

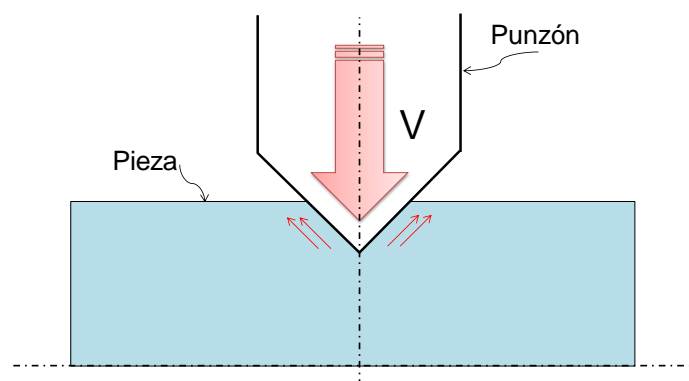
## 1. Introducción

En los estudios efectuados hasta la fecha relacionados con la indentación, ésta ha sido considerada como un proceso de fabricación secundario debido al tipo de deformaciones que se obtienen a partir de su aplicación, quedando relegada, de este modo, a la realización de ensayos, como los de dureza. La deformación que se produce en una pieza a conformar mediante el proceso de indentación es, generalmente, localizada y de valores reducidos, pudiendo llegar a tener sólo efecto superficial, especialmente en los ensayos de dureza mencionados (Bernal et al. 2012; Chakrabarty 2006).

No obstante, con el reciente desarrollo producido en la industria de manufactura, este proceso se encuentra en auge debido a la gran importancia que presenta como proceso de deformación plástica. Se están consiguiendo significativos avances en procesos basados en la indentación, como puede ser el denominado Proceso de Forja Incremental Localizada (PFIL) o el Proceso de Indentación Múltiple (PIM), ambos clasificados como Procesos de Deformación por Conformado Plástico (PDCP). Este tipo de procesos permite obtener el mismo tipo de deformación que el alcanzado con los procesos actuales mediante la aplicación de unos menores esfuerzos. Además, no requiere matrices con formas complejas, resultando procesos muy flexibles gracias a la posibilidad de ser implementados por completo mediante Control Numérico (Camacho et al. 2012).

Por otro lado, el Teorema del Límite Superior (TLS) mediante su aplicación modular de Bloques Rígidos Triangulares (BRT), desarrollado por F. Martín en 2009 y basado en los estudios llevados a cabo por Kudo en 1960 y 1961, es un método que permite la obtención de los esfuerzos de deformación necesarios para conseguir la deformación estimada en la pieza a deformar, adaptándose al tipo de proceso aplicado. Esta técnica se caracteriza por su sencilla aplicación, una vez que el modelo matemático ha sido generado. Tan sólo con la introducción de algunos de los parámetros conocidos presentes en el proceso, como pueden ser las dimensiones de la matriz o la profundidad de la deformación requerida, el modelo proporciona la magnitud del esfuerzo necesario para la obtención de dicha deformación.

**Figura 1: Indentación con punzón inclinado.**



En el presente trabajo, el proceso de indentación se estudia desde la perspectiva del TLS. Se ha desarrollado un nuevo modelo modular adaptado a este tipo de procesos de conformado plástico. Se analiza un caso de indentación ejecutado por un punzón inclinado (Figura 1). Una vez desarrollada la formulación matemática pertinente, se podrán estudiar casos de indentación en los que se presenten diferentes combinaciones de punzón plano e inclinado, siendo el modelo simple para casos de indentación solo con punzón plano

## 5. Referencias

- Babaei, A., Faraji, G., Mashhadi, M. M., & Hamdi, M. (2012). Repetitive forging (rf) using inclined punches as a new bulk severe plastic deformation method. *Materials Science and Engineering: A*, 558, 150-157.
- Bermudo, C., Martín, F., & Sevilla, L. (2013). Analysis and selection of the modular block distribution in indentation process by the upper bound theorem. *Procedia Engineering*.
- Bermudo, C., Martín, F., & Sevilla, L. (2014a). Optimización del modelo modular en procesos de indentación mediante el teorema del límite superior. *Anales de Ingeniería Mecánica*, 19, 97.
- Bermudo, C., Martín, F., & Sevilla, L. (2014b). Selection of the optimal distribution for the upper bound theorem in indentation processes. *Materials Science Forum*, 797, 117-122.
- Bernal, C., Camacho, A. M., Arenas, J. M., & Rubio, E. M. (2012). Analytical procedure for geometrical evaluation of flat surfaces formed by multiple indentation processes. *Applied Mechanics and Materials*, 217-219, 2351-2356.
- Camacho, A. M., Marín, M. M., Rubio, E. M., & Sebastian, M. A. (2012). Application of different simulation strategies for the analysis of multi-stroke localised-incremental forming operations. *Materials Science Forum*, 713, 19-24.
- Chakrabarty, J. (2006). *Theory of plasticity*. U.K.: Elsevier Science.
- Goryacheva, I. G., Murthy, H., & Farris, T. N. (2002). Contact problem with partial slip for the inclined punch with rounded edges. *International Journal of Fatigue*, 24(11), 1191-1201.
- Johnson, W., & Mellor, P. P. B. (1983). *Engineering plasticity*: Ellis Horwood Limited.
- Kudo, H. (1960a). Some analytical and experimental studies of axi-symmetric cold forging and extrusion—i. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2(1-2), 102-127.
- Kudo, H. (1960b). An upper-bound approach to plane-strain forging and extrusion-i. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1(1), 57-83.
- Kudo, H. (1961). Some analytical and experimental studies of axi-symmetric cold forging and extrusion—ii. *International Journal of Mechanical Sciences*, 3(1-2), 91-117.
- Martín, F. (2009). Desarrollo, integración y optimización en el estudio del proceso de forja mediante el teorema del límite superior a través del modelo de bloques rígidos triangulares. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga, Málaga.
- Prager, W., & Hodge, P. G. (1951). *Theory of perfectly plastic solids*. Wiley, New York: John Wiley & Sons.
- Sackfield, A., Dini, D., & Hills, D. A. (2005). The finite and semi-infinite tilted, flat but rounded punch. *International Journal of Solids and Structures*, 42(18-19), 4988-5009.
- Tajul, L., Maeno, T., & Mori, K.-i. (2014). Successive forging of long plate having inclined cross-section. *Procedia Engineering*, 81, 2361-2366.