se busca aplicar nuevas herramientas analíticas y proporcionar una visión más integral y útil al Grupo.

Se prestará atención particular a las fuerzas medidas en cada rueda sobre las tres direcciones: longitudinal, transversal y vertical. Este análisis se desarrollará para dos vehículos: uno con un motor de combustión interna y el otro eléctrico.

Se comenzará por introducir a la empresa, importante para comprender el interés de este análisis, mediante el concepto de seguridad vehicular. Luego, se presentará el sitio donde se realizó esta formación, describiendo en particular al equipo de trabajo. De hecho, éste estudio es el resultado de la cooperación entre dos polos: uno que estudia las mediciones en pista y el otro la arquitectura de los vehículos.

A continuación se describirá el contexto, describiendo a los órganos del chasis, conjunto sobre el cual serán aplicados los métodos y la problemática aquí abordada: el daño por fatiga a gran cantidad de ciclos bajo carga de amplitud variable.

Posteriormente, se explicarán los métodos utilizados por el Grupo PSA. Se comenzará por el dimensionamiento mecánico, introduciendo al uso "normal" del vehículo, el cual se asocia a sollicitaciones dentro del dominio elástico y presenta los dos enfoques que serán abordados: en fatiga y en sollicitación máxima. Luego, se describirá el procesamiento de señales, presentando las teorías que permiten el conteo de los ciclos, la cuantificación del daño y la identificación de los extremos.

Luego, se presentarán los resultados sobre el vehículo a combustión interna, comparándolos entre las cuatro ruedas y las tres direcciones canónicas del espacio. Y a continuación, se contrastará este vehículo con el eléctrico.

Finalmente, se presentarán las conclusiones técnicas y también las personales, finalizando con las perspectivas de este proyecto.

2. PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA [9]

El Grupo PSA (acrónimo de Peugeot Sociedad Anónima) es un fabricante de automóviles francés que agrupa a Peugeot, Citroën, DS Automobiles, Vauxhall y Opel. Con más de 200 años de experiencia en la industria, el Grupo PSA ocupa el primer lugar en ventas en Francia en 2019, el tercero en Europa y el décimo en todo el mundo. Por lo tanto, es una referencia a escala mundial, reconocida por presentar automóviles de alto rendimiento con conocimientos franceses.

En particular, este trabajo tuvo lugar en el Centro Técnico de Belchamp, que se encuentra en la región de Bourgogne-Franche-Comté, ubicada a unos 5 km de la planta de Sochaux. Este último es uno de los sitios de producción más antiguos del Grupo PSA, creado en 1912, donde se producen los modelos Peugeot 308 berlina y SW, Peugeot 3008 y Opel Grandland X. Belchamp es el segundo centro de I+D del Grupo, donde más de 1,000 personas realizan experimentación, desarrollo y validación en pistas e instalaciones de prueba. Por lo tanto, los equipos de ingeniería ubicados en el sitio de Sochaux y el Centro Técnico de Belchamp diseñan, desarrollan y prueban los vehículos que serán comercializados por las marcas del Grupo PSA en todo el mundo.

Dentro del organigrama del Grupo, tres departamentos fueron importantes para mi trabajo: FUDV (Fiabilidad de calidad para el dimensionamiento del uso del vehículo), ATRP (Arquitectura de trenes, ruedas y neumáticos), del que yo formé parte, y EBOL (Ensayos de bancos orgánicos de chasis).

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se explicará el contexto técnico y la problemática de este estudio, comenzando con una breve descripción del chasis. Luego, se introducirá el análisis de cargas de amplitud variable, protagonista de este estudio.

3.1. El chasis

El chasis integra al conjunto de componentes que conecta al vehículo con el suelo, incluyendo a los ejes, suspensión, dirección, frenos y neumáticos. Los mismos se consideran piezas de seguridad, ya que su falla mecánica durante la vida útil del vehículo podría conducir a la pérdida de control. Por lo tanto, los objetivos de este conjunto son permitir al conductor navegar de manera segura, informar el estado del vehículo y participar en la comodidad acústica y vibratoria. En particular los ejes son órganos esenciales para el comportamiento del vehículo, y por lo tanto, para su dimensionamiento.

3.2. Objetivo: estudio de solicitaciones de amplitud variable

Como se acaba de explicar, el chasis comprende piezas de seguridad, cuya resistencia a la fatiga debe verificarse con pruebas numéricas y experimentales. De hecho, existen mecanismos de ruptura que tienen lugar incluso si el material está bajo tensión por debajo de su límite elástico. Este comportamiento se explica mediante la noción de daño.

El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar modelos capaces de representar el comportamiento de fatiga de los miembros del chasis, sujetos a cargas de amplitud variable.

De hecho, en el Grupo PSA, hay una larga historia de análisis que ya se ha hecho sobre este tema. En particular, varios estudiantes realizaron estudios en el contexto de pasantías, incluido el trabajo del Ing. Navratil [17], el Ing. Xin [21] y el Ing. Martins de Oliveira [15] [16], quienes analizaron las teorías de Wöhler y Gassner y sus aplicaciones sobre el daño inducido por la fuerza, y la Ing. Bellec [1], quien estudió los modelos para representar espectros, constituyendo una base bibliográfica. En particular, la Ing. Bellec ha desarrollado un análisis al mismo tiempo que este trabajo, y seguirá los estudios durante una tesis doctoral que

comenzará a fines de este año. Además, la Ing. Bellec, el Dr. Facchinetti (mi ingeniero tutor del Grupo PSA) el Dr. Doudard (mi tutor de la escuela ENSTA Bretagne) y yo publicaremos un documento sobre el tema, que se presentará durante la conferencia VAL4 International, en Darmstadt, Alemania, en marzo de 2020.¹

4. MÉTODO GENERAL

En este capítulo, se explicará la base teórica de este estudio. Se comenzará presentando el dimensionamiento mecánico que el Grupo PSA aplica sobre el chasis. En segundo lugar, se explicará la metodología utilizada para obtener las señales en las pistas de prueba. Finalmente, se introducirá el análisis de estas señales.

4.1. Dimensionamiento mecánico de los órganos del chasis [20][4][7]

Si bien el fabricante es legalmente responsable de garantizar la seguridad vehicular, hay una ausencia de estándares o regulaciones de diseño mecánico que la garanticen. Como resultado, cada fabricante practica su propia norma, apoyándose en la estadística para garantizar la fiabilidad de las piezas.

Para comprender mejor los diferentes enfoques realizados durante el diseño, el Grupo PSA utiliza el concepto de "arcoíris" del dimensionamiento, permitiendo identificar cuatro tipos de uso diferentes: dos normales (fatiga y solicitación máxima) y dos excepcionales (incidentes y accidentes).

En primer lugar, la fatiga es lo que sucede varias veces al día, a diferencia del esfuerzo máximo que tiene una ocurrencia de una vez a la semana o menor. Ambos tipos de uso normal ocurren sin deformación plástica. Por otro lado, los casos incidentales corresponden a los eventos esperados como máximo una vez al año, involucrando deformaciones plásticas, pero no visibles por el cliente, lo que permite un funcionamiento seguro. Finalmente, el uso accidental se produce como máximo una vez en la vida del vehículo, sin producir una ruptura, sino que genera la falla de las piezas fusibles y grandes deformaciones visibles que requieren reparación.

En este trabajo se estudiaron solamente las solicitaciones llamadas normales, es decir, sin tolerancia alguna a las fallas de las piezas durante su periodo de servicio.

¹ Para mayor información, visitar el sitio www.val4.de

4.2. Obtención de las señales de pista

En el sitio técnico de Belchamp los vehículos son conducidos sobre las pistas, con el objetivo de obtener las señales útiles para el dimensionamiento. Si bien los sensores registran una gran cantidad de variables en cada rueda a lo largo del tiempo, la información importante para nuestro análisis de fatiga son las fuerzas longitudinales, transversales y verticales en cada una de las ruedas.

El conjunto de pistas se divide en distintos circuitos con diferentes tipos de situaciones de conducción, pudiendo elegir distintas porciones, según el estudio buscado. Una vez finalizado el rodaje, los especialistas realizan una primera manipulación de los datos para cortar las partes interesantes de la señal y reorganizarlas de acuerdo con los diferentes circuitos. Además, para considerar la vida útil del vehículo al correr en las pistas, es necesario concatenar los circuitos, cada uno multiplicándose por un coeficiente, llamado "Coeficiente de mezcla".

4.3. Análisis de las señales obtenidas

Las etapas que fueron seguidas durante el análisis de las señales obtenidas se muestran en la siguiente figura, indicando en celeste aquellas pertenecientes al cálculo en fatiga, en verde al estudio de solicitaciones máximas, y en gris, las comunes a ambos análisis.

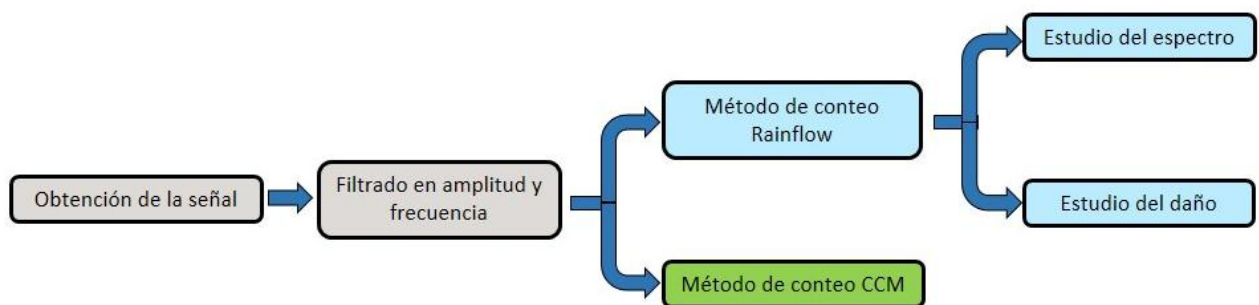


Figura 1: Etapas seguidas durante el análisis de señales

Los cálculos correspondientes fueron realizados utilizando programas en Matlab y Glyphworks. Para obtener una mejor comprensión, se comenzó por el estudio del esfuerzo según una dirección y sobre una rueda, durante el rodaje de un vehículo a combustión sobre una porción de pista. Luego, la metodología fue aplicada sobre la totalidad de las pistas, realizando la concatenación teniendo en cuenta los coeficientes de mezcla. A continuación, se estudiaron las cuatro ruedas sobre las tres direcciones. Por último, los resultados fueron comparados con aquellos correspondientes al mismo modelo de vehículo, pero en versión eléctrica.

Así, una vez que las señales son registradas, las mismas son sometidas a un filtrado en amplitud (denominado gate) y a otro frecuencial, ambos con la finalidad de desprestigiar los ciclos que no contribuyen significativamente al daño.

Para el estudio en fatiga, se continuó con el conteo de ciclos, aplicando el método Rainflow, registrando amplitudes junto a sus ocurrencias y desprestigiar el efecto de las solicitaciones medias, debido a que las mismas son débiles en las tres direcciones estudiadas. Este estudio fue basado en las recomendaciones brindadas por las normas ASTM E 1049-85, "Prácticas estándar para el conteo de ciclos en el análisis de fatiga" y la norma francesa AFNOR A03-406. Si bien estas recomiendan también otros métodos, se seleccionó la metodología Rainflow ya que es la más reconocida y utilizada a nivel internacional, incluyendo al Grupo PSA, gracias a su relación la histéresis de los materiales.

Así, una vez que los ciclos fueron contabilizados, se estudió la forma del espectro² de solicitaciones y el daño asociado, identificando las constantes que los caracterizan, con el objetivo de encontrar un modelo que permita predecir el comportamiento. Para dichos estudios se utilizaron los modelos de Basquin, de Gassner, Heuler & Al. y Palmgren-Miner, descritos por las siguientes ecuaciones.

Considerando:

- S : amplitud de solicitación (N)
- N : número de ciclos, ocurrencias
- H : ocurrencias acumuladas
- H_0 : longitud de espectro
- D : daño por fatiga
- B : constante de Basquin, parámetro dependiente del material y del proceso de fabricación
- b : pendiente de Basquin, parámetro dependiente del material y del proceso de fabricación
- v : exponente de forma

Entonces:

- Modelo de Basquin: $N S^b = B$
- Modelo de Gassner: $H S_{max}^b = B$
- Modelo de Heuler & Al.: $\frac{\log H_i}{\log H_0} = 1 - \frac{S_i^v}{S_{max}^v}$
- Modelo de Palmgren-Miner junto al de Basquin: $D_i = \frac{N_i S_i^b}{\sum N_j S_j^b}$

Se consideró un valor determinado de constante de Basquin, teniendo en cuenta al material y su procesamiento, y se buscó encontrar el valor del exponente de forma v que permitiera caracterizar cada comportamiento, sin depender del material.

La siguiente figura muestra la influencia de este parámetro sobre la forma del espectro de ocurrencias. Se observa que:

- $v = 1$ corresponde a un espectro lineal, donde el daño es generado por todas las amplitudes por igual
- $v < 1$ corresponde un espectro cóncavo, donde el daño se debe principalmente a las amplitudes pequeñas
- $v > 1$ corresponde un espectro convexo, donde el daño se debe principalmente a las grandes amplitudes

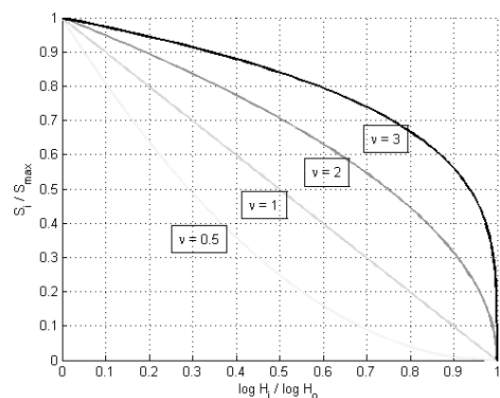


Figura 2: Espectro estándar según el valor del exponente de forma v [5] [6]

² Debe entenderse que el término "espectro" aquí no tiene relación con los análisis de frecuencia, sino que representa a las solicitaciones en función de sus ocurrencias.

A diferencia de lo realizado para el estudio en fatiga, cuando se analizaron las solicitaciones máximas, sólo se realizó el conteo de valores máximos y mínimos, identificando las constantes que caracterizan su tendencia, estableciendo una estrategia de concepción maximalista. En este caso fue utilizado el método Level Crossing, también descrito en las normas anteriormente mencionadas.

Si bien este segundo método no está relacionado a la histéresis material como Rainflow, es uno de los más antiguos y simples, permitiendo obtener una rápida visualización de los extremos de la señal. Esto permite apreciar la distribución del comportamiento de los clientes.

5. RESULTADOS

En primer lugar, se encontraron los resultados asociados al daño de cada nivel de amplitud. Además, se cuantificó el deterioro sobre cada porción de pista, asociándolo a diferentes situaciones de conducción. También se encontró la longitud de espectro.

Luego se obtuvo la comparación entre ambos trenes y lados, asociando las diferencias y las similitudes a la arquitectura vehicular y la dinámica de conducción.

Dentro del análisis cuantitativo, se obtuvo el resultado del exponente de forma, lo que permitió calificar al espectro. También se obtuvieron las constantes que caracterizan al comportamiento máximo en sollicitación.

Por último, se encontraron las similitudes y diferencias entre ambos vehículos analizados.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones técnicas

Este proyecto fue enriquecedor en términos de análisis de señal con respecto a los esfuerzos experimentados por el chasis durante la vida de un vehículo. Permitió estudiar los métodos de procesamiento de señales, las teorías sobre la fatiga y las influencias de las características físicas de los vehículos en este comportamiento. En particular, el análisis del daño fue el protagonista, para calificar la falla de los elementos sujetos a los niveles de esfuerzo por debajo del límite elástico, lo cual es esencial debido a la importancia de los órganos del chasis con respecto a la seguridad operacional.

Este documento comenzó presentando al Grupo PSA, empresa anfitriona, para dar el contexto físico a la pasantía. La proximidad entre mi oficina y las pistas me permitió llevar a cabo estudios importantes, brindándome la posibilidad de resolver todas mis preguntas.

Luego se presentaron las especificaciones que explican el problema, comenzando por una breve descripción del chasis. Posteriormente, se explicó el objetivo: identificar y caracterizar modelos capaces de representar el comportamiento de fatiga de los miembros del chasis sujetos a cargas de amplitud variable. También se presentaron los estudios que se han desarrollado sobre este tema y los que están por venir.

Además se exhibieron los métodos utilizados, comenzando con los procedimientos de dimensionamiento mecánico implementados por el Grupo, y siguiendo por la obtención de las señales de pista. Posteriormente, el procesamiento de estas señales se introdujo desde dos puntos de vista: fatiga y sollicitación máxima.

Finalmente, se presentaron los resultados.

Para concluir, los métodos de análisis de fatiga permitieron observar el comportamiento de los elementos a lo largo de su posible rango de amplitudes, cuantificando el daño asociado y llegando al valor máximo de esfuerzo que pueden desarrollar. Por otro lado, el método CCM permitió rápidamente tener una visión de los extremos de sollicitación.

Se podría decir que el principal inconveniente de la metodología aplicada se debe a que la misma se trata de un análisis uniaxial y por lo tanto, limitado.

6.2. Conclusiones personales

Este trabajo me permitió utilizar todos mis conocimientos adquiridos durante mi formación en ingeniería en Argentina y Francia, pudiendo aplicar mis estudios relacionados con el procesamiento y la programación de señales en Matlab. Además, el análisis de los resultados utilizando estos métodos me permitió aplicar mi propio conocimiento de arquitectura de vehículos, correspondiente a la rama que elegí en la escuela ENSTA Bretagne.

Todas estas aplicaciones me dieron la oportunidad de mejorar mis saberes sobre la fatiga y la arquitectura y el dimensionamiento de los vehículos.

Aprecié enormemente los intercambios entre los expertos en dimensionamiento y los arquitectos que realizan el diseño de los elementos, funcionando como intermediaria entre ambas disciplinas, permitiéndome comprender como se alimentan mutuamente.

Además, participé en varios entrenamientos del Grupo PSA relacionados con el dimensionamiento y el procesamiento estadístico de datos, lo que me permitió aumentar aún más mis conocimientos.

En pocas palabras, este proyecto fue muy enriquecedor no solo a nivel técnico sino también humano, lo que me permitió aprender a trabajar en un grupo dentro de una empresa prestigiosa. Además, me ayudó enormemente a mejorar mi nivel de francés, el cual pude practicar día a día y durante la escritura de este trabajo.

7. PERSPECTIVAS

Dentro de las tareas que considero importantes de realizar por parte de quienes continuarán mi trabajo, se encuentra la continuación del análisis de señales provenientes de clientes, con la finalidad de elaborar la Norma de Solicitación de Trenes del Grupo y de verificar la representatividad de los mismos sobre las pistas. También es importante el análisis de ciertas condiciones de vida complejas, las cuales implican análisis multiaxiales. Estos temas serán objeto de estudio de la tesis doctoral que tendrá lugar durante los próximos tres años.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Bellec E. (2019), *Application Système – Dimensionnement en fatigue sous chargement variable d'une liaison au sol*, ENSTA Bretagne, 29806 Brest, France
2. Bignonnet A., Chieragatti R., Colin B., Courtin S., Huther M., Nguyen-Tajan M., Szmytka F. (2016), *Définition des chargements en fatigue*, Commission Fatigue de la SF2M, Saint-Denis, France
3. Blouquy J. (2019), *Projet de fin d'études – Dimensionnement mécanique des amortisseurs de véhicule automobile – Application aux amortisseurs de train de type pseudo Mac-Pherson*, UTBM, France.
4. Echard B., Gayton N., Bignonnet A. (2014), *A reliability analysis method for fatigue design*, International Journal of Fatigue, France
5. Facchinetti M. L. (2017), *Fatigue damage of materials and structures assessed by Wöhler and Gassner frameworks: recent insights about load spectra for the automotive*, Groupe PSA, Centre Technique de Belchamp, 25420 Voujeaucourt, France
6. Facchinetti M. L. (2018), *Load spectra and fatigue damage: applications to the automotive industry*, Groupe PSA, Centre Technique de Belchamp, CC SX.BP.06, 25240 Voujeaucourt, France
7. Facchinetti M. L. (2019), *Formation interne pour le dimensionnement mécanique LAS*, Groupe PSA, Centre Technique de Belchamp, CC SX.BP.06, 25240 Voujeaucourt, France
8. Farges R. (1996), *La Fatigue*, Groupe PSA, Direction des Études Techniques Automobiles
9. Groupe PSA <https://www.groupe-psa.com/fr/>
10. Halconrui T., *Les liaisons au sol*, Groupe PSA
11. Heuler P., Klätschke H. (2005), *Generation and use of standardised load spectra and load-time histories*, International Journal of Fatigue
12. <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/>
13. Köhler M., Jenne S., Pötter K., Zenner H. (2017), *Load Assuption for Fatigue Design of Structures and Components*, Springer, Berlin, Allemagne
14. Mahajoub G., Zarka F. (2005), *Formation interne Liaison au sol et dynamique du véhicule*, Groupe PSA, Centre Technique de Belchamp, CC SX.BP.06, 25240 Voujeaucourt, France
15. Martins de Oliveira M. (2018), *Application Système – Dimensionnement à la fatigue des éléments d'une liaison au sol*, ENSTA Bretagne, 29806 Brest, France
16. Martins de Oliveira M. (2018), *Projet de fin d'études – Chassis system reliable fatigue assessment*, ENSTA Bretagne, 29806 Brest, France
17. Navratil L. (2017), *Application Système – Fatigue sous chargement à amplitude variable*, ENSTA Bretagne, 29806 Brest, France
18. Sonsino C.M. (2007), *Fatigue testing under variable amplitude loading*, International Journal of Fatigue
19. Spoticar, Groupe PSA <https://www.capital.fr/entreprises-marches/psa-lance-spoticar-son-nouveau-label-multimarques-de-vehicules-doccasion-1338394>
20. Thomas J. J. (2002), *Fatigue Modeling for Automotive Applications*, Groupe PSA, France
21. Xin Su (2016), *Projet de fin d'études – Durée de vie en fatigue sous contrainte à amplitude variable*, ENSTA Bretagne, 29806 Brest, France