

Desarrollo de una metodología experimental para el estudio de problemas de contacto empleando técnicas ópticas de campo completo

E. López-Alba⁽¹⁾, P. Romero-Carrillo⁽¹⁾, R. Dorado⁽¹⁾, F. A. Díaz⁽¹⁾,

*(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Campus las Lagunillas, Edif. A-3, 23071, Jaén
E-mail: elalba@ujaen.es, fdiaz@ujaen.es, rdorado@ujaen.es,*

La ley de contacto que se obtiene como resultado de las fuerzas y desplazamientos que se originan durante la presión de un sólido de revolución, como es una bola, contra una lámina ha sido investigado desde hace décadas. En este trabajo se realiza un análisis de la ley de contacto que se produce ejerciendo una fuerza entre una placa metálica y una esfera de acero. Dicho análisis se realiza mediante el uso de la técnica de Correlación Digital de Imágenes 3D. Para ello, dos cámaras CCD son utilizadas para obtener una secuencia de imágenes durante el ensayo, pudiéndose obtener el campo de desplazamientos fuera del plano observado durante el ensayo. Previamente es requerida una calibración de las cámaras para determinar la posición relativa entre ellas y respecto frente al objeto sobre el cual se realiza el ensayo. La deformación originada en la placa metálica a distintos niveles de carga es estudiada en toda el área en contacto.

Los resultados se comparan con los estudios analíticos que predicen una ley de contacto teórica.

1. INTRODUCCIÓN

La respuesta de materiales ante determinadas cargas ha sido objeto de estudio en el campo de la ingeniería para poder determinar su comportamiento estructural. Además en las últimas décadas el comportamiento de las estructuras ante cargas dinámicas como impactos ha sido un campo de investigación ampliamente abordado [1-4]. Generalmente para predecir el comportamiento a impacto de las estructuras, es utilizada la ley de contacto determinada experimentalmente a partir de la realización de un ensayo en condiciones estáticas [5]. Dichos ensayos consisten en la determinación de la relación entre fuerza e indentación, definida esta como la diferencia entre el desplazamiento del proyectil o impactador y la parte trasera de la lámina sobre la que se realiza el ensayo [6].

En ensayos realizados para la determinación de la indentación producida por el impactador sobre una placa, se suele utilizar un lector LVDT [3] el cual traduce en voltaje, de forma proporcional, la deformación que se haya producido en la zona de contacto.

En el presente trabajo, se ha realizado un análisis de los parámetros que intervienen en las leyes de contacto y se establece una metodología experimental para la medida de estos durante el ensayo utilizando una técnica óptica de campo completo denominada Correlación Digital de Imágenes (DIC) [7]. Esta técnica se utiliza en 3-D por lo tanto ha sido necesario el uso de dos cámaras digitales y una calibración entre estas y el objeto a medir. Posteriormente se han realizado ensayos para validar la metodología desarrollada y ver cómo influyen parámetros tales como el diámetro del impactador. Los resultados fueron comparados con los modelos analíticos elásticos.

2. LEY DE CONTACTO EN UN MATERIAL

La fuerza ejercida en la región de contacto entre dos cuerpos y la deformación producida durante un ensayo de contacto son variables necesarias para determinar la ley de contacto de un material. Los ensayos se realizan de manera experimental para posteriormente emplear simulaciones numéricas con las que estudiar el comportamiento de diferentes materiales.

De acuerdo con la teoría de Herz [8], el desplazamiento relativo entre dos cuerpos elásticos lisos y curvados en contacto viene dado por (1):

$$\alpha = k_H F^{2/3} \quad (1)$$

donde α es la indentación, F la fuerza aplicada y k_H (2) la resistencia de contacto determinada por la geometría de la superficie y las propiedades elásticas de los dos cuerpos en contacto, siendo su valor (2):

$$k_H = \frac{4}{3} E R^{1/2} \quad (2)$$

En esta última expresión, los parámetros R y E se determinan de la forma siguiente (3-4):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

Donde R_1 y R_2 son los radios de curvatura de los cuerpos en contacto, E_1, ν_1 y ν_2, E_2 son el módulo de Young y de Poisson de ambos cuerpos.

Posteriormente Sun C.T. [9] propuso una ley de Hert modificada investigando el fenómeno de la indentación realizando ensayos estáticos sobre estructuras fabricadas con materiales compuestos. Las leyes de contacto modificadas se representan mediante (5-6):

$$F = k \alpha^n \quad (5)$$

$$k = \frac{4}{3} \frac{R^{1/2}}{\frac{1-\nu_r^2}{E_r} + \frac{1}{E_p}} \quad (6)$$

Donde R es el radio del impactador que ejerce el contacto, ν_r es el módulo de Poisson del impactador, E_r y E_p los módulos de Young en la dirección del espesor del impactador y laminado respectivamente.

Además Crook [10] observó el fenómeno de indentación de placas de acero e indentadores esféricos en la fase de la descarga, comportándose los materiales según (7). Yang y Sun [11] observaron en sus ensayos fuerza- indentación los valores que podía adoptar el exponente q que se representa en dicha ecuación que puede estar entre 1.5 y 2.5.

$$F = F_m \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_m - \alpha_0} \right)^q \quad (7)$$

Donde F_m y α_m son la máxima fuerza de contacto y la máxima indentación respectivamente. α_0 es la indentación permanente tras el cese de aplicación de la fuerza.

En el análisis de la ley de contacto en materiales compuestos, diversas investigaciones [6] concluyen, que el material a la hora de aplicarse la carga pasa por diferentes estados. Primeramente el material se comporta de manera elástica. Una vez que ha superado una determinada indentación denominada crítica la respuesta del material es plástica, de ahí que se defina una ley de contacto durante la carga denominada carga elastoplástica [12].

La determinación de la ley de contacto es objeto de este estudio, utilizando para ello la técnica óptica de Correlación Digital de Imágenes 3D (DIC-3D). Mediante dicha técnica se pretende cuantificar durante un ensayo estático los parámetros involucrados en las leyes de contacto mencionadas anteriormente.

DIC-3D es una técnica óptica de campo completo mediante la cual se puede realizar medidas de desplazamientos y deformaciones. Para ello, la superficie, debe presentar un contraste suficiente para poder cuantificar una escala de grises de forma aleatoriamente distribuida. Dicha superficie, en su estado de referencia, se divide en facetas virtuales, buscando el centro de dichas facetas mediante algoritmos correlación[13], en imágenes sucesivas del ensayo donde si hay aplicada una carga y por lo tanto habrá desplazamientos fuera de plano.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE MEDIDA

En este apartado se explica la metodología experimental desarrollada para la medición de la indentación durante un ensayo estático.

El material empleado ha sido Aluminio 1050, las dimensiones de las probetas fueron de 150×150×2 mm. La probeta previamente había sido tratada para poder aplicar la técnica DIC, para ello se pintó de blanco y posteriormente se proyectó puntos negros de forma aleatoria (speckle). De esta manera se conseguía el contraste suficiente para poder aplicar los algoritmos de DIC. Posteriormente la probeta se sujetó a una estructura, la cual mediante las fijaciones laterales, permitió empotrar los cuatros lados de la probeta como muestra la figura 1.

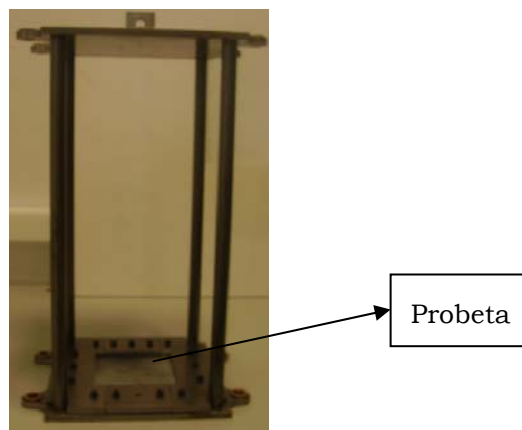


Figura 1. Estructura fabricada para los ensayos de contacto

Los indentadores utilizados fueron esferas de 12 y 18 mm de diámetro.

La estructura se acopló a una máquina hidráulica universal de ensayos MTS de capacidad de carga de 25 kN, mediante la cual se desplazaba el pistón para generar el contacto entre ambos cuerpos. Seguidamente se realizaron las medidas de la fuerza aplicada en cada momento como se puede ver en la figura 2.

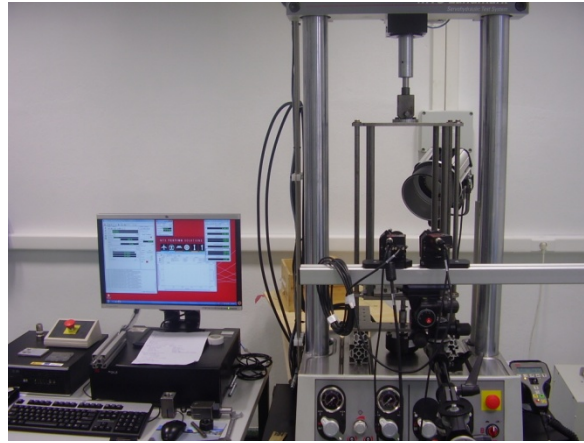


Figura 2. Set-up del ensayo de contacto

A continuación se posicionaron las dos cámaras CCD necesarias para la aplicación de la técnica DIC. Dichas cámaras eran iguales (Avt Stingray IEEE 1394b, blanco y negro) con una resolución espacial de 5 Mpíxel, lentes Schneider de 23 mm de distancia focal. El sistema DIC fue calibrado, para ello se tomaron una serie de imágenes de una rejilla con puntos espaciados unas distancias conocidas, obteniendo así la posición de las cámaras entre sí y con respecto al objeto de medida, figura 3

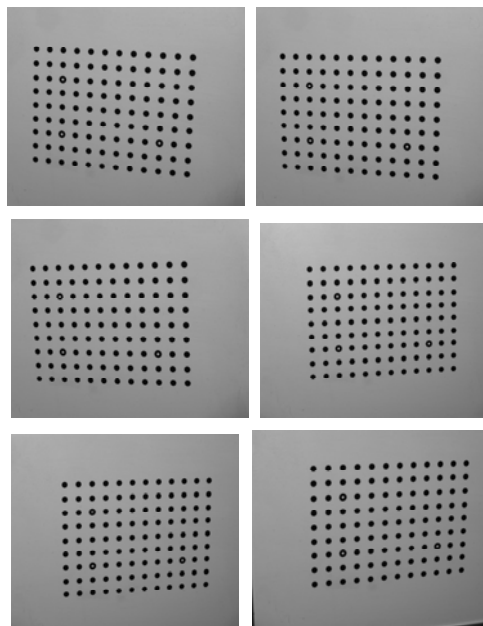


Figura 3. Imágenes de calibración

El procedimiento de medida, consistió en la aplicación de una fuerza entre la probeta y la bola de forma progresiva. Al mismo tiempo se tomaron imágenes con DIC que fueron postprocesadas. El postprocesado se realizó dividiendo la superficie en estudio en facetas virtuales de 29×29 píxeles, determinando los desplazamientos producidos para cada estado de carga, figura 4.

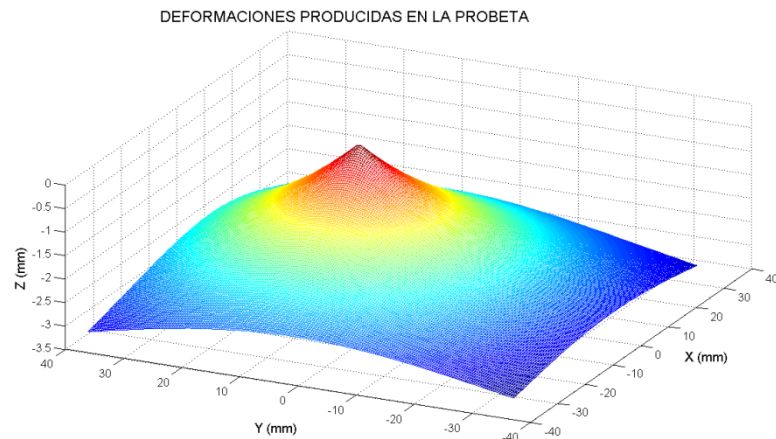


Figura 4. Deformación producida en la probeta ante la sollicitación de una carga estática.

4. RESULTADOS

Los ensayos realizados se llevaron a cabo primeramente con una esfera de diámetro 18 mm. Para lo cual se fue incrementando la fuerza hasta un valor de 1170N y al mismo tiempo se tomaron imágenes utilizando DIC para la medición de la indentación que se producía en cada instante.

En la figura 5 se puede observar la ley de contacto experimental obtenida tanto para la carga como para la descarga, representándose la fuerza aplicada frente a la indentación producida en el material en cada estado. Así mismo, se puede observar que en la descarga hay una indentación permanente de valor 0.16mm.

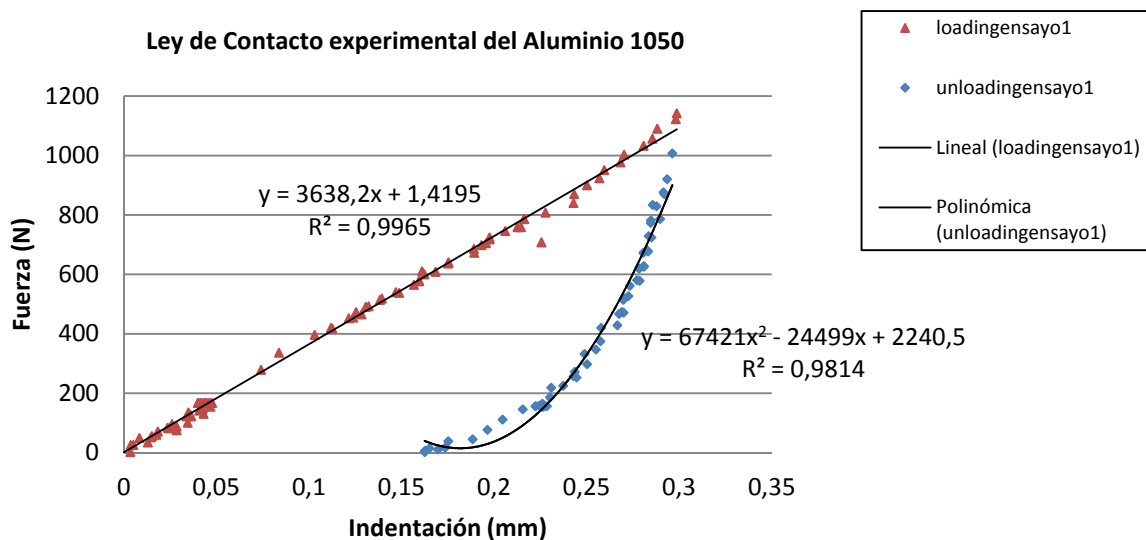
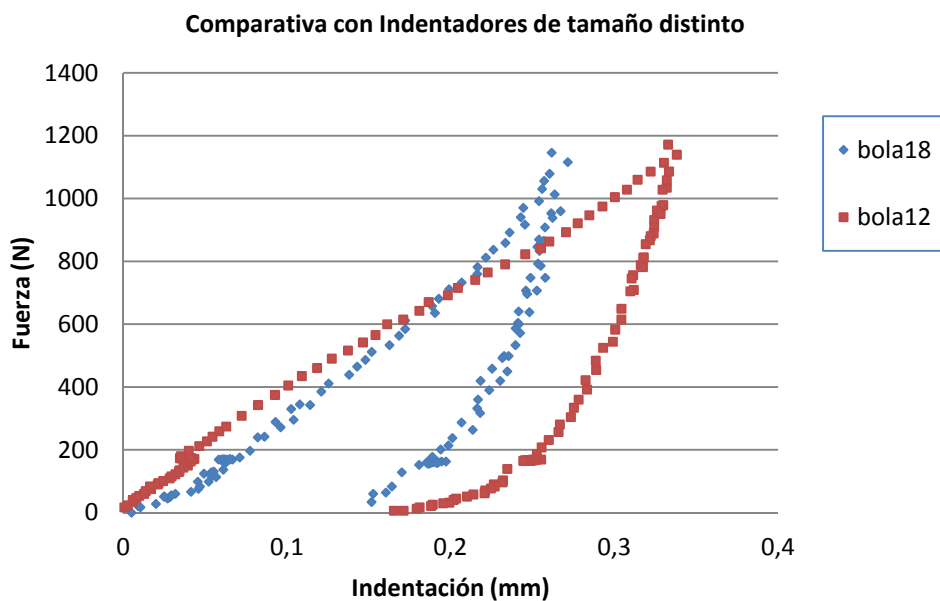


Figura 5. Deformación producida en la probeta ante la sollicitación de una carga estática.

Del mismo modo se han realizado ensayos utilizando esferas de distintos tamaños. En la figura 5 se pueden ver los resultados obtenidos para ensayos con diámetros 18 y 12 mm. Se puede apreciar que la esfera de menor diámetro tiene menor superficie de contacto, por lo tanto, para la misma fuerza aplicada la indentación será mayor.



Los resultados de las medidas de indentación obtenidos han sido comparados con los ensayos realizados con un reloj comparador, obteniendo valores muy similares.

5. CONCLUSIONES

En el trabajo mostrado, se pone de manifiesto la posibilidad de la utilización de técnicas ópticas para la medida de indentación durante la realización de un ensayo de contacto entre una esfera y una placa de material. En particular, la técnica de Correlación Digital de Imágenes 3D ha sido utilizada para la medida de deformaciones y desplazamientos fuera de plano. A partir de estos es extraída la indentación producida. Diversos ensayos se han realizado ajustando los resultados por mínimos cuadrados. Además la influencia del parámetro del radio de la esfera ha sido analizada, concluyendo experimentalmente que se obtiene los mismos efectos que predice la teoría.

6. REFERENCIAS

- [1] I.M Daniel, J.L. Abot, P.M. Schubel, J.J. Luo. *Response and Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact*. *Experimental Mechanics* 52 (2012), 37-47.
- [2] P. Kumar, J. LeBlanc, D.S. Stargel, A. Shuckla. *Effect of plate curvature on blast response of aluminum panels*. *International J. of Impact Engineering*, 46 (2012), 74-85.
- [3] C.T. Sun, A. Dicken. *Characterization of Impact Damage in Arall Laminates*. *Composites Science and Technology*, 49 (1993) 139-144.
- [4] A.J. McMillan, C. Monroy-Aceves, M.P.F. Sutcliffe. *Moderate energy impact analysis combining phenomenological contact law with localised damage and intergral equation method*. *International Journal of Impact Engineering*, 43 (2012) 29-39.
- [5] W.J. Liou. *Impact analysis of laminated composite plates with statical indentation laws*. *Computer&Structures Vol 62*.(1997) 817-829.
- [6] S. Abrate, *Impact on Composite Structures*, Cambridge University Press,(1998)
- [7] Chu. T, Ranson WF, Sutton MA, Peters WH. *Applications of digital image correlation to experimental mechanics*. *Exp Mech*, 253, (1985), 232-244.
- [8] H. Hertz. *Über die Berührung fester elastischer Körper*. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92, (1881), 156-71.
- [9] C.T. Sun. *An analytical method for evaluation of impact damage energy of laminated composites*. *ASTM STP. 617*, (1977), 427-440.
- [10] A.W. Crook. *A study of some impacts between metal bodies by a piezoelectric method*. *Proc. Royal Soc.* 212,(1952), 377-390
- [11] S.H. Yang C.T. Sun. *Indentation law for composites laminates*. *ASTM STP*, 787, (1982), 425-449.
- [12] S.Y. Ahmet, A.P. Christoforou, M.A. Majeed. *A nonlinear visco-elastoplastic impact model and the coefficient of restitution*. *Nonlinear Dynamics*. 66, (2011) 509-521
- [13] Pan B., Qian K., Xie H. y Asundi A. *Two dimensional digital image correlation for in plane displacement and strain measurement. A review*, *Measurement Science and Technology*. 20, (2009).