

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. Maspocho, 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. Muños 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

ANÁLISIS DE DIFERENTES METODOLOGÍAS PARA OBTENER LAS PROPIEDADES A FRACTURA DE MATERIALES METÁLICOS A PARTIR DEL USO DE PROBETAS MINIATURA DE PUNZONADO

J. M. Alegre^{1*}, R. Lacalle², I.I. Cuesta¹, J.A. Álvarez²

¹Grupo de Integridad Estructural (Universidad de Burgos)

²LADICIM (Universidad de Cantabria)

Escuela Politécnica Superior. Av Cantabria s/n 09006 – Burgos (Spain)

*E-mail: jalegre@ubu.es

RESUMEN

Una de las principales líneas de investigación en la aplicación del ensayo miniatura de punzonado (SPT) consiste en analizar su viabilidad para obtener las propiedades a fractura de un material. En este artículo se presentan tres diferentes aproximaciones para obtener las propiedades a fractura de aceros mediante el uso de p-SPT: La primera está basada en el concepto del CTOD, la segunda está basada en la medida del área encerrada bajo la curva carga-desplazamiento para diferentes longitudes de fisura, y la tercera aproximación está basada en la simulación numérica de la probeta p-SPT para obtener la integral J. Para analizar la viabilidad de este ensayo los valores obtenidos mediante las diferentes aproximaciones se comparan con los resultados de tenacidad obtenidos a partir de probetas compactas C(T) de diferentes espesores. Los resultados indican que las probetas p-SPT pueden utilizarse como un método alternativo para estimar un valor de tenacidad para condiciones de bajo confinamiento tensional.

PALABRAS CLAVE: Fractura, Probetas miniatura de punzonado, entalla

ABSTRACT

One important topic in the application of the Small Punch Test (SPT) is to analyze its viability for the determination of the fracture properties of a material. This article describes three different approaches using pre-notched SPT specimens (p-SPT): the first one is based on the concept of crack tip opening displacement (CTOD), the second is based on measuring the area under the load-displacement curve for different initial pre-notch lengths, and the third approach is based on the numerical simulation of the specimen p-SPT for the J-integral determination. To explore the feasibility of this miniature test for obtaining the fracture properties of steels the test values obtained by the different approaches are compared with results obtained from conventional compact specimens C(T). The results indicate that p-SPT specimens can be used, when there is not enough material for conducting conventional fracture test, as an alternative method to estimate a value of the fracture properties under low constraint conditions.

KEYWORDS: Fracture, Small Punch Tests, Notches

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo miniatura de punzonado o Small Punch Test (SPT) es un método alternativo para la determinación de las propiedades mecánicas de un material, aplicable en aquellos casos en los que no se disponga de material suficiente para la realización de ensayos convencionales.

El ensayo SPT consiste básicamente en el punzonado hasta rotura, mediante una bola de gran rigidez, de una probeta de reducidas dimensiones (espesor 0.5 mm) que se encuentra empotrada en sus extremos. El registro de este ensayo es, típicamente, la fuerza aplicada frente al desplazamiento del centro de la probeta o de la bola.

La aplicación del SPT ha adquirido una gran relevancia en las últimas décadas, y como consecuencia del interés suscitado y de los numerosos trabajos aparecidos ha dado lugar al desarrollo de un código de buenas prácticas por el CEN [1]. En este código se recogen aspectos relacionados con los ensayos de rotura por creep, propiedades a fractura o búsqueda de las propiedades a tracción del material mediante el uso de las probetas SPT.

A lo largo de los últimos años han aparecido varios estudios dedicados a obtener las propiedades a fractura de un material utilizando probetas SPT, los cuales proporcionan expresiones empíricas para la estimación de un parámetro de resistencia a la fractura, en base a la medida de la reducción del espesor de la probeta en el momento del fallo [2].

A pesar de su relativa sencillez, la ausencia de una fisura o entalla iniciadora de la fractura resta precisión a estas aproximaciones, que permiten simplemente una estimación grosera de la resistencia a fractura del material.

En este trabajo se presentan una serie de nuevas aproximaciones al problema, en base al uso de probetas SPT en las que se ha practicado una entalla previa a la realización del ensayo. Estas probetas prefisuradas SPT se designarán en este trabajo como p-SPT.

Las aproximaciones al problema de la fractura presentadas en este trabajo son: (1) utilización del concepto de apertura de fisura, o *crack tip opening displacement* (CTOD), como parámetro característico de la resistencia a fractura del material, (2) medida de la energía de fractura en base al área encerrada debajo de la curva, para distintas longitudes de fisura (técnica multiprobeta), y (3) comparativa numérico-experimental en base al cálculo de la integral J y de su valor en el momento de la iniciación de la rotura.

Para una correcta estimación de la precisión alcanzada por cada una de las tres aproximaciones anteriores, se han comparado los resultados con ensayos convencionales sobre probetas compactas C(T), siguiendo la Norma ASTM E1820 [3].

2. DEFINICION DE LAS PROBETAS p-SPT

Las probetas empleadas en este trabajo presentan una sección cuadrada de 10x10 mm y un espesor de referencia de 0.5 mm. La zona de proceso de los ensayos es idéntica a la probeta tipo disco de 8 mm de diámetro propuesta en [1] siendo la única diferencia entre las muestras la forma de la zona empotrada entre matrices.

A las probetas se les ha practicado una entalla lateral desde uno de los bordes, con longitudes variables desde antes de la línea de carga hasta después de la línea de carga del punzón. Se han utilizado dos procedimientos diferentes para la generación de las entallas: (a) mediante corte por láser presentando un radio en el fondo de entalla de 0.075mm (Figura 1), y (b) mediante electroerosión por hilo, presentando un radio de 0.15 mm.

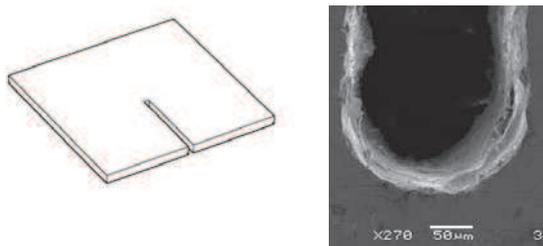


Figura 1. Probeta p-SPT con entalla lateral mecanizada por láser.

3. LONGITUD DE ENTALLA OPTIMA PARA LOS ENSAYOS p-SPT

El objetivo de practicar una entalla en las probetas p-SPT es para conseguir que durante el ensayo se produzca una propagación de la fisura que permita la aplicación de las diferentes aproximaciones basadas en la mecánica de fractura.

Con el objetivo de determinar en que rango de entalla se produce la fisuración de la probeta en esta geometría, Alegre *et al* [4] efectuaron ensayos a probetas p-SPT con diferente longitudes de entalla desde 4mm hasta 6mm, siendo 5mm la longitud de entalla que coincide con la línea de carga del punzón. El material utilizado fue un acero 15.5pH.

Los modos de rotura obtenidos para las diferentes longitudes de fisura analizadas se presentan en la Figura 2. Para las probetas con fisura inferior a 4mm la rotura se produce de forma circunferencial. Para probetas entre 4.5 mm y 5.5. mm la rotura se produce mediante una propagación en la dirección de la entalla.

Finalmente, para fisuras superiores a 5.5mm no se observa propagación en la dirección de la entalla, sino que la punta de la entalla se enroma progresivamente hasta el punzón es capaz de atravesar por completo la probeta.

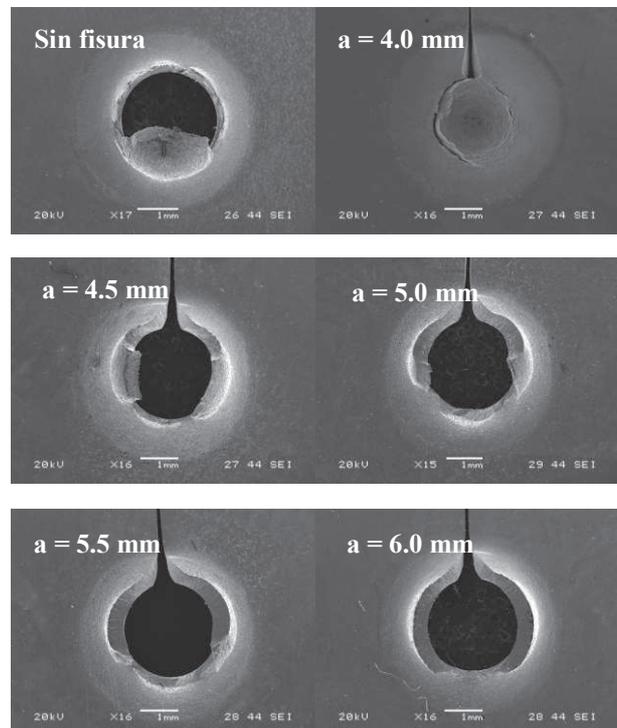


Figura 2. Modos de rotura de las diferentes longitudes de fisura [4].

En consecuencia, es posible afirmar que existe un rango de variación de la longitud de entalla para el cual la propagación se inicia en la dirección de la entalla. Dicho

rango varía aproximadamente entre la longitud de entalla de 4.5mm y la de 5.5 mm siendo 5 mm la línea de acción del punzón.

4. METODO 1: MEDIDA DEL CTOD

El primer método propuesto para la estimación de parámetros de fractura está basado en la medición de la apertura de la punta de entalla (CTOD) en las probetas p-SPT en el instante en el que se produce el inicio de la propagación de fisura. Este parámetro CTOD, también conocido como “ δ ”, es un parámetro puramente geométrico que se define como la apertura que experimenta la fisura en un proceso de carga [5].

La resistencia a fractura obtenida en términos de “ δ ” puede ser expresada en forma de “K” o “G” equivalentes aplicando las teorías básicas de Mecánica de la Fractura [1,5]:

$$CTOD = \frac{G}{m \cdot \sigma_y} = \frac{K_I^2}{m \cdot \sigma_y \cdot E} \quad (1)$$

donde m es una constante adimensional cuyo valor es aproximadamente 1 para tensión plana, y 2 para deformación plana.

De particular interés es el control de la apertura de entalla en el instante en que se inicia una grieta. Por su semejanza con los procesos que tienen lugar en un ensayo de tenacidad convencional, este instante podría correlacionarse con el momento en que, tras el enromamiento de la fisura inicial, se inicia la progresión de una grieta en la probeta estándar.

Con el objetivo de detectar el instante en el que se produce el inicio de la propagación, que servirá de base para establecer la tenacidad a fractura del material, se puede hacer uso de dos técnicas experimentales diferentes, que se describen a continuación.

La primera consiste en una evaluación directa de la apertura de la entalla en el transcurso de los ensayos, instalando una cámara tipo endoscopio en la matriz inferior del útil de ensayo lo que permite observar cómo se abre la entalla en el transcurso de un ensayo SPT (Figura 3) [6].

La segunda técnica consistiría en llevar a cabo ensayos interrumpidos, en el entorno de carga máxima donde se produce el inicio de la propagación, tal y como se presenta en los ejemplos mostrados en las Figuras 4 y 5 [7]. La punta de entalla de los ensayos interrumpidos se analiza mediante microscopía electrónica de barrido o microscopía óptica para medir la abertura de la punta de entalla en la zona inferior de la probeta, correspondiente al radio mayor.

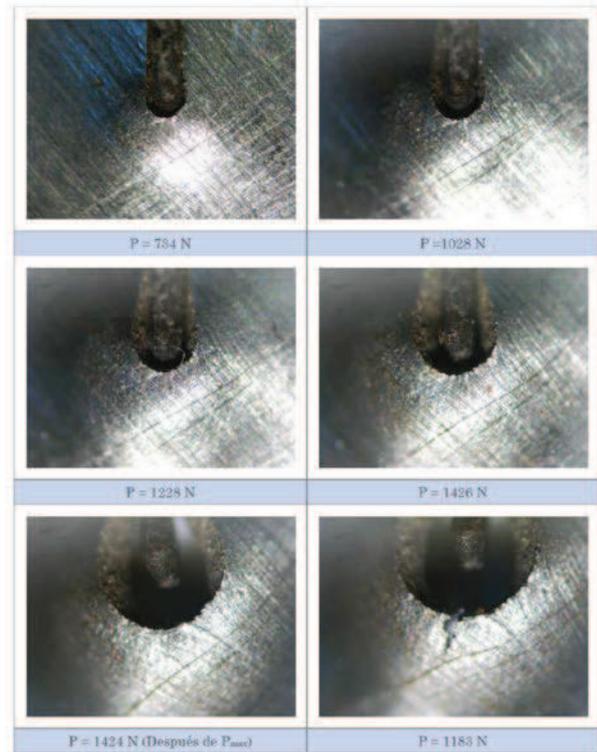


Figura 3. Evolución del frente de entalla en el transcurso de un ensayo p-SPT [6,8].

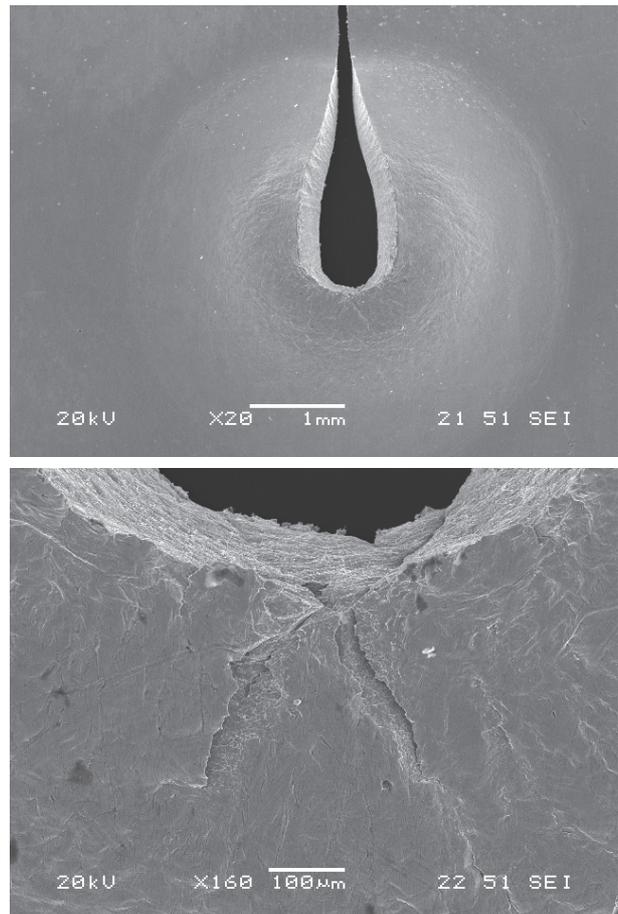


Figura 4. Inicio de la propagación en el entorno de carga máxima para una probeta con $a=5\text{mm}$ [7].

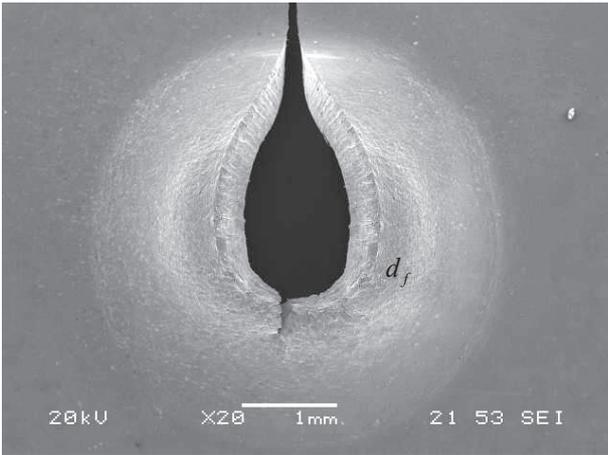


Figura 5. Propagación de la fisura iniciada una vez sobrepasado el valor de carga máxima [7].

Por otro lado, en el trabajo desarrollado por Lacalle *et al* [6,8], se ha demostrado que una vez fijada la longitud inicial del defecto, la relación entre la apertura de entalla y la deflexión de la probeta (o el desplazamiento del punzón) hasta el instante de la iniciación, es exclusivamente geométrica, es decir, no depende del material analizado. Como consecuencia de esta observación, ha sido posible generar mediante simulación por elementos finitos una colección de curvas “patrón” para diferentes valores de longitud de entalla inicial (Fig.6) que permiten relacionar directamente la deflexión máxima en la probeta (ó el desplazamiento del punzón) con la apertura de entalla en un instante determinado.

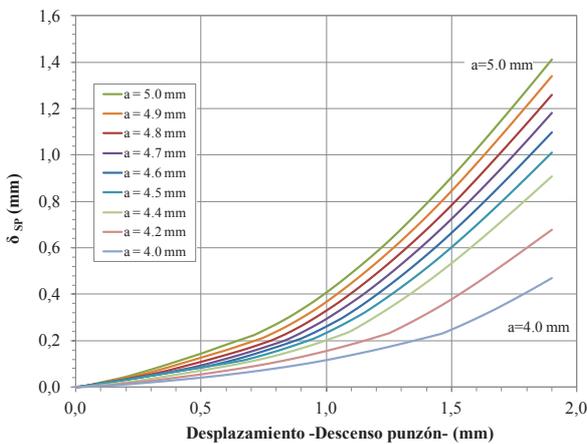


Figura 6. Curvas patrón relacionando la deflexión de la probeta con la apertura de entalla.

Sabiendo por tanto que la iniciación viene ligada a la discontinuidad en la pendiente de la curva y sin más que entrar en las curvas de la Figura 6 con el valor de deflexión registrado para ese instante del ensayo, es posible obtener a su vez un valor de “ δ_{SP} ”, característico de la iniciación de grieta al menos para la configuración de probeta empleada (p-SPT).

5. METODO 2: ENERGIA DE FRACTURA

La tasa de liberación de energía, definida como $G = -\partial U / \partial A$, representa la energía utilizada ∂U para producir un incremento del área fisurada ∂A .

Para aplicar este concepto a las probetas p-SPT es necesario disponer de las curvas carga-desplazamiento de varias probetas ensayadas con diferentes longitudes de entalla. Teniendo en cuenta que la energía almacenada por la probeta (U) se corresponde con el área encerrada debajo de la curva $P-\Delta$, y que desde un punto de vista ingenieril se puede asumir que el inicio de la propagación se produce en carga máxima, se calculará el área encerrada entre dos curvas con distinta longitud de entalla (Figura 7), con el fin de obtener la energía necesaria para producir el avance de entalla correspondiente a la diferencia de longitudes y estimar con ello el valor de G :

$$G = -\frac{\partial U}{\partial A} = -\frac{1}{t} \cdot \frac{dU}{da} = -\frac{1}{t} \cdot \left(\frac{U_2 - U_1}{a_2 - a_1} \right) \quad (3)$$

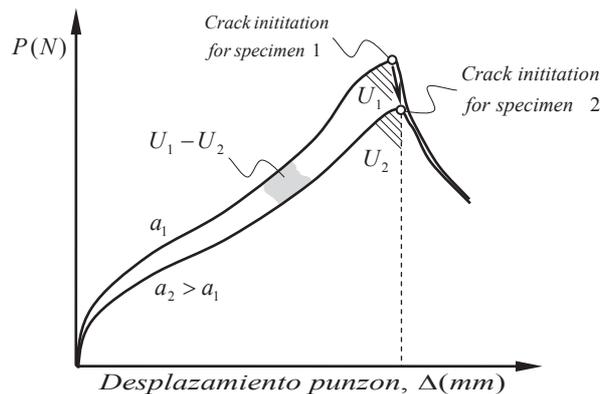


Figura 7. Esquema para la estimación de parámetros de fractura a partir del área encerrada debajo de la curva.

6. METODO 3: CALCULO DE LA INTEGRAL J

La estimación de los parámetros de fractura puede realizarse también de manera directa ya que, algunos de ellos como K y J , pueden ser directamente calculados por los programas de elementos finitos convencionales. El software de simulación utilizado en esta tarea ha sido ABAQUS, que aplica el método de la extensión virtual de fisura para el cálculo de la integral de dominio a partir de varios caminos de integración.

En el trabajo de Cuesta *et al* [10], se han realizado simulaciones con modelos 3D simétricos de probeta p-SPT con distintas longitudes de entalla, donde los caminos de integración se han creado concéntricos a la punta de entalla. Los resultados obtenidos en la simulación permiten representar una curva, para cada camino, que define el valor de la integral J en función del desplazamiento del punzón Δ .

Teniendo en cuenta que el inicio de propagación se va a producir en el entorno de carga máxima y que se dispone de curvas experimentales que permiten conocer el valor del desplazamiento del punzón para dicho valor de carga Δ_c , será posible establecer un valor de tenacidad crítico J_c para el inicio de propagación en la curva simulada tenacidad-desplazamiento del punzón. La metodología se esquematiza en la Figura 8.

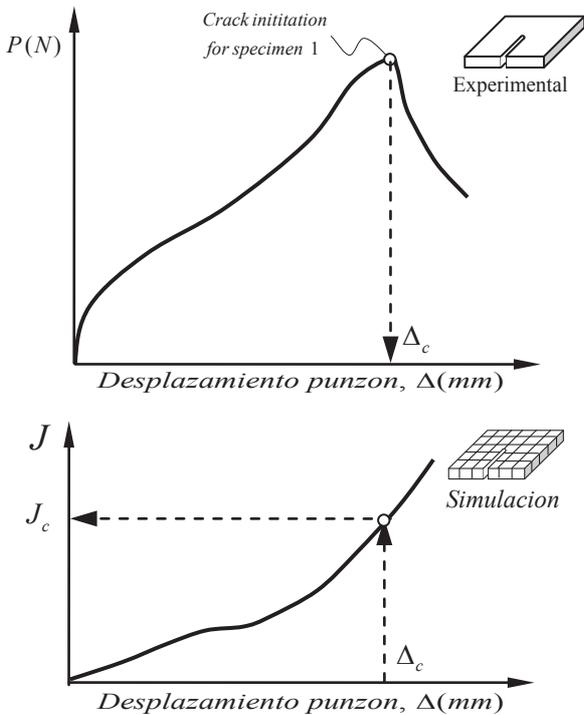


Figura 8. Esquema del método basado en el cálculo numérico de la integral J .

7. RESULTADOS Y ANALISIS

En el trabajo desarrollado por Lacalle *et al* [6,8] se han llevado a cabo ensayos tipo p-SPT sobre 4 distintos aceros estructurales (S235, S355, S690 y S890) empleando en cada caso 3 longitudes iniciales de entalla distintas (4.5, 4.8 y 5.0 mm). Siguiendo el procedimiento basado en la estimación del CTOD presentado anteriormente se estimaron los valores de “ δ_{sp} ” correspondientes al instante de iniciación de grieta. Estos valores fueron posteriormente expresados en términos de “ J ” [5] y comparados con los valores de “ J ” de iniciación obtenidos para los mismos materiales en ensayos convencionales sobre probeta C(T) realizados siguiendo las pautas de [3]. La Figura 9 muestra la comparativa entre los valores obtenidos por ambas vías, pudiéndose comprobar como la correlación se encuentra en una más que aceptable banda del $\pm 15\%$. La misma metodología utilizando probetas p-SPT ha sido empleada también en otros trabajos [9] para caracterizar la zona de transición de aceros de vasija. En esos casos, al no presentar la zona plástica el mismo desarrollo, la comparación entre ensayos p-SPT y

ensayos convencionales requiere de correcciones para tener en cuenta el efecto del espesor.

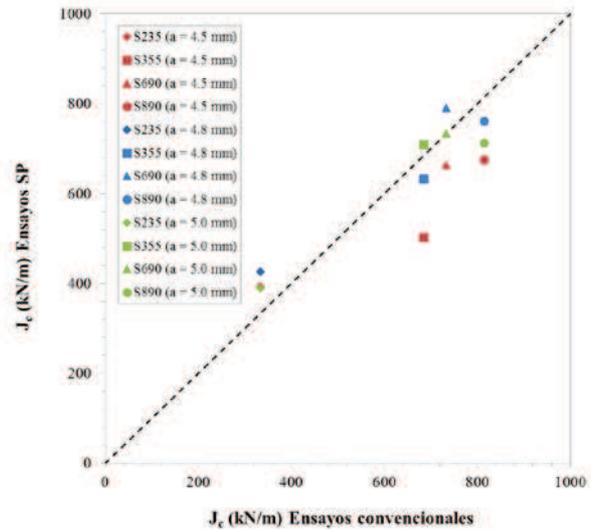


Figura 9. Comparación de los valores de “ J ” de iniciación, obtenidos con ensayos convencionales y con ensayos p-SPT.

Por su parte, en el trabajo desarrollado por Alegre *et al* [4,7] se han aplicado y comparado los tres métodos presentados en este trabajo, utilizando en su investigación un acero martensítico endurecido por precipitación 15.5pH. En la Figura 10, se recoge una evolución de las curvas de las probetas P-SPT para diferentes longitudes de entalla desde 4mm hasta 6mm.

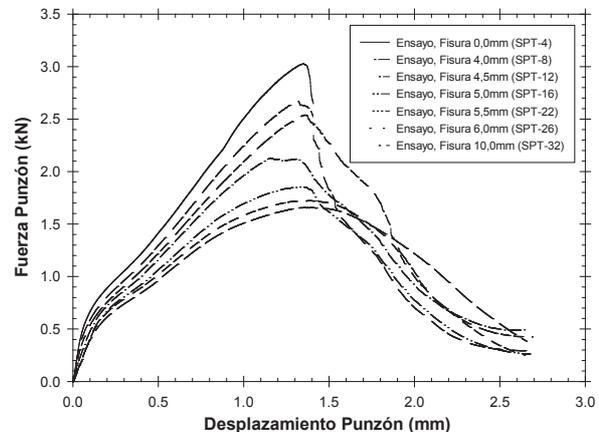


Figura 10. Curvas carga-desplazamiento representativas de las probetas p-SPT de diferentes longitudes de entalla.

A partir de las curvas presentadas en la Figura 7 es posible aplicar la metodología basada en el cálculo de la energía de fractura (método 2). El programa experimental completo se puede consultar en [7]. A modo de ejemplo, en la Figura 11 se presenta la forma de las curvas de la energía disponible para la propagación de la fisura, utilizando los ensayos experimentales de varias probetas con diferentes longitudes de fisura entre 5.0 y 5.5mm. Teniendo en cuenta el desplazamiento del punzón en el momento de la iniciación (carga máxima) se puede obtener el valor del parámetro “ G ” o “ J ”.

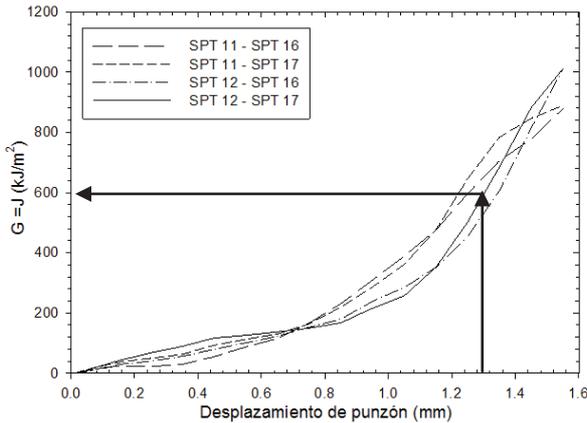


Figura 11. de la energía de disponible para la propagación de la fisura ($a=5.0-5.5$ mm)

Del mismo modo se puede operar a partir de los resultados del cálculo numérico de la integral J (método 3) cuya evolución se presenta en la Figura 12 para una probeta de longitud de entalla inicial $a=5.0$ mm.

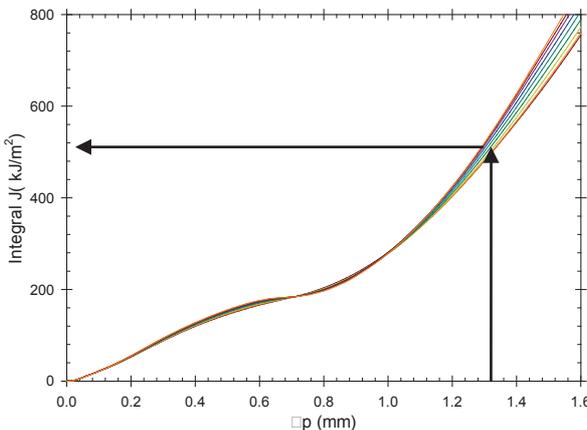


Figura 12. Cálculo numérico de la integral J en probetas p-SPT, 10 primeros caminos de integración ($a=5.0$ mm)

Finalmente, para la estimación de las propiedades a fractura, utilizando el método del CTOD, se han realizado ensayos interrumpidos en el entorno de carga máxima, tal y como se ha comentado en el apartado 4.

En la Figura 13 aparece recogida la comparativa entre los resultados de los tres métodos, y la tenacidad del material obtenida con probetas CT para diferentes espesores desde $B=20$ mm (DP) hasta $B=5$ mm (TP).

Se puede observar que, en general, la técnica multi-probeta de la energía de fractura (método 2) es la que proporciona una menor dispersión, y que los valores estimados se sitúan en torno al valor de tenacidad correspondientes a la probeta CT-5, representativa de un bajo confinamiento tensional (TP). Este método sin embargo presenta el inconveniente de precisar varias probetas de diferentes longitudes iniciales de entalla para su aplicación.

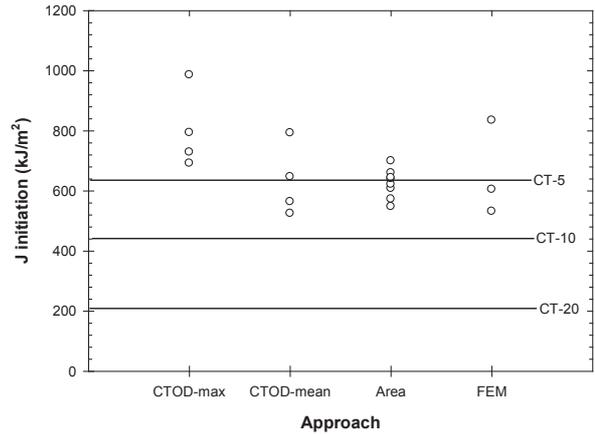


Figura 13. Cálculo de la energía de disponible para la propagación de la fisura ($a=5.0-5.5$ mm)

8. CONCLUSIONES

El uso de probetas SPT pre-entalladas constituye una alternativa factible para obtener las propiedades a fractura de un material en aquellos casos en los que no se disponga de material suficiente para realizar ensayos convencionales. El valor de tenacidad estimado es el correspondiente a condiciones de tensión plana o bajo confinamiento tensional.

De las tres técnicas analizadas, la técnica basada en el cálculo de la energía bajo la curva parece la más sólida, aunque el cálculo del CTOD puede resultar de más sencilla aplicación.

REFERENCIAS

- [1] CWA 15627:2008, Small Punch Test Method for Metallic Materials, European Committee for Standardization (CEN).
- [2] T. Misawa et al. Fracture toughness evaluation of fusion reactor structural steels at low temperatures by small punch tests. Journal of Nuclear Materials 169, (1989), Pages 225–232
- [3] ASTM E1820-01 (2001) Standard test method for measurement of fracture toughness. ASTM, Annual Book of Standards, Vol. 03.01.
- [4] J.M. Alegre, I. I. Cuesta, H. L. Barbachano. Determination of the fracture properties of metallic materials using pre-cracked small punch tests. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2015, 38, 104–112
- [5] Anderson, T.L., “Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications”, CRC Press, 1991.
- [6] R. Lacalle, “Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos Small Punch”, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, 2012.
- [7] H.L. Barbachano, “Aplicación del ensayo miniatura de punzonado para la determinación de los parámetros de fractura de aceros”, Tesis Doctoral, Universidad de Burgos, 2012.
- [8] R. Lacalle, J.A. Álvarez, B. Arroyo, F. Gutiérrez-Solana, “Methodology for fracture toughness estimation based on the use of Small Punch notched specimens and the CTOD concept”, 2nd International Conference SSTT, Conference Proceedings, 2012.
- [9] R. Lacalle, D. Andrés, J. Hernando, J.A. Álvarez, D. Ferreño, J.M. Alegre y F. Gutiérrez-Solana, “Caracterización de la zona de transición de aceros de vasija mediante el ensayo Small Punch”, Anales de Mecánica de Fractura, Volumen 31, 2014.
- [10] I.I. Cuesta, J.M. Alegre, R. Lacalle, J.A. Alvarez, F. Gutierrez-Solana. Cálculo de la Integral J en probetas SPT para la estimación de la tenacidad a fractura. Anales de la Mecánica de Fractura, Volumen 25, 2008.