Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (4): 1641-1646

UNA PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

H. E. Jaramillo[1,3,4], L. A. Bacca[2]

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.

- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.

- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).

- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.

- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (4): 1641-1646

UNA PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

H. E. Jaramillo[1,3,4], L. A. Bacca[2]

1: Director Programa Ingeniería Mecánica-Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
2: Joven Investigador UAO, Cali, Colombia
3: Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales, Autónoma de Occidente, Cali, Colombia
4: Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Cali, Colombia

. * E-mail: hjsuarez@uao.edu.co

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

En general el software basado en la teoría de elementos finitos solo permite determinar el Factor de Intensidad de Esfuerzos (K_I), más no la Tenacidad a la Fractura (K_{IC}). Esta última se determina experimentalmente en equipos de elevado costo. Este trabajo presenta dos procedimientos para determinar K_{IC} usando el método de elementos finitos. El primer procedimiento simula las condiciones exactas de las pruebas realizadas en el laboratorio siguiendo el procedimiento recomendado por la norma ASTM E399-90. El segundo procedimiento parte del concepto de que cuando K_I se hace igual al valor K_{IC}, se tiene una propagación de grieta inestable. Para el modelado se trabajo con la mitad del modelo real, por consideraciones de simetría, simulándose diferentes tamaños de grieta, valores obtenidos en el proceso de prefisurado. El análisis por elementos finitos utilizo elementos tipo 2-D cuadriláteros y triangulares, formulación de tensión plana, tipos de material: von Mises con endurecimiento isotrópico para el primer procedimiento e isotrópico para el segundo, el tipo de análisis fue: simulación de eventos mecánicos (MES) para ambos procedimientos con prescripciones de desplazamiento. Los resultados obtenidos para el acero AISI 1045 en ambos procedimientos fueron muy cercanos a los datos de las referencias consultadas.

Palabras Claves: *Tenacidad a la fractura, elementos finitos, simulación de eventos mecánicos, elementos 2-D, factor de intensidad de esfuerzos.*

Abstract

In general the software based on the theory of finite elements only to determine the Factor of Intensity of Stress (KI), and not the Tenacity of the Fracture (K_{IC}). The K_{IC} decides experimentally in equipments of high cost. This work presents two procedures to determine K_{IC} using the finite elements method. The first procedure simulates the exact conditions of the tests realized in the laboratory following the procedure recommended by the norm ASTM E399-90. The second procedure departs from the concept from that when K_I becomes equal to the value KIC, has a spread of unstable crack. For the model we work with the half of the real model, for the symmetry, with the different sizes of crack, values obtained in the process of precracking. The analysis for finite elements use elements type 2-D quadrilateral and triangular, formulation plane stress, types of material: von Mises with isotropic hardening for the first procedure and only isotropic for the second one, the type of analysis was: Mechanical Event Simulation (MES) for both procedures with displacement prescriptions. The results obtained for the steel AISI 1045 in both procedures performed very close to the references finding.

Keywords*: Fracture toughness, finite elements, mechanical event simulation, 2-D elements, intensity factor.*

1. INTRODUCCION

Alan Arnold Griffith en el año de 1920 estudio la resistencia mecánica de las fibras de vidrio [1]. Griffith [2] partió del hecho de que un cuerpo deformado elásticamente almacena energía potencial y propuso que esta energía elástica almacenada es la fuerza impulsora del crecimiento de grietas.

La mecánica de la fractura es un tema que actualmente recibe gran atención por parte de los ingenieros e investigadores. El interés radica en el hecho que los materiales de los componentes mecánicos presentan defectos o imperfecciones que

hacen que las piezas mecánicas no resistan los esfuerzos a que están sometidas y la vida útil esté por debajo para la que fueron diseñadas. La fractura o falla inesperada de una pieza mecánica, puede causar problemas que van desde la falla general del sistema mecánico, perdidas económicas, hasta poner en peligro vidas humanas.

La mecánica de la fractura es la disciplina que se encarga del estudio y la evaluación de los componentes agrietados con la finalidad de determinar si los componentes pueden seguir operando satisfactoriamente [3].Es importante conocer una propiedad como la Tenacidad a la fractura, porque permite realizar diseños más adecuados. Este trabajo presenta dos procedimientos usados para determinar la tenacidad a la fractura (K_{IC}) del acero AISI/SAE 1045, usando el método de elementos finitos. Resultados que fueron comparados con valores obtenidos en el laboratorio y con las referencias consultadas.

2. FASE EXPERIMENTAL

Para obtener los valores experimentales de tenacidad a la fractura en materiales metálicos la ASTM (American Society for Testing and Materials) ha establecido ensayos normalizados que garanticen resultados confiables. Estos ensayos se basan en las normas ASTM E399-90 y E1290-99 [4], [5]. Para esto se utilizo un equipo generador de grieta por fatiga el cual se diseño y construyo como parte del trabajo investigativo del grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales (GCIM), especialmente para operar bajo estas normas [6].

El primer paso para determinar la tenacidad a la fractura del acero AISI/SAE 1045 fue obtener las probetas que se ajustaran a los requerimientos de la norma establecida por la ASTM 399-90. Para este caso se trabajo con probetas tipo compactas (ver figura 1), con las dimensiones mostradas en la tabla 1.

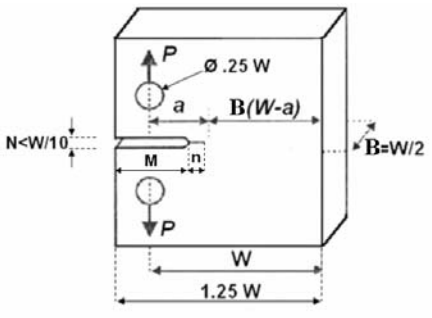


Figura 1. Dimensiones probeta compacta a tensión.

Una vez determinadas las dimensiones de la probeta se calcula la carga máxima de prefisurado, con base en la ecuación (1).

$$P_f = 0.4\left[\frac{Bb_o^2\sigma_y}{2W + a_o}\right] \qquad (1)$$

De la ecuación (1):

P_f es la carga de prefigurado, a_0 es el tamaño de grieta inicial, B es el espesor de la probeta, b_0 es el ligamento de la probeta, W es el ancho de la probeta y $\sigma_y = ½ (S_{ut} + S_y)$.

Para estas dimensiones de probeta y propiedades del material, la carga de prefigurado es de 5776 N. Pero por seguridad del equipo se decide trabajar con una carga de 3000 N para generar grieta por fatiga

Tabla 1. Dimensiones para la probeta compacta de acero AISI/SAE 1045.

Variable	*Dimensión*
Grosor de la probeta (**B**)	10,9mm
Longitud total de la probeta (**1,25 W**)	27,2mm
Altura de la probeta (**H**)	26,1mm
Diámetro de los agujeros	5,4mm
Ancho de la entalla (**N**)	2,2mm
Longitud de la entalla (**M**)	9,8mm

Se aplico una carga a tensión en el prefisurador (figura 2) de 3000 N para generar en las probetas una grieta superior a 1.3 mm. Esto se logro en el equipo generador de grieta por fatiga a través de su mecanismo de doble excéntrica que produce un perfil de carga sinusoidal con una amplitud de 0.6mm.

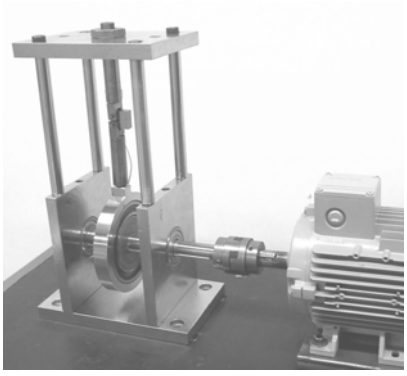


Figura 2. Probeta compacta montada en el equipo generador de grieta por fatiga.

Después de generar la grieta (figura 3). El siguiente

paso es montar las probetas en la máquina universal de ensayos UTS, aplicar tracción hasta fracturar la probeta: con los resultados obtenidos se realizó una curva fuerza vs deformación, con el objeto de determinar el valor de la carga P_q. La carga P_q se encuentra al proyectar una línea sobre la grafica original, inclinada en un 5 % de la grafica inicial. El punto donde se intersectan las dos curvas (figura 4) se encuentra el valor de P_q. Lo anterior es tomado como se indica en la norma ASTM E399-90.



Figura 3. Fotografía a 100 aumentos de la grieta generada por fatiga.

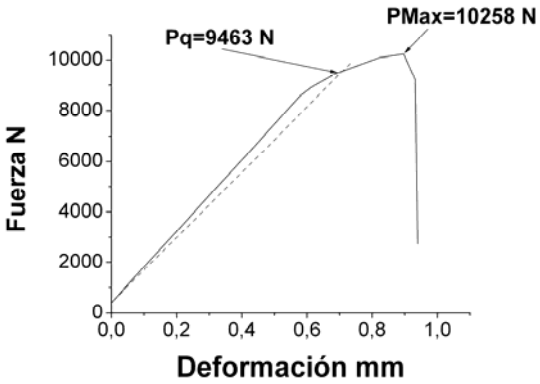


Figura 4. Curva fuerza vs deformación para probeta sometida a tracción.

Aplicando el procedimiento anterior para tres probetas se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de P_{max} y P_q

Probeta	*Carga máxima* P_{max}	*Carga calculada* P_q
1	10084 N	9865 N
2	10258 N	9463 N
3	10760 N	11337 N

Con el valor de P_Q y las dimensiones de la probeta se procede a calcular K_Q, con la ecuación (2).

$$K_Q = \left(P_Q / B^* \sqrt{W}\right)^* f\left(a/W\right) \qquad (2)$$

El valor de la función *f(a/W)* se obtiene a partir de la tabla A4.5.3.1, proporcionada por la norma ASTM E399-90 y que relaciona los valores del cociente *a/W* con los valores de la función *f(a/W)*. Para este caso en particular se tiene un valor de *a/W=0,450*; por tanto se obtiene un valor de *f(a/W)=8,34*.

Finalmente se calcula el valor de K_Q, que va a ser igual al valor de K_{IC} que se desea. Para las tres probetas y usando la ecuación (2), los resultados se presentan en la tabla 3. En esta tabla también se muestra el cálculo de la razón de P_{max}/P_q, que en los tres casos no supera el valor de 1,10. Demostrando que los tres ensayos fueron validos de acuerdo a las normas de la ASTM E 399-90.

Tabla 3. Resultados experimentales.

Probeta	K_{IC}	P_{max}/P_q
1	$61{,}7 MPa\sqrt{m}$	1,02
2	$63{,}2 MPa\sqrt{m}$	1,08
3	$62{,}4 MPa\sqrt{m}$	1,05

De la tabla 3, se obtiene un promedio para los tres ensayos de $K_{IC} = 62{,}4 MPa\sqrt{m}$.

3. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Debido a la necesidad de validar los resultados obtenidos en la fase experimental y de poseer una alternativa para obtener el K_{IC} sin la necesidad de realizar ensayos de laboratorios; se busco la forma de obtener la tenacidad a la fractura utilizando software que trabaje con el método de elementos finitos.

En esta búsqueda, se encontró que en general el software que trabajan con esta técnica solo permite el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos (K_I). Sin embargo usando las potenciales del software Algor v21.1. [7], se encontraron dos alternativas para el cálculo del K_{IC}. En la primera alternativa se simulan completamente el ensayo en el software, teniendo en cuenta las recomendaciones de la norma ASTM E 399-90, mientras que la segunda alternativa combina datos experimentales con trabajo en elementos finitos. A continuación se describen los dos procedimientos:

3.1. Procedimiento 1

Por éste método se simulo bajo las mismas condiciones las pruebas realizadas en el laboratorio, y, se siguió el procedimiento recomendado por la norma ASTM E 399-90. Teniéndose en cuenta las siguientes consideraciones:

a. Para el modelado se trabajo con la mitad del modelo real, por consideraciones se simetría.
b. Se simuló un tamaño de grieta de 1.5 mm, que es el valor máximo que se puede obtener en el proceso de prefisurado.
c. Tipo de elemento: 2-D, tensión plana, elementos cuadriláteros y triangulares mezclados
d. Numero de elementos: 400
e. Material: AISI 1045
f. Tipo de material: Von mises con endurecimiento isotrópico.
g. Tipo de Análisis: Mechanical Event Simulation (MES) con modelos de material no lineal
h. Se Incluyo una prescripción de desplazamiento de 0.85 mm del agujero, de manera que garantizara que los esfuerzos generados en la punta de la grieta superaran el esfuerzo último del material de S_{ut}=600MPa (figura 5)
i. Tiempo de duración del evento: 1 segundo
j. Pasos por segundos: 100

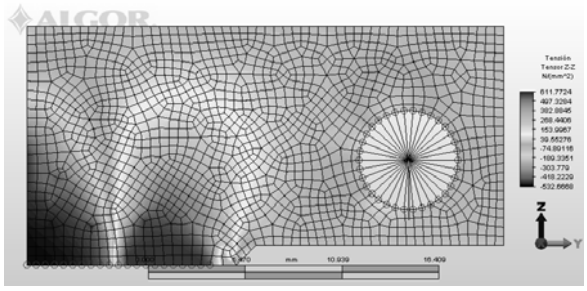


Figura 5. Valores de esfuerzos cuando la probeta se lleva hasta su valor del esfuerzos último.

Una vez simulado el evento, se procede a determinar los valores de carga y desplazamientos obtenidos para cada instante de tiempo, hasta que el esfuerzo en la punta de grieta alcance como mínimo el valor del esfuerzo último.

Con los datos de fuerza y desplazamiento, se procede a graficar estos datos (figura 6). De igual forma se grafica una línea recta con una pendiente disminuida en 5%, se encuentra el cruce entre las dos graficas y se obtiene el valor de P_q.

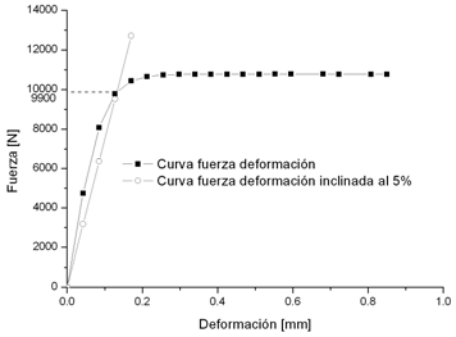


Figura 6. Grafica fuerza versus desplazamiento

De la figura 6, P_q=9900N y P_{max}= 10780N. Por tanto con un valor de *a/W*=0,517 (este valor cambia, debido al que se uso un tamaño de grieta diferente al de la parte experimental) y usando la tabla A4.5.3.1. de la norma ASTM E399-90, se tiene que *f(a/W)*=10,12. El valor de P_{max}/P_q=1,09, lo que indica que el procedimiento es valido. Ahora, utilizando la ecuación (2) se tiene un valor de K_{IC}=62,3 MPa.$m^{0,5}$

3.2. Procedimiento 2:

Para el segundo método se partió del concepto de que cuando el factor de intensidad de esfuerzos se hace igual al valor de la tenacidad a la fractura, se tiene una propagación de grieta inestable. Ahora como el factor de intensidad de esfuerzos es un parámetro definido para fractura lineal elástica, es decir, que la mayor parte de la región esta en el rango elástico, se tomo una probeta de las fracturadas en el laboratorio (figura 7) y, se le midió el ancho de la zona elástica. Lo anterior se realizo a partir de la observación de la zona que no tuviera deformación plástica apreciable. Para este caso se obtuvo una distancia de propagación de grieta hasta esta zona de 4.6 mm (figura 7).

Después se simulo la probeta con un tamaño de grieta de 4.6 mm, determinándose en factor de intensidad de esfuerzos (K_I) para esta condición. Como este sería el tamaño de grieta crítico, el factor de intensidad de esfuerzos será igual al valor de la tenacidad a la fractura (K_{IC}), para un esfuerzo en la punta grieta igual al de fluencia del material (S_y=473MPa.)

Las consideraciones que se tuvieron en este análisis fueron:

a. Para el modelado se trabajo con la mitad del

modelo real, por consideraciones se simetría, simulandose un tamaño de grieta de 4.6 mm

b. Tipo de elemento: 2-D, tensión plana, elementos cuadriláteros y triangulares mezclados
c. Número de elementos: 400
d. Material: AISI 1045
e. Tipo de material: Isotrópico
f. Tipo de Análisis: MES con modelos de material no lineal
g. Se Incluyo una prescripción de desplazamiento de 0.85 mm del agujero.
k. Tiempo de duración del evento: 1 segundo
h. Pasos por segundos: 100

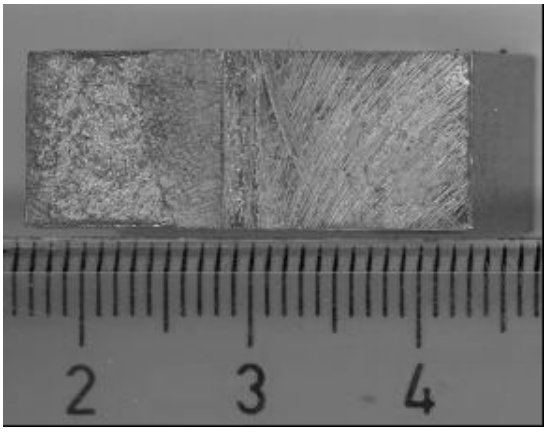


Figura 7. Probeta fracturada en un ensayo de tenacidad a la fractura, en una máquina Universal de Ensayos, después de prefigurada.

Después de realizado el análisis de simulación de eventos mecánicos (MES), se corre un nuevo análisis para determinar el factor de intensidad de esfuerzos. Una vez realizado este último se busca paso a paso el tiempo en el cual es esfuerzo en la punta de grieta se hace igual al esfuerzo de fluencia (figura 8).

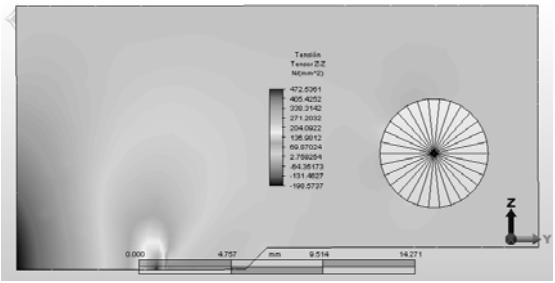


Figura 8. Valores de esfuerzos en la punta de grieta iguales al esfuerzo de fluencia

De igual forma se busca el factor de intensidad de esfuerzos para el mismo instante de tiempo y valor de esfuerzo. El valor obtenido en este instante para el factor de intensidad de esfuerzo (K_I), es igual al valor para la tenacidad a la fractura (K_{IC}) (figura 9).

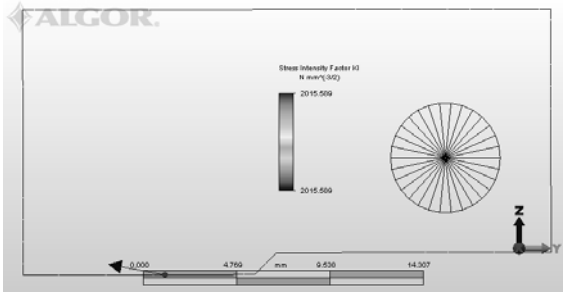


Figura 9. Determinación del Factor de Intensidad de Esfuerzos en Algor

4. RESULTADOS

Un resumen de los datos obtenidos en los dos procedimientos descritos y realizados mediante el método de elementos se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados obtenidos por los dos métodos

Método	*Tenacidad a la fractura*
Procedimiento 1	62,3 $MPa\sqrt{m}$
Procedimiento 1	2015,5 $Nm^{(-3/2)}$=63,7 $MPa\sqrt{m}$

En la tabla 5, se muestran valores de K_{IC} obtenidos para el acero AISI 1045 de fabricación nacional y que fueron encontrados reportados en la literatura. De igual forma se comparan estos valores con los obtenidos en el análisis por elementos finitos:

Tabla 5. Valores de tenacidad a la fractura (K_{IC}) para el acero AISI 1045 reportados.

Referencia	*Tenacidad a la fractura (K_{IC}) $MPa\sqrt{m}$*	*Diferencia porcentual Procedimiento 1*	*Diferencia porcentual Procedimiento 2*
Análisis experimental	62,4	0,16 %	-2,08%
Hinestroza y Ándres [8]	63,1	1,26%	-0,95%
UPB [9]	66,0	5,60	3,48%

5. CONCLUSIONES

Los valores encontrados para la tenacidad a la fractura (K_{IC}), por los dos procedimientos propuestos, arrojaron valores muy cercanos a los encontrados en las referencias, al igual que a los valores obtenidos experimentalmente. Lo anterior valida los procedimientos usados y plantea una

alternativa para el calculo del K_{IC} usando la técnica de elementos finitos, cuando no se dispone de un software de éste tipo que permita su determinación directa.

La determinación del K_{IC}, mediante la técnica de elementos finitos, reduce la necesidad de realizar pruebas de laboratorio, que generalmente son de un elevado costo y amplia el campo de investigación en el tema.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Meizoso AM., Martinez JM., 1999, *Mecánica de la Fractura*, impreso en España ©Los autores, Cap 1. p1. 1998.

[2] Gonzalez, JL. *"Mecánica de fractura, bases y aplicaciones"*, Primera Edición 1998, Editorial LIMUSA S.A, Cap 2. p34.

[3] Jaramillo HE, Alba NC, Cañizales JP; Toro AJ. *"Introducción a la Mecánica de la Fractura y Análisis de Fallas"*, Universidad Autónoma de Occidente p18, 2008

[4] Norma ASTM E 399-90, *"Estándar Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials"*, Annual Book of American Society for Testing and Materials Standard.

[5] Norma ASTM E 1290-99, *"Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurem",* American Society for Testing and Materials Standard.

[6] Laboratorio grupo de investigación Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad Autónoma de Occidente. www.uao.edu.co. [En línea]. Cali – Colombia. 2008.

[7] www.algor.com, agosto 10 de 2008. [en línea]

[8] Hinestroza G, Andrés O, *"Diseño y construcción de un banco prefisurador de probetas tipo flexión en tres puntos para determinar la tenacidad Ctod del acero SAE 1045"*. Trabajo de grado. Universidad del Valle. Cali-Colombia 2004.

[9] "Mecánica de la fractura". Junio 19 de 2007 [en línea]. http://amasd.upb.edu.co/pregrado/diseno/diseno_C11_MecanicaFracturas.pdf