

# Caracterización de Materiales

## Tema 4. Caracterización frente a esfuerzos a alta velocidad de deformación



**Isidro Carrascal Vaquero**  
**Soraya Diego Cavia**  
**José Antonio Casado del Prado**  
**Diego Ferreño Blanco**  
**Jesús Setién Marquínez**

DPTO. DE CIENCIA E INGENIERÍA  
DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



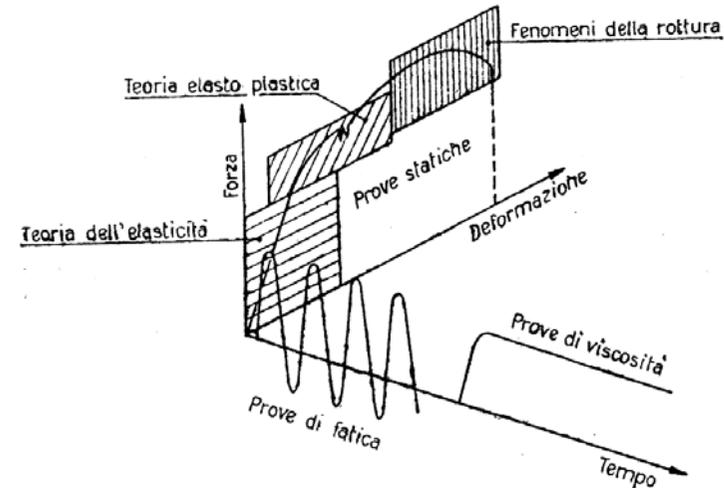
## **Comportamiento Mecánico.**

### **Índice:**

- Introducción
- Ensayos a velocidad de deformación alta y muy alta
- Ensayos de impacto de barra entallada
- Ensayo Charpy
- Ensayos a gran escala

## 1. INTRODUCCIÓN

- ❑ Hasta ahora nos movíamos en el campo **estático**, La variable tiempo apenas había aparecido (solo velocidades de carga)



- ❑ Las propiedades de los materiales dependen de la velocidad a la que se deforman
- ❑ La caracterización de la deformación, fractura y capacidad portante de los materiales sometidos a altas velocidades de carga es problemática y está en evolución
- ❑ Esta caracterización es imprescindible de cara a la selección de materiales apropiados en la fase de diseño de componentes industriales o estructuras

## 1. INTRODUCCIÓN

❑ Campos de aplicación:

- Vehículos de transporte (automóviles)
- Balística
- Fabricación y procesado de materiales
- Mecanizado

❑ Velocidad de deformación ( $\dot{\epsilon}$ ): velocidad con que cambia la deformación aplicada a un material en el tiempo:  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$

❑ Si la velocidad de deformación en un ensayo es cte:  $\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t}$

❑ Si se toma  $\epsilon$  como deformación ingenieril:  $d\epsilon = \frac{dL}{L_0} \rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0}$

- L: long. Probeta;  $L_0$ : Long. Inicial; v: velocidad maq. ensayo

## 1.1. Clasificación de los ensayos en función de $\dot{\epsilon}$

### ❑ Ensayos estáticos

- ( $\dot{\epsilon} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ). Técnicas válidas hasta  $0.1 \text{ s}^{-1}$

### ❑ Ensayos a velocidad intermedia

- Técnicas similares a las estáticas con equipamiento especial (servoválvulas de gran capacidad, equipos de medida de carga y deformación y adquisición de datos)  $\rightarrow \dot{\epsilon} \sim 100\text{-}200 \text{ s}^{-1}$
- Con ensayos específicos se puede alcanzar hasta  $500 \text{ s}^{-1}$

### ❑ Ensayos a velocidad alta

- Técnicas experimentales basadas en impactos de proyectiles y propagación de ondas  $\rightarrow \dot{\epsilon} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$

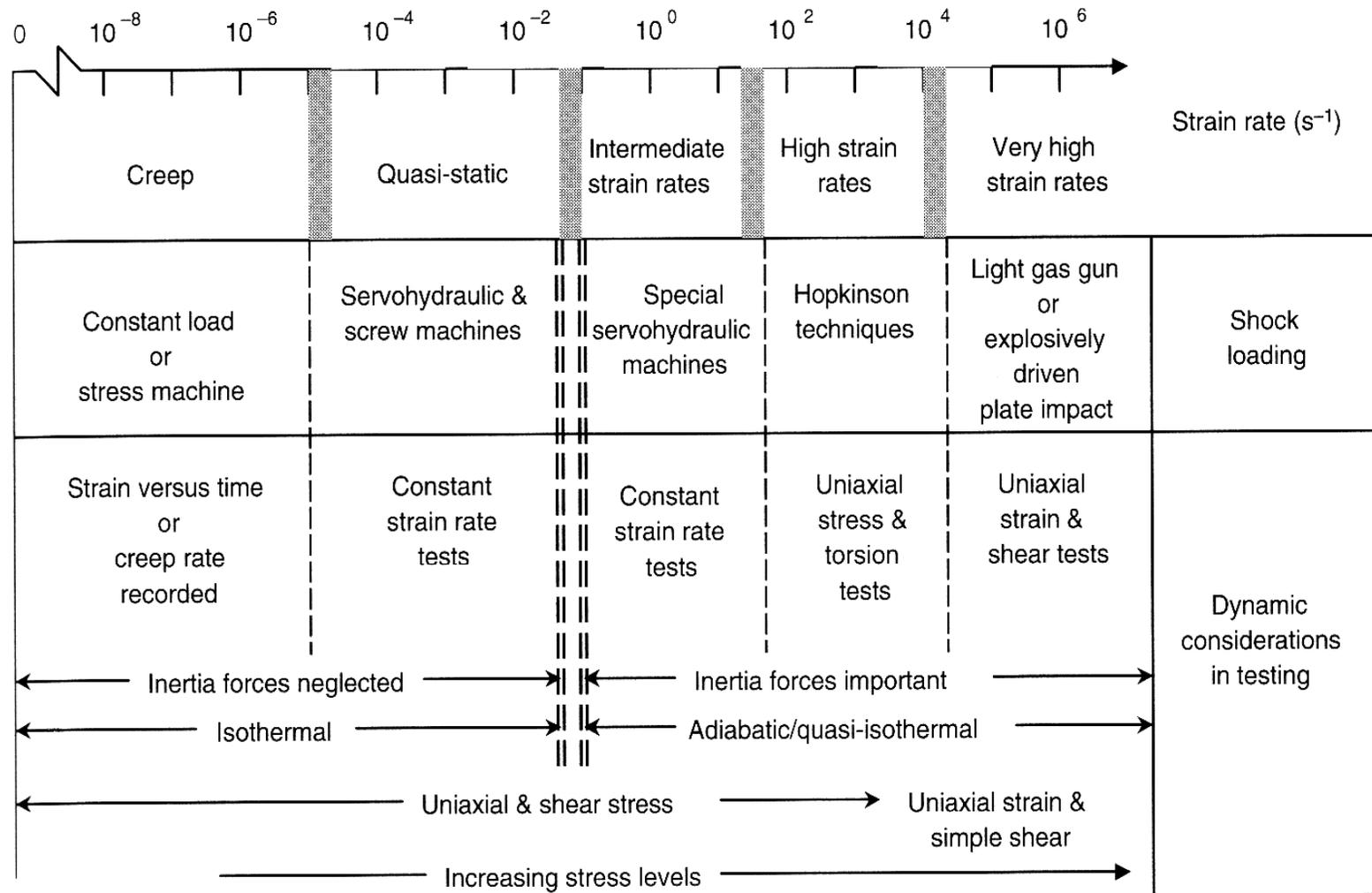
### ❑ Ensayos a velocidad muy alta

- Técnicas experimentales que requieren el uso de explosivos para generar choques a alta velocidad  $\rightarrow \dot{\epsilon} > 10^4 \text{ s}^{-1}$

## 1.2. Factores a tener en cuenta

- ❑ Las propiedades de los materiales dependen de  $\dot{\epsilon}$
- ❑ Diferentes  $\dot{\epsilon}$  pueden inducir un cambio en el mecanismo que produce la rotura del material
- ❑ **Efecto de las ondas de presión**
  - A mayor  $\dot{\epsilon}$  el efecto de las ondas tensionales es más importante
  - Al aplicar la carga en un extremo de la probeta, las fuerzas de inercia se oponen a la deformación
  - Las ondas de tensión se propagan a la velocidad del sonido
- ❑ **Condiciones térmicas adiabáticas**
  - En ensayos convencionales la mayor parte del trabajo de deformación se disipa en forma de calor (solo el 5-10% se almacena como energía de deformación)
  - Los ensayos estáticos se realizan en condiciones isotérmicas
  - Para  $\dot{\epsilon}$  altas no hay tiempo de disipar calor (condiciones adiabáticas), no hay intercambio de calor con otros sistemas
  - Importante: las propiedades de los materiales dependen de la  $T^a$

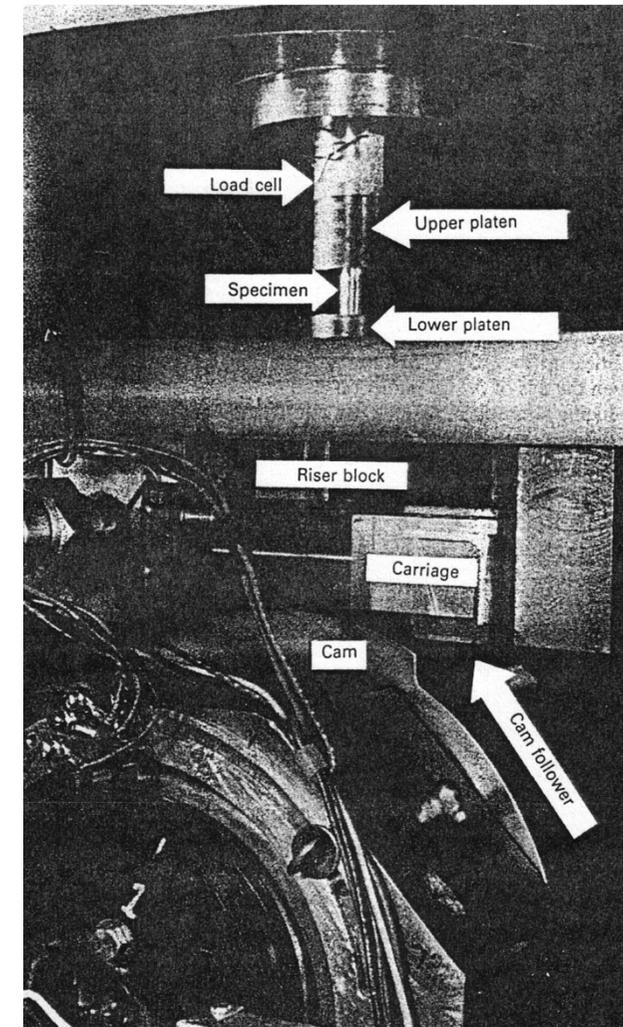
## 1.1. Métodos experimentales



## 2. ENSAYOS A VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN ALTA Y MUY ALTA

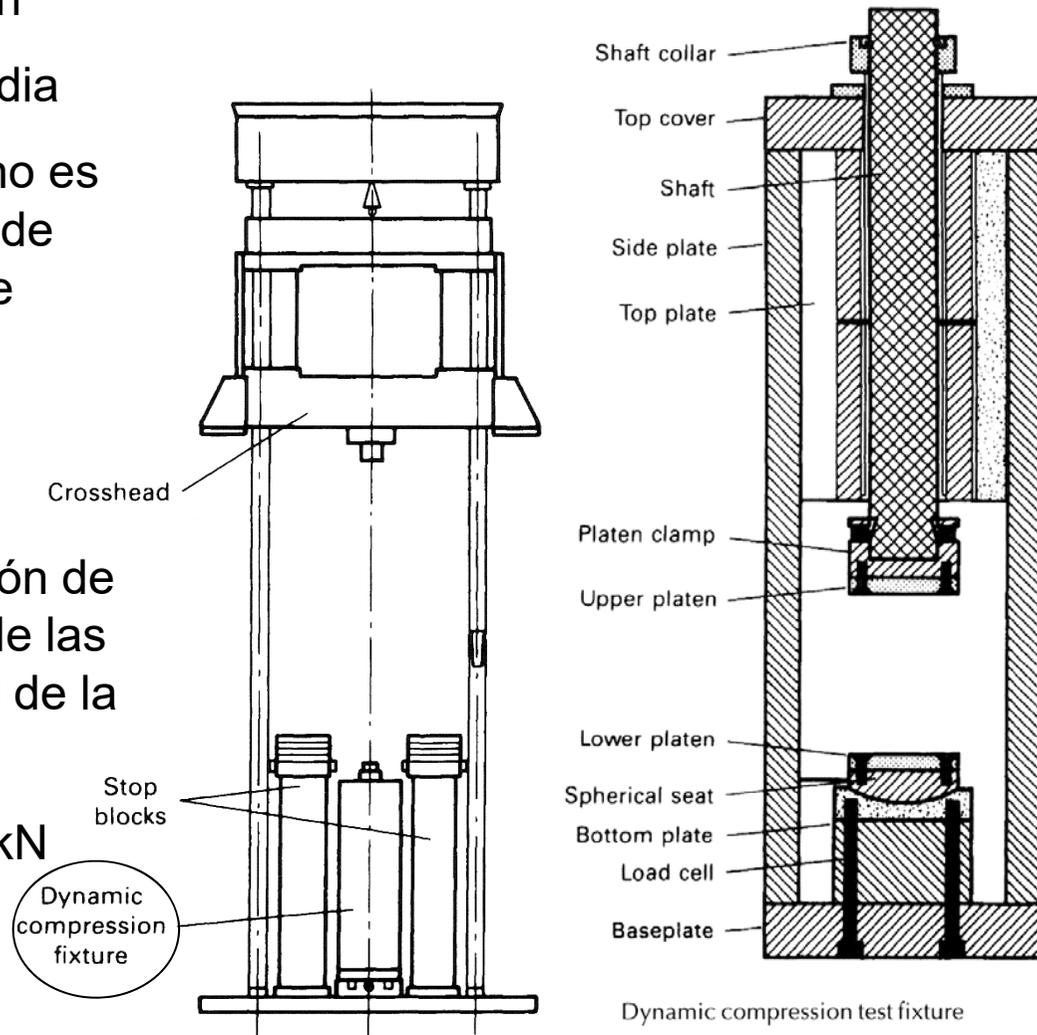
### 2.1. Cam Plastometer

- ❑ Carga aplicada a través de una leva
- ❑ Deformación real constante  
(forma de la leva)
- ❑  $\dot{\epsilon} \sim 0.5-200 \text{ s}^{-1}$
- ❑ Registro F-t ( $\epsilon$  conocida)
- ❑ Válido para ensayos a altas  $T^a$



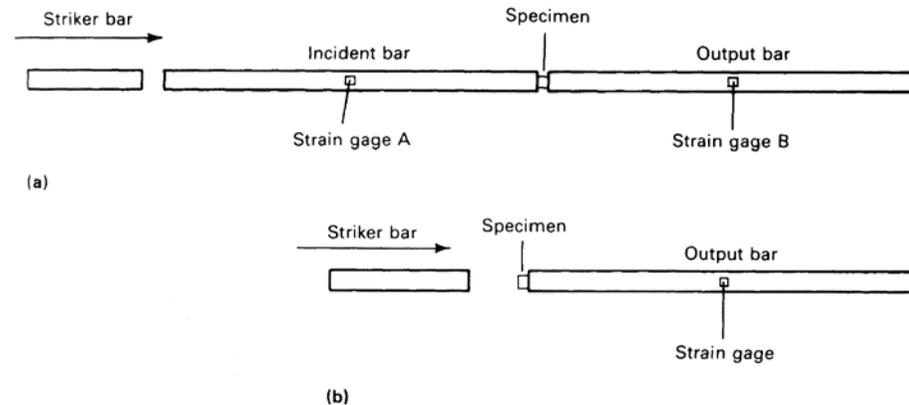
## 2.2. Caída de peso (Drop test)

- ❑ Ensayo de compresión
- ❑ Alta carga y  $\dot{\epsilon}$  intermedia
- ❑ Difícil interpretación: no es de desplazamiento ni de velocidad de carga cte
- ❑ Velocidad de ensayo limitadas por efectos inerciales
- ❑ Sensible a la colocación de la probeta, suciedad de las superficies, flexibilidad de la maq. ensayo
- Carga dinámica: 900 kN
- Altura: 1.5 m
- Peso: 250-1000 kg



### 2.3. Barra HOPKINSON

#### ❑ Ensayo de compresión (varias configuraciones)



- ❑ Máximo  $\dot{\epsilon}$  en condiciones de deformación uniforme
- ❑ Galga extensométrica en mitad de cada barra (cálculos más sencillos)
- ❑ Condiciones:
  - Propagación unidimensional: medidas en superficie representativas
  - Deformación uniforme a lo largo del espesor
- ❑ Ensayo válido a altas  $T^a$

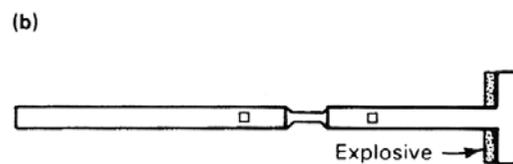
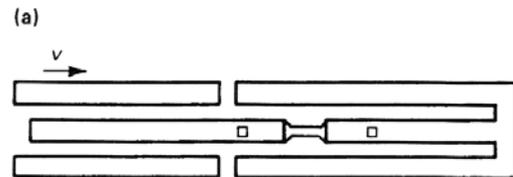
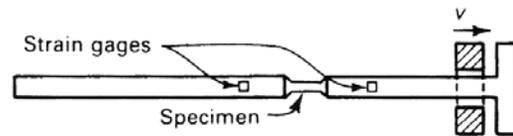
### 2.3. Barra HOPKINSON (II)

❑ La velocidad de deformación en la probeta es:  $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L}$

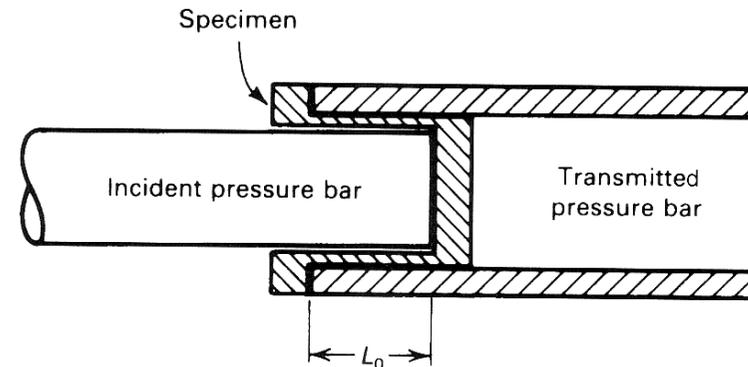
❑ Curva tensión deformación:

$$\begin{aligned} \text{➤ } \frac{d\varepsilon(t)}{dt} &= \frac{-2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \\ \text{➤ } \sigma(t) &= E \frac{A_0}{A} \varepsilon_T(t) \end{aligned} \left\{ \begin{array}{l} L: \text{ long. Probeta} \\ \varepsilon_R: \text{ onda reflejada en A} \\ \varepsilon_T: \text{ onda transmitida en B} \\ C_0: \text{ velocidad de propagación de la onda} \end{array} \right.$$

❑ Ensayo de tracción (varias configuraciones)

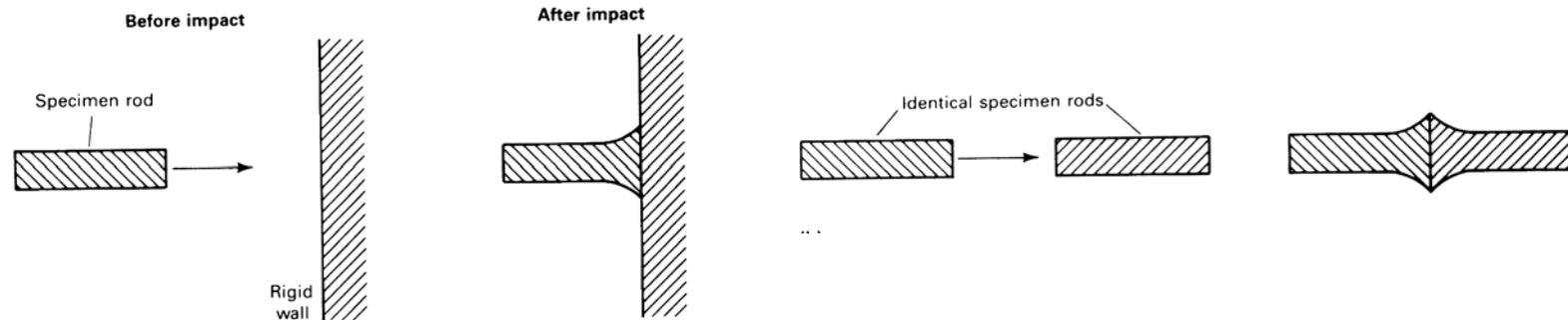


(c)



## 2.4. Ensayo TAYLOR

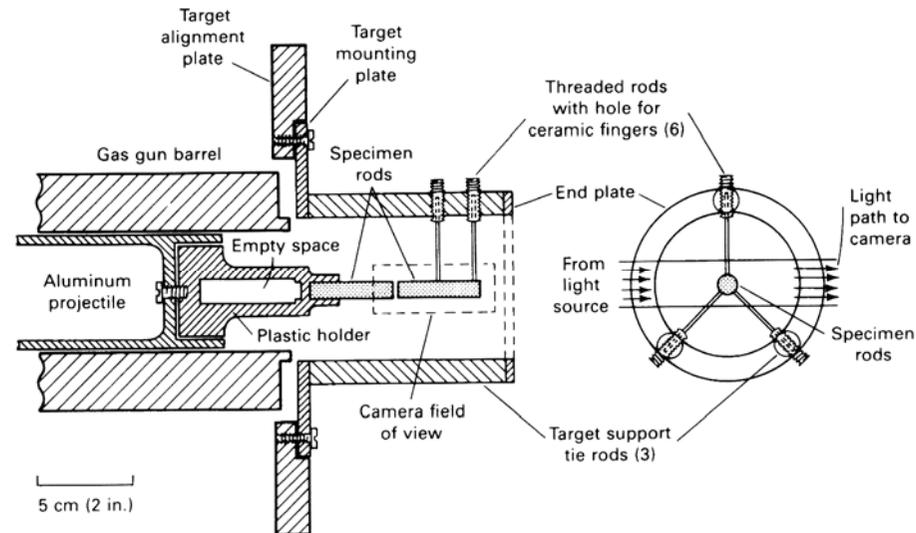
- Impacto de un cilindro (configuración simétrica y asimétrica)



- La expansión del cilindro se relaciona con el límite elástico del material

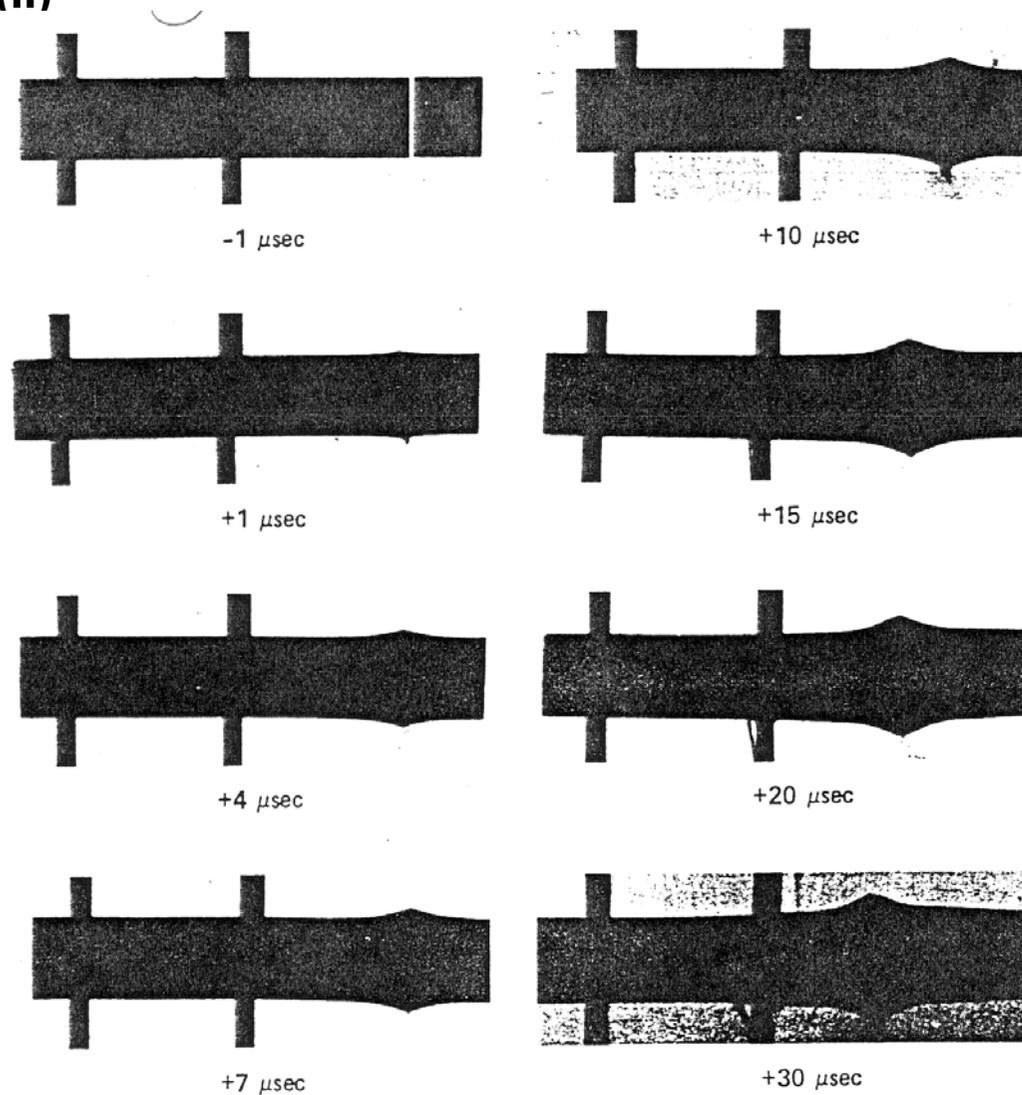
- Los efectos de fricción son importantes

- Configuración simétrica:



## 2.4. Ensayo TAYLOR (II)

- Curva  $\sigma$ - $\epsilon$   
por fotografía a  
alta velocidad



Dimensión  
del cilindro  
9.5x44.5 mm

## 2.5. Anillo expansivo (Expandig ring)

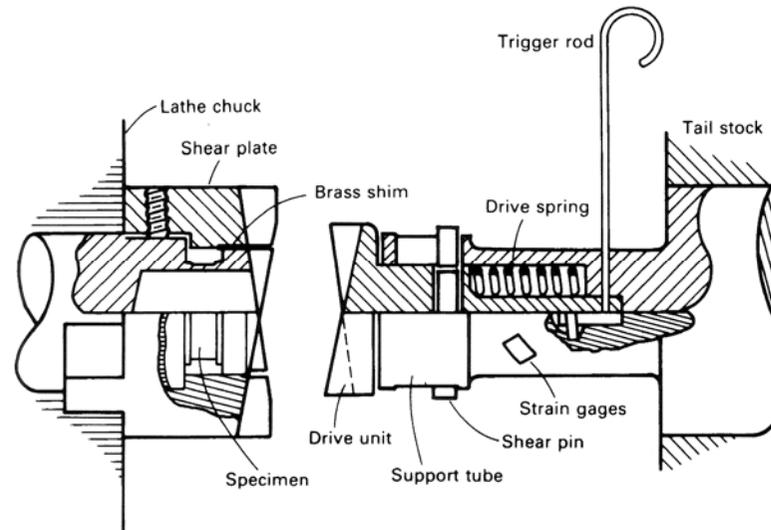
- ❑  $\dot{\epsilon} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$
- ❑ Los principios del ensayo son simples pero es complicado de ejecutar
- ❑ Método: aceleración repentina en dirección radial de un anillo por la acción de un explosivo o una carga electromagnética

Deceleración por efecto de las tensiones en el anillo

- ❑ Obtención de curva  $\sigma$ - $\epsilon$ 
  - $\epsilon = \ln \frac{R}{R_0}; \quad \sigma = -\rho R \frac{d^2R}{dt^2}$
  - R se mide por fotografía a alta velocidad
  - La tensión se obtiene por doble diferenciación (imprecisión) [ $v \rightarrow 1^a$ ]
- ❑ Ventajas: no tiene propagación de ondas de tensión y altos valores de  $\dot{\epsilon}$
- ❑ Inconvenientes:  $\dot{\epsilon}$  no es constante y dificultad de ejecución
  - Compresión en dirección radial (resultados inconsistentes con otros ensayos)

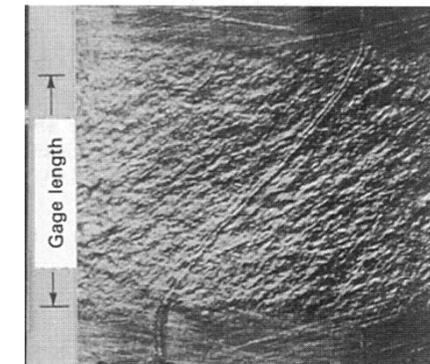
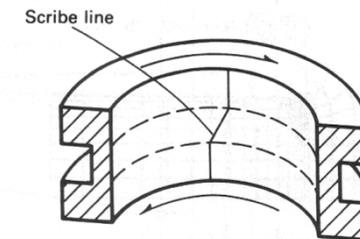
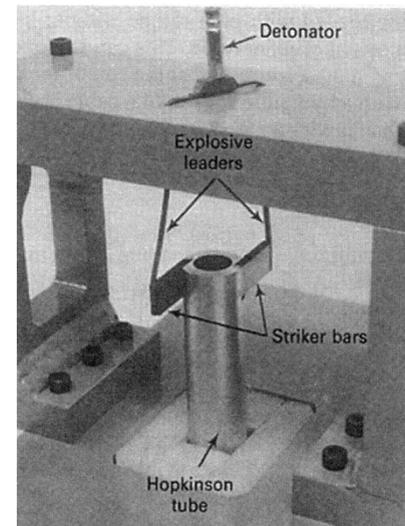
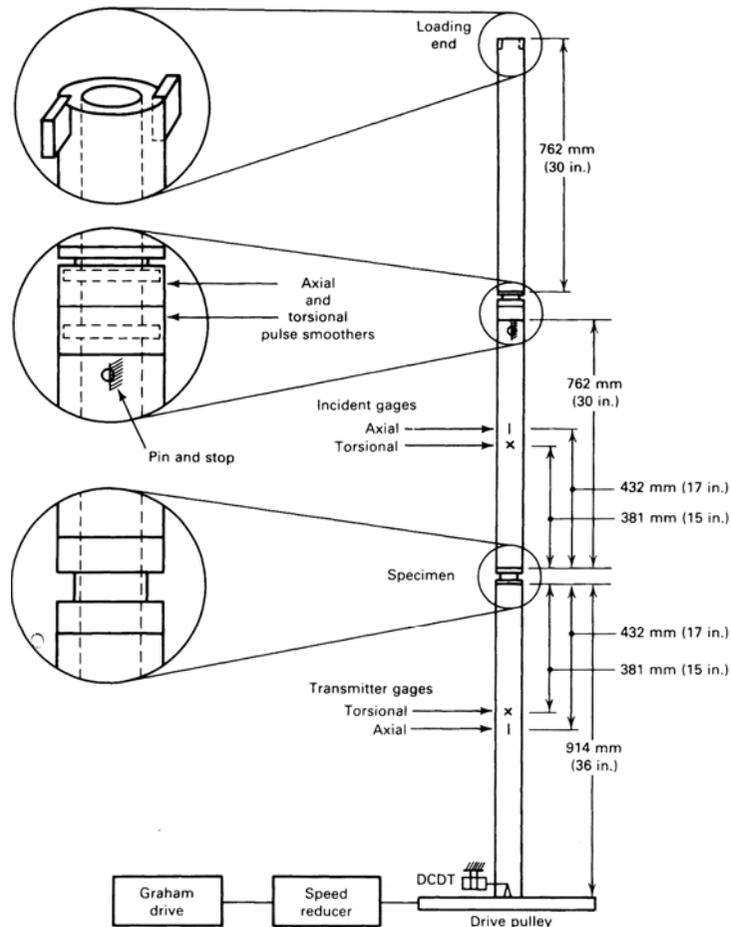
## 2.6. Ensayo de impacto a torsión

- ❑  $\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$
- ❑ Probetas cilíndricas o tubos
- ❑ Dispositivo de almacenamiento de energía → impacto a torsión
- ❑ Medida de tensión y deformación mediante galgas extensométricas



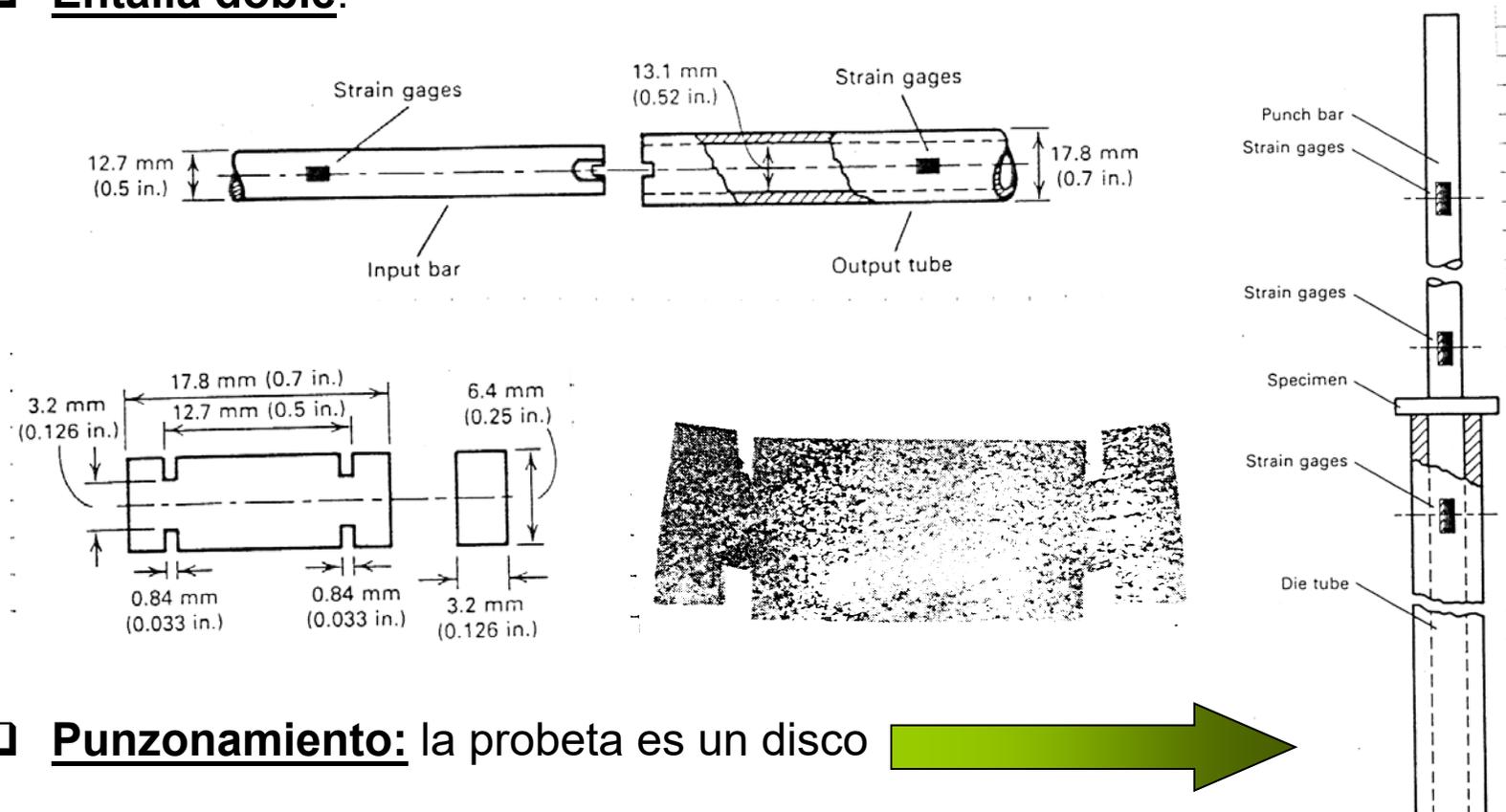
## 2.7. Barra KOLSKY

- ❑  $\dot{\epsilon} \sim 10^2$  a  $10^4$  s<sup>-1</sup>
- ❑ Igual que el ensayo Hopkinson de compresión pero a torsión



## 2.8. Ensayo de Punzonado

- ❑  $\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$
- ❑ Modificaciones de la barra Hopkinson para obtener mayores  $\dot{\epsilon}$  a cortante
- ❑ Entalla doble:



- ❑ Punzonamiento: la probeta es un disco



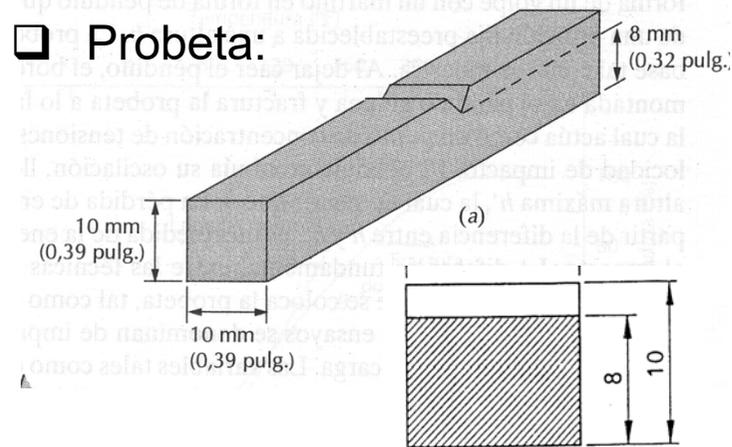
### 3. ENSAYOS DE IMPACTO DE BARRA ENTALLADA

- ❑ Objeto: simular fallos por rotura frágil
  - Entalla: concentrador de tensiones, estado tensional triaxial
  - Impacto: altas velocidades de deformación
  - Ensayos a diferentes  $T^a$
- ❑ Los componentes reales no tienen entallas pero si defectos (fabricación o servicio)
- ❑ No proporcionan parámetros cuantitativos aplicables al diseño
- ❑ Producen valores cualitativos (análisis comparativo, selección, efectos de elementos de aleación, o ttos. Térmicos y control de calidad)
- ❑ Ventaja: son rápidos, simples y baratos. Existe una gran base de datos
- ❑  $\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$

### 3.1. Ensayo Charpy

❑ El péndulo rompe la probeta por impacto en flexión en tres puntos

❑ Probeta:



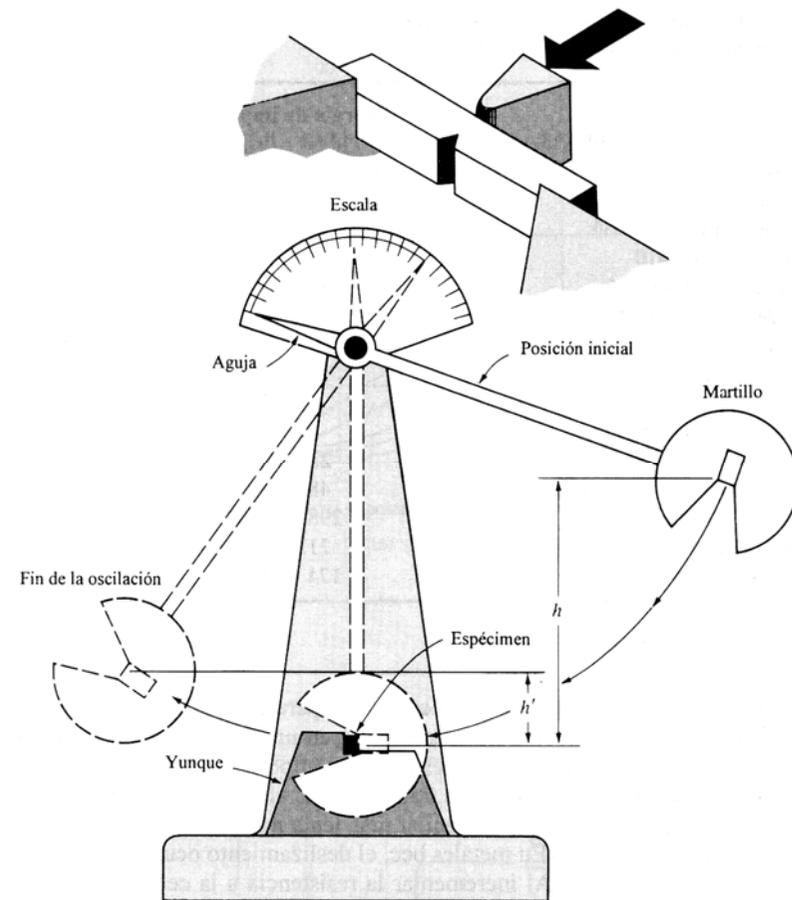
❑ Energía absorbida en la rotura:

$$E = Ep_0 - Ep_f = mgh_0 - mgh_f$$

$$E = mg(h_0 - h_f)$$

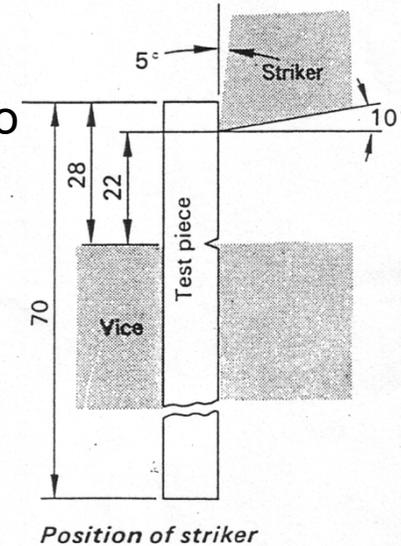
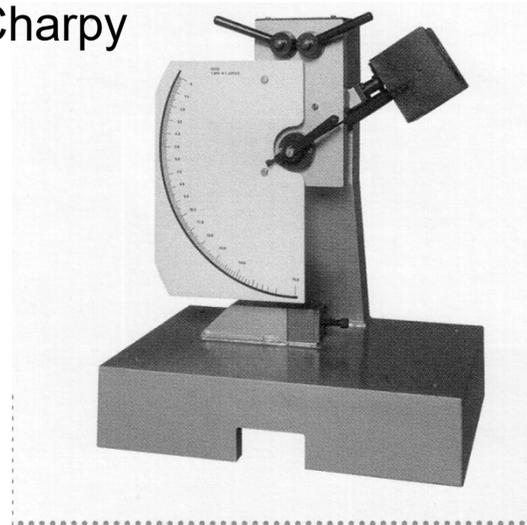
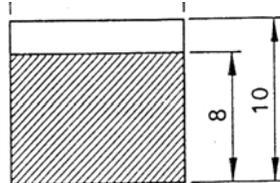
❑ Resiliencia:

$$R = \frac{E}{A} = \frac{E}{0.8} \left[ \frac{J}{cm^2} \right]$$



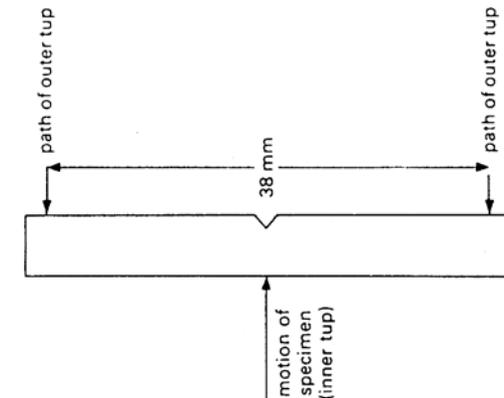
### 3.2. Ensayo IZOD

- ❑ El péndulo rompe la probeta por impacto en voladizo
- ❑ Resultados similares al Charpy
- ❑ No se recomienda a T<sup>a</sup> diferente a la ambiente
- ❑ Probeta:



### 3.3. Ensayo HOUNSFIELD

- ❑ Dos péndulos en sentido contrario
- ❑ Probeta de sección circular de 7.8 mm de diámetro situada en el péndulo interior



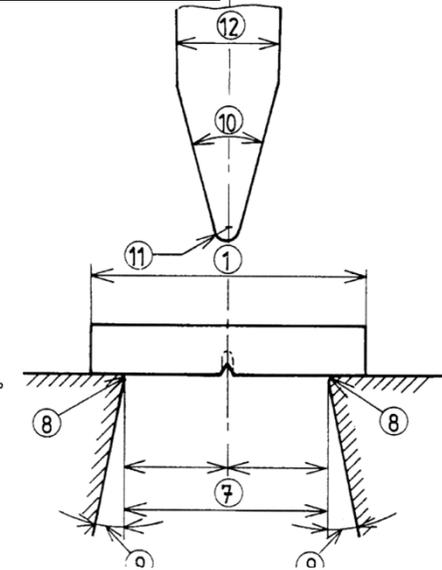
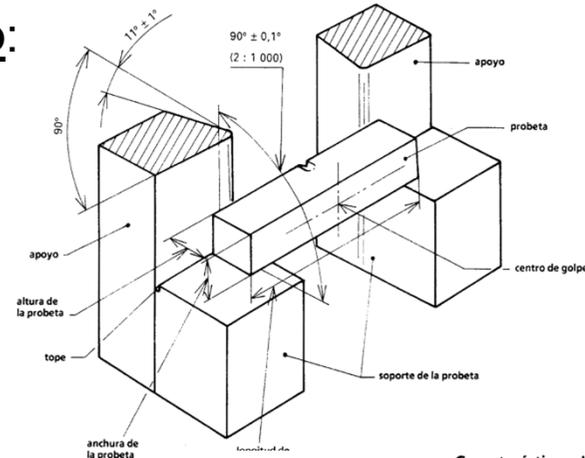
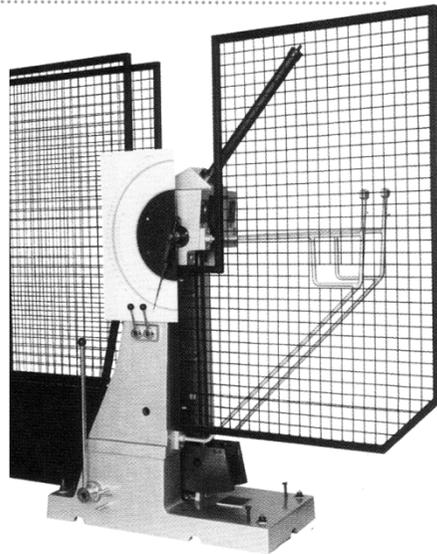
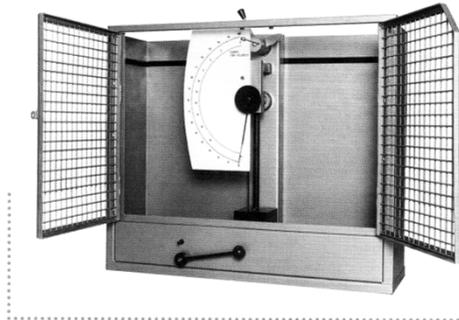
#### 4. ENSAYO CHARPY

- ❑ Se trata del ensayo más extendido
- ❑ Es un ensayo sensible a:
  - Calidad del mecanizado de la probeta
  - Forma de la entalla
  - Colocación de la probeta, centrado
  - Holguras y rozamientos en el péndulo
  - Forma de la cuchilla
  - Rapidez de ejecución (ensayos a otras  $T^a$ )
- ❑ Este ensayo tiene sentido cuando se realiza a varias  $T^a$  para definir la curva de transición frágil-dúctil
- ❑ Mucha dispersión de resultados:
  - Ejecución del ensayo
  - Muy variable en zona de transición
  - Variación de las propiedades locales
- ❑ Aplicaciones: Análisis comparativos (comp. Química, aleaciones, ttos térmicos, procesos de fabricación...), Especificaciones de material, correlaciones con  $K_{IC}$

## 4.1. Ensayo de flexión por choque sobre probeta CHARPY

❑ UNE 7-475-92 Parte 1. (EN 10045-1)

❑ Máquina de ensayo:



Características de la máquina de ensayo

Referencias (figura 1)	Designación	Valor
7	Distancia entre apoyos	$40^{+0,2}_0$ mm
8	Radio de los apoyos	$1^{+0,5}_0$ mm
9	Ángulo de salida de cada apoyo	$11^\circ \pm 1^\circ$
10	Ángulo de filo de la cuchilla de la maza	$30^\circ \pm 1^\circ$
11	Radio del filo de la cuchilla de la maza	$2^{+0,5}_0$ mm
12	Anchura máxima del filo de la cuchilla de la maza	18 mm
-	Velocidad de la maza en el momento del impacto	5 m/s a 5,5 m/s <sup>1)</sup>
-	Ángulo entre los soportes y los apoyos	$90^\circ \pm 0,1^\circ$

1) En el caso de máquinas fabricadas antes de 1983, previo acuerdo, puede admitirse una velocidad comprendida entre 4,5 y 7 m/s.

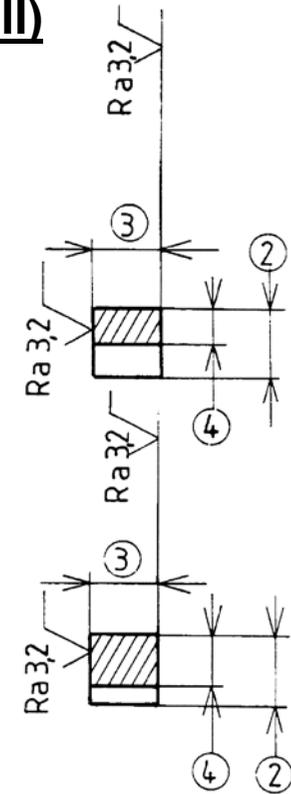
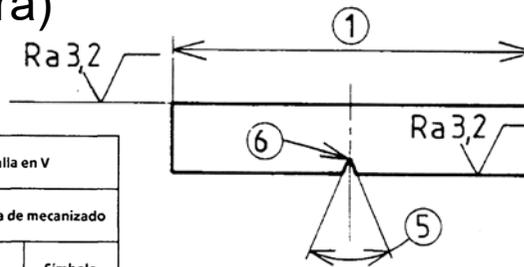
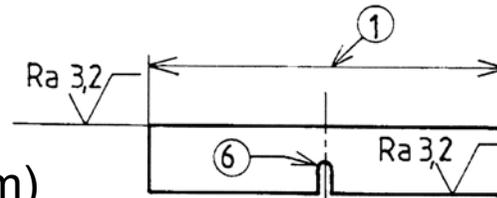
### 4.1. Ensayo de flexión por choque sobre probeta CHARPY (II)

❑ Probeta:

❑ L = 55 mm y S=10x10mm

- Entalla en V a 45°,  
profundidad = 2mm (R=0.25 mm)  
secciones reducidas (7.5, 5 mm, ...)

- Entalla en U (u ojo de cerradura)  
profundidad = 5mm (R=1mm)



Designación	Probeta con entalla en U			Probeta con entalla en V		
	Medida nominal	Tolerancia de mecanizado		Medida nominal	Tolerancia de mecanizado	
			Símbolo ISO <sup>1)</sup>			Símbolo ISO <sup>1)</sup>
Longitud	55 mm	± 0,60 mm	j <sub>s</sub> 15	55 mm	± 0,60 mm	j <sub>s</sub> 15
Altura	10 mm	± 0,11 mm	j <sub>s</sub> 13	10 mm	± 0,60 mm	j <sub>s</sub> 12
Anchura:						
– probeta estándar	10 mm	± 0,11 mm	j <sub>s</sub> 13	10 mm	± 0,11 mm	j <sub>s</sub> 13
– probeta sección reducida	–	–	–	7,5 mm	± 0,11 mm	j <sub>s</sub> 13
– probeta sección reducida	–	–	–	5 mm	± 0,06 mm	j <sub>s</sub> 12
Ángulo de entalla	–	–	–	45°	± 2°	–
Altura bajo la entalla	5 mm	± 0,09 mm	j <sub>s</sub> 13	8 mm	± 0,06 mm	j <sub>s</sub> 12
Radio en el fondo cilíndrico de la entalla	1 mm	± 0,07 mm	j <sub>s</sub> 12	0,25 mm	± 0,025 mm	–
Distancia del plano de simetría de la entalla a los extremos de la probeta <sup>2)</sup>	27,5 mm	± 0,42 mm	j <sub>s</sub> 15	27,5 mm	± 0,42 mm	j <sub>s</sub> 15
Ángulo entre el plano de simetría de la entalla y el eje longitudinal de la probeta	90°	± 2°	–	90°	± 2°	–
Ángulo entre dos caras longitudinales adyacentes de la probeta	90°	± 2°	–	90°	± 2°	–

esfuerzos a alta velocidad de deformación

#### 4.1. Ensayo de flexión por choque sobre probeta CHARPY (III)

##### □ Realización:

- Centrado de la probeta. (distancia inferior a 0.5 mm)
- La maza golpea en la cara opuesta de la entalla
- Si no se especifica  $T^a \rightarrow T^a = 23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
- Si se indica  $T^a$ , la tolerancia será de  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- Si se realiza a  $T^a \neq$  a la de ambiente la probeta debe atemperarse el tiempo suficiente (10 min en medio líquido y 30 min en gaseoso)
- La probeta debe romperse antes de los 5 s después de salir del medio
- El dispositivo para sacar y colocar la probeta debe permitir que la probeta se mantenga en la tolerancia establecida
- Si la probeta se deforma pero no se rompe, no se puede determinar la energía absorbida. Se necesitará un péndulo mayor

#### 4.1. Ensayo de flexión por choque sobre probeta CHARPY (IV)

##### □ Resultado:

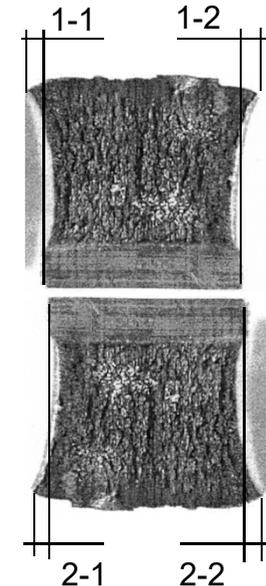
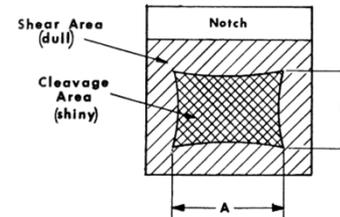
##### ➤ Energía absorbida (lectura directa dial o integración instrumentado)

- **KV(KU) X/Y = Z J** (tipo de probeta; X: valor nominal del péndulo, si no se indica es 300 J; Y: anchura de probeta reducida; Z: valor en J)

##### ➤ Expansión lateral: E.L. = max (1-1,2-1) + max (1-2,2-2)

##### ➤ Aspecto de la fractura

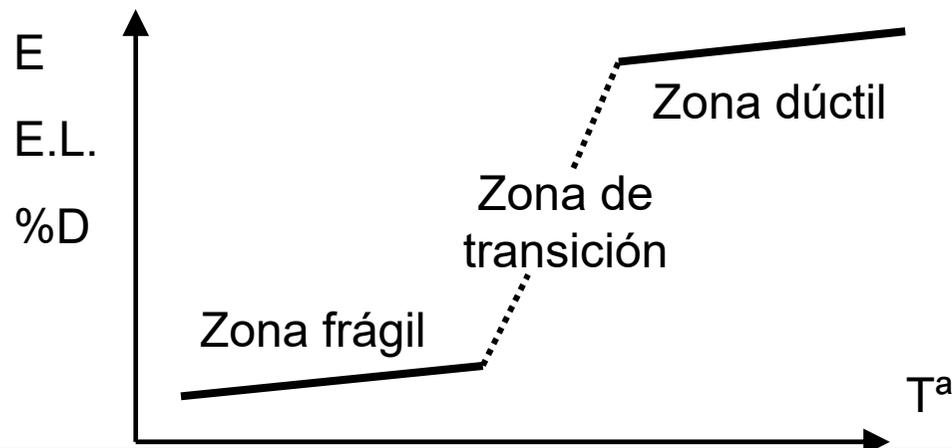
- Porcentaje de zona dúctil ó frágil
- Frágil (brillante), dúctil (mate)



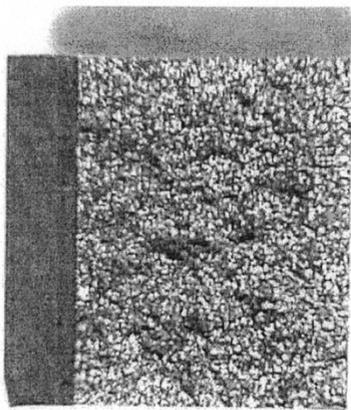
Dimension B, mm	Dimension A, mm																					
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10			
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88			
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75			
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69			
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62			
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56			
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50			
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44			
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37			
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31			
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25			
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19			
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12			
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6			
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0			

## 4.2. Curva de transición frágil-dúctil

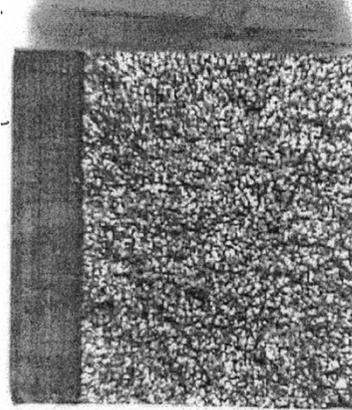
- ❑ El ensayo Charpy tiene sentido cuando se realiza a varios  $T^a$  para definir la curva de transición frágil-dúctil
- ❑ El principal uso de los ensayos Charpy es la selección de materiales resistentes a la rotura frágil por medio de la curva de transición
- ❑ Para ensayos a  $T^a$  bajas el material se comporta de forma frágil (energías absorbidas bajas)
- ❑ Para  $T^a$  superiores el comportamiento será dúctil (E altas)
- ❑ Zona intermedia: Zona de transición (salto brusco)



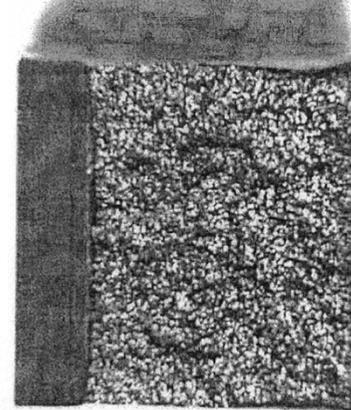
## 4.2. Curva de transición frágil-dúctil (II)



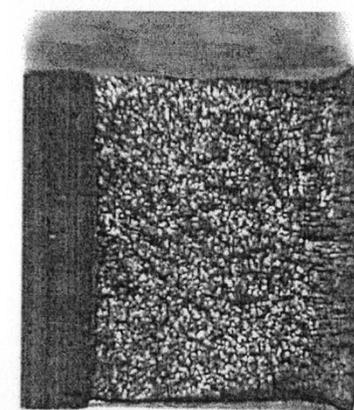
$T^a = -70 \text{ °C}; E = 6 \text{ J}$



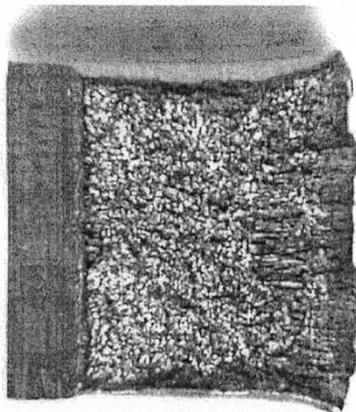
$T^a = -60 \text{ °C}; E = 6 \text{ J}$



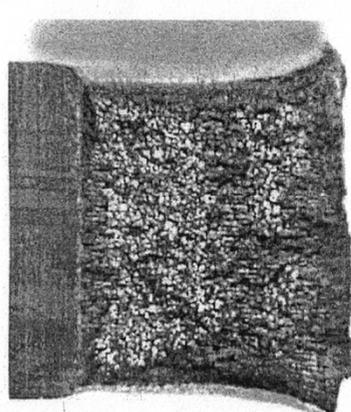
$T^a = -40 \text{ °C}; E = 14 \text{ J}$



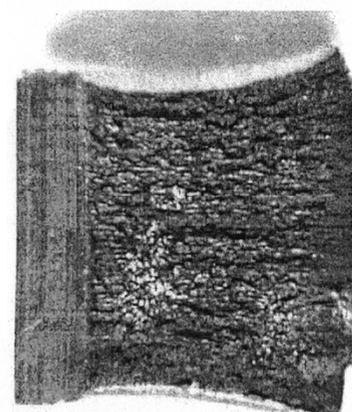
$T^a = -20 \text{ °C}; E = 19 \text{ J}$



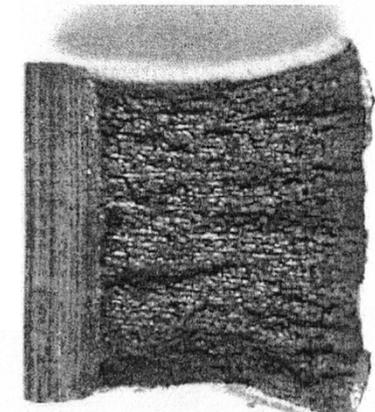
$T^a = 0 \text{ °C}; E = 32 \text{ J}$



$T^a = 20 \text{ °C}; E = 49 \text{ J}$



$T^a = 55 \text{ °C}; E = 67 \text{ J}$



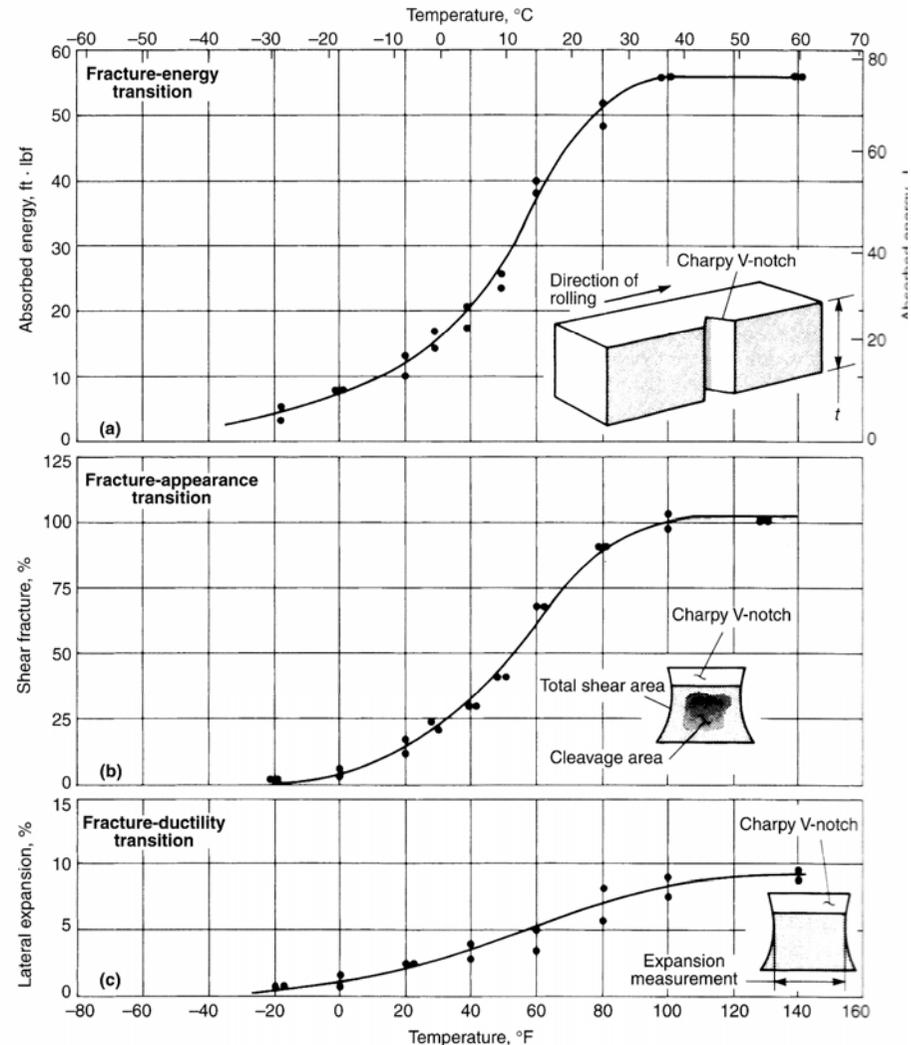
$T^a = 100 \text{ °C}; E = 74 \text{ J}$

## 4.2. Curva de transición frágil-dúctil (III)

□ Curva E-T<sup>a</sup> (R-T<sup>a</sup>)

□ Curva % dúctil-T<sup>a</sup>

□ Curva Exp. Lateral-T<sup>a</sup>



### 4.3. Temperatura de transición dúctil-frágil

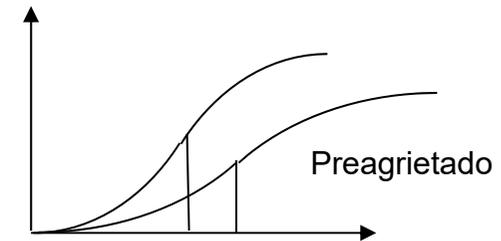
- ❑ Es la temperatura por encima de la cual no tiene lugar la rotura frágil del material sometido a tensiones en el rango elástico
- ❑ Criterios de definición de la  $T^a$  de transición
  - $T_1$ : 100% rotura dúctil (FTP, trans. fract. plást.) muy conservador
  - $T_2$ : 50 % rotura dúctil (FATT,  $T^a$  Trans. apariencia fractura)
  - $T_3$ : Valor medio de energías ( $\sim T_2$ )
  - $T_4$ : Valor  $C_v$  (muy usado)  $\rightarrow T^a$  para una energía de 20 J
  - $T_5$ : 100% rotura frágil (NDT, temperatura si ductilidad)
- ❑ Valores aproximados de la temperatura de transición
  - Metales: 10-20 %  $T^a$  fusión
  - Materiales cerámicos: 50-70 %  $T^a$  fusión

#### 4.4. Factores que afectan a la temperatura de transición

❑ Ensayo charpy preagrietado (sustitución de entalla por fisura de fatiga):

➤ Condiciones de sollicitación más severas

- Menor energía de rotura
- Mayor  $T^a$  de transición



❑ % de carbono → ↑ TT

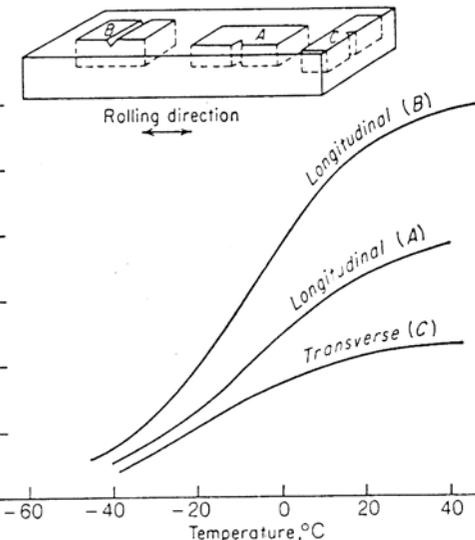
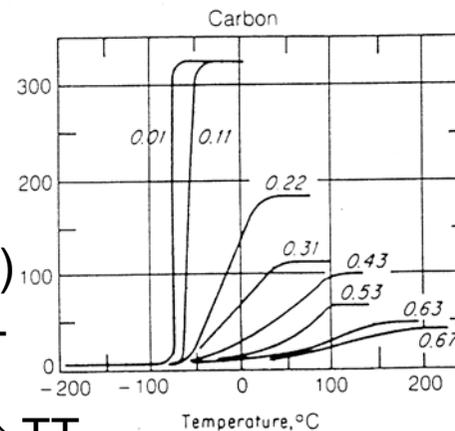
❑ Elementos de aleación  
Mn (↓↓), P (↑↑), N(↑),  
Ni(↓), Si(↑), Mo(↑↑), O(↑)

❑ ↑ Tamaño grano → ↑ TT

❑ ↑ espesor laminado → ↑ TT

❑ Orientación respecto a la  
dirección de trabajo

❑ Precipitados Nb, V → ↑ TT



#### 4.5. Ensayo CHARPY instrumentado

- ❑ UNE-EN ISO14556:2001 Acero. Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado
- ❑ Probeta: Probeta Charpy con entalla en V
- ❑ Proporciona información suplementaria sobre comportamiento en rotura
- ❑ El ensayo consiste en medir la fuerza de impacto en función del desplazamiento en flexión de la probeta
- ❑ El área bajo la curva Fuerza-desplazamiento define la E. absorbida
- ❑ Si la diferencia entre los valores de E obtenidos de la curva y del diál exceden de  $\pm 5J$  → revisar calibración, software, fricciones...

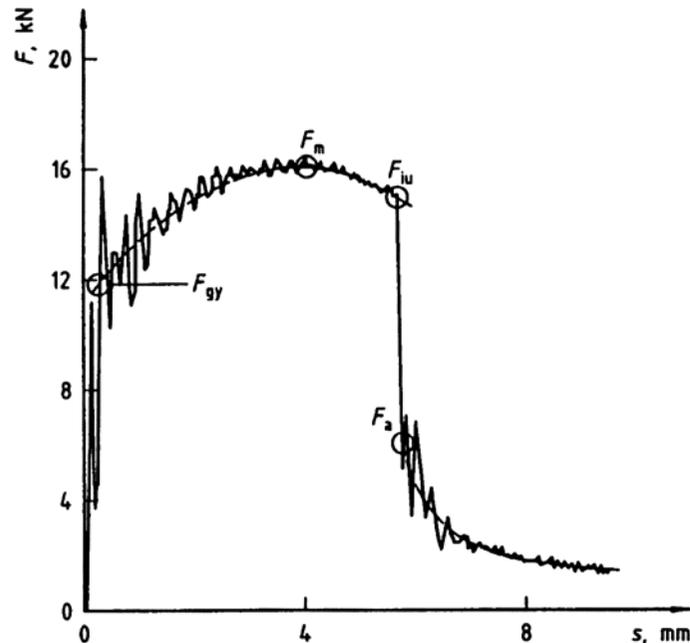
#### 4.5.1. Parámetros a medir

- ❑ **Medida de fuerza:** por medio de dos galgas de deformación conectadas a la cuchilla normalizada para formar un transductor de F
- ❑ **Medida de desplazamiento:**
  - Directamente: medida sin contacto del desplazto. de la cuchilla respecto al yunque por métodos ópticos, inductivos o capacitivos
  - Normalmente se determina indirectamente a partir de medidas F-t
  - La relación F-t medida sobre la cuchilla es proporcional a la aceleración característica
  - Masa (m), velocidad inicial de impacto ( $v_0$ ) y tiempos t siguientes a  $t_0$  (inicio de la deforamción)

$$\dot{\psi}(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \quad \Rightarrow \quad \psi(t) = \int_{t_0}^t \dot{\psi}(t) dt$$

- ❑ Aparato de registro: frecuencia mínima 250 kHz. Capacidad de almacenamiento de 2000 pto para cada señal en un tiempo de 8 ms

#### 4.5.2. Valores característicos de fuerza y desplazamiento



#### □ Fuerza:

- Fuerza elástica ( $F_{gy}$ )
- Fuerza máxima ( $F_m$ )
- F. correspondiente al inicio de la fisura inestable ( $F_{iu}$ )
- F. correspondiente al fin de propagación inestable ( $F_a$ )

#### □ Desplazamiento:

- Desplazamiento elástico general ( $s_{gy}$ )
- Desplazamiento para la fuerza máxima ( $s_m$ )
- Desplazamiento en el inicio de la fisura ( $s_{iu}$ )
- Desplazamiento en la interrupción de la fisura ( $s_a$ )
- Desplazamiento total ( $s_t$ ): abscisa para  $F = 0.02F_m$

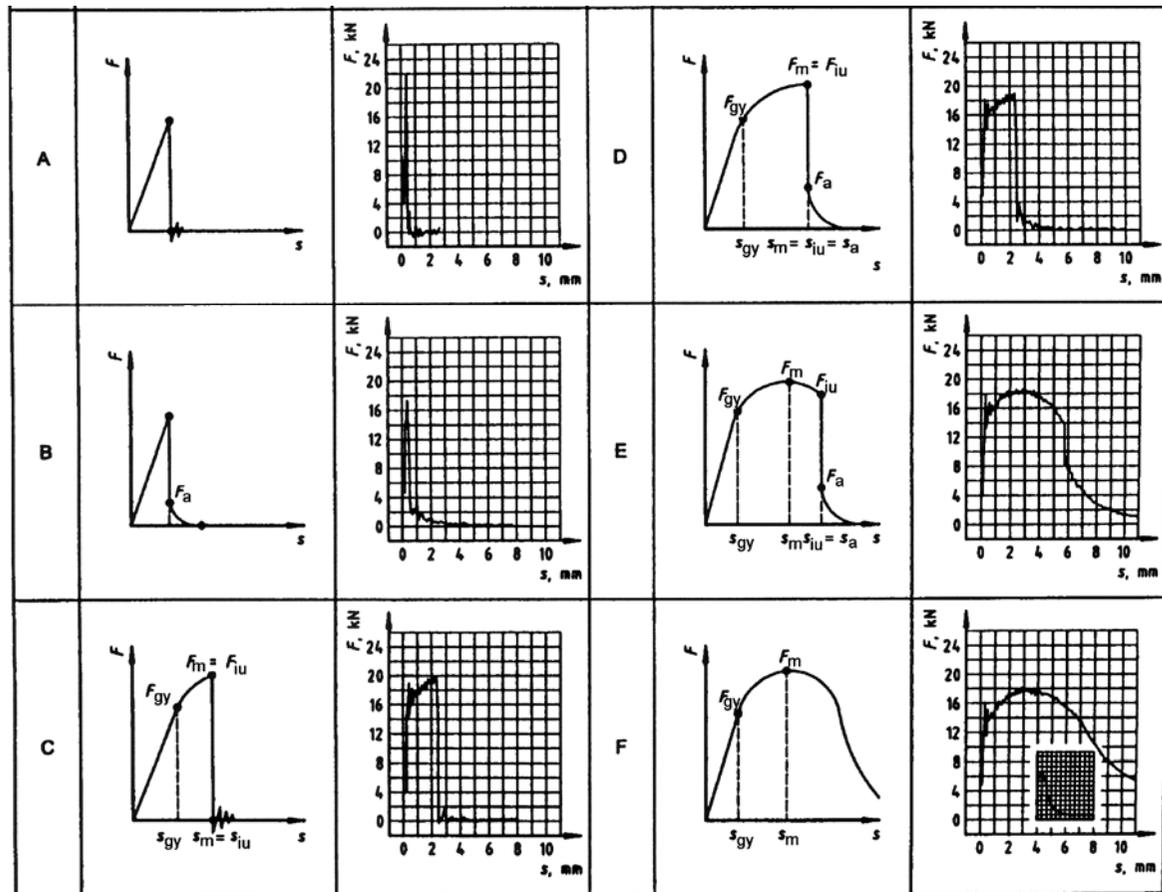
### 4.5.3. Evaluación de la curva fuerza-desplazamiento

- ❑ **Clasificación:**
  - Tipo A y B: dominio frágil
  - Tipo C, D y E: dominio de transición
  - Tipo F: dominio dúctil

❑ Tipo A, sólo se produce propagación de fisura inestable

❑ Tipos B, C, D y E, aparecen proporciones variables de fisura estable e inestable

❑ Tipo F, sólo se produce propagación de fisura estable



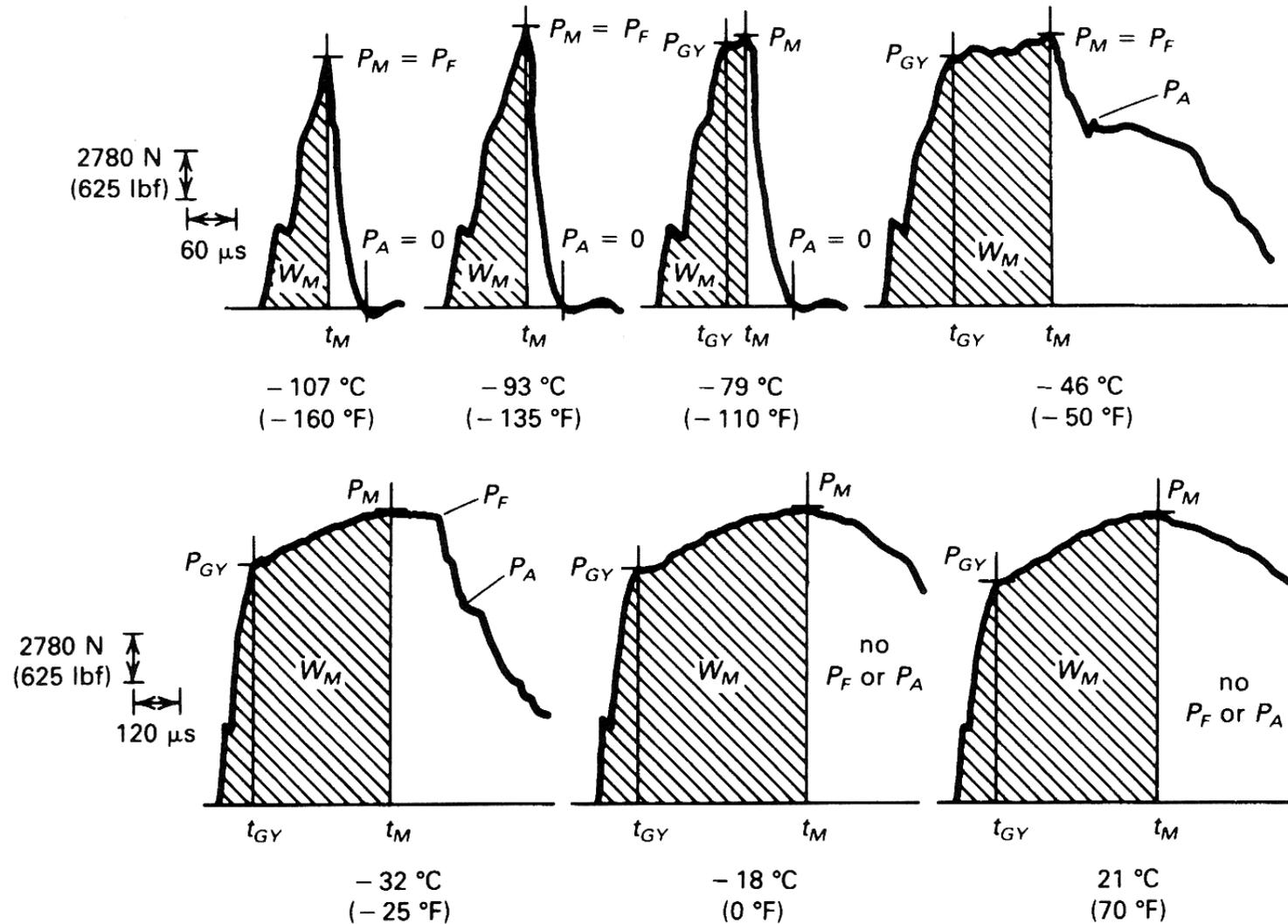
#### 4.5.4. Valores característicos de energía de impacto

- ❑ **Energía a la fuerza máxima ( $W_m$ ):** área de la superficie encerrada bajo la curva  $f-\Delta$  desde  $s = 0$  hasta  $s = s_m$
- ❑ **Energía al inicio de fisura ( $W_{iu}$ ):** área de la superficie encerrada bajo la curva  $f-\Delta$  desde  $s = 0$  hasta  $s = s_{iu}$
- ❑ **Energía a la interrupción de fisura ( $W_a$ ):** área de la superficie encerrada bajo la curva  $f-\Delta$  desde  $s = 0$  hasta  $s = s_a$ 
  - Debido al decremento brusco entre  $F_{iu}$  y  $F_a$ , generalmente  $W_{iu}=W_a$
- ❑ **Energía de impacto total ( $W_t$ ):** área de la superficie encerrada bajo la curva  $f-\Delta$  desde  $s = 0$  hasta  $s = s_t$

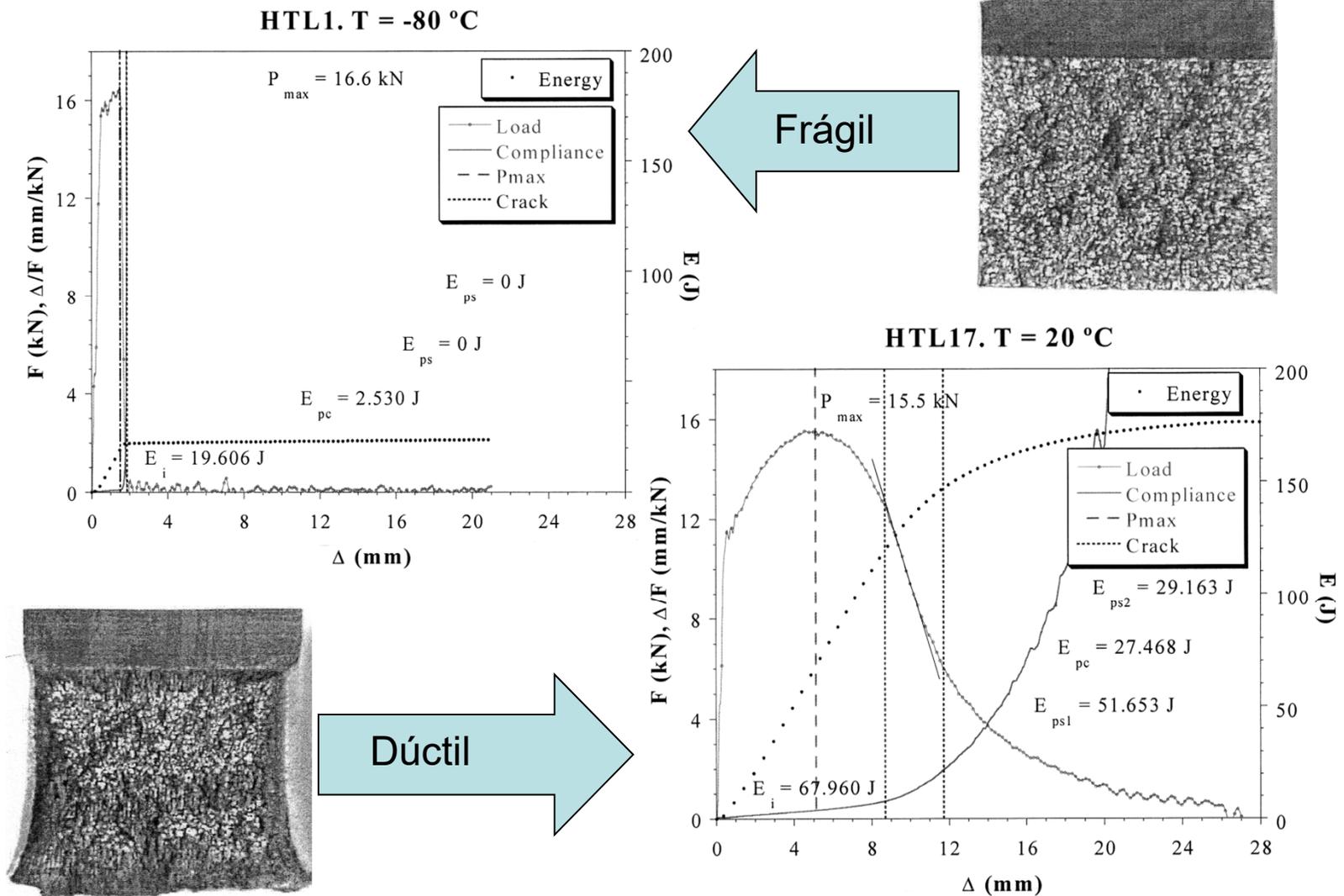
#### 4.5.5. Determinación de la proporción de Supf. con rotura dúctil

- ❑ Tipo F → 100 dúctil
- ❑ En el resto, la magnitud del decremento en relación con los otros valores característicos permite obtener valores aproximados (del orden del 20 %) de la proporción de superficie con rotura dúctil.
- ❑ Por ejemplo: 
$$\text{PSFD} = \left(1 - \frac{F_{iu} - F_a}{F_m}\right) \cdot 100(\%)$$

4.5.6. Ejemplos (influencia de la  $T^a$  en la Energía absorbida)

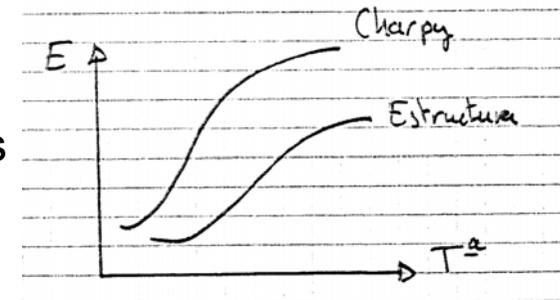


### 4.5.6. Ejemplos (diferencia entre ensayo sobre probeta dúctil y frágil)

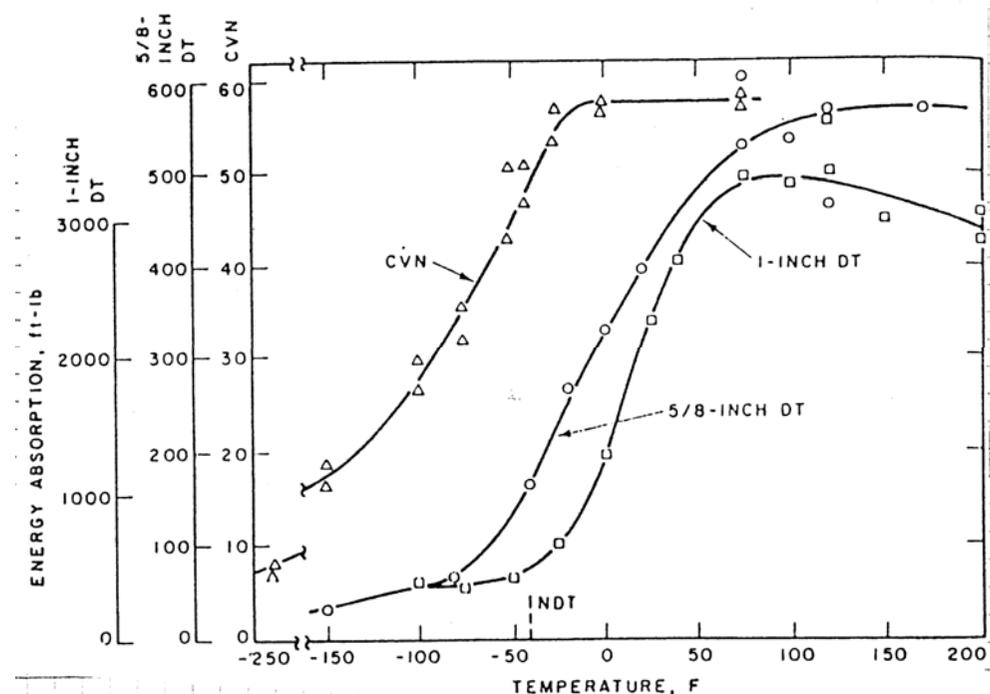


## 5. ENSAYOS A GRAN ESCALA

- ❑ Las reducidas dimensiones de las probetas Charpy no reproducen las condiciones reales
- ❑ Estructura (fisuras) → probeta (entalla)
- ❑ Charpy preagrietado resultados más parecidos

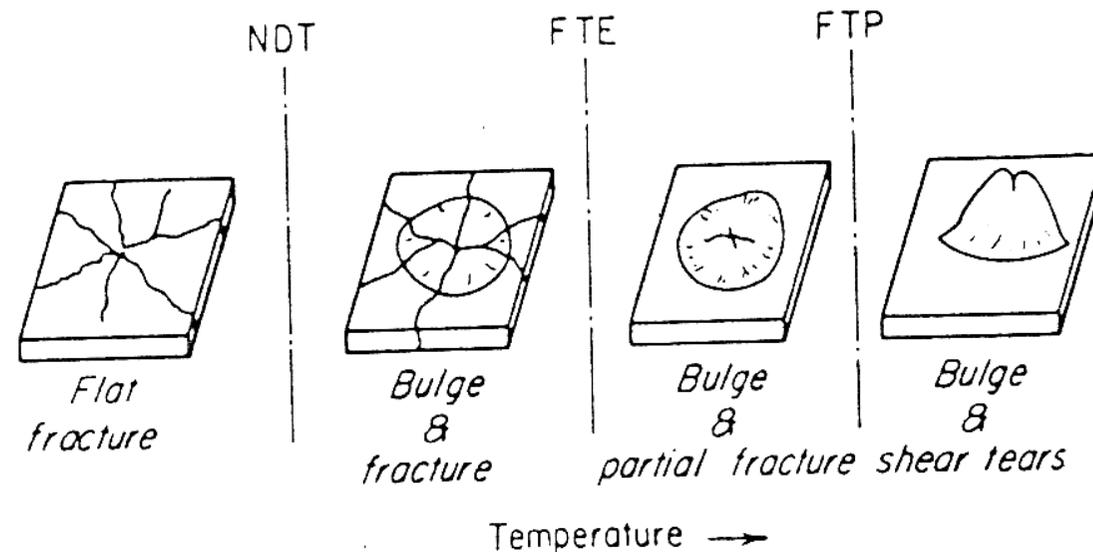


- ❑ Diferentes tamaños conducen a distintos resultados
- ❑ Ej: 25.5, 15.8 y 10 mm
- ❑ Se necesitan ensayos en probetas más grandes y con fisuras para que los resultados sean más representativos



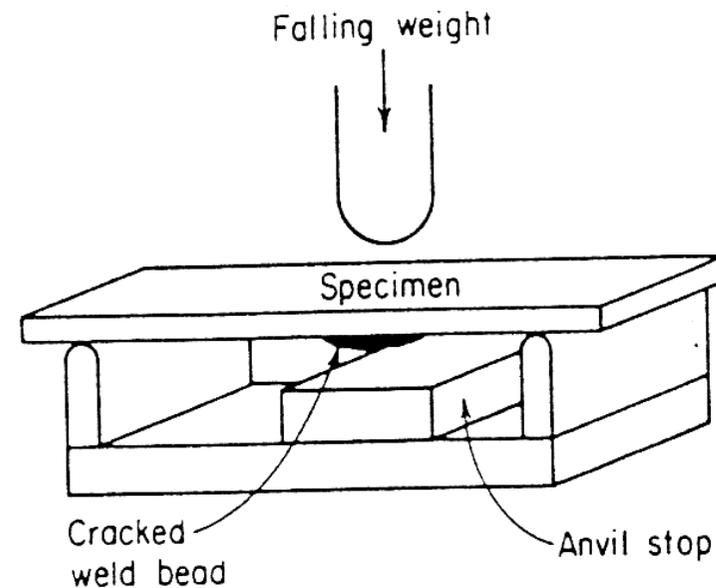
### 5.1. Ensayo de agrietamiento explosivo (explosión-crack starter test)

- ❑ Probeta: placa de 350x350x25 mm con soldadura frágil
- ❑ Se apoya en un orificio circular
- ❑ Se carga mediante una detonación explosiva
- ❑ Se realizan ensayos a diferentes  $T^a$
- ❑ El tipo de fractura define los distintos valores de la  $T^a$  de transición



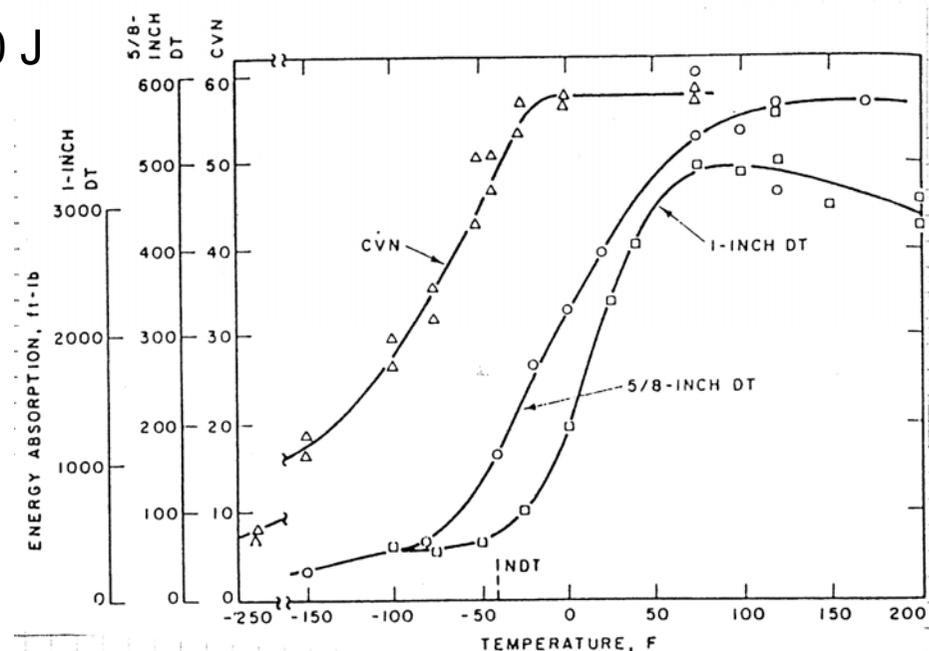
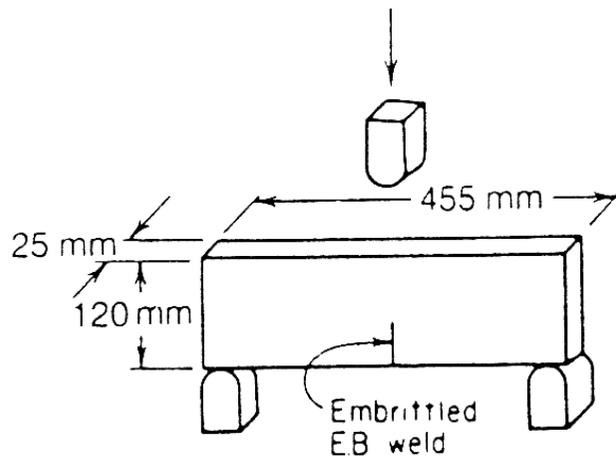
## 5.2. Ensayo de caída de peso (PELLINI, DWT, Drop Weight Test)

- ❑ Probeta: placa de 90x350x15-25 mm con soldadura frágil entallada
- ❑ Carga: Caída de peso → flexión en tres puntos
- ❑ La holgura del soporte limita las tensiones en el rango elástico
- ❑ NDT →  $T^a$  a la cual la fisura se propaga hasta ambos extremos de la probeta



### 5.3. Ensayo de desgarro dinámico (DT – Dynamic Tear)

- ❑ Ensayo Charpy a lo grande
- ❑ Habitualmente se emplean espesores entre 15 y 25 mm
- ❑ Entalla: soldadura frágil por haz de electrones
- ❑ Ensayo de rotura por golpeo con péndulo y determinación de la energía absorbida a diferentes T<sup>a</sup>
- ❑ Charpy: 300 J → DT: 14000 J



#### 5.4. Ensayo de parada de fisura (Robertson - CAT, crack Arrest test)

- ❑ Relación entre el nivel tensional y la capacidad del material de detener la propagación rápida de una grieta
- ❑ Carga de tracción uniforme en rango elástico a una placa de 150 mm de anchura en la que se provoca un gradiente térmico.
- ❑ La fisuración se inicia mediante impacto en el lado frío
- ❑ El punto donde se detiene la fisura define la CAT
- ❑ Otra posibilidad es realizar ensayo sin gradiente térmico a distintas temperaturas
- ❑ Ensayo de mayor utilidad que los anteriores ya que proporciona valores cuantitativos válidos para el diseño
- ❑ Poco común: necesita máquinas grandes y complejas y probetas grandes

