

# Troquel sensorizado para el estudio de las principales fuerzas que intervienen en el proceso de embutición.

**L. A. Valdivia Pérez\***, **F. Robles Proenza\*\***, **R. Santana Milan\*\***.

\*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pinar del Río, C/ Martí Final 270, Pinar del Río, Cuba.

\*\*Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín. Ave. XX Aniversario, Holguín, Cuba.

Email: valdivia@meca.upr.edu.cu ; frobles@eftshlg.co.cu ; director@cadcam.uho.edu.cu

(Recibido el 15 de Diciembre de 2005, aceptado el 12 de Febrero de 2006)

## Resumen.

El control de las fuerzas que intervienen en el desarrollo del embutido, así como también en la generación de la fuerza de fricción, es una vía para lograr la disminución de los defectos en las piezas y minimizar la fricción. Mediante el empleo de la electrónica moderna y las técnicas de sensorización, como complemento necesario, puede obtenerse un control integral del proceso.

En el presente trabajo se muestra el proceso de diseño y selección de los componentes de un sistema de regulación y control para un troquel que ha sido diseñado y construido con el objetivo de conocer el comportamiento de las principales fuerzas que intervienen en el proceso de embutición. Como elementos de medición y control de los parámetros del proceso se utilizan diversos tipos de sensores o captadores.

**Palabras claves:** Control de fuerzas en el embutido, troquel sensorizado, sistema de control, captador, fricción y desgaste en troqueles.

## 1. Introducción.

En el proceso de embutición, la obtención de una pieza sin defectos, grietas, fisuras o arrugas, se consigue controlando el flujo de material entre punzón y matriz y sobre todo, entre matriz y pisador. (Schey, 1997). El flujo de material entre el pisador y la matriz actualmente se controla por la presión de pisado y el coeficiente de rozamiento entre la chapa, matriz y pisador. Si las fuerzas de rozamientos son muy elevadas, presión de pisado elevada o falta de lubricación, la chapa llegará a romperse o agrietarse; si las fuerzas de rozamiento son inexistentes, presión de pisado muy baja y/o gran cantidad de lubricante, se generarán arrugas. (García, 1999).

El proceso de conformado (Figura 1) es tan complejo, debido a sus interacciones, que es imposible su descripción o comprensión exacta. Se ha establecido que en la mayoría de las operaciones el éxito depende, sobre todo, del conocimiento y control del desgaste de la herramienta y de la fricción entre el material que se deforma y las superficies activas de la herramienta. (Vermeulen 1993).

Independientemente de todas las teorías desarrolladas, el rozamiento en la intercara introduce variaciones incontroladas en el proceso por lo cual es necesario que su magnitud sea mínima y así garantizar una

distribución lo más uniforme posible de la deformación. Por lo tanto, un control eficiente del proceso, desde el punto de vista de la dinámica tribológica que se desarrolla en el mismo, parte justo del control de las fuerzas que generan dicho rozamiento y de otras variables que brinden la posibilidad de detectar un defecto tan pronto como aparezca. Este control se puede lograr a través de la sensorización de las herramientas.

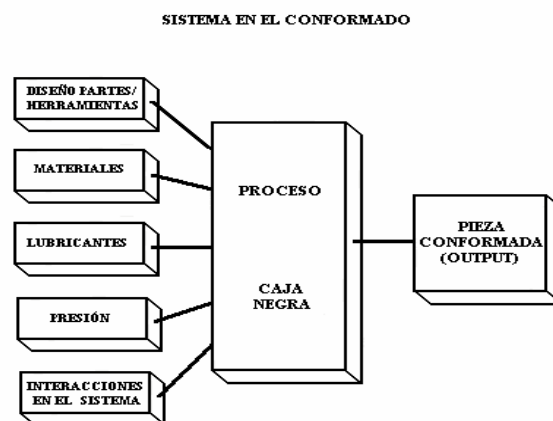


Figura 1. Sistema del proceso de conformado de metales.

## 2. Métodos de Control y regulación de los procesos de conformado.

La regulación y el control de los procesos de conformado de la chapa se pueden llevar a cabo por diferentes métodos, sobre todo teniendo en cuenta los objetivos trazados y las posibilidades de intervención en el proceso. De tal manera se distinguen los métodos en línea (on line) y los métodos fuera de línea (off line). (Netsch y Ruhland, 1992). Una condición para la regulación de los procesos es la existencia de magnitudes de proceso y de ajuste características, así como el conocimiento claro de las interrelaciones en el proceso.

Las soluciones actuales para el control y la diagnosis del proceso en prensas para la conformación de piezas de chapa vienen dadas en gran manera por las posibilidades de la sensorización (Siegert y cols.1997), donde se intenta aprovechar automáticamente muchos datos sobre el proceso y el producto, para poder controlarlo con los menores costos posibles. En definitiva, se deben registrar aquellos datos que en su significado permitan buenas conclusiones sobre el dominio del proceso (Timossi 1993).

El requisito previo para el desarrollo y el uso de tales sistemas multisensoriales, es un profundo conocimiento tecnológico de los procesos, pues, por ejemplo, los sensores tienen que disponerse de tal modo que los datos sean aprovechables en correspondencia con la tarea de control (Berasategui 1998).

## 3. Diseño de troquel sensorizado para el estudio de fenómenos tribológicos.

En la práctica industrial de los procesos de transformación de chapas es bien conocido que el hecho de controlar el flujo de material entre la matriz y el pisador durante el proceso de estampación, mejora la conformabilidad de una pieza, es decir, su aptitud para ser conformada hasta la forma final sin que aparezcan defectos (Ter Haar 1996). En embutición, los factores que más influyen en el flujo del material son: los nervios de freno, la presión en la superficie del pisador, la velocidad del pisador y punzón y la lubricación y el rozamiento. (Peñalba 1993) (Siegert y cols. 1997), (Neugebauer 1997).

Diseñar y construir un troquel sensorizado donde se estudiará el comportamiento de las principales fuerzas que intervienen en el proceso de embutición y a su vez la influencia sobre los fenómenos de fricción y el desgaste en diferentes partes del mismo, implica que debe ser funcional y que su diseño garantice la intercambiabilidad de sus elementos así como la ubicación de sensores, además, que los componentes del troquel deban garantizar una elevada resistencia

mecánica y tener en cuenta elementos de centrado y de guiado de la pieza, además del centrado del propio troquel. Como la finalidad de las mediciones serían las superficies del troquel, se estableció entonces el criterio de seleccionar una geometría sencilla de pieza a embutir, en este caso una pieza cilíndrica en forma de copa. La figura 2 muestra el boceto inicial del troquel.

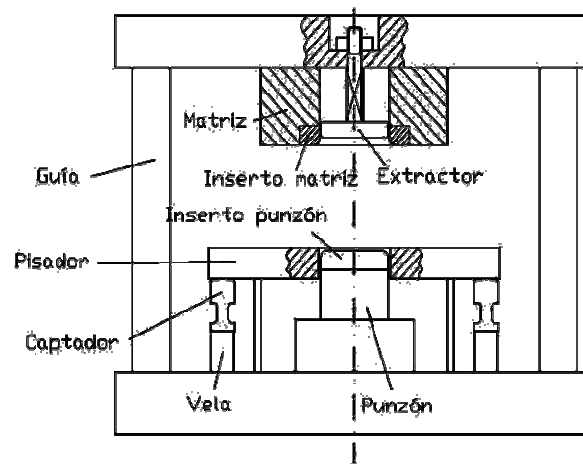


Figura 2. Boceto inicial del troquel.

Una vez seleccionada la geometría de la pieza y elaborado el boceto inicial del troquel, se identifican los registros que se harán, estos son: fuerza total de embutición (en el punzón), fuerza de pisado (en las velas), desplazamiento entre matriz y punzón y desplazamiento entre pisador y punzón. El desgaste de los elementos activos del troquel será analizado mediante observación microscópica y la medición de su peso. La Figura 3 muestra el diseño final del troquel junto a la ubicación de los captadores seleccionados.

## 4. Sistema de adquisición de datos.

Los sistemas de adquisición de datos están compuestos por sensores, cableado, acondicionadores de señal, tarjetas de adquisición de PC y software de captura de datos. Estos sistemas tienen como misión almacenar y recoger los valores de aquellos parámetros que tienen influencia relevante en la calidad final de la pieza embutida.

En este troquel se han definido 7 captadores más un sistema propiamente de adquisición de datos. Los captadores son: 1 captador de la fuerza de embutición + acondicionador de señal, 4 captadores de la fuerza de pisado, 1 captador de desplazamiento + acondicionador de señal + fuente de alimentación, 1 regla óptica. Todos estos captadores fueron primeramente calibrados y validados sus mediciones.

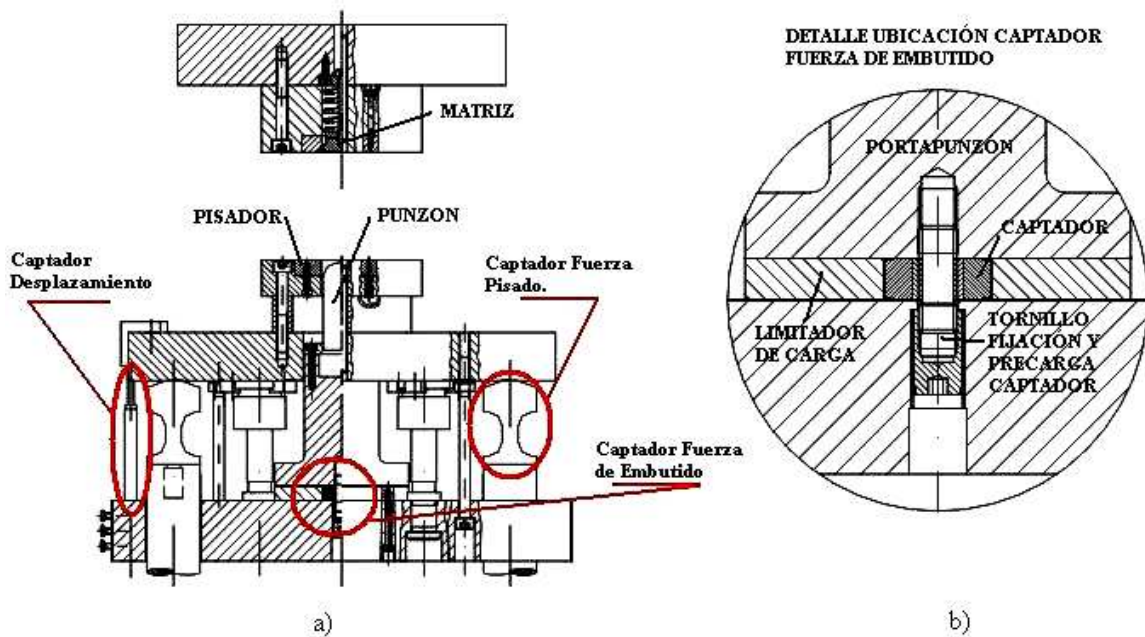


Figura 3. a) Diseño final del troquel y ubicación de captadores. b) detalle del montaje del captador de fuerza de embutido.

Para la recogida de datos utilizaremos el sistema SCXI de National Instruments, que permite el tratamiento de este tipo de señales. Las señales analógicas son acondicionadas y pasadas a una única tarjeta de adquisición, para la introducción directa en la memoria del PC. Dicha tarjeta también controla y comprueba las operaciones de entrada/salida digitales y salidas analógicas en módulos ubicados en el sistema SCXI.

Los componentes básicos del SCXI son: chasis SCXI-1001, 2 módulos SCXI-1121, 2 bloques terminales SCXI-1321, módulo SCXI-1200 (contiene tarjeta de adquisición), cable de conexión SCXI-1341, 2 cajas de conexiones y ordenador con puerto paralelo. La Figura 4 muestra el diagrama de bloques de la adquisición de datos.



Figura 4. Diagrama del sistema de adquisición de datos.

#### 4.1 Selección de captadores.

En general, los diferentes parámetros a tomar en cuenta para la selección de un captador deben ser el rango de medida, que es la diferencia entre los máximos y mínimos valores medibles con el captador y que normalmente será desde el valor “cero” hasta el valor máximo a medir, la frecuencia con la que se desea adquirir los valores del captador y la precisión, (que en este caso se trata de un error combinado que incluye diferentes términos, exactamente los errores de no-linealidad, histéresis y repetibilidad). Por otro lado, influyen también el tipo de captador, su tamaño, forma de agarre y colocación, ubicación en el troquel.

#### 4.2 Medición de la fuerza de embutición.

Mediante el control de la fuerza de embutición durante el proceso se puede determinar el origen de las grietas sobre la base de la variación de la característica de fuerza. Por un lado, se controla la fuerza máxima, que resulta en un momento dado de la carrera de la prensa, y por otro el desarrollo de la fuerza durante la carrera de la prensa. (Siegert y cols. 1997). La utilidad

del conocimiento de la evolución de la fuerza de embutición a lo largo del todo el proceso se deriva en que, mediante diferentes estrategias de valoración, se puede realizar un seguimiento total del gráfico de esfuerzo y controlar en una anchura de banda la evolución del mismo.

Para este fin se ubica un captador de carga piezoeléctrico, estos presentan la desventaja de ser más imprecisos y más caros que los captadores extensiométricos, pero trabajan a frecuencias mucho mayores y son de un tamaño mucho menor que estos últimos. Se necesita un captador que tenga un rango de medida de fuerza máxima de hasta 8 Tn, una frecuencia de hasta 25 kHz y que la frecuencia de adquisición de datos sea mayor que esta frecuencia. El captador seleccionado se muestra en la Figura 4 a), es el piezoeléctrico Marca PCB modelo M203B. Figura 4 b) acondicionador de señal. Las características del mismo se incluyen en la Tabla 1. En la Figura 3b se observa el detalle del montaje de dicho captador así como el sistema de precarga.

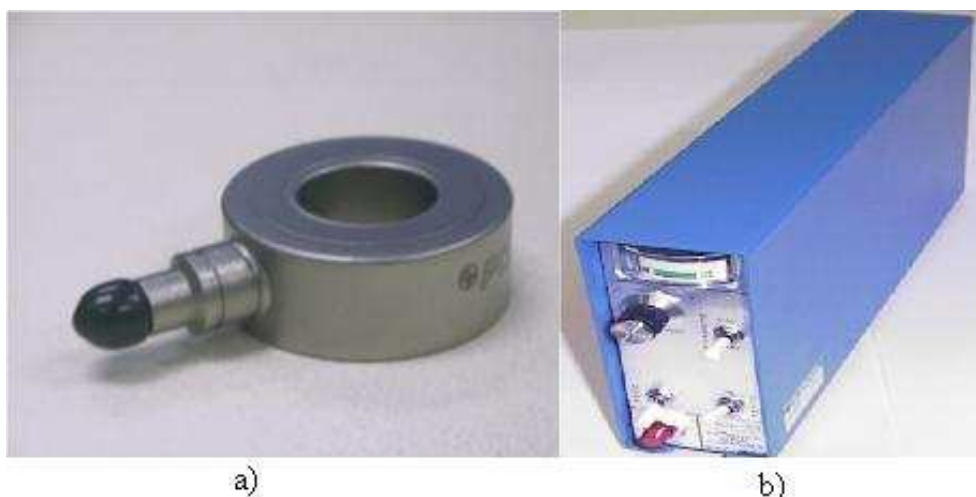


Figura 5. a) Captador para medición de fuerza de embutido. Marca PCB, modelo M203B. b) Acondicionador 484B02.

Tabla1. Características del captador de fuerza de embutido. Marca PCB, modelo M203B; y características del acondicionador 48B02. Ref[ 23] (\*) Respuesta del captador.

CARACTERÍSTICAS M203B		ACONDICIONADOR PCB 48B02	
Rango de medida (para 5 V)	88,96 kN	No. canales	1
Carga máxima	111,2 kN	Ganancia	x 1
Resolución (0 Hz a 10 kHz)	1,78 N rms	Corriente de excitación	1-20 mA
Respuesta a baja frecuencia	0,0003 Hz	Respuesta alta frecuencia	200 kHz
Frecuencia máxima	60000 Hz	A baja frecuencia (DC/DC)	0* / 0,0005 Hz
Linealidad	≤1% F. E	Acoplamiento	AC/DC
Sensibilidad	56,2 mV/kN	Voltaje de excitación	24V DC
Constante de tiempo de descarga	≥2000 seg	Rango de salida	±10V
	Corriente de entrada	2 a 20 mA	
	Rigidez	4 kN/μm	

#### 4.3 Medición de la fuerza de pisado.

Para tal fin se diseñaron y construyeron 4 células de carga mediante galgas extensométricas para un rango de medida de fuerza máxima de pisado de 635 kg., por lo que habrá que asegurarse que los captadores sean capaces de resistir, como mínimo, esta fuerza. Las galgas extensométricas aseguran una gran precisión. Las galgas deben caber físicamente en la zona del captador pensada para ello, en dicha zona la deformación unitaria debe ser constante y la zona de contacto de la célula con respecto al pisador y la vela tiene que ser plana.

En la Figura 6 se muestra la imagen de una célula de carga construida y la disposición de las galgas. El diseño obtenido tiene como características principales un rango de medida de hasta 1500 kg, un diámetro del núcleo de 12 mm, y una sensibilidad de 4 mV/ kg.



Figura 6. Célula de carga construida para medición de esfuerzos de pisado. Características.

#### 4.4. Medición de la distancia entre el pisador y la matriz.

La medición de la distancia entre el pisador y la matriz también se considera un parámetro que puede contribuir al conocimiento del proceso. Considerando que el objetivo del pisador es mantener una distancia más o menos constante entre él mismo y la matriz durante la embutición. Cualquier variación de esta medida aporta información significativa sobre el desarrollo del proceso, como pueden ser las medidas que denotan el surgimiento de arrugas.

Se necesita medir la distancia entre el pisador y la matriz en todo momento, por lo que se decide introducir un captador de desplazamiento inductivo. Los requerimientos que se exigen son: una medición de carrera mayor de 16 mm, una precisión de error de 0,1 mm como máximo, lo cual significa el 0,625% sobre la medida de 16 mm. Los captadores inductivos pueden trabajar hasta unas frecuencias de entre 3 y 5 kHz., por

lo que podrían adquirir datos a una frecuencia parecida a la del captador de fuerza de embutición.

Fue seleccionado el captador de desplazamiento LVDT modelo RDP D5/ 400 AG, Figura 7. Este captador, a su vez, dispone de su propio acondicionador de señal y fuente de alimentación. La Tabla 2, muestra las características.



Figura 7. Captador de desplazamiento RDP D5/400AG

Tabla 2. Características del captador de desplazamiento modelo RDP D5/400AG, el acondicionador de señal y la fuente de alimentación.

Captador desplazamiento RDP D5/400 AG	
Voltaje de entrada	5V
Frecuencia de entrada	5kHz (2-10kHz)
Linealidad	0,15 % FSD
Sensibilidad	80 mV/V/ mm
Acondicionador RDP S7AC	
Alimentación	612 a 618V DC/24 a 36, 120mA max.
Excitación captador	1 V rms 5 kHz, 10 mA
Linealidad	0,1% FSD
Salida amplificador	65 V ó 610 V según alimentación
Fuente de alimentación HBM NT101A	
Voltaje de entrada	230 V
Voltaje de salida	15,3 DC
Eficiencia aproximada	60 %

#### 4.5. Captador de desplazamiento entre matriz y punzón.

Este captador de desplazamiento había sido instalado en la prensa prototipo anteriormente. Sirve para medir la distancia entre las mesas superior e inferior de la prensa, y obviamente, para medir la distancia entre matriz y punzón. El único requerimiento que se le exige a este captador es que el rango de medida debe ser suficiente como para que pueda trabajar en todo el proceso de embutición de una pieza.



La Figura 8 muestra el captador lineal FAGOR modelo CVX con un rango de medida de 600mm, una tensión de alimentación de 5v, 150 mA y una velocidad máxima de de 60 m/mm.



Figura 8. Lineal FAGOR modelo CVX.

#### 4.6. Visualización de los datos.

Para poder visualizar las señales captadas a pie de máquina se utiliza un programa desarrollado en Visual Basic, que permite al final del ensayo revisar la forma de las señales emitidas por los captadores. Este programa ofrece facilidades de visualización realizar cambios de escala y obtener valores de puntos concretos

de la gráfica. Las señales recogidas por medio de la tarjeta son digitalizadas según la frecuencia de muestreo definida por el usuario y guardadas en ficheros con formato ASCII, que pueden volver a leerse con este programa o bien con otros tales como Microsoft Excel.

Es válido recordar que el principal objetivo con la construcción de este troquel sensorizado es el estudio de los fenómenos de fricción y desgaste en las superficies activas del mismo por lo cual, la única exigencia que en tal caso se considera es la consecución del prototipo de piezas con cierta calidad. En las Figuras 9 y 10, se muestran los resultados de dos adquisiciones durante la puesta a punto del troquel y la validación de los resultados. En la primera se observa el comportamiento de las señales registradas mediante los captadores durante el tiempo en el que transcurre el embutido de una pieza, en este caso los valores se corresponden con los establecidos para una pieza buena.

La Figura 10 muestra la interrupción del proceso apenas comienza la operación de embutición, se observa un valor alto de fuerza de pisado lo cual provoca un frenado del flujo de la chapa y esto a su vez trae consigo la rotura de la pieza. En este caso también pueden influir los fenómenos de desalineación entre las superficies de la matriz y el pisador lo cual provoca una deficiente acción de este último. Es necesario establecer que en estos casos es imprescindible un análisis teniendo en cuenta la mayor cantidad de factores que puedan intervenir en la ocurrencia de un defecto.

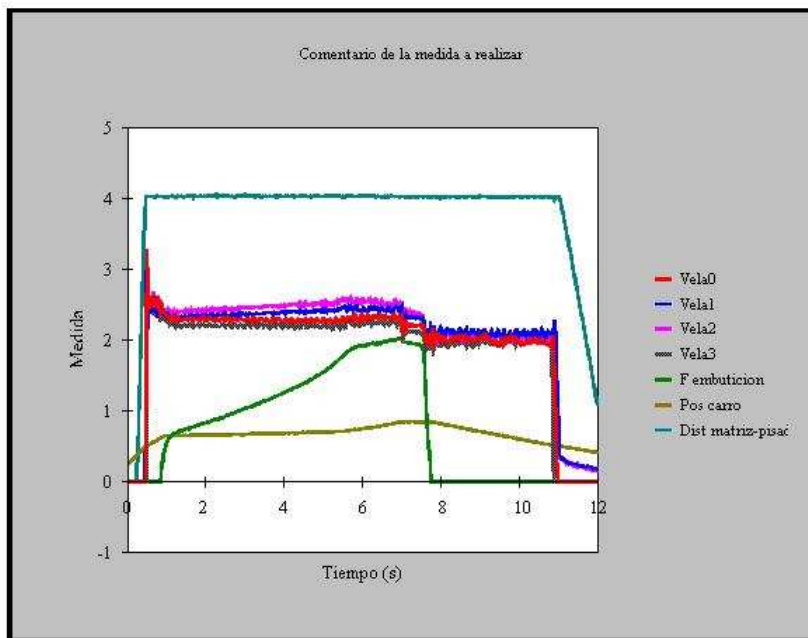


Figura 9. Interfase que muestra el resultado de las adquisiciones de las medidas de los 7 captadores instalados en el troquel. Las mediciones se corresponden con una pieza buena.

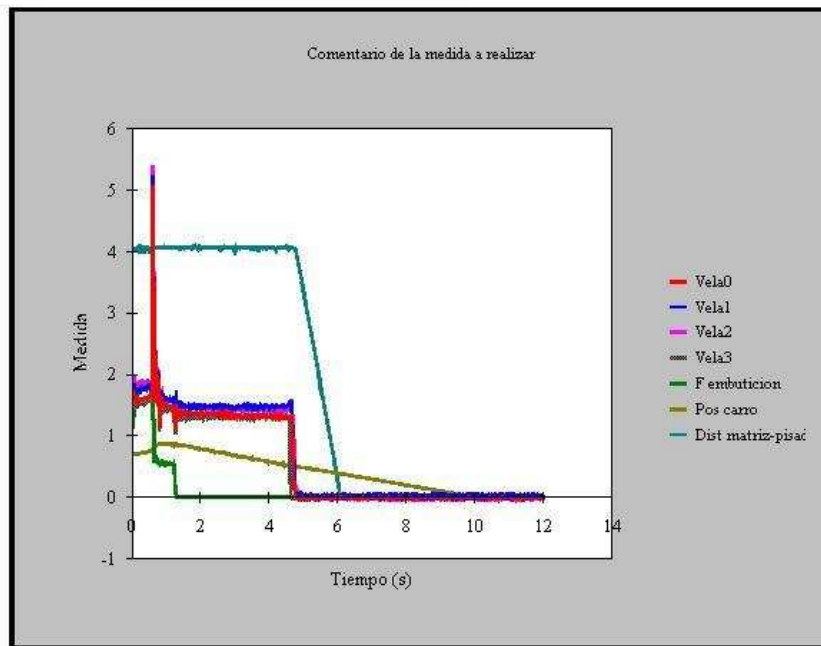


Figura 10. Medición que muestra la interrupción del proceso producto de la rotura de la pieza.

## 5. Conclusiones.

- Mediante técnicas modernas de sensorización se ha logrado equipar un troquel de embutición prototipo que permite la medición directa de los valores reales y el control de la fuerza de embutición, fuerza de pisado y las distancias entre las herramientas. Elementos estos que influyen en la estabilidad del proceso de embutición y que pueden ser regulados partiendo de magnitudes que se captan constantemente y que se llevan a una comparación del valor real con el requerido.
- Debido a que los procesos de conformado comprenden interrelaciones complejas que se pueden captar difícilmente en su totalidad, la selección y colocación de los sensores estará condicionada, fundamentalmente, por aquellas posibilidades que permitan una clara intervención sobre las magnitudes de regulación o de ajuste que caracterizan el proceso.
- Las mejoras que sean necesarias introducir en el proceso de fabricación, y que constituyan regulaciones a perturbaciones surgidas durante la obtención de una pieza, serán necesarias hacerlas a través de modificaciones sobre la cinemática de la máquina teniendo en cuenta el conocimiento previo de las relaciones reciprocas de sus parámetros.
- Independientemente de las bondades que sobre el control de la calidad brindan las técnicas de sensorización en el conformado, el elevado costo de los sensores y del equipamiento electrónico puede

constituir un inconveniente para la implementación de los mencionados sistemas en pequeñas y medianas empresas.

## 6. Referencias bibliográficas.

4. De Koninck, J., Gutter, D., "Manual del Técnico Matricero" José Monteso Editor, 1977.
5. García, C. "Optimización de los Procesos de Deformación de Chapa Metálica" IRAUNKOR 1999.
6. Netsch, T., Ruhland, T., "Control y Regulación del Conformado de Chapa". Novamáquina, 189/ Extra 17 BIEMH, 1992, pp.128-135.
7. Neugebauer, R., Leib, U., Braunlich, H., "Influence on Materials Flow in Deep Drawing Using Individual Controllable Draw Pins and Smooth Blankholder Design". Society of Automotive Engineers, Inc. Paper. 1997, pp.269-274.
8. Oehler – Kaiser, "Herramientas de troquelar, estampar y embutir" Edit. Gustavo Gili, Barcelona, España 1997.
9. Peñalba, F., "El Comportamiento de la Chapa en los Procesos de Conformación." Deformación Metálica, no 235, 1997.
10. Siegert, K., Dannenmann, E., Wagner, S., Galaiko, A., "Closed-Loop Control System for Blank Holder Forces in Deep Drawing".

11. Schey, John A., 1997, "Friction in Sheet Metalworking". Society of Automotive Engineer. Paper. 970712, 87-106.
  12. Timossi, P., "La Conformación en Frío de la Chapa". Novamáquina, 194/195, 1993, pp.55-63.
  13. Ter Haar, R., "Friction in Sheet Metal Forming, the influence of (local) contact Conditions an Deformation". PhD-Thesis, University Twente, Netherlands.1996.
  14. Valdivia, L., "Conformado en seco". Documento Interno Marco de Actuación MEP 2000.
  15. Valdivia, L., Lizarralde, I., "Diseño de un troquel sensorizado para el estudio del conformado en seco" MEP 2001.
  16. Vermeulen, M., Scheers, J., De Boeck, A., "Tribology in the deep drawing process". 6<sup>th</sup> International Conference on Tribolgy, Eurotrib '93. 1993.
- 

## Sensitivity Die for the study of the main forces in the rivet process.

### Abstract.

The control of forces that intervene in the development of the deep drawing process, as well as in the generation of the friction force it is a way to achieve the decrease of defects in spares, and to minimize friction.

The present paper deals with the process of design and selection of components of the regulation and control system for a die designed and build for the analysis of the principal forces in the deep drawing process. Different types of sensors or collectors have been used in order to allow the control and the measurement of parameters.

**Keywords:** Deep drawing process, control system, captator, friction and wear in die.