

## ENSAYOS DE IMPACTO INSTRUMENTADO EN UN COMPUESTO PEI-Fibra de Vidrio

Coz Díaz ,J.J.del\*;Viña Olay,J.\*\*;Fernández Canteli,A.\*

Universidad de Oviedo

E.T.S. INGENIEROS INDUSTRIALES DE GIJON.

\*Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación .

\*\*Dpmto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica  
Crtra. de Castiello s/n . Gijón - 33204

Resumen.- El comportamiento a fractura del compuesto PEI-Fibra de Vidrio ha sido estudiado en una unidad de impacto dinámica , constituida por un péndulo Charpy convenientemente instrumentado . Los ensayos han sido realizados sobre probetas Charpy de dimensiones 8x10x54 mm , con diferentes tamaños de grieta , siendo en todos los casos la dirección de rotura perpendicular al laminado . A partir de los resultados de los ensayos se ha estudiado la influencia del tamaño de grieta inicial en los valores de fractura dinámica . Los parámetros objeto de estudio han sido : la tenacidad a fractura dinámica ( $K_{Id}$ ), el módulo elástico dinámico ( $E_d$ ) y la energía de iniciación de fractura ( $J_{Id}$ ) según Kobayashi [1][2] y Sumpter y Turner [3].

Abstract.- We have studied the fracture behaviour of the PEI-Fiberglass composite in a dynamic machine , an Instrumented Charpy pendulum . The tests have been carried out on Charpy specimens of 8x10x54 mm , with different crack lengths , and the crack propagation perpendicular to the laminate . The influence of the initial crack length on fracture parameters has been studied. The experimental fracture parameters considered were : the dynamic fracture toughness ( $K_{Id}$ ), the dynamic elastic modulus ( $E_d$ ) and the energy of fracture initiation ( $J_{Id}$ ) according to Kobayashi [1][2] and Sumpter & Turner [3] .

### 1.INTRODUCCION.

La mayoría de los equipos en ingeniería están sometidos a cargas dinámicas . En el caso de materiales compuestos de elevadas propiedades mecánicas utilizados en la industria militar y aeroespacial , estas solicitaciones son habituales , y deben ser consideradas en la fase de diseño , por lo que resulta preciso el conocimiento del comportamiento a fractura de los mismos , para la selección del material más adecuado en cada caso .

En el presente artículo se muestran los resultados obtenidos en la caracterización dinámica de un material compuesto , PEI reforzado con fibra de vidrio , así como las técnicas experimentales utilizadas en los ensayos . Asimismo se estudia la influencia del tamaño de grieta inicial de las probetas en la determinación de los diferentes parámetros de fractura del compuesto .

### 2.MATERIAL UTILIZADO.

Se trata de un material compuesto formado por una resina termoplástica de altas prestaciones PEI (polieterimida) reforzada con fibra de vidrio continua tipo "E". La resina termoplástica PEI constituye junto con el PEEK (Poliéter-éter-cetona) el polímero comercial que presenta unas propiedades mecánicas más altas, así como una muy alta resistencia a ambientes húmedos y a elevadas temperaturas de trabajo [4]. Su estructura química está constituida por una imida aromática y un éter (Fig.1.). Las altas prestaciones mencionadas anteriormente son una consecuencia de la rigidez y elevada temperatura de transición vítrea  $T_v$  (217°C), que le proporciona la imida aromática y la flexibilidad de la cadena que le otorga el grupo éter.

El material de refuerzo empleado en este caso fué la fibra de vidrio tipo E, con una fracción volumétrica de fibra del 50%. El material fue suministrado en forma de rollo de preimpregnado.

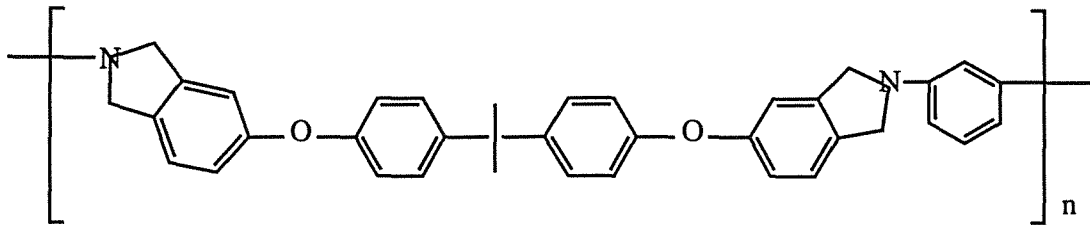


Fig. 1. Estructura química del PEI.

Las características mecánicas del compuesto PEI-fibra de vidrio, obtenidas mediante ensayos estáticos para probetas en dirección longitudinal, se muestran en la Tabla 1.

$\sigma_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\nu$	E [N/mm <sup>2</sup> ]
882 ± 72	0.290 ± 0.007	37360 ± 2967

Tabla 1. Características mecánicas del compuesto.

### 3. EQUIPOS UTILIZADOS

Para la realización de los ensayos de caracterización dinámica, se han utilizado algunos equipos del departamento de Mecánica experimental de la Universidad de Bochum, con el cual se están llevando a cabo diferentes Proyectos de Investigación.

Los equipos más importantes han sido:

- Péndulo Charpy marca IBERTEST, modelo PIB-30, energía de impacto 300 J., velocidad de impacto máxima 5.42 m/s, dotado de un prototipo "Low-Blow", que permite regular la altura de caída y, por tanto, la velocidad y energía del impacto, entre 0.0 y 0.9 m.
- Péndulo Charpy marca WOLPERT-Probat, Modelo PW 30/15 Clase 1s s/DIN 51220, energía de impacto 300 - 150 J., velocidad de impacto máxima 5.5 m/s, con enclavamiento automático y regulable entre 0.013 y 1.54 m.
- Cuchillas instrumentadas mediante galgas extensométricas, según normativa DVMS, elaboradas en Titanio y en acero X210 CrMo 12.
- Equipo de amplificación y filtrado de la señal de las galgas extensométricas de la cuchilla, de una frecuencia de muestreo hasta 1MHz, y diferentes frecuencias de filtrado, entre 50 y 300 MHz.
- Tarjetas de recogida de datos marca Keithley-Metrabyte, modelo DAS-50, frecuencia de muestreo hasta 1 Mmuestra/s, 1MB de memoria RAM. Parámetros de funcionamiento seleccionables por software. La señal de las galgas extensométricas de la cuchilla del péndulo es usada como trigger para la tarjeta.

- Ordenador personal, Mod. 486/30MHz, 8MB RAM, 200 MB H.D. que aloja las citadas tarjetas, encargado de la lectura y procesado de los datos adquiridos por la misma. Todo el proceso de adquisición de datos, así como el posterior tratamiento de la señal se realiza bajo Windows® 3.1, mediante el programa OSCILOS-3 V.1.0 ©OFS-JJCD(ETSII).

### 4. PREPARACION DE LOS ENSAYOS

El proceso seguido en la preparación de los ensayos ha sido el siguiente:

- 1.- Elaboración de las probetas
- 2.- Mecanización de las probetas.
- 3.- Planificación de los ensayos.

#### 4.1. Elaboración de las probetas.

Con el objeto de poder realizar los ensayos de impacto en este material se fabricó un composite a partir de un elevado número de capas unidireccionales, previamente secadas en una mufla, que se apilaron cuidadosamente unas sobre otras para asegurar lo mas posible la alineación de las fibras en una única dirección. El posterior curado se llevó a cabo en una prensa de platos calientes Polystat 300 S, siguiendo el ciclo presión - temperatura aconsejado por el fabricante (Ten Cate Advanced Composites), pero ligeramente modificado por ser el número de láminas muy elevado y poder existir problemas en el curado de las zonas más internas del laminado.

Se elaboró una placa de dimensiones 300 mm de largo x 250 mm de anchura, y de un espesor de 8 mm.

#### 4.2. Mecanización de probetas

Se mecanizaron un total de veinte probetas, extraídas en dirección longitudinal, de un espesor de 8 mm, anchura 10 mm y longitud 54 mm, con entallas en V a 30° de 2 a 5 mm de profundidad en dirección L-T.

#### 4.3.-Planificación de los ensayos .

Se realizaron inicialmente tres ensayos de impacto total (300 J.) con probetas de 8 mm de espesor , y 2 mm de entalla , al objeto de determinar la energía de fractura del compuesto , y ajustar los parámetros del sistema electrónico de medida .

En base a los citados pre-ensayos , las condiciones de operación fijadas fueron las siguientes :

-Frecuencia de muestreo	= 250 KHz
-Frecuencia de filtrado	= 100 KHz
-Número de puntos almacenados	≥ 2000
-Puntos antes del Trigger	= 100
-Rango de voltaje	= ± 2.50 V
-Tensión de disparo "Trigger"	= + 0.01 V
-Tipo de cuchilla seleccionada	= Titanio
-Velocidad de impacto	= 3.85 m/s
-Energía de impacto	= 146 J.

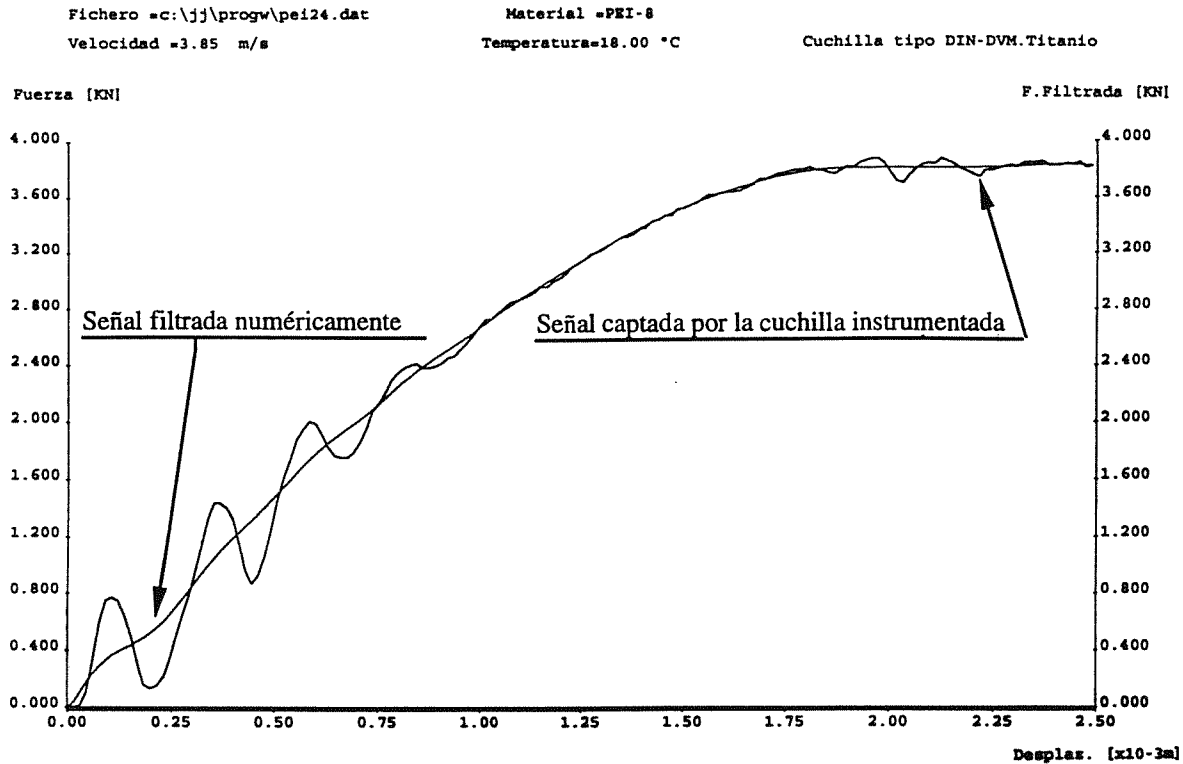


Fig.2 Señal (F- $\delta$ ) captada por la cuchilla y filtrada numéricamente .

#### 5.CARACTERIZACION DINAMICA.

Los parámetros obtenidos para el compuesto solicitado dinámicamente han sido los siguientes :

- 1.- Módulo elástico dinámico  $E_d$  .
- 2.- Tenacidad dinámica a fractura  $K_{Id}$  .
- 3.- Energía de iniciación de fractura  $J_{Id}$  .

Los criterios utilizados en la determinación de los citados parámetros se describen a continuación .

##### 5.1.Determinación del módulo elástico dinámico $E_d$ .

El proceso seguido para la obtención del módulo elástico dinámico del material ha sido el siguiente :

- Obtención de la Fuerza del impacto  $F(t)$  , a partir de la señal captada por la cuchilla instrumentada .
- Cálculo del desplazamiento de la probeta , mediante integración de la señal Fuerza-tiempo .

-Determinación del semiperiodo de oscilación de la probeta ,  $\tau$  , a partir de la formulación dada por ASTM E24.03 [6].

-Filtrado numérico de la señal fuerza-desplazamiento (Fig.2) [5].

-Ajuste por mínimos cuadrados de la señal filtrada en los instantes iniciales del impacto , comprendidos entre  $\tau/2$  y  $2\tau$  .

-Obtención de la flexibilidad de la probeta mediante integración numérica utilizando la regla de Simpson y cuadratura adaptativa .

La fuerza en el impacto se obtiene a partir del registro Voltaje-Tiempo , sin más que multiplicar , en cada instante , el valor de voltaje por el correspondiente factor de calibración de la cuchilla .

La velocidad y el desplazamiento se calculan por integración numérica , aplicando la regla trapezoidal para puntos base equidistantes , a partir del registro fuerza-tiempo [5] , mediante las fórmulas (1) (2) .

$$v(t) = v_0 - \frac{\Delta t}{2m} \sum_{i=t_i}^t F_i + F_{i+1} \quad (1)$$

$$s(t) = \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=t_i}^t s_i + s_{i+1} \quad (2)$$

Siendo :

$v_0$  Velocidad de impacto .

$F_i$  Fuerza .

$\Delta t$  Intervalo de tiempo (1/Frecuencia) .

$m$  Masa de la cabeza del Péndulo .

El valor del semiperiodo de oscilación de la probeta se ha obtenido de la formulación (3)..(6) , dada por ASTM E24.03 [6] .

$$\tau = \frac{\sqrt{S \cdot W \cdot E \cdot B \cdot C_{LL}}}{c_0} \quad (3)$$

Siendo :

$$E \cdot B \cdot C_{LL} = 72 \cdot \left[ g\left(\frac{a}{W}\right) \right] + 20 \quad (4)$$

$$g\left(\frac{a}{W}\right) = a_2 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 + \dots + a_{10} \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{10} \quad (5)$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

$(a_2, a_3, \dots, a_{10}) = (1.86; -3.95; 16.38; -37.23; 77.55; -126.87; 175.53; -143.96; 66.56)$  .

El filtrado numérico de la señal tiene por objeto eliminar las oscilaciones en la misma , sin distorsionarla . Para ello se han empleado los algoritmos en que se basan los filtros digitales de respuesta impulsional finita [7], definiendo una ecuación según la cual cada valor de salida se obtiene como una suma ponderada de un conjunto finito de valores de entrada , que representan las muestras de la señal que se quiere filtrar .

Por tanto , si la señal de entrada es  $x(t)$  , la cual se halla representada por sus muestras  $x(nT)$  , tomadas a la frecuencia  $F_e=1/T$  , la ecuación de salida filtrada viene dada por la ecuación (7) .

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \cdot x(n-i) \quad (7)$$

Siendo  $w_i$  los coeficientes del filtro , también denominados funciones de peso , y N el número de tales coeficientes .

En los ensayos se han utilizado las funciones de peso de Hanning , cuya forma es cosenoidal , ya que presentan la menor distorsión en el valor medio de la señal [5] , tal y como se ha podido apreciar en la realización de diferentes ensayos .

En la Fig.2 puede apreciarse la señal fuerza-desplazamiento captada , y la obtenida al aplicar el filtro numérico .

La pendiente inicial , C , se determina efectuando una regresión lineal , mediante mínimos cuadrados , sobre la señal filtrada . El proceso se lleva a cabo en los instantes iniciales del impacto , comprendidos entre  $\tau/2$  y  $2\tau$  .

Una vez obtenida dicha pendiente inicial , el valor del módulo elástico dinámico del material se obtiene a partir de la formulación de la flexibilidad de la probeta , la cual consta de dos partes , una debida a la deformación como viga , y otra debida a la flexibilidad adicional que introduce la grieta . Por tanto , podemos escribir (8) :

$$E_d = E_{d0} + E_{d1} \quad (8)$$

Siendo  $E_{d0}$  el módulo elástico dinámico de la probeta sin entalla , dado por (9) ; y  $E_{d1}$  el debido a la entalla (10) .

$$E_{d0} = \frac{C \cdot S^3}{4 \cdot W^3 \cdot B} \left[ 1 + 2.85 \cdot \left(\frac{W}{S}\right)^2 - 0.84 \cdot \left(\frac{W}{S}\right)^3 \right] \quad (9)$$

$$E_{d1} = C \cdot \frac{SBW(1-v^2)}{2} \int_0^{\frac{a}{W}} \left( \frac{K_{Imm}\left(\frac{a}{W}\right)}{M} \right)^2 d\left(\frac{a}{W}\right) \quad (10)$$

En la fórmula (10)  $K_{Imm}$  es el factor de intensidad de tensiones a flexión , dado por (11) , y  $F_m$  es el factor concentrador de tensiones dado por F.Paris *et al.* [6] .

$$K_{Imm} = \frac{3}{2} \frac{F \cdot S}{BW^2} \sqrt{\pi a} \cdot F_m\left(\frac{a}{W}\right) \quad (11)$$

La evaluación de la integral definida se realiza mediante integración numérica utilizando la regla de Simpson y cuadratura adaptativa .

### 5.2. Obtención de la tenacidad dinámica a fractura $K_{Id}$ .

Para la determinación de la tenacidad a fractura se ha realizado un Análisis cuasiestático basado en la Norma ASTM.E24.03.03 [4][8] , a partir de la señal de la cuchilla instrumentada .

Se han respetado los siguientes requerimientos en la realización de los ensayos :

1.- Energía de impacto :  $E_0 \geq 3 \cdot E_I$  .

Siendo :

$E_0$  Energía disponible en el péndulo .

$E_I$  Energía de rotura de la probeta hasta el instante  $t=0.02 F_m$  , siendo  $F_m$  la fuerza máxima del impacto .

2.- Tiempo de fractura :  $t_f \geq 3 \cdot \tau$

Siendo :

$t_f$  Tiempo de rotura .

$\tau$  Semiperiodo de oscilación de la probeta , obtenido a partir de las fórmulas (3)..(6) del apartado 5.1 .

Una vez calculado el desplazamiento, según se ha indicado en el apartado anterior, la evolución de la energía se obtiene mediante (12).

$$E(t) = \sum_{i=t_i}^t \frac{1}{2} (F_i + F_{i-1})(s_i - s_{i-1}) \quad (12)$$

La energía de fractura para un sólido agrietado sometido a una carga de rápida variación viene dada por la ecuación (13); en la cual  $E_I$  es la energía hasta el instante de máxima carga, y  $E_T$  es la energía cinética de la probeta.

$$G_I = \frac{E_I}{B \cdot W} - \frac{E_T}{B \cdot W} \quad (13)$$

El valor de la carga máxima  $F^*$  se determina, una vez conocida  $G_I$ , a partir de la fórmula (13).

$$F^* = \sqrt{2 \cdot G_I \cdot B \cdot W \cdot C} \quad (14)$$

Con la notación ya habitual.

No obstante, dada la plasticidad del material y su baja densidad, se ha prescindido del término correspondiente a la energía cinética en los cálculos realizados.

El valor de la tenacidad a fractura se determina a partir de la formulación (11) [8].

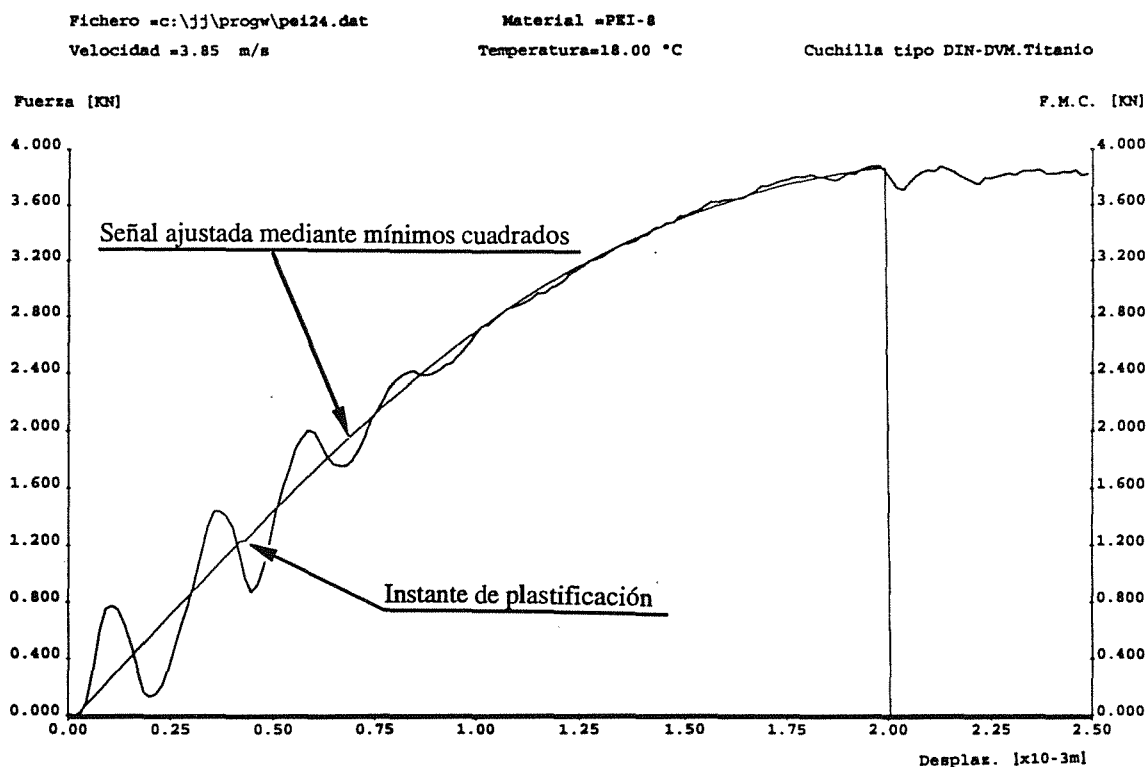


Fig.3 Determinación del instante de plastificación.

### 5.3.- Energía de iniciación de fractura $J_{Id}$ .

Para la obtención de la energía de iniciación de fractura  $J_{Id}$  se ha optado por calcular el valor de la integral  $J$  en el instante de comienzo del crecimiento subcrítico de la grieta. Dicho instante se determinará basándose en la variación efectiva de la flexibilidad, método ya utilizado por otros autores, como Kobayashi [1] [2].

El procedimiento seguido ha sido el siguiente:

- Determinación del instante de plastificación (fluencia) del material.
- Obtención de la variación de la flexibilidad.
- Detección del cambio de pendiente en la variación de la flexibilidad.

El instante de plastificación se obtiene realizando un ajuste mediante mínimos cuadrados, a un polinomio de segundo orden, del diagrama fuerza-desplazamiento, entre los instantes comprendidos entre  $2\tau$  y el tiempo de rotura,  $t_f$ , calculado mediante el máximo de la función  $\Psi(t)$  (15).

$$\Psi(t) = \left\{ F(t)^2 \cdot \frac{dF(t)}{dt} \right\} \quad (15)$$

Una vez realizado el ajuste, el instante de plastificación,  $t_{gy}$ , queda determinado por la intersección de la pendiente inicial con la curva obtenida. En el caso de que no se produzca intersección, se determina la distancia mínima entre las mismas, a partir de la derivada de ésta última. En la Fig.3 puede verse el ajuste realizado en uno de los ensayos de impacto.

La flexibilidad en el comienzo del ensayo de impacto se define como (16) :

$$C_e = \frac{F_{gy}}{s_{gy}} \quad (16)$$

Siendo :

$F_{gy}$  -> Fuerza en el instante de plastificación .

$s_{gy}$  -> Desplazamiento en dicho instante .

La variación de la flexibilidad en cada punto de la curva  $F-\delta$  filtrada , viene dada por la función (17) :

$$\Delta C = \frac{\delta(t)}{F(t)} - C_e \quad (17)$$

La cual presenta una discontinuidad en el instante de crecimiento de la grieta ,  $t_{cg}$  . Para la localización de la misma se efectúa una regresión lineal a un polinomio de segundo grado entre los instantes  $t_{gy}$  y  $t_f$  . Una vez realizada la regresión , el instante de crecimiento de la grieta será aquel en el que la diferencia entre la variación de la flexibilidad y la función ajustada supera el valor dado por la ecuación (18).

$$|\Delta C - \Gamma(t)| \geq 2 \cdot \sigma_n \quad (18)$$

En la cual se tiene que :

$\Gamma(t) = c_0 + c_1 \cdot \delta(t) + c_2 \cdot \delta(t)^2$  -> La función ajustada

$\sigma_n$  -> La desviación estándar obtenida en el ajuste de dicha función .

Una vez obtenido el instante  $t_{cg}$  , el valor de la energía de iniciación de la fractura  $J_{Id}$  se ha determinado mediante los siguientes métodos :

- 1.- A partir del instante de crecimiento estable subcrítico de la grieta , preconizado por Kobayashi [1][2].
- 2.- Mediante la formulación dada por Sumpter y Turner , para flexión en tres puntos [3].
- 3.- A partir de la tenacidad a fractura dinámica  $K_{Id}$ .

El valor de  $J_{Id}$  mediante el método 1 resulta ser (19) :

$$J_{Id} = \frac{2 \cdot E(t = t_{cg})}{B(W - a)} \quad (19)$$

El valor de  $J_{Id}$  dado por Sumpter y Turner [3] se dividirá en dos partes , una elástica y otra plástica , quedando definida por la formulación (20)..(24) .

$$J_{Id} = J_{de} + J_{dp} \quad (20)$$

$$J_{de} = \eta_e \frac{E_e}{B \cdot (W - a)} \quad (21)$$

$$J_{dp} = \eta_p \frac{E_p}{B(W - a)} \left( \frac{W - a_{eff}}{W - a} \right) \quad (22)$$

$$\eta_e = \frac{2 \cdot F_{gy} \cdot S^2 (W - a)}{s_{gy} \cdot E \cdot B \cdot W^3} \cdot F_m \left( \frac{a}{W} \right) \cdot (1 - v^2) \quad (23)$$

$$\eta_p = \begin{cases} 2.0 & \frac{a}{W} \geq 0.282 \\ d_0 + d_1 \left( \frac{a}{W} \right) - d_2 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + d_3 \left( \frac{a}{W} \right)^3 & \frac{a}{W} < 0.282 \end{cases} \quad (24)$$

$$(d_0, d_1, d_2, d_3) = (0.32; 12.0; -49.5; 99.8)$$

El tamaño de grieta efectiva ,  $a_{eff}$  , se obtiene a partir de la ecuación que relaciona la fuerza aplicada con el desplazamiento (25) , suponiendo que el material sigue la ley de Ramber-Osgood .

$$\frac{F(t) \cdot W}{(W - a)^2} = k \cdot \left( \frac{\Delta_{pl}(t)}{W} \right)^n \quad (25)$$

Estando definido el desplazamiento plástico del punto de carga mediante la fórmula (26) .

$$\Delta_{pl}(t) = \delta(t) - \delta(t = t_{gy}) \quad (26)$$

Efectuando una regresión de potencia sobre la ecuación (25) , se obtienen los factores  $k$  y  $n$  , quedando expresado el crecimiento de la grieta por (27) . En la Fig.4 se puede apreciar la evolución del crecimiento de grieta  $\Delta a$ .

$$\Delta a = W - \left\{ \sqrt{\frac{F \cdot W^{n+1}}{k \cdot \Delta_{pl}^n}} + a \right\} \quad (27)$$

El tamaño de grieta efectiva vendrá dado por (28) , en el instante  $t = t_{cg}$  .

$$a_{eff} = a + \Delta a \quad (28)$$

El valor de  $J_{Id}$  mediante el 3er. método se determina a partir de la ecuación (29) , para tensión plana.

$$J_{Id} = \frac{K_{Id}^2}{E_d} \quad (29)$$

## 6.RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados se muestran en las Figs. 5 a 8, en función del tamaño de grieta  $a/W$  . Se ha representado el valor medio y el rango de error en las medidas , definido como la variación estándar ,  $\sigma_n$ , de los ensayos.

En la Fig.5 se aprecia la evolución del módulo elástico dinámico para cada uno de los tamaños de grieta de las probetas . Los valores resultan claramente inferiores a los determinados en los ensayos estáticos de tracción (Tabla 1) , lo que puede ser debido a las plastificaciones en los apoyos y en el punto de aplicación de la carga . Se observa un aumento de  $E_d$  con el tamaño de grieta ya que las cargas de impacto , y por tanto las plastificaciones , son menores .

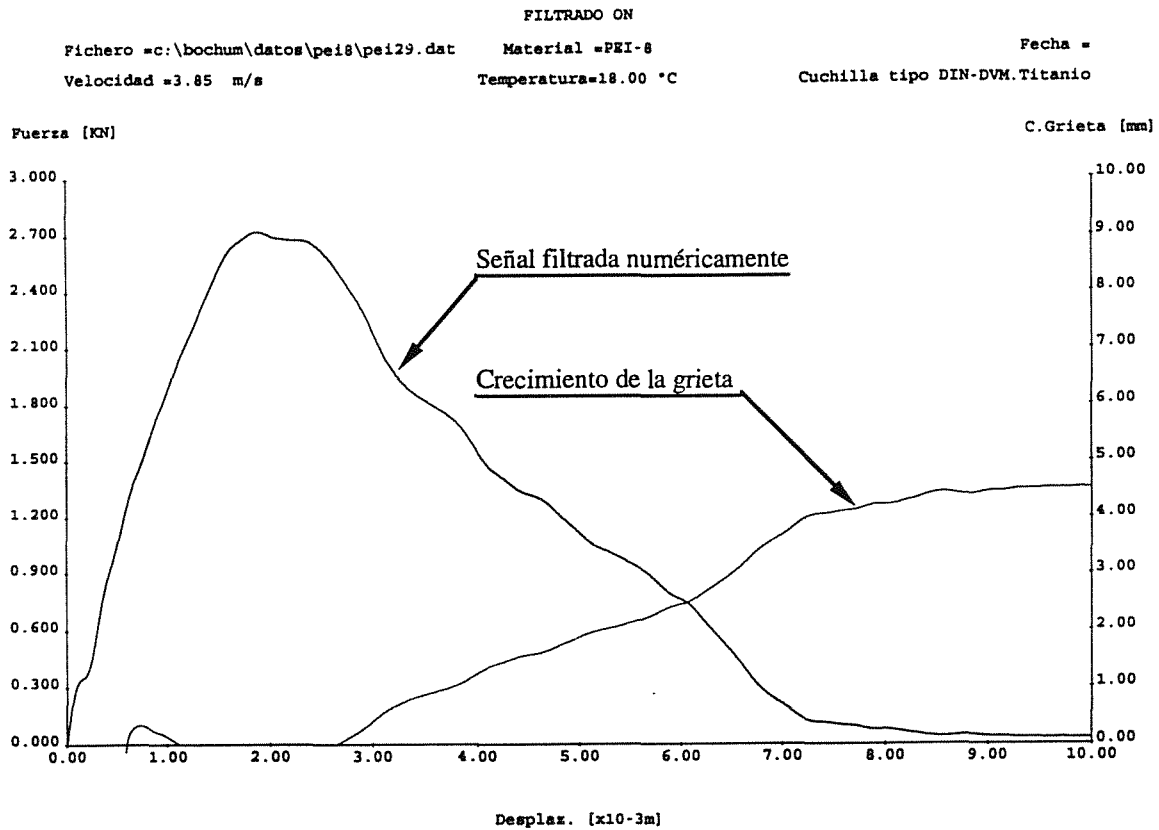


Fig.4 Evolución del crecimiento de grieta  $a_{eff}$ .

En la Fig.6 se muestra la variación del factor dinámico de intensidad de tensiones con el tamaño de grieta. No se observa una variación importante del mismo con el tamaño de grieta. El valor de cálculo de la tenacidad dinámica,  $K_{Id}^c$ , definido por (30), ha sido:

$$K_{Id}^c = \bar{K}_{Id} - 2 \cdot \sigma_n \quad (30)$$

$$K_{Id}^c = 1808 \text{ MN/m}^{3/2}$$

Siendo  $\bar{K}_{Id}$  el valor medio.

En la Fig.7 se ha representado la evolución de la energía de iniciación de fractura para diferentes tamaños iniciales de grieta, según los autores ya citados. Se observa una importante disminución de  $J_{Id}$  con el tamaño de grieta, que posiblemente sea debida al incumplimiento de los criterios de ensayos denominados "J-Controlados"(31)(32).

$$B > 25 \cdot \frac{J}{\sigma_0} \quad (31)$$

$$(W-a) \geq 15 \dots 25 \left( \frac{J}{\sigma_0} \right) \quad (32)$$

En nuestro caso, dichas condiciones tienen por valor:

$$B > 17 \text{ mm}$$

$$(W-a) > 10 \dots 17 \text{ mm}$$

Asimismo se observa un paralelismo entre los valores obtenidos mediante ambas formulaciones, con mayores diferencias en tamaños de grieta menores. Ello puede ser debido a que el factor  $\eta_p$  que afecta a la energía plástica es inferior en la formulación de Sumpter y Turner, para tamaños de grieta menores de 0.282 (24).

En la Fig.8. se representa el valor de  $J_{Id}$  con el tamaño de grieta, obtenido a partir de la tenacidad, observándose, asimismo, diferencias importantes para pequeños tamaños de grieta.

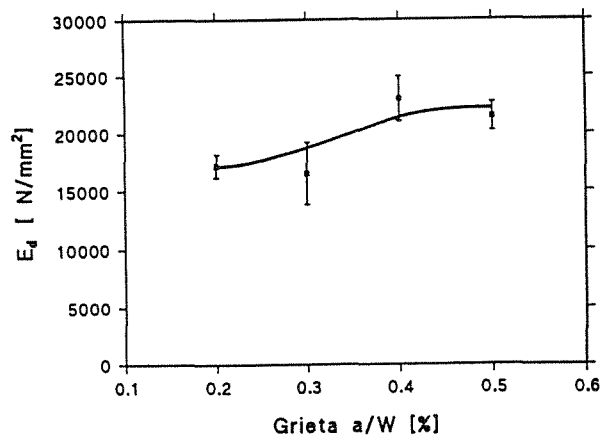


Fig.5 Evolución del módulo elástico dinámico  $E_d$

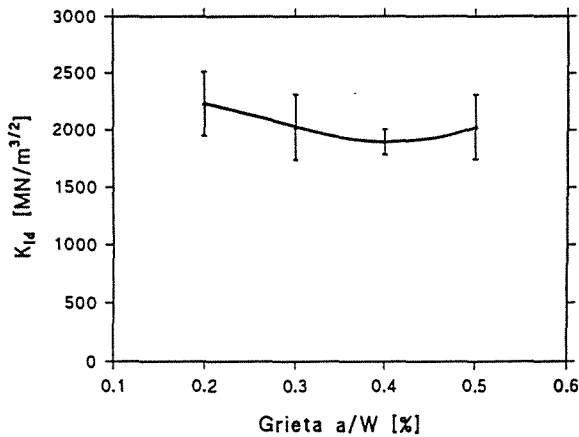


Fig.6 Evolución de la tenacidad a fractura  $K_{Id}$

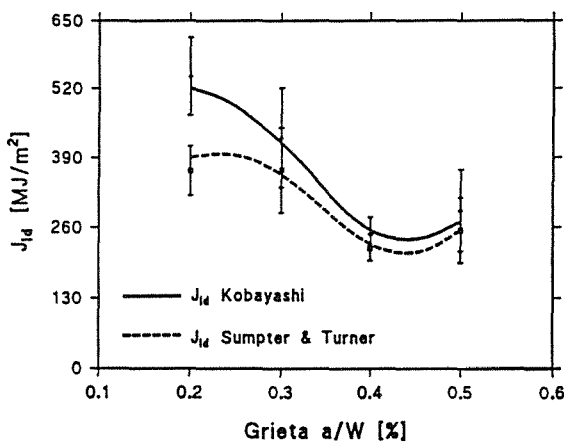


Fig.7 Evolución de la energía de iniciación de fractura.

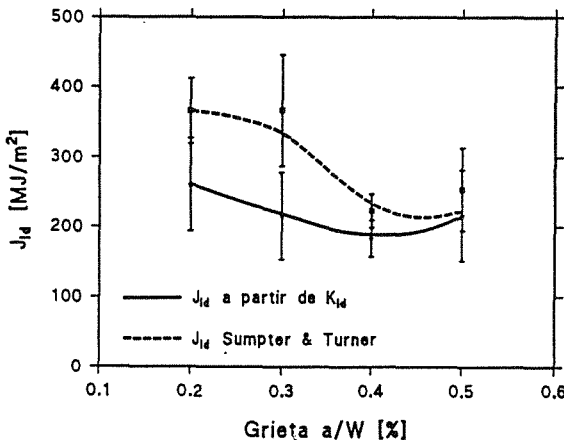


Fig.8 Comparación entre los valores de  $K_{Id}$  y  $J_{Id}$

7.CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos , se apuntan las siguientes conclusiones :

- Los ensayos mediante el péndulo Charpy instrumentado proporcionan una valiosa y rápida información acerca del comportamiento dinámico del material .

- Para la obtención del módulo elástico dinámico del material resulta preciso conocer el valor de las justificaciones locales en los apoyos y el punto de carga .

- Los valores de la energía de iniciación de fractura obtenidos mediante diferentes formulaciones , presentan importantes diferencias con tamaños de grieta menores de 0.4 , por lo que parece apropiado realizar la caracterización de los materiales con prefisuras comprendidas entre 0.4 a 0.6  $a/W$ .

8.AGRADECIMIENTOS

El presente artículo se ha realizado en el marco del Proyecto de Investigación "Técnicas para la determinación de la tenacidad a fractura dinámica en aceros industriales", (Ref. PA-MAT92-03) financiado a través del Plan Regional de Investigación del Principado de Asturias , y con participación de FICYT, ENSIDESA y la Universidad de Oviedo .

Agradecemos especialmente al Grupo de Mecánica experimental de la Universidad de Bóchum y , en particular , al Dr. J.F.Kalthoff el uso de sus Laboratorios y la atención prestada .

9.REFERENCIAS

- [1] KOBAYASHI, T. *et.al.*, "Evaluation of dynamic fracture toughness parameters by instrumental Charpy impact test." . Engineering Fracture Mechanics. Vol 24, pp 773-782, 1986.
- [2] KOBAYASHI T. *et.al* . "Evaluation of Dynamic Crack Initiation and Growth Toughness by Computer Aided Impact Testing Systems." .Nuclear Engineering and Design 111, pp.27-33, 1989.
- [3] SUMPTER, J.D.G ; TURNER, C.E. "Method for Laboratory determination of  $J_c$ " . ASTM STP 601, pp 1-14. (1976).
- [4] "Modificación de las propiedades mecánicas del PEI reforzado con fibra de vidrio unidireccional tras envejecimiento acelerado". Viña, J., Sánchez, A. Lamela, M.J., Belzunce, F. J. Actas de la IV Reunión Nacional de Materiales. pp. 204 - 205. 1993.
- [5] COZ DIAZ, J.J. " Aplicación de técnicas experimentales y métodos numéricos en la determinación de los parámetros de fractura dinámica " .Trabajo de Investigación .ETSII-Gijón (1993).
- [6] ASTM E 24.03.03, "Proposed Standard method of test for instrumental impact testing of precracked Charpy specimens of metallic materials ."Draft 2d, ASTM, 1981.
- [7] M.BELLANGER. "Tratamiento numérico de la señal .Teoría y práctica" Ed. Masson (1991).
- [8] KALTHOFF J.F., "On the measurement of dynamic fracture toughness.A review of recent work." International Journal of Fracture 27, pp.277-98.