

Metodologías avanzadas de caracterización para la predicción de la conformabilidad y resistencia a la fatiga de chapa metálica de alto rendimiento

DR. DAVID FRÓMETA GUTIÉRREZ

Investigador en la Unidad de Materiales Metálicos de Eurecat

SERGI PARARADA ORIOL

Investigador en la Unidad de Materiales Metálicos de Eurecat

El uso de nuevos materiales metálicos de alto rendimiento en forma de chapa, como los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS, por sus siglas en inglés) o las aleaciones de aluminio de alta resistencia, ha experimentado un crecimiento sin precedentes en los últimos años. Este crecimiento está principalmente motivado por los requerimientos, cada vez más exigentes, de seguridad en caso de accidente y las estrictas normativas anticontaminación.

Estos materiales metálicos de alto rendimiento se caracterizan por tener unas propiedades mecánicas únicas, combinando alta resistencia mecánica, buena conformabilidad y un excelente comportamiento en caso de impacto, lo que los hace especialmente idóneos para la fabricación de piezas estructurales y de seguridad del automóvil. Al mismo tiempo, debido a su mayor resistencia mecánica, permite la fabricación de componentes de menor espesor, lo que permite reducir el peso total del vehículo, contribuyendo así a aumentar la autonomía de conducción y a reducir las emisiones de CO₂. Este concepto de reducción de peso del

automóvil, también conocido como diseño ligero o *lightweight design*, ha sido una de las grandes tendencias en automoción durante los últimos años y con la llegada del vehículo eléctrico y las nuevas regulaciones europeas de emisión de CO₂, cobra ahora una mayor relevancia si cabe.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES LIGEROS DE ALTO RENDIMIENTO: NUEVOS RETOS

El diseño de nuevos componentes ligeros de automoción es cada vez más exigente, lo que motiva la fabricación de piezas con geometrías cada vez más complejas donde los materiales son llevados al límite. Esto plantea una serie de nuevos retos relacionados con la conformabilidad y el comportamiento en servicio.

Uno de estos desafíos está relacionado con la mayor susceptibilidad al agrietamiento de los materiales metálicos de alta resistencia, lo que hace que sean más propensos a la formación de grietas durante el conformado

en frío (agrietamiento de borde o *edge cracking*) o en casos de deformación severa, como en una situación de impacto, figura 1. El *edge cracking* es uno de los problemas más frecuentes al que se enfrentan los estampadores de pieza metálica al utilizar materiales de alta resistencia. Este fenómeno conlleva una serie de inconvenientes como son el aumento de piezas rechazadas o incluso la imposibilidad de fabricar una pieza con un material determinado, lo que implica rediseñar o estudiar un cambio de material. Este tipo de fracturas no se pueden predecir mediante los criterios convencionales de fractura y ductilidad basados en los límites de deformación definidos por las Curvas Límite de Conformado (FLC, por sus siglas en inglés) o los parámetros obtenidos a partir de ensayos de tracción convencionales, por lo que son necesarias nuevas metodologías de caracterización avanzada.

En este sentido, la tenacidad de fractura ha destacado como la propiedad más adecuada para entender este tipo de fracturas relacionadas con la resistencia a la nucleación y propagación de grietas en chapa metálica de

alta resistencia. Esta propiedad se ha aplicado en diversas investigaciones y casos de estudio industriales para seleccionar los materiales más apropiados en conformado de chapa y clasificar su rendimiento a fractura e impacto.

Así, la evaluación de la tenacidad de fractura en chapas de alta resistencia se ha convertido en un parámetro clave para el sector metálico y de la automoción. No obstante, la evolución de la tenacidad de fractura de chapas metálicas es un tema complejo y no existen metodologías estándar de fácil aplicación, lo que dificulta el uso de esta propiedad en la industria, y el conocimiento sobre las propiedades de fractura de materiales delgados de alta resistencia es bastante limitado.

Las excelentes propiedades mecánicas de estos materiales los hace atractivos para extenderlos a otros componentes del vehículo como el chasis e incluso en otras plataformas como

FIGURA 1. Ejemplos de fracturas relacionadas con el agrietamiento en chapas de aluminio de alta resistencia.



camiones o autobuses. Sin embargo, estos componentes tienen que afrontar requerimientos fundamentalmente distintos a los de la carrocería, principalmente altas sollicitaciones mecánicas en términos de cargas cíclicas que

pueden comprometer la integridad del componente. De este modo, la resistencia a la fatiga se convierte en un factor clave para el diseño, sumado a los anteriores criterios de conformabilidad y resistencia a impacto.

García
Servicios y Suministros Industriales

“ SOMOS ACERO INOXIDABLE ”

YA DISPONIBLE EN NUESTRA TIENDA ONLINE
TUBO DE ACERO INOXIDABLE DE ALTO BRILLO

TODOPARALAINDUSTRIA.COM

FIGURA 2. Dispositivo para la preparación de entallas en muestras de chapa plana y detalle del punzón.

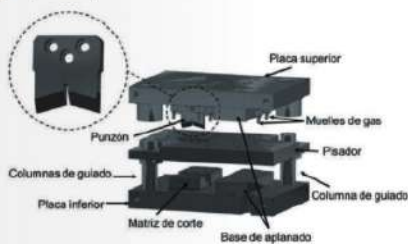
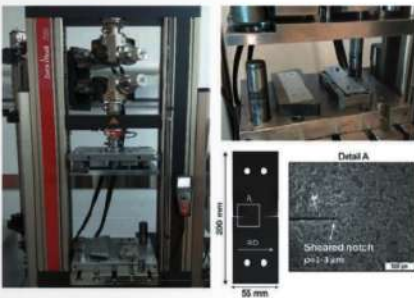


FIGURA 3. Montaje experimental del dispositivo en una máquina de ensayos universal y ejemplo de probeta tipo DENT obtenida mediante el proceso de corte.



El comportamiento a fatiga está gobernado por múltiples variables dadas en el componente fabricado como distintos materiales, procesos de conformado y/o acabados. Los métodos de caracterización actuales como las curvas SN hace que no sea económicamente viable caracterizar la influencia de estas variables debido a los largos tiempos de ensayo, desde semanas a meses. Así, disponer de un método económico que permita caracterizar rápidamente el comportamiento a fatiga de los materiales

con distintas condiciones resulta necesario.

Con el afán de promover el desarrollo de nuevos materiales ligeros de alto rendimiento y ayudar en la implementación de estos materiales en el sector de automóvil, el centro tecnológico Eurecat ha desarrollado y optimizado dos nuevas metodologías de caracterización avanzada para predecir el comportamiento durante el conformado y en servicio de chapas metálicas de alto rendimiento. Estas metodologías, desarrolladas en el marco del proyec-

to europeo Horizon 2020 FormPlanet, permiten obtener parámetros críticos de los materiales en poco tiempo, de forma eficaz y económica.

NUEVO PROCEDIMIENTO RÁPIDO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FRACTURA

Hay diferentes procedimientos normalizados de ensayo para caracterizar la tenacidad de fractura de materiales metálicos en el marco de la mecánica de fractura, como la norma ASTM E1820. Sin embargo, las chapas utilizadas normalmente en automoción, con un grosor entre 1 y 4 mm, no cumplen los requerimientos de espesor mínimos establecidos en esta, por lo que no puede ser directamente aplicada. Otros procedimientos estándar como el que se describe en la norma ASTM E2472 son aplicables. Sin embargo, estas metodologías son muy complejas y requieren equipo especializado. Estas características dificultan la implementación industrial de los ensayos de tenacidad de fractura como un procedimiento rutinario para la validación de este tipo de materiales.

Ensayos alternativos, como la metodología del Trabajo Esencia de Fractura (TEF), ofrecen una solución más simple para medir la tenacidad de fractura de chapas metálicas delgadas. El método del TEF se ha usado de forma generalizada para caracterizar la resistencia a la fractura de materiales laminares para aplicaciones ingenieriles poliméricas, aleaciones de aluminio, aceros, etc.

El método es fácil de utilizar ya que no requiere monitorizar el crecimiento de grieta durante el ensayo y el post-proceso de datos es simple. No obstante, la preparación de las probetas aún es un inconveniente ya que, tal y como se recomienda en los estándares de la mecánica de fractura, es necesario el uso de probetas con grietas preparadas mediante procesos de fatiga. Estos procesos de fatiga son caros y consumen mucho tiempo, por lo que la duración y el coste de los ensayos se incrementa de forma significativa.

Para solventar las dificultades del proceso experimental de la preparación de probetas para tenacidad de fractura, Eurecat ha desarrollado y patentado (nº de patente EP3567364A1) una herramienta innovadora para el entallado de probetas de chapa. Esta herramienta consiste en una matriz de corte modular, equipada con un punzón biselado (Figura 2 izquierda) diseñado para introducir entallas afiladas tipo grieta en probetas planas rectangulares. La geometría obtenida es una probeta rectangular doblemente entallada conocida como Double Edge Notch Tension (DENT) (Figura 3).

El nuevo procedimiento de entallado permite obtener un gran número de probetas en pocos minutos. Además, esta herramienta se puede acoplar a una máquina de ensayo universal y no requiere ningún otro equipo especial, lo que supone un gran ahorro de tiempo en la preparación de las probetas y representa una alternativa rápida y

económica a los procedimientos convencionales de generación de grietas por fatiga. En el proyecto FormPlanet, los resultados obtenidos con la nueva herramienta se han validado con éxito para una gran variedad de chapas de AHSS, aleaciones de aluminio y aceros inoxidables. El proceso ha demostrado ser robusto y fiable y permite preparar probetas fácilmente para la evaluación de la tenacidad de fractura.

Este nuevo procedimiento supone un claro progreso en la caracterización de la resistencia a la fractura de chapas metálicas delgadas y permitirá entender el uso de la tenacidad de fractura para mejorar la selección de nuevos materiales y optimizar el desarrollo de probetas de pocos minutos de alto rendimiento. Además, la nueva herramienta conviene al ensayo de la tenacidad de fractura en un método fácil y rápido, promoviendo su aplicación industrial y facilitando la implementación como ensayo de control rutinario.

ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Dijo de los puntos clave para promover la aplicación a nivel industrial de la metodología del TEF, así como del nuevo procedimiento de preparación de muestras, es la necesidad de disponer de un marco normativo de referencia o de un procedimiento normalizado de ensayo que asegure la repetitividad y la validez de los resultados. En este sentido, el proyecto FormPlanet también ha servido para elaborar un documento de referencia, el *CEN Workshop Agreement (CWA) 17793-2021: Test method for determination of the EWF of thin ductile metallic*, donde se describen en detalle las pautas a seguir para la evaluación del TEF en chapas metálicas delgadas, así como las limitaciones de la metodología y recomendaciones sobre la preparación de muestras. En este documento, elaborado en colaboración con los organismos de normalización



Soluciones de software para la optimización de la producción

Corte CAD/CAM
2D/3D/Tubos

Programación fuera de línea para robots

Plegado/Desplegado

Presupuestación

Gestión de la Producción

Industria 4.0



*Alma continúa su desarrollo en España.
¡Únete a nuestra red y construyamos juntos el futuro!*








www.almacam.es

DIN y UNE y empresas relevantes del sector del acero y del ensayo de materiales como ArcelorMittal, Letomec, srl o ZwickRoell, se recogen tanto los procedimientos tradicionales de preparación de muestra por fatiga como el nuevo procedimiento de entallado rápido. El CWA supone un primer paso hacia la estandarización de la metodología del TEF para evaluar la tenacidad de fractura de láminas metálicas y será de gran utilidad para incentivar la aplicación de estos ensayos en la industria.

MÉTODO RÁPIDO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA A FATIGA DE CHAPAS METÁLICAS

El comportamiento a fatiga convencionalmente se entiende como el número de ciclos que es capaz de aguantar un material sometido a una carga cíclica sin romperse. Este parámetro es de especial interés en el sector del automóvil debido a las sollicitaciones mecánicas de algunos elementos de los vehículos como los brazos de suspensión o llantas, entre otros. Estos componentes son diseñados para aguantar un alto número de ciclos sin romperse, ya que son piezas críticas que no pueden fallar durante su utilización. Así, la resistencia a la fatiga a alto número de ciclos ($10^4 - 10^7$) definida por las curvas SN o de Wöhler son ampliamente utilizadas para seleccionar el material más adecuado, así como para el diseño de los componentes.

Sin embargo, la obtención de estas curvas mediante los procedimientos estandarizados como la norma ASTM E466 consumen mucho tiempo y conllevan unos costes muy elevados. Mas aún si se requiere la determinación del límite de fatiga (σ_e) del material, donde un elevado número de probetas deben ensayarse alrededor de millones de ciclos. En este sentido, Eurecat ha desarrollado y patentado (EP20382742.3) un nuevo método de ensayo que permite determinar el límite de fatiga en unas pocas horas y solo empleando tres probetas. Gracias a la colaboración en el proyecto FormPlanet, el nuevo método llamado *stiffness*

FIGURA 4. Representación esquemática del procedimiento experimental para la determinación del límite de fatiga utilizando el nuevo método basado en la evolución de la rigidez de la probeta.

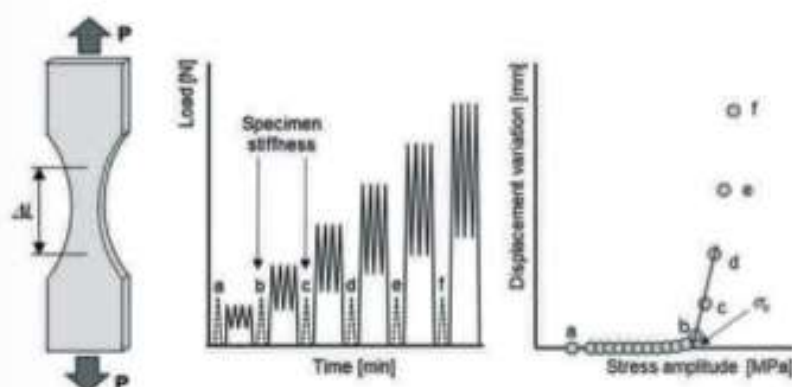
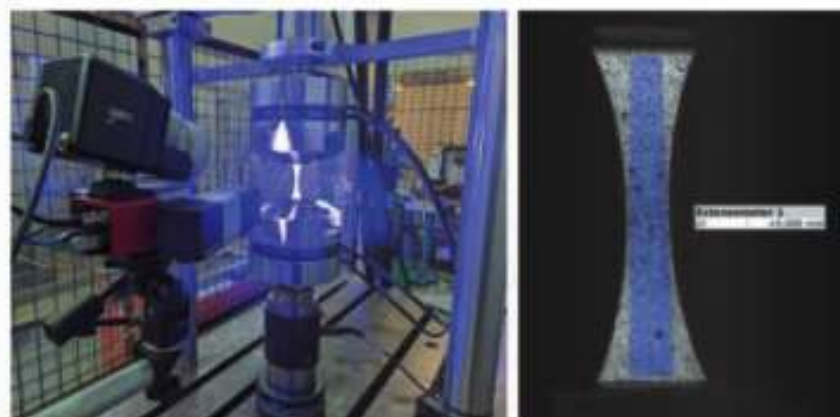


FIGURA 5. Ejemplo de ensayo con probeta de fatiga. La extensión de la muestra se mide a utilizando el sistema de cámaras y software DIC.



method se ha desarrollado considerando los requerimientos de las diferentes instituciones para ser aceptado y aplicado en distintos laboratorios.

El ensayo está basado en monitorear la evolución de la rigidez del material mientras se aplican cargas cíclicas que van incrementando en distintos bloques a lo largo del ensayo hasta la fractura total (Figura 4). Esta estrategia lo convierte en un método sea robusto y repetitivo que puedan utilizarse en equipos de fatiga convencionales equipados con extensómetros dinámicos. Como se observa en la Figura 5, en este caso se utiliza un sistema de cámaras (DIC) que permite medir las deformaciones y/o extensión (ΔL) de la probeta solicitada a una fuerza determinada. Además, el tratamiento de datos es sencillo facilitando la de-

terminación de la resistencia a fatiga sin complicaciones.

Este método ha sido desarrollado como una herramienta de soporte al equipo de diseño de componentes con la finalidad de poder plantear muchas condiciones de ensayo y obtener la resistencia a la fatiga para cada una de ellas de forma rápida. De esta forma, la selección y desarrollo de materiales se puede mejorar conociendo mucho mejor como afectan los parámetros de conformado de la pieza, tratamientos térmicos, procesos de acabado, de corte, etc. a la resistencia a la fatiga del componente final.