

CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES PARA ELEGIR MATERIALES EN FATIGA

V. Chaves

Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla
C/ Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España
chavesrv@us.es

RESUMEN

En este trabajo se proponen algunos criterios medioambientales para los diseñadores de fatiga de materiales de modo que puedan considerar de forma cuantitativa el impacto ambiental durante el proceso de diseño. En concreto, durante la selección de los materiales en aplicaciones sometidas a fatiga. Se han analizado dos tipos de aplicaciones: las que no consumen energía durante su uso, como una tubería sometida a presión variable y las que se utilizan en medios de transporte, como las piezas de un coche o un avión. En el primer tipo de aplicación el mayor impacto ambiental tiene lugar en la fase de producción del material, mientras que en el segundo tipo el mayor impacto es durante la fase de uso. Para ambos casos, se proporciona un parámetro, denominado Ecological-Fatigue-Factor (EFF), que combina el impacto ambiental y la resistencia a fatiga. Se ha realizado una clasificación de los materiales más habituales usados en fatiga para las dos aplicaciones. Para el primer tipo el mejor material es el acero mientras que para el segundo el mejor es el material compuesto de fibra de carbono.

ABSTRACT

In this paper some environmental criteria are proposed for fatigue designers so that they can quantitatively consider the environmental impact during the design process. Specifically, during the selection of materials in applications subject to fatigue. Two types of applications have been analyzed: those that do not consume energy during their use, such as a pipeline subjected to variable pressure and those used in means of transport, such as the parts of a car or an airplane. In the first type of application the greatest environmental impact takes place in the production phase of the material, while in the second type the greatest impact is during the use phase. For both cases, a parameter is provided, called Ecological-Fatigue-Factor (EFF), which combines environmental impact and fatigue endurance. A classification of the most common materials used in fatigue has been made for the two applications. For the first type the best material is steel while for the second the best is the carbon fibre composite.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, Materiales, Medioambiente, Límite de fatiga, Eco-indicador.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años muchos grupos industriales importantes están incorporando criterios ambientales en sus procesos de producción. El grupo BMW tiene, no sólo programas de disminución de emisiones de CO₂ o de consumo de combustible para sus vehículos, sino de disminución de energía o agua consumida por vehículo producido, de incorporación a la sostenibilidad de sus suministradores de materiales, etc. [1]. En esta línea, el programa de diseño y de análisis llamado Solidworks, de Dassault Systemes, ha comercializado recientemente un paquete que permite calcular de forma muy sencilla el impacto ambiental de los productos diseñados [2]. Un aspecto evidente es que la fase de diseño juega un papel decisivo en el impacto ambiental y tiene gran repercusión en todas las fases posteriores del producto, como la producción, comercialización, gestión de

residuos, etc. Por tanto es clave incorporar criterios medioambientales en el proceso de diseño si se quiere realmente reducir el impacto ambiental de los diversos productos.

Uno de los objetivos primordiales de los diseñadores de máquinas es el evitar el fallo por fatiga. Su estudio es bastante complejo y requiere conocimientos amplios de diversos campos como: metalurgia, elasticidad y resistencia de materiales, cinemática y dinámica de máquinas, vibraciones y mecánica de fluidos, etc. Es quizás esta complejidad unida a lo crítico y especializado que puede ser un diseño de este tipo lo que ha provocado que no se haya prestado todavía demasiada atención al aspecto del impacto ambiental en el campo del diseño a fatiga.

Este trabajo pretende aportar un criterio medioambiental al diseño a fatiga, con la idea de que en un futuro próximo el diseñador a fatiga considere el impacto ambiental como un factor más a la hora de definir su diseño. En concreto se pretende analizar qué materiales utilizados habitualmente en el diseño a fatiga tienen un menor impacto ambiental y por tanto son los más recomendables para un diseño a fatiga que sea lo más respetuoso con el medio ambiente. Para ello se han estudiado los materiales desde los dos puntos de vista: resistencia a la fatiga e impacto ambiental. El parámetro más general para definir la resistencia de un material a fatiga es el denominado “límite de fatiga del material”, y es el que se ha utilizado en este estudio, tomado de la bibliografía habitual empleada en diseño para fatiga. Para cuantificar el impacto ambiental se ha utilizado un parámetro muy ingenieril y habitual en diseño medioambiental, como es el “Embodied energy”. El impacto ambiental de un material se basa en su ciclo de vida completo, desde su extracción de la corteza terrestre hasta su final de vida, por ejemplo, en un vertedero.

En este estudio se han distinguido dos tipos de aplicaciones ingenieriles: las asociadas a componentes que no consumen energía durante su uso pero que sufren cargas cíclicas, por ejemplo por variaciones de presión, y las asociadas a medios de transporte, como los componentes o piezas en coches o aviones y que se ven sometidos a vibraciones y/o cargas variables. Se proporciona un nuevo parámetro combinado, que se le ha denominado “Ecological-Fatigue-Factor”, que permite cuantificar cuáles son los materiales mejores desde el punto de vista medioambiental y, a la vez, más resistentes a fatiga. Por último, para los dos tipos de aplicaciones ingenieriles se ha realizado una clasificación de los materiales según este parámetro.

2. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE UN COMPONENTE

El estudio del impacto ambiental de un equipo o componente consiste en realizar lo que se conoce en la literatura como un análisis del ciclo de vida (Life cycle assessment (LCA)), que consiste en estudiar los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida del componente o equipo, desde la adquisición de las materias primas hasta su fin de vida. Existe un conjunto de normas de ámbito internacional, las normas de la serie ISO 14040 [3], que definen un procedimiento para realizar un análisis de ciclo de vida, y que pueden ser estudiadas en detalle en libros o guías, como la publicada por la Unión europea en 2010 [4].

El ciclo de vida se suele agrupar en 5 fases: obtención y producción de materiales, procesado y fabricación, transporte, uso y fin de vida. A continuación se van a describir brevemente estas cinco etapas:

1) Obtención y producción de materiales: el primer paso para realizar un componente consiste en la obtención de los materiales de los que está hecho. Como ejemplo, la producción de 1 kg de acero requiere la extracción y reducción del mineral de hierro, el traslado a la planta y un conjunto de procesos metalúrgicos que producen finalmente el acero. Estos procesos tienen en primer lugar un impacto ambiental asociado al gasto de energía para realizar las diversas actividades. Pero esto no es todo el impacto ambiental asociado a la obtención del acero. Así, cuando en la mina se realiza la obtención del mineral de hierro de las vetas minerales se vierten metales pesados a las aguas circundantes y cuando se prepara el mineral para llevarlo al horno, en las operaciones de sintering y pelletising, se emiten gases que contienen metales pesados e hidrocarburos. Posteriormente, cuando se funde el pig iron en el horno, se emiten sulfuros a la atmosfera, y cuando se realiza el proceso de oxidación en el horno se producen grandes cantidades de CO y también residuos sólidos que contienen CaO, SiO₂, etc. Todas estas emisiones al medioambiente, ya sea en forma sólida, líquida o gaseosa, tienen asociados un cierto impacto ambiental.

2) Procesado y fabricación: las plantas de producción de materiales suelen proporcionar unos productos semiacabados. Considerando de nuevo la producción de acero, es necesario realizar procesos de laminado, extrusionado, etc., para obtener planchas, placas o barras de acero. Posteriormente se suelen aplicar tratamientos térmicos, mecánicos o químicos para mejorar las propiedades del material. Después es necesario realizar una serie de operaciones mecánicas de fresado, laminado, prensado, curvado, corte, etc. Por último se suele realizar un montaje de las diversas piezas que dan lugar al equipo o componente deseado. Todos estos procesos evidentemente tienen también asociado un impacto ambiental.

3) Transporte: a continuación el equipo o componente debe ser trasladado desde su lugar de fabricación a su lugar de uso, que en muchas ocasiones puede encontrarse a miles de km. El impacto de esta fase está básicamente asociado al consumo de combustible en el transporte y es una función del tipo de transporte empleado, del número de km y del número de kilos transportados.

4) Uso: la siguiente fase de un equipo o componentes es la propia de su uso para el que fue diseñado. Hay muchos equipos o elementos que prácticamente no tienen asociado ningún impacto ambiental durante su uso, como puede ser un puente o una tubería. Pero en otros la fase de uso implica un considerable consumo de electricidad o de un combustible, como puede ser un hervidor para calentar agua, o un componente de un medio de transporte, como un coche o un avión.

5) Eliminación: por último, una vez que el equipo deja de estar en uso entra en la fase de eliminación. El

equipo se puede desmontar y reutilizar parte de sus elementos, o se pueden reciclar algunos de los materiales que lo componen, o se puede enviar a un vertedero o quemarlo en una incineradora. Cada uno de esos procesos tiene un impacto ambiental asociado. El que un equipo siga un camino u otro de eliminación es muy dependiente del tipo de materiales empleados, de la degradación que hayan sufrido los mismos durante su uso y también de lo fácilmente separables que sean.

Para realizar un análisis de ciclo de vida de un componente es necesario hacer un inventario de todas las actividades y procesos que a lo largo de las 5 fases anteriormente explicadas implican un impacto significativo sobre el medioambiente. Existen en la actualidad diversas bases de datos, de acceso público como la denominada ELCD [5], proporcionada por la Comisión Europea, o de acceso restringido como la suiza Ecoinvent [6], que ha sido la utilizada en este trabajo. En estas bases de datos se cuantifica de forma bastante exhaustiva, los consumos de materiales y de energía y las emisiones al agua y al aire, que tienen lugar en cientos de procesos unitarios de todo tipo. Algunos de estos podrían ser: la fabricación de 1 kg de acero o de 1 kg de polietileno, el transporte de 1 kg de mercancía en camión, el consumo de 1 kWh de electricidad, el envío a un vertedero de 1 kg de acero o de polietileno, etc. Por tanto el ciclo de vida de un equipo o componente estará compuesto de un conjunto de estos procesos básicos. En estas bases de datos se analizan las tecnologías más representativas, a nivel regional o mundial, y se utilizan unos valores medios de un conjunto de fabricantes, de modo que el proceso pueda ser considerado representativo del hacer actual. Estas bases de datos se van actualizando regularmente.

El inventario de actividades y procesos en combinación con las bases de datos permite obtener una lista de consumos de materiales y de energía y de emisiones. El siguiente paso es evaluar su impacto medioambiental. Existen muchas categorías de impacto ambiental como el calentamiento global, agotamiento de recursos, acidificación del suelo, toxicidad humana, etc. Es necesario cuantificar cuanto contribuye cada proceso o actividad a cada impacto. Así, la emisión de dióxido de carbono tiene un factor de 1 mientras que la emisión de metano tiene un factor de 21 en el impacto de calentamiento global. El siguiente paso es combinar las diversas categorías de impacto, poderlas de alguna manera y finalmente proporcionar un valor numérico del impacto, que representa una cuantificación del impacto del ciclo de vida de un componente. Este proceso se hace mediante los *eco-indicadores*. Existen diversos *eco-indicadores* en la literatura, aunque el más extendido quizás sea el *Eco-indicator 99* [7]. Una segunda opción es realizar la cuantificación medioambiental basándose en una cantidad directamente medible, como el CO₂ emitido a la atmósfera o el “Embodied energy”, también definido como “Cumulative energy demand”, que se podría

traducir al español como “Demanda acumulada de energía”, y que se define como la cantidad total de energía consumida a lo largo de todo el ciclo de vida del componente. En este trabajo se va a utilizar preferentemente la Demanda acumulada de energía, por ser un parámetro relativamente sencillo de calcular y muy ingenieril.

Existen en la literatura diversos estudios de LCA y *eco-indicadores* para equipos electrónicos, bolsas de plástico, etc., pero según el conocimiento del autor, ninguno de ellos relacionado con aplicaciones de fatiga de materiales. A continuación se va a mostrar un estudio de este tipo para aplicaciones de fatiga.

3. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE UN DISEÑO DE FATIGA

Hacer un LCA de un diseño requiere un cierto nivel de conocimiento y también un tiempo considerable. Sin embargo, el análisis de diversos trabajos de la literatura nos indica que es muy habitual que una de las cinco fases tenga mucho más impacto ambiental que las otras cuatro, como comenta Ashby [8]. En esos casos tiene sentido, como primera aproximación, analizar el impacto de solamente la fase decisiva, obviando el resto, lo que permite estudiar el problema de una forma mucho más simple. Esta filosofía es la que se ha seguido en este trabajo. Se van a considerar dos tipos de aplicaciones de fatiga:

1) Aplicaciones sin consumo de energía durante su uso: se refiere a componentes sometidos a cargas de fatiga que no requieren consumir energía durante su uso, como un depósito o una tubería sometida a presión variable, las palas de una turbina eólica o el marco de una bicicleta. Como ejemplo de este tipo se propone un caso muy simple: el LCA de una tubería de 1 kg de acero, fabricada en Francia, utilizada en España y enviada al final de su vida útil a un vertedero. Este LCA, como todos los del documento se ha realizado con el software SimaPro [7] y usando la base de datos de *ecoinvent* [6]. El impacto se ha cuantificado con el *Eco-indicator 99*. El impacto de cada una de las cinco fases se muestra en la figura 1. La fase de producción del material tiene un impacto del 73.8% del total, muy superior al de fabricación y transporte, con el 14% y 11.5% respectivamente. El uso no tiene impacto asociado y el fin de vida tiene un impacto relativo bajísimo. Este ejemplo muestra que para este tipo de aplicaciones la fase producción del material es la fase decisiva para mejorar el impacto ambiental.

2) Aplicaciones de transporte: en este apartado se consideran los componentes sometidos a fatiga que se usan en medios de transporte, como el radiador de un coche sometido a fatiga térmica o el ala de un avión sometida a vibraciones. Durante la fase de uso se consume energía para mover el vehículo y una proporción de ella para mover el componente objeto de

estudio. Como ejemplo de nuevo se va a estudiar una tubería de acero de 1 kg, pero en este caso esta tubería forma parte de un componente de un coche. Se va a considerar un coche de 1000 kg que recorre doscientos mil km en toda su vida útil y que consume de media 8,6 l de gasolina cada 100 km. En la figura 2 se muestra el impacto relativo para este ejemplo de cada una de las 5 fases, incorporando en la fase de uso el impacto de la fabricación de toda la gasolina necesaria. Como se ve, la fase de uso es claramente la de mayor impacto. Aún mayor preponderancia de la fase de uso muestra Ashby en su estudio del impacto de componentes de aviones [8]

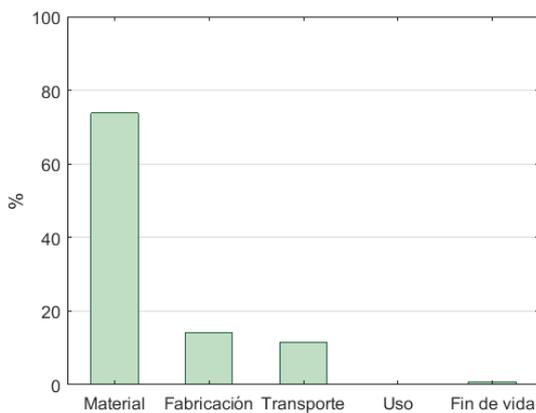


Figura 1. Impacto de cada fase para una tubería de acero.

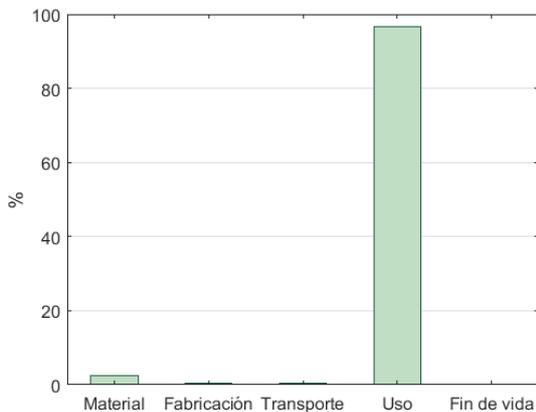


Figura 2. Impacto de cada fase para una tubería de acero incluida en el componente de un coche.

Finalmente habrá aplicaciones de fatiga que no se puedan incluir en ninguna de las dos categorías anteriores. En el caso de que no se vea un claro predominio de una de las fases sobre las otras se requerirá el realizar un LCA completo. A continuación se va a ver con más detalle los dos tipos de aplicaciones mencionados.

4. SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA APLICACIONES SIN CONSUMO DE ENERGÍA DURANTE SU USO

Para las aplicaciones en las que no se consume energía durante su uso se acaba de ver que es la fase de producción de materiales la que predomina en el impacto ambiental. En la figura 3 se muestra el impacto ambiental, cuantificado mediante el eco-indicador Demanda acumulada de energía (MJ/kg), de la fase de producción de los materiales más habituales en fatiga.

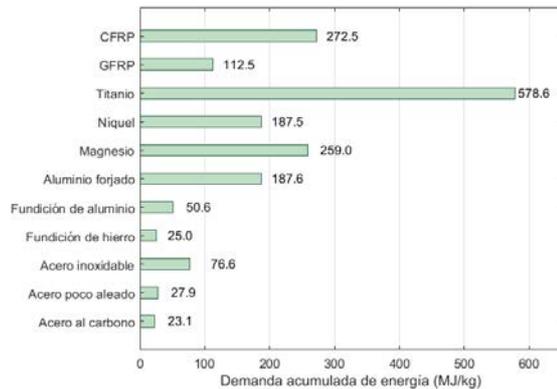


Figura 3. Impacto ambiental de la producción de 1 kg de varios materiales.

Además de los metales más habituales se ha incluido los polímeros de fibra de carbono (carbon fibre reinforced polymer, CFRP) y de fibra de vidrio (glass fibre reinforced polymer, GFRP), materiales muy utilizados en los últimos años en diversas industrias como la aeronáutica. En estos valores está incorporado el uso de chatarra habitual para la producción de material, que reduce el impacto de la producción. El uso de la chatarra es muy alto en las fundiciones de aluminio (80%) y prácticamente nulo en las fibras de carbono y vidrio. Como se observa, el impacto más bajo se da en los materiales de hierro, por ser el hierro un material muy abundante en la Tierra y con un consumo de energía no elevado en el proceso de transformación del mineral. Por el contrario, el titanio tiene el impacto más elevado, al requerir una gran cantidad de energía en el proceso de reducción del óxido de titanio a metal.

4.1. El Ecological-Fatigue-Factor

La clasificación de materiales mostrada en la figura 3 no basta para realizar la elección del material ya que existe entre ellos grandes diferencias en su resistencia a fatiga. En este trabajo se propone un índice, denominado *Ecological-Fatigue Factor (EFF)*, para poder clasificar los materiales desde los dos puntos de vista, impacto ambiental y resistencia a fatiga. Para las aplicaciones que no requieren energía durante la fase de uso se define como:

$$EFF_{NE} = \frac{FL}{\rho \cdot EE} \text{ (adimensional)} \quad (1)$$

donde se ha añadido el subíndice *NE* para indicar que se trata de una aplicación sin consumo de energía durante la fase de uso (No-energy) y distinguirla de las aplicaciones vinculadas al transporte, donde se usará el subíndice *T*. En el numerador aparece el límite de fatiga del material (*FL*, fatigue limit) y en el denominador la densidad del material ρ , multiplicada por la Demanda acumulada de energía (*EE*, embodied energy), dando lugar a una variable adimensional. Los valores de densidad y de límites de fatiga se muestran en la tabla 1, tomados de fuentes conocidas de la literatura. Los valores de límite de fatiga están expresados como amplitud para ensayos del tipo R=-1, y se han seleccionado tratando de encajar lo mejor posible con los materiales tomados de la base de datos de ecoinvent. En la figura 4 se muestran los valores de este indicador para los diversos materiales. Mientras mayor sea el valor del *EFF* mejor será el comportamiento del material desde los dos puntos de vista, fatiga y medio-ambiente. Se observa como los materiales mejores para este tipo de aplicaciones son claramente los aceros. Se trata de unos materiales con bajo impacto ambiental y buen comportamiento a fatiga, aunque algo penalizados por la alta densidad. Entre los peores están los metales magnesio, níquel y titanio. El magnesio tiene una excelente baja densidad pero mucho impacto ambiental y bajo límite de fatiga, mientras que el níquel y el titanio tienen alta densidad y alto impacto ambiental.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de varios materiales

Material	Densidad	Límite de fatiga	
	(kg/m ³)	Valor (MPa)	Comentarios
Acero al carbono	7850	241	1020, hot rolled
Acero poco aleado	7850	324	4130, normalized
Acero inoxidable	7850	241	304, annealed
Fund. de hierro	7150	95	Grey cast iron
Fund. de aluminio	2700	115	AA356-T6
Aluminio forjado	2700	124	2014-T6
Magnesio	1850	82	AZ91
Níquel	8200	228	Nickel 200
Titanio	4600	330	Ti, annealed
GFRP	1860	75	
CFRP	1550	225	

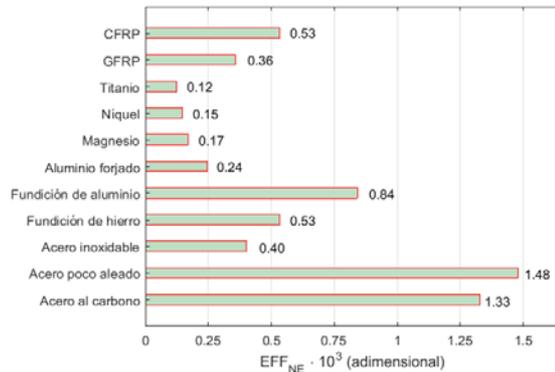


Figura 4. Ecological-Fatigue Factor para aplicaciones sin consumo de energía durante la fase de uso (*EFF_{NE}*).

En la figura 5 se muestra cómo influye en los valores de *EFF_{NE}* la aplicación de un tratamiento termomecánico al material. Estos tratamientos se aplican para mejorar las propiedades mecánicas del material, aunque evidentemente conllevan un gasto energético y un impacto ambiental. En los dos ejemplos que se muestran, el tratamiento de deformación en frío de un acero al carbono y un acero inoxidable, se mejora considerablemente el valor del *EFF_{NE}* respecto al valor inicial. Es decir, el incremento del valor del límite de fatiga ha compensado claramente el gasto energético del tratamiento.

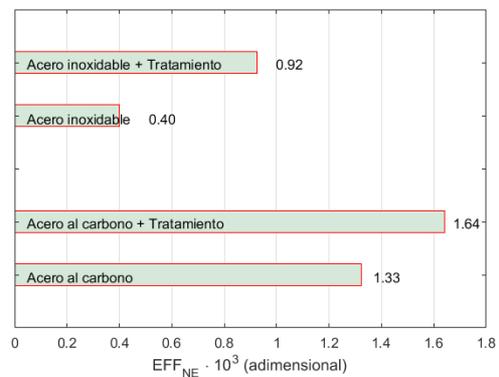


Figura 5. Modificación del valor de *EFF_{NE}* por la realización de un tratamiento termo-mecánico.

5. SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA APLICACIONES DE TRANSPORTE

Para los componentes utilizados en medios de transporte, coches, aviones, etc., se ha visto que el mayor impacto se produce durante la fase de uso, asociado al consumo de combustible del vehículo. Sin entrar en aspectos complejos como la aerodinámica o la combustión, una forma directa de reducir el consumo de energía es la reducción del peso del vehículo, como ha quedado establecido en varios estudios [8]. Así que un parámetro muy simple para medir que material es mejor en aplicaciones de transporte es el obtenido de la

división entre el límite de fatiga (FL) y la densidad, dando lugar al segundo índice, EFF_T denominado así por ser el Ecological-Fatigue Factor relacionado con las aplicaciones de transporte. Su definición es simplemente:

$$EFF_T = \frac{FL}{\rho} \quad (\text{MJ/kg}) \quad (2)$$

Los valores de EFF_T se muestran en la figura 6. Se observa que los resultados son muy diferentes a los mostrados en la figura 4. Ahora el mejor material es claramente el polímero de fibra de carbono, que combina un buen límite de fatiga con una densidad bajísima. En segundo lugar aparece el titanio, con una muy buena combinación de ambas propiedades. En último lugar está la fundición de hierro, con un bajo límite de fatiga y una alta densidad.

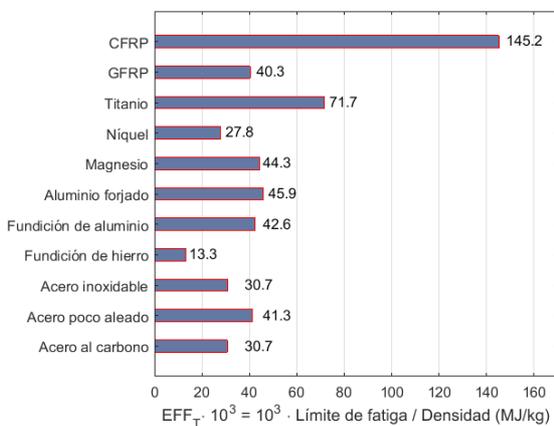


Figura 6. Ecological-Fatigue Factor para aplicaciones de transporte (EFF_T).

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este trabajo proporciona criterios sencillos para elegir materiales en fatiga más respetuosos con el medio ambiente. Se analizan dos tipos de aplicaciones de fatiga, la primera relacionada con componentes que no consumen energía durante su uso y la segunda con componentes usados en medios de transporte. En la tabla 2 se muestra una clasificación de los materiales para estas dos aplicaciones según un parámetro que incluye el comportamiento a fatiga y el impacto ambiental. Para el primer tipo de aplicación el mejor material es el acero al carbono mientras que para la segunda es el polímero de fibra de carbono. Las diferencias entre ambas clasificaciones son notables. Sirva como ejemplo el titanio, penúltimo en la clasificación del primer tipo y segundo en la otra.

Tabla 2. Clasificación de los mejores materiales para fatiga y medioambiente.

	Aplicaciones No-energy	Aplicaciones de transporte
1	Acero al carbono	CFRP
2	Acero poco aleado	Titanio
3	Fund. de aluminio	Aluminio forjado
4	Fund. de hierro	Magnésio
5	CFRP	Fundición de aluminio
6	GFRP	Acero al carbono
7	Acero inoxidable	GFRP
8	Aluminio forjado	Acero al carbono
9	Magnésio	Acero inoxidable
10	Titanio	Níquel
11	Níquel	Fundición de acero

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer al Ministerio de Educación de España por su apoyo financiero a través del proyecto DPI2014-56904-P.

REFERENCIAS

- [1] BMW Group. Sustainable Value Report. Munich; 2011.
- [2] Dassault Systemes SolidWorks Corp. SolidWorks 2010. Vélizy (Francia), 2010.
- [3] ISO14040. Environmental management: life-cycle assessment, 2006.
- [4] European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. ILCD handbook: general guide for life cycle assessment - detailed guidance. 2010.
- [5] European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. (2013) European reference Life-Cycle Database (ELCD 3.0). <http://elcd.jrc.ec.europa.eu>. Acceso, julio 2013.
- [6] ecoinvent Centre. ecoinvent data v2.0. Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 2007.
- [7] PRé. SimaPro 7.3. PRé Consultants bv. Printerweg 18, 3821AD Amersfoort. The Netherlands. 2011.
- [8] M.F. Ashby. Materials and the environment. Butterworth Heinemann, Elsevier Inc. 2009.