

Anales de Mecánica de la Fractura

TEXTO DE LAS COMUNICACIONES PRESENTADAS EN EL

**XXXIII ENCUENTRO DEL
GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA**

Número 33

San Sebastián

9, 10 y 11 de marzo de 2016

Anales de Mecánica de la Fractura

TEXTO DE LAS COMUNICACIONES PRESENTADAS EN EL
XXXIII ENCUENTRO DEL GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA

9, 10, 11 de marzo de 2016

San Sebastián

©ANALES DE MECÁNICA DE LA FRACTURA
Editado por la Secretaría del Grupo Español de Fractura

“Reservados todos los derechos para todos los países. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea electrónico o de cualquier otro, sin previa autorización escrita por parte de la Editorial”

I.S.S.N: 0213-3725
Fecha impresión: Marzo 2016

Este año el Encuentro del Grupo Español de Fractura regresa a San Sebastián donde ya fueron los Encuentros de los años 2000 y 1994.

Como novedad tendrá lugar una Mesa Redonda con agentes de la industria, potenciales clientes y usuarios de nuestros conocimientos. La idea que subyace es volver a acercar el mundo académico e investigador al mundo más aplicado e industrial de modo que ambas partes salgan beneficiadas.

Tendrán lugar tres sesiones especiales sobre “Ensayos Miniatura” en el mundo de la Mecánica de la Fractura, con la intención de publicar un número especial en la revista *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. La contribución española en el campo de los miniensayos es muy elevada y creemos que merece la pena que se reconozca nuestra experiencia en esta materia. Por supuesto, contamos con la contribución de los expertos internacionales más relevantes en esta temática, que actúan como conferenciantes invitados.

Una mención especial merece la designación de Donostia/San Sebastián como Capital Europea de la Cultura 2016, de la que este Encuentro debería ser un ejemplo paradigmático.

Por último, los organizadores queremos agradecer especialmente el esfuerzo de los conferenciantes invitados, los autores y ponentes, los patrocinadores institucionales e industriales, a los moderadores de las sesiones, a los revisores, miembros de los jurados de los premios, miembros de la Secretaría del Encuentro... y a todos los participantes por colaborar al éxito de este Encuentro, que confiamos en que sea memorable para todos.

¡Muchas gracias!

En San Sebastián, a 9 de marzo de 2016

M. Reyes Elizalde González
Antonio Martín Meizoso
José Manuel Martínez Esnaola
Ibon Ocaña Arizcorreta

Junta Directiva de la Sociedad Española de Integridad Estructural – Grupo Español de Fractura, SEIE – GEF

Presidente	Antonio Martín Meizoso
Vicepresidente 1º	Jesús Manuel Alegre Calderón
Vicepresidente 2º	Mª Lluisa Maspoch Rulduà
Vicepresidente 3º	Eugenio Giner Maravilla
Vicepresidente 4º	Cristina Rodríguez González
Vicepresidente 5º	Carlos Navarro Pintado
Secretario	David Angel Cendón Franco
Tesorero	Francisco Gálvez Díaz-Rubio

Comité Científico

Jesús Manuel Alegre Calderón
Sergio Cicero González
M. Reyes Elizalde González
Javier Gil Sevillano
Antonio Martín Meizoso
José Manuel Martínez Esnaola
Ibon Ocaña Arizcorreta
José María Rodríguez Ibabe

Comité Organizador

M. Reyes Elizalde González
Antonio Martín Meizoso
José Manuel Martínez Esnaola
Ibon Ocaña Arizcorreta

Secretaría Técnica

Itziar Cobo
Claudia Basabe

Organizado por

Sociedad Española de Integridad Estructural — Grupo Español de Fractura, SEIE — GEF Grupo DIMME — CEIT

Patrocinadores

INSTRON
Zwick/ Roell
SEM, RUMUL, MTS
ESIS

▪ CONFERENCIAS INVITADAS	15
Recent developments in small punch testing: tensile and fracture testing	17
M. Bruchhausen*, S. Holmström, I. Simonovski, T. Austin, S. Ripplinger, J.-M. Lapetite, F. de Haan	
Recent developments in small punch testing: applications at elevated temperatures.....	30
P. Dymáček	
Micromecanismos de fractura en los aceros: una herramienta para el diseño de nuevas composiciones y procesos industriales	39
J.M. Rodríguez Ibabe	
▪ APLICACIONES Y CASOS PRÁCTICOS	46
Análisis numérico del efecto de la protección de mandíbula y visor en un casco de combate ante cargas explosivas	48
J.A. Loya, M. Rodríguez-Millán, L.B Tan, K.M. Tse, H.P. Lee, M.H. Miguélez	
Análisis de fallo de engranaje.....	54
L.Mendia-Huarte. J. Gascó-Álvarez, G. Atxaga-Genbeltzu	
Mapas de riesgo y evaluación probabilística de fallo global: dos modos de interpretar la integridad estructural	59
M. Muñiz Calvente, A. Ramos, M.J. Lamela Rey, F. Pelayo, A. Fernández Canteli	
Comparative study of the fatigue strength of dental implant systems with preangled and straight connecting parts	65
J.M. Ayllón, J. Mitjavila, C. Navarro, J. Domínguez	
Análisis de rotura de eje	71
R. Rivera, A. Valencia, C. López, S. Clavo	
Modelado analítico del proceso de fisuración y fallo en flexión simple de secciones de hormigón armado.....	77
J. R. Carmona, G. Ruiz	
Análisis de la aparición de fisuras de origen térmico en estructuras masivas de hormigón utilizando un modelo de fisuración cohesiva con acoplamiento termo-mecánico	83
M.P. Zappitelli, E.I. Villa, J. Fernández-Sáez, C.G. Rocco	
▪ ENSAYOS MINIATURA	90
Propiedades mecánicas de las zonas afectadas por un corte láser, corte por plasma y oxicorte de una chapa de acero S460M de 15mm de espesor	92
J. Aldazabal, A. Martín-Meizoso, A. Bannister, S. Cicero, A. Klimpel	
Determination of the creep crack initiation properties using pre-cracked small punch tests.	98
J. M. Alegre, I.I. Cuesta, C. Rodríguez, F.J. Belzunce	
Análisis de diferentes metodologías para obtener las propiedades a fractura de materiales metálicos a partir del uso de probetas miniatura de punzonazo	104
J. M. Alegre, R. Lacalle, I.I. Cuesta, J.A. Álvarez	
Predicción de tiempos de rotura en condiciones de fluencia mediante el ensayo Small Punch en aleaciones de magnesio	110
D. Andrés, M. Lorenzo, R. Lacalle, J.A. Álvarez, J.M. Alegre	

Study of the energy for embrittlement damage initiation by SPT means. Estimation of Keac In aggressive environments and rate considerations	116
B. Arroyo, J.A. Álvarez, R. Lacalle	
El uso del ensayo miniatura de punzonado en la resolución de problemas prácticos en ingeniería	122
C. Rodríguez, M. Fernández, J. Cabezas, T.E. García, F.J. Belzunce	
Cambio de propiedades mecánicas de la aleación AM60 con tratamientos térmicos y su correlación con ensayos miniatura de punzonado (SPT)	128
P.M Bravo Díez, M. Preciado Calzada, D. Cárdenas Gonzalo	
Análisis numérico mediante el uso de modelos de daño dúctil del comportamiento hasta fractura en probetas miniatura de punzonado	134
I. I. Cuesta, E. Martínez-Pañeda, I. Peñuelas, J. M. Alegre	
Repetitive nano-impact tests as a new tool to measure fracture toughness in brittle materials	140
E. Frutos, J. L. González-Carrasco, T. Polcara	
Small punch test methodologies for the analysis of the hydrogen embrittlement of structural steels	147
T.E. García, B. Arroyo, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, J.A. Álvarez	
Resistencia y tenacidad de fibras estructurales para refuerzo de materiales compuestos ..	153
M. Herráez, A. Fernández, C. González, C. Lopes	
Métodos para determinar la tenacidad de fractura real en materiales frágiles nanoestructurados: el caso del wolframio	162
T. Palacios, J.Y. Pastor	
Propiedades micromecánicas del ligante metálico en composites WC-Co: Análisis estadístico de ensayos masivos de nanoindentación e influencia de la microestructura	168
J. J. Roa, E. Jiménez-Piqué, J.M.Tarragó, A.Mateo, J.Fair, L.Llanes	
Aplicación del ensayo SPT en la caracterización mecánica de materiales poliméricos	174
C. Rodríguez , I.I. Cuesta, M. LL. MasPOCH, F.J. Belzunce	
▪ FATIGA E INTERACCIÓN CON EL MEDIO AMBIENTE	181
Estudio de agrietamiento en el ensayo SSRT de probetas galvanizadas	183
G. Artola, J. Aldazabal	
A numerical analysis of the relation between CTOD and fatigue crack growth	188
D. Camas, F.V. Antunes, S.M. Rodrigues	
Análisis mediante simulación numérica del efecto de las trampas microestructurales en la concentración de hidrógeno en punta de grieta en aceros	194
A. Díaz, J. M. Alegre, I.I. Cuesta	
Influencia del contenido de fibra de acero en el comportamiento a fatiga del hormigón en compresión	200
E. Poveda, G. Ruiz, H. Cifuentes, R. C. Yu, X. X. Zhang	
Aplicación de un modelo probabilístico al comportamiento en fatiga por tracción y flexotracción de hormigones reforzados con fibras	206
José D. Ríos, Héctor Cifuentes, Rena C. Yu, Gonzalo Ruiz	
▪ FRACTURA DE ENTALLAS	213

Un procedimiento básico de evaluación de integridad estructural de componentes entallados	215
S. Cicero, V. Madrazo, T. García	
Análisis del efecto entalla en Poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio corta	221
F.T. Ibáñez, S. Cicero, I.A. Carrascal	
Loading rate effect on the Double-K parameters in fracture of concrete	227
G. Ruiz, J. J. Ortega, R. C. Yu, S. Xy, Y. Wu	
Reconstrucción en 3D mediante tomografía electrónica del fondo de micro-entallas generadas por ablación láser en circona dopada con itria	233
M. Turon-Vinas, J. Morillas, P. Moreno, M. Anglada	
▪ FRACTURA DE MATERIALES BIOLÓGICOS Y BIOMATERIALES	240
Mechanical characterization of a bone repair system using anisotropic and isotropic collagen sponges containing BMP2	242
I, Andreu, M. Flandes Iparraguirre, K. Stuckensen, J.M. Lamo de Espinosa, Vazquez de Sola, E. Muiños López, J. Nickel, R. Elizalde González, F. Prósper Cardoso, J. Groll, F. Granero Moltó	
Tenacidad de materiales de fosfato tricálcico con porosidad controlada	247
A. García-Prieto, J.C. Hornez, A. Leriche, P. Pena, C. Baudín	
Estimación de propiedades elásticas y resistentes de la línea cementante en tejido óseo cortical a partir de ensayos experimentales y modelos de elementos finitos.....	251
R. Belda, C. Arango, C. Tudela, E. Giner	
Efecto de la deformación sobre los parámetros microestructurales de membranas de fibras colágeno	257
Jean-Yves Bourges, Francisco J. Rojo, Adriana L. Torres, Gustavo V. Guinea	
Integridad estructural de pericardio bovino para fabricación de válvulas cardíacas	263
A.L. Torres, G.R. Plaza, F.J. Rojo, B. Mendoza-Novelo, J.Y. Bourges, G.V. Guinea	
▪ FRACTURA DE MATERIALES CERÁMICOS	270
Obtención de la función de ablandamiento de un mortero de cemento reforzados con fibras de vidrio (GRC) mediante análisis inverso	272
A. Enfedaque, M. G. Alberti, J. C. Gálvez, J. Domingo	
Simulación numérica de hormigones reforzados con fibras de poliolefina	278
M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez	
Influencia de la orientación de defectos superficiales en la caracterización a fractura de vidrio estructural.....	283
A. Ramos, M. Muñoz-Calvente, F. Pelayo, M.J. Lamela, A. Fernández-Canteli	
Caracterización dinámica del hormigón a alta velocidad de deformación.....	289
V. Rey-de-Pedraza, D. A. Cendón, V. Sánchez-Gálvez, F. Gálvez	
▪ FRACTURA DE MATERIALES METÁLICOS	296
Effect of the Loading Rate and Stress State on the Ductile Fracture Initiation of the Dual Phase 980 Advanced High Strength Steel.....	298
Borja Erice, Christian Roth, Dirk Mohr	
Diagramas momento-rotación de ligamentos resistentes de zona afectada térmicamente	

en soldaduras reparadas de estructuras de acero.....	304
M. Iordachescu, A. Valiente, R. Moreno Pérez	
Corrosión bajo tensión en agua de mar de barras de acero de alta resistencia con estructura perlítica no orientada	310
M. Pérez Guerrero, M. Iordachescu , A. Valiente, M. Elices	
Rate and temperature dependent plasticity and failure of AA7017-T73: experiments and modelling.....	316
M.J. Pérez-Martín, B. Erice, F. Gálvez	
▪ FRACTURA DE MATERIALES POLIMÉRICOS Y COMPOSITES	323
Influencia del tiempo de exposición a altas temperaturas en el comportamiento en fractura de hormigones autocompactantes reforzados con fibras.....	325
H. Cifuentes, J.D. Rios, C. Leiva, F. Medina	
Influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico uniaxial de polipropilenos microespumados.....	331
M. Crespo, T. Gómez del Río, J. Rodríguez, D. Arencón, A. Martínez	
Análisis morfológico y del comportamiento a fractura de polipropileno espumado.....	337
J. Gómez-Monterde, M. Schulte, M. Sánchez-Soto, O. O. Santana, M. Ll. MasPOCH	
Fractura de bioblends PLA/ABS preparadas por moldeo por inyección.....	343
O. O. Santana, D. Costas, J. Cailloux, M. Sánchez-Soto, F. Carrasco, M. Ll. MasPOCH	
Ensayos de fractura interlaminar en modo II en laminados composites angulares.....	349
A. Arrese, J. De Gracia, A. Boyano, F. Mujika	
Efecto de la relación de esfuerzos en el crecimiento de grietas por fatiga del PETG	355
A. Salazar, Alberto J. Cano, J. Rodríguez	
Greenstick fractures in composite pultruded rods	361
G. Vargas, F. Mujika	
▪ MÉTODOS Y MODELOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS	368
Atomistic simulation of the response to axial elongation of a <110> columnar nanostructure of iron with a nano-sized penny-shaped transverse crack.....	370
A. Luque, J. Aldazabal, I. Aldazabal, J. Gil Sevillano	
Determinación numérica del Módulo de Compresibilidad en Nanoestructuras de Carbono mediante el BBM.....	375
J. Aranda-Ruiz, M. Braun, J.A. Loya	
Transporte electrónico a través de bordes de grano en grafeno.....	381
F. Arca, J. P. Mendez , M. P. Ariza	
Estudio de la propagación de grietas por fatiga mediante el método extendido de los elementos finitos (XFEM)	386
A. Bergara, J.I. Dorado, A. Martín-Meizoso, J.M. Martínez-Esnaola	
Propagation: Software para deducción analítica de curvas de crecimiento de grieta y del campo S-N en propagación.....	393
S. Blasón, A. Fernández-Canteli, C. Rodríguez	
Propagación de fisuras tipo esquina en placas con un taladro sometidas a carga cíclica de tracción.....	399
B. González, J.C. Matos, J. Toribio	

Metodología numérica para determinar la vida en fenómenos de desgaste y fatiga por fretting	405
I. Llavori, M.A. Urchegui, W. Tato, X. Gomez	
FE estimation of the stress intensity factor in tubular T-joint cracks for offshore wind turbine support structures	411
E. Lozano-Minguez, E. Giner-Maravilla, F.P. Brennan	
Efecto plástico de escala: modelización numérica y caracterización del daño.....	417
E. Martínez-Pañeda	
Papel de las tensiones residuales en el crecimiento de fisuras por fatiga en alambres de acero de pretensado	423
JC. Matos, B. González, J. Escuadra, J. Toribio	
Dynamic fracture in HSC under impact load: a numerical study via meshfree approximation schemes	429
Pedro Navas, Bo Li, Rena C. Yu	
Extensión del modelo de Gurson para materiales con sensibilidad a la velocidad de deformación	435
J. Reboul, G. Vadillo	
Estudio de la propagación de una fisura semielíptica contenida en un eje sometido a flexión rotatoria cuasiestática.....	441
P. Rubio, L. Rubio, B. Muñoz-Abella	
Cálculo de la velocidad de propagación de fisura en aceros de alta resistencia debido a fragilización por Hidrógeno: influencia de las trampas de hidrógeno	447
J. Sanchez, A. Ridruejo, J. Alonso, E. Muñoz, C. Andrade, J. Fullea, P. de Andres	
Modelo del comportamiento mecánico de materiales con cambios microestructurales	453
R.Sancho, D. Cendón, F.Gálvez	
Un modelo micromecánico del comportamiento en fatiga de una superaleación de base Niquel.....	459
J. Segurado, J. LLorca, A. Cruzado, S. Lucarini	
Numerical analysis of crack direction in case of crack kinking in standard compact tension and double cantilever beam specimens with inclusion of constraint	465
S. Seitzl, R. F. Diego Liedo, A. Fernández-Canteli	
Análisis del método de borino para formulaciones no locales en modelos de elementos finitos	473
F. Suárez Guerra	
Modelo de Interfase Elástica Lineal - Frágil (MIELF) aplicado a problemas tridimensionales con crecimiento de grietas en modo mixto	479
L. Távora, J. Reinoso, A. Estefani, A. Blázquez, Vladislav Mantic, Federico Paris	
Numerical modelling on the pullout response of a steel fibre inclined at an arbitrary angle...485	
Rena C. Yu, Hui Zhang, Gonzalo Ruiz, Shilang Xu	
▪ SEGURIDAD Y DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS	492
Efecto de las condiciones de contacto vaina-hormigón en la fractura por efecto multicordón en tanques postensados de gran curvatura	494
F. Medina Reguera, H. Cifuentes Bulté, F. Medina Encina	
Ensayos para determinar las propiedades mecánicas del óxido en corrosión acelerada de	

hormigón armado.....	500
B. Sanz, J. Planas, J.M. Sancho	
Damage behaviour of reinforced concrete plates under impact loadings.....	506
D. Schmitt, M.L. Ruiz-Ripoll, O. Millon, A. Stolz, K. Thoma	
▪ TÉCNICAS EXPERIMENTALES	513
Effect of Loading Rate on the Fracture Behaviour of Three Different Steel-Fiber Reinforced Concretes	515
X.X. Zhang, G. Ruiz, M. Tarifa, W.H. Alhazmi, D. Cendón, F. Gálvez	
Advanced mechanical characterization of lime mortars	521
L.Garijo, X. X. Zhang, G. Ruiz	
Comparación de patrones de daño por tomografía computerizada en hormigón reforzado con fibras sometido a cargas monótonas y cíclicas	527
M. A. Vicente, G. Ruiz, D. C. Gonzalez, J. Mínguez, M. Tarifa, X. X. Zhang	
Metodología para la cuantificación experimental del tamaño y la forma de la zona plástica..	533
J.M. Vasco-Olmo, F.A. Díaz, M.N. James, C.J. Christopher, E.A. Patterson	
▪ MINIPRESENTACIONES	541
Reparaciones de fisuras superficiales con parches de material compuesto	543
I. Ivañez y M. Braun	
Comportamiento cíclico de un acero St-52-3N: Influencia de los módulos de elasticidad en las estimaciones de vida a fatiga	549
M. López-Prieto, B. Moreno, J. Zapatero, P. López-Crespo	
El efecto de la tensión media de cortadura en la resistencia a fatiga torsional de un acero 34CrNiMo6	555
L. Pallarés-Santasmartas, J. Merzeau, J. Albizuri, R. Avilés, N. Saintier	
Empleo del ensayo de fatiga para estimar el deterioro por corrosión bajo tensión en un acero pretensado	561
L. Rodríguez Duro, M. A. Morales Hortelano, F. J. Sainz de Cueto Torres	
Predicción de las cargas de rotura de probetas entalladas de resinas epoxi mediante modelos cohesivos	567
M. A. Garrido, A. Serrano, A. Salazar, J. Gómez, J. Rodríguez	
Shape and compliance functions determination of quasi-brittle test specimens	572
J. Sobek, V. Veselý	
▪ ÍNDICE DE AUTORES	577

PREDICCIÓN DE TIEMPOS DE ROTURA EN CONDICIONES DE FLUENCIA MEDIANTE EL ENSAYO SMALL PUNCH EN ALEACIONES DE MAGNESIO

D. Andrés^{1*}, M. Lorenzo², R. Lacalle¹, J.A. Álvarez¹, J.M. Alegre³

¹Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales (Universidad de Cantabria)
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Avda. De los Castros, 39005, Santander

²Departamento de Ingeniería Electromecánica (Universidad de Burgos)

³Departamento de Ingeniería Civil (Universidad de Burgos)
Escuela Politécnica Superior, Avda. Cantabria, 09006, Burgos

* E-mail: andresd@unican.es

RESUMEN

El ensayo Small Punch (SP) en condiciones de fluencia, introducido por primera vez por Parker en 1993, ha estado en continuo desarrollo desde sus orígenes. Actualmente, su uso se encuentra extendido en la industria nuclear y aeroespacial, empleándose principalmente en la caracterización de aceros. Debido a su potencial, especialmente por el reducido tamaño de las probetas y tiempos de ensayo inferiores a los convencionales, se ha planteado su aplicación en aleaciones ligeras. Estas cuentan con una utilización creciente en diversos sectores, puesto que contribuyen a reducir el peso de los componentes. En este trabajo se ha analizado la aleación de magnesio AZ31 entre 398 K y 523 K. Se han establecido equivalencias entre los ensayos convencionales y SP mediante la comparación del tiempo de rotura, así como de los parámetros de Larson-Miller (LM) y Orr-Sherby-Dorn (OSD). Por otro lado, se han obtenido los parámetros LM y OSD a partir de los resultados obtenidos mediante ensayos SP (transformados en sus equivalentes uniaxiales) y se han comparado con los ensayos convencionales, confirmando el potencial de esta técnica de ensayo y su adecuación para la extrapolación de tiempos de rotura en condiciones de fluencia.

PALABRAS CLAVE: *Small Punch*, Fluencia, Técnicas de extrapolación, Aleaciones de magnesio

ABSTRACT

The Small Punch Creep (SPC) test, first introduced by Parker in 1993, has been in continuous development ever since. Currently, it has a widespread utilisation in the nuclear and aerospace industry, being mainly applied to steel characterisation. Thanks to its potential, especially for the reduced size of the samples and shorter testing times than the conventional tests, its application in light alloys has been proposed. The use of light alloys in several sectors is growing continuously, since they contribute to reduce the weight of components. In this work, the behaviour of the magnesium alloy AZ31 has been analysed at temperatures between 398 K and 523 K. A relationship between conventional and SPC tests has been established, by comparing time to rupture, as well as the Larson-Miller (LM) and Orr-Sherby-Dorn (OSD) parameters. On the other hand, the LM and OSD parameters have been obtained from the results of the SPC tests (turned into their equivalent uniaxial values) and they have been compared to the ones derived from the conventional tests, confirming the potential of this testing technique and its accuracy for the extrapolation of times to rupture in creep conditions.

KEYWORDS: Small Punch, Creep, Extrapolation techniques, Magnesium alloys

1. INTRODUCCIÓN

El número de aplicaciones de las aleaciones ligeras, caracterizadas por su reducida densidad y resistencia específica, se encuentra actualmente en continuo crecimiento. Esto se debe a la búsqueda de componentes cada vez más ligeros para conseguir una mayor eficiencia, y así reducir el consumo energético. En consecuencia, este tipo de materiales está desplazando a

otros materiales tradicionales, como el acero, en industrias tales como las asociadas al transporte.

Entre el conjunto de las aleaciones ligeras destacan las aleaciones de magnesio, cuatro veces menos densas que el acero y con una gran resistencia específica [1]. Entre ellas, la aleación AZ31B es la más utilizada para la obtención de placas y chapas en aplicaciones a temperatura ambiente y ligeramente elevadas, con un

gran uso en la industria automovilística [1]. Esta aleación, al igual que el resto de aleaciones ligeras, presenta un punto de fusión relativamente bajo, en torno a 600° C. Por ello, resulta vital conocer el comportamiento de este tipo de materiales en condiciones de altas temperaturas relativas de trabajo, ya que se ven afectados por fenómenos como la fluencia.

En este trabajo se plantea la caracterización de la aleación AZ31 mediante el ensayo *Small Punch* en condiciones de fluencia. Esta técnica alternativa de ensayo, desarrollada en la década de los 90 [2], permite caracterizar componentes reales empleando un volumen muy reducido de material. Por ello, permite analizar localizaciones concretas de los componentes, independientemente de la geometría que estos presenten, al contrario que otras metodologías convencionales mediante las cuales sería prácticamente imposible.

Para caracterizar la aleación AZ31 en condiciones de fluencia se han realizado ensayos convencionales y *Small Punch* a varias temperaturas, entre 125° y 250° C, a varios niveles tensionales. Los resultados experimentales han sido empleados para obtener una equivalencia entre ambas técnicas comparando los tiempos de rotura, así como los parámetros de extrapolación habituales (Larson-Miller y Orr-Sherby-Dorn). También se han obtenido las curvas de diseño en fluencia a partir de los ensayos *Small Punch* convertidos en sus equivalentes uniaxiales, confirmando la adecuación del método para tales fines.

2. PROGRAMAS EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material elegido ha sido la aleación de magnesio AZ31B, en forma de chapa laminada, cuya composición se muestra en la tabla 1. Se ha ensayado el mismo material en dos formas diferentes, siendo chapa de espesor 1 mm. en el caso de las temperaturas entre 398 K y 448 K, y de 20 mm. en el resto.

Tabla 1. Composición de la aleación AZ31B en porcentaje en peso.

Composición química						
Al	Zn	Mn	Cu	Fe	Ni	Mg
3.1	1.05	0.54	0.0008	0.0035	0.0007	Bal.

Para la caracterización a *creep* uniaxial (UAC), se han mecanizado dos tipos de probetas de tracción convencionales, de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM E139-11 [3], cilíndricas de diámetro 6 mm y planas de 1 mm de espesor y 6 mm de ancho. Se han ensayado varias direcciones: dirección de laminación, a 45° y perpendicular a la misma.

En cuanto a las probetas *Small Punch*, se han empleado probetas de dimensiones 10 x 10 mm, de acuerdo al Código Europeo de Buenas Prácticas (CoP) [4] y a otros trabajos previos [5]. Se han extraído probetas de las chapas de 1mm de espesor mediante la técnica de corte por chorro de agua. Por su parte para las de 20 mm de espesor se han extraído piezas de 0.5 mm de espesor mediante corte refrigerado en una cortadora de precisión. Tras ello, se ha llegado al espesor deseado de 0.5 ± 0.005 mm mediante el pulido de las probetas, de acuerdo al CoP [4].

2.2. Dispositivos experimentales

Los ensayos convencionales en condiciones de fluencia (UAC) han sido desarrollados de acuerdo a las recomendaciones de ASTM E139-11 [3]. Los ensayos han sido realizados en dos laboratorios diferentes: UBU (temperaturas entre 398 K-448 K) y UC (473 K y 523 K). En ambos casos se han empleado dispositivos experimentales como los del esquema de la figura 1.

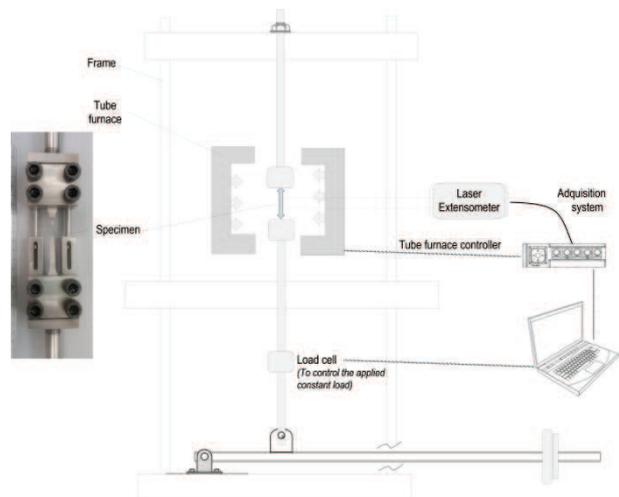


Figura 1. Esquema del utillaje UAC empleado [6].

Por otro lado, los ensayos *Small Punch Creep* (SPC) se han realizado de acuerdo a las recomendaciones del CoP [4]. Los ensayos han sido realizados de manera análoga a los UAC en los laboratorios de UBU y UC. Un esquema similar a los dispositivos empleados puede verse en la figura 2.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3, donde se pueden apreciar las diferentes isoterms obtenidas para cada tipo de ensayo. Se aprecia cierta dispersión en los resultados obtenidos, posiblemente debido a heterogeneidades del material y a la dispersión propia de la fluencia, así como cierto paralelismo entre las isoterms obtenidas para cada tipo de ensayo.

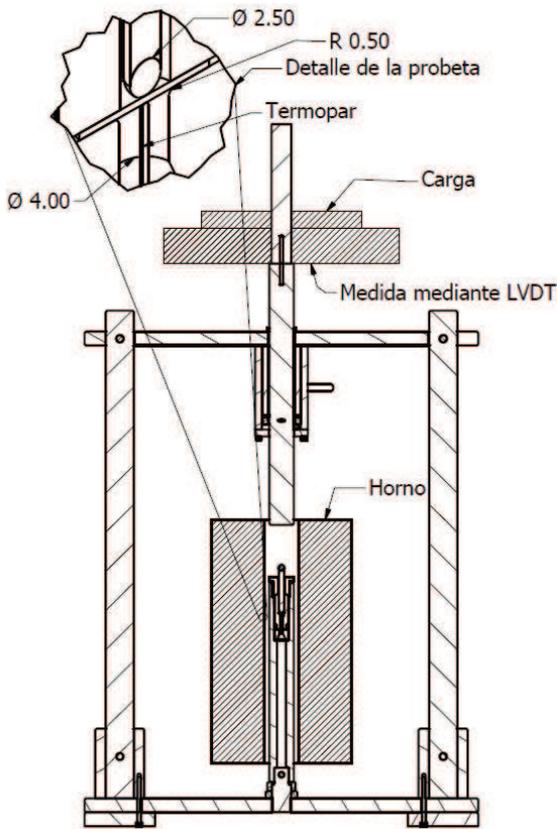


Figura 2. Esquema del utillaje Small Punch empleado.

Tal como se puede ver en la figura 4, la aleación AZ31 tiene un comportamiento de tipo dúctil en las condiciones ensayadas. Esto es visible en la gran estricción que presentan las probetas, así como en las grandes deformaciones alcanzadas. En el caso de la probeta SPC, la rotura dúctil tiene forma circular, indicando una gran ductilidad del material [5].

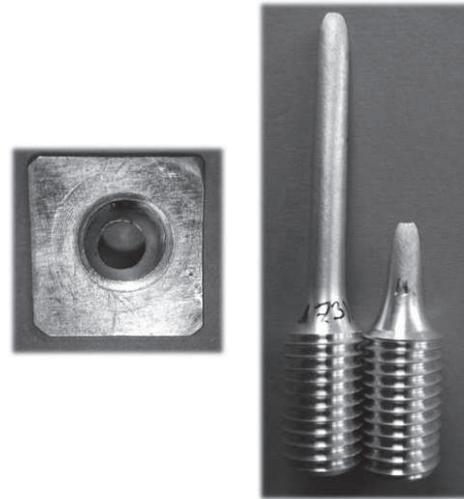


Figura 4. Fractografía de una probeta SPC y de una probeta UAC.

4. RELACIÓN ENTRE UAC Y SPC

Uno de los principales retos de la técnica *Small Punch Creep* es su correlación con los ensayos convencionales de fluencia. En este trabajo se han obtenido relaciones entre ambas metodologías mediante la comparación de (i) tiempos de rotura, (ii) el parámetro de Larson-Miller y (iii) el parámetro de Orr-Sherby-Dorn.

4.1. Comparación de tiempos de rotura

De acuerdo al CoP [4], para obtener una relación entre los ensayos UAC y SPC deben compararse ensayos que hayan sido realizados a la misma temperatura y compartan el mismo tiempo de rotura. A la hora de obtener esta relación surge el reto de obtener dos ensayos con un mismo tiempo de rotura. Dada la dificultad

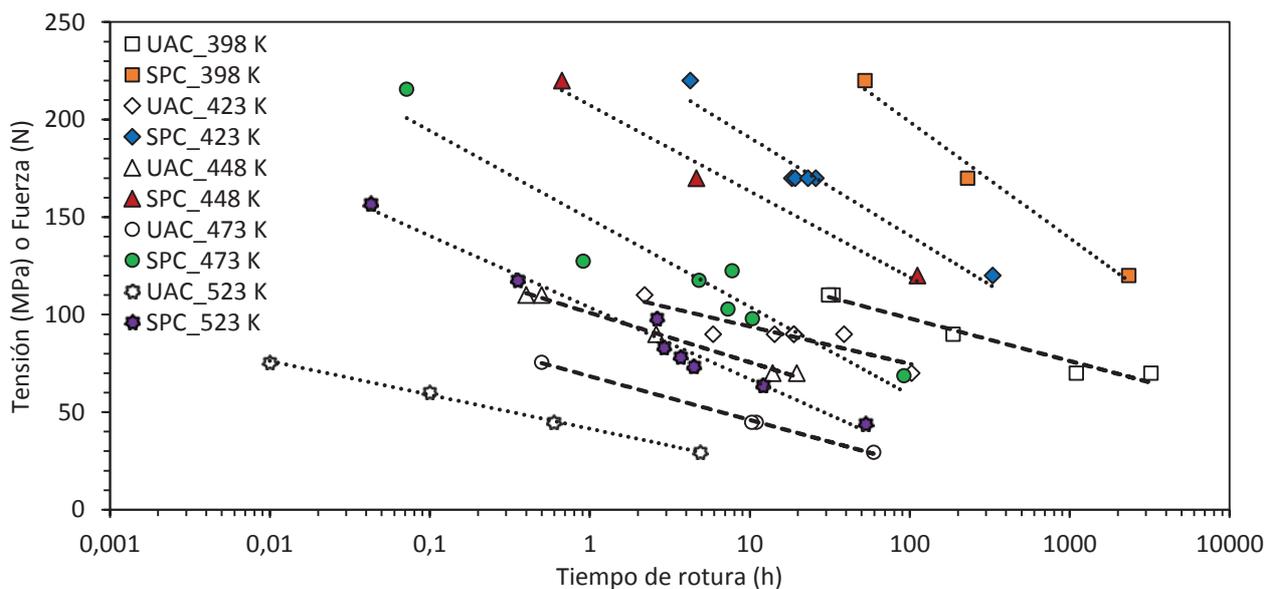


Figura 3. Resultados obtenidos en los ensayos de fluencia, tanto convencionales como Small Punch.

práctica de esta tarea, se ha optado por estimar la carga de los ensayos SPC correspondiente a los tiempos de rotura de los ensayos UAC mediante un ajuste de tipo lineal, obtenido mediante regresión lineal para cada temperatura.

En este trabajo se ha obtenido la relación UAC-SPC, obteniendo los resultados que se observan en la figura 5. De acuerdo al CoP [4], el factor de correlación k_{SP} para este material es de 1.1, similar al propuesto por otros autores, como por ejemplo, 1.2 para el acero P91 [7].

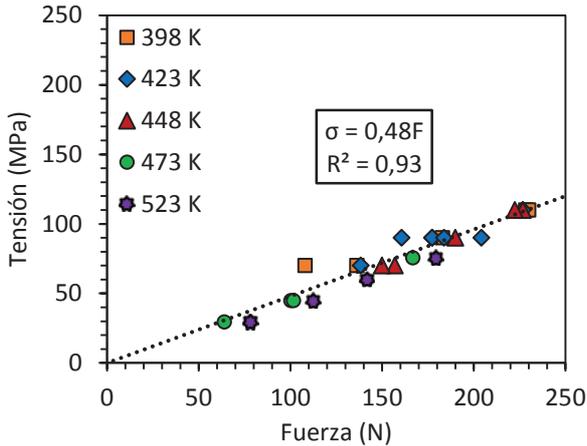


Figura 5. Comparación de ensayos SPC y UAC que comparten la misma temperatura y tiempo de rotura.

4.2. Comparación del parámetro de Larson-Miller

De manera análoga a la sección anterior, en este caso se ha obtenido una relación entre los ensayos UAC y SPC mediante la comparación de ensayos que compartan un mismo parámetro de LM [8,9]. Para ello, en primer lugar se han obtenido las curvas de LM a partir de los resultados de los ensayos, mediante un ajuste de tipo

lineal de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2), derivadas a partir de la ecuación (3) (se ha asumido un ajuste lineal del parámetro LM en función de la fuerza o tensión aplicada), tal como se muestra en la figura 6.

$$\log(t_r) = -a_1 + (a_2 + a_3\sigma)/T \quad (1)$$

$$\log(t_r) = -a_1 + (a_4 + a_5F)/T \quad (2)$$

$$LM = T(\log t_r + a_1) \quad (3)$$

En las ecuaciones (1),(2) y (3), t_r es el tiempo de rotura en horas, a_i son constantes determinadas mediante regresión lineal, F es la fuerza aplicada en los ensayos SPC en N, σ es la tensión aplicada en los ensayos UAC en MPa y T es la temperatura en Kelvin.

Hay que señalar que se ha usado la constante a_1 obtenida a partir de los ensayos UAC en el ajuste de los ensayos SPC, una vez demostrada su escasa influencia en el ajuste de los resultados. La adopción de este valor permite garantizar la obtención de valores de LM similares para ambas metodologías de ensayo, permitiendo evitar así la extrapolación de resultados para poder luego realizar la comparación. Fruto de dicha comparación se ha obtenido la relación que se muestra en la figura 7, coincidente con la obtenida mediante la comparación de los tiempos de rotura y garantizando la adecuación de ambos métodos para obtener la relación entre ensayos UAC y SPC.

4.3. Comparación del parámetro de Orr-Sherby-Dorn

Mediante la comparación del parámetro de Orr-Sherby-Dorn, formulado de acuerdo a la ecuación (4), también se puede obtener la relación entre los ensayos UAC y SPC. Para ello, se ha actuado de manera similar a lo explicado en la sección 4.2 para el caso de LM, basándose en este caso en las ecuaciones (5) y (6), donde b_i son obtenidos

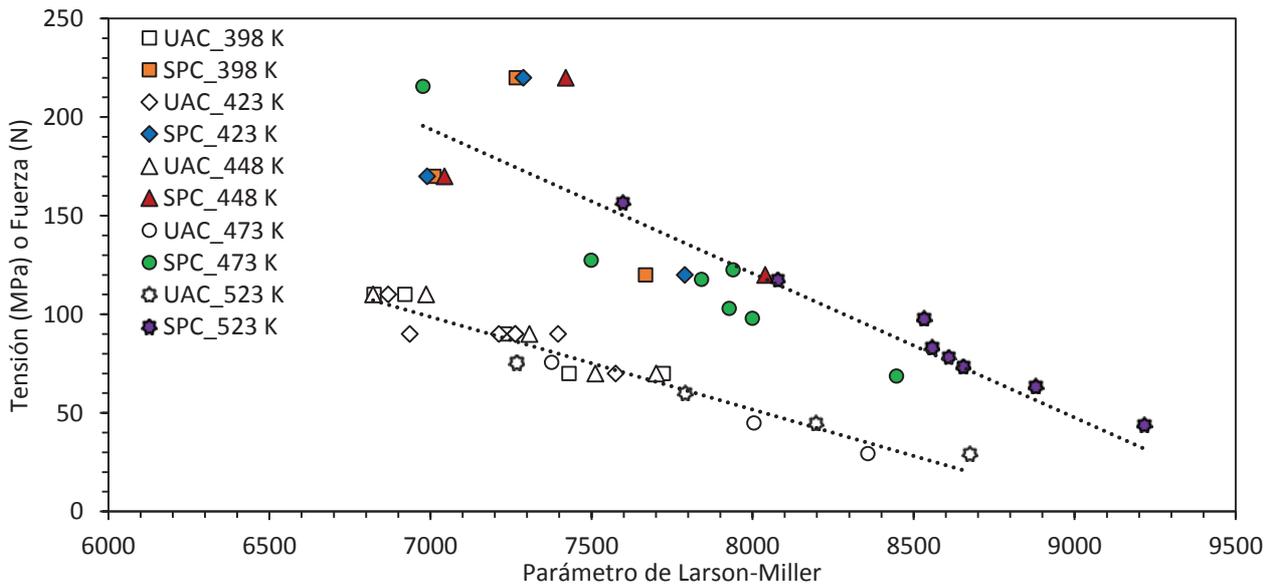


Figura 6. Curvas de Larson-Miller obtenidas para los ensayos UAC y SPC.

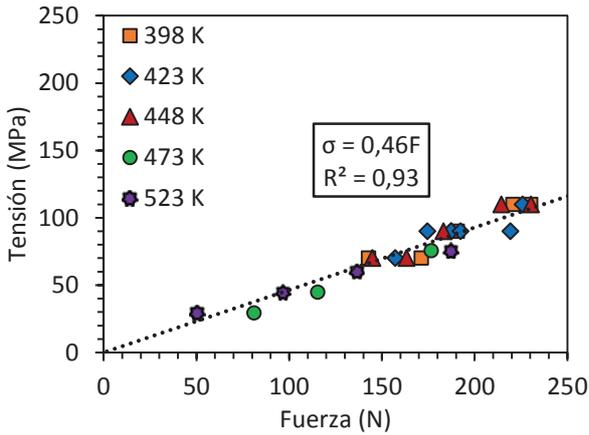


Figura 7. Relación entre UAC y SPC obtenida mediante la comparación del parámetro de Larson-Miller.

mediante regresión lineal. En la figura 8 se muestran las curvas obtenidas a partir de los ensayos UAC y SPC. Fruto de su comparación, se obtiene la relación que se muestra en la figura 9, coincidente con la obtenida en las secciones anteriores.

$$OSD = \log(t_r) - b_1/T \quad (4)$$

$$\log(t_r) = b_2 + b_3\sigma + b_1/T \quad (5)$$

$$\log(t_r) = b_2 + b_3F + b_1/T \quad (6)$$

5. CURVAS DE DISEÑO EN CREEP

Una vez obtenida la relación entre los ensayos UAC y SPC para la aleación AZ31 en las condiciones de ensayo ($\sigma = 0.47F$), se plantea la utilización de los ensayos SPC convertidos en sus equivalentes uniaxiales para la

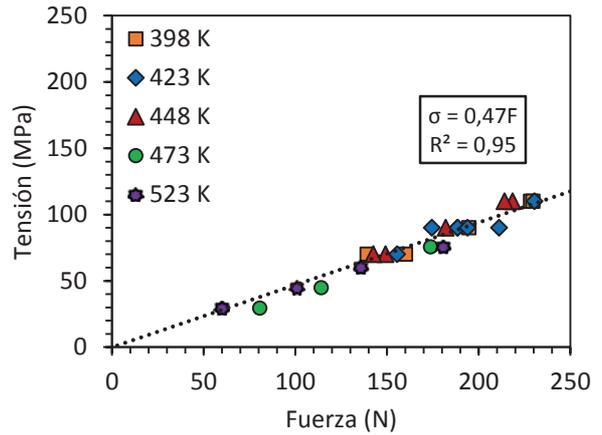


Figura 9. Relación entre UAC y SPC obtenida mediante la comparación del parámetro de Orr-Sherby-Dorn.

obtención de las curvas de diseño de LM y OSD, habitualmente empleadas en ingeniería. Estos parámetros permiten la extrapolación de los resultados obtenidos en laboratorio, generalmente con tiempo de rotura inferiores a 1,000 horas, a las condiciones reales de los componentes, con vidas útiles superiores a las 100,000 horas y temperaturas de trabajo que no suelen coincidir con las de los ensayos [10].

De acuerdo a lo planteado previamente, se ha obtenido la curva de diseño de Larson-Miller mediante regresión lineal empleando una expresión como la ecuación (1), consiguiendo los parámetros de la tabla 2.

Por otro lado, se ha obtenido la curva de diseño de Orr-Sherby-Dorn a partir de los resultados obtenidos en los ensayos UAC, convertidos en sus equivalentes uniaxiales. Para ello, mediante regresión lineal, y de acuerdo a la ecuación (6), se han obtenido los parámetros

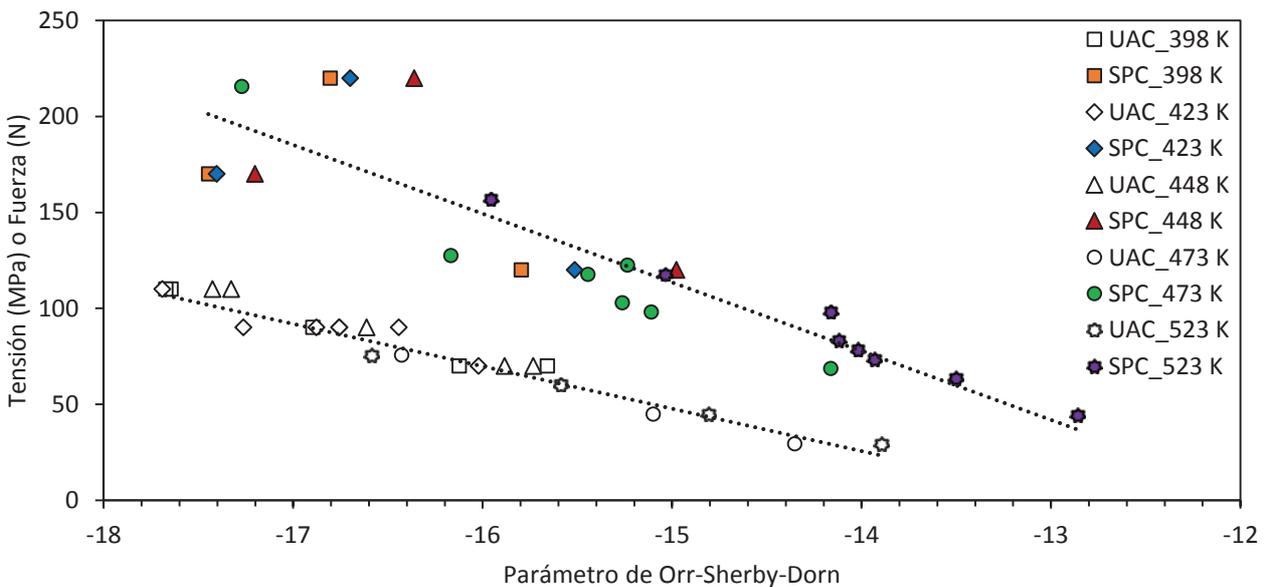


Figura 8. Curvas de Orr-Sherby-Dorn obtenidas para los ensayos UAC y SPC.

Tabla 2. Parámetros obtenidos para el ajuste de LM.

Parámetro	a_1	a_2	a_3
Valor	15.9	9175.2	-23.4

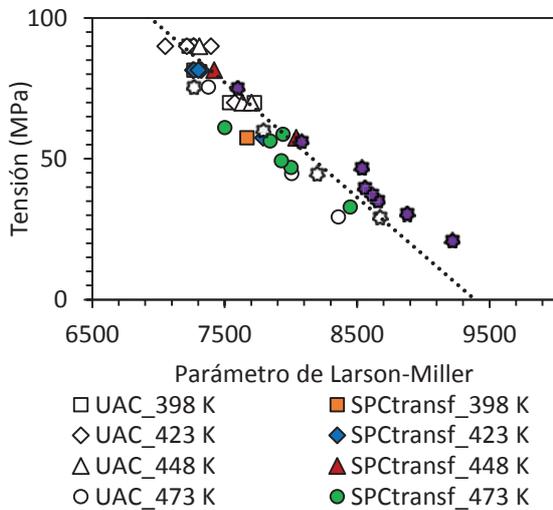


Figura 10. Comparación entre curvas de LM.

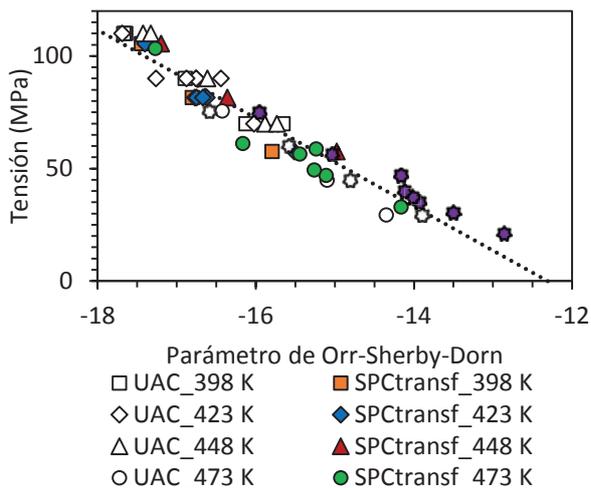


Figura 11. Comparación entre la curvas de OSD.

que se muestran en la tabla 3. Se ha representado la curva obtenida en la figura 11, donde ha sido superpuesta con la obtenida directamente de los ensayos UAC. Tal como se esperaba, ambas curvas coinciden, confirmando la adecuación del método para la extrapolación de resultados.

Tabla 3. Parámetros obtenidos para el ajuste de OSD.

Parámetro	b_1	b_2	b_3
Valor	-12.3	-0.05	7,629

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha validado el empleo del ensayo SPC en la caracterización de las propiedades de fluencia en

una aleación ligera de amplia utilización. Se han realizado ensayos UAC en varias direcciones diferentes a la de laminación sin encontrarse diferencias relevantes en su comportamiento [11]. Se ha obtenido una relación empírica entre ensayos convencionales y alternativos mediante la comparación de tres parámetros diferentes: (i) tiempo de rotura, (ii) parámetro de Larson-Miller y (iii) parámetro de Orr-Sherby-Dorn. Los tres métodos propuestos han conducido a la misma relación, confirmando la adecuación de los mismos.

Gracias a dicha relación ha sido posible obtener la tensión uniaxial equivalente a partir de la carga empleada en el ensayo SPC. Los ensayos SPC han sido empleados para obtener curvas de diseño en fluencia (LM y OSD), coincidentes con las obtenidas directamente de los ensayos UAC. En consecuencia, el método ha sido validado para la extrapolación de los resultados SPC a situaciones de componentes reales en las condiciones analizadas, confirmando el potencial de esta técnica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al MINECO la financiación recibida de los proyectos MAT2011-28796-C03-01 y MAT2011-28796-C03-02.

REFERENCIAS

- [1] Gil, F.J., et al., Aleaciones ligeras, Edicions UPC, Barcelona, 2001.
- [2] Parker, J.D., James, J.D., Disc-Bend Creep Deformation Behaviour of 0.5Cr0.5Mo0.25V Low Alloy Steel, *CFEMS*, 651-660, 1993.
- [3] ASTM E139-11, Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials, ASTM International, 2006.
- [4] CWA 15627:2008, Small Punch Test Method for Metallic Materials, European committee for Standardization 2008.
- [5] Lacalle, R., Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos *Small Punch*, PhD. Thesis, Univ. de Cantabria, 2012.
- [6] Lorenzo, M., Evaluación y aplicación del ensayo de fluencia miniatura de punzonado (SPCT) para la determinación de las propiedades a *creep* en la aleación de magnesio AZ31, PhD. Thesis, Univ. De Burgos, 2015.
- [7] Hurst, R., Matocha, K., Experiences with the European Code of Practice for Small Punch Testing for Creep, Tensile and Fracture Behaviour, *SSTT 2014*, 1-26, 2014.
- [8] Komazai, S., et al., Development of small punch tests for creep property measurement of tungsten-alloyed 9% ferritic steels, *JTE*, **28**, 249-256, 2000.
- [9] Dobeš, F., Milicka, K., Application of creep small punch testing in assessment of creep lifetime, *Materials Science and Engineering A*, **510-511**, 440-443, 2009.
- [10] Viswanathan, R., Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components, ASM International, Ohio, 1989.
- [11] Lorenzo, M., Cuesta, I.I., Alegre, J.M., The relationship between the Uniaxial Creep Test and the Small Punch Creep Test of the AZ31 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering A*, **614**, 319-325, 2014.