

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 4

HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

4.1.- Preparación de probetas.

Las probetas para la realización de los diferentes ensayos fueron obtenidas por inyección sobre un molde normalizado ASTM D-647. La presión de inyección se mantuvo en un nivel bajo para evitar promover una orientación preferente del material en la probeta, los valores empleados se han indicado en el capítulo 2. Posteriormente a su inyección las probetas se sometieron a un recocido a 70 °C durante 6 horas al objeto de aliviar las tensiones residuales internas.

4.1.1.- Probetas de tracción.

Para la ejecución de los ensayos de tracción [ASTM D638] se emplearon probetas normalizadas con forma de halterio, según la tipología I del molde. Las dimensiones principales de la probeta se muestran en la figura 4.1

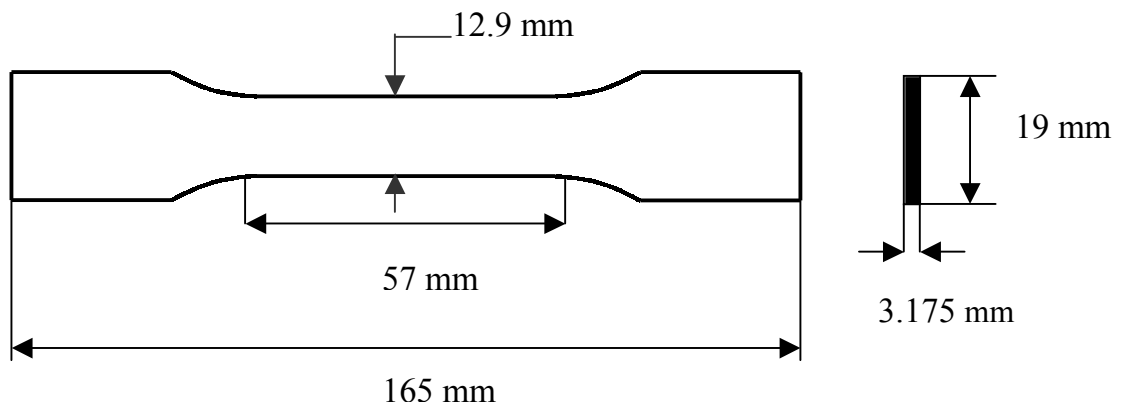


Figura 4.1.- Probeta para el ensayo de tracción.

4.1.2.- Probetas de flexión.

Las probetas necesarias para el ensayo de flexión se obtuvieron como resultado de cortar por la mitad barras prismáticas moldeadas por inyección en la figura 4 del molde de la norma ASTM D-647. La geometría y las dimensiones resultantes de la probeta se muestran en la figura 4.2.

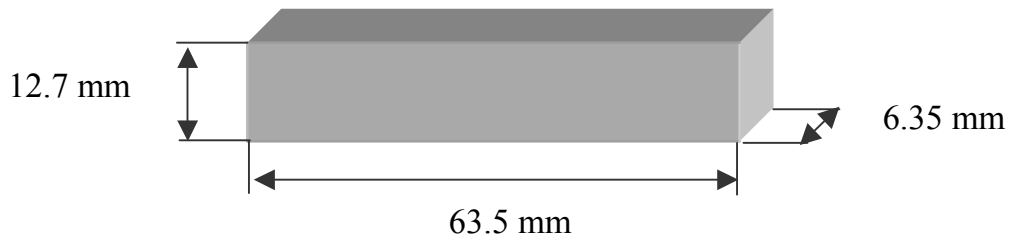


Figura 4.2.- Probetas para los ensayos de flexión.

4.1.3.- Probetas de compresión.

En los ensayos de compresión fueron empleados dos tipos de probetas diferentes. Por un lado las prismáticas de dimensiones:

$$6.35 \text{ mm} * 12.7 \text{ mm} * 127 \text{ mm}.$$

y como segunda opción, la zona central calibrada de las probetas de tracción, cuyas dimensiones son:

$$3.175 \text{ mm} * 12.9 \text{ mm} * 57 \text{ mm}.$$

4.1.4.- Probetas para el ensayo de caída de dardo.

Las probetas en forma de disco empleadas para el ensayo de caída de dardo se corresponden con la figura 2 del molde de inyección correspondiente a la norma ASTM D647. De acuerdo a esta normativa se inyectaron discos con las dimensiones que se muestran en la figura 4.3.

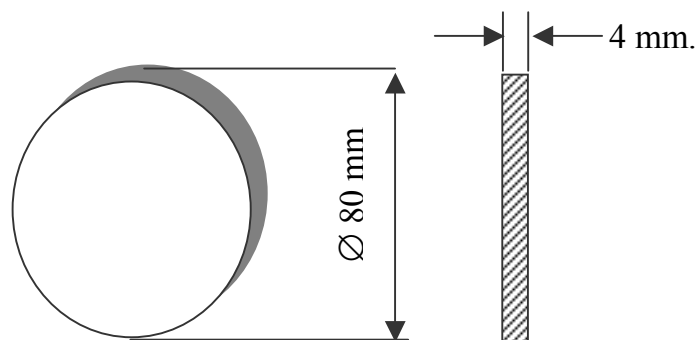


Figura 4.3.- Geometría y dimensiones de las probetas de disco.

4.1.5.- Probetas para los ensayos de la mecánica de la fractura.

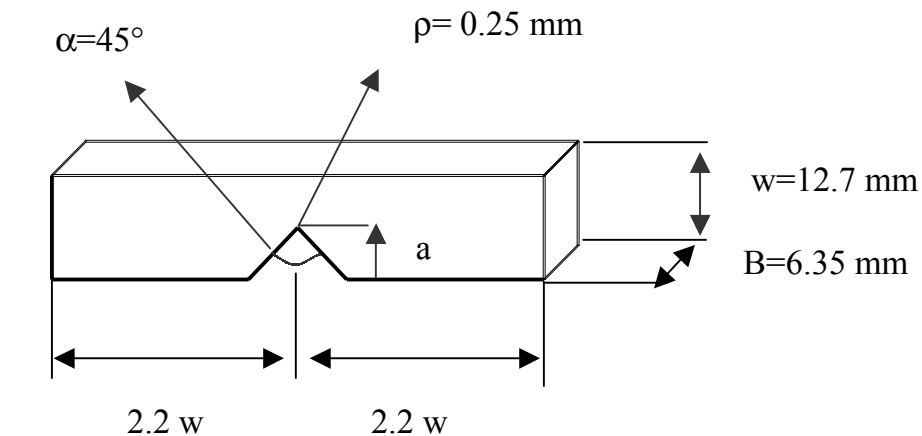
Para los ensayos de mecánica de la fractura se han utilizado exclusivamente probetas

de flexión por tres puntos con geometría SENB cuyas dimensiones principales son las mostradas en la figura 4.4.

Las dimensiones guardan las relaciones geométricas establecidas en los protocolos de norma del EGF¹⁹ [1990-a] y del ESIS20 [1991].

$$4B > W \geq 2B$$

Figura 4.4.- Geometría y dimensiones principales de las probetas SENB empleadas en



los ensayos de mecánica de la fractura.

Las entallas fueron mecanizadas en una entalladora motorizada marca CEAST de acuerdo a lo especificado en la normativa ASTM D-256. El radio de entalla es de 0.25 mm y el ángulo de la misma de 45°. Con posterioridad, y previamente a la realización de los ensayos, las entallas se agudizaron mediante una cuchilla de afeitado dejando transcurrir un tiempo mínimo de dos horas antes de realizar el ensayo.

4.2.- Caracterización mecánica.

La caracterización mecánica de los compuestos PS-microesferas de vidrio se realizó siguiendo dos procedimientos de ensayo diferentes: a baja velocidad de deformación y a alta velocidad de deformación.

La primera tipología implicó la realización de diferentes procedimientos clásicos como los de compresión, flexión y tracción en los que el cambio en la velocidad del ensayo está en general limitado por las propias características de las máquinas empleadas. La caracterización a alta velocidad de deformación se realizó íntegramente sobre probetas en forma de disco siguiendo la configuración normalizada del ensayo por caída de dardo [ISO/DIS6603/1].

¹⁷ Siglas del Grupo Europeo de Fractura

²⁰ Siglas de la Sociedad Europea de Integridad Estructural.

4.2.1.- Ensayos a baja velocidad de deformación.

En todos los casos se utilizaron aparatos universales de ensayo de velocidad de desplazamiento constante dotados de equipos informatizados para la toma y procesamiento automático de los datos. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente y a diferentes velocidades de deformación tomando un mínimo de 10 probetas por ensayo y velocidad.

4.2.1.1- Ensayo de tracción.

Las curvas tensión-deformación se obtuvieron siguiendo el procedimiento normalizado ASTM D-638 empleando las probetas de tipo halterio.

Se ha utilizado un equipo universal de ensayos ADAMEL modelo DY-34, en el cual se ha variado la velocidad de separación de mordazas entre 0.1 y 50 mm/min. La velocidad de deformación extensional en estos ensayos puede obtenerse a través de la expresión:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0} \quad (4.1)$$

siendo v la velocidad de separación de las mordazas, y L_0 la distancia entre ellas.

Una vez obtenida la representación de la curva tensión-deformación, se determinaron las siguientes magnitudes:

a).- Módulo de elasticidad o de Young (E): Valor inicial de la pendiente de la curva tensión-deformación.

b).- Tensión de fluencia (σ_y)

$$\sigma_y = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (4.2)$$

c.- Alargamiento en el límite de fluencia (ε_y):

$$\varepsilon_y = \frac{L_y - L_0}{L_0} * 100 \quad (4.3)$$

d.- Alargamiento a la rotura (ϵ_r)::

$$\epsilon_r = \frac{L_r - L_0}{L_0} * 100 \quad (4.4)$$

e.- Energía en el límite de fluencia (U_y): Se computa como el área situada bajo la curva carga-desplazamiento, tomando como límite el punto de fluencia.

4.2.1.2.- Ensayo de compresión.

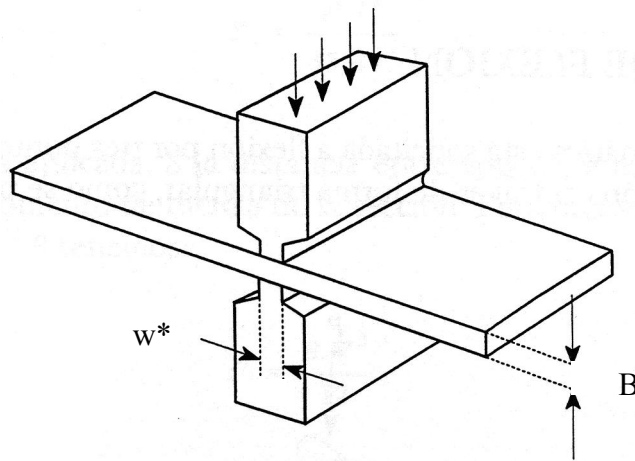
El ensayo de resistencia a compresión cuya configuración se muestra en la figura 4.5, se llevó a cabo en 3 disposiciones diferentes según indica la tabla 4.1. La velocidad del ensayo se mantuvo constante en todos los casos e igual a 1mm/min.

Tabla 4.1.- Magnitudes del ensayo de compresión.

Espesor probeta B (mm.)	6.35	3.175	6.35
Ancho mordaza w* (mm.)	20	6.4	6.4

Figura 4.5.- Geometría del ensayo de compresión.

En los dos primeros casos se cumple la relación de deformación plana establecida por Williams [1964]:



$$2 \leq \frac{W^*}{B} \leq 4 \quad (4.5)$$

La velocidad de deformación puede obtenerse a partir de la ecuación:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0} \quad (4.6)$$

siendo v la velocidad de acercamiento del bastidor y L_0 la longitud inicial o espesor de las probetas.

Para mejorar el contacto entre las superficies y limitar los efectos de fricción entre materiales se depositó una capa de bisulfuro de molibdeno en las superficies de contacto bastidor/probeta.

La resistencia a compresión fue determinada como el valor de la tensión en el límite de fluencia de acuerdo con la expresión:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_Y}{A_0} \quad (4.7)$$

siendo P_Y la fuerza en el límite de fluencia y A_0 el área sobre la que actúa dicho esfuerzo.

4.2.1.3.- Ensayo de flexión por tres puntos.

Las probetas empleadas en el ensayo de flexión se corresponden con las descritas en el apartado 4.1.2 manteniéndose la distancia entre apoyos utilizada en los ensayos de Mecánica de la Fractura ($S=50.8$ mm.).

Asumiendo la distribución de tensiones similar a la mostrada en la figura 4.6 se determinaron los valores del módulo del material en flexión E_f y de la tensión en la cara de tracción (máxima) o resistencia a la flexión σ_f . La velocidad de ensayo empleada fue para todos los casos de 1 mm/min, siendo la velocidad de deformación del material la descrita mediante la relación:

$$\dot{\varepsilon}_f = \frac{6vw}{S^2} \quad (4.8)$$

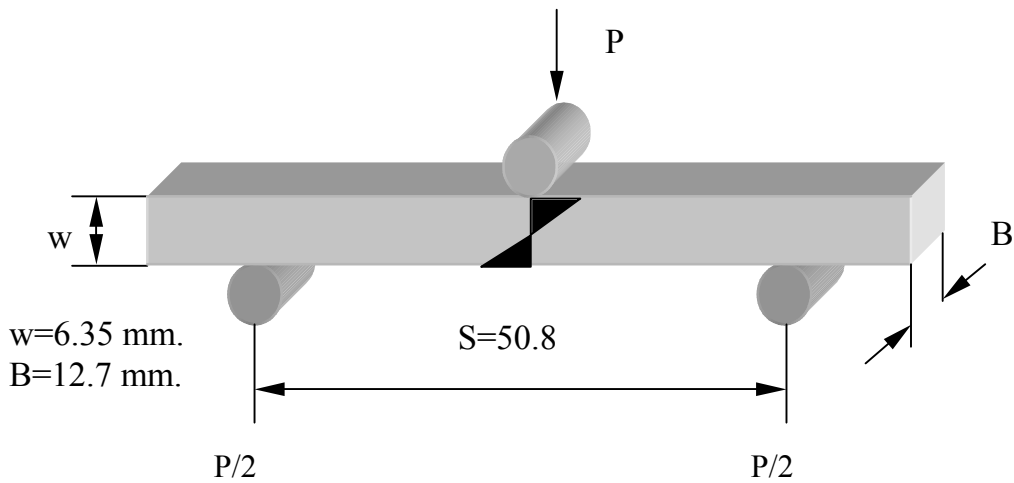


Figura 4.6.- Disposición experimental del ensayo de flexión y distribución de tensiones en la sección central de la probeta.

Cuando se aplica una carga P en el centro de una probeta simplemente apoyada, la deflexión o flecha de su punto central viene dada por la ecuación:

$$Y^* = \frac{P S^3}{48 E I} \quad (4.9)$$

dónde I es el momento de inercia de la sección transversal de la probeta que para una sección rectangular de altura w y espesor B vale:

$$I = \frac{B w^3}{12} \quad (4.10)$$

Considerando las ecuaciones 4.9 y 4.10 puede obtenerse el valor del módulo de elasticidad en flexión a partir de:

$$E_f = \frac{S^3}{4 B w^3} \left[\frac{\Delta P}{\Delta Y} \right] \quad (4.11)$$

La parte encerrada entre corchetes representa la variación de la fuerza respecto a la deflexión en el dominio elástico del material, es decir, la pendiente inicial del registro carga-desplazamiento, E_f proporciona un valor aproximado del módulo de Young.

Por efecto de la concentración de la carga se genera un nivel elevado de indentación tanto en su punto de aplicación como en los puntos de apoyo, apareciendo un esfuerzo cortante que puede ser importante en magnitud. La deflexión de la probeta para esta situación puede ser obtenida a través de la ecuación desarrollada por Timoshenko:

$$Y^* = \frac{PS^2}{48EI} + \frac{PS}{2w} \left[\frac{3}{4G^*} - \frac{3}{10E} - \frac{3\nu}{4E} \right] - 0,21 \frac{P}{E} \quad (4.12)$$

Si se considera la relación entre el módulo de cizalla, G, y el módulo elástico (E):

$$E = 2G^* (1 + \nu) \quad (4.13)$$

Asumiendo un coeficiente de poisson $\nu=0.32$ [Progelhof 1994] se llega a la expresión siguiente que resulta válida para niveles moderados de indentación:

$$E_f = \frac{S^3}{4Bw^3} \left[\frac{\Delta P}{\Delta Y^*} \right] \left[1 + 2,88 \left(\frac{w}{S} \right)^2 - 0,84 \left(\frac{w}{S} \right)^3 \right] \quad (4.14)$$

La tensión máxima en la cara de tracción, se obtiene a partir de la expresión:

$$\sigma_f = \frac{3PS}{2Bw^2} \quad (4.15)$$

4.2.2.- Ensayos a alta velocidad de deformación o impacto.

Los ensayos de impacto son uno de los métodos empleados en la evaluación la capacidad de un determinado material para soportar cargas aplicadas a elevada velocidad. El parámetro empleado como referente para estos ensayos es la resistencia a impacto que evalúa la energía por unidad de superficie involucrada en la fractura del material. La resistencia a impacto no es, sin embargo, una propiedad invariable del material ya que depende de la configuración geométrica del ensayo así como de otras contribuciones que acompañan a la rotura.

Gran parte de los inconvenientes han sido subsanados con la utilización de equipos de impacto instrumentado en los que mediante el registro de la señal fuerza-tiempo es posible obtener la energía consumida por la probeta en su deformación y rotura y obtener los parámetros de fractura.

El principal problema que puede presentarse es que los valores de fuerza que se registran y los que realmente actúan sobre el impactor pueden no coincidir. La diferencia, como ha sido demostrado por Kalthoff [1985] y Williams [1987], está originada por la presencia de efectos dinámicos asociados al método de ensayo que originan curvas fuerza-tiempo oscilantes. La magnitud de los efectos dinámicos se minimiza si la velocidad del impactor es relativamente baja y además la masa de la probeta es pequeña frente a la masa del impactor [Casiraghi 1988], [Martínez 1988].

A lo largo de esta Tesis se han utilizado las dos técnicas más comunes para la caracterización de los materiales bajo cargas súbitas: El método de caída de dardo y el método de impacto Charpy. Este último, aunque puede proporcionar una estimación del módulo de elasticidad se ha empleado fundamentalmente para la obtención de los parámetros de fractura a alta velocidad de deformación por lo que se tratará dentro del apartado relacionado con los ensayos de mecánica de la fractura.

Atendiendo a la energía con la que el impactor golpea la probeta los ensayos de impacto pueden clasificarse en ensayos con exceso de energía y ensayos de baja energía. En la primera configuración se trabaja con exceso de energía en el impactor a fin de aproximarnos a una velocidad constante durante el impacto y simplificar el cálculo de la energía absorbida [Martínez 1994-c]. En la metodología de baja energía, la energía disponible en el impactor es reducida, y dependiendo de su nivel puede dañar más que destruir la muestra. En esta disposición la instrumentación obvia la necesidad de velocidad constante pudiéndose analizar el material en el rango elástico y los procesos de iniciación y propagación de grietas. La baja velocidad del impactor hace que los efectos inerciales sean pequeños. En la configuración de baja energía son aplicables a su vez dos modelos de análisis: El modelo de flexión y el de indentación.

En el cuadro de la figura 4.7 se resumen los modelos o técnicas de impacto empleadas a lo largo de este trabajo.

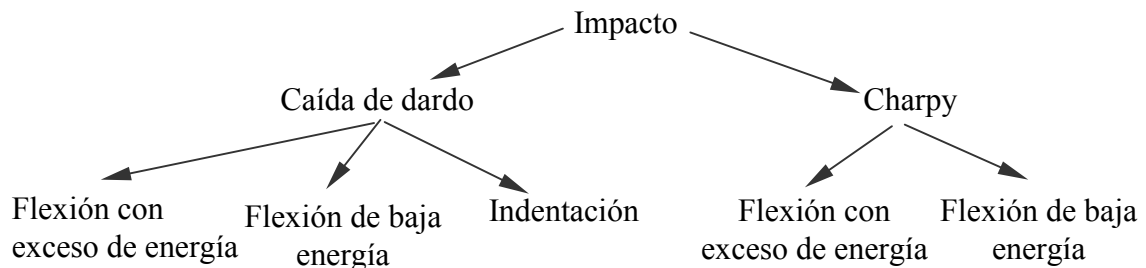


Figura 4.7.- Resumen de ensayos de impacto realizados.

4.2.2.1.- Ensayos de caída de dardo instrumentado.

El ensayo de caída de dardo consiste en llevar una masa definida a una cierta altura para posteriormente dejarla caer libremente sobre la probeta. La energía cinética de la masa en el momento del impacto se determina a través de una célula fotoeléctrica situada en la parte inferior del equipo. La parte inferior del impactor tiene forma semiesférica al objeto de conseguir un reparto biaxial del esfuerzo aplicado lo que permite evidenciar las zonas más débiles de la probeta. Las fuerzas originadas son tomadas indirectamente a través de un sistema de captación en el que se miden las deformaciones que sufre el dardo. Esta señal se transforma y envía a un ordenador

donde se procesa, representa y evalúa.

A.- ASPECTOS GEOMETRICOS.

La geometría del método de caída de dardo sobre discos [ISO –DIS 6603/1], [ISO-DIS 6603/2] se esquematiza en la figura 4.8. La respuesta elástica se puede obtener aplicando la teoría estándar para la deflexión elástica de discos circulares cargados en el centro y simplemente soportados [Timoshenko 1984].

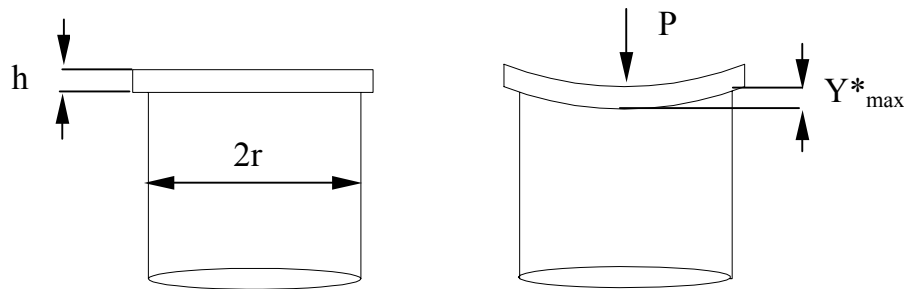


Figura 4.8.- Geometría del ensayo de caída de dardo.

La deflexión máxima Y^*_{\max} al aplicar la fuerza P , en el centro de un disco circular de altura h y radio r , simplemente apoyado, ocurre en su centro y viene dada por:

$$Y^*_{\max} = \frac{(3 + \nu)Pr^2}{16\pi(1 + \nu)D^*} \quad (4.16)$$

dónde ν es el coeficiente de Poisson y D^* es la rigidez de flexión del disco:

$$D^* = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (4.17)$$

combinando las ecuaciones se obtiene:

$$E = \frac{6(3 + \nu)(1 - \nu)r^2}{8\pi h^3} \frac{P}{Y^*_{\max}} \quad (4.18)$$

Si se asume que se puede aplicar la teoría de la elasticidad, la pendiente inicial de las curvas fuerza-desplazamiento nos daría como resultado el valor del módulo elástico. Si la concentración de carga es puntual, la máxima tensión de tracción ocurre en el centro de la superficie inferior del disco y su valor se aproxima por la relación:

$$\sigma_t = \frac{P}{h^2} \left[(1 + \nu) \left(0.485 \log \frac{r}{h} + 0.52 \right) + 0.48 \right] \quad (4.19)$$

Para la geometría esquematizada en la figura 4.8, la teoría para la deformación elástica de discos se cumple si el disco es suficientemente delgado (la relación entre el espesor y el diámetro es menor de 0.2) y la masa de la probeta despreciable respecto de la del impactor.

B.- MODELO DE FLEXIÓN CON EXCESO DE ENERGÍA EN EL IMPACTOR

En este proceso el impactor que golpea la muestra se deja caer desde una altura de caída tal que la energía potencial del dardo esté en exceso respecto de la necesaria para romper las probetas.

Si distinguimos con el subíndice cero a los valores que corresponden justo al instante inicial t_0 cuando el impactor empieza a tomar contacto con la muestra, tenemos que en ese instante la velocidad es V_0 y la energía E_0 . Ambos valores los podemos determinar experimentalmente.

$$E_0 = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (4.20)$$

donde m es la masa del impactor

$$V_0 = \sqrt{2gH^*} \quad (4.21)$$

siendo g la aceleración de la gravedad y H^* la altura de caída del impactor.

Este modelo para la geometría de caída de dardo puede analizarse aplicando la segunda ley de Newton y el primer principio de la Termodinámica. Las ecuaciones representativas y el esquema del ensayo están incluidas en la figura 4.9.

A partir del registro de la fuerza en función del tiempo se pueden calcular los gráficos de la velocidad, desplazamiento y energía en función del tiempo, y cruzando los datos, las gráficas de la fuerza y de la energía en función del desplazamiento.

El análisis estático es aplicable cuando la pérdida de velocidad del impactor durante el ensayo es inferior al 20 %. Esta configuración de ensayo es la que origina mayores efectos inerciales.

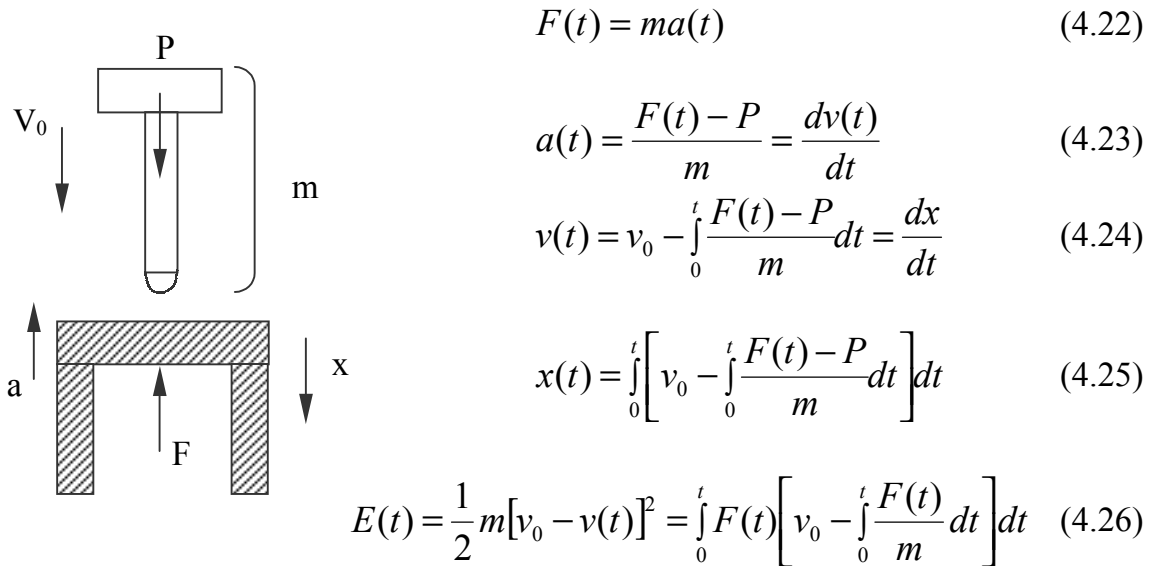


Figura 4.9.- Modelo y ecuaciones de cálculo para la geometría de caída de dardo

C.- MODELO DE FLEXIÓN DE BAJA ENERGÍA.

La colisión transversal de un impactor rígido con una probeta uniforme, lineal y elástica puede modelarse reemplazando la probeta por un resorte lineal de constante K' , donde K' representa la fuerza estática requerida para producir una deflexión transversal unitaria de la probeta.

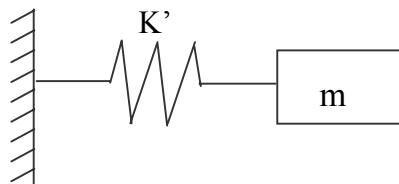


Figura 4.10.- Esquema resorte-masa correspondiente al modelo de flexión de baja energía.

Si la masa de la probeta es despreciable respecto a la masa del impactor, el modelo de la figura 4.10 se reduce a un solo grado de libertad siendo m es la masa equivalente del sistema.

En el caso de la geometría de caída de dardo, la masa equivalente m es la del impactor, y la constante elástica viene dada por:

$$K' = \frac{P}{Y^*_{\max}} = \frac{16\pi(1+\nu)D^*}{(3+\nu)r^2} \quad (4.27)$$

Si aplicamos la segunda ley de Newton al movimiento conjunto de la masa y del resorte se obtiene:

$$P = -K'x = m\ddot{x} \quad (4.28)$$

$$m\ddot{x} + K'x = 0 \quad (4.29)$$

donde x es la elongación y \ddot{x} es la aceleración.

Aplicando la transformada de Laplace se encuentra que la solución es del tipo [Roca 1981]:

$$x = A_1 \cos(w_n t) + A_2 \sin(w_n t) \quad (4.30)$$

siendo w_n la frecuencia angular o propia del sistema:

$$w_n = \sqrt{\frac{K'}{m}} \quad (4.31)$$

y f_n la frecuencia natural o propia del movimiento oscilatorio:

$$f_n = \frac{w_n}{2\pi} \quad (4.32)$$

y el periodo τ_n del evento será es el inverso de la frecuencia:

$$\tau_n = \frac{2\pi}{w_n} \quad (4.33)$$

Aplicando como condiciones de contorno que cuando $t=0$, $x=x_0$ y $v=v_0$ tenemos que:

$$x(t) = A_1 \cos(w_n t) + A_2 \sin(w_n t) \quad (4.34)$$

$$\dot{x}(t) = -A_1 w_n \sin(w_n t) + A_2 w_n \cos(w_n t) \quad (4.35)$$

lo que implica que $A_1=x_0$ y $A_2=v_0/w_n$ siendo ahora la solución:

$$x(t) = x_0 \cos(w_n t) + \frac{v_0}{w_n} \sin(w_n t) \quad (4.36)$$

que puesta en función del ángulo de fase, resulta:

$$x(t) = A'' \sin(w_n t + \xi) \quad (4.37)$$

donde:

$$A'' = \sqrt{(A_1^2 + A_2^2)} = \sqrt{\left(x_0^2 + \left(\frac{v_0}{w_n} \right)^2 \right)} \quad (4.38)$$

y:

$$\xi = \arctan \frac{A_1}{A_2} = \arctan \frac{x_0 w_n}{v_0} \quad (4.39)$$

Si consideramos que $t=0$ en el instante en que el impactor va a golpear la probeta, la deflexión es $x_0=0$, y la velocidad del impactor dependerá de la altura h de la que cae $v_0=(2gh)^{1/2}$, la energía disponible en el impactor será $E_0=mgh=1/2 mv_0^2$, luego:

$$A'' = \frac{v_0}{w_n} \quad (4.40)$$

$$\xi = 0 \quad (4.41)$$

$$\ddot{x} = -v_0 w_n \sin(w_n t) \quad (4.42)$$

entonces la fuerza ejercida por el impactor sobre la probeta es:

$$P(t) = m \ddot{x} = -mv_0 w_n \sin(w_n t) = -\sqrt{(2E_0 K)} \sin \sqrt{\frac{K'}{m}} t = -P_{\max} \sin \frac{\pi t}{t_c} \quad (4.43)$$

de donde, la fuerza máxima es:

$$P_{\max} = \sqrt{(2E_0 K')} \quad (4.44)$$

y t_c es el tiempo de contacto:

$$t_c = \pi \sqrt{\frac{m}{K'}} \quad (4.45)$$

Este modelo nos predice el comportamiento elástico y lineal de la probeta en el que el registro de la fuerza en función del tiempo tendrá una forma semisinusoidal. La fuerza máxima dependerá fundamentalmente de la energía total del impactor y el tiempo de contacto será función de la masa del impactor. Ambos términos dependerán también de la constante elástica de la probeta, que como se ha indicado, es función del módulo elástico del material y también de la geometría de la probeta.

Aumentando la masa del impactor, aumentamos la energía disponible en el instante del impacto y consecuentemente la fuerza máxima ejercida sobre la probeta y el tiempo de contacto entre la probeta y el impacto. Si se aumenta la altura de caída, aumenta la energía disponible en el momento del impacto y la fuerza máxima, el tiempo de contacto no varía, pero sí lo hace la velocidad del impactor en el instante de golpear la probeta.

Cuando el comportamiento del material deja de ser elástico y lineal, sea por rotura, por deformación plástica o por otras razones, se dejará de cumplir el modelo y las gráficas de la fuerza en función del tiempo registrados experimentalmente se diferenciarán de los mismos gráficos teóricos (figura 4.11).

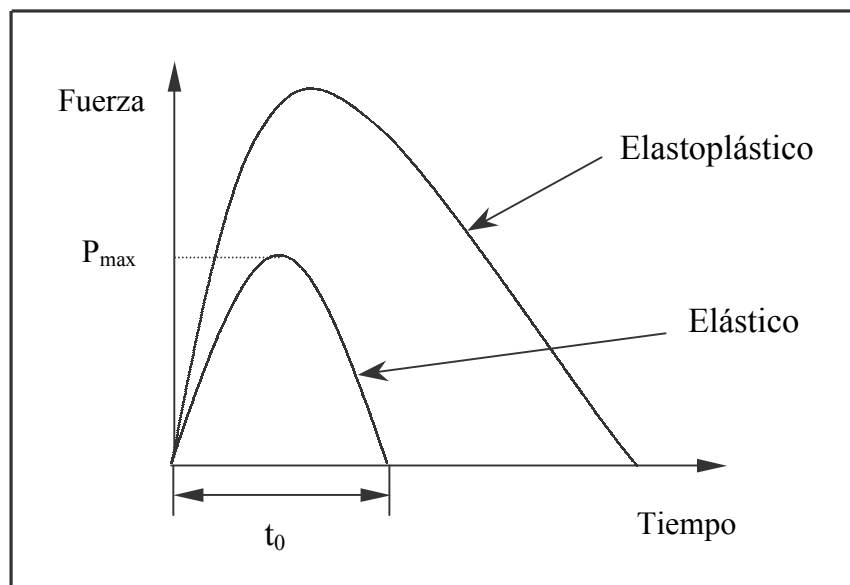


Figura 4.11.- Esquema de la representación experimental de las curvas fuerza-tiempo

Para la determinación del módulo de Young, se representa la fuerza máxima registrada normalizada respecto del espesor de la probeta frente a la velocidad del ensayo v_0 , del valor de la pendiente se obtiene el valor de $K' (=P/Y^*_{max})$ y por sustitución en la ecuación 4.18 se obtendría el valor del módulo de Young.

$$P_{\max} = \sqrt{2E_0 K'} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{mv_0^2}{2}} \sqrt{K'} = \sqrt{mK'} v_0 \quad (4.46)$$

con:

$$V_0 = \sqrt{2gH} \quad (4.47)$$

En la práctica las ecuaciones empleadas para el cálculo se obtienen de la sustitución de las expresiones 4.20 y 4.27 en la 4.44, la relación resultante queda:

$$P_{\max} = \sqrt{2E_0 K} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{mv_0^2}{2}} \sqrt{\frac{16\pi(1+\nu)Eh^3}{(3+\nu)a^2 12(1-\nu^2)}} \quad (4.48)$$

y despejando y simplificando:

$$\frac{P_{\max}}{h^{3/2}} = \sqrt{\frac{4\pi m}{3r^2(3+\nu)(1-\nu)}} v_0 \sqrt{E} \quad (4.49)$$

Llamando genéricamente f al coeficiente que multiplica v_0 en la ecuación anterior, el valor del módulo se obtiene por:

$$E = \left(\frac{P_{\max}}{f h^{3/2}} \right)^2 \quad (4.50)$$

Adicionalmente es posible realizar el cálculo a través del tiempo de contacto y independientemente de la velocidad del ensayo. A partir de los tiempos de contacto registrados experimentalmente, y una vez se han normalizado para el espesor de la probeta, conocida la masa del impactor puede averiguarse K' por la ecuación 4.45, y como $K' = P/Y^*$ procediendo de igual manera que en el método anterior se halla E .

$$P_{\max} = \sqrt{(2E_0)} \sqrt{\frac{4\pi(1+\nu)Eh^3}{3r^2(3+\nu)(1-\nu)}} \quad (4.51)$$

$$t_c = \frac{\pi \sqrt{m}}{\sqrt{\frac{4\pi E h^3}{3r^2(3+\nu)(1-\nu)}}} \quad (4.52)$$

Como resultados del ensayo se obtienen los registros de las curvas fuerza-tiempo y a partir de ellas se extraen los valores resultantes de la fuerza máxima (P_{\max}), del tiempo

en el que se adquiere la fuerza máxima (t_{max}) y del tiempo total de duración del impacto o tiempo de contacto (t_c).

Con los valores de P_{max} y t_c se determinan, los valores de los módulos elásticos y de la tensiones máximas en la cara sometida a tracción de las muestras en estudio por aplicación de la ecuación 4.19.

D.- MODELO DE INDENTACION

El modelo de indentación ha sido recopilado por Greszczuk [1982] y describe el contacto entre dos esferas elásticas e isotrópicas a partir de la conocida ley de Hertz. El contacto entre una esfera y una placa plana es un caso especial en el que el radio de una esfera es infinito. En este último caso la relación entre la fuerza de contacto, P y la indentación, α , puede expresarse como:

$$P = n\alpha^{3/2} \quad (4.53)$$

cuando el diámetro del contorno de la superficie de contacto es pequeño comparado con el diámetro de la esfera.

El radio del contorno de la superficie de contacto es:

$$r_s = \left[\frac{3\pi P}{4} (k_1 + k_2) R_1 \right]^{1/3} \quad (4.54)$$

siendo:

$$n = \frac{4\sqrt{R_1}}{3\pi(k_1 + k_2)} \quad (4.55)$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \quad (4.56)$$

$$k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad (4.57)$$

Los subíndices 1 y 2 denotan indentador y placa respectivamente, R es el radio del indentador, ν es el coeficiente de Poisson, y E es el módulo de Young.

La ley de Hertz establecida para condiciones estáticas puede también aplicarse al choque cuando el tiempo de duración del contacto es grande comparado con las frecuencias naturales, las vibraciones del sistema pueden desestimarse. Tan pronto los

cuerpos entran en contacto, la fuerza de compresión P comienza a actuar cambiando las velocidades. Designando la masa y velocidad del impactor como m_1 y v_1 , y las correspondientes a la placa con el subíndice 2, las aceleraciones que definen la variación de las mismas son:

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -P \quad (4.58) \qquad m_2 \frac{dv_2}{dt} = -P \quad (4.59)$$

y la velocidad de la aproximación como consecuencia de la compresión:

$$\dot{\alpha} = v_1 + v_2 \quad (4.60)$$

luego:

$$\ddot{\alpha} = -P \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} = nM^* \alpha^{3/2} \quad (4.61)$$

siendo:

$$M^* = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (4.62)$$

Multiplicando ambos miembros por $\dot{\alpha}$

$$\frac{1}{2} d\left(\dot{\alpha}\right)^2 = -nM^* \alpha^{3/2} d\alpha \quad (4.63)$$

que integrando resulta

$$\dot{\alpha}^2 - v_0^2 = -\frac{4}{5} M^* n \alpha^{5/2} \quad (4.64)$$

donde v_0 es la velocidad de aproximación en el instante justo anterior al contacto.

La penetración máxima α_{\max} ocurre cuando $\dot{\alpha} = 0$

$$\alpha_{\max} = \left(\frac{5v_0^2}{4M^* n} \right)^{2/5} \quad (4.65)$$

que sustituyendo en la ecuación 4.53 conduce a:

$$P_{\max} = n^{2/5} \left(\frac{5v_0^2}{4M^*} \right)^{3/5} \quad (4.66)$$

La duración del contacto puede calcularse reescribiendo la ecuación 4.64 como

$$dt = \frac{d\alpha}{\sqrt{\left(v_0^2 - \frac{4}{5} M^* n \alpha^{5/2} \right)}} \quad (4.67)$$

que combinando con 4.65 y haciendo $x = \alpha/\alpha_1$

$$dt = \frac{\alpha_1}{v_0} \frac{dx}{\sqrt{\left(1 - x^{5/2} \right)}} \quad (4.68)$$

de donde se deduce que el tiempo para alcanzar α_1 es

$$t = \frac{\alpha_1}{v_0} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{\left(1 - x^{5/2} \right)}} = 2,94 \frac{\alpha_1}{v_0} \quad (4.69)$$

Ecuación que puede integrarse numéricamente y determinar α/α_1 como función del tiempo t/t_0 y que puede aproximarse por:

$$\alpha = \alpha_1 \operatorname{sen} \frac{\pi t}{t_0} \quad (4.70)$$

La representación de la fuerza máxima frente a $v^{6/5}$ (ecuación 4.66) da como resultado una recta cuya pendiente corresponde a:

$$Pdte = n^{2/5} \left(\frac{5}{4M^*} \right)^{3/5} \quad (4.71)$$

Por otro lado si en la ecuación 4.69 se sustituye el valor de $\alpha_1 = \alpha_{\max}$ (ecuación 4.65) se obtiene:

$$t_0 = 2.94 \left(\frac{5}{4M^* n v_0^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (4.72)$$

La representación de t_0 frente a $v_0^{-1/2}$ proporciona el valor de la segunda pendiente:

$$Pdte^* = 2.94 \left(\frac{5}{4M^* n} \right)^{2/5} \quad (4.73)$$

A partir de ambas pendientes se obtiene un sistema con dos incógnitas M y n. De la solución de dicho sistema, y con el valor de n puede obtenerse k_1 y k_2 , y el valor del módulo de Young del material.

E.- METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

En todos los modelos empleados, salvo pequeñas diferencias que se comentan seguidamente, la metodología experimental ha sido la misma.

El equipo de caída de dardo empleado en todas nuestras experiencias pertenece a la marca CEAST y consta de una masa cayente cuyo peso puede variarse entre un mínimo de 0.730 Kg y un máximo de 3.730 Kg.. El extremo inferior del dardo es una superficie semiesférica de diámetro 12.7 mm. El tiempo mínimo de registro del sistema es de 1 μ s.

Para la realización de estos ensayos se utilizó una media de 25 probetas para cada una de las siete composiciones estudiadas. Previamente al ensayo se midió el espesor de cada probeta a través de un Palmer de precisión dotado con un micrómetro electrónico.

Las probetas de disco se colocaron simplemente apoyadas sobre una base en forma de corona circular de diámetro interno 60 mm y externo 80 mm.

En el modelo de flexión con exceso de energía en el impactor, la masa del impactor fue la mayor permitida por el aparato (3,730 Kg.) y la altura de caída se mantuvo constante en un valor de 35 mm. pues se conseguía la rotura total de la muestra, pocos efectos dinámicos y la pérdida de velocidad del impactor era inferior al 10%.

En el modelo de flexión por baja energía se incrementó paulatinamente la altura de caída desde un mínimo de 5 mm. hasta que se produjo la rotura.

En el modelo de indentación para evitar la flexión de la probeta se colocó una plancha metálica rígida entre la probeta y el soporte. Posteriormente se determinó el rango de velocidades en el que el material se comporta como lineal y elástico para lo que se representó el registro fuerza-tiempo comprobando su forma senoidal.

En todos los casos las probetas ensayadas se examinaron visualmente determinando en su caso, el momento de aparición de daños sobre la probeta.

4.3.- Ensayos de mecánica de la fractura

Con la realización de los ensayos de la Mecánica de la Fractura se determinarán los parámetros de fractura K_{IC} , G_{IC} y J_{IC} utilizando la geometría SENB. La elección de este tipo de geometría permite establecer comparaciones entre las fracturas producidas a altas y bajas velocidades de deformación.

4.3.1.- Ensayos a baja velocidad de deformación.

Consistieron en ensayos de flexión por tres puntos realizados sobre las probetas SENB. Para ello se empleó una máquina universal de ensayos, de velocidad de desplazamiento constante ADAMEL DY-34. La velocidad de desplazamiento de mordazas fue de 1 mm/min, la distancia entre apoyos (S) de 50.8 mm, y la temperatura de los ensayos la ambiental. Se varió la profundidad de entalla en un rango entre 2 mm a 7.5 mm. con un incremento entre ellas de 0.5 mm.

La configuración de los ensayos de mecánica de la fractura sobre probetas SENB, geometría y dimensiones principales se reflejan en la figura 4.12. El valor del factor crítico de intensidad de tensión, K_{IC} , para esta geometría, puede calcularse a partir de la carga (P_C) medida en el instante del inicio de la propagación de grieta mediante la relación:

$$K_{IC} = \frac{3}{2} \frac{P_C S}{B w^{3/2}} X^{1/2} Y(a/w) \quad (4.74)$$

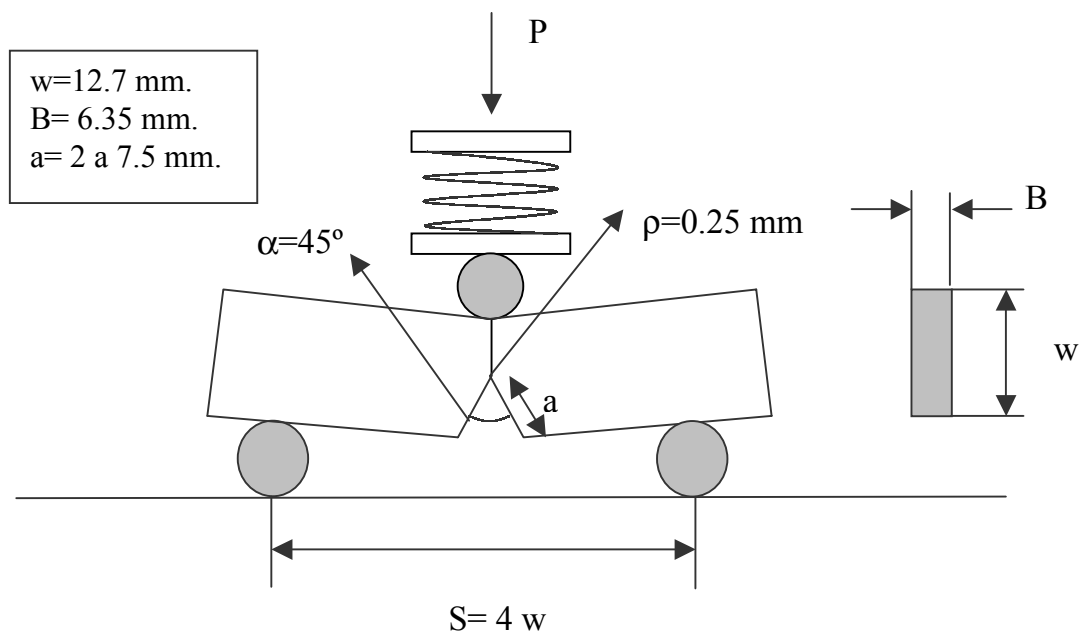


Figura 4.12 - Configuración de los ensayos de mecánica de la fractura.

donde $x=a/w$, a es la longitud de la entalla, B es el espesor de la probeta, w la anchura e $Y(a/w)$ es un factor geométrico adimensional que viene dado por:

$$Y\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)}{(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (4.75)$$

Por otra parte, la tasa crítica de liberación de energía de deformación, G_{IC} , puede expresarse como:

$$G_{IC} = \frac{U_C}{B w \chi} \quad (4.76)$$

donde U_C es la energía elástica almacenada por la probeta en el instante de iniciación de la propagación, que puede ser medida experimentalmente, y χ es un factor adimensional geométrico relacionado con la flexibilidad, C , y las dimensiones de la probeta:

$$\chi = \frac{C}{\frac{dC}{d(a/w)}} \quad (4.77)$$

En nuestro caso particular $S/w = 4$, y χ puede calcularse entonces mediante las relaciones siguientes

$$\chi = \frac{A + 18.64}{\frac{dA}{dx}} \quad (4.78)$$

donde:

$$A = \frac{16x^2}{(1-x)^2} [8.9 - 33.717x + 79.616x^2 - 112.952x^3 + 84.815x^4 - 25.672x^5] \quad (4.79)$$

y:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{16x^2}{(1-x)^2} [-33.717 + 159.232x - 338.856x^2 + 339.26x^3 - 128.36x^4] + \dots$$

$$+ 16[8.9 - 33.717x + 79.616x^2 - 112.952x^3 + 84.815x^4 \dots]$$

$$\dots - 25.672 x^5] [\frac{2x(1-x) + 2x^2}{(1-x)^3}] \quad (4.80)$$

4.3.1.1.- Aplicación de la mecánica de la fractura elástico-lineal.

Se ha seguido el protocolo de ensayo para materiales plásticos propuesto por el Grupo Europeo de Fractura [EGF 1990-a] en el que se registra la curva carga-desplazamiento. En un caso ideal la representación debería dar una línea recta con una caída brusca hacia el cero en el momento de iniciación de la grieta. Sin embargo, en muchos casos se observa desviación de la linealidad, que puede ser debida, a la presencia de deformación plástica en la punta de la grieta, a un comportamiento no-lineal o viscoelástico del material o bien a un cierto crecimiento estable de grieta antes de que se produzca la fractura. Las primeras condiciones violan los postulados de la LEFM y el último supone que la verdadera carga de iniciación no está definida por el máximo. En este caso se adopta la regla arbitraria de la norma ASTM E-399.

Según indica la norma ASTM E-399 debe dibujarse inicialmente la línea de flexibilidad inicial C, seguidamente se incrementa la pendiente de dicha recta un 5%, si la carga máxima P_{max} queda situada entre estas dos líneas límites, entonces P_{max} es válida para el cálculo de K_Q . Si la línea C+5% corta a la curva carga-desplazamiento, el punto de corte $P_{5\%}$ debe tomarse como el valor de la carga a iniciación de grieta. La figura 4.13 ilustra esquemáticamente el proceso comentado.

Para poder aplicar la LEFM se admite una tolerancia máxima de “no-linealidad” de un 10% de manera que se debe cumplir:

$$\frac{P_{max}}{P_{5\%}} < 1.1 \quad (4.81)$$

El valor de K_Q se calcula a partir de la siguiente relación:

$$K_Q = f \frac{P_Q S}{B w^{3/2}} \quad (4.82)$$

donde P_Q puede tomar el valor de P_{max} o $P_{5\%}$, y f es el factor geométrico de calibración que depende del cociente entre la profundidad de la entalla y la altura de la probeta. La expresión (4.82) equivale a la (4.74) ya que se cumple que f es igual a $6x^{1/2}Y(a/w)$, siendo $Y(a/w)$ el factor expresado en la ecuación (4.75).

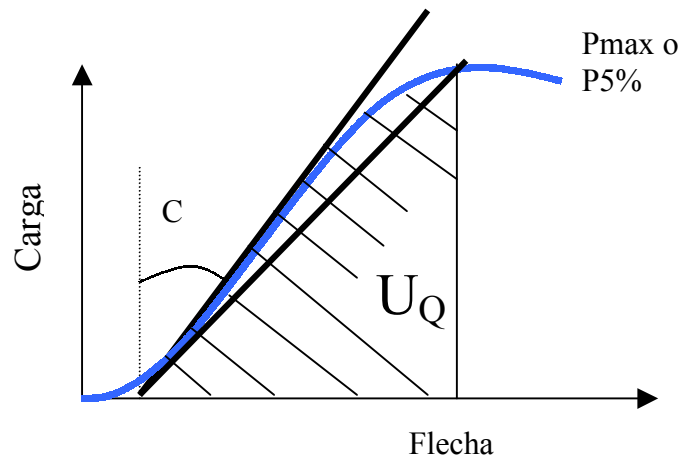


Figura 4.13.- Determinación de la carga P_Q y cálculo de K_Q

En nuestro caso se ha adoptado la metodología de ensayo de múltiples probetas, variando la dimensión de la entalla creada sobre la probeta entre 2 y 7.5 mm, con la finalidad de obtener los parámetros K_Q y G_Q independientes de la geometría de la probeta.

Cuando la profundidad de la entalla (a) es 6.35 mm, a/w toma el valor de 0.5 y f es 10.65.

A partir de los valores de K_{IC} y mediante la aplicación de las relaciones que establece la LEFM, se puede llegar a estimar el tamaño de la zona plástica, r''_y y Ω de los modelos de Irwin y Dugdale respectivamente así como la apertura crítica (COD) del vértice de grieta de los compuestos en estudio.

El valor de la energía de fractura, G_{IC} , se determinó a partir de la expresión:

$$G_{IC} = \frac{U_Q^*}{B W \chi} \quad (4.83)$$

siendo U_Q^* el valor de la energía absorbida hasta el valor de carga (P_{max} o $P5\%$) corrigiéndola por los efectos de indentación. La corrección de la energía se realiza restando al valor de U_Q , la energía empleada en generar la indentación U_i , que se obtiene del cómputo del área situada bajo la curva carga-desplazamiento del ensayo de indentación. En este ensayo, se somete a una probeta no entallada, situada según la disposición mostrada en la figura 4.14, a una carga compresiva hasta que se alcanza el mismo valor P_Q que en el ensayo SENB, de modo que:

$$U^* = U_Q - U_i \quad (4.84)$$

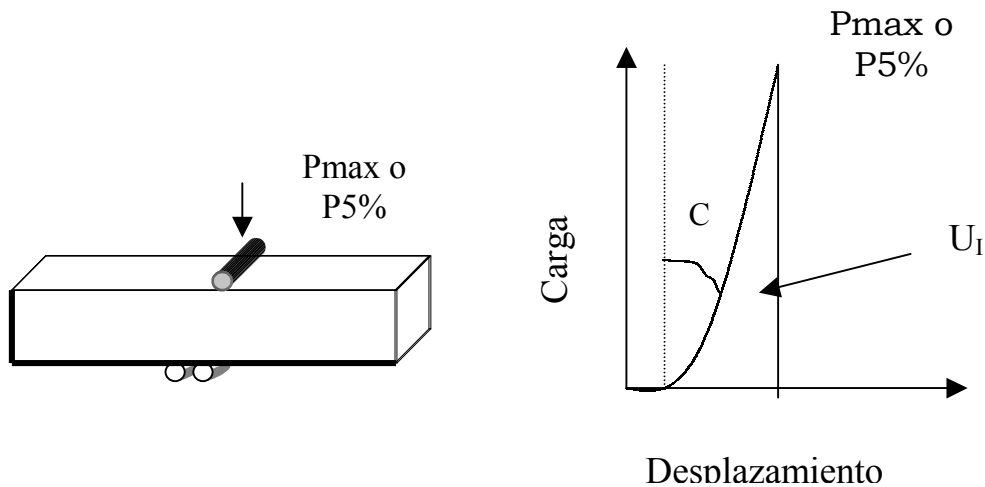


Figura 4.14.- Geometría y determinación de la energía de indentación.

La energía de fractura G_{IC} , puede obtenerse de igual forma a partir de los valores encontrados experimentalmente de la tenacidad a fractura K_{IC} y del módulo elástico E . Para la condición de deformación plana encontramos:

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (4.85)$$

donde ν es el coeficiente de Poisson del material compuesto.

4.3.1.2.- Aplicación de la mecánica de la fractura elasto-plástica (EPFM).

En el estudio elasto-plástico de la fractura se ha procedido a la aplicación del concepto de integral de contorno o integral J . El método empleado en la determinación de J es el de múltiples probetas [ESIS-1991], en el cual se mide el crecimiento estable de grieta sometiendo las probetas a cargas variadas hasta obtener diferentes desplazamientos.

Los ensayos fueron realizados a una velocidad de acercamiento de mordazas de 1 mm/min sobre probetas de geometría SENB. La relación $w=2B$ en estas probetas asegura unas condiciones de deformación plana en la punta de la grieta. Las entallas realizadas se agudizaron mediante una hoja de afeitar de manera que la profundidad total incluyendo el afilado cumpliera la relación:

$$0.5 \leq a/w \leq 0.65 \quad (4.86)$$

Posteriormente se dejaron reposar 48 horas después de practicar el afilado para favorecer la relajación de tensiones en la punta de la grieta. La construcción de las curvas $J-\Delta a$, y la determinación del parámetro de inicio de la propagación de grieta se

realizaron teniendo en cuenta lo indicado tanto en la normativa ASTM E813-81, la ASTM E813-87 y el protocolo del ESIS.

En la técnica empleada de múltiples probetas Δa expresa la propagación de grieta, esto es, la diferencia entre la longitud final de la grieta (a_f) y la inicial (a_0) medidas sobre la superficie de fractura de la probeta ensayada. Para poder medir la propagación de la grieta existen diferentes metodologías alternativas [Santana 1997], en nuestro caso y ante la similitud de resultados obtenidos optamos por colocar una gota de tinta china en el fondo de la entalla [Maspoch 1992][Díaz 1995] que por capilaridad penetra en el material a medida que avanza la grieta, poniendo de manifiesto el frente de avance y su extensión. Una vez concluido el ensayo se dejó secar la tinta separando ambas mitades de las probetas por impacto. El valor de Δa se midió en un proyector de perfiles (NIKON 6C) equipado con un banco micrográfico de precisión.

Los crecimientos de grieta muy pequeños son muy difíciles de apreciar y su valor está sujeto a un considerable grado de error, para evitarlo la normativa recomienda trazar una línea de exclusión paralela al eje J y desplazada 0.05 mm, de forma que sólo son válidos los puntos de $\Delta a > 0.05$ mm.

En la normativa ASTM para metales el criterio de mayor crecimiento de grieta se ha fijado a un 6% del ligamento remanente, esto es, $0.06 (w - a_0)$. Sin embargo se ha visto que este criterio es demasiado restrictivo para el caso de los materiales plásticos, por lo que se como límite superior de validez se ha establecido un valor igual al 10% de la longitud inicial de ligamento:

$$\Delta a_{\max} = 0.1 (w - a_0) \quad (4.87)$$

Por encima de este valor de Δa no se puede garantizar un crecimiento controlado de grieta. En nuestro caso el valor límite superior resulta ser 0.635 mm, dando lugar a una segunda línea de exclusión. Los datos obtenidos experimentalmente deben quedar espaciados según se indica en la figura 4.15 requiriéndose un mínimo de tres puntos en la primera región, dos en la segunda y un punto en cada una de las dos últimas regiones.

Existen diferentes fórmulas para la determinación del valor de resistencia a fractura J, la más apropiada para la metodología de múltiples probetas establece:

$$J_0 = \frac{\eta U^*}{B(w - a_0)} \quad (4.88)$$

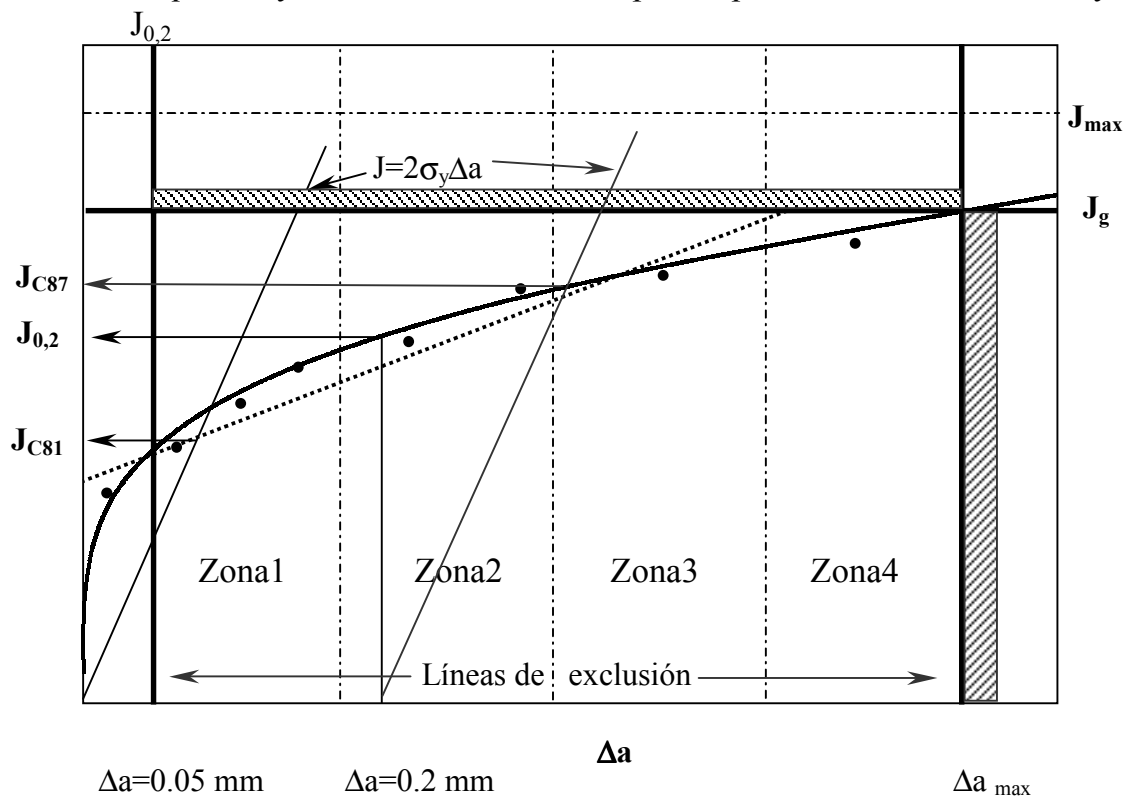
dónde η es una constante de valor 2 para la geometría usada, B, w son las dimensiones de la probeta, a_0 representa la profundidad de la entalla y el afilado y U^* es el área bajo

la curva carga-desplazamiento para cada ensayo, una vez descontados los efectos de indentación. La ventaja de la expresión anterior es que evita la distinción del área bajo la curva fuerza-desplazamiento en dos contribuciones, elástica y plástica.

En la ecuación anterior no se contempla el crecimiento de grieta durante el ensayo. Para el caso de pequeños crecimientos de grieta el error que se produce es despreciable, sin embargo, los valores pueden ajustarse para cualquier crecimiento de grieta utilizando la expresión:

$$J = \frac{\eta U^*}{B(w - a_0)} \left[1 - \frac{(0.75 \eta - 1) \Delta a}{(w - a_0)} \right] \quad (4.89)$$

Figura 4.15. Requisitos y límites de validez de los puntos para la determinación de J y



Criterios: $J_{0,2-E}$.- ESIS 1991
 J_{IC81} .- ASTM E813-81
 J_{IC-87} .- ASTM E813-87

Un valor provisional de la resistencia a la fractura en el límite superior de crecimiento de grieta (J_g) se obtiene con la primera intersección de la curva de ajuste de los datos experimentales con a) la línea de exclusión superior Δa_{max} ó b) una paralela al eje de

abscisas de valor J_{\max} , siendo

$$J_{\max} = \min\left[\frac{(w - a_0)\sigma_y}{25}, \frac{B\sigma_y}{25}\right] \quad (4.90)$$

Con los límites superior e inferior establecidos se representan los puntos experimentales comprendidos entre los dos márgenes y se ajustan a una recta (ASTM E813-81) o a una curva potencial (ASTM E813-87) y (ESIS).

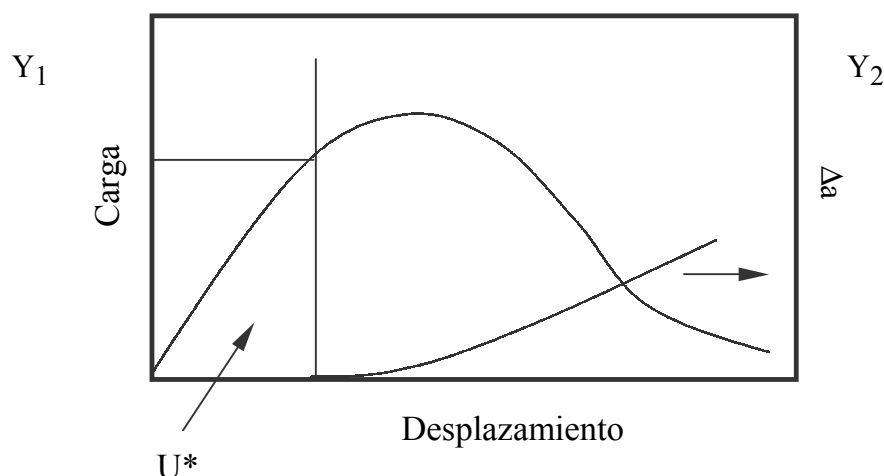
La parte inicial de las curvas $J-\Delta a$ presenta normalmente una pendiente previa a la extensión de grieta real que se debe al enromamiento de la misma y que queda descrita por la línea de enromamiento (ecuación 3.93).

El valor crítico de J se obtiene de la intersección del ajuste lineal con la curva de enromamiento (ASTM E813-81), con la línea de enromamiento desplazada 0.2 mm (ASTM E813-87), o de la intersección del ajuste exponencial con la abscisa $\Delta a=0.2$ (ESIS). En este último caso el valor obtenido $J_{0,2}$ se contempla como parámetro de fractura aunque el valor de $J_{0,2}$ incluye una mínima extensión de grieta (0.2mm).

Además de la metodología propuesta por Narisawa y Takemori [1989] se ha aplicado una metodología basada en la creación del doble gráfico de la figura 4.16, en el que en el eje x se representa la flecha registrada durante el ensayo, en el eje Y1, el valor de la carga alcanzada en cada ensayo, y en el eje Y2 se representa el incremento de grieta observado [Martínez 1994-b].

Figura 4.16.- Determinación de J a través del método de la curva patrón.

En el momento en que la línea de incremento de grieta Δa se separa del eje X, se traza una perpendicular a dicho eje, y el punto dónde la perpendicular interseca con la curva



carga-desplazamiento nos proporciona el valor de inicio de propagación de grieta. A

partir de este valor puede hallarse el valor J_{IC} .

4.3.2.- Ensayos a alta velocidad de deformación.

Los ensayos correspondientes a la mecánica de la fractura a alta velocidad de deformación fueron realizados sobre probetas prismáticas de flexión utilizando la configuración clásica del ensayo Charpy.

El equipo de impacto pendular Charpy pertenece a la marca CEAST e incorpora captadores en la cabeza impactora. El tiempo medio de duración del ensayo de impacto Charpy es del orden de varios milisegundos.

La velocidad del martillo se determinó a través de la medición del tiempo que emplea una estrecha bandera de anchura conocida en atravesar una célula fotoeléctrica situada justamente en el punto de impacto con la probeta.

Los ensayos sobre el Poliestireno y los compuestos Poliestireno-microesferas de vidrio, se realizaron a velocidades de ensayo moderadas (0.5 m/s) y se colocó una masa en el martillo impactor de valor 2.508 Kg. mucho mayor que el peso de la probeta a fin y efecto de disminuir al máximo la contribución de los efectos dinámicos y obtener unas condiciones en el test estáticas [Martínez 1994-c, 1994-d, 1994-e, 1994-f].

Un esquema simplificado del dispositivo pendular de impacto junto con las magnitudes que intervienen en él se muestra en la figura 4.17.

4.3.2.1.- Geometría.

La geometría de la sollicitación del ensayo Charpy es idéntica a la de flexión por tres puntos con la variante de la aplicación de la fuerza a través de un martillo pendular. La probeta se encuentra simplemente apoyada y recibe el golpe del martillo pendular en su punto medio. Las probetas fueron entalladas a profundidades variables.

4.3.2.2.- Modelo con exceso de energía en el impactor.

De acuerdo con el modelo mostrado en la figura 4.17, la velocidad del impactor puede conocerse por aplicación de la Ley de Newton si se conoce la masa del impactor m , y la fuerza originada por la acción de la gravedad P .

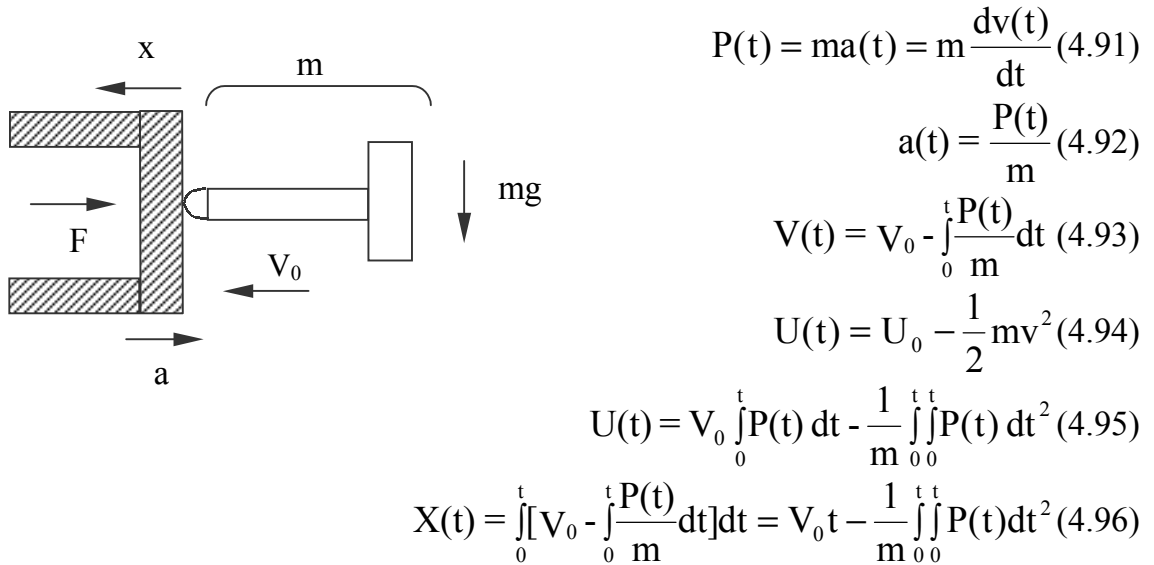


Figura 4.17.- Modelo y ecuaciones de cálculo para la geometría de impacto Charpy.

Para el cálculo de las características a fractura por impacto de los materiales empleados, es posible utilizar las mismas ecuaciones que en el ensayo de flexión por tres puntos puesto que la geometría es idéntica.

A partir del cómputo del valor de la fuerza en el instante de la fractura (P_c) y de la energía consumida por el péndulo hasta el mismo instante (U_c), si se puede aplicar la LEFM, similarmente al caso de baja velocidad hallamos:

Tensión de fractura:

$$\sigma_f = \frac{3 P_c S}{2 B w^2} \quad (4.97)$$

De la representación gráfica del valor de $P_c S / B w^{3/2}$ frente a $1/f$ y por aplicación de la ecuación 4.82 podría hallarse la tenacidad a fractura:

$$K_{IC} = f \frac{P_c S}{B w^{3/2}} \quad (4.98)$$

El valor de la energía de fractura puede hallarse a través del valor de la pendiente de la gráfica U_c^* frente a $B w \chi$.

$$G_{IC} = \frac{U_c^*}{B w \chi} \quad (4.99)$$

Para hallar el módulo elástico podemos aplicar la relación establecida en la LEFM entre K_{IC} y G_{IC} . (ecuación 4.85) obteniendo:

$$E = \frac{K_{IC}^2 (1-\nu^2)}{G_{IC}} \quad (4.100)$$

De igual manera puede obtenerse una relación de linealidad a partir de la LEFM entre carga, energía y profundidad de entalla. Si se representa el valor obtenido de U_c versus $\chi Y^2 a P_c$, el resultado debe ser una línea recta cuya pendiente debe dar un valor estimado del módulo según la expresión:

$$E = \frac{\chi Y^2 a P_c^2}{U_c} \left(\frac{3}{2} \right)^2 (1-\nu^2) \frac{S^2}{B w^3} \quad (4.101)$$

4.3.2.3.- Modelo de flexión de baja energía.

Este método consiste en hacer que un péndulo al que se le proporciona una energía cinética reducida, contacte y rebote una única vez sobre una probeta prismática a la que no se le ha practicado entalla alguna. El análisis predice que las curvas obtenidas deben ser de tipo semisenoidal.

El valor del módulo elástico se halla considerando la ecuación que define la flexibilidad de una probeta prismática simplemente apoyada:

$$E = \frac{S^3}{4 B w^3} \left[\frac{P}{d} \right] \left[1 + 2.85 \left(\frac{w}{S} \right)^2 - 0.84 \left(\frac{w}{S} \right)^3 \right] \quad (4.102)$$

A partir de las representaciones gráficas y de la amplificación de la zona inicial de las curvas se halla la pendiente del registro carga-desplazamiento (P/d) pudiendo entonces obtener el valor del módulo.

Los ensayos de rebote se realizaron con una velocidad de 0.5 m/s.