



BASE DE DATOS RELACIONAL PARA EL ANÁLISIS Y LA COMPENSACIÓN DEL ERROR DE DEFORMACIÓN PROVOCADO POR EL SISTEMA DE SUJECCIÓN EN PROCESOS DE MECANIZADO

HORACIO T. SÁNCHEZ, MANUEL ESTREMS, FÉLIX FAURA

Universidad Politécnica de Cartagena, ETS Ingeniería Industrial
Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación
Doctor Fleming s/n, 30202 Cartagena, España

(Recibido 5 de abril de 2004, para publicación 17 de junio de 2004)

Resumen – En este trabajo se ha desarrollado una base de datos relacional con el fin de integrar los resultados obtenidos mediante un método de análisis del reparto de cargas de sistemas de sujeción en máquinas-herramienta con un procedimiento para la compensación del error de deformación. La base de datos proporciona un fichero de salida que contiene las coordenadas modificadas de la superficie de la pieza deformada, que serán introducidas en un programa de CADCAM, donde se obtendrá la trayectoria de la herramienta de corte y el programa de control numérico que compense el error de deformación anterior.

1. INTRODUCCIÓN

Las funciones de los sistemas de sujeción en máquinas-herramienta consisten en posicionar la pieza con la mayor precisión posible sobre la mesa de trabajo y en aplicar las fuerzas de apriete adecuadas para asegurar su inmovilidad total, sin que se origine una deformación estructural o por indentación local excesiva sobre la pieza.

Un estudio demuestra que en la producción por pequeños lotes, el coste relativo a la selección, montaje y utilización de los elementos de sujeción supone el 30% del coste total que conlleva la fabricación del producto, y de media, el tiempo perdido en diseñar los elementos de sujeción es de aproximadamente el 25% del tiempo de planificación del proceso [1]. Por este motivo, muchos han sido los trabajos que han reconocido la importancia del desarrollo de sistemas de diseño de la sujeción asistidos por ordenador (CAFD), donde los atributos de diseño de los elementos de apriete, los soportes y los localizadores se generan automáticamente para una familia de diseños de piezas determinado [2].

La representación de la geometría basada en características necesita de la aplicación de otras técnicas para alcanzar una solución factible, como por ejemplo la aplicación de sistemas expertos. Wang e Inasaki [1] desarrollaron un sistema CAFD basado en el conocimiento de las características de la pieza, por medio de un mecanismo de inferencia referido a las reglas de producción, capaz de generar configuraciones de sistemas de sujeción. En la misma línea, Ma *et al.* [3] desarrollaron un sistema CAFD, llamado *Fix Planning*, en donde se determinaron las superficies y los puntos de aplicación de los elementos de sujeción. Kow *et al.* [4] desarrollaron otro sistema CAFD basado en el modelo de geometría de Unigraphics®. Kumar *et al.* [5] llevaron a cabo el desarrollo de un modelo de clasificación de los tipos de elementos de sujeción basado en reglas de aprendizaje máquina. En otro trabajo, Kumar *et al.* [6] presentaron un sistema CAFD capaz de generar configuraciones de sistemas de sujeción libres de colisión o interferencia con la trayectoria de la herramienta de corte. Al igual que los autores anteriores, Hu y Rong [7] desarrollaron otro sistema CAFD basándose en la trayectoria de herramienta libre de colisiones, pero con un enfoque diferente y más eficiente, al no considerar el volumen de barido.

Los elementos de apriete también han sido tenidos en cuenta en varios trabajos basados en CAFD, entre ellos cabe destacar el de Cecil [8], donde se identificaron las superficies de aplicación y la dirección de las cargas de apriete utilizando técnicas de razonamiento geométrico. En este trabajo también se conside-

ró el diseño de los elementos localizadores, las especificaciones de diseño de la pieza, y otros datos de entrada.

Dentro de la línea de investigación basada en las técnicas de inteligencia artificial cabe destacar, entre otros, el trabajo de Pham y De Sam Lazaro [9], donde desarrollaron un sistema CAFD totalmente automatizado, llamado *Autofix*, para la configuración de elementos de sujeción de tipo modular. De Sam Lazaro y King [10] integraron los sistemas CAFD con el análisis de tolerancias, mediante el desarrollo del sistema *Autofix II*.

Sin embargo, un problema detectado en los sistemas CAFD, citados anteriormente, es que están basados en los datos geométricos y no tienen en cuenta otros también importantes, como la deformación de la pieza durante el proceso de apriete y mecanizado.

Aunque se han propuesto numerosas técnicas basadas en CAFD, el diseño de los sistemas de sujeción sigue siendo el mayor cuello de botella en la integración entre los sistemas CAD y CAM. Ello es debido principalmente a que aún quedan fuera de la integración otros muchos aspectos que deberían ser tenidos en cuenta. Por esta razón, los sistemas CAFD permanecen aún incompletos.

En el presente artículo se desarrolla una base de datos relacional que permita una ágil búsqueda y extracción de los datos críticos procedentes del análisis de reparto de cargas de los sistemas de sujeción. La base de datos se alimenta de la información suministrada por el modelo CAD de la pieza y del utilaje de sujeción, la elección y posicionamiento de los utilajes de sujeción para el estudio de la accesibilidad de la herramienta de corte a la pieza (CAPP), y el análisis mecánico mediante técnicas CAE de las deformaciones estructurales que se producen en la pieza. Esta base de datos persigue la integración de los sistemas CAD, CAPP, CAE y CAM que permita obtener una información del error de deformación provocado por un inadecuado diseño del sistema de amarre, y que además proporcione los datos necesarios para compensar este error mediante la generación de nuevas trayectorias de la herramienta de corte en el mecanizado de la pieza en una máquina-herramienta de control numérico (MHCN), lo que conllevará la obtención de mayores precisiones en las cotas críticas de fabricación.

En el ejemplo ilustrativo que se plantea en este artículo se implementa de modo práctico, la integración de un método de reparto de cargas entre el sistema de sujeción y la pieza con un procedimiento de compensación del error de deformación, mostrando los programas y los formatos de datos utilizados.

2. FUENTES DE ERROR DE LOS SISTEMAS DE SUJECIÓN EN MÁQUINAS-HERRAMIENTA

El primer objetivo en la fabricación de componentes es la obtención de mayor calidad en las piezas, que en este caso se traduce en el cumplimiento de las tolerancias especificadas. Pero si consideramos calidad en un sentido más amplio, debe entenderse como satisfacción del cliente o mayor perfección en la ejecución de las prestaciones del componente. Por ello, un análisis más profundo de las fuentes de error y su cuantificación llevará a la mejora continua de los actuales sistemas de calidad. Dichas fuentes de error pueden extraerse a partir del estudio del ciclo de operaciones del proceso de mecanizado.

En primer lugar, es necesario realizar una preparación o puesta a punto de la máquina-herramienta, de este modo, una de las operaciones previas al mecanizado más importantes es la selección, medición y montaje del utilaje de sujeción en la mesa de trabajo de la máquina-herramienta. Durante esta operación puede aparecer un error debido bien a que los elementos de sujeción no poseen el nivel de tolerancia exigido, o bien por una errónea manipulación y montaje por parte del operario. Este error, denominado error de prerreglaje tiene como consecuencia que el sistema de coordenadas del sistema de sujeción (SCES) varíe su posición con respecto al sistema de coordenadas de la máquina-herramienta (SCMH), como se puede observar en la Fig. 1. Por otro lado, puede aparecer un error de referencia, debido a que las superficies de referencia de la preforma (que son las que apoyan sobre los elementos localizadores) presentan irregularidades superficiales. Estas irregularidades superficiales tienen como consecuencia que el sistema de coordenadas intrínseco de la pieza (SCIP) varíe con respecto al SCES y SCMH (Fig. 2). Estos errores han sido analizados por varios autores, entre ellos cabe destacar a Estrems *et al.* [11]. El siguiente paso consiste en fijar la pieza aplicando una fuerza de apriete, que en caso de que exceda de un determinado valor, puede provocar deformación elástica o plástica sobre la pieza, conociéndose este tipo de error como

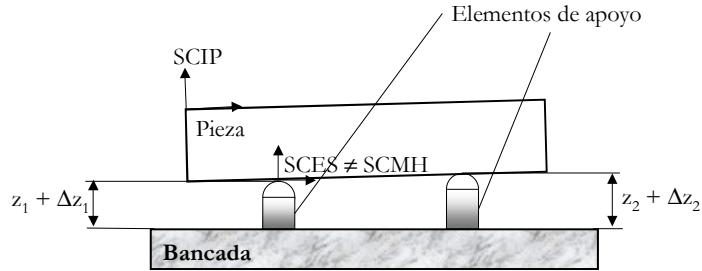


Fig. 1. Error por imprecisión dimensional del utilaje de sujeción o error de prerreglaje.

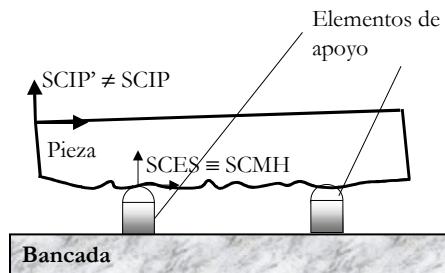


Fig. 2. Errores por imperfecciones en la pieza o error de referencia

error de deformación. Una vez comenzada la operación de mecanizado aparecen una serie de errores como son el error originado por el límite de precisión en el posicionamiento de la máquina-herramienta, el error de deformación debido a las fuerzas de corte, el error provocado por el desgaste de la herramienta, el error debido al calor generado durante el proceso de corte, etc. Aspectos estos últimos que no son objeto de estudio del presente artículo, ya que la máquina-herramienta ha sido considerada como ideal, y el estudio se ha centrado únicamente en error de deformación introducido por los elementos de sujeción.

3. DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS RELACIONAL

Con el objeto de realizar un estudio más general y compacto del error de deformación producido por los sistemas de amarre, es necesario integrar el método de análisis de reparto de cargas desarrollado por Estrems *et al.* [12] con un procedimiento que permita compensar dicho error en un programa CADCAM. De este modo, como se observa en el esquema de la Fig. 3, el proceso de análisis de los elementos de sujeción parte de la información suministrada por el sistema CAD en formato STEP acerca de la geometría de la pieza y de los elementos de sujeción.

A partir de estas dos bases de datos (BB.DD.) de los modelos de la pieza y de los elementos de sujeción, se llevará a cabo la fase de preprocessamiento requerida por el método de análisis del reparto de cargas entre los elementos localizadores del sistema de sujeción y la pieza. Conocido el reparto de cargas de contacto en los elementos localizadores, es posible la realización de un análisis mediante el método de los elementos finitos (MEF) para calcular la deformación de la superficie de la pieza. Esta deformación será registrada en un fichero de salida del programa de elementos finitos Ansys®. A partir de estas deformaciones se determinará el error de deformación estructural. La deformación estructural se calculará siguiendo el método descrito por Estrems *et al.* [12]. A continuación, la base de datos proporcionará un fichero de salida de datos que permitirá la modificación del posicionamiento de los puntos de la superficie de la pieza con respecto al SCMH. Introduciendo esta información en la base de datos de un programa de

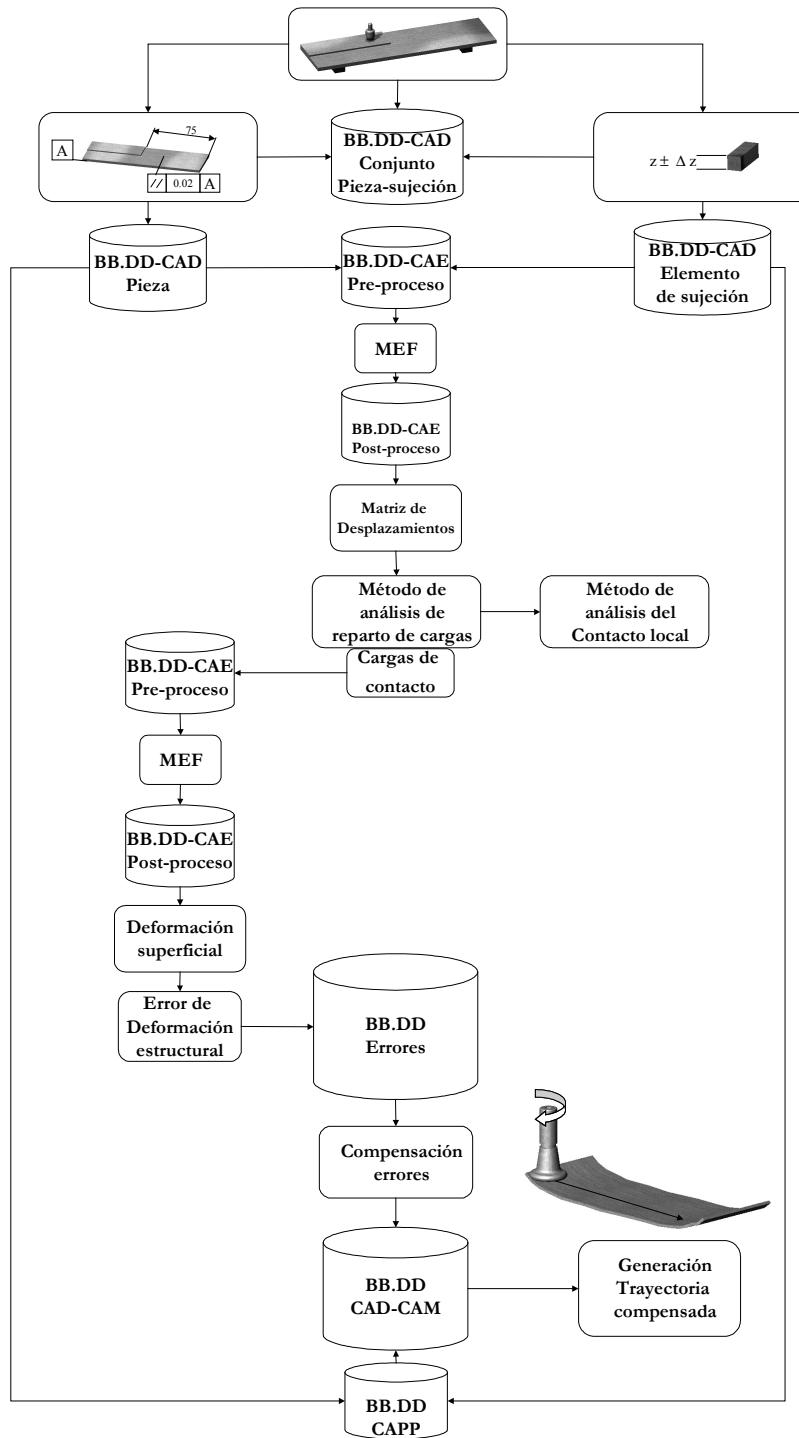


Fig. 3. Base de datos relacional.

CAD-CAM, se obtendrá la trayectoria de herramienta con compensación de error. Una vez se haya mecanizado la pieza y sea liberada de la carga de apriete, la superficie recuperará elásticamente su forma con el fin de que sus cotas críticas se encuentren dentro del límite de tolerancia especificado.

Por otro lado, la información del reparto de cargas se puede introducir en un análisis del estudio del daño por indentación sobre la superficie de referencia de la pieza, dando lugar al conocimiento de la tensión cortante máxima τ_{max} . Si ésta superara el límite de seguridad establecido, debería modificarse el diseño

del elemento de sujeción, o disminuir la magnitud de la fuerza de apriete con el fin de no producir daño por indentación.

A continuación se describen cada uno de los pasos establecidos para la generación de la base de datos relacional.

3.1. BB.DD. CAD de la pieza y de los elementos de sujeción

La demanda de productos de alta calidad y bajo coste, con un tiempo de desarrollo corto pertenecientes al dinámico y global mercado actual, ha llevado a los investigadores a crear estrategias de desarrollo del producto cada vez más eficaces. Por esta razón, el modelado del producto ha sido reconocido como una de las claves en la elaboración de estas estrategias [13]. El papel desempeñado por el modelado del producto alcanza aún mayor importancia cuando ha de ser utilizado por un entorno multidisciplinar. Donde no sólo existen diferentes sistemas CAD, CAM y CAE, sino también un equipo de participantes implicado en el diseño, desarrollo y fabricación del producto (Ingeniería Concurrente) [14]. En el planteamiento del presente artículo, donde el diseño y análisis de los sistemas de sujeción actúa como nexo de unión entre el proceso de diseño y el de fabricación de componentes, el formato estándar donde se expresa el modelo del producto y de los elementos de sujeción, debe proveer de capacidad de comunicación total entre el método de análisis presentado y el software de los distintos sistemas informáticos utilizados.

Con el ánimo de conseguir esta integración, se debe establecer una definición genérica, neutra, consistente y compartida del elemento de sujeción y de la pieza, para obtener sus características implementadas en las diferentes aplicaciones informáticas (p. e.: CAD, CAM, CAE, etc.). Por esta razón, la definición del producto se debe expresar en un formato estándar de intercambio de datos conocido.

3.1.1. BB.DD. de la pieza. Estándares de intercambio de datos

Un formato estándar de intercambio de datos que ha sido ampliamente utilizado en CAD, CAM y CAE a lo largo de los últimos años, ha sido el estándar IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Sin embargo, debido a la complejidad que conlleva el diseño de un sistema de sujeción para máquina-herramienta, el estándar de representación IGES es insuficiente a la hora de representar toda la información necesaria para la integración, ya que tan solo contiene la colección de entidades geométricas que posee la pieza. Aunque este estándar ha sido ampliamente utilizado, se han desarrollado otros estándares, tales como SET (Standard d'Exchange et de Transfer) en Francia, VDA/FS (Verband der Automobilindustrie) en Alemania, ESPRIT-CAD*I (European Especific Programme for Research and Development in Information Technology, Project 322 Computer-Aided Design Interfaces) en la Unión Europea, con el ánimo de tener en cuenta otros tipos de características del producto. Como ejemplo, uno de los proyectos de ESPRIT ha sido el interface NIRO (Neutral Interface for Robotics), que desarrolla un interfaz y un formato de datos neutrales para el intercambio de funciones y datos tecnológicos, geométricos y de programación entre sistemas CAD y la planificación y el control de robots.

Sin embargo, el modelo representado por el formato IGES y los alternativos anteriores, están orientados solamente hacia la geometría. Y por lo tanto es incompleto para representar otro tipo de características. En el comienzo del desarrollo de los sistemas CAD-CAM, el concepto de característica se relacionó solamente con el esquema de formas geométricas de la superficie y forma del producto. Posteriormente, con el crecimiento de los sistemas CAD-CAM, las características del producto pasaron a ser consideradas como características de diseño, de mecanizado y de montaje, teniendo cada una de ellas un dominio especial de implementación. Como consecuencia de ello, ha surgido el concepto de modelo integrado del producto o modelo global del producto, que actúa como soporte de la información de todas las actividades relacionadas con el análisis de los requisitos del producto, del diseño conceptual, del diseño de detalle, de la planificación de procesos de fabricación, de la programación de control numérico, del mecanizado, del montaje y del control de calidad.

Con el propósito de obtener un método sistemático para integrar el modelado del producto, en los Estados Unidos, se extendieron las capacidades de IGES hacia la especificación PDES (Product Data Exchange Specification); y en 1990, a partir de PDES se desarrolló el formato STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data). El estándar STEP es un formato neutral capaz de representar el producto a lo largo de todo su ciclo de vida y de servir como base para implementar y compartir sus características. Si

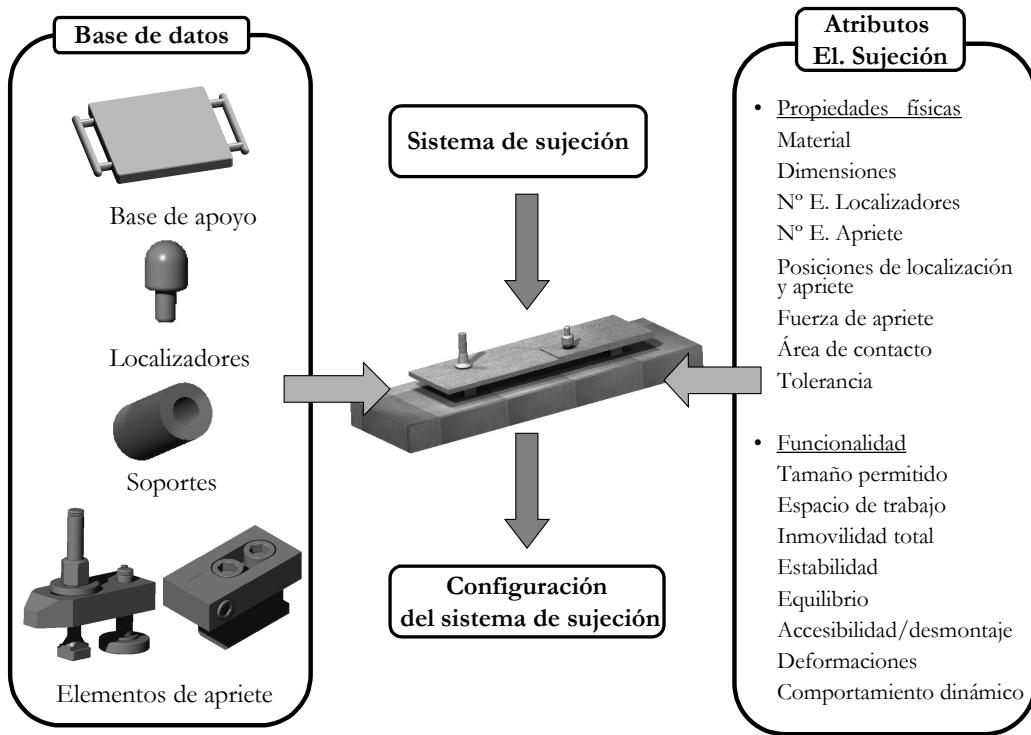


Fig. 4. Base de datos de los elementos de sujeción.

estas características son leídas por más de una aplicación, la información debe de permanecer invariable entre ellas, conservando su completitud y funcionalidad, hasta que dicha información sea almacenada. La mejor manera de encapsular esta información del producto es mediante un formato neutral independiente que pueda ser utilizado por cualquier sistema CAD.

El lenguaje de modelado de información EXPRESS (ISO 10303-11), debe ser capaz de integrar la base de conocimiento, compuesta por la información procedente del CAD, CAM y CAPP. El sistema CAD utiliza los objetos de la librería de EXPRESS, que se definen estructuralmente para la comprensión del conocimiento del diseño de la pieza.

3.1.2. Base de datos de los elementos de sujeción

En la planificación del sistema de amarre, una configuración dada además de depender del tamaño y forma de la pieza, y de las características del proceso de fabricación, también lo hará de los tipos de elementos de sujeción de que se disponga. Por ello, es necesario establecer una base de datos de elementos de sujeción. En la Fig. 4, se representa de forma general los atributos de los elementos de sujeción y la arquitectura de la base de datos. La base de datos contiene tanto los tipos estándar de elementos de sujeción (base de apoyo, localizadores, elementos de apriete y soportes), como otros especiales que puedan adaptarse a un caso muy específico de amarre.

El paso siguiente consiste en establecer su aplicabilidad en un proceso de mecanizado determinado y el almacenamiento de sus propiedades físicas. Esta información habilita al sistema de sujeción para que determine las herramientas disponibles para su configuración. El propósito de establecer una base de datos de elementos de sujeción consiste en la posibilidad de utilizar aquellos que se adapten, en las mejores condiciones posibles, a las superficies de referencia de la preforma de la pieza que se desea mecanizar en una máquina-herramienta determinada. En la base de datos de los elementos de sujeción se puede realizar la siguiente clasificación de atributos:

- Propiedades físicas: Dimensiones, tolerancias, número de elementos localizadores, número de elementos de apriete, fuerza de apriete, área de contacto, etc.

- Propiedades funcionales: Espacio de trabajo, máximo tamaño de pieza permitido, inmovilidad total, estabilidad, equilibrio, accesibilidad, desmontaje, deformación estructural y local, etc.

De este modo y a partir de estas especificaciones se puede establecer una cierta intercambiabilidad entre los distintos elementos de sujeción.

Una de las propiedades importantes a tener en cuenta en un sistema de sujeción es el tamaño de pieza máximo permitido, que se corresponde a las especificaciones de la máquina-herramienta y de diseño del elemento de sujeción. Esta propiedad limita el tamaño de pieza que el sistema de amarre es capaz de fijar. Otro parámetro importante es el margen de seguridad necesario para posicionar al elemento de sujeción sobre el plato base o la mesa de trabajo de la máquina-herramienta.

3.2. Integración de los métodos de análisis de los sistemas de sujeción

La realización de los distintos análisis conlleva una pérdida importante de tiempo, tanto para la preparación de los datos necesarios para la ejecución de los distintos métodos numéricos como para la obtención y representación de los datos para que sean expresados en un formato inteligible. Por esta razón, es necesario establecer un procedimiento de integración de los métodos de análisis de los sistemas de sujeción que permita la intercambiabilidad de los datos, la representación de los resultados entre los distintos programas utilizados, el almacenamiento de los errores debidos a la utilización de los elementos de sujeción en una base de datos, y su tratamiento con el fin de implementar acciones de compensación sobre la trayectoria generada en el programa CAD-CAM.

Este procedimiento de integración consta de las siguientes fases:

1. **Definición del modelo CAD de la pieza y los utillajes de sujeción.** Donde vendrán especificados:
 - Los materiales y sus propiedades (módulo de Young E , coeficiente de Poisson ν , tensión de fluencia σ_y).
 - Las dimensiones y formas geométricas, y sus incertidumbres asociadas.
2. **Obtención del modelo del conjunto del sistema de sujeción-pieza.** En él quedarán reflejados los siguientes datos:
 - La relación entre la fuerza de accionamiento y la fuerza de apriete.
 - La fuerza de apriete máxima calibrada.
 - El límite de tamaño de pieza.
3. **Obtención del modelo CAE del conjunto sistema de sujeción-pieza.** El modelo constará de los siguientes elementos:
 - Las matrices de rigidez conjuntas pieza-amarre.
 - La áreas de apriete admisibles.
 - Los puntos de aplicación de aprietes.
 - Las reacciones en los localizadores.
 - La superficie deformada a mecanizar.
 - El error de posicionamiento por deformación estructural.
4. **Obtención del modelo CAM.** Para la fabricación de la pieza se realizarán los siguientes pasos:
 - Determinación de la superficie a mecanizar teniendo en cuenta:
 - La deformación estructural de la superficie debida a la acción de la fuerza de apriete.
 - Importación de superficie a mecanizar en el programa CAD-CAM.
 - Generación de trayectorias de herramienta en el programa CAD-CAM.
 - Postprocesado del programa de control numérico en el programa CAD-CAM.
 - Envío o ejecución en modo DNC desde el ordenador a la MHCN.

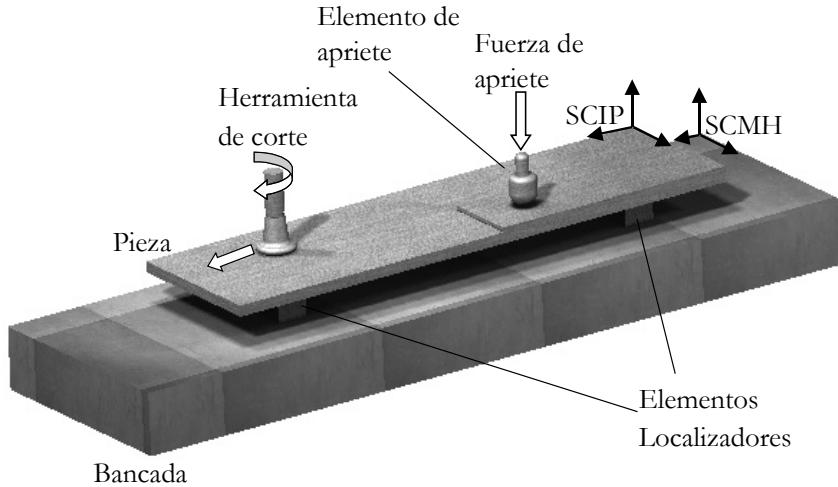


Fig. 5. Ejemplo de aplicación.

Por otro lado también se ha tenido en cuenta la evaluación del daño superficial ejercido sobre la pieza para cada uno de los valores de reparto de carga. El siguiente paso consiste en determinar la carga de contacto P_i en N/m, que se obtiene dividiendo el valor de la carga de contacto f_i en cada punto de localización entre la longitud l_i de los segmentos en los que se ha discretizado la línea de carga existente entre la pieza y los elementos de sujeción. Posteriormente, se determinará el valor de la presión máxima de Hertz p_0 mediante la siguiente expresión conocida [15]:

$$p_0 = \sqrt{\frac{P_i E^*}{\pi R}} \quad (1)$$

donde $E^* = \frac{E}{1 - \nu^2}$.

A partir de la presión máxima de Hertz (p_0) se determina la tensión cortante máxima (τ_0) [15]:

$$\tau_0 = 0,3 p_0 \quad (2)$$

Con los datos de τ_0 y el semiancho de contacto de Hertz a_0 se realizará el cálculo de la tensión cortante máxima τ_{\max} que deberá ser menor que $\sigma_y/2$, con el fin de que no se produzca daño por indentación.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se establece como ejemplo de aplicación el mecanizado de la pieza de aluminio 7178 que aparece en la Fig. 5 de dimensiones principales de 175 x 50 x 4 mm (con módulo de Young $E = 75$ MPa, densidad $\rho = 2820$ Kg/m³ y tensión de fluencia $\sigma_y = 120$ MPa). Al tratarse de una pieza prismática, se ha seleccionado el método 3-2-1, por ser el más extensamente empleado para el amarre de la pieza de la Fig. 5, al que se le ha aplicado una fuerza de apriete $F = 1500$ N. Según este principio deben existir tres puntos de localización donde apoye la superficie de referencia inferior de la pieza, dos puntos en los que apoye una superficie de referencia lateral de la pieza y un punto de apoyo para la superficie lateral restante. Sin embargo, en ocasiones en los que la superficie de referencia inferior de la pieza haya sido previamente mecanizada y su longitud sea relativamente alta es conveniente restringir más grados de libertad. Por ello se ha optado por una configuración de dos barras como elementos de localización inferiores, capaz de dar lugar a una mayor estabilidad y menor deformación sobre la pieza. Esta mayor estabilidad y menor deformación redundará en un mecanizado de mayor precisión bajo la acción de las fuerzas de apriete y de corte.

Las dos barras que forman parte de los elementos localizadores son de acero endurecido y están distanciadas una longitud $L = 125$ mm y sus dimensiones principales son $L = 30$ mm, $b = 10$ mm y $z = 10$ mm. Ambas poseen las mismas propiedades mecánicas (módulo de Young $E = 201$ GPa y densidad $\rho = 8000$ Kg/m³). La superficie a mecanizar debe presentar una tolerancia final de paralelismo de 0,02 mm.

Por otro lado, se establecen las siguientes hipótesis de partida:

- Solamente se tiene en cuenta la carga de apriete que se aplica en la sujeción de la pieza a la máquina-herramienta.
- El problema que nos ocupa se corresponde a un análisis quasi-estático donde no se tiene en cuenta la variación en el tiempo de la carga de apriete.
- Sólo son tenidas en cuenta las cargas normales compresivas sobre la pieza.
- Al aplicarse grandes fuerzas de apriete en dirección normal a la superficie de la pieza, aparecerán fuerzas normales elevadas en los puntos de localización o de apoyo entre la pieza y los localizadores, hecho por el que se justifica la nula consideración de los fenómenos de fricción y deslizamiento.

A continuación se va a integrar el método de análisis del reparto de carga entre los elementos de sujeción y la pieza con el procedimiento de compensación del error de deformación estructural introducido por el sistema de apriete en la pieza.

4.1. Análisis del reparto de cargas y de deformaciones estructurales

4.1.1. Integración de las BB.DD. de CAD con las BB.DD. de CAE

Para llevar a cabo el análisis del reparto de cargas será necesario en primer lugar, extraer la información geométrica de la pieza y de los elementos de sujeción procedente de la base de datos del sistema CAD donde se hayan modelado. El primer paso reside por lo tanto, en establecer un interconexión para poder capturar dichos datos geométricos y que éstos sean empleados en la etapa de preproceso descrita en el análisis del reparto de cargas. El programa de propósito general de análisis por elementos finitos Ansys® posee varias posibilidades para realizar la integración.

4.1.2. Obtención del reparto de cargas

Una vez importado el modelo de la pieza y de los elementos de sujeción, se procede al cálculo del reparto de cargas, tal y como se describe en el método desarrollado por Estrems *et al.* [12]. Para realizar el cálculo es necesario determinar los coeficientes de la matriz de desplazamientos. Estos se pueden obtener mediante el MEF, analizando cada uno de los cuerpos por separado, pieza y localizadores.

Una vez obtenida la matriz de desplazamientos modificada $[C^*]$ y conocida la fuerza de apriete $F = 1500$ N, el reparto de carga se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \\ f_9 \\ f_{10} \\ v \end{bmatrix} = [C^*]^{-1} \begin{bmatrix} 1500 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99,31 \\ 164,59 \\ 247,72 \\ 342,48 \\ 433,12 \\ 36,35 \\ 39,60 \\ 42,75 \\ 45,71 \\ 48,37 \\ 4,52 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

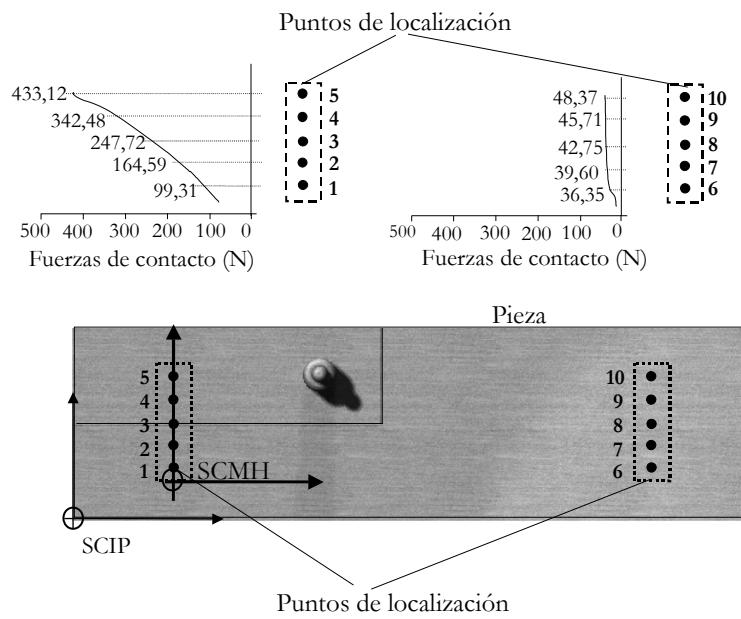


Fig. 6. Reparto de cargas en los puntos de localización.

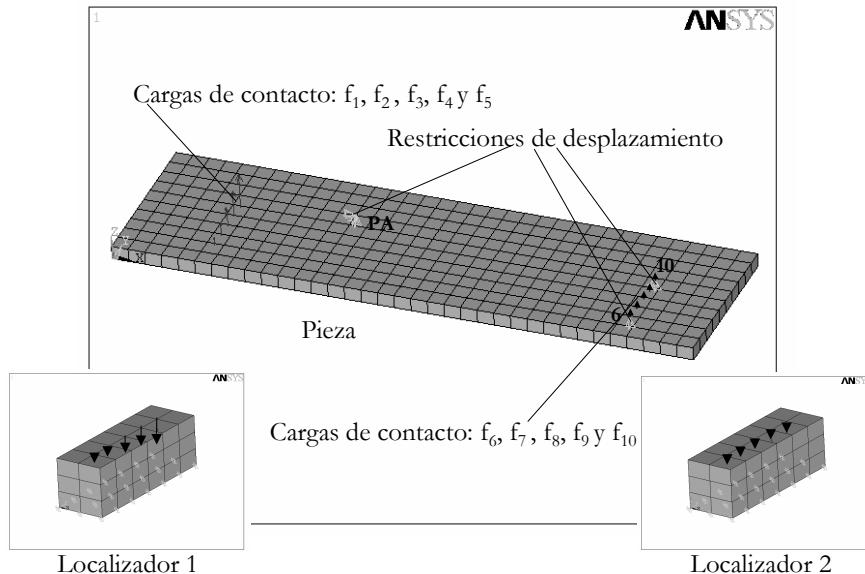


Fig. 7. Aplicación de condiciones de contorno en la pieza.

En la Fig. 6 se observa como se reparte el vector de cargas a lo largo de todos los puntos de contacto, apareciendo un claro desequilibrio entre los puntos PL1 y PL5 del localizador 1, y en general entre los valores de un localizador y el otro.

4.1.3. Análisis de deformaciones

Conocido el reparto de carga sobre los puntos de localización, uno de los posteriores estudios que se pueden realizar, consiste en la determinación de la deformación de las superficies de la pieza y de los loca-

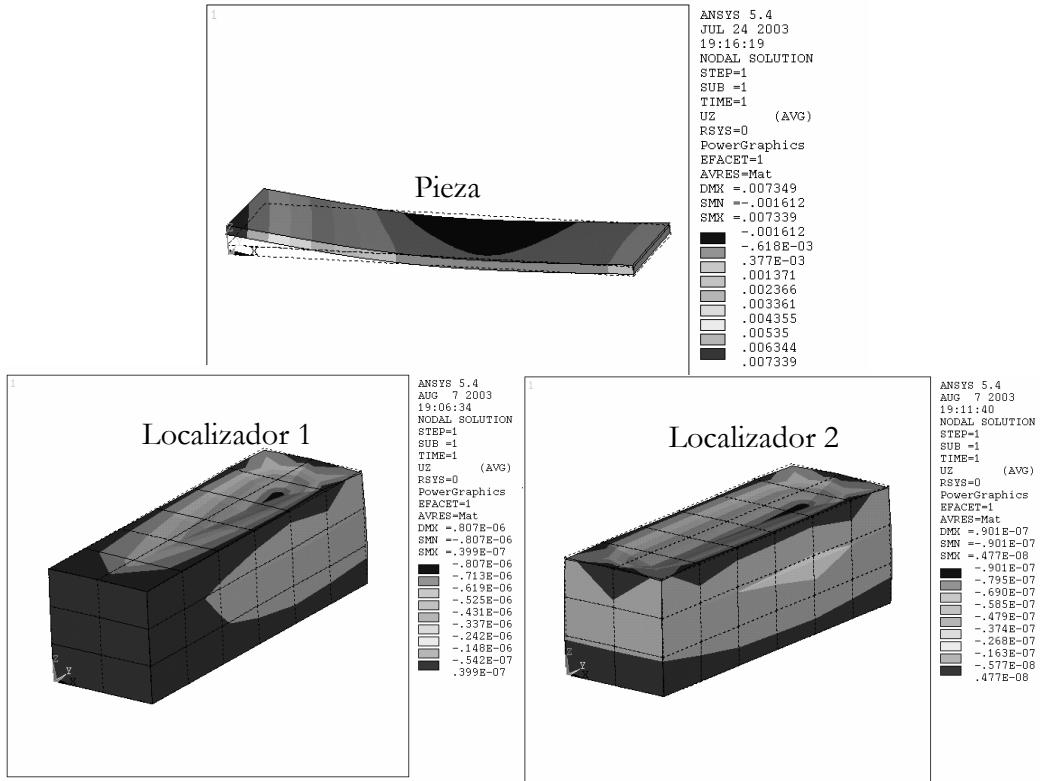


Fig. 8. Deformación producida en la pieza.

lizadores. La primera deformación, debe ser tenida en cuenta con el fin de corregir el camino de herramienta para compensar el error en el mecanizado. La segunda afectará al error de prerreglaje, es decir, alterará la superficie de los elementos localizadores sobre las que apoya la superficie de referencia de la pieza. Para ello, se va a realizar un análisis por MEF del modelo de pieza anterior y de los localizadores, con las propiedades de material, el tipo de elementos y estrategia de mallado ya utilizados anteriormente. Sin embargo, se utilizan unas nuevas condiciones de contorno, donde las cargas a aplicar sobre los puntos de localización son las fuerzas de contacto anteriormente calculadas en la sección 4.1.2.

Además, es necesaria la restricción de 6 desplazamientos para asegurar la inmovilidad total de la pieza. Con tal fin se ha optado por restringir los tres desplazamientos del punto de aplicación de la fuerza de apriete PA, los desplazamientos según los ejes Y y Z del punto de localización 10, y el desplazamiento vertical del punto de localización 6, como se puede observar en la Fig. 7. En el caso de los localizadores, se supone que su base permanece totalmente fijada sobre la mesa de trabajo, por lo que todos sus nodos correspondientes poseen sus tres grados de libertad restringidos.

Seleccionando el tipo de análisis estático y resolviendo el problema planteado, se obtienen las deformaciones verticales sufridas por la pieza y los elementos localizadores, así como las tensiones de von Mises (ver Fig. 8 y 9). Se puede observar que la mayor deformación sufrida se corresponde a la zona de contacto más cargada, es decir, en las inmediaciones del localizador 1. En cuanto a las tensiones de von Mises, se detecta que la zona próxima al punto de aplicación de la fuerza de apriete presenta una menor concentración de carga.

Si se seleccionan los nodos correspondientes a la superficie que será mecanizada en la pieza, y a la superficie de apoyo de los elementos localizadores en el programa de elementos finitos, se puede obtener un fichero de salida donde estén contenidos los valores correspondientes a la deformación sufrida. Como se puede observar en la Fig. 10 aparecen seleccionados todos los nodos de las superficies y el listado de valores de deformación de los mismos. Conocido el valor de la deformación de la superficie a mecanizar, es posible determinar el cambio de la posición relativa de la pieza y de su SCIP correspondiente, con respecto al SCMH, y por consiguiente el error producido. Este error se puede introducir en la base de datos

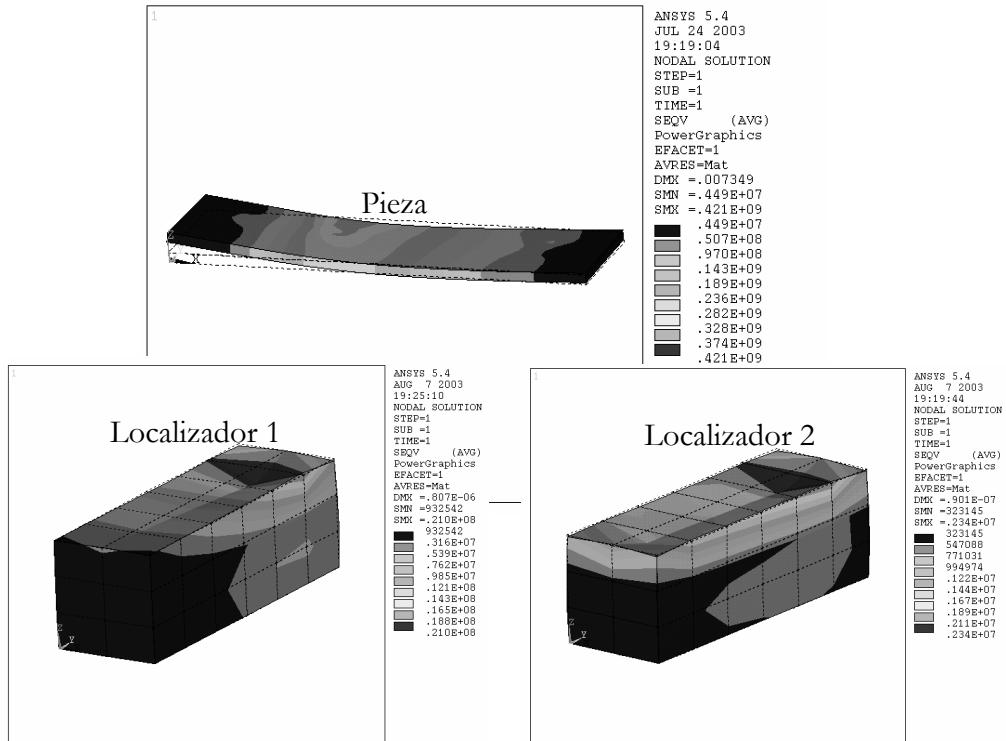


Fig. 9. Tensión de von Mises.

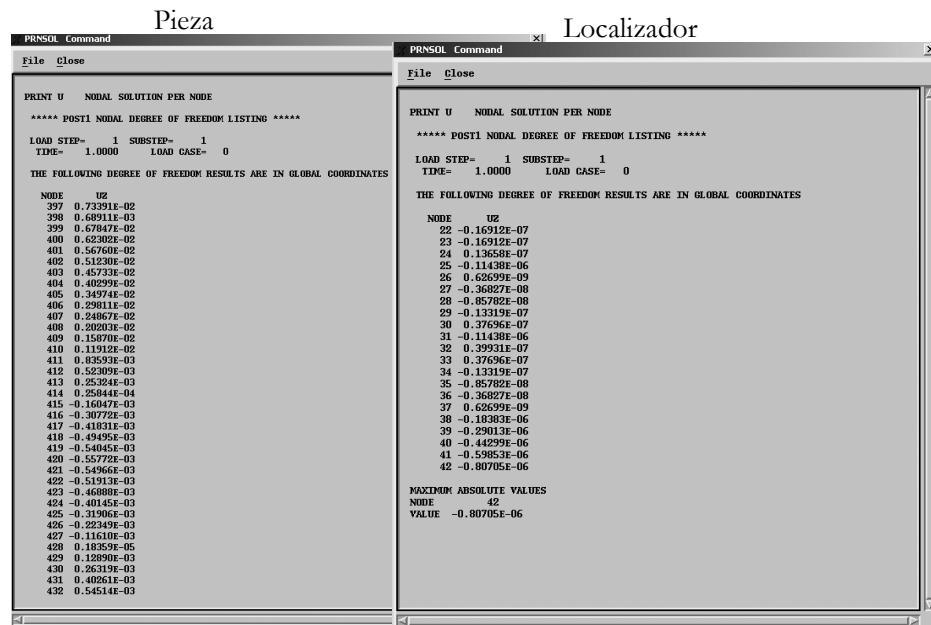


Fig. 10. Deformación obtenida en los nodos de la superficie.

del Sistema CAD-CAM con la finalidad de que sea compensado mediante la generación de un nuevo camino de herramienta; y por lo tanto, se adapte a los cambios de posición de la superficie. Del mismo modo, la deformación de los elementos localizadores también dará lugar a las correcciones adecuadas en la generación de nuevos caminos de herramienta en los sistemas CAD-CAM.

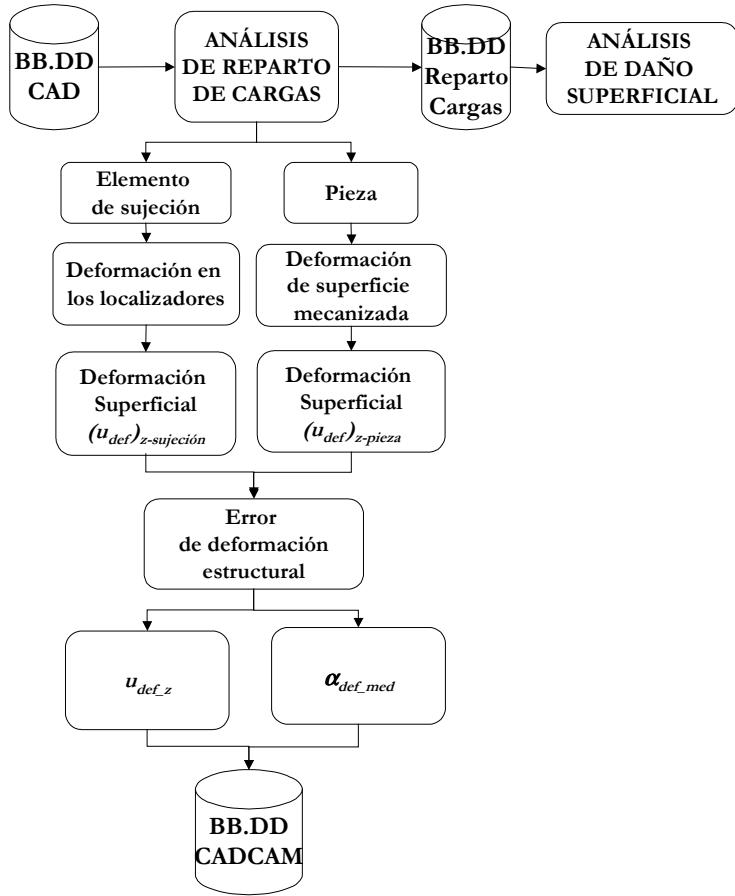


Fig. 11. Esquema de integración del análisis del reparto de cargas y la compensación del error de deformación.

4.2. Análisis del daño por indentación

El siguiente paso consiste en estudiar el problema del contacto desde el ámbito local a partir de los valores del reparto de cargas obtenidos en el apartado 4.1. De este modo, se puede conocer la existencia de daño superficial sobre la pieza.

Sánchez *et al.* [16] presentaron un método semianalítico capaz de determinar la distribución de presiones subsuperficial y el mapa tensional tanto si se realizaba la indentación con elementos de sujeción de tipo cilíndrico (caso de deformación plana) como si se llevaba a cabo mediante elementos de sujeción de tipo esférico (caso de comportamiento tensional axisimétrico).

En relación al ejemplo ilustrativo de la Fig. 5, cabe decir que al ser prismática la geometría escogida para el elemento de localización, la formulación debe corresponderse con la desarrollada para el elemento de sujeción de tipo cilíndrico con radio $R \rightarrow \infty$.

A partir de las correlaciones determinadas por Sánchez *et al.* [16] para este tipo de geometría de contacto se puede llegar a calcular el valor de τ_{\max} correspondiente a cada una de las cargas de contacto:

$$\frac{\tau_{\max}}{\tau_0} = -0,8117t^3 + 1,6282t^2 - 1,2827t + 1 \quad (4)$$

donde $t = \frac{w}{a_0}$.

Finalmente todos los valores de τ_{\max} se encuentran por debajo de $\sigma_y/2 = 60$ MPa. Si esto no fuera así, se debería modificar la geometría del elemento de sujeción de modo que disminuyera el valor de τ_{\max} .

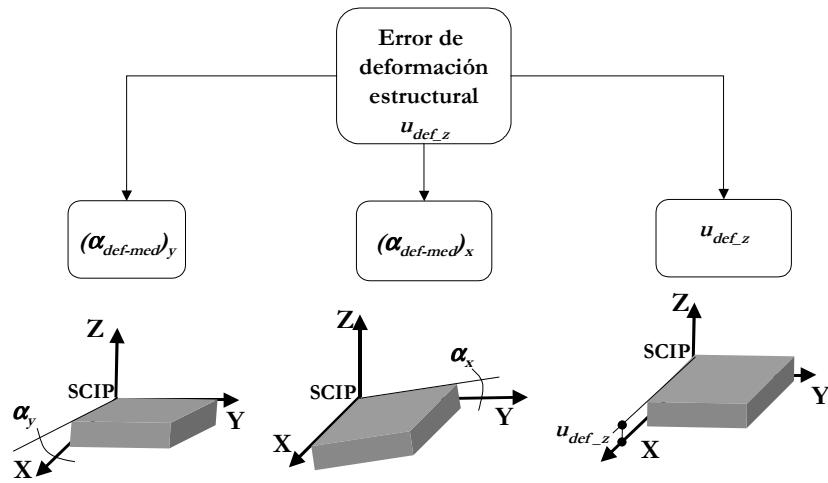


Fig. 12. Error de deformación.

4.3. Compensación del error

Una vez realizado el análisis de reparto de cargas y deformación estructural es necesario llevar a cabo la compensación del error de deformación para alcanzar la precisión final de la pieza. Para ello, se requiere realizar una integración con el fin de tratar adecuadamente toda la información generada en el análisis anterior, e introducirla en la base de datos del programa de CAD/CAM.

La relación del error de deformación con el procedimiento de integración que se pretende llevar a cabo, se presenta el esquema de la Fig. 11.

El error de deformación se produce debido a la deformación estructural originada por la acción de la fuerza de apriete. Este error se cuantifica a partir la deformación de la superficie mecanizada, que se obtiene mediante la aplicación del vector de cargas de contacto sobre el modelo de elementos finitos. Por un lado, se tienen los valores de la deformación vertical en los nodos superficiales (u_{def_z}), y por otro la rotación producida por esta deformación respecto al eje x ($(\alpha_{def-med})_x = 1,715^\circ$, y al eje y ($(\alpha_{def-med})_y = 1,023^\circ$ del SCIP.

La posición de los seis puntos establecida por el conocido principio de isostaticidad, puede variar debido a la aparición del error de deformación, entre otros errores. Por lo tanto, las coordenadas de cualquier punto de la superficie mecanizada de la pieza pueden sufrir un cambio de posición, debido bien a las rotaciones del SCIP con respecto al SCMH, o bien a las deformaciones de la superficie mecanizada obtenidas en el análisis de reparto de cargas (Fig. 12):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = B_x B_y B_z \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (u_{def})_x \\ (u_{def})_y \\ (u_{def})_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde:

$$B_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B_y = \begin{bmatrix} \cos \alpha_y & 0 & -\sin \alpha_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_y & 0 & \cos \alpha_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B_z = \begin{bmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

aunque como se puede observar, según los valores obtenidos, la pieza no sufre variación alguna según la rotación respecto al eje z , α_z . Además, al asumirse que sólo se produce deformación vertical en los nodos de la superficie de la pieza, sólo es necesario introducir el valor de $(u_{def})_z$ en la ecuación (5).

Mediante esta transformación, la nube de puntos de la superficie de la pieza se introduce en la base de datos del sistema CAD-CAM Teksoft®. Para llevar a cabo la introducción de la nube de puntos es necesario seleccionar todos los nodos de la superficie que debe ser mecanizada en la pieza en el programa de elementos finitos Ansys®. De modo que finalmente, se obtiene un fichero de salida que contiene un listado con los números de nodo, sus coordenadas x , y y z , y las deformaciones verticales correspondientes. Posteriormente, la información correspondiente a los errores es tratada adecuadamente aplicándose la ecuación (5) implementada en el programa de cálculo Matemático Matlab®. Como resultado se registra un nuevo listado con las nuevas coordenadas de los nodos de la superficie que se pretende mecanizar. En el ejemplo ilustrativo que se presenta en este artículo, se han diferenciado 3 zonas en la superficie, por un lado se encuentra la zona A, donde se aplica la carga de apriete, y las dos zonas, B y C, que deben ser mecanizadas con profundidad de 0,5 mm. El módulo de CAD representa la tres zonas de la superficie de la pieza a partir de la información descrita anteriormente, mediante el modo de generación de superficies a malla de líneas (como se muestra en la Fig. 13), donde es necesario crear una malla regular donde las coordenadas x e y deben ser equidistantes y la coordenada z se obtiene en el proceso de transformación descrito anteriormente.

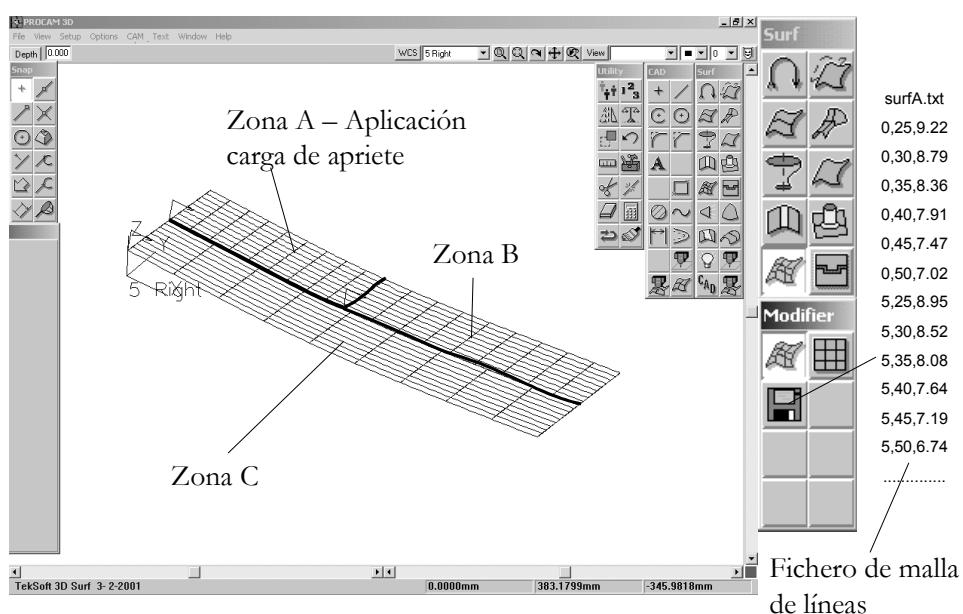


Fig. 13. Modelo de superficie a malla de líneas compensada.

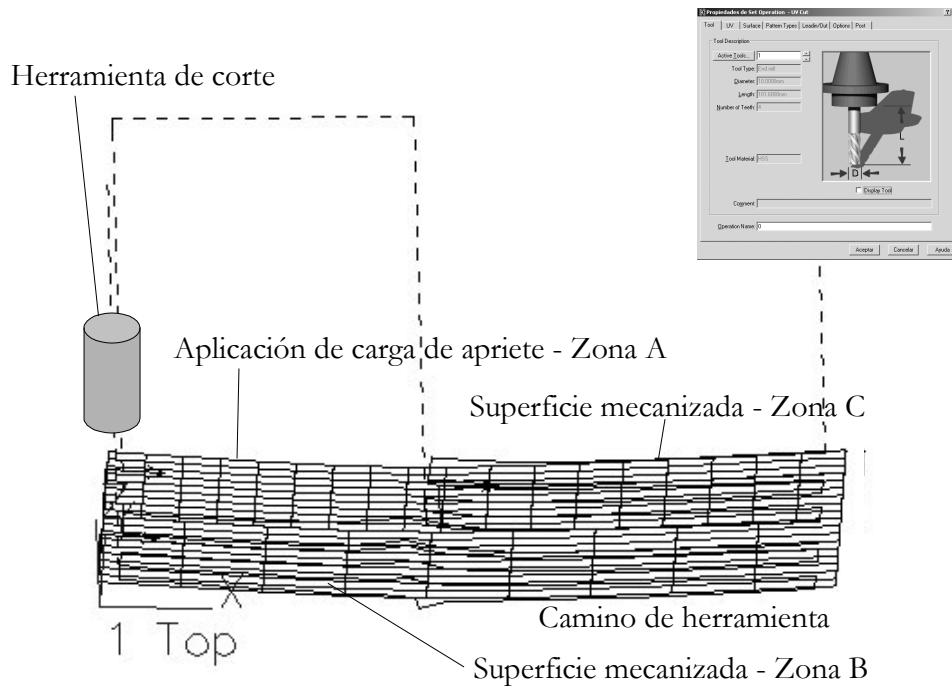


Fig. 14. Trayectoria de herramienta obtenida mediante el módulo de CAM de TekSoft®.

A continuación, se selecciona el ciclo de acabado superficial tipo UV en el módulo de CAM. Este ciclo elimina material realizando una serie de pasadas de corte a lo largo de las direcciones U y V de la superficie. Las dos direcciones, U y V, se identifican por medio de las líneas de ajuste que conforman la superficie. En la generación de la trayectoria de la herramienta es posible especificar el punto de comienzo, la dirección de corte, si se mecaniza en pasadas bidireccionales o unidireccionales, y si se mecaniza toda la superficie o solamente una porción.

En el cuadro de diálogo del mecanizado UV se introducen los parámetros correspondientes a las condiciones de corte adecuadas para el mecanizado de la pieza. Dichos parámetros se expresan en la Tabla I.

Por último, se obtiene la trayectoria de herramienta que tiene en cuenta la compensación de error anteriormente calculada, que se puede observar en la Fig. 14. De este modo, y una vez que la superficie de la pieza haya experimentado la recuperación elástica después de retirar la carga de apriete, las cotas finales satisfarán la condición de planitud previamente establecida de 0,02 mm. Si se selecciona convenientemente la opción de postprocesado en las operaciones a realizar en el programa de CAD-CAM, se obtendrá además un fichero en código ASCII que contenga los comandos de programación de la MHCN (Fig. 15) que se vaya a utilizar para llevar a cabo el mecanizado de la pieza.

Tabla 1. Parámetros de mecanizado utilizados en la simulación de CAD/CAM.

Tipo de operación	Fresado frontal en acabado
Diámetro de corte	10 mm
Número de filos	4
Material	Acero HSS
Velocidad de corte (rpm)	500
Velocidad de avance (mm/min·diente)	62,5

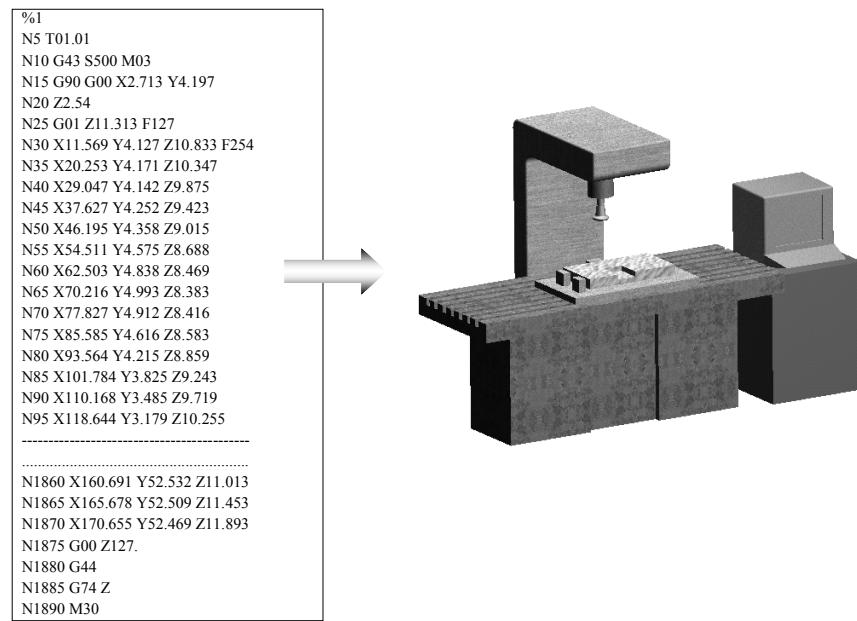


Fig. 15. Código ISO generado mediante el programa TekSoft®.

5. CONCLUSIONES

El procedimiento de integración posee como soporte una base de datos relacional que permite una ágil búsqueda y extracción de los datos críticos del análisis de reparto de cargas y deformación. La base de datos se alimenta de la información suministrada por los modelos CAD de la pieza y del utilaje de sujeción, de la elección y posicionamiento de los utilajes de fijación para el estudio de la accesibilidad de la herramienta de corte a la pieza (CAPP), y del análisis mecánico mediante técnicas CAE de las deformaciones que se producen en la pieza. Esta base de datos persigue la integración final de los sistemas CAD, CAPP, CAE y CAM que permita obtener una información de los errores provocados por un inadecuado diseño o posicionamiento del sistema de amarre, y que además proporcione los datos necesarios para compensar estos errores mediante la generación de nuevas trayectorias de herramienta en el mecanizado de la pieza en una MHCN, lo que permitirá obtener mayores precisiones en las cotas críticas de fabricación.

REFERENCIAS

- [1] Wang, C. Y., Inasaki, I., "Knowledge in the domain of Feature-Based Fixturing Planning", *JSME International Journal, Series C*, Vol. 42, No. 4, pp. 1085-1092, 1999.
- [2] Cecil, J., "Computer-Aided Fixture Design - A review and future trends", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, No. 11, pp. 790-793, 2001.
- [3] Ma, W., Rong, Y., "Development of automated fixture planning systems", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 171-181, 1999.
- [4] Kow, T. S., Kumar, A. S., Fuh, J. Y. H., "An integrated approach to collision-free Computer-Aided Modular Fixture Design", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 233-242, 2000.

- [5] Kumar, A. S., Subramaniam, V., Teck, T. B., "Conceptual design of fixtures using machine learning techniques", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 176-181, 2000.
- [6] Kumar, A. S., Fuh, J. Y. H., Kow, T. S., "An automated design and assembly of interference-free modular fixture setup", *Computer Aided Design*, Vol. 32, No. 10, pp. 583-596, 2000.
- [7] Hu, W., Rong, Y., "A fast interference checking algorithm for Automated Fixture Design Verification", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 8, pp. 571-581, 2000.
- [8] Cecil, J., "A clamping design approach for Automated Fixture Design", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, No. 11, pp. 784-789, 2001.
- [9] Pham, D. T., De Sam Lazaro, A., "AutoFix - an expert CAD system for jigs and fixtures", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 30, No. 3, pp. 403-411, 1990.
- [10] De Sam Lazaro, A., King, D. A., "Automated design of machining fixtures: tolerance and sequential operations", *Intelligent Systems Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 172-184, 1992.
- [11] Estrems, M., Sánchez, H. T., Faura, F., "Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 384-390, 2003.
- [12] Estrems, M., Faura, F., Pedrero, J. I., "Método para determinación de la distribución de carga entre dos cuerpos con varios puntos de contacto", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 17, No. 4, pp. 387-401, 2001.
- [13] Chin, K. S., Zhao, Y., Mok, C. K., "STEP-Based multiview integrated product modelling for concurrent engineering", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 20, No. 12, pp. 896-906, 2002.
- [14] Liu, T. H., "The Standards: STEP ISO-10303", *Concurrent design of products, manufacturing process and systems. Automation and production systems. Methodologies and applications. Vol. 3*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1998.
- [15] Jonhson, K. L., "Contact Mechanics", Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- [16] Sánchez, H. T., Estrems, M., Hernández, J. J., Faura, F., "Desarrollo de un método semianalítico para el estudio del contacto entre los elementos de fijación y la pieza en procesos de mecanizado", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 20, No. 1, pp. 33-54, 2004.

RELATIONAL DATA BASE FOR THE ANALYSIS AND THE COMPENSATION OF THE DEFLECTION ERROR DUE TO THE FIXTURING SYSTEM IN MACHINING PROCESSES

Abstract – In this work a relational data base has been developed for integrating the results obtained by a fixturing load distribution method in machine tools with a deflection error compensation procedure. The data base gives an output file which contains the modified coordinates of the bended workpiece surface. These coordinates will be introduced in a CAD/CAM program for obtaining the cutting tool path and the numerical control program, which will compensate the deflection error.