

DISEÑO Y ENSAYO EXPERIMENTAL DE UNA CELDA DE CARGA PARA MAQUINADO

Gustavo M. Flores^a, Rogelio L. Hecker^{a,b}, Diego Vicente^a y Esteban Dalhaye^a

*^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 esq. 9, General Pico (6360), La Pampa, Argentina
gmflores@ing.unlpam.edu.ar, <http://www.ing.unlpam.edu.ar>*

^bCONICET, hecker@ing.unlpam.edu.ar

Palabras claves: maquinado, celda de carga, fuerza.

Resumen. Exigencias de calidad, reducción de costos y rápida respuesta al mercado requieren de máquinas herramientas con mayor y mejores prestaciones desde el punto de vista de su control. El conocimiento de la fuerza de mecanizado es de gran importancia tanto para la implementación de técnicas de control adaptivas como para el monitoreo del estado de la herramienta de corte (desgaste, rotura del filo, etc.).

En este trabajo se presenta el diseño de una celda de carga para medir las fuerzas presentes en procesos de mecanizado, su fabricación y resultados experimentales. Este dispositivo permite medir fuerzas estáticas a partir de la deformación captada por galgas extensiométricas (strain-gauge) pegadas en la superficie de elementos deformables o resortes del tipo anillo octogonal. Las condiciones de aplicación exigen el diseño de una celda de carga capaz de medir las tres componentes ortogonales de una fuerza orientada en el espacio. Además, su rigidez debe ser lo suficientemente alta para evitar que la medición afecte al proceso de corte pero a su vez debe ser lo suficientemente sensible para captar pequeños valores de esfuerzo. Como se aprecia son dos requerimientos que están en oposición.

En el diseño de la celda se utilizaron herramientas de cálculo y simulación por elementos finitos lo que permitió arribar a un diseño apropiado que cumple satisfactoriamente con las exigencias impuestas como lo muestran los resultados experimentales. Las experiencias se realizaron en un torno CNC (Control Numérico Computarizado) y se pudieron captar las principales componentes de la fuerza de corte.

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de mecanizado representan una porción importante dentro de los procesos de fabricación de partes metálicas y son de fundamental importancia en aquellas aplicaciones donde es necesario lograr tolerancias muy estrechas y condiciones superficiales apropiadas. Además la creciente globalización y competitividad imponen condiciones de fabricación cada vez mas exigentes en cuanto calidad de las piezas obtenidas. Estas condiciones conducen al desarrollo de máquinas herramientas con mayores y mejores prestaciones tanto en aspectos estructurales como de su control. Para lograr estos objetivos es necesario una completa y detallada comprensión del proceso de corte, es decir determinar relaciones entre las distintas variables y parámetros del proceso (velocidad de corte, temperatura, fuerzas de corte, desgaste de la herramientas, etc.). En este sentido se están llevando a cabo numerosas investigaciones y se han implementado una gran variedad de sensores que emplean principios acústicos, eléctricos, térmicos, magnéticos, etc. Además se han propuesto sistemas de procesamiento de señales y de análisis basados en modelos para obtener información relativa al proceso de mecanizado.

El conocimiento de la fuerza de mecanizado no solo permite inferir el estado de la herramienta de corte si no que también permitiría implementar técnicas de control adaptivas o de tipo supervisión (Liang et al. 2004, Mazini et al, 2000). Estas técnicas pertenecen al tercer nivel dentro de la jerarquía de control de una máquina CNC. En general las máquinas CNC comerciales solo implementan dos niveles de control: Servomecanismos e Interpolación. El primero implementa lazos de control de posición, velocidad y aceleración de cada uno de los ejes de desplazamiento, mientras que el segundo coordina el movimiento de todos ellos para seguir las trayectorias definidas para la herramienta de corte. El tercer nivel, limitado aún al campo de la investigación, corresponde el nivel de control del proceso de mecanizado y se lo denomina Control Adaptivo. Este nivel actúa sobre parámetros del proceso (tales como velocidad de alimentación, de corte, etc.) en función de las variables sensadas como fuerza, temperatura, vibración, etc.. El objeto de este nivel de control apunta a aumentar el nivel de producción y calidad de las piezas mecanizadas.

La fuerza de corte desarrollado durante el mecanizado puede ser estimada por métodos indirectos mediante la medición de la potencia consumida o en forma directa a través de la utilización de un dinamómetro (Korkut, 2003; Yaldiz y Ünsaçar, 2005). En general estos últimos se basan en la deformación elástica de materiales. Los transductores mas comúnmente utilizados para captar tales deformaciones son del tipo piezoeléctricos o galgas extensiométricas (strain-gauges). Entre las principales características de los piezoeléctricos se destacan su buena sensibilidad y alta rigidez, lo cual lo hace muy apropiado para la aplicación propuesta. Sin embargo presentan como desventaja no poder medir condiciones estáticas sin un complejo sistema de procesamiento de datos y poseen un mayor costo comparativo respecto de las galgas extensiométricas. Por otro lado los strain-gauges poseen una buena exactitud en mediciones estáticas y permiten una implementación rápida, sencilla y económica. Estas condiciones justifican la selección de estos transductores para la fabricación de un dispositivo que apunta a ser utilizado masivamente en procesos de mecanizado.

Este trabajo presenta el diseño de una celda de carga para medir las fuerzas presentes en procesos de mecanizado, su fabricación y resultados experimentales. La fuerza se obtiene a partir de la deformación captada por strain-gauges estratégicamente pegados en elementos deformables o resortes del tipo anillo octogonal. A diferencia de trabajos similares que basan sus diseños en aproximaciones analíticas (Karabay, 2005; Kim y Kim, 1995) en este trabajo se presenta el diseño del dinamómetro utilizando herramientas de cálculo y simulación por elementos finitos. Además se presentan brevemente el sistema de medición utilizado para

captar las deformaciones.

2 DISEÑO DE LA CELDA DE CARGA

2.1 Especificaciones de diseño

En toda operación de mecanizado la fuerza involucrada para producir la remoción de material en forma de viruta es aplicada a través de la herramienta de corte y tiene una orientación particular. Generalmente para su estudio se la descompone en tres direcciones principales que dependen del proceso particular del que se trate (torneado, fresado, taladrado, etc.). Esta condición exige el diseño de una celda de carga capaz de medir las tres componentes ortogonales de una fuerza orientada en el espacio. Para cumplir con esta premisa el dinamómetro debe ser capaz de identificar precisamente la dirección en la cual es aplicada la fuerza. Este concepto se lo denomina sensibilidad cruzada y debe ser lo mas baja posible.

La rigidez de la celda de carga juega un papel muy importante y es un aspecto crítico del diseño. Esta debe ser lo suficientemente alta para evitar que la medición interfiera en el proceso de corte. Una baja rigidez puede introducir errores geométricos en la pieza fabricada y vibraciones que afectan su terminación superficial. Por el contrario si esta es demasiado alta disminuye la sensibilidad del dispositivo con lo cual no se podrían captar pequeños valores de esfuerzo. Como se aprecia sensibilidad y rigidez son dos aspectos que están en oposición.

Un buen dinamómetro para investigación debería poder captar variaciones del orden de $\pm 1\%$ del valor para el cual se diseña (Karabay, 2005). Se fijó como valor máximo una fuerza de 3000 Newton con una rigidez de 60 N/ μm . Inicialmente será montado sobre un torno CNC por lo tanto sus dimensiones deben ajustarse al espacio disponible para su instalación, sin embargo debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a otros procesos. Puesto que el dinamómetro consiste básicamente de un elemento que debe soportar grandes esfuerzos manteniéndose dentro de su rango elástico se selección para su fabricación un acero AISI 4140 que posee un valor relativamente alto de esfuerzo de fluencia (550-990 N/mm²).

2.2 Diseño de los elementos deformables

En general una celda de carga o dinamómetro mide la fuerza aplicada a partir de la deformación elástica de los materiales. Para ello cuenta con elementos que se deforman controladamente dentro de su rango elástico del material. De esta manera la magnitud de la deformación es proporcional a la fuerza que la origina. Debido a la rigidez requerida estas deformaciones alcanzan valores muy bajos (2.5e-4 mm a 2.5e-2 mm). Estos elementos o “resortes” pueden adoptar distintas geometrías (Flores et al. 2006) todas ellas con la misma particularidad: exhibir zonas con alta concentración de esfuerzos. Particularmente en estas zonas van pegados los strain-gauges.

La geometría seleccionada en este trabajo para la implementación de la celda de carga es una variante de la geometría de anillo cilíndrico. El anillo cilíndrico presenta como ventaja que puede medir fuerzas en la dirección vertical y horizontal en forma independiente es decir exhibe un buen comportamiento en cuanto a sensibilidad cruzada. De la teoría de anillos se desprende que si la fuerza aplicada es en la dirección vertical la concentración de esfuerzos o deformaciones se disponen a 0° de la horizontal, mientras que si esta es aplicada en la dirección horizontal se disponen a 50,4°. Este último corresponde a la ubicación que minimiza la interferencia producida por una fuerza aplicada en la dirección vertical. Otra relación importante que se desprende de la teoría mencionada y que se encuentra detallada en

(Karabay, 2005) es la relación entre la deformación y la deflexión radial del anillo producto de la fuerza vertical F_V y que se presenta a continuación (1):

$$\frac{\varepsilon_{0^\circ}}{\delta_V} = 0.605 \cdot \frac{t}{r^2} \quad (1)$$

Donde ε_{0° es la deformación del anillo a 0° de la horizontal, δ_V es la deflexión en la dirección radial, t es el espesor del anillo y r el radio medio. La relación (1) no depende del ancho b del anillo ni del módulo de elasticidad del material E . Por otro lado para cumplir los requisitos de alta sensibilidad y rigidez, la expresión (1) debe ser lo mas grande posible. Esto implica que el radio medio r debe ser tan pequeño como se pueda y t lo mas grande posible. Si embargo el radio medio no puede hacerse muy chico por la dificultad que se presentaría a la hora del pegado de los satrain-gauges.

De lo expresado se desprende que la geometría de anillo cilíndrico es apropiada para ser utilizada como elemento deformable en la construcción del dinamómetro. Sin embargo presenta una dificultad práctica a la hora del montaje, es difícil lograr una buena sujeción que impida que el anillo ruede. Esta situación disminuiría considerablemente la rigidez horizontal del conjunto. Para evitar este inconveniente se plantea una modificación por la cual el anillo es octogonal por fuera y cilíndrico por dentro como se aprecia en la Figura 1.

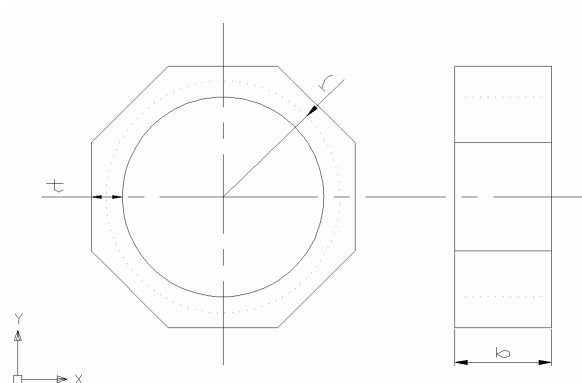


Figura 1: Anillo octogonal, parámetros de diseño.

En (Karabay, 2005) el diseño de los elementos deformables se obtuvo a partir de cálculos analíticos basados en la teoría de anillos delgados. En este trabajo se propone el diseño utilizando herramientas de cálculo por elementos finitos. El diseño del anillo implica definir las dimensiones expuestas en la Figura 1. Por limitaciones del espacio disponible en el torno CNC donde será montado y atendiendo la relación (1) se definió el radio medio $r=18\text{ mm}$ y el espesor $t=4\text{ mm}$. El ancho b será ajustado a partir de la especificación de rigidez del dinamómetro como se verá posteriormente. A partir de estas dimensiones y tomando un ancho arbitrario se efectuaron simulaciones del anillo octogonal para verificar sus comportamiento cuando es sometido a esfuerzos.

De la Figura 2a) se aprecia claramente la concentración de tensiones en la región central (a 0° de la horizontal) cuando se aplica una carga en la dirección vertical del anillo. Por otro lado cuando la carga es aplicada en la dirección horizontal, Figura 2b) (en el mismo plano del anillo) la tensiones se concentran en una región cercana a los 45° tal como preveía la teoría de anillos delgados. Analizando mas detalladamente ambas zonas de deformación se pudo determinar la ubicación de las zonas de mayor concentración de tensiones para la correcta

ubicación de los strain-gauges.

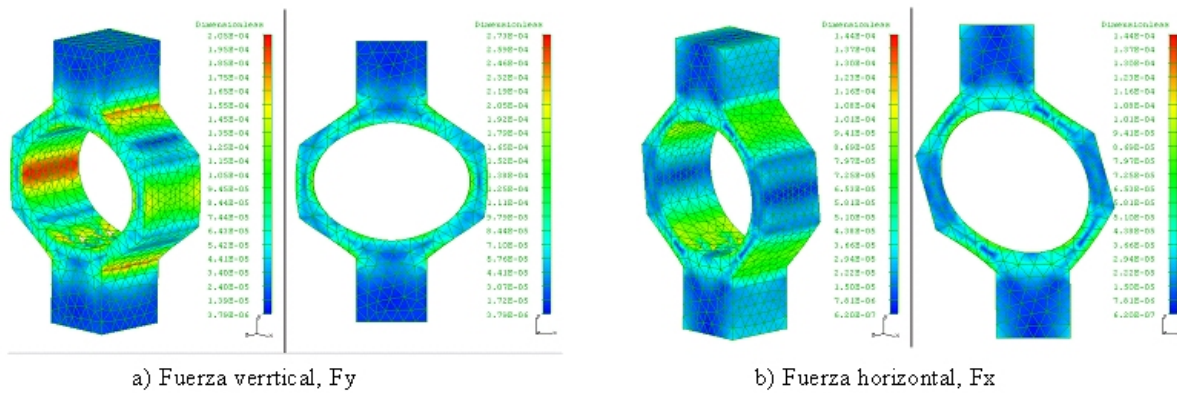


Figura 2: Deformación del anillo: a) fuerza vertical y b) fuerza horizontal.

En la **Figura 3** se graficaron los valores de deformación para nodos ubicados simétricamente respecto de las posiciones a 0° y 45° tanto en el interior como exterior del anillo y obtenidos luego de aplicar cargas en la dirección vertical (F_Y) y horizontal (F_X) separadamente. Del gráfico se desprende que las deformaciones interior y exterior son de signo contrario como era de esperar. Cuando las fibras interiores se comprimen las exteriores se estiran. Además los valores absolutos de las deformaciones interiores son mayores, con lo cual los strain-gauges se podrían colocar en estas regiones para una mayor sensibilidad.

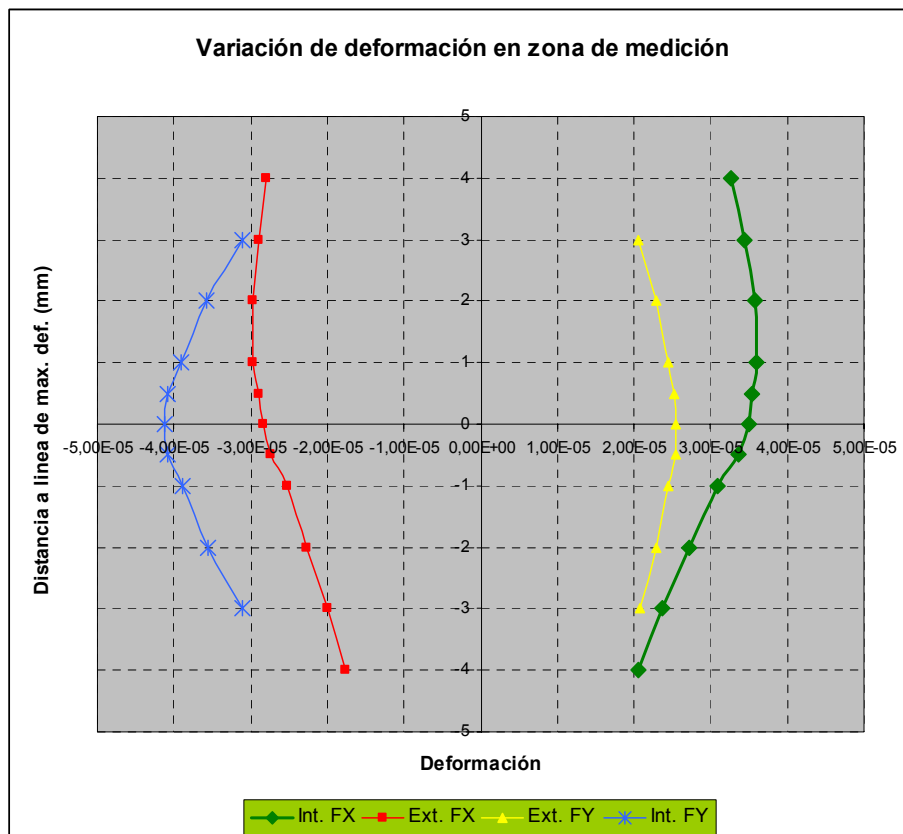


Figura 3: Deformación del anillo obtenida en las zonas de máxima deformación.

Finalmente también se puede apreciar que la zona de máxima deformación cuando se aplica una carga en la dirección horizontal se encuentra entre los nodos 1 y 2 lo que indica esta se encuentra por encima de los 45° como indica la teoría de anillos.

De lo expuesto las zonas apropiadas para el pegado de los strain-gauges son las mostradas en la **Figura 4**. Las regiones 1 a 4 serán utilizadas para la detección de fuerzas en la dirección vertical (F_Y) mientras que las regiones 5 a 8 harán lo propio con la fuerza horizontal ubicada en el plano del anillo (F_X). Finalmente para completar el diseño del anillo y definir la dimensión restante es necesario fijar la cantidad y disposición de estos en el dinamómetro de manera de cumplir con las especificaciones de rigidez.

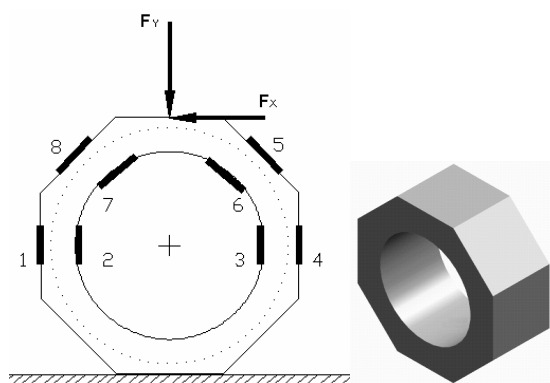


Figura 4: Zonas de máxima concentración de tensiones del anillo octogonal.

2.3 Diseño del dinamómetro

El dinamómetro consiste básicamente de dos placas de acero vinculadas entre si por los elementos deformables o resorte. Las placas simplemente cumplen funciones estructurales y son las encargadas de transferir los esfuerzos a los anillos. Sobre la placa superior se monta la herramienta o la pieza a mecanizar dependiendo del proceso que se trate, mientras que la inferior permite la sujeción del conjunto a la máquina herramienta. En (Karabay, 2005) se presentan distintas configuraciones y orientaciones de los anillos las cuales se ajustan a distintos proceso de mecanizado como ser fresado, taladrado o torneado. La configuración adoptada en este trabajo es la mostrada en la **Figura 5**.

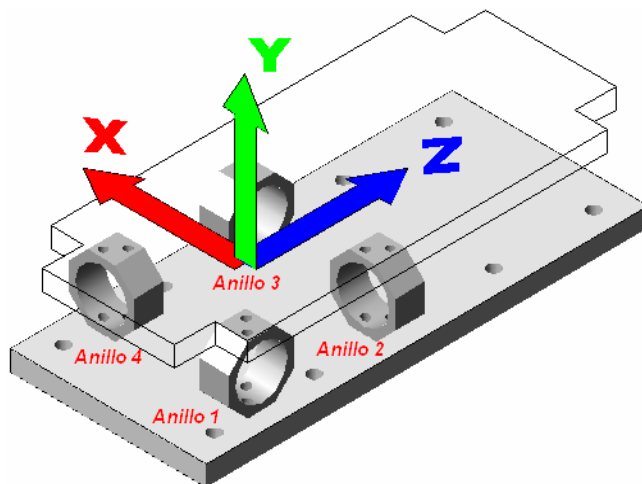


Figura 5: Esquema del Dinamómetro.

De esta manera la componente vertical (dirección Y) de una fuerza será detectada por los strain gauges colocados en las regiones 1, 2, 3 y 4, **Figura 4**, de los cuatro anillos del dinamómetro. Mientras que la componente horizontal en la dirección X será detectada por los que se encuentran en las regiones 5, 6, 7 y 8, **Figura 4**, de los anillos número 2 y 4 y la componente Z por los strain gauges pegados en las mismas regiones 5, 6, 7 y 8 pero de los anillos número 1 y 3. Cabe aclarar que para la configuración de los puentes de Wheatstone, armados con los strain-gauges, no es necesaria la utilización de todas las zonas, con un número menor se pueden obtener buenos resultados.

Teniendo en cuenta la configuración de los elementos deformables en el dinamómetro se tiene que la rigidez estimada para el dinamómetro en cada una de las direcciones X, Y, Z, **Figura 5**, será (2):

$$\begin{aligned} Rd_y &= 4Rr_y \\ Rd_x &= Rd_z = 2(Rr_x + Rr_z) \end{aligned} \quad (2)$$

Siendo Rd_i , ($i=x,y,z$) rigidez estimada del dinamómetro en la dirección i , **Figura 5** y Rr_i ($i=x,y,z$) la del elemento deformable también en cada una de las direcciones. En este caso la dirección Z para el elemento individual corresponde a la dirección perpendicular a las direcciones mostradas en el anillo de la **Figura 4**. Definidos el radio medio y el espesor del anillo resta definir su espesor, b , de manera de cumplir la especificación de rigidez del conjunto. Mediante ensayos por elementos finitos para distintos valores del espesor se obtuvo la dimensión que verifica la condición de rigidez los cuales se presenta en la Tabla 1.

i=	b=18 mm	
	Rr_i (N/μm)	Rd_i (N/μm)
x	7.23N	70.66
y	65.36	261.44
z	28.1N	70.66

Tabla 1: Valores de rigidez del elemento tipo S, en las direcciones x, y, z.

Como se aprecia la rigidez estimada del conjunto en la dirección vertical es casi cuatro veces mayor a la rigidez en las direcciones horizontales. Con esto las dimensiones finales del octógono son: diámetro interior de 32 mm, espesor mínimo de 4 mm y ancho de 18 mm.

3 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Definidas las dimensiones de los anillos se realizaron simulaciones mediante cálculo por elementos finitos para verificar el comportamiento del conjunto, es decir valores de rigidez y sensibilidad cruzada. Para ello se modeló el dinamómetro y se aplicó un mallado con la particularidad de lograr una mayor densidad de elementos en aquellas zonas donde irán pegados los strain-gauges, **Figura 6**.

El conjunto fue anclado (restricción de desplazamiento) por la placa inferior y sobre la placa superior se aplicaron esfuerzos conocidos. Tomando los valores de desplazamiento en cada una de las direcciones se obtuvo la rigidez del conjunto siendo: $R_x=R_z= 84.03 \text{ N}/\mu\text{m}$ y $R_y: 266.6 \text{ N}/\mu\text{m}$. Como se aprecia estos valores cumplen con la especificación de diseño y son muy aproximados a los predichos en (2).

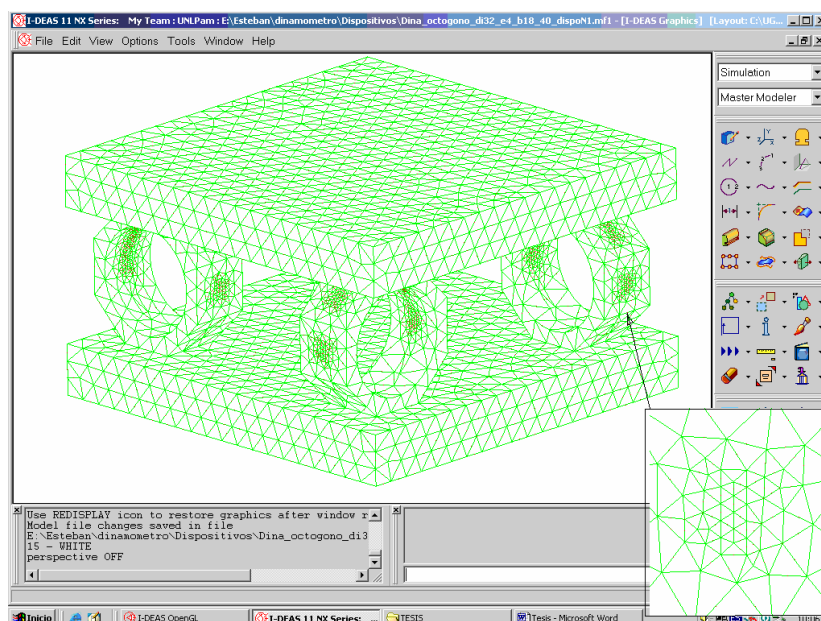


Figura 6: Mallado del dinamómetro y detalle en zonas de máximas deformaciones.

Para determinar la sensibilidad cruzada del dinamómetro se realizaron ensayos aplicando fuerzas conocidas en cada una de las direcciones y se observó la interferencia o deformación que esta produce en aquellas posiciones que miden fuerza en las restantes direcciones. El valor total de la deformación, la cual será proporcional a la fuerza aplicada, se obtiene sumando las deformaciones captadas en los anillos y zonas correspondientes a cada dirección. Teniendo en cuenta que estas deformaciones pueden ser positivas o negativas, si son de tracción o compresión respectivamente, y que los efectos deben sumarse para mayor sensibilidad del conjunto, la deformación total en cada dirección queda dada por las siguientes ecuaciones (3):

$$\begin{aligned}\varepsilon_X &\equiv [(SG_{25} - SG_{26} + SG_{27} - SG_{28}) + (-SG_{45} + SG_{46} - SG_{47} + SG_{48})] \\ \varepsilon_Y &\equiv \left[\sum_{i=1}^4 (SG_{i1} - SG_{i2} - SG_{i3} + SG_{i4}) \right] \\ \varepsilon_Z &\equiv [(SG_{15} - SG_{16} + SG_{17} - SG_{18}) + (-SG_{35} + SG_{36} - SG_{37} + SG_{38})]\end{aligned}\quad (3)$$

En estas ecuaciones la expresión SG_{ij} representa la deformación medida en la región j del anillo i . Definiendo la sensibilidad cruzada como (4):

$$S_{ij} = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} * 100 \quad (4)$$

Siendo S_{ij} con $i \neq j$ ($i=x,y,z$; $j=x,y,z$) la sensibilidad cruzada porcentual que produce una fuerza aplicada en la dirección i sobre la dirección j . En la Figura 7 y Figura 8 se presentan los resultados obtenidos luego de aplicar alternativamente fuerzas en la dirección X e Y. Como se aprecia el efecto cruzado en las direcciones restantes es bajo siendo todos ellos menores al 1%. Los resultados obtenidos en la dirección Z fueron similares a los obtenidos en la dirección X por la simetría del conjunto.

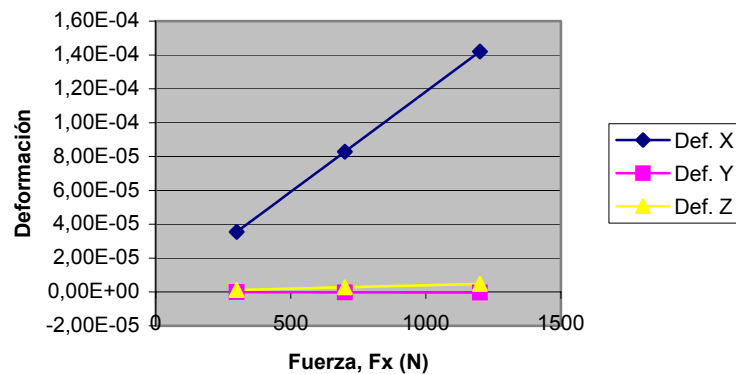


Figura 7: Sensibilidad cruzada para fuerzas aplicadas en la dirección X.

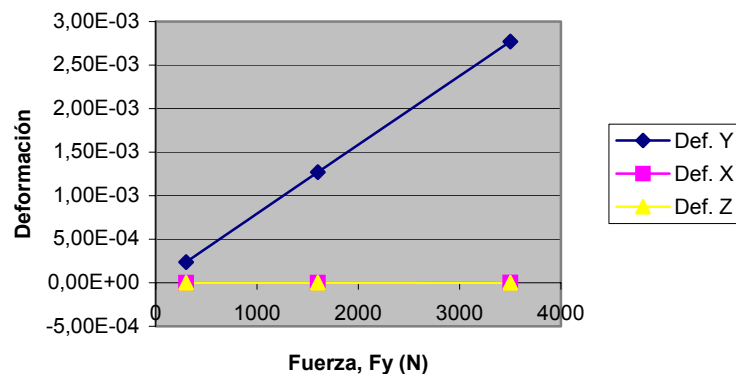


Figura 8: Sensibilidad cruzada para fuerzas aplicadas en la dirección Y.

4 PREPARACIÓN EXPERIMENTAL

Finalizado la etapa de diseño y habiendo obtenido un resultados apropiados se procedió a la fabricación de dinamómetro. Los anillos fueron fabricados mediante los procesos sucesivos de torneado, fresado y rectificado de piezas de acero SAE 4140. Sobre los mismos se pegaron las galgas extensiométricas seleccionadas para montaje sobre acero con una longitud de galga de 5 mm, una resistencia de 120 ohm ± 0.3 . El factor de galga es de $2.16 \pm 1\%$ y tiene una variación con la temperatura de $0.012 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Posteriormente se realizó el ensamble de los anillos junto con las placas superior e inferior del dinamómetro.

La deformación de los anillos es captada a partir de un puente de Wheatstone armado con los strain-gauges apropiados. La excitación del puente se realizó a través de un acondicionador de señal para galgas extensiométricas que otorga una tensión de excitación estable de 1 a 10 V con una corriente máxima de 20 mA. A su vez este dispositivo filtra y amplifica la señal proveniente del puente hasta un nivel adecuado para su adquisición mediante una tarjeta en PC

Para la lectura de las mediciones se desarrolló una interfase gráfica que permite el tratamiento de los datos adquiridos así como también el monitoreo en tiempo real de los mismos. La velocidad de muestro fue de 100 kHz y los datos fueron filtrados mediante una implementación digital de un filtro pasa bajo de orden 2 y frecuencia de corte de 40 Hz.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El objetivo principal planteado en este ensayo fue comprobar la sensibilidad y la sensibilidad cruzada del dinamómetro. Para ellos se aplicaron cargas en una dirección y se midió el voltaje de salida del puente en todas las direcciones. De las ecuaciones que relacionan la deformación con el voltaje de salida se obtiene el valor de la deformación específica. Se prefirió usar este valor para comparar con los resultados experimentales obtenidos por elementos finitos.

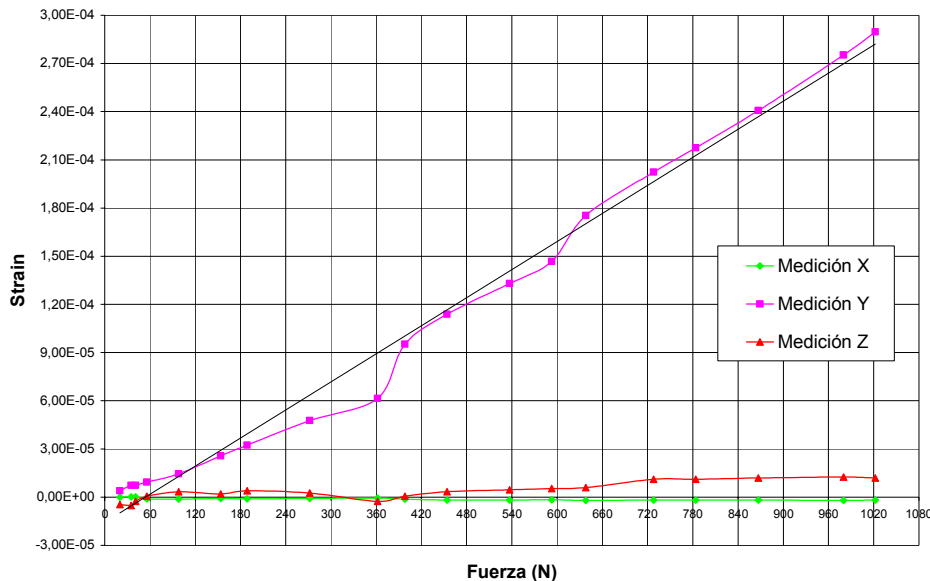


Figura 9: Deformaciones medidas para fuerzas aplicadas en la dirección Y.

En la [Figura 9](#) se observa que el dinamómetro posee una buena respuesta cuando la carga se aplica en la dirección vertical Y, donde solo se ve una desviación apreciable, respecto de la recta ideal definida como alinealidad, alrededor de los 300 N de fuerza aplicada. Además, se observa la reducida sensibilidad cruzada, evidenciado la reducida lectura en las restantes direcciones.

En la [Figura 10](#) se observan la respuesta en las dos direcciones horizontales cuando la fuerza se aplica sobre una de ellas. Se observa que la linealidad en la dirección Z es razonable para esta aplicación. Además, se observa que las fuerzas aplicadas en la dirección horizontal Z no influyen de manera significativa sobre los anillos destinados a la detección de las fuerzas en la otra dirección horizontal, X.

Estos experimentos evidenciaron que la etapa de diseño fue adecuada para garantizar una buena respuesta en cada dirección, adecuada linealidad, y al mismo tiempo mantener una reducida sensibilidad cruzada. De esta manera se pueden distinguir las componentes ortogonales de la fuerza aplicada.

También se observó en todos los experimentos que los valores mínimos que el dinamómetro puede medir adecuadamente están en el orden de los 100 N. Este valor es más que suficiente para los requerimientos de un proceso de maquinado.

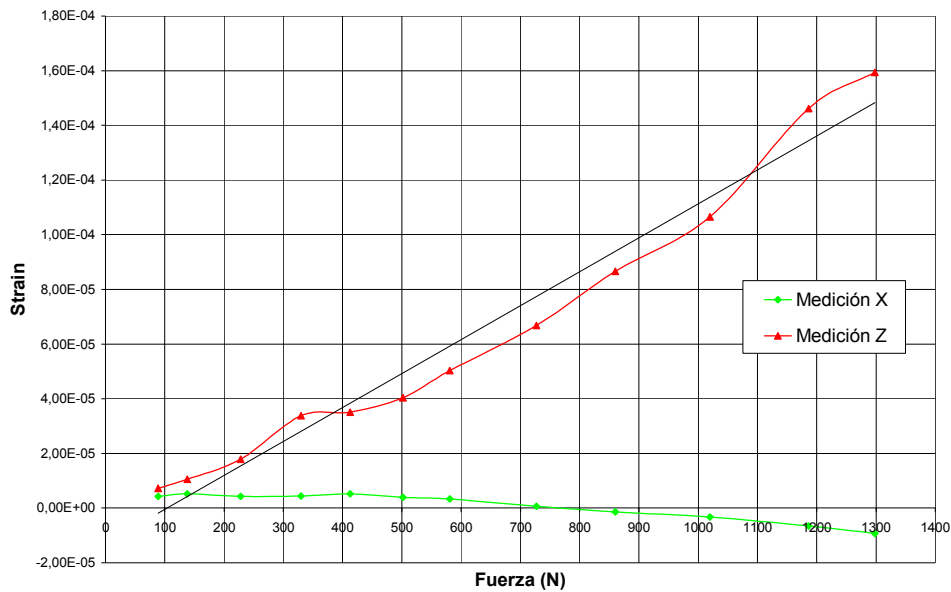


Figura 10: Deformaciones medidas en las direcciones X y Z para fuerzas en dirección Z.

6 CONCLUSIONES

La medición de las fuerzas presentes en operaciones de mecanizado es de gran importancia tanto para el monitoreo en tiempo real del estado de la herramienta como para la optimización del proceso. La utilización de un dinamómetro para medir las fuerzas presentes en este tipo de aplicación impone condiciones de diseño exigentes. Debe ser capaz de medir las tres componentes de una fuerza orientada en el espacio, su rigidez debe ser alta para evitar que interfiera en el proceso de remoción de material y a su vez debe poseer una buena sensibilidad.

En este trabajo se presentó el diseño, fabricación y ensayo experimental de un dinamómetro para maquinado. Las fuerzas se miden a partir de la deformación captada por galgas extensiométricas pegadas convenientemente en elementos deformables del tipo anillo octogonal. El diseño presentado permite evaluar fuerzas estáticas en tres direcciones principales de procesos de corte. En la etapa de diseño se utilizaron herramientas de cálculo y simulación por elementos finitos las cuales permitieron arribar a un diseño apropiado que cumplió con las especificaciones planteadas. El comportamiento del dinamómetro obtenido a partir de los resultados experimentales fue similar al obtenido durante las simulaciones por elementos finitos. Esto indica la conveniencia de su utilización, logrando resultados más próximos a la realidad que los presentados en trabajos similares obtenidos a partir de ecuaciones analíticas aproximadas.

De esta manera, se obtuvo un dinamómetro con una adecuada rigidez, buena sensibilidad y reducida sensibilidad cruzada. Todos elementos son requisitos indispensables para la medición de esfuerzos en maquinado.

7 REFERENCIAS

Gustavo M. Flores, Rogelio L. Hecker, Esteban Dalhaye y Julián Guzmán. Diseño preliminar de una celda de carga para maquinado. *Mecánica Computacional*, Vol. XXV, pp. 1347-1355, 2006.

- İhsan Korkut. A dynamometer design and its construction for milling operation. *Materials & Design*, 24 (8), pp. 631-637, 2003.
- Jeong-Du Kim and Dong-Sik Kim. Development of a combined-type tool dynamometer with a piezo-film accelerometer for an ultra-precision lathe. *Journal of Materials Processing Technology*, 71(3), pp. 360-366, 1997.
- Liang, Steven Y., Hecker, Rogelio L., and Landers, Robert G. Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art, *Journal of Manufacturing. Science and Engineering*, ASME, 126(2), pp. 297-310, 2004.
- Mazini, N., Blanco, J., Iurman, L., Ziegel, D., Saenz, A., Pascual, M. Cabezal Dinamométrico para Monitoreo de Esfuerzos en Procesos de Desbaste. *Congreso de la Asociación Argentino de Materiales (SAM)*, 2000, Jujuy.
- Sedat Karabay. Design criteria for electro-mechanical transducers and arrangement for measurement of strains due to metal cutting forces acting on dynamometers. *Materials & Design*, In Press, Corrected Proof, 2005.
- Süleyman Yıldız and Faruk Ünsaçar. Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Materials & Design*, In Press, Corrected Proof, 2005.