Charpy 000000 Torre de Caída 000000 Barra Hopkinson 000000 Cañón de gas 00000000 Bibliografía

## OpenCourseWare Protección Ligera de Sistema Móviles (PLSM) Tema 4: Caracterización dinámica de Materiales

Jesús Pernas Sánchez José Alfonso Artero Guerrero Fernando Naya Montáns

Universidad Carlos III de Madrid





Universidad

de Madrid 《마》《문》《문》 문 이익은 1/35



Péndulo Charpy

Torre de caída de peso

Barra Hopkinson

Cañón de gas

Bibliografía

Universidad Carlos III de Madrid 《 마 > 《 문 > 《 문 > 문 것 약 약 2/35

uc3m

Lnarpy DOOOOC rre de Caída 20000 Barra Hopkinson 000000 Cañón de ga

Bibliografía 00

### Introducción



Figura: Dependencia con la velocidad de deformación de aceros de construcción

Velocidad de deformación

Universidad Carlos III de Madrid (미) (문) (문) 문) 문 이익() 3/35

uc3m

• Lindholm (1964)

$$\sigma = (A + B\varepsilon^m) + (C + D\varepsilon)\log\dot{\varepsilon}$$

• Vinh (1979)

$$\sigma = F\varepsilon^m (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon_0}) e^{W/T}$$

• Campbell (1977)

$$\sigma = A arepsilon^m (1 + m \ln(1 + \dot{arepsilon} / \dot{arepsilon_0}))$$

• Johnson-Cook (1983)

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{m})(1 + c\ln(1 + \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon_{0}})\left(1 - \left(\frac{T - T_{amb}}{T_{fusion} - Tamb}\right)^{m}\right) \cup C3m$$

Universidad Carlos III de Madrid 《 마 > 《 문 > 《 문 > 《 문 > 문 · 오 < ~ 4/35



#### Properties for the Johnson–Cook Equation

Material	Ref.	A (MPa)	B (MPa)	n	С	m	$T_{\rm m}({ m K})$
Al 5083 <sup>a</sup>	(Gray III et al. 1994)	270	470	0.600	0.0105	1.200	933
Al 7039	(Johnson and Cook 1983)	337	343	0.410	0.0100	1.000	877
Al 7039ª	(Gray III et al. 1994)	220	500	0.220	0.0160	0.905	933
Ti–6Al–4V (low cost)	(Meyer, Jr. and Kleponis 2001)	896	656	0.500	0.0128	0.800	1930
1006 steel	(Johnson and Cook 1983)	350	275	0.360	0.0220	1.000	1811
4340 steel	(Johnson and Cook 1983)	792	510	0.260	0.0140	1.030	1793
RHA	(Gray III et al. 1994)	1225	1575	0.768	0.0049	1.090	1783
HHA	(Johnson and Holmquist 1989; Gray III et al. 1994)	1504	569	0.220	0.0030	0.900	1783

<sup>a</sup> The plate was obtained directly from the manufacturing line for the Bradley infantry fighting C3m vehicle.

Figura: Johnson Cook Properties for different Materials [2]

Universidad **Carlos III** 

de Madrid

### Dispositivos Experimentales en función de la velocidad de deformación



rpy 0000 orre de Caída 00000 Barra Hopkinsor 000000 Cañón de gas DOOOOOOC Bibliografía 00

#### Detalle de las mordazas debido a la inercia



Figura: Servohidráulica Quasistatica



### Péndulo Charpy: tenacidad del material

Se emplea en ensayos para determinar la tenacidad de un material. Son ensayos de impacto de una probeta entallada y ensayada a flexión en 3 puntos. La idea es medir la energía residual del péndulo para compararla con la absorbida por la probeta, mediante un equilibrio simple de energía potencial (Se debe tener en cuenta el rozamiento).



Figura: Péndulo Charpy

uc3m

Universidad Carlos III

arpy DOOOO orre de Caída 00000 Barra Hopkinsoi 000000 Cañón de gas 00000000

・ コ ト ・ 西 ト ・ 正 ト ・

Bibliografía 00

### Péndulo Charpy: tenacidad del material



Figura: Péndulo Charpy

uc3m

Universidad Carlos III de Madrid

9 / 35

#### Péndulo Charpy: tenacidad del material



#### Interpretación resultados: Charpy

$$a(t)=rac{F(t)}{m}$$

Mediante integración y conociendo la velocidad de impacto obtenemos la velocidad:

$$v(t)=v_0-\int_0^t a(t)dt$$

Mediante integración y conociendo la posición de impacto obtenemos el desplazamiento:

$$\mathbf{x}(t) = \int_0^t \left( \mathbf{v}_0 - \int_0^t \mathbf{a}(t) dt 
ight)$$

Conocido la fuerza y el desplazamiento durante el ensayo podemos obtener la energía:

$$E(t) = \int_0^t F(t) \int_0^t \left( v_0 - \int_0^t a(t) dt \right) dt$$

Universidad Carlos III de Madrid

re de Caída 00000 Barra Hopkinsor 000000 Cañón de gas

イロト イボト イヨト イヨト

Bibliografía

#### Interpretación resultados: Charpy



かくで 12/35

de Madrid

3

### Impacto Izod:tenacidad del material

Este ensayo similar al Charpy, se modifican las condiciones de contorno de la probeta.



Charpy 00000 orre de Caída 00000 Barra Hopkinso 000000 Cañón de ga

Bibliografía

#### Torre de caída de peso



Figura: Torre de caída de peso



Figura: Percutor



Figura: Instrumentación Universidad Carlos III de Madrid (미아 (문) (문) 문) 문 아이아 14/35

#### Torre de caída de peso



590 15 / 35

#### Interpretación resultados: Torre de caída

$$a(t)=\frac{F(t)}{m}$$

Mediante integración y conociendo la velocidad de impacto obtenemos la velocidad:

$$v(t)=v_0-\int_0^t a(t)dt$$

Mediante integración y conociendo la posición de impacto obtenemos el desplazamiento:

$$x(t) = \int_0^t \left(v_0 - \int_0^t a(t) dt\right)$$

Conocido la fuerza y el desplazamiento durante el ensayo podemos obtener la energía:

$$E(t) = \int_0^t F(t) \int_0^t \left( v_0 - \int_0^t a(t) dt \right) dt$$

∽ ⊂ 16 / 35

Universidad Carlos III de Madrid

イロト イボト イヨト イヨト





rre de Caída DOO●O Barra Hopkinsor 000000 Cañón de gas 00000000 Bibliografía 00

### Barra Hopkinson: Compresión



orre de Caída 00000 Barra Hopkinson 000000 añón de gas

Bibliografía 00

### Barra Hopkinson: Compresión

Ejemplo de señales experimentales sin probeta:



Figura: Señales puentes



19 / 35





Valor de las deformaciones en las secciones A y B

$$\varepsilon_A(t) = \varepsilon_I(t) + \varepsilon_r(t)$$

$$\varepsilon_B(t) = \varepsilon_T(t)$$

Valor de las velocidades en las secciones A y B

$$v_A(t) = -carepsilon_I(t) + carepsilon_r(t)$$
  
 $v_B(t) = -carepsilon_T(t)$ 







Valor de la velocidad de deformación en la probeta:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{v_B - v_A}{L_S} = \frac{c}{L_S} (-\varepsilon_T(t) + \varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t)) = \frac{-2c}{L_S} \varepsilon_r(t)$$

Nota 1: se supone equilibrio  $\varepsilon_l(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_T(t)$ Nota 2: El valor de *c* se toma como valor absoluto Valor de deformación en la probeta:

$$arepsilon(t) = \int \dot{arepsilon}(t) dt = rac{-2c}{L_S} \int arepsilon_r(t) dt$$

uc3m

Universidad

Carlos III de Madrid এ মেন্ট্র ক্রিক উ প্র 22/35



Valor de las tensiones en las secciones A y B

$$\sigma_A(t) = E(\varepsilon_I(t) + \varepsilon_r(t))$$

 $\sigma_B(t) = E(\varepsilon_T(t))$ 

Valor de las Fuerzas en las secciones A y B

$$F_A(t) = A_A E(\varepsilon_I(t) + \varepsilon_r(t))$$
$$F_B(t) = A_B E(\varepsilon_T(t))$$





Introducción Charpy Torre de Caida Barra Hopkinson Cañón de gas Bibliografía 00000 000000 000000 0000€0 0000000 00

#### Barra Hopkinson: Compresión



Valor de tensión en la probeta:

$$\sigma(t) = \frac{F_A + F_B}{2A_s} = \frac{A_B E}{2A_s} (\varepsilon_I(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_T(t)) = \frac{A_B E}{A_s} \varepsilon_T(t)$$

Nota: se supone equilibrio  $\varepsilon_I(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_T(t)$ 

uc3m

Universidad Carlos III



#### Barra Hopkinson: Tracción



orre de Caída 00000 Barra Hopkinson 000000 Cañón de gas ●0000000 Bibliografía

#### Cañón de gas: El ensayo de Taylor

El ensayo o impacto de Taylor es una manera experimental donde se puede observar y obtener tanto el límite elástico como la velocidad de propagación de la onda plástica. El ensayo consiste en el impacto de un cilindro de metal contra una pared que se puede considerar como rígida.



#### Consideraciones e hipótesis:



Figura: Ensayo de Taylor

- El límite elástico *σ<sub>y</sub>* es constante en toda la probeta
- La velocidad de propagación de la ondas c es mayor que la velocidad del impacto V o la propagación de la onda plástica c<sub>plas</sub>
- Idealiza el material como elastico, perfectamente plástico
- *x* es la zona no deformada plasticamente que viaja a velocidad *u*
- *h* altura de la zona deformada plásticamente.
   De tal manera que L > L<sub>1</sub> = x + h

Carlos III de Madrid এচ এলি এই চাও ই তিও্ও 27/35

Universidad

### Consideraciones e hipótesis:

Se puede definir un *dt* como el tiempo que tarda una onda elástica en recorrer la parte elástica (ida-vuelta



$$dt = \frac{2x}{c} \tag{1}$$

En ese tiempo el frente plástico avanzará:

$$dh = c_{plas}dt = c_{plas}rac{2x}{c}$$

Figura: Ensayo de Taylor

Se debe tener en cuenta que la parte x viaja a una velocidad *u* y por lo tanto reducirá la parte elastica. Por lo que la parte no deformada:

$$dx = -udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})dt \rightarrow \frac{dx}{dt} = -(u + c_{plas})_{\text{ersidad}}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})dt \rightarrow \frac{dx}{dt} = -(u + c_{plas})_{\text{ersidad}}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})dt \rightarrow \frac{dx}{dt} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})dt \rightarrow \frac{dx}{dt} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})dt \rightarrow \frac{dx}{dt} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

$$(a - udt - dh = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c} = -(u + c_{plas})\frac{2x}{c}$$

En ese tiempo la velocidad u ha sido modificada (decelerada) por la onda elástica<sup>a</sup> (recuerdese ecuación 1)

$$du = -2\varepsilon c = -2\frac{\sigma}{\rho c} \rightarrow \frac{du}{dt} = -\frac{\sigma}{\rho x}$$



Figura: Ensayo de Taylor

Hipótesis:

 $\begin{bmatrix} u \\ L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z_1 \end{bmatrix}$  • La velocidad del frente plastico es constante (no hay endurecimiento) y dividiendo las ecuaciones anteriores:  $du \qquad \sigma$ • La velocidad del frente plástico es constante  $c_{plas} = C$ 

$$\frac{du}{dx} = \frac{\sigma}{\rho x (u+C)}$$

Re-ordenando y aplicando las condiciones de contorno:  $\frac{\sigma}{\rho} \int_{L}^{X} \frac{dx'}{x'} = \int_{V}^{0} (u' + C) du' \frac{\text{UC3m}}{\text{Universidad}}$ 

<sup>a</sup>La onda en este periodo de tiempo viaja 2 veces (ida vuelta) S de Madrid 

29 / 35

Integrando la expresión anterior:

$$\frac{\sigma}{\rho V^2} \ln \left(\frac{L}{X}\right) = \frac{1}{2} + \frac{C}{V}$$



• La deceleración de la parte trasera es constante, por lo que el tiempo para deternerse viene dado por:  $\frac{L_1-X}{C}$ , tiempo que también se puede expresar como  $\frac{2(L-L_1)}{V}$  (ver ejercicios Tema 3). Por lo que:

$$\frac{C}{V} = \frac{L_1 - X}{2(L - L_1)}$$

Figura: Ensayo de Taylor

Aplicando esta hipótesis a la expresión anterior  $\sigma = \frac{\rho V^2(L_1 - X)}{2(L - L_1) \ln \left(\frac{L}{X}\right)}$ Universidad Carlos III de Madrid

・ロト・4日・4目・4目・ 目 のへで

30 / 35

orre de Caída 00000 Cañón de gas 00000●00 Bibliografía 00

### Cañón de gas: El ensayo de Taylor

Determinación ensayo Taylor

$$\sigma = \frac{\rho V^2(L_1 - X)}{2(L - L_1) \ln \left(\frac{L}{X}\right)}$$



Figura: Ensayo de Taylor

La hipótesis de no tener endurecimiento es muy restrictiva por lo que se plantearon diferentes metodologías para tener en cuenta el posible endurecimiento por deformación (y por tanto el cambio en la velocidad de la onda plástica)



Barra Hopkinson 000000 lañón de gas 000000€0 Bibliografía 00

### Cañón de gas: Ensayo Balístico



Carlos III de Madrid এ০ ৮ এলি ৮ এই ৮ এই প্র 32/35

Universidad

Bibliografía 00

### Cañón de gas: Ensayo Balístico



Fig. 4. (a) Residual Velocity versus impact velocity. (b) Delaminated area versus impact velocity.



0

orre de Caída 00000 Barra Hopkinson 000000 Cañón de ga 0000000

イロト イボト イヨト イヨト

Bibliografía ●O

# Bibliografía

The influence of laminate stacking sequence on ballistic limit using a combined experimental/fem/artificial neural networks (ann) methodology. Composite Structures, pages-, 2017.



P J Hazell.

Armour:materials, theory and design. CRC Press, 2016.



Marc André Meyers. Dynamic behaviour of materials. *Wiley and sons*, 1994.



Johnson W.

Impact strength of materials. *Edward Arnold*, 1972.



Jonas A. Zukas. Impact dynamics. *Wiley*, 1982.



Jonas A. Zukas. High velocity impact dynamics. *Wiley*, 1990. uc3m

Universidad **Carlos III** de Madrid

Barra Hopkinson 000000 Cañón de gas

Bibliografía ○●

# OpenCourseWare Protección Ligera de Sistema Móviles (PLSM)

Salvo indicación expresa, todas las imágenes son de la autoría de los autores del curso. Contenido distribuido bajo la licencia "Creative Commos Attribution - Non-commercial - Non Derivatives".



uc3m

Universidad Carlos III de Madrid

<ロト < 部 ト < 三 ト < 三 ト 三 の Q () 35 / 35