



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELADO DEL PROCESO DE FORJADO ORBITAL
MEDIANTE PAQUETERÍA DE ELEMENTO FINITO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

ESAU ALAMEDA DE LA MORA

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. EDGAR ISAAC RAMIREZ DIAZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mi madre, por todo el apoyo y cariño que me ha brindado durante todo este tiempo. Te agradezco profundamente el tiempo que invertieras en mi cuidado, mi formación como persona, tu esfuerzo y el enorme sacrificio que sostuvieras todos estos años, gracias al cual he podido llegar hasta esta etapa de mi vida.

A Lucero mi compañera de vida. Tu confianza me mantuvo en pie, gracias por estar conmigo, por tu amor, por ser mi amiga, mi musa y mi todo.

A mi director de tesis el M. en C. Edgar Isaac Ramírez Díaz, su conocimiento, sus consejos y paciencia me brindaron la confianza necesaria para conseguir mis objetivos.

A mis compañeros y amigos de la facultad: Adrián, Carlos, Fernando y Toño, porque para mi han sido un ejemplo, gracias por el aprendizaje recibido pero en especial por todos los momentos que compartimos.

A mis sinodales: Dr. Armando Ortiz Prado, M. en C. Ubaldo Márquez Amador, M. en C. Osvaldo Ruiz Cervantes, Ing. Hugo Alberto Durán Cortés, por el tiempo que me dedicaron, sus valiosas contribuciones y consejos para enriquecer este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México pero en especial a la Facultad de Ingeniería que me brindó una formación y me permitió desarrollarme en una ambiente de libertad y respeto.

Índice de Contenido

Capítulo 1 Características del proceso de forjado orbital.	1—1
1.1 Introducción.	1—1
1.2 Parámetros de los procesos de conformado.	1—2
1.2.1 Esfuerzo de fluencia.	1—3
1.2.2 Temperatura.	1—5
1.2.3 Condiciones de fricción y lubricación.	1—8
1.3 Forja.	1—9
1.4 Clasificación de los procesos de forja.	1—10
1.5 Forjado Orbital.	1—12
1.6 Ventajas y desventajas.	1—15
1.7 Equipo para Forjado Orbital.	1—16
1.8 Características de deformación y flujo del material.	1—19
1.8.1 Efecto de hongo.	1—21
Capítulo 2 Modelos del proceso de forjado orbital.	2—23
2.1 Modelos para el análisis de forjado orbital.	2—23
2.2 Modelos Analíticos.	2—24
2.2.1 Método del Límite Superior.	2—24
2.2.2 Método del Planchón.	2—25
2.3 Modelos materiales.	2—26
2.3.1 Estudio experimental foto-plástico.	2—30
2.4 Simulaciones numéricas.	2—32
2.5 Modelos desarrollados mediante el método de elementos finitos.	2—32

Capítulo 3 Modelado del proceso de forjado orbital en ABAQUS®.	3—42
3.1 Modelo General.....	3—42
3.1.1 Propiedades del material.....	3—44
3.1.2 Procedimiento de análisis.....	3—45
3.1.3 Condiciones de contacto.	3—48
3.1.4 Restricciones de contacto.	3—48
3.1.5 Condiciones de Frontera.	3—51
3.2 Características del mallado.	3—52
3.2.1 Mallado Adaptativo ALE (Arbitrario Lagrangiano-Euleriano).....	3—53
3.3 Energía interna y cinética.	3—56
Capítulo 4 Resultados.....	4—57
4.1 Distribución de la deformación.....	4—57
4.2 Flujo de material.....	4—61
4.3 Distribución de esfuerzos en la pieza de trabajo.	4—64
4.4 Fuerza y momento de forja.....	4—66
4.5 Variación del coeficiente de fricción.....	4—68
4.6 Variación del avance por revolución S	4—71
4.7 Variación del ángulo de inclinación α en el molde superior.	4—76
Capítulo 5 Conclusiones.	5—81
Bibliografía y Referencias.	84

Prólogo

En la industria del conformado, la meta es obtener las características óptimas en el producto terminado; sin embargo, para conseguir esta optimización se requiere un diseño apropiado del proceso y un control riguroso del mismo. Por este motivo, el uso de las simulaciones numéricas en la industria se ha incrementado considerablemente, ya que su implementación permite reducir los costos referidos al desarrollo de un proceso en particular; entre los cuales, el método de elementos finitos se ha colocado como el más importante en la simulación de los procesos de conformado metálico. No obstante, el uso de estas técnicas sólo puede justificarse mediante la fiabilidad de la solución entregada y la eficiencia computacional que represente su utilización.

En este trabajo se presenta un modelo 3D, para la simulación del proceso de forjado orbital, elaborado mediante una paquetería comercial de elemento finito, con el cual se pretende estudiar las diferencias presentes en la distribución de la deformación de la pieza de trabajo, el flujo de material y los parámetros de fuerza entre los procesos de forjado convencional y rotatorio. La mayoría de los trabajos que existen, en relación al proceso de forjado orbital, se enfocan principalmente en la medición de la distribución de presión en el área de contacto, así como el flujo de material en dicha zona, empleando para este fin métodos analíticos, experimentales y más recientemente métodos numéricos especialmente el método de elementos finitos (FEM).

Para obtener una solución adecuada, se utilizaron diferentes técnicas de mallado para discretizar la pieza de trabajo; así como métodos de remallado para simular correctamente el flujo de material. Con el objetivo de validar el modelo propuesto, los resultados obtenidos serán comparados con el trabajo experimental realizado por Canta T. et al en 1998.

Una vez que se haya obtenido un modelo satisfactorio, se variarán las condiciones cinemáticas del proceso (avance por revolución S), el ángulo de inclinación del molde superior (α) y las propiedades de contacto, al introducir diferentes valores al coeficiente de fricción; esto con la finalidad de investigar la influencia que presentan dichos parámetros en el flujo de material, la fuerza de formado y el momento de forja en el proceso rotatorio.

El presente trabajo consta de cinco capítulos, en los cuales se abordan los temas de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta la geometría del proceso, las relaciones cinemáticas entre las herramientas y se explican las variables que intervienen en el proceso de forjado orbital; así como, las características de deformación y el flujo de material en la pieza de trabajo.

El segundo capítulo brinda una recopilación de los modelos analíticos y trabajos experimentales desarrollados para el estudio del proceso. Así mismo, se muestran algunos de los trabajos más recientes, realizados mediante simulaciones numéricas, y los alcances de cada trabajo.

El tercer capítulo se enfoca en la construcción del modelo. Se explican las características del modelo, el material utilizado, las técnicas de generación de malla, el método de remallado, etc. con las cuales se consiguió un modelo eficiente en comparación con los resultados reportados en la literatura y con un costo computacional aceptable.

El análisis de los resultados, obtenidos mediante el modelo planteado, se abordan en el capítulo cuatro; así como, una comparación entre el proceso de forja convencional y rotatorio. Finalmente, en el capítulo quinto se exponen las conclusiones obtenidas mediante este trabajo.

Capítulo 1 Características del proceso de forjado orbital.

1.1 Introducción.

La importancia de los metales en la tecnología moderna se debe principalmente a que pueden ser formados con geometrías útiles como tubos, barras o placas. Existen dos métodos para transformar en estado sólido un metal en un producto útil, los procesos de deformación plástica y los procesos de remoción de material o procesos de maquinado.

En los procesos de deformación plástica, el volumen y la masa del metal permanecen constantes, mientras que la forma de la pieza sufre una deformación permanente. Entre las ventajas que se tiene con estos procesos se encuentran las siguientes: no se desperdicia materia prima, se obtienen mejores propiedades mecánicas y mayores velocidades de producción.

Los procesos de maquinado remueven material en forma de viruta utilizando una herramienta afilada. La remoción de material causa un desperdicio considerable del mismo, sin embargo, se mejora notablemente el acabado superficial y la aproximación dimensional.

Procesos de deformación plástica (formado metálico).

Inicialmente se tiene una forma simple, la cual es deformada plásticamente entre herramientas para obtener la configuración final deseada.

Se clasifican en dos grandes grupos:

- Procesos de conformado volumétrico.
- Procesos de conformado de hojas metálicas.

En los procesos de conformado volumétrico el material de entrada es un tocho, una barra o puede tener forma de placa. Durante la deformación, se incrementa considerablemente la relación volumen-superficie bajo la acción de las cargas de presión. Como resultado de la deformación plástica que sufre la pieza de trabajo, se denota un cambio apreciable en su forma o sección transversal. La porción de la pieza de trabajo que sufre deformación permanente, es mucho mayor en comparación con la porción que sufre deformación elástica, por consiguiente, la recuperación elástica es despreciable.

En los procesos de conformado de láminas metálicas, la lámina se deforma plásticamente sin que haya un cambio significativo en el espesor y sus características superficiales. Usualmente, la deformación provoca cambios importantes en la forma, no así en la sección transversal de la misma. Cuando la deformación se realiza en frío, la magnitud de la deformación plástica y la deformación elástica son equiparables, por lo cual, la magnitud de la recuperación elástica no puede ser depreciada.

1.2 Parámetros de los procesos de conformado.

Los procesos de conformado comprenden todas las variables en relación a la pieza de trabajo (geometría y material), las herramientas (geometría y material), las condiciones en la intercara del material y la herramienta, la mecánica de la deformación plástica, el equipo usado y las características del producto terminado.

La interacción entre las variables más importantes durante el proceso de formado se muestran en la Figura 1. 1.

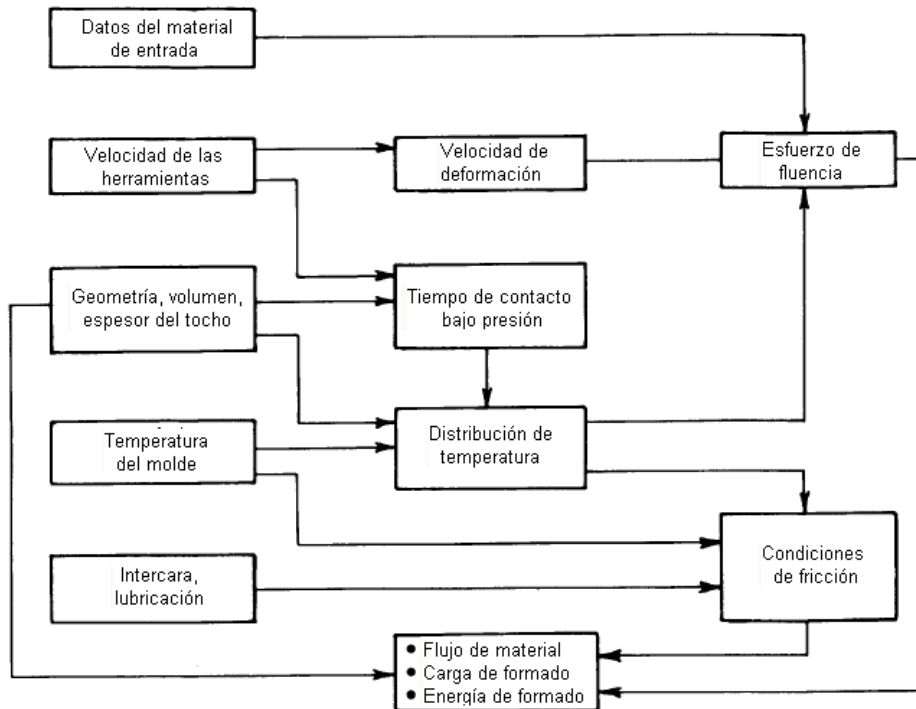


Figura 1. 1 Interacción entre la mayoría de las variables de un proceso de formado metálico (Kobayashi, 1989).

Se puede observar que para un material y una geometría, la velocidad de la herramienta influye en la rapidez de deformación y el esfuerzo de fluencia. La rapidez de deformación, la geometría de la pieza y la temperatura del molde influyen en la distribución de temperatura de la pieza formada. Finalmente, el esfuerzo de fluencia, la fricción y la geometría de la pieza determinan el flujo del metal, la carga y la energía de formado (Kobayashi, 1989).

1.2.1 Esfuerzo de fluencia.

El esfuerzo de fluencia o esfuerzo efectivo $\bar{\sigma}$ es importante porque de él dependen en gran medida, la fuerza y los esfuerzos de formado.

El esfuerzo de fluencia puede estar influenciado por factores que no están relacionados con el proceso de deformación, por ejemplo, composición química, estructura metalúrgica, fases, tamaño de grano, segregación y principalmente su historia de deformación. Por otro lado, los factores que se encuentran explícitamente relacionados al proceso y que afectan el esfuerzo de fluencia son la temperatura, el grado de deformación y la rapidez de deformación. Por lo tanto, el esfuerzo efectivo puede ser expresado como función de la temperatura T , la deformación efectiva $\bar{\epsilon}$, la rapidez de deformación efectiva $\dot{\bar{\epsilon}}$, y la microestructura S .

$$\bar{\sigma} = f(T, \bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, S)$$

En operaciones a temperatura ambiente, el efecto debido a la rapidez de deformación es poco relevante, puede decirse que $\bar{\sigma}$ depende sólo de la cantidad de la deformación y del material que se esté deformando. La curva de esfuerzo de fluencia y cantidad de deformación muestra la conducta de endurecimiento por deformación de un material. Esta curva puede aproximarse (para deformación en frío) por la siguiente ecuación (Hollom, 1944).

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{100\%} \cdot \varepsilon^n = c \cdot \varepsilon^n$$

c - equivale a $\bar{\sigma}_{100\%}$ cuando $\varepsilon = 100\%$.

n - coeficiente de endurecimiento por deformación.

En procesos realizados sobre la temperatura de recristalización, la influencia de la deformación sobre el esfuerzo de fluencia es insignificante. El esfuerzo de fluencia depende principalmente de la rapidez de deformación, la temperatura del proceso y el material que está siendo deformado.

La relación entre la resistencia a la fluencia $\bar{\sigma}_1$ a una rapidez de deformación $\dot{\varepsilon}_1$ y $\bar{\sigma}_2$ a una rapidez $\dot{\varepsilon}_2$ está descrita por:

$$\left(\frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_1}\right) = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}\right)^m$$

En donde m representa la sensibilidad del esfuerzo de fluencia a la velocidad de deformación.

La sensibilidad de un material a la rapidez de deformación es dependiente de la temperatura. Mientras que para la mayoría de los metales a temperatura ambiente varía entre 0 y 0.03, para trabajo en caliente alcanza valores entre 0.1 y 0.2, lo cual explica porque es mucho más relevante su efecto en operaciones de trabajo en caliente.

El esfuerzo de fluencia debe obtenerse experimentalmente para las condiciones particulares del proceso. Los métodos más comúnmente utilizados son las pruebas de tracción, compresión y de torsión. En estas pruebas se miden las cargas y desplazamientos, a partir de esta información, se calcula el esfuerzo de fluencia en cada etapa de deformación o en incrementos para una rapidez de deformación dada por la relación entre la velocidad instantánea de la herramienta a una distancia específica de la muestra.

Para este fin, se emplean máquinas que pueden entregar un perfil de velocidad y desplazamiento de manera que se mantenga la condición de velocidad de deformación constante durante toda la prueba.

1.2.2 Temperatura.

Aproximadamente del 90 a 95% de la energía mecánica involucrada en el proceso, se transforma en calor. Una parte del calor generado permanece dentro de la zona deformada, mientras otra fluye hacia las herramientas y las zonas no deformadas de la pieza de trabajo. Las temperaturas que se desarrollan durante el proceso tienen influencia en las condiciones de lubricación, la vida de las herramientas, las propiedades del producto final y además determinan la rapidez máxima de deformación a la que puede efectuarse el proceso sin excesivo daño en las herramientas.

La temperatura de la pieza de trabajo depende de 4 factores: temperatura inicial de los moldes, herramientas y material de trabajo, el calor generado debido a la deformación provocada, la generación de calor debido a los efectos de la fricción en la intercara del material y el molde y la transferencia de calor entre los moldes, la pieza de trabajo y los alrededores.

La resistencia del material y el esfuerzo de fluencia decrecen con el aumento de temperatura, sin embargo, no siempre lo hacen de manera continua, esto significa que existirá un rango de temperatura dentro del cual el esfuerzo de fluencia se verá ligeramente afectado por el aumento de temperatura. La dependencia del esfuerzo de fluencia a la temperatura está relacionada con su dependencia a la velocidad de deformación. Como se observa en la Figura 1. 2, al disminuir la velocidad de deformación se obtiene el mismo efecto que con un aumento de temperatura.

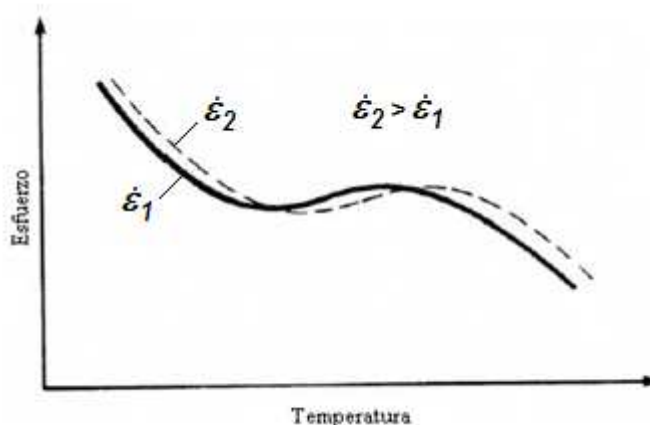


Figura 1. 2 Gráfica esquemática que muestra la dependencia del esfuerzo de fluencia con la temperatura para algunas aleaciones (Hosford, 2007).

Los procesos de formado metálico en función de la temperatura se pueden clasificar en dos grupos:

- Trabajo en caliente. Se define como operaciones de deformación bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación tal que los procesos de recuperación tienen lugar simultáneamente con la deformación.
- Trabajo en frío. Son operaciones que se realizan en condiciones tales que los procesos de recuperación no son eficaces.
- Trabajo en tibio. Se realiza por debajo de la temperatura de recristalización y por encima de la temperatura ambiente.

Trabajo en caliente.

Si la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso es mayor que la temperatura de recristalización del metal, usualmente $0.6T_m$ (en donde T_m es la temperatura de fusión del material empleado), el proceso es llamado “trabajo en caliente”. A estas temperaturas los efectos del endurecimiento por deformación y la estructura deformada del grano son rápidamente eliminados por la formación de nuevos granos debido a la recristalización. Esto permite obtener grandes deformaciones debido a que el esfuerzo de fluencia disminuye al aumentar la temperatura, la energía necesaria para producir la deformación es generalmente mucho menor que en el trabajo en frío. La rápida difusión de las temperaturas durante el trabajo en caliente, permite además disminuir las heterogeneidades en la estructura.

La mayoría de las operaciones en caliente se llevan a cabo en varios pasos. Entre cada paso, la temperatura se mantiene por encima de la temperatura mínima de trabajo para aprovechar las ventajas económicas que representa el bajo esfuerzo de fluencia. Para obtener un tamaño de grano fino en el producto, la temperatura de trabajo en el último paso se disminuye hasta el punto en que el crecimiento de grano durante el enfriamiento sea despreciable. También para favorecer la recristalización de granos finos en la estructura, la cantidad de deformación debe ser grande en el último paso.

Sin embargo, el trabajo en caliente presenta algunos inconvenientes. A elevadas temperaturas la superficie de los materiales reacciona con la atmósfera circundante. Esto representa un grave problema debido a la presencia de oxígeno que provoca que una gran cantidad de material pueda perderse; por lo tanto el trabajo debe efectuarse en una atmósfera de gas inerte o debe existir una barrera que impida el contacto con el aire. Aunado a esto, la estructura y propiedades de los materiales trabajados en caliente no son uniformes a lo largo de su sección transversal.

El límite inferior de temperatura para el trabajo en caliente, es la temperatura a la cual la velocidad de recristalización es lo suficientemente rápida para eliminar el endurecimiento por deformación. El límite superior es la temperatura a la cual el material se funde o se oxida excesivamente.

Trabajo en frío.

El trabajo en frío aumenta la resistencia y disminuye la ductilidad del material. Cuando se llevan a cabo operaciones de formado en frío, las deformaciones provocadas pueden provocar fracturas en el material. Para prevenir esto, las operaciones se realizan en varios pasos con operaciones de recocido intermedias para restaurar la ductilidad en el material.

Estas operaciones intermedias elevan los costos de fabricación, en especial cuando se trata de materiales reactivos, cuyo recocido debe efectuarse en condiciones de vacío o inmerso en alguna atmosfera inerte. Por medio de ajustes realizados a estos ciclos de trabajo en frío y recocido pueden obtenerse grados de endurecimiento por deformación deseables en el producto.

Trabajo en tibio.

Es el trabajo realizado por encima de la temperatura ambiente pero por debajo de la temperatura de recristalización. Estas operaciones tratan de combinar las ventajas de las operaciones llevadas a cabo en frío o en caliente.

Con este método, las cargas de forja permanecen entre la mitad y una tercera parte del valor correspondiente en forja en frío. La forjabilidad del material aumenta permitiendo reducir el número de pasos de fabricación y ahorro de energía en relación con los procesos en frío. Y en comparación con los procesos en caliente, permite un mayor control dimensional, mejora la calidad de las superficies y disminuye los costos por la energía empleada (Dieter, 1988)

1.2.3 Condiciones de fricción y lubricación.

Las condiciones de fricción en el proceso pueden aumentar o disminuir la carga requerida para obtener una deformación determinada, además tiene una influencia muy importante en la fluencia del material y podrían ocasionar graves heterogeneidades en el producto terminado, así como grietas superficiales y defectos internos. Como resultado de estos efectos, se tiene especial importancia en obtener unas condiciones de fricción óptimas para llevar a cabo cualquier proceso.

Una buena lubricación puede aumentar la vida útil de la herramienta y provocar un movimiento más uniforme durante la deformación, en cambio una mala lubricación puede provocar grandes fluctuaciones de la fuerza. Por mucho, la consecuencia más grave de una mala lubricación es la adherencia del metal de la pieza a la herramienta.

Una forma de cuantificar las condiciones de fricción durante el proceso es considerar el coeficiente de fricción constante en la intercara del molde y la pieza de trabajo. Este concepto se conoce normalmente como modelo de Coulomb (fricción de deslizamiento):

$$f_s = \mu p,$$

Donde p representa el esfuerzo normal a compresión, f_s el esfuerzo cortante de fricción y μ el coeficiente de fricción de Coulomb.

En la realidad el coeficiente de Coulomb puede variar durante el proceso, ya que la lubricación se deteriora debido al crecimiento de la superficie y la delgadez de la película. Otro método empleado es el llamado *fricción por adherencia*, particularmente empleado en procesos que involucran grandes deformaciones.

$$f_s = mk,$$

Donde k representa la resistencia en cortante del material y m es el factor de fricción.

Aunque los límites de cada método de lubricación no se encuentran claros, se suele hacer la siguiente división entre ellos:

- Lubricación hidrodinámica. Esta condición se presenta cuando existe una capa de lubricante relativamente gruesa entre el molde y la pieza de trabajo. Estas películas se mantienen debido a su propia viscosidad.
- Lubricantes de capa límite y de presión extrema. Son lubricantes muy eficaces en forma de películas muy delgadas. Entre los más importantes se encuentran los ácidos grasos y las

parafinas, líquidos y sólidos, su eficacia radica en que reaccionan con una superficie metálica formando un jabón metálico sólido.

- Lubricantes sólidos. Son aquellos materiales cuya resistencia a esfuerzos cortantes es más baja que la del material. Ejemplo de estos materiales son el plomo, los polímeros y las ceras. El grafito y el bisulfuro de Molibdeno se emplean como lubricantes a elevadas temperaturas.
- Lubricación con sólidos fundibles. Este tipo de lubricación utiliza una delgada película de líquido que se genera mediante la fusión de un sólido en contacto con una pieza caliente. Para este fin se han empleado materiales como vidrio, incluso hielo y muchos compuestos orgánicos.

1.3 Forja.

La forja es básicamente el control de la deformación bajo presión. La pieza de trabajo es deformada plásticamente entre dos moldes o herramientas hasta obtener la geometría final deseada. Las herramientas aplican la presión a la pieza de trabajo, y de éstas depende la geometría que se obtendrá. La pieza de trabajo es obtenida en un periodo corto de tiempo, por lo general con muy poca pérdida de material. Las partes que son producidas mediante operaciones de forja, presentan mejores propiedades mecánicas que aquellas producidas mediante fundición o maquinado (Shirgaokar, 2004).

Las operaciones de forja son procesos no estacionarios, producto de una presión indirecta bajo condiciones de esfuerzo y deformación tridimensionales. Debido a las restricciones del molde y a la fricción, la deformación resulta no homogénea.

Usualmente, los procesos de forja se combinan con tratamientos térmicos dentro de un rango de temperaturas para reducir los esfuerzos e incrementar la formabilidad. Algunos metales y aleaciones, deben forjarse dentro de un rango muy corto de temperatura para prevenir cambios de fase no deseados.

1.4 Clasificación de los procesos de forja.

Existe una gran variedad de procesos de forja entre los cuales se pueden encontrar:

- Impresión en molde cerrado con rebaba. El tocho es formado entre dos dados, los cuales restringen el flujo del material dentro de los mismos. El exceso de material es restringido hacia una cavidad que aparece al final de la forja en la línea de partición, este material sobrante se conoce como rebaba.
- Impresión en molde cerrado sin rebaba. Consiste en colocar un tocho de volumen controlado en la cavidad de un molde mientras un punzón lo deforma hasta la geometría requerida sin pérdida de material.
- Electro-recalcado. El proceso consiste en presionar la pieza de trabajo mientras es calentada eléctricamente mediante unos electrodos.
- Acuñaado. Es el proceso mediante el cual se forman grabados o relieves en una parte metálica.
- Punzonado. Consiste en presionar un punzón sobre el material para provocar indentación o impresión en una sección de la pieza.
- Forja isotérmica. Es el proceso de forja en el cual el molde y el material de trabajo se encuentran a la misma temperatura.
- Forja libre. En este proceso de forja el producto es deformado por dos herramientas de contorno simple.
- Forja orbital. Una porción de la pieza de trabajo es deformada de manera continua entre dos moldes con movimiento rotacional y axial.
- Forja radial. Se emplea movimiento radial en los moldes para provocar cambios en la sección transversal de piezas sólidas o tubulares.
- Recalcado. Es aquel proceso en el cual el área transversal de una porción o de la pieza completa es incrementada entre dos placas planas.
- Forjado de polvos metálicos. Es un proceso en molde cerrado de compactación de polvos metálicos.

Los procesos de forja pueden clasificarse de muchas maneras considerando diferentes criterios, la clasificación más general que puede hacerse considerando el flujo del material es la siguiente:

- Forja en molde abierto.
- Forja en molde cerrado.

El proceso de forja en molde abierto, se realiza entre dos moldes de forma muy simple, se caracteriza por permitir el flujo libre de material. La pieza de trabajo suele ser más grande que la herramienta, por lo que la deformación se encuentra confinada a una pequeña porción de la pieza. El modo principal de deformación es compresión, con flujo de material en las direcciones laterales.

Este proceso es usualmente utilizado para la producción de partes grandes o cuando el número de partes producidas es pequeño. Por lo regular, la forja en molde abierto se emplea para obtener la preforma de la pieza de trabajo que se usará en forja en molde cerrado.

La forja en molde cerrado se lleva a cabo entre dos mitades del molde que lleva las impresiones de la figura que se desea producir; en este caso el flujo del material se encuentra restringido por las paredes del molde. La pieza de trabajo se deforma con elevadas presiones dentro de una cavidad cerrada, de esta manera pueden producirse piezas con tolerancias dimensionales cerradas.

El material de entrada suele tener alguna forma inicial que permita asegurar el flujo correcto del material, así mismo es muy importante colocar suficiente material para asegurar que las cavidades del molde sean llenadas por completo. Sin embargo, es difícil colocar la cantidad correcta de material en los lugares indicados. Por este motivo, algunos moldes se diseñan con cavidades por donde sale el exceso de material o rebaba. El espesor de rebaba regula el escape del material, incrementando la resistencia al flujo y elevando los esfuerzos para el llenado de todas las cavidades.

Los procesos de forja ofrecen muchas ventajas para la industria del conformado de metales, tiempo de producción, tolerancias dimensionales, estructura de grano, menor gasto de material entre otras. Sin embargo, aquellas partes que requieran ser formadas en geometrías muy complejas, que soliciten gran cantidad de deformación y tolerancias dimensionales muy cerradas necesitarán de una carga de formado muy elevada, realizarse en múltiples operaciones o en su defecto conformarse a elevadas temperaturas. Todos estos factores incrementan el costo del equipo necesario para la producción, y en un ambiente en donde la demanda del producto es variable, no es conveniente optar por costosos sistemas de manufactura no flexibles. Por esta razón algunos investigadores se han orientado a la implementación de procesos incrementales.

En particular la forja orbital permite reducir la carga de forja al deformar sólo una parte de la pieza en forma continua, alargando la vida de los moldes y permitiendo obtener deformaciones mayores aún a temperatura ambiente. A la fecha, de un 25 a un 30% de todas las partes que se conforman mediante forja convencional pueden obtenerse mediante forja orbital (ASM Metals Handbook Volume 14, 1996). No obstante para poder explotar todas las ventajas que pueden ofrecer los procesos de forja orbital es necesario conocer la influencia de todos los parámetros que involucra.

1.5 Forjado Orbital.

El forjado orbital es un proceso que se lleva a cabo entre dos moldes que deforman sólo una pequeña porción de la pieza de trabajo a la vez de manera continua. Se basa en el principio de presión uniaxial continua, con movimiento rotacional de los moldes.

La Figura 1. 3 muestra el arreglo del sistema para un proceso de forjado orbital.

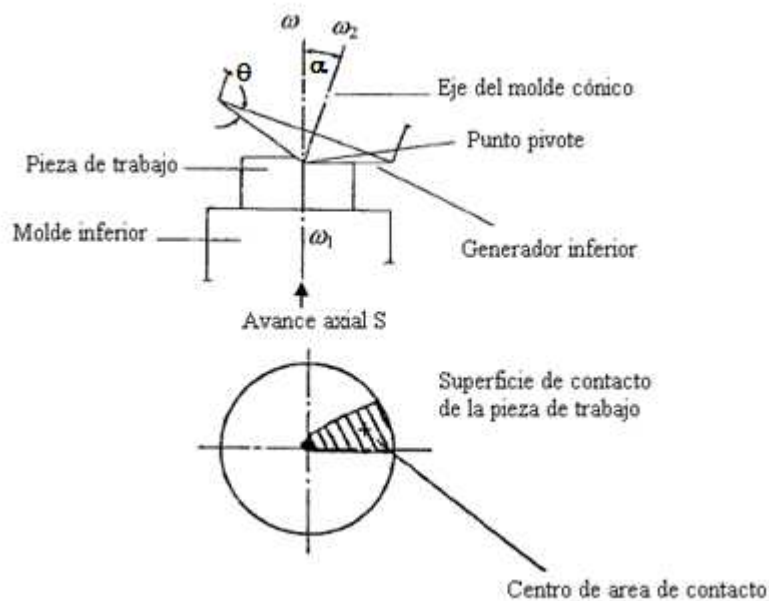


Figura 1. 3 Relaciones entre la herramienta inclinada, la pieza de trabajo y la herramienta opuesta (Standring P. M., 2001)

En donde ω_1 y ω_2 son las velocidades angulares alrededor de sus respectivos ejes; θ = ángulo del molde cónico; y α = ángulo de inclinación del eje del molde.

Como se aprecia en la Figura 1. 3 las máquinas para forja rotatoria constan de una herramienta que comparte el eje con la pieza de trabajo, y una herramienta opuesta con su eje inclinado. El punto de intersección entre los ejes es llamado "punto pivote" y es de particular importancia para la máquina y el diseño de la herramienta. La herramienta con el eje inclinado es frecuentemente un cono convexo pero puede ser cóncavo e incluir superficies radiales y/o circunferencias. Por lo regular, el vértice de la herramienta cónica se coloca coincidente con el "punto pivote". Para provocar la deformación, un molde se mueve hacia el otro a lo largo del eje de la pieza de trabajo. Como la herramienta superior presenta rotación relativa con respecto al molde inferior, el área de contacto de la herramienta con la pieza de trabajo se extiende progresivamente hasta obtener la deformación deseada.

El ángulo α influye de manera importante en la fuerza que se debe aplicar a la pieza de trabajo. Conforme aumenta el valor de α , el área de presión es menor, como resultado la fuerza requerida para provocar la deformación en la pieza es menor en comparación con un área más grande.

Con el fin de ampliar la zona de deformación a través de la sección transversal de la pieza de trabajo, puede hacerse rotar la herramienta cónica alrededor de su propio eje y por consiguiente la pieza de trabajo debe hacer lo mismo. Bajo éstas condiciones, para asegurar condiciones de "rodamiento puro", la velocidad de la rotación angular requerida está dada por: $\omega_1 r_2 = \omega_2 r_1$; en donde ω_1 es la velocidad angular del molde no inclinado (con la pieza de trabajo), ω_2 es la velocidad angular del molde inclinado con respecto de su propio eje, r_1 y r_2 son puntos radiales coincidentes a lo largo de la línea del generador inferior y la intercara con la pieza de trabajo. Debido a que las relaciones entre r_1 y r_2 cambian de una línea radial a otra, habrá deslizamiento tangencial.

Otra manera de extender la deformación es hacer rotar la herramienta cónica sobre la zona de contacto, alrededor de la pieza de trabajo. Este tipo de procedimiento no requiere la rotación de la pieza de trabajo, es decir $\omega_1 = 0$, pero cinemáticamente sería lo mismo que hacer girar la pieza de trabajo.

El movimiento combinado que presentan los moldes durante la deformación da lugar al parámetro denominado avance por revolución o velocidad de avance (S), el cual está definido mediante la combinación de la velocidad axial v y la velocidad de precesión ω como sigue:

$$S \left[\frac{mm}{rev} \right] = \frac{v \left[\frac{mm}{min} \right]}{\omega \left[rpm \right]}$$

En donde:

S - la velocidad de avance;

v - la velocidad axial;

ω - la velocidad de precesión;

El movimiento de rotación es la base del proceso de forjado orbital, sin embargo, este mismo movimiento provoca que la herramienta haga contacto intermitente con la pieza de trabajo; al momento que el contacto se pierde, la estabilidad de la pieza debe mantenerse por alguna fuente externa. La cavidad del molde debe proporcionarle dicha estabilidad a la pieza, para este efecto es necesario asegurar unas condiciones de fricción suficientemente elevadas en la cavidad del molde para reducir los efectos de la inestabilidad causada por las cargas desbalanceadas del sistema.

En gran parte, las características del proceso dependen de la geometría de las herramientas empleadas, así como del movimiento que se está ejecutando al inicio y hasta el final del proceso. En la Figura 1. 4 se observan algunas de las diferentes geometrías de las herramientas para los distintos procesos de forjado orbital. Las características del producto estarán influenciadas por el tipo de proceso que se esté llevando a cabo. El flujo del material es diferente para cada proceso, no obstante presentan características similares al ser procesos de deformación incremental.

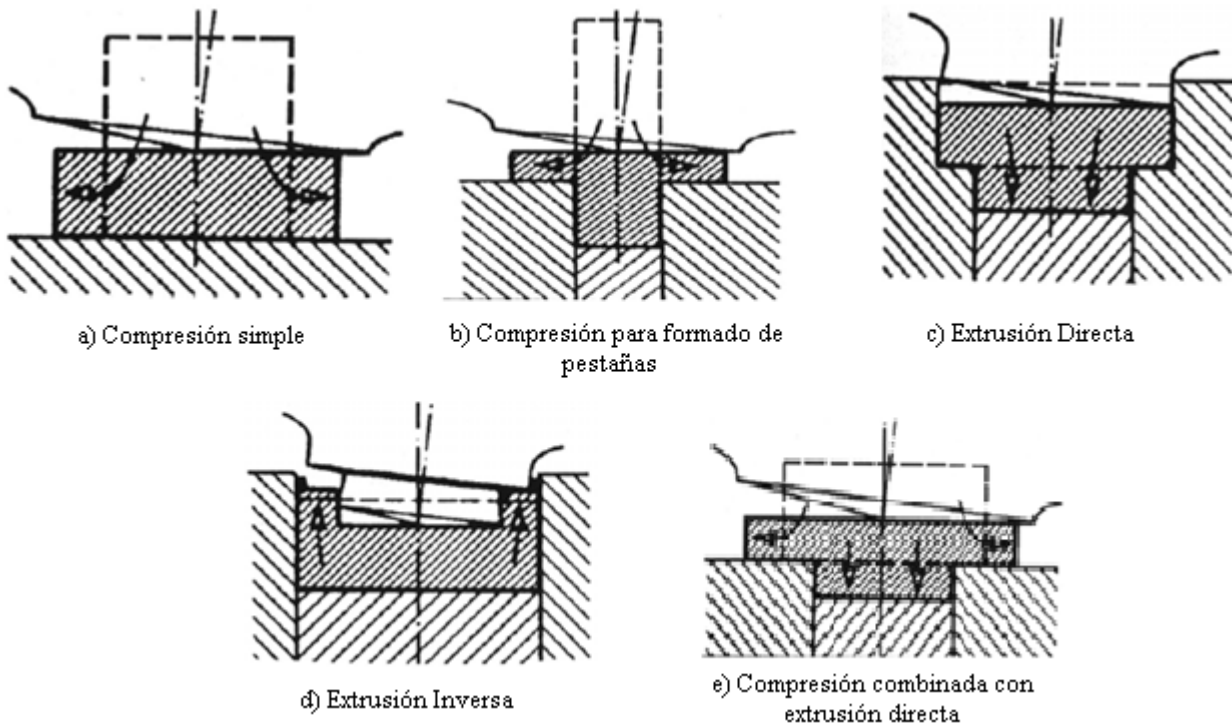


Figura 1. 4 Tipos de procedimientos de Forjado Orbital (Horvath Radu et al, 2004)

En ciertas circunstancias, la herramienta superior se diseña con un hemisferio en la parte inferior del cono de la misma, esta forma otorga estabilidad a la pieza de trabajo, debido a que las fuerzas laterales generadas durante el proceso son contrarrestadas por la geometría de la pieza deformada (Standing P. M., 2001).

1.6 Ventajas y desventajas.

Las principales ventajas que presenta el proceso de forjado orbital son:

- La fuerza axial requerida para el proceso suele ser del 20 al 30% menor que la carga requerida para un proceso de forjado convencional.
- Como la carga requerida se ve enormemente disminuida, el equipo necesario es de menor capacidad, la deformación en los moldes e incluso la fuerza de fricción con la pieza de trabajo es menor.
- Puede utilizarse para formar partes complejas con un elevado nivel de precisión, y con una deformación más uniforme en toda la pieza.
- El proceso puede llevarse a cabo en un solo paso, incluso aquellas piezas que requerirían varios pasos de formado e incluso un acabado final en procesos de forja convencional.
- Los costos de las herramientas empleadas en forjado orbital son menores, ya que las cargas requeridas no son tan elevadas como en forja convencional, y es posible manufacturarlas en materiales más fáciles de trabajar disminuyendo el costo por fabricación.
- Complicaciones como ruido y vibraciones son casi inexistentes.
- Las menores cargas de forjado permiten el formado de metales en frío, que de manera convencional tendrían que conformarse a mayores temperaturas, disminuyendo el tiempo de vida de las herramientas. Además el formado en frío tiene un efecto de resistencia en las propiedades mecánicas debido a la deformación que adquiere la estructura del grano.

Las principales desventajas que presenta el proceso son:

- La necesidad de un método para determinar si una pieza puede ser producida por este proceso.
- Es requerida una investigación más profunda de los parámetros que involucra el proceso, antes de que pueda convertirse en una práctica potencial
- El mayor problema radica en el diseño de las máquinas, debido a las elevadas fuerzas laterales ocasionadas por el movimiento de las herramientas. Dichas fuerzas deben estar apropiadamente soportadas por el marco, de manera que no influya en la calidad final de la pieza.

1.7 Equipo para Forjado Orbital.

Las máquinas para Forjado Orbital pueden clasificarse de acuerdo al movimiento que pueden realizar las herramientas. Para este fin se utilizan los tres ángulos de Euler descritos en mecánica clásica los cuales se ilustran junto a la herramienta de trabajo en la Figura 1. 5. Dichos ángulos son los siguientes:

- Ángulo de Rotación Propia (spin). Es el eje de la herramienta, el cual se desplaza junto con ella en todo momento.
- Ángulo de Precesión. Es el ángulo formado en el plano de la pieza de trabajo.
- Ángulo de Nutación. Es el ángulo formado por el eje de la herramienta y el plano de la pieza de trabajo.

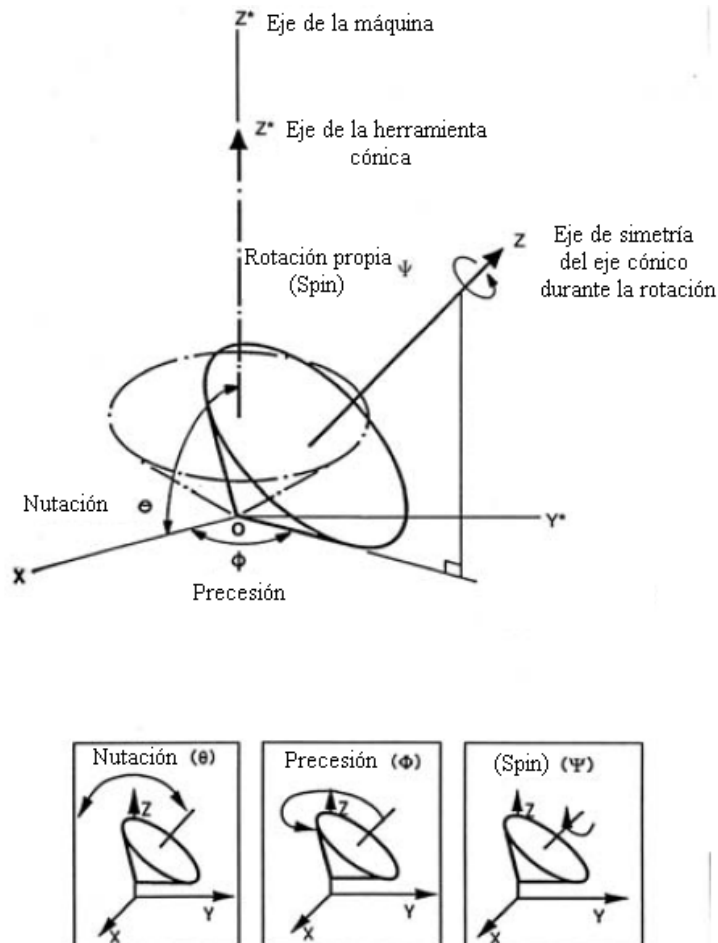


Figura 1. 5 Ángulos de rotación de Euler (Horvath Radu et al, 2004)

La herramienta superior puede o no desplazarse sobre cualquiera de estos ángulos, su movimiento alrededor de cualquiera de estos ángulos o la combinación de movimientos da lugar a la clasificación completa de la familia de las máquinas para forjado orbital mostrada en la Figura 1. 6.

Además de los movimientos de rotación de la herramienta, tanto el molde inferior como la herramienta superior pueden tener movimiento axial, en cada caso, alguna de las dos permanece fija mientras la otra se desplaza hacia la pieza de trabajo.

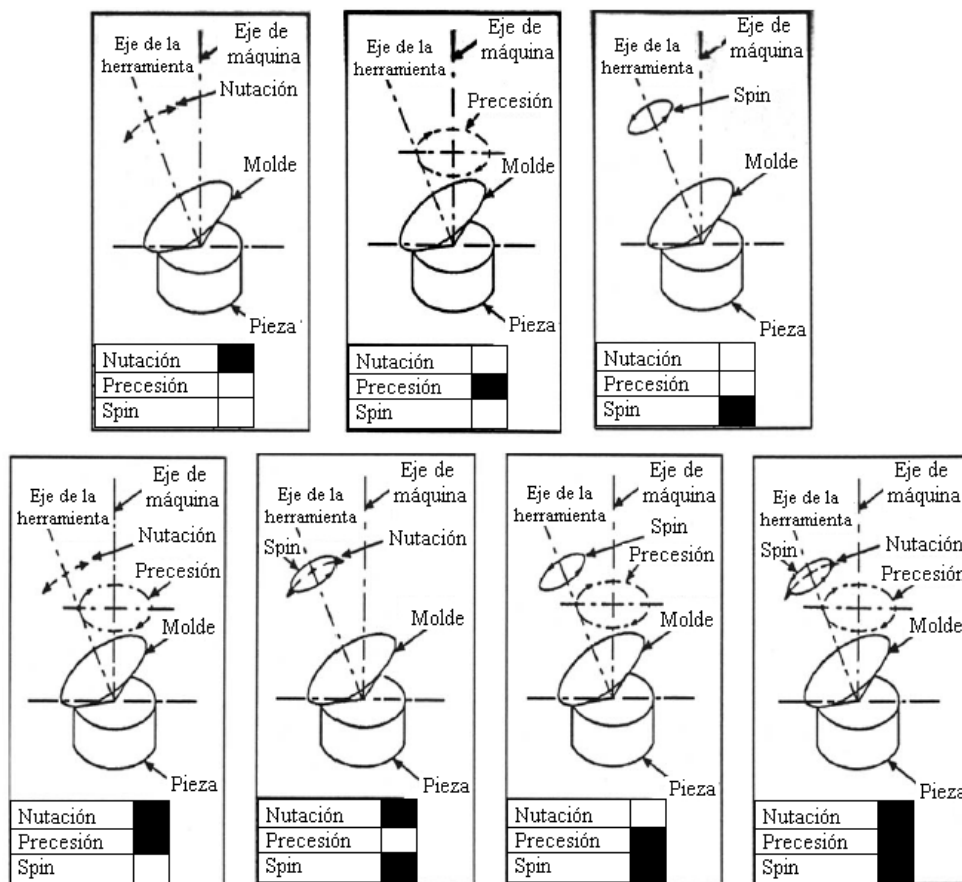


Figura 1. 6 Clasificación de prensas para Forja Orbital (Horvath Radu et al, 2004)

En las máquinas modernas el cabezal puede realizar varios movimientos. Los distintos movimientos que pueden realizar las máquinas se muestran en la Figura 1. 7. Estos movimientos se refieren a la trayectoria de un punto situado en el cabezal orbital de la máquina; la trayectoria está situada en un plano perpendicular sobre el eje de simetría de la pieza (Strandring P. M., 1982).

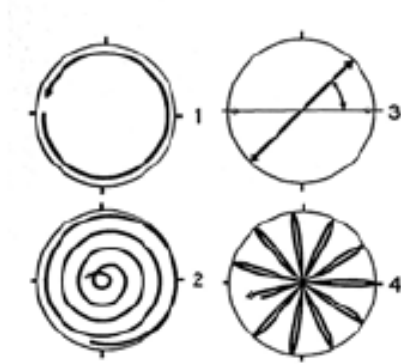


Figura 1. 7 Posibles movimientos del cabezal orbital (Horvath Radu et al, 2004)

Cada movimiento ocasiona que tanto la distribución de presiones como de deformación y el flujo de material sean diferentes, por tal motivo cada trayectoria es empleada para obtener una geometría en particular por ejemplo:

- Movimiento Orbital (Figura 1.7 1). Utilizado para partes con sección circular.
- Movimiento Espiral (Figura 1.7 2). Utilizado para deformaciones radiales y axiales.
- Movimiento Pendular (Figura 1.7 3). Utilizado para deformaciones en una dirección preferencial.
- Movimiento Planetario (Figura 1.7 4). Utilizado para partes con deformación especial de la superficie lateral.

La selección de la máquina está basada en la construcción y mantenimiento de la misma. En el entendido que aquellas máquinas que permitan un mayor movimiento de las herramientas presentarán mayores dificultades para su mantenimiento, particularmente en la pérdida de aproximación en las piezas debido a deflexión en el marco.

1.8 Características de deformación y flujo del material.

Como se ha mencionado, la principal ventaja que ofrece el proceso de forjado orbital es la reducción de la fuerza de forja debido a que es un proceso incremental que involucra una fracción del área de contacto entre el molde y la pieza de trabajo en comparación con los procesos de forja convencionales. Debido a que el área de contacto tiene gran influencia sobre la carga de forja, es necesario conocer la zona de contacto instantánea, así como las zonas que sufren deformación durante el proceso para conocer las características de flujo del material.

Es posible identificar dos zonas dentro de la zona de deformación, la zona que se encuentra en contacto con la herramienta y cuya forma está determinada exclusivamente por la geometría de la misma, mientras que la zona que no hace contacto con la herramienta es parte de la superficie espiral durante el proceso.

Cuando la herramienta cónica es plana, la superficie superior de la pieza de trabajo toma la forma de una parte de la curva conocida como *Espiral de Arquímedes*, la cual se muestra en la Figura 1.

8. Esta curva puede expresarse en términos del avance S de la siguiente manera:

$$z - \frac{S}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) = 0;$$

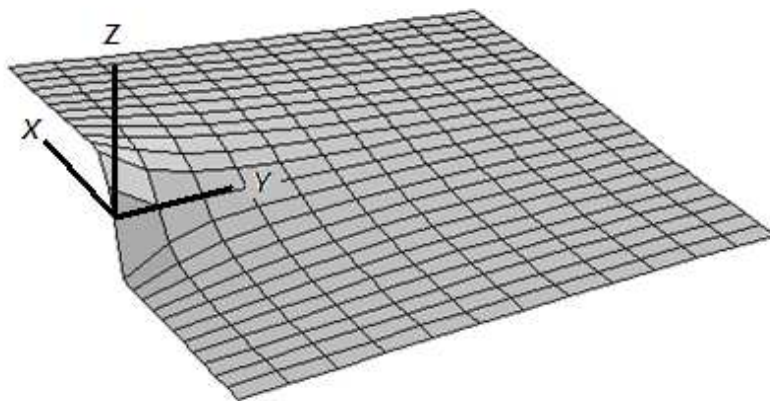


Figura 1. 8 Espiral de Arquímedes

La línea de salida de la zona de deformación es la intersección entre la curva de la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo. Su proyección sobre el plano xy se expresa como sigue: (Guangchung Wang et al, 1995)

$$\left[\frac{S}{2 * \pi} * \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \right]^2 [1 - (\tan \alpha)^2] - y^2 (\tan \alpha)^2 + 2x \left[\frac{S}{2 * \pi} * \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \right] \tan \alpha = 0$$

La zona de deformación se observa en la Figura 1. 9. Esta superficie se encuentra influenciada por el avance (S) y el ángulo de inclinación de la herramienta (α), dos de los principales parámetros del proceso.

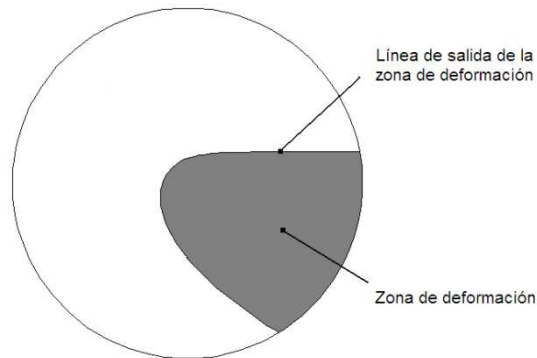


Figura 1. 9 Aproximación plana del área de contacto.

Otra característica importante durante la deformación es la torsión que sufre el material de la pieza de trabajo. Los patrones que se obtienen mediante forja convencional y forja orbital son muy diferentes entre sí, mientras que el tocho deformado mediante forja convencional muestra un patrón axisimétrico tanto en las intercaras del material con las herramientas como a lo largo de la pieza, el patrón del tocho deformado con un proceso de forja orbital muestra una configuración radial axisimétrica convencional en la intercara con el molde no inclinado, y una espiral deformada a lo largo de la pieza de trabajo (Standring P. M., 1999), tal y como se muestra en la Figura 1. 10. Este patrón en el material es debido a que la deformación en la dirección tangencial que sufre la pieza de trabajo, es mucho mayor en la superficie superior y disminuye gradualmente hacia el fondo de la pieza (Liu G. et al, 2004). Este patrón indica la existencia de un elevado momento de reacción en la intercara de la pieza de trabajo y la herramienta. Los resultados de la deformación dependerán principalmente de las herramientas empleadas, la relación de aspecto, la reducción de altura, el avance, la lubricación, etc.

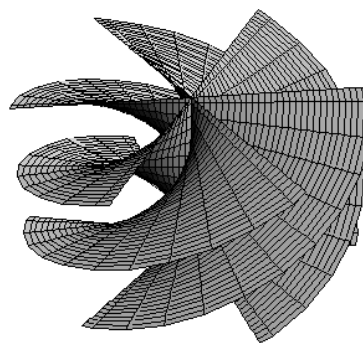


Figura 1. 10 Patrón de deformación en forja orbital.

1.8.1 Efecto de hongo.

Debido a la fuerza ejercida por el molde superior sobre la pieza de trabajo, la deformación ocurre fácilmente en la zona de contacto, sin embargo, no ocurre fácilmente en la parte inferior de la pieza. A la mitad de la zona de contacto, la deformación ocurre en su mayoría en la dirección radial, y los valores más elevados de elongación radial ocurren en la superficie superior de la pieza de trabajo (Liu G. et al, 2004). En la Figura 1. 11 se muestra una pieza cilíndrica luego de un proceso de recalcado por forja orbital. Se observa claramente que el diámetro superior es más grande que en el fondo de la pieza, la figura que se observa es similar a un hongo, por lo que este tipo de deformación no uniforme es conocido como “efecto de hongo”.

La zona con mayor deformación plástica ocurre en la cima de la pieza y se desarrolla de manera axial hacia el fondo de la misma. La zona de deformación plástica depende del área de contacto entre la herramienta superior y la pieza de trabajo. Cuando el área de contacto es pequeña, la zona de deformación plástica se ve disminuida y en consecuencia la deformación plástica no alcanza a penetrar completamente la pieza de trabajo en la dirección axial. Esta situación provoca que el fondo de la pieza de trabajo presente ninguna o muy poca deformación plástica, generando una zona muerta en la parte inferior en donde el flujo de material es prácticamente nulo; resultando en un muy notorio “efecto de hongo”. Al aumentar el área de contacto, la zona de deformación plástica penetra más fácilmente en la pieza de trabajo resultando más homogénea en la dirección axial y provocando que el “efecto de hongo” sea mucho menos notorio.

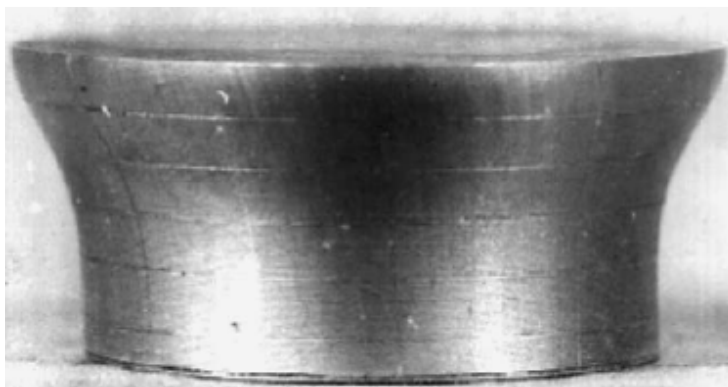


Figura 1. 11 Pieza en forma de hongo obtenida en forja orbital (Liu G. et al, 2004).

Para procesos de forjado orbital en frío, la deformación no homogénea en la pieza de trabajo incrementa gradualmente conforme se incrementa el ángulo de inclinación de la herramienta superior, este efecto es mucho más evidente para velocidades de avance pequeñas. Esto indica que el grado de deformación no homogénea puede controlarse efectivamente mediante el ángulo de inclinación de la herramienta superior para pequeñas velocidades de avance, sin embargo el control se hace menos efectivo con velocidades de avance más elevadas (Hua Lin, Han Xinghui, 2008).

Capítulo 2 Modelos del proceso de forjado orbital.

2.1 Modelos para el análisis de forjado orbital.

El propósito del análisis del proceso de formado metálico es investigar la mecánica de la deformación plástica (Kobayashi, 1989), teniendo como objetivos principales:

- Establecer las relaciones cinemáticas (forma, velocidades, deformaciones y velocidades de deformación) entre el producto y la pieza no deformada, prediciendo el flujo del metal durante la operación. Además de predecir las temperaturas y la transferencia de calor ya que son los parámetros que mayor influencia tienen en las condiciones de flujo del material.
- Establecer los límites de conformabilidad para determinar si es posible obtener el producto sin defectos superficiales o internos.
- Predecir los esfuerzos, fuerzas y energía requerida para llevar a cabo la operación, a fin de que el herramental y el equipo sean diseñados o seleccionados de acuerdo a las capacidades de fuerza y energía para realizar el proceso.

Los procesos de forjado orbital se han utilizado ampliamente aunque algunos problemas con esta tecnología aún no han sido resueltos. Los problemas técnicos relacionados al proceso han tenido que encontrar solución por medio del método de ensayo y error debido a las cargas excéntricas y al complicado contorno del área de deformación (Guangchung Wang et al, 1999). Sin embargo, la optimización del proceso debe realizarse mediante un conocimiento detallado de los mecanismos de deformación, así como de la influencia de los principales parámetros del proceso.

A la fecha muchos de los trabajos de investigación realizados sobre forja orbital han sido llevados a cabo en países como Gran Bretaña, Japón, China, Polonia y la extinta Unión Soviética. Esos trabajos se enfocan principalmente en el cálculo y verificación de los parámetros de energía y distribución de presión en el área de contacto (Guangchung Wang et al, 1997).

2.2 Modelos Analíticos.

Los modelos analíticos se basan en ecuaciones y principios fundamentales que rigen la mecánica de deformación plástica para cualquier material. Frecuentemente resulta muy complicado encontrar una solución completa a todas las ecuaciones, además las soluciones exactas deben ser consistentes con la geometría y satisfacer las condiciones de equilibrio en cualquier parte del cuerpo deformado. No obstante, existen métodos que pueden entregar una solución aproximada dependiendo de las simplificaciones y condiciones que se tomen en cuenta al momento del análisis.

2.2.1 Método del Límite Superior.

Este método predice esfuerzos o fuerzas mayores a las condiciones de equilibrio. Se basa principalmente en satisfacer el criterio de fluencia y ser consistente con la geometría sin prestar atención al equilibrio en las fuerzas. En este método se asume un campo de flujo interno el cual es responsable del cambio en la forma, se calcula la velocidad a la cual la energía es consumida por este flujo y se calcula la fuerza igualando el trabajo externo con la velocidad de consumo de la energía interna (Hosford William, 2007).

Empleando dicho método, se han realizado algunos intentos para analizar este proceso. En 1983 M. Hayama propuso un modelo en el cual no considera la componente tangencial de la velocidad en su campo de velocidades. En 1988 M. Zhang elaboró un método considerando al proceso como una superposición de la compresión y rolado de una placa plana, sin embargo su método excluía la componente radial de la velocidad. (Guangchun Wang et al, 2005). En 1997, Choi S. et al. nuevamente proponen un campo de velocidades admisible representando todos los componentes de la velocidad dentro de la zona de deformación en coordenadas cilíndricas.

Los resultados de estos modelos son comparados en la Figura 2. 1; como se observa, el modelo de Choi, tiene una mejor aproximación en comparación a los modelos de Hayama y Zhang incluso para mayores reducciones de altura.

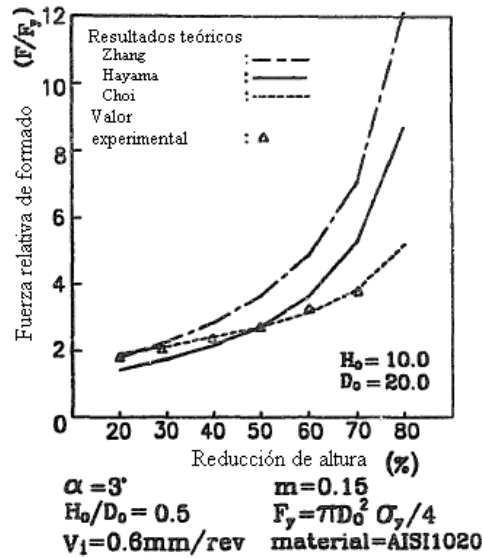


Figura 2. 1 Comparación de la carga relativa de formado entre algunos modelos analíticos (Choi S. et al., 1997).

En su modelo, Choi identifica tres zonas de deformación, sin embargo para su análisis no considera aquellas zonas que presentan deformación elástica, de esta forma su análisis se reduce al consumo de energía dentro de la zona de deformación plástica. Como se ha mencionado, la carga relativa de forja tiene una mejor aproximación en comparación con otros modelos, además su modelo muestra el efecto del ángulo de inclinación y el avance sobre la carga de forja, y revela un flujo de material preferentemente en la dirección radial.

2.2.2 Método del Planchón.

El método del planchón se basa en establecer un equilibrio de fuerzas en un elemento diferencial de la pieza de trabajo. Se considera que los efectos de la fricción no alteran la dirección de los ejes principales y no producen distorsión interna, el material se deforma homogéneamente (Hosford, 2007).

Oh Hung-Kuk y Choi S. estudiaron el adelgazamiento de la sección central de una placa circular formada por recalcado en forja orbital y establecen un criterio para prevenir la aparición de este defecto, basados en el análisis del proceso por el método del planchón. Su modelo toma en cuenta toda la zona de deformación, las zonas en contacto con la herramienta superior las aproxima como zonas planas. No presentan resultados de su modelo, su investigación está orientada a la determinación de un criterio para prevenir la aparición del adelgazamiento en la zona central.

2.3 Modelos materiales.

Los modelos materiales son de gran importancia para optimizar la geometría del proceso, permitiendo que el material fluya libre de defectos, asegurar un completo llenado en las cavidades del molde y un gasto mínimo de material, información que por métodos analíticos no puede ser revelada debido a las limitaciones de los mismos. Estos trabajos experimentales suelen realizarse en materiales blandos (como plastilina, cera, polímeros e incluso plomo) debido a que pueden conformarse con menores cargas, la observación de los patrones de deformación resulta más fácil, el empleo de materiales de bajo costo para los moldes y la facilidad del proceso experimental. Sin embargo, las condiciones del proceso deben asimilar muy bien las condiciones del proceso real ya que de otra manera revelarán datos erróneos sobre el patrón de flujo de material.

En 1998 Canta T. et al realizaron pruebas de forjado rotatorio empleando una prensa hidráulica de 1000 kN con una fuente de forjado orbital instalada a la misma. La evolución de la fuerza, el torque y el avance fueron grabados a una computadora. Además realizaron los mismos procesos por métodos tradicionales y compararon los resultados obtenidos. Los procesos de forja utilizados en sus pruebas fueron extrusión inversa convencional y rotatoria para especímenes en plomo y recalco rotatorio y convencional para especímenes de acero. Ambos procesos son realizados a temperatura ambiente, los especímenes de plomo no son lubricados y para los especímenes de acero es empleado bisulfuro de molibdeno (MoS_2) como lubricante.

Las dimensiones de los especímenes se muestran en la Figura 2. 2. Los experimentos para recalco fueron realizados en muestras con diferente relación de aspecto (h_0/d_0). Las cargas obtenidas para los procesos convencional y rotatorio se presentan en la Figura 2. 3. Sus resultados revelan una reducción considerable de la carga de forja en el proceso rotatorio en comparación con el proceso convencional.

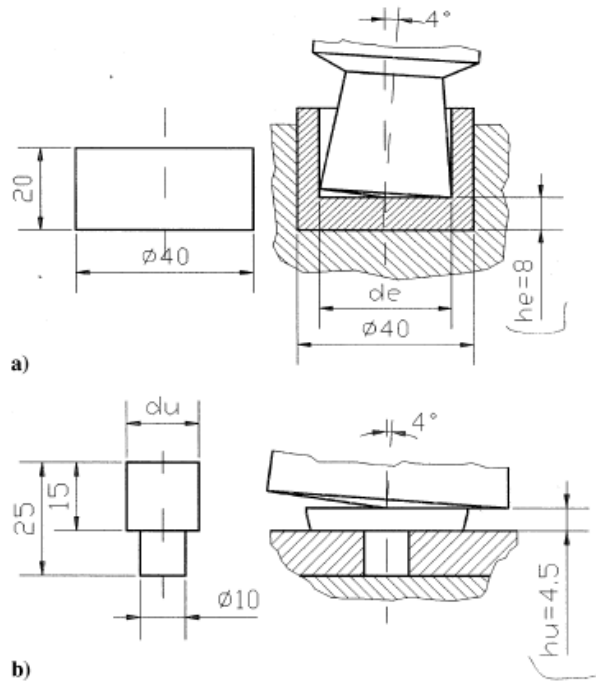


Figura 2. 2 Configuración inicial y final de la pieza de trabajo: a) extrusión inversa y b) recalado (Canta T. et al, 1998).

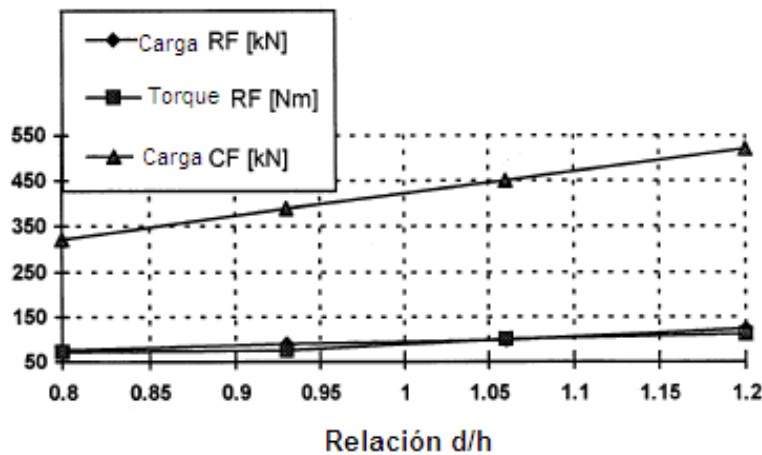


Figura 2. 3 Carga y torque axial vs. Relación d/h para forjado rotatorio y convencional (Canta T. et al, 1998).

Los experimentos de extrusión inversa se realizaron con punzones de distintos diámetros, la Figura 2. 4 muestra la carga de formado para los procesos rotatorio y convencional con las diferentes herramientas. La tendencia para el proceso, muestra una reducción de la carga de formado en el proceso rotatorio, incluso para un diámetro del punzón de 30 mm la carga de forja no presenta cambios notables en relación con el proceso convencional para el proceso planteado en sus experimentos. Sus resultados muestran que para los procesos rotatorios existe una fuerte dependencia de la distribución de energía con los parámetros principales de proceso.

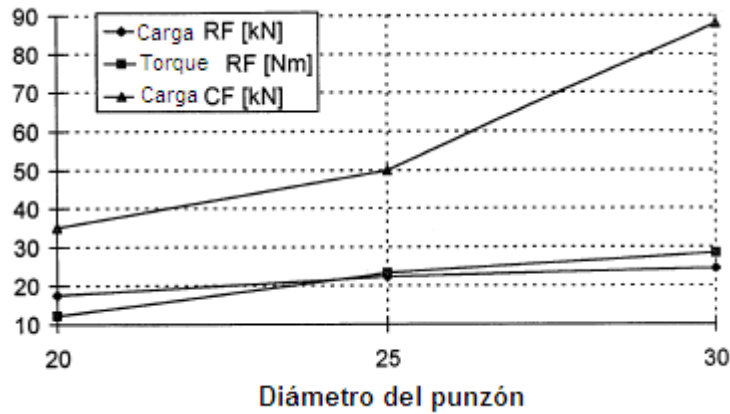


Figura 2. 4 Carga axial y torque vs. Diámetro del punzón para extrusión convencional y rotatoria (Canta T. et al, 1998).

Park J. H. et al realizaron experimentos con especímenes cilíndricos de plastilina, con diámetro inicial de 40 mm y diferentes relaciones de aspecto altura/diámetro (h_0/d_0) de 0.5, 1.0, y 1.5. Se utilizó además, talco en polvo como lubricante obteniendo un coeficiente de fricción de 0.4. Sus resultados muestran una reducción en la carga de formado para el proceso rotacional, una mayor deformación total y una distribución más homogénea de la misma, en comparación con el proceso convencional. Los especímenes mostrados en la Figura 2. 5 revelan los diferentes patrones de flujo entre procesos de recalcado convencional y rotacional. Puede observarse un menor abarillamiento en el proceso rotacional además de un efecto de torsión en el material revelando flujo de material en la dirección tangencial de la pieza.

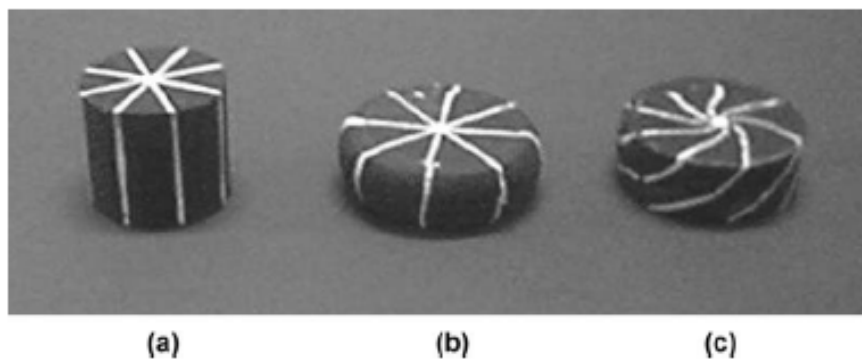


Figura 2. 5 Fotografías de especímenes en plastilina: a) Tocho inicial;
b) Recalcado convencional; c) Recalcado orbital (Park J. H. et al., 2001)

Yuan Shijian et al investigaron el flujo del material durante el formado de la cabeza de un pivote de dirección por medio de forjado orbital. La configuración del proceso orbital se muestra en la Figura 2. 6. Se experimentaron especímenes a diferentes temperaturas en una máquina de forja orbital de 1000 kN.

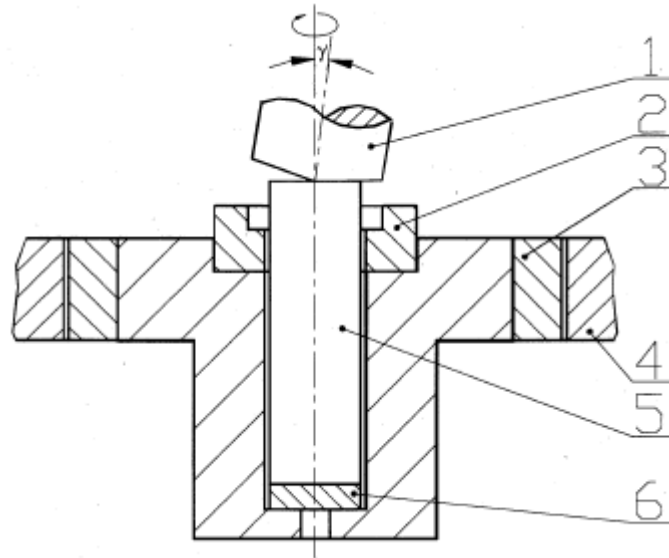


Figura 2. 6 Esquema del proceso de forja rotatoria para el formado de la cabeza del pivote. 1-generador superior, 2-molde inferior, 3-corredera, 4-guía, 5-pieza de trabajo, 6-amortiguamiento (Yuan Shijian, 1999)

Posteriormente se estudió la dureza y las dimensiones de la pieza terminada. Sus resultados mostraron que la pieza satisfacía los requerimientos de dureza y tolerancia dimensional, incluso la dureza se mejoró en cierto grado.

2.3.1 Estudio experimental foto-plástico.

El método foto-plástico tiene la ventaja de alcanzar resultados con elevada precisión y puede revelar formas de flujo complicadas y obtener información detallada sobre el esfuerzo y deformación en cualquier punto (J. W. Dally, 1995, Z. Huang y P. Fu, 2001).

El método tiene como base teórica que la deformación plástica producirá un efecto de birrefracción de la luz generando formas de bordes en la pieza deformada. Estas series de bordes en el material deformado tienen relación con su grado de deformación. De esta forma es posible obtener la distribución de esfuerzos mediante leyes de deformación-óptica.

En 2005, Guangchun Wang et al realizan estudios en forjado orbital para una pieza en forma de anillo, El material empleado es policarbonato ya que el comportamiento de sus propiedades mecánicas son similares a las de los metales sólidos, aunado a que las relaciones deformación-óptica son lineales para este material. Sus estudios se enfocaron en una primera instancia en analizar los mecanismos de deformación sobre la zona de deformación y posteriormente analizar el proceso real de formado de una pieza en forma de anillo. El estudio se realizó sobre los planos de corte axiales "**B₁-B₁**" y "**B₂-B₂**" y en el plano transversal "**A-A**" como se muestra en la Figura 2. 7.

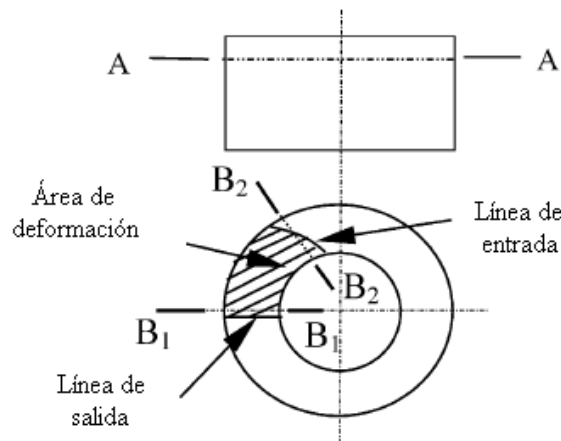


Figura 2. 7 Diagrama esquemático de los cortes (Guangchung Wang et al, 2005)

En la Figura 2. 8 se observa que el flujo en la zona de contacto es preferentemente radial y compresivo, en la línea de salida de la zona de contacto se observa que la deformación tangencial cambia de signo a lo largo de la dirección del espesor de la pared, presentándose deformación a compresión en la zona cercana a la pared interna y deformación a tensión hacia la pared exterior; en cambio, en la línea de entrada la deformación no consigue expandirse en todo el espesor de la pared de la pieza. En la muestra 3 el grado de deformación alcanzado por el proceso es mayor, sus resultados se presentan en la Figura 2. 9, se aprecia un cambio significativo en la deformación tangencial, el cambio entre deformación compresiva y a tensión sigue haciéndose presente, no obstante se presenta mucho más cercano a la pared interna. Estos resultados revelan una línea que demarca el flujo en la dirección radial con la pared interna fluyendo hacia el interior de la pieza y la pared exterior fluyendo fuera de la misma, además dicha línea parece cambiar su ubicación al aumentar el grado de deformación en la pieza de trabajo.

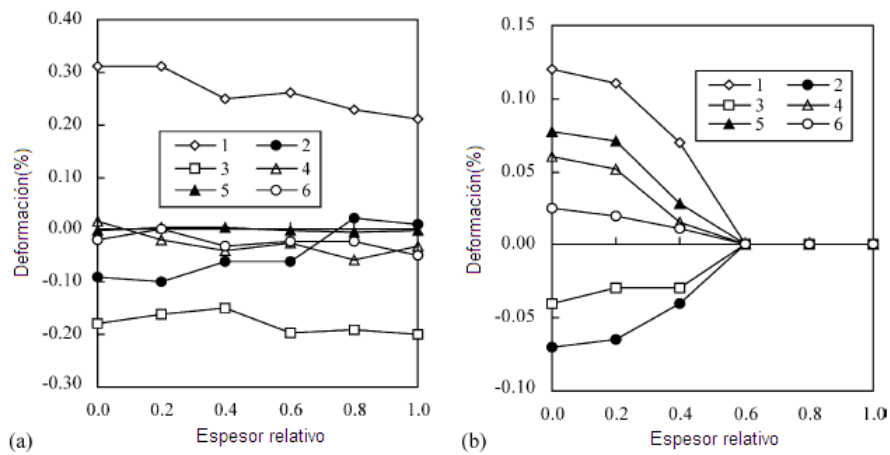


Figura 2. 8 Distribución de la deformación en el espesor de la pared de la muestra 1 ($1-\varepsilon_r$, $2-\varepsilon_\theta$, $3-\varepsilon_z$, $4-\gamma_{r\theta}$, $5-\gamma_{\theta z}$, $6-\gamma_{zr}$); a) salida en la zona de contacto y b) entrada en la zona de contacto (Guangchung Wang et al, 2005).

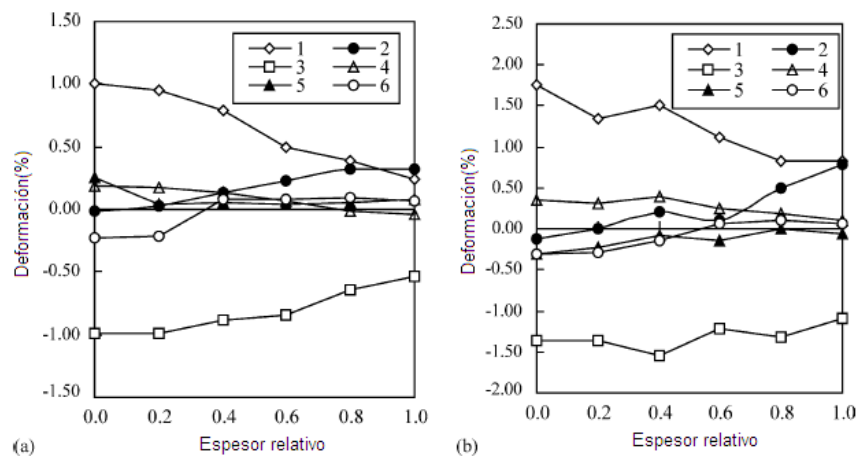


Figura 2. 9 Distribución de la deformación en el espesor de la pared de la muestra 3 ($1-\varepsilon_r$, $2-\varepsilon_\theta$, $3-\varepsilon_z$, $4-\gamma_{r\theta}$, $5-\gamma_{\theta z}$, $6-\gamma_{zr}$); a) salida en la zona de contacto y b) entrada en la zona de contacto (Guangchung Wang et al, 2005).

2.4 Simulaciones numéricas.

En muchos casos la aplicación de algún método de análisis sólo se justifica mediante su fiabilidad y la eficiencia computacional, en años recientes debido al gran desarrollo que en tecnología computacional y la reducción en su costo han permitido un clima propicio para el desarrollo de las simulaciones numéricas en la industria del conformado.

Las simulaciones numéricas son importantes para la industria ya que permiten reducir el número de ensayos experimentales para el desarrollo de un proceso, reduciendo además los costos referidos a su desarrollo, en particular los referidos a la manufactura de moldes costosos para ensayos. Mediante su implementación se incrementa la competitividad y la flexibilidad a través de la habilidad para introducir nuevos productos rápidamente a un menor costo.

En este ámbito, el método de elementos finitos ha recibido gran aceptación en el diseño y desarrollo de procesos de conformado en la industria actual debido principalmente a la capacidad de entregar soluciones detalladas del proceso de deformación (velocidades, formas, deformaciones, esfuerzos, temperaturas o distribución de presión de contacto, etc.), y el hecho de que un código de computadora una vez escrito puede ser utilizado para una gran cantidad de problemas (Kobayashi Shiro, 1989).

2.5 Modelos desarrollados mediante el método de elementos finitos.

Un modelo en elementos finitos se construye de la siguiente manera: se identifica un número de puntos dentro del dominio de la función, los valores de las funciones y sus derivadas son evaluados en cada uno de esos puntos llamados “nodos”. El dominio puede entonces ser representado por medio de un conjunto de subdominios llamados “*elementos finitos*”, el dominio es entonces el ensamble de todos los elementos conectados apropiadamente en sus límites. El valor de la función dentro de cada elemento es aproximado mediante funciones de interpolación (funciones de forma) en términos de los valores en cada nodo. Posteriormente se aplican las técnicas de análisis numérico para obtener la solución global del problema.

Guangchung Wang et al propusieron un método de análisis por Elementos Finitos para el proceso de Forjado Orbital de una pieza de trabajo en forma de anillo. Para la obtención de sus resultados generaron un conjunto de programas para analizar la deformación de la pieza.

Su modelo considera el área de contacto y la superficie espiral del proceso como zona de deformación plástica considerando que la deformación elástica es mínima y puede ser despreciada. La Figura 2. 10 presenta el mallado empleado por Guangchung, utilizando elementos hexaédricos de ocho nodos para discretizar la pieza de trabajo. Todos los nodos en la superficie del fondo se restringen en la dirección axial y en la dirección tangencial. Considerando la existencia probable de una zona neutral donde la velocidad relativa entre la herramienta y la pieza de trabajo es muy próxima a cero, optaron por utilizar el modelo de fricción propuesto por Chen y Kobayashi en 1978.

$$f = -mk \left(\frac{2}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{|\overline{V}_R|}{a} \right) \right);$$

En donde m es el factor de fricción, k es el valor límite de resistencia en cortante, $|\overline{V}_R|$ es el módulo de la velocidad relativa entre la herramienta y la superficie en contacto y a es una constante de velocidad ($a \in [0.00001, 0.0001]$).

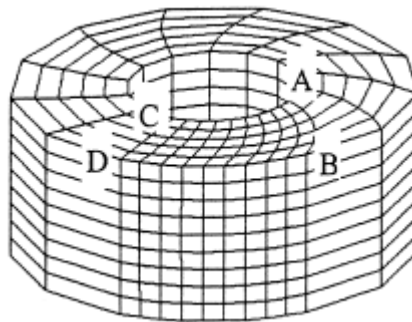


Figura 2. 10 Discretización de la pieza de trabajo en forjado orbital (Guangchung Wang et al., 1999).

Sus resultados mostraron un nuevo patrón de flujo en la zona de deformación. En la Figura 2. 11 se observan zonas con combinaciones de flujo diferentes. R^+ significa que fluye en la dirección radial hacia el exterior de la pieza, R^- indica flujo radial en sentido inverso, T^+ indica flujo tangencial en el mismo sentido de la rotación del molde superior y T^- significa flujo tangencial en sentido contrario a la rotación del molde. El patrón de flujo muestra que el material fluye en la dirección radial desde la zona marcada hacia el interior o exterior de la pieza respectivamente, la línea que divide el flujo radial se encuentra más próxima a la pared interior, esto es debido a que la resistencia al flujo es mayor hacia el centro de la pieza. Al mismo tiempo el material fluye en la dirección tangencial a la entrada y la salida de la zona de deformación hacia el centro de la zona de contacto debido a la fuerte restricción que ofrece el material que se encuentra alrededor. La zona de deformación se encuentra principalmente en la porción superior de la pieza y decrece gradualmente hacia abajo de la misma en forma de embudo.

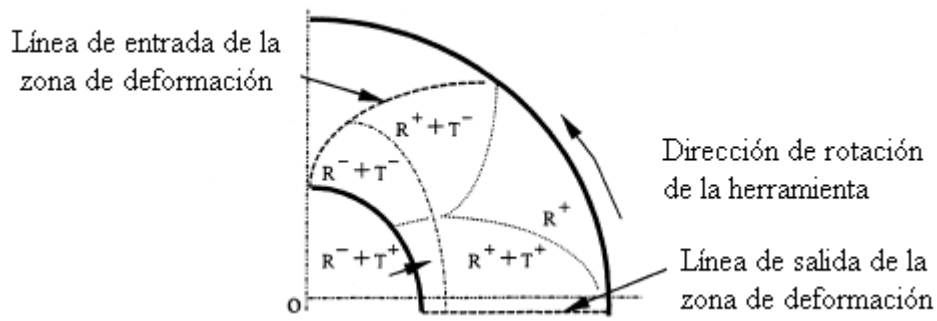


Figura 2. 11 Nuevo patrón de flujo en la superficie de contacto de una pieza en forma de anillo (Guangchung Wang et al., 1999).

En el ambiente DEFORM™ 3D, Liu G. et al estudiaron los mecanismos de deformación para una pieza cilíndrica. La pieza fue discretizada con elementos tetraédricos, para el estudio del patrón de deformación se realizaron cortes meridionales. Como se presenta en la Figura 2. 12, los cortes se realizaron a la entrada, a la salida y a la mitad de la zona de deformación; “W” muestra el sentido de giro de la herramienta superior, por lo tanto el plano de entrada está representado por la línea “E-F”, “A-B” representa el plano de salida y “C-D” representa el plano medio.

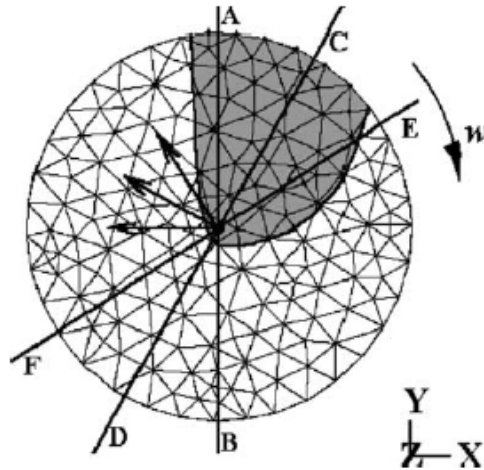


Figura 2. 12 Posición de las secciones meridionales (Liu G. et al., 2004).

Sus resultados muestran un patrón de deformación con un diámetro mayor en la parte superior y un diámetro menor en la parte inferior (*efecto de hongo*), los nodos en la parte superior de la pieza de trabajo presentan una mayor cantidad de deformación plástica en la dirección radial y tangencial, así mismo revela la existencia de una zona muerta en el fondo de la pieza de trabajo.

Dentro del ambiente ABAQUS®, Hua Lin y Han Xinghui en 2008 establecen un modelo razonable para el proceso de forja orbital en frío de una pieza cilíndrica. Se estudiaron los efectos de los tres principales parámetros en el proceso, avance axial v , avance rotacional n , y ángulo de inclinación de la herramienta superior α , sobre el flujo del metal, la inhomogeneidad de la deformación y los parámetros de fuerza y potencia.

El modelo establecido es tridimensional debido a las condiciones de deformación. A diferencia de otros modelos desarrollados anteriormente, el material es tratado con una formulación elasto-plástica. El arreglo de su modelo se presenta en la Figura 2. 13. Las herramientas son formuladas como cuerpos rígidos y la pieza de trabajo es discretizada con elementos octaédricos; para prevenir una severa distorsión de la malla y en consecuencia la precisión de los resultados se vea comprometida, emplearon la técnica de remallado adaptativo Lagrangiano-Euleriano. La trayectoria del molde superior es circular mientras que el molde inferior sólo puede moverse en la dirección axial ("2") y la pieza de trabajo se restringe a rotar junto con el molde inferior.

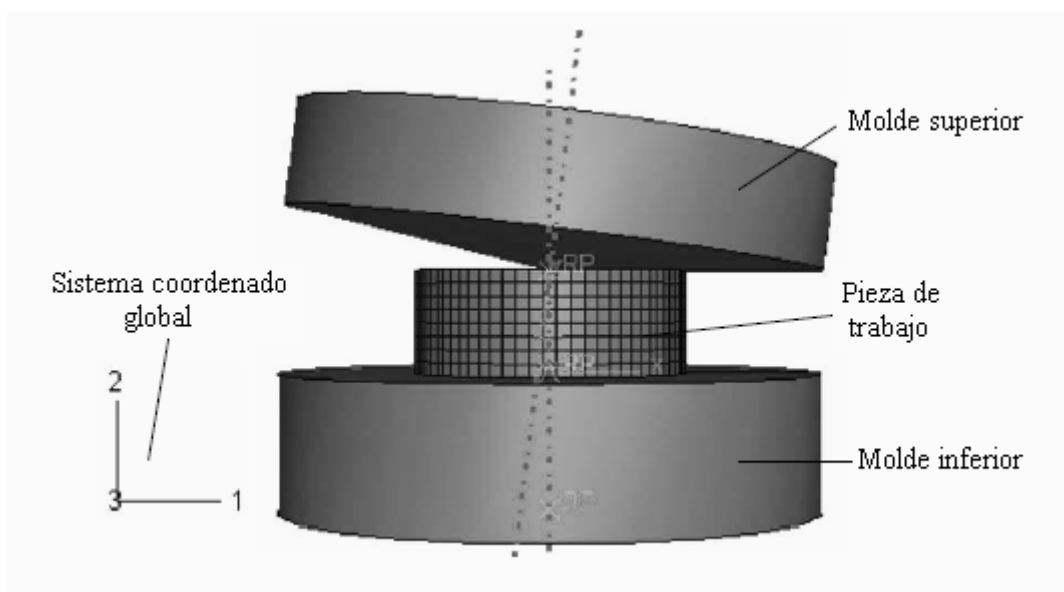


Figura 2. 13 Modelo 3D de una pieza cilíndrica en forja orbital en frío (Hua Lin, Han Xinghui, 2008).

La Figura 2. 14 muestra la historia de la energía cinética y la energía interna del modelo propuesto en 2008. Como regla general, la energía cinética no debe exceder una pequeña fracción de la energía interna, típicamente del 5 a 10% de la energía interna total, para que el modelo pueda considerarse válido (Hua Lin, Han Xinghui, 2008). Puede notarse que la energía interna se incrementa gradualmente conforme avanza el proceso mientras que la energía cinética alcanza cierto valor y permanece sin cambios.

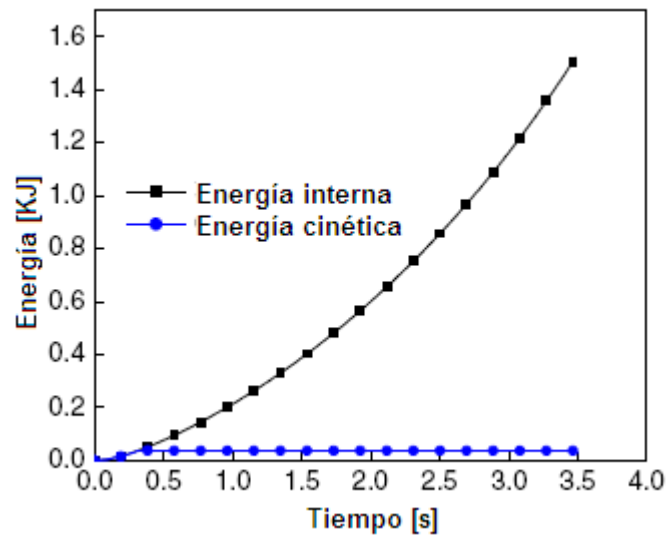


Figura 2. 14 Historia de las energías de la deformación de la pieza de trabajo (Hua Lin, Han Xinghui, 2008).

Para comprobar la validez de sus resultados utilizaron el modelo experimental usado por Choi S. et al. El material de los especímenes es un acero de bajo carbono denominación AISI 1020, con un radio inicial $R = 10mm$ y una altura inicial $H = 10mm$, las restantes condiciones del proceso se muestran en la Tabla 2. 1. En la Figura 2. 15 se presentan los resultados experimentales y los resultados del modelo propuesto hasta un 50% de reducción de la altura, se aprecia que el mayor error relativo en el modelo se presenta al final del proceso con un valor de 17.62% (Hua Lin, Han Xinghui, 2008) respecto del trabajo experimental.

Tabla 2. 1 Parámetros del proceso de la simulación (Hua Lin y Han Xinghui, 2008).

Parámetros	Valores
Velocidad de avance del molde inferior	3[mm/s]
Velocidad rotacional del generador	300[rpm]
Ángulo de inclinación del generador	3[°]
Coefficiente de fricción	0.15

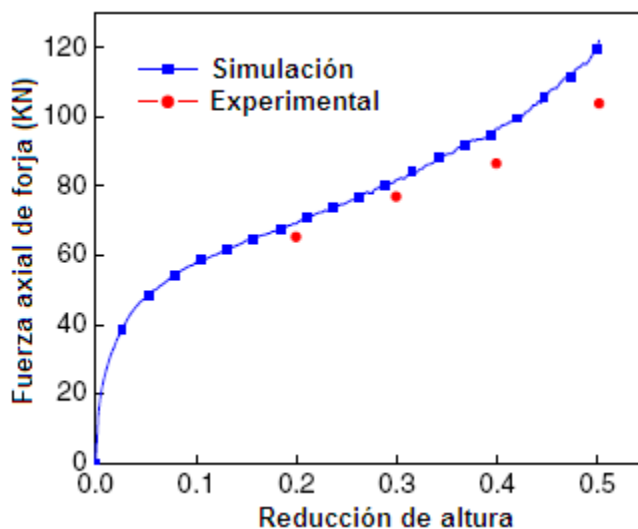


Figura 2. 15 Comparación de la carga de forja axial entre simulación y experimento (Hua Lin y Han Xinghui, 2008).

Sus resultados también mostraron que el efecto del avance axial y el avance rotacional puede atribuirse a un solo parámetro denominado avance por revolución S . Así mismo encontraron que la carga axial y el momento de forja presentan gran dependencia con el ángulo de inclinación del generador y el avance por revolución S . Tanto la carga como el momento aumentan exponencialmente mientras el ángulo disminuye, en tanto que la carga y el momento disminuyen conforme se disminuye el avance por revolución. Esto se debe principalmente a que al incrementarse el avance, una mayor cantidad de material entra en estado de deformación plástica y por lo tanto requiere mayor energía para deformar (Hua Lin y Han Xinghui, 2008).

Posteriormente en 2009, el efecto de los parámetros investigados es explicado por otro parámetro crítico que afecta significativamente el proceso, llamado relación de longitud-altura de la zona de deformación plástica. El modelo propuesto fue validado mediante resultados experimentales, obteniendo un máximo error relativo de 7.8% (Hua Lin y Han Xinghui, 2009).

La Tabla 2. 2 muestra los parámetros del proceso empleados en la simulación y el trabajo experimental. El material empleado fue acero de bajo carbono AISI1020 y se aplicó MoS_2 como lubricante, obteniendo un coeficiente de fricción $\mu = 0.15$ constante para la simulación.

Tabla 2. 2 Parámetros del proceso adoptados en la simulación y el experimento (Hua Lin, Han Xinghui, 2009).

Parámetros	Valores
Velocidad de avance del molde inferior	1 mm/s
Velocidad rotacional del generador	300rpm
Ángulo de inclinación del generador	2°
Reducción de altura	20%

Para estudiar los efectos de las dimensiones de la pieza de trabajo, se variaron las dimensiones iniciales de los especímenes. Aunado a estos factores, se variaron los principales parámetros del proceso, el avance por revolución S y el ángulo de inclinación del generador superior.

La principal característica del proceso de forjado orbital es el efecto denominado “hongo” (Hua Lin y Han Xinghui, 2009), dicho efecto consiste en un mayor crecimiento en el diámetro superior que en el inferior. Sus resultados muestran que el incremento del diámetro inicial tiende a disminuir este efecto, debido a que la deformación plástica penetra la longitud axial con mayor facilidad. Dicho efecto también puede ser controlado para ángulos de inclinación mayores y velocidades de avance pequeñas. De forma inversa, el incremento en la altura de la pieza de trabajo ayuda a hacer presente dicho efecto en la pieza de trabajo.

La geometría inicial de la pieza de trabajo también influye en la carga axial y en el momento de forjado. El incremento en la relación H_0/D_0 mediante la reducción del diámetro inicial D_0 resulta más efectivo para controlar la carga máxima, el momento de forja y aumentar la homogeneidad en la deformación de la pieza. Mientras que el cambio en la altura inicial H_0 puede controlar el flujo de material durante el proceso.

También en 2009, y empleando la misma formulación en el ambiente ABAQUS® estudian el proceso de forjado orbital para una pieza en forma de anillo. La configuración inicial se muestra en la Figura 2. 16, la aproximación de su modelo fue evaluada experimentalmente bajo las mismas condiciones de la simulación. Los experimentos fueron realizados en una prensa rotatoria T 200, el material de trabajo fue acero de bajo carbono AISI1020 y utilizaron MoS_2 como lubricante. Los parámetros del experimento se muestran en la Tabla 2. 3.

Tabla 2. 3 Parámetros adoptados en la simulación y el experimento (Hua Lin, Han Xinghui, 2009).

Parámetros	Valores
Velocidad de avance del molde inferior	1.5[mm/s]
Velocidad rotacional del generador	300[rpm]
Ángulo de inclinación del generador	2[°]
Reducción de altura	30%
Avance por revolución	0.3[mm/rev]

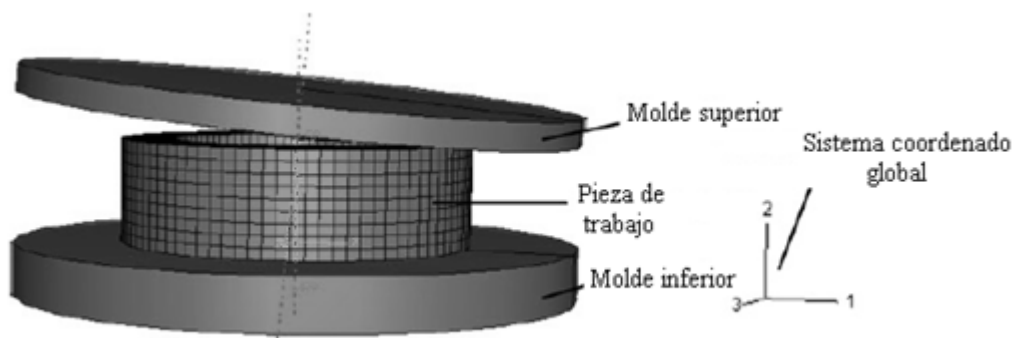


Figura 2. 16 Modelo 3D de la pieza de trabajo en forma de anillo (Hua Lin, Han Xinghui, 2009).

El diámetro superior de la pieza de trabajo fue medido y comparado con los resultados obtenidos de la simulación. La Figura 2. 17 muestra la comparación entre los resultados del experimento y la simulación. Se observa que el máximo error relativo se obtiene al final de la reducción de altura, con un valor de 3.93% (Hua Lin, Han Xinghui, 2009), sin embargo la curva muestra un comportamiento similar en ambos casos.

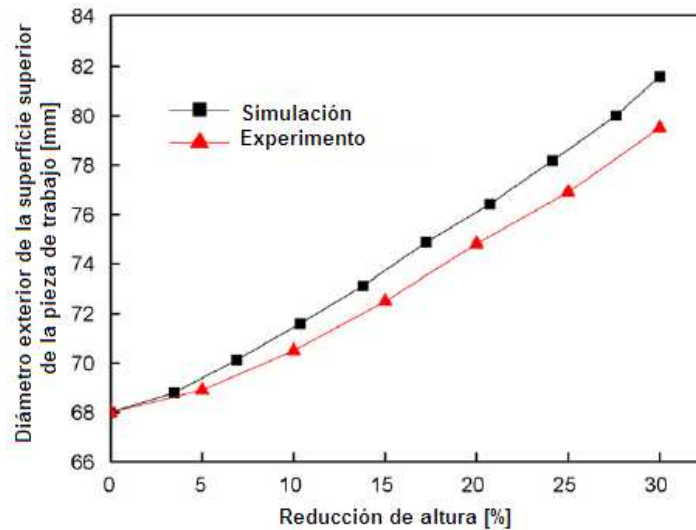


Figura 2. 17 Comparación entre resultados de la simulación y el experimento (Hua Lin, Han Xinghui, 2009).

Sus resultados muestran el mecanismo de deformación que se presenta en la pieza de trabajo, una deformación homogénea en la dirección tangencial y una deformación muy heterogénea tanto en la dirección radial como en la axial. El flujo de material en la dirección radial presenta ambos sentidos por lo que el barrenado interior de la pieza de trabajo se reduce mientras el diámetro exterior se incrementa conforme avanza el proceso, este mecanismo de deformación es mucho más marcado en la parte superior de la pieza. El comportamiento plástico de la pieza de trabajo se muestra en la Figura 2. 18, los nodos 5600 y 5684 se encuentran en la superficie superior de la pieza de trabajo, los nodos 5671 y 5587 se encuentran en la superficie inferior y el nodo 5636 justo a la mitad de la pieza. El patrón de deformación plástica avanza de forma escalonada a cada revolución del generador superior, los nodos en la parte superior presentan la mayor cantidad de deformación plástica en especial el nodo 5600 en la cara externa de la pieza de trabajo. Como resultado, el diámetro exterior crece y el diámetro interior decrece aunque en menor proporción.

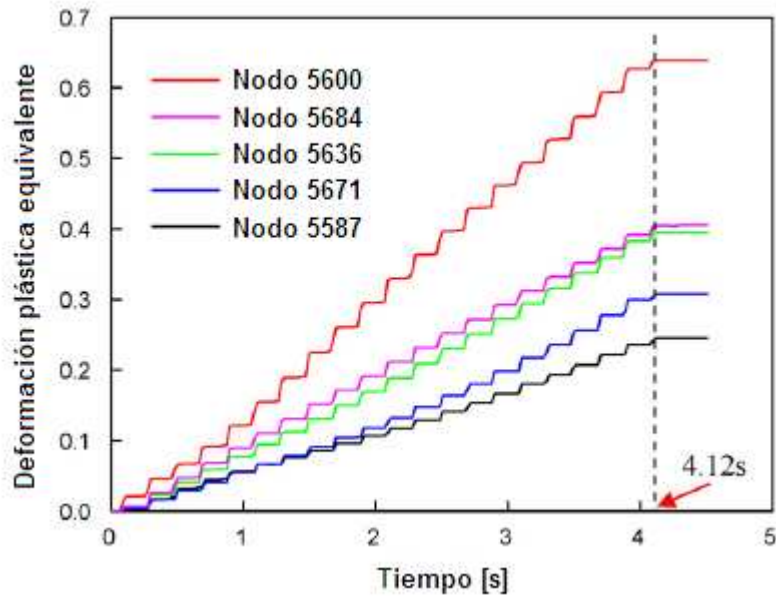


Figura 2. 18 Evolución de la deformación plástica equivalente en nodos seleccionados (Hua Lin, Han Xinghui, 2009).

El esfuerzo equivalente presenta un comportamiento periódico mientras la oscilación del generador superior prosigue. Al detenerse el avance axial del molde inferior se mantiene el mismo comportamiento aunque el máximo esfuerzo disminuye.

La Figura 2. 19 muestra la evolución de la fuerza de forja con el tiempo, tanto el momento de forja como la fuerza de forja incrementan rápidamente al inicio del proceso y posteriormente el incremento se hace más lento hasta alcanzar los valores máximos al 30% de reducción de altura. Casi al término del proceso, el molde inferior detiene el avance axial por lo que la carga y el momento decrecen drásticamente hacia el final del proceso.

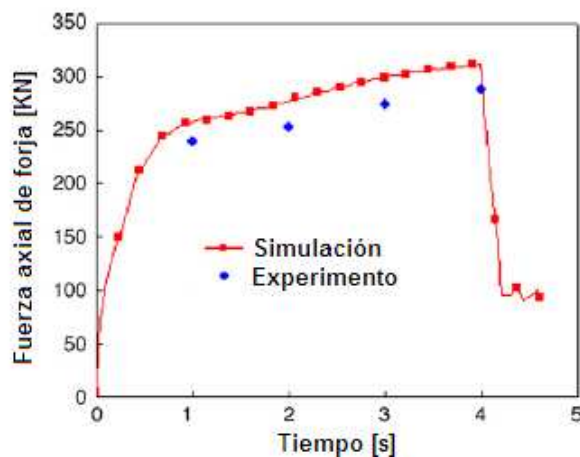


Figura 2. 19 Variación de la fuerza axial de forja con el tiempo (Hua Lin, Han Xinghui, 2009).

Capítulo 3 Modelado del proceso de forjado orbital en ABAQUS®.

3.1 Modelo General.

La configuración y dimensiones de la pieza de trabajo, así como las herramientas están basadas en los experimentos realizados por Canta T. (2009). Debido al mecanismo de deformación que se presenta en el proceso de forjado rotatorio, el modelo se planteó en tres dimensiones, considerando la pieza completa sin planos de simetría.

Una primera aproximación fue considerar las herramientas empleadas para el proceso como cuerpos analíticamente rígidos con la finalidad de estudiar en una primera etapa la deformación de la pieza de trabajo.

La configuración del proceso se muestra en la Figura 3. 1. Para lograr comparar los parámetros de fuerza con respecto del proceso convencional, la pieza de trabajo es deformada hasta el 70% de la altura inicial, las mismas dimensiones de la pieza de trabajo, condiciones de fricción y velocidad axial del generador son empleadas tanto en el proceso rotatorio como en el proceso convencional.

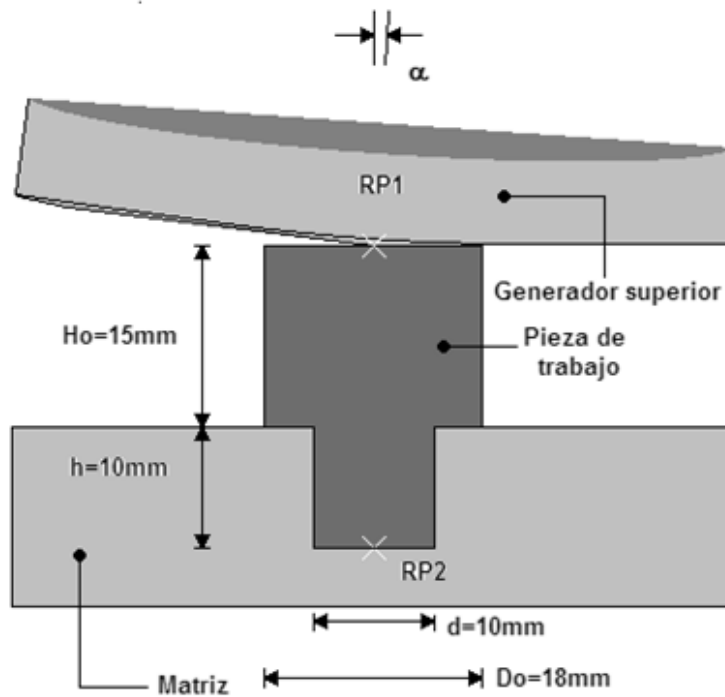


Figura 3. 1 Configuración inicial del modelo.

Todos los parámetros del proceso se muestran en la Tabla 3. 1. El ángulo de inclinación del generador superior y el avance por revolución S se modificarán posteriormente para comparar sus efectos sobre el flujo de material y los parámetros de fuerza del proceso de forjado rotatorio.

Tabla 3. 1 Parámetros del proceso de forjado rotatorio.

Parámetros	Valores
Velocidad axial del generador	$v = 4\text{ mm/s}$
Velocidad rotacional del generador	$n = 5\text{ rev/s}$
Ángulo de inclinación del generador	$\alpha = 4^\circ$
Reducción de altura	70%
Avance por revolución	$S = 0.8\text{ mm/rev}$

3.1.1 Propiedades del material.

Con la finalidad de comparar el modelo presentado con el trabajo experimental realizado por Canta T. (2009), se utilizaron las propiedades del acero AISI1035 que corresponden a las propiedades del material empleado en sus experimentos. El proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente, por esta razón, el comportamiento del material, utilizado para este trabajo, se definió mediante la ecuación de Hollom para deformación en frío, despreciando los efectos de la rapidez de deformación. Las propiedades mecánicas que definen el material empleado para la simulación se presentan en la Tabla 3. 2.

Tabla 3. 2 Propiedades mecánicas del acero AISI1035.

Propiedades	Valores
Densidad	7850 kg/m^3
Módulo de elasticidad	200GPa
Relación de Poisson	0.29
Resistencia a la fluencia	340MPa
Resistencia última a tensión	585MPa

La paquetería proporciona una gran cantidad de modelos para definir el comportamiento del material, básicamente puede hacerse variable con la velocidad de deformación e incluso de la temperatura cuando así se requiere. Considerando que el proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente y es completamente isotérmico, se consideró el modelo elástico lineal isotrópico dentro de la zona elástica, mientras que para la zona plástica se utilizó el modelo de endurecimiento isotrópico. Bajo estas condiciones, el modelo de Hollom para el acero AISI1035 (Tschaetsch Heinz, 2005) utilizado en la simulación se muestra enseguida:

$$\sigma = 950 \cdot \varepsilon^{0.178} [MPa]$$

3.1.2 Procedimiento de análisis.

El procedimiento de análisis, dentro del ambiente ABAQUS®, se define de la siguiente manera:

- Dividir la historia del problema en pasos.
- Especificar sólo un tipo de análisis en cada paso.
- Describir cargas, condiciones de frontera, interacciones, movimientos y requerimientos de respuesta en cada paso.

Un paso es una división de la simulación en etapas para estudiar un proceso específico. En cada paso se puede especificar sólo una técnica de análisis dependiendo de la linealidad o no linealidad del problema. Básicamente hay dos tipos de pasos en ABAQUS®: pasos de análisis general y pasos de perturbación lineal, sólo los pasos de análisis general pueden utilizarse para analizar respuestas no lineales y pueden incluirse en análisis tanto de ABAQUS/STANDARD® como de ABAQUS/EXPLICIT®.

La diferencia central entre ambas opciones es el esquema de solución empleado por cada una; ABAQUS/STANDARD® utiliza integración directa implícita mientras que ABAQUS/EXPLICIT® utiliza un método explícito. En el método implícito la matriz de rigidez debe ser invertida y las ecuaciones de equilibrio deben ser resueltas a cada incremento, en cambio en un análisis explícito, los desplazamientos y las velocidades son calculadas en términos de cantidades conocidas al inicio del paso, las matrices de rigidez no necesitan ser formadas e invertidas y en consecuencia el costo computacional de cada incremento es menor en comparación con el método implícito.

El modelo propuesto está planteado en tres dimensiones, lo cual implica una cantidad considerable de elementos por lo que resultaría poco eficiente plantear un método de solución implícito, aunado a esto, el contacto entre las herramientas y la pieza de trabajo hacen del método dinámico explícito una alternativa de solución mucho más atractiva.

En el modelo que se presenta, la simulación fue dividida en 6 pasos con un tipo de análisis dinámico explícito. Los primeros cinco pasos refieren el recorrido axial del molde superior hasta completar una reducción del 70% de la altura inicial en la pieza de trabajo, y el sexto paso sólo involucra el movimiento oscilatorio del molde para completar la deformación. La principal razón de usar pasos múltiples, es la capacidad de la paquetería para cambiar las condiciones de remallado entre etapas diferentes del proceso, sin la necesidad de redefinir nuevamente todas las condiciones y comenzar una nueva simulación desde el principio.

Una ventaja más al emplear el esquema de pasos múltiples, es la posibilidad de reiniciar un análisis desde una etapa determinada, utilizando los resultados obtenidos desde el incremento anterior. Estas herramientas otorgan una mayor flexibilidad para completar un análisis en donde se involucran grandes deformaciones.

Un procedimiento dinámico explícito realiza pequeños incrementos de tiempo para asegurar una solución estable al problema. Aunque el límite de incremento de tiempo estable es muy limitado y se encuentra condicionado a los elementos de la malla, ABAQUS/EXPLICIT® proporciona algunas herramientas que permiten reducir el costo computacional agregando un factor de escalamiento al incremento de tiempo estable.

- Acelerar la simulación. El número de incrementos requeridos n puede reducirse al acelerar artificialmente el proceso. Sin embargo, si la velocidad es demasiado alta, las fuerzas inerciales pueden incrementarse y por lo tanto la respuesta predicha puede verse afectada. Otro error puede hacerse presente cuando la conducta del material es definida como dependiente de la velocidad de deformación, en cuyo caso no puede acelerarse la simulación.
- Escalamiento de masa. La densidad del material empleado puede modificarse artificialmente por un factor f^2 , dicha alteración reduce el número de incrementos a n/f , manteniendo el tiempo del proceso sin cambios, lo cual permite utilizarse cuando el material definido es dependiente de la velocidad. Sin embargo, se presenta el mismo efecto sobre las fuerzas inerciales que al acelerar el proceso.

Con el propósito de acortar el tiempo de cálculo de la simulación, se utilizó el *Escalamiento de masa* con un factor fijo durante la simulación. En la Tabla 3. 3 se observa el efecto del factor de escalamiento en el tiempo de cálculo y en el parámetro de carga axial. Queda expuesto que al emplear factores de escalamiento elevados, pueden obtenerse ahorros significativos en el tiempo de cálculo, en tanto que la carga axial obtenida no exhibe grandes divergencias. No obstante, al observar la deformación que se obtiene al final de la simulación, mostrada en la Figura 3. 2, se hace evidente que el factor de escalamiento influye en la distorsión de los elementos, principalmente en aquellos ubicados sobre la superficie superior. Los elementos más alejados en la dirección radial se separan del generador superior, esta separación y distorsión se hace más evidente conforme el factor de escalamiento es más elevado. Al disminuir el factor esta separación disminuye gradualmente, con un factor de 1×10^6 los elementos en la superficie superior ya no presentan separación alguna de la superficie del generador superior, y el mismo comportamiento se mantiene con factores menores.

Tabla 3. 3 Efecto del factor de escalamiento de masa.

Factor de escalamiento	Tiempo de cálculo [min]	Incrementos	Carga axial [KN]
1×10^8	142	42603	137.253
5×10^7	148	45347	132.572
1×10^7	199	64598	141.624
5×10^6	219	72744	139.007
1×10^6	341	120245	136.496
5×10^5	442	157914	137.839
1×10^5	1235	578491	149.124
1×10^4	3828	2346134	155.580

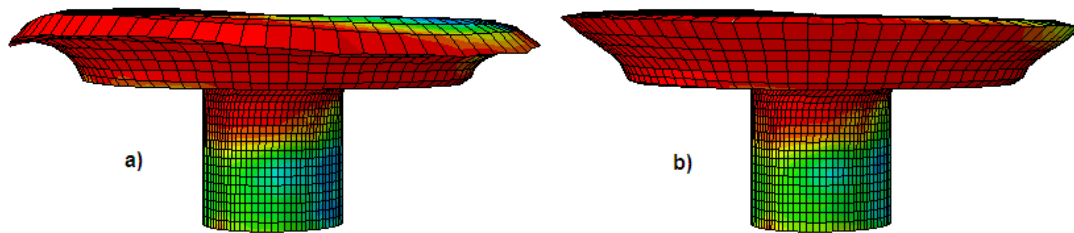


Figura 3. 2 Distorsión de los elementos debido al factor de escalamiento de masa: a) 1×10^8 , b) 5×10^7 .

Por otro lado, se observa que cuando el número de incrementos es muy elevado el valor de la carga axial comienza a aumentar. Este hecho puede explicarse debido a que los procedimientos que requieren más de 300,000 incrementos pueden verse afectados por errores de redondeo y en caso de requerir más de 2,000,000 es recomendable utilizar una doble precisión (Simulia, 2006). Así mismo, el costo computacional requerido para análisis que superan los 300,000 incrementos es demasiado alto.

El valor experimental obtenido por Canta T. en 1998, se sitúa entre 100 y 155 *kN*. Con base en sus resultados y el tiempo de cálculo, al emplear un factor de 1×10^6 entrega un valor de carga dentro del rango de los resultados experimentales en un tiempo razonable; además, con este factor no se presenta separación de los elementos con respecto a la superficie del generador superior.

3.1.3 Condiciones de contacto.

Las condiciones que se presentan en la intercara de las herramientas y el material de trabajo tienen una influencia muy importante en el flujo del material e incluso en los parámetros de fuerza y potencia. Dichas condiciones dependen de los materiales empleados y principalmente del lubricante utilizado.

En el modelo presentado, las propiedades mecánicas de contacto en la intercara están dadas por el modelo de fricción de *Coulomb* (*fricción isotrópica constante*) con un coeficiente $\mu = 0.15$ que es el valor correspondiente en la literatura al lubricante empleado por Canta T. en 1998. Aunque otros valores del coeficiente de fricción no se han reportado para la utilización de MoS_2 como lubricante, en el presente trabajo se variará el coeficiente de fricción para revelar su influencia en conjunto con los demás parámetros del proceso. El contacto entre las herramientas y la pieza de trabajo empleado esta definido como tipo *superficie-superficie*, debido al movimiento relativo que presenta el generador superior con respecto a la pieza de trabajo, se adoptó la formulación de *deslizamiento finito* puesto que es la única que permite el movimiento arbitrario de las superficies de formado.

3.1.4 Restricciones de contacto.

Las *restricciones de contacto* definen los grados de libertad entre regiones de un modelo durante todo el análisis. Los tipos de restricciones aplicables a un modelo en ABAQUS® son:

- *Tie.*
- *Rigid body.*
- *Display body.*
- *Coupling.*
- *MPC Constraint.*
- *Shell-to-solid coupling.*
- *Embedded region.*
- *Equation.*

El movimiento del generador superior podría provocar que la pieza de trabajo se adhiriera y rotara junto con él, esta situación provocaría que la deformación en la pieza fuera producida sólo por el desplazamiento axial del generador. Con la finalidad de impedir dicha rotación, se utilizó una restricción de tipo *Acoplamiento distributivo (distributive coupling)* en las superficies sumergidas en el molde inferior tal como se muestra en la Figura 3. 3, estas superficies corresponden a aquellas que se encuentran sujetas en el proceso para impedir la rotación del material. El punto de control al que estarán asociadas las superficies, es el nodo de referencia del molde inferior (*RP2*). Este tipo de restricción acopla el movimiento de un conjunto de nodos sobre una superficie, al movimiento de un nodo de referencia. La característica principal de este tipo de restricción es que permite la distribución de las fuerzas a través de los nodos acoplados mediante factores de peso, permitiendo que los elementos cercanos a la zona de influencia de la restricción se flexionen.

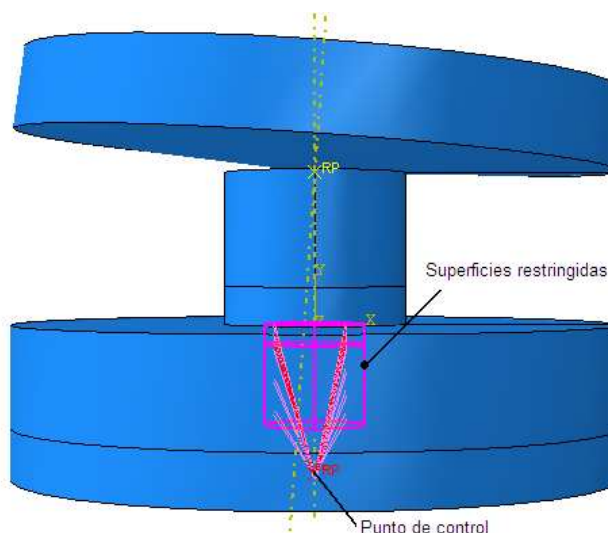


Figura 3. 3 Superficies en las que se aplicó la restricción de *acoplamiento distributivo*.

En el último paso de la simulación, la restricción de contacto establecida en las superficies sumergidas no resulta suficiente para impedir un adelgazamiento excesivo en la zona inferior de la pieza como su ilustra en la Figura 3. 4, generando una distorsión excesiva en esa zona. La distorsión comienza a hacerse presente una vez que la deformación alcanza la superficie inferior de la pieza, y es debida principalmente a la separación de la pieza de trabajo del molde inferior por la transferencia de carga además de las condiciones de remallado en dicha zona. En este momento se hace evidente la necesidad de plantear otra condición para impedir este adelgazamiento en la simulación.

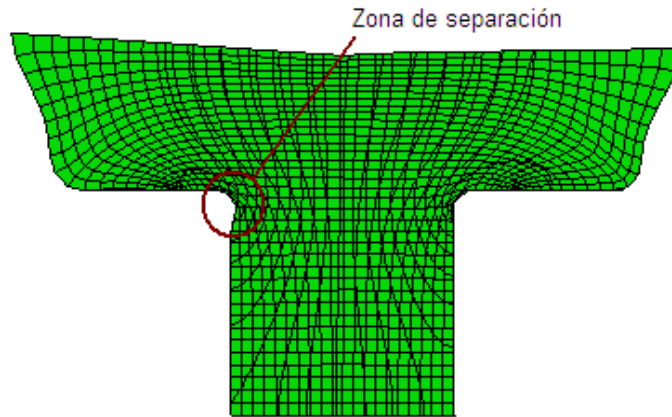


Figura 3. 4 Zona de distorsión debido a las condiciones de contacto

Para prevenir este error sin alterar las condiciones del proceso, se definió una nueva restricción de contacto en la superficie inferior. La restricción de tipo *Acoplamiento distributivo* se asignó a la superficie inferior como se observa en la Figura 3. 5, con un punto de control en (RP2) para obtener un mayor control en los nodos de dicha zona. Esta nueva restricción no altera las condiciones pre-establecidas para el proceso ya que la definición del tipo de restricción aplicada permite cierta flexibilidad en el movimiento de los nodos, en cambio, si permite mayor control en la distorsión de los elementos logrando así que la simulación sea completada.

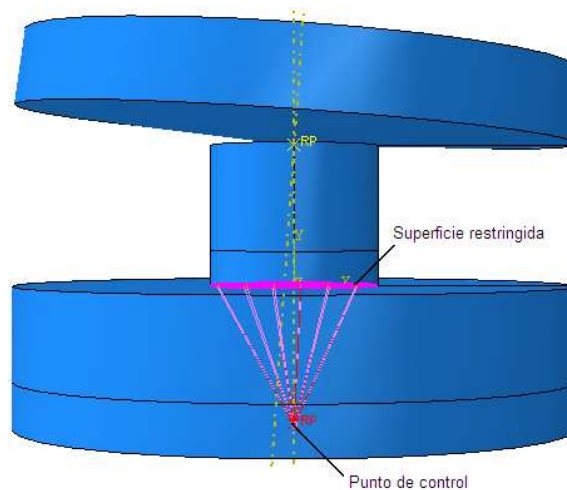


Figura 3. 5 Definición de una nueva restricción de tipo *Acoplamiento Distributivo*.

3.1.5 Condiciones de Frontera.

En esta parte, se define el movimiento de las herramientas para producir la deformación deseada. En los experimentos realizados por Canta T. (2009) el molde inferior rota junto con la pieza de trabajo, sin embargo, para efectuar la simulación del proceso, resulta poco eficiente hacer rotar todos los nodos de la pieza de trabajo ya que involucraría un mayor gasto en cuestión de tiempo de cálculo. En su lugar, se utilizó sólo el movimiento en el molde superior para producir la misma deformación. Las herramientas se tomaron como cuerpos rígidos y su movimiento está asignado al nodo de referencia correspondiente como se enlista a continuación.

- **Molde:** Como se mencionó anteriormente, el molde no describe ningún movimiento. Una restricción de tipo *empotramiento* se aplicó sobre el nodo *RP2* para restringir cualquier tipo de desplazamiento o rotación.
- **Generador (*desplazamiento*):** El generador debe desplazarse sólo a lo largo del eje axial, por lo tanto la restricción de tipo *desplazamiento* se aplicó en el nodo de referencia *RP1* en las direcciones *X* y *Z*. Por otro lado, la rotación del generador también está impedida sobre los ejes *X* y *Z*.
- **Generador (*movimiento*):** Con el objetivo de comparar el modelo propuesto, las condiciones de movimiento son las mismas que utilizó Canta T. en 2009. El generador se desplazará sobre el eje axial *Y* a una velocidad de $v = 4 \text{ mm/s}$ y deberá rotar alrededor del mismo eje a una velocidad angular de $\omega = 5 \text{ rev/s}$. Posteriormente, las condiciones de velocidad serán modificadas para analizar el comportamiento del proceso a diferentes velocidades.

3.2 Características del mallado.

Existen varios niveles de automatización y control para crear una malla que se ajuste a las necesidades de un análisis. Para el presente trabajo, se emplearon distintas técnicas y métodos que se enunciarán a continuación.

Se utilizaron elementos hexagonales (prismas rectangulares) para el mallado de la geometría de la pieza de trabajo. Para mantener una calidad de mallado aceptable sin requerir un número excesivo de elementos, se utilizó el método de descomposición del dominio en bloques para dividir la geometría de la pieza de trabajo. El método consiste en dividir en bloques la geometría deseada, y posteriormente asignar las características de la malla en las diferentes regiones en que fue dividida. La técnica de mallado que fue elegida en cada zona se basa principalmente en las condiciones de deformación que se esperan debido al flujo del material; en aquellas regiones en las cuales se espera que el flujo de material sea menor y no produzca cambios significativos en la geometría, se utilizó una técnica de mallado estructural (Figura 3. 6). Las regiones exteriores de la geometría, en las cuales se espera una deformación muy heterogénea, se empleó la técnica de barrido frontal para ajustar los elementos de acuerdo a las divisiones creadas.

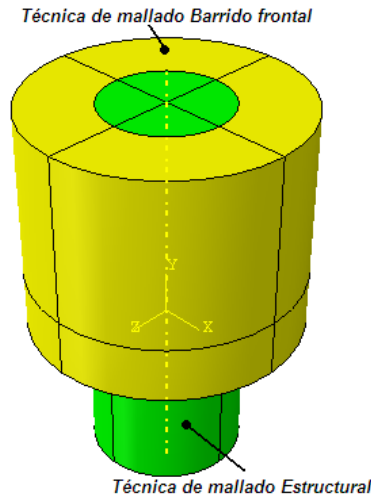


Figura 3. 6 Técnicas de mallado para la geometría de la pieza de trabajo.

La cantidad de elementos en la malla se asignó mediante el método de inserción de nodos para las secciones de la geometría completa. Para describir con mayor exactitud la geometría de la pieza deformada, se mantuvo una densidad mayor de elementos en la región inferior de la pieza como se aprecia en la Figura 3. 7, ya que se espera un flujo de material complejo en la zona de contacto con el molde inferior. En cambio, los nodos más alejados de dicha zona no requieren una cantidad demasiado elevada de elementos puesto que no se esperan cambios drásticos de la geometría.

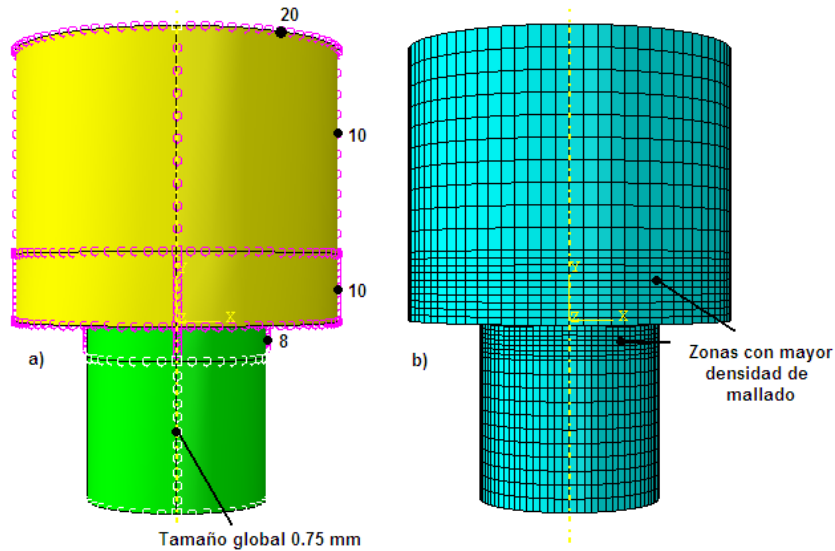


Figura 3. 7 Construcción de la malla: a) Cantidad de elementos por secciones, b) Malla generada.

En procesos que involucran patrones de deformación complejos o deformación excesiva de la geometría inicial, los elementos que conforman la malla pueden distorsionarse demasiado y producir errores en la solución del problema, incluso, el análisis puede detenerse debido a esta distorsión. Algunas veces, el refinamiento de la malla puede sobrellevar dichas deformaciones, sin embargo, una malla muy fina también ocasionará que el tiempo de cálculo se incremente.

Con el objetivo de obtener resultados adecuados para un análisis con un costo computacional razonable, fue necesario emplear los métodos de remallado propios de ABAQUS EXPLICIT® para tratar con la deformación de la malla inicial, manteniendo una óptima calidad en los elementos mientras se controla el tiempo de cálculo empleado.

3.2.1 Mallado Adaptativo ALE (Arbitrario Lagrangiano-Euleriano).

El método de mallado adaptativo **ALE**, disponible en el ambiente ABAQUS/EXPLICIT®, proporciona control sobre la distorsión de la malla inicial a través del proceso. El método **ALE** incorpora técnicas que van desde análisis Lagrangianos en su totalidad (en el cual los movimientos de los nodos corresponden al movimiento del material), hasta análisis puramente Eulerianos (en donde los nodos permanecen fijos en el espacio mientras el material fluye a través de los elementos). Este método permite trabajar con una sola malla, modificándola sin alterar su topología inicial (elementos y conectividades).

El éxito del método **ALE** depende de la elección del método usado en el remallado y la extrapolación de la solución, en la mayoría de los casos el parámetro que más afecta la eficiencia del método y su costo computacional es la frecuencia de remallado.

Durante cada barrido de mallado, los nodos son reubicados para reducir la distorsión de los elementos. El cálculo de la nueva malla se basa en tres métodos para suavizar la distorsión de los elementos, la nueva ubicación de los nodos se basa en la posición de los nodos y elementos circundantes; aunque la tendencia de todos los métodos es disminuir la distorsión, la nueva malla diferirá dependiendo del método empleado.

- **Reposicionamiento volumétrico.** Este método reubica un nodo en función de los centros de masa de los elementos circundantes. La nueva posición de un nodo **M** (como se muestra en la Figura 3. 8) estará ubicada en función de los centros de masa **C** de los elementos que le rodean. El reposicionamiento volumétrico ubicará el nodo **M** más cerca del centro **C₃** y alejado del centro **C₁**.
- **Reposicionamiento Laplaciano.** El método Laplaciano coloca el nodo en función del promedio de las posiciones de los nodos adyacentes conectados al nodo mediante un eje. En la Figura 3. 8, el nodo **M** estará colocado en función de los nodos **L**; por efecto de los nodos **L₂** y **L₃**, el nodo **M** se moverá a la derecha y arriba para reducir la distorsión.
- **Reposicionamiento Equipotencial.** El reposicionamiento equipotencial es un método de orden más alto que toma en cuenta todos los nodos circundantes. Este método sólo puede ser utilizado para mallas estructuradas.

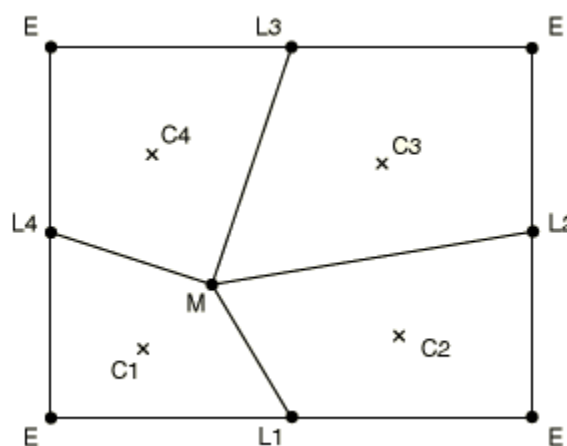


Figura 3. 8 Reposicionamiento de un nodo durante un barrido de mallado (ABAQUS DOCUMENTATION V6.8® 2006).

El reposicionamiento de los nodos con el empleo del método ALE, afecta todas las zonas que hayan sido definidas con el método de remallado. Para evitar que el reposicionamiento de los nodos afecte las regiones con una mayor densidad de elementos, el método ALE se utilizó únicamente en la región superior de la pieza para el tiempo completo de la simulación, tal y como se presenta en la Figura 3. 9, los parámetros del método ALE, se enlistan en la Tabla 3. 4.

Tabla 3. 4 Parámetros del método ALE.

Paso.	Frecuencia de remallado.	Barridos por incremento	Sección
1	20	1	Superior
2	5	1	Superior, Inferior
3	5	1	Superior
4	5	1	Superior
5	5	1	Superior
6	5	1	Superior

La región inferior de la pieza, en la cual el mallado es más fino, no fue incluida por el método ALE en la totalidad de la simulación para no afectar la densidad de mallado. Sin embargo, cuando la deformación alcanza la superficie inferior de la pieza en el tiempo $t = 0.5s$, resultó necesario incluir un remallado en la sección inferior, para prevenir la distorsión excesiva de los elementos involucrados. El remallado de la sección inferior termina en $t = 1s$, ya que si se prolonga el remallado en esta sección, ocasiona el adelgazamiento de la misma y una deformación excesiva de los elementos que ocasiona el aborto de la simulación en el tiempo $t = 2.1s$.

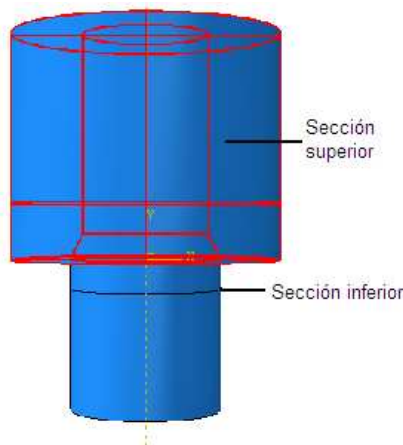


Figura 3. 9 Asignación de las secciones para el método ALE.

3.3 Energía interna y cinética.

En la Figura 3. 10 se presentan las gráficas que representan el comportamiento de la energía interna y energía cinética del modelo propuesto en el trabajo. El desarrollo de ambas curvas es suave, la energía interna aumenta durante todo el proceso, sin embargo la velocidad de aumento en la energía interna sufre un cambio drástico hacia el final del proceso; este cambio es debido a que el generador superior detiene en dicho momento su desplazamiento axial para continuar con su rotación y así completar la deformación de la pieza. Por otro lado, la energía cinética alcanza cierto valor y se estabiliza hasta el final de proceso, dicho valor es mucho menor que la energía interna total del modelo como se puede apreciar en la figura. Como regla general, la energía cinética de un material no debe exceder una pequeña fracción de la energía interna durante la simulación, típicamente de 5 a 10%, para que el modelo pueda ser considerado válido (Lin Hua et al, 2008). En base a los resultados mostrados para el modelo y en comparación con los resultados obtenidos por Canta T. et al., en 1998 el modelo presentado puede considerarse válido.

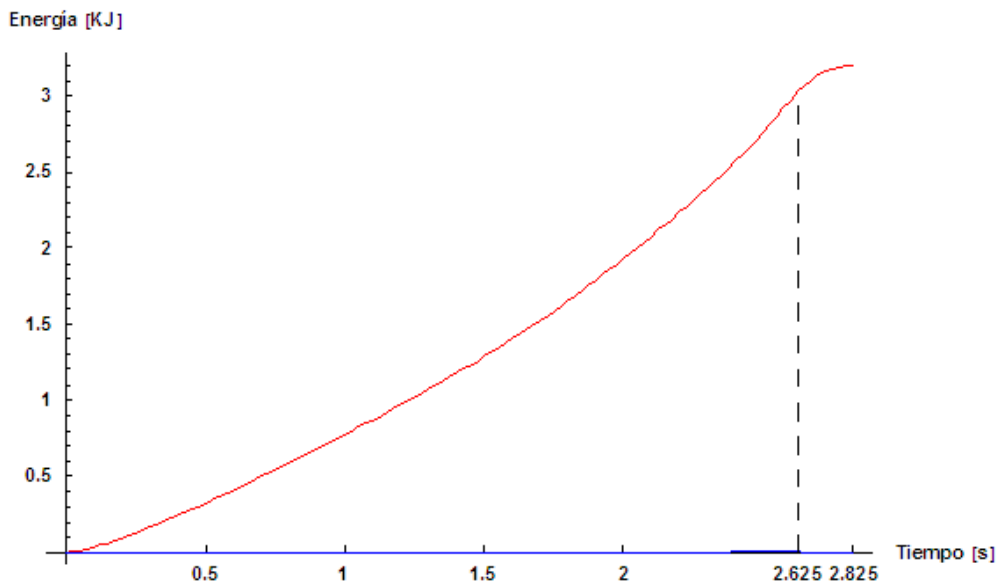


Figura 3. 10 Historia de las energías del modelo. Rojo - Energía interna, Azul – Energía cinética.

Capítulo 4 Resultados.

4.1 Distribución de la deformación.

La Figura 4. 1 ilustra la historia de la deformación de la pieza de trabajo. En la figura se aprecia que la zona de mayor deformación plástica se concentra en la superficie de contacto entre el generador y la pieza durante todo el proceso y se expande a lo largo de la dirección axial conforme progresa la simulación; mientras que la zona inferior de la pieza presenta una deformación casi nula. Al inicio de la simulación (Figura 4. 1b), la región de mayor deformación plástica se concentra en la región superior y no alcanza a penetrar la longitud axial de la pieza, sin embargo, la deformación se ha expandido a lo largo de la dirección radial. Al avanzar la simulación, en el tiempo $t = 1.5 s$ (Figura 4. 1c), la deformación ha alcanzado la superficie inferior de la pieza de trabajo y se ha expandido por toda la superficie lateral de la misma, no obstante, la zona central en la parte inferior permanece sin deformación plástica. En la Figura 4. 1d se puede observar una zona en donde el flujo de material es casi nulo en la parte central de la pieza de trabajo, a pesar de que la deformación plástica ha alcanzado la superficie de contacto entre la pieza y el molde inferior. Al término de la simulación (Figura 4. 1e), la mayor parte de la región superior de la pieza presenta deformación plástica mientras que sólo una pequeña fracción de la misma en la zona central permanece sin flujo plástico. Este resultado es indicativo de la existencia de una zona muerta en donde no se presenta ningún flujo plástico durante todo el proceso; esta zona se concentra en la región central de la parte inferior de la pieza de trabajo. No obstante, la deformación plástica se percibe bastante homogénea, hecho que permitiría que las propiedades mecánicas se presenten más uniformes en la pieza de trabajo.

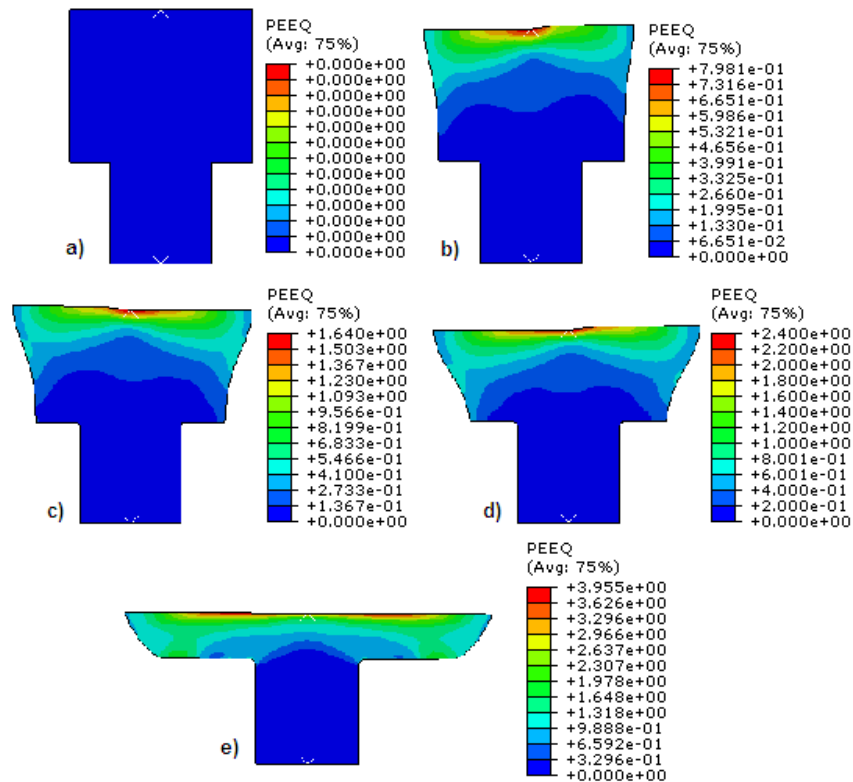


Figura 4. 1 Distribución de la deformación plástica en la sección axial de la pieza de trabajo:

a)t=0.5s, b)t=1s, c)t=1.5s, d)t=2s, e)t=2.625s.

La Figura 4. 2 ilustra las diferencias en la distribución de deformación entre los procesos convencional y rotatorio a un 30% de la deformación total. Se pueden apreciar claras diferencias en el patrón de deformación incluso en el flujo de material durante la simulación. En el proceso de recalado convencional, la deformación plástica se expande en toda la pieza de trabajo, concentrándose en el centro de la pieza y disminuyendo en la dirección radial hacia el exterior de la pieza. Este comportamiento provoca que tanto el diámetro en la superficie inferior como en la superior aumenten desde el inicio del proceso, además, las condiciones de fricción con los moldes ocasiona que la pared exterior de la pieza tome la forma de un barril (abarrilamiento). En cambio, en el proceso rotatorio la deformación se concentra en la superficie de contacto con la herramienta superior y la deformación se expande hacia la superficie inferior. El resultado de este patrón de flujo es un incremento muy marcado del diámetro superior de la pieza mientras que el diámetro inferior no presenta aumento debido a que la zona de deformación plástica no penetra la longitud axial de la pieza (efecto de hongo).

Debido al flujo de material, muy característico del proceso de forja rotatorio, los efectos de fricción y desgaste en los moldes pueden verse reducidos en la fabricación de piezas que requieran cambios de sección importantes en su geometría como en el caso de recalado o formado de cabezas. Los procesos de forjado rotatorio también pueden ser de gran utilidad cuando se plantea el formado de piezas que requieran cambios mínimos de la geometría en la superficie opuesta al molde rotatorio. A pesar de esto, el efecto de hongo puede ser controlado variando algunos parámetros del proceso como el avance y el ángulo del generador, por consiguiente pueden obtenerse, bajo ciertas condiciones, geometrías más regulares.

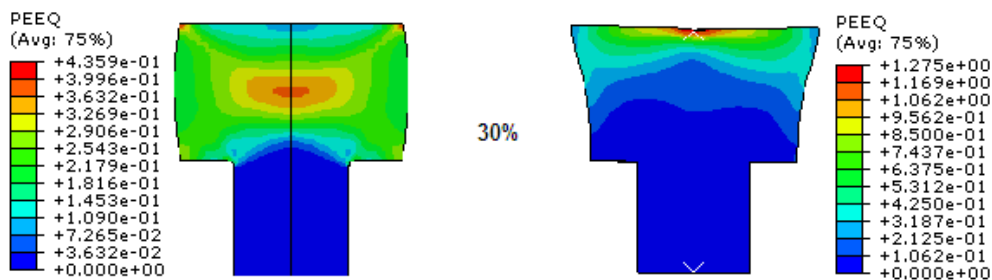


Figura 4. 2 Comparación entre la deformación plástica equivalente de los procesos convencional y rotatorio.

Con la finalidad de comparar la evolución de la deformación plástica equivalente, se eligió un nodo en la superficie superior de la pieza de trabajo sobre la pared cilíndrica, debido a que es la región de nodos que mayor desplazamiento presentan y se esperan altos niveles de deformación plástica para ambos procesos; estos resultados se exponen en la Figura 4. 3. La curva del proceso rotatorio muestra un avance escalonado, muy característico de un proceso de deformación incremental, debido a la transferencia continua de la zona de deformación plástica. La deformación aumenta a cada revolución del generador superior, el ancho del escalón representa el tiempo que tarda en dar una vuelta el generador superior; mientras que la altura del paso representa el aumento en la deformación plástica a cada revolución. Después de $t = 2.625s$ de la simulación, el generador superior detiene su desplazamiento axial y efectúa una rotación para completar la deformación de la pieza, en ese momento la deformación plástica presenta su menor incremento durante la simulación, debido a la recuperación elástica que sufre la pieza mientras el generador vuelve a deslizarse sobre el mismo punto. Al comparar las curvas, es evidente que el nivel de deformación plástica obtenido mediante forja convencional es más elevado y se mantiene así durante toda la simulación.

Pese a que no existe transferencia de carga en el proceso de forja convencional, su evolución no es uniforme, se presentan cambios en su pendiente, es decir, el incremento de la deformación plástica para ese punto no es uniforme durante toda la simulación, se observan aumentos y reducciones en el desarrollo de su curva. Por otro lado, la evolución de la deformación para el proceso rotatorio muestra un comportamiento uniforme durante toda la simulación para el nodo estudiado, el aumento de la deformación plástica se presenta casi constante (altura del escalón) y es afectado únicamente por el cambio continuo en la zona de carga. Al final del proceso la cantidad de deformación plástica es más elevada para el proceso convencional, y debido a este hecho el material puede fallar en las zonas de mayor deformación.

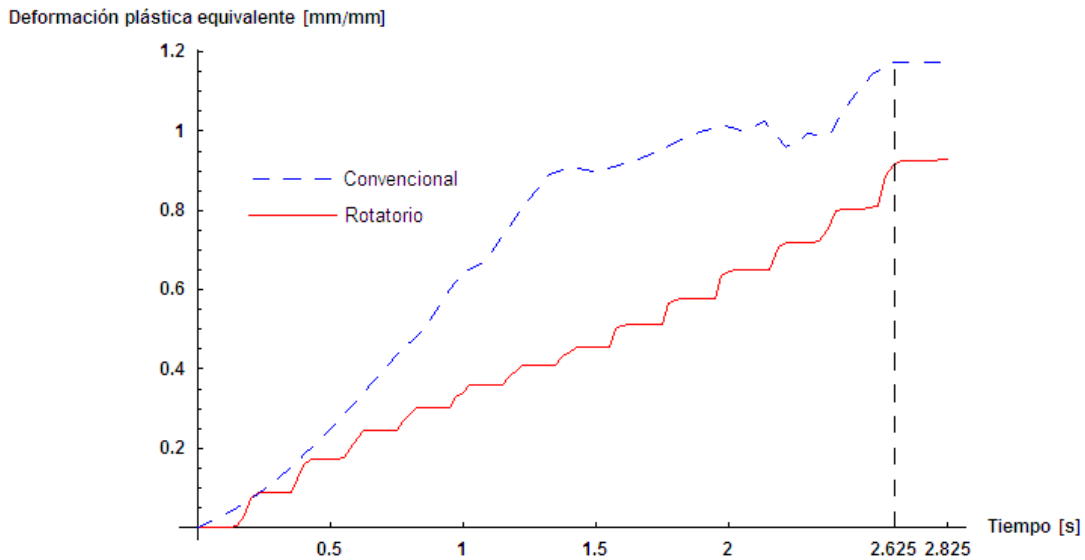


Figura 4. 3 Evolución de la distribución de deformación plástica en un nodo de la superficie superior; rojo- forja rotatoria, azul- forja convencional.

4.2 Flujo de material.

Como resultado de las diferencias entre la distribución de deformación entre ambos procesos, el flujo del material presenta diferencias en la geometría y dimensiones finales de la pieza de trabajo sometida a deformación que deben ser consideradas ya que pueden afectar la tolerancia dimensional de la pieza formada. Como resultado de la oscilación del generador superior, el diámetro superior de la pieza de trabajo se incrementa paulatinamente conforme el generador se desliza sobre el mismo punto mientras comprime la pieza de trabajo en la dirección axial. En la Figura 4. 4 se observa el desarrollo del diámetro superior en función del tiempo para ambos procesos. Como era de esperarse, el desarrollo del diámetro superior para el proceso rotatorio no se desarrolla de manera continua debido a la rotación del generador, y este patrón de crecimiento se mantiene en tanto el molde se desplaza hacia abajo; en el proceso convencional el desarrollo se observa más continuo puesto que las condiciones de fricción en la intercara es el único impedimento para su libre desarrollo; aunque el incremento del diámetro es más continuo, también es más lento en comparación con el proceso rotatorio. Un instante posterior a que el desplazamiento axial del molde superior se ha detenido, el diámetro superior se mantiene constante en el proceso convencional, sin embargo, en el proceso rotatorio sigue creciendo hasta el término del proceso, aunque en la etapa final crece más lentamente. Este hecho se debe a que el movimiento en la dirección axial del generador superior es el principal responsable del flujo del material en la dirección radial. Una vez que el molde superior se ha detenido completamente, es posible apreciar claras diferencias en los perfiles de la pared lateral de la pieza de trabajo.

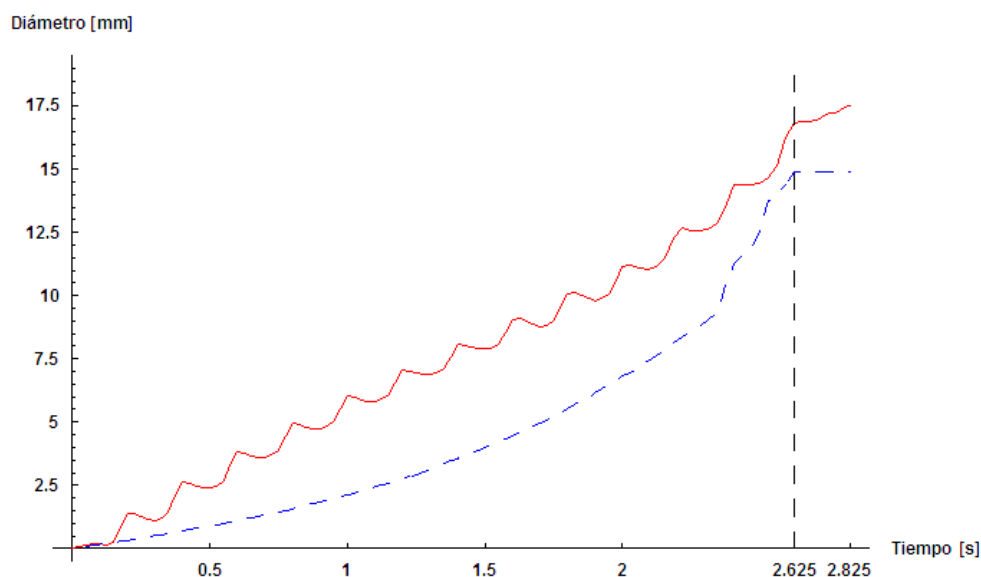


Figura 4. 4 Evolución del diámetro de la superficie superior de la pieza de trabajo; rojo – forja rotatoria, azul – forja convencional.

La Figura 4. 5 ilustra los perfiles de la pieza de trabajo luego de la deformación. El diámetro superior de la pieza obtenida mediante forja orbital, muestra un ensanchamiento mayor por $1.3mm$ en comparación con el perfil del proceso convencional. En el proceso rotatorio, la distribución de la deformación plástica durante la simulación ocasiona que el flujo radial en la superficie inferior no ocurra desde el inicio de la misma; en cambio, en el proceso de forja convencional el diámetro en la superficie inferior comienza su desarrollo desde el inicio de la simulación debido a que la deformación plástica se ha extendido en toda la pieza, por esta razón, el diámetro inferior en la pieza deformada por el forja orbital es menor por $1.175mm$ en comparación con el diámetro de la pieza obtenida en forja convencional. Al observar los perfiles de la Figura 4. 5 se puede apreciar que los patrones mostrados con anterioridad en la Figura 4. 4, mantienen sus características hasta el final del proceso, esto es, el perfil conseguido en forja convencional muestra abarrilamiento en la superficie lateral de la pieza en la parte central de ésta, con una diferencia de $1.869mm$ entre los diámetros de las superficies superior e inferior. Para el perfil obtenido por forja rotatoria (perfil en rojo) la pared lateral no muestra el mismo comportamiento, el efecto de “hongo” se hace notar durante toda la simulación, el diámetro en la superficie superior es mayor que el de la superficie inferior por $3.664mm$ y el radio de la circunferencia del perfil es mucho más abierto que el respectivo perfil logrado por forja convencional.

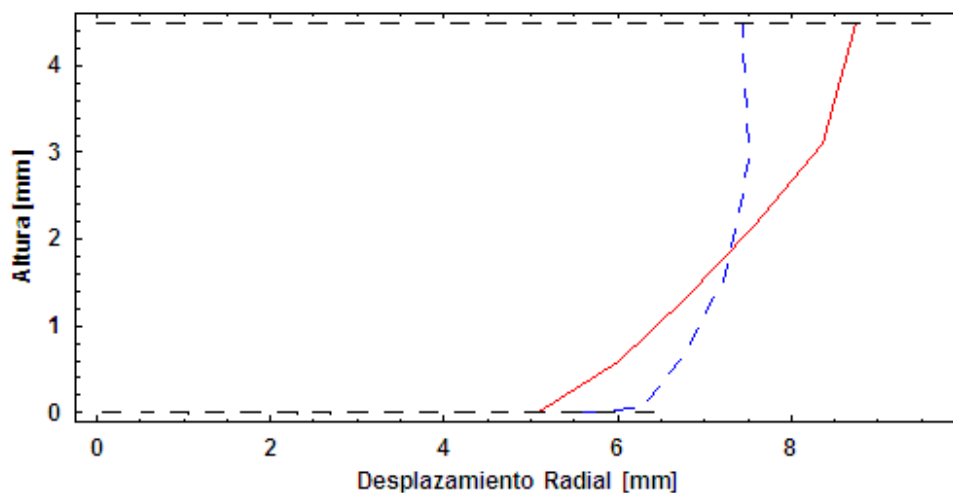


Figura 4. 5 Diferencias entre los perfiles de la pared lateral de la pieza de trabajo; rojo – forja rotatoria, azul – forja convencional.

Como resultado del movimiento del generador superior, el material de la pieza de trabajo obtiene una forma de espiral a lo largo de la dirección axial. En la Figura 4. 6 puede apreciarse el desplazamiento sobre el plano **XZ** de los nodos ubicados en la superficie superior e inferior de la pieza de trabajo. Hay que tener en cuenta que todos los nodos comienzan sobre el eje x y se muestra el desarrollo de los nodos durante la simulación.

Se observa que los nodos ubicados en la superficie superior se ubican sobre la misma línea formando un ángulo promedio de 19.5° , en cambio, los nodos en la superficie inferior muestran un flujo más complejo. Los nodos ubicados más lejos en la dirección radial presentan un ángulo similar al de la superficie superior mientras que los nodos más próximos a la zona muerta presentan un menor desplazamiento en la dirección tangencial y dentro de la zona que está sujeta por el molde inferior no se observa desplazamiento alguno. Este hecho implica que el desarrollo espiral producto de la oscilación del generador superior, se desarrolla desde la superficie de contacto hasta el fondo de la pieza, disminuyendo gradualmente en dirección axial. El efecto que se muestra en la superficie inferior es producto del nivel de deformación obtenido en la pieza, es decir, la influencia del generador superior ha alcanzado la superficie inferior por el desplazamiento axial del molde, sin embargo, la región plástica para esta zona se desarrolla desde la pared exterior hacia el centro de la pieza, y debido a esto el desplazamiento tangencial de los nodos disminuye al acercarse al centro de la pieza.

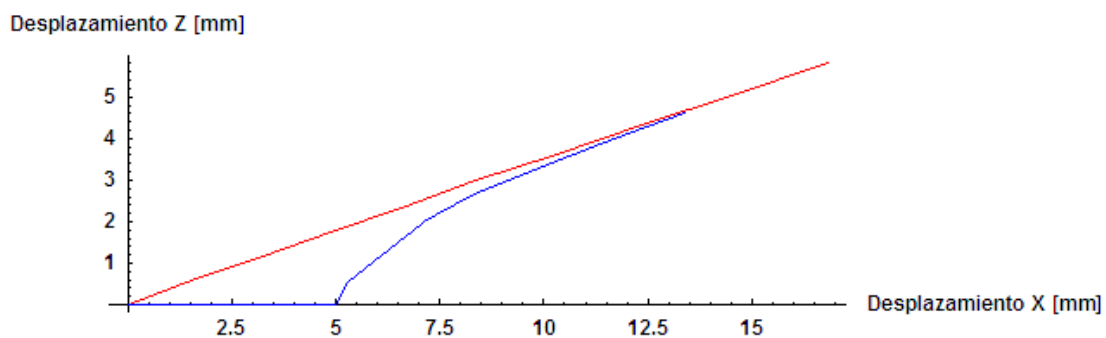


Figura 4. 6 Desplazamiento tangencial de los nodos sobre las superficies de la pieza de trabajo;

rojo – superficie superior, azul – superficie inferior.

4.3 Distribución de esfuerzos en la pieza de trabajo.

En la Figura 4. 7 se muestra la historia del esfuerzo de von Mises para el nodo sobre la superficie superior y la pared cilíndrica que exhibe el mayor desplazamiento radial durante el proceso. Se observa que cuando el generador superior hace contacto con la superficie superior, el esfuerzo se incrementa rápidamente hasta 297 MPa , enseguida el generador se desplaza de ese punto por lo cual el esfuerzo decrece rápidamente hasta 100 MPa , y cuando el generador vuelve a pasar sobre el nodo seleccionado, el esfuerzo se incrementa hasta su valor máximo de 585 MPa , y se mantiene fluctuando alrededor de los 350 MPa . Mientras el generador se mueve sobre la pieza de trabajo, el esfuerzo fluctúa entre su valor máximo y mínimo. La forma de la curva que se muestra en la figura ilustra el movimiento periódico del generador, todos los nodos cercanos a la zona de influencia de deformación plástica presentarán un incremento en el esfuerzo cuando el generador se mueve sobre esa zona, y al alejarse se presenta una caída en el esfuerzo en dicha zona. Sin embargo, el esfuerzo no decrece hasta el mínimo valor de cero durante el formado de la pieza, esto significa que cuando el generador vuelve a rotar sobre la misma zona, dicha región se encuentra pre-esforzada debido a los esfuerzos residuales ocasionados por el paso del generador.

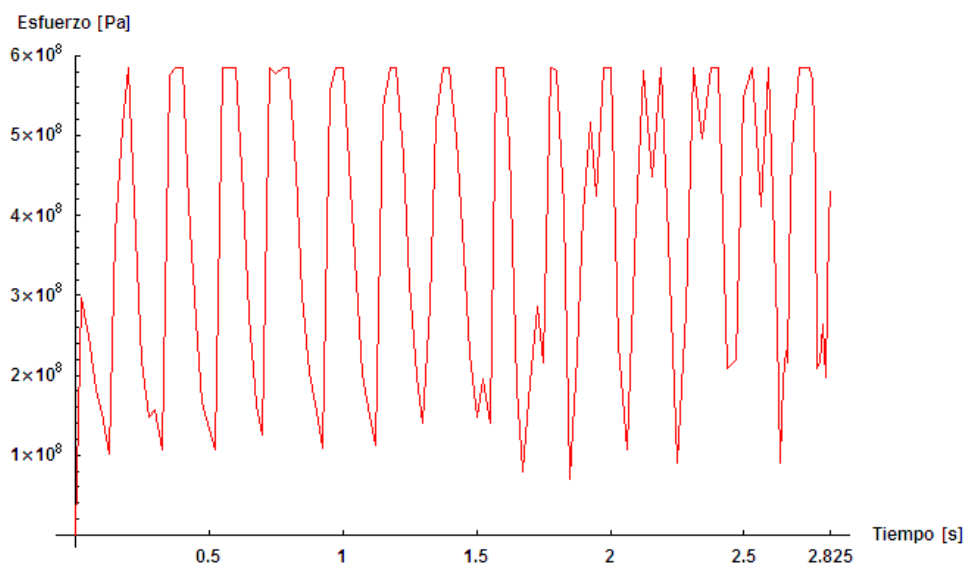


Figura 4. 7 Historia de la evolución del esfuerzo en el nodo seleccionado de la pieza de trabajo.

Como se ha mencionado, la distribución del esfuerzo cambia dependiendo de la posición del generador superior, no obstante, la distribución es muy semejante conforme el tiempo de la simulación avanza (Figura 4. 8 a, b, c y d); la región que muestra el mayor esfuerzo coincide con la zona de contacto con el generador superior y se expande hacia el fondo de la pieza de trabajo, la zona opuesta a la posición en la que se encuentra el generador es la que presenta el menor esfuerzo para ese instante determinado. Esta distribución fluctuante es coherente con la evolución del esfuerzo mostrada en la gráfica de la Figura 4. 7. En las Figura 4. 8e) y f) se observa un cambio drástico en la deformación, esto es debido a que el molde superior detiene el desplazamiento axial pero continúa rotando, esto indica que la mayor cantidad del esfuerzo en la pieza de trabajo es compresivo y se debe al desplazamiento axial del molde mientras que una menor parte del esfuerzo generado en la pieza es debido al movimiento oscilatorio del generador. Una vez que la simulación ha terminado, en la Figura 4. 8 f), el esfuerzo máximo no invade toda la pieza de trabajo, y se concentra principalmente en la zona que rodea a la superficie de contacto con el molde inferior.

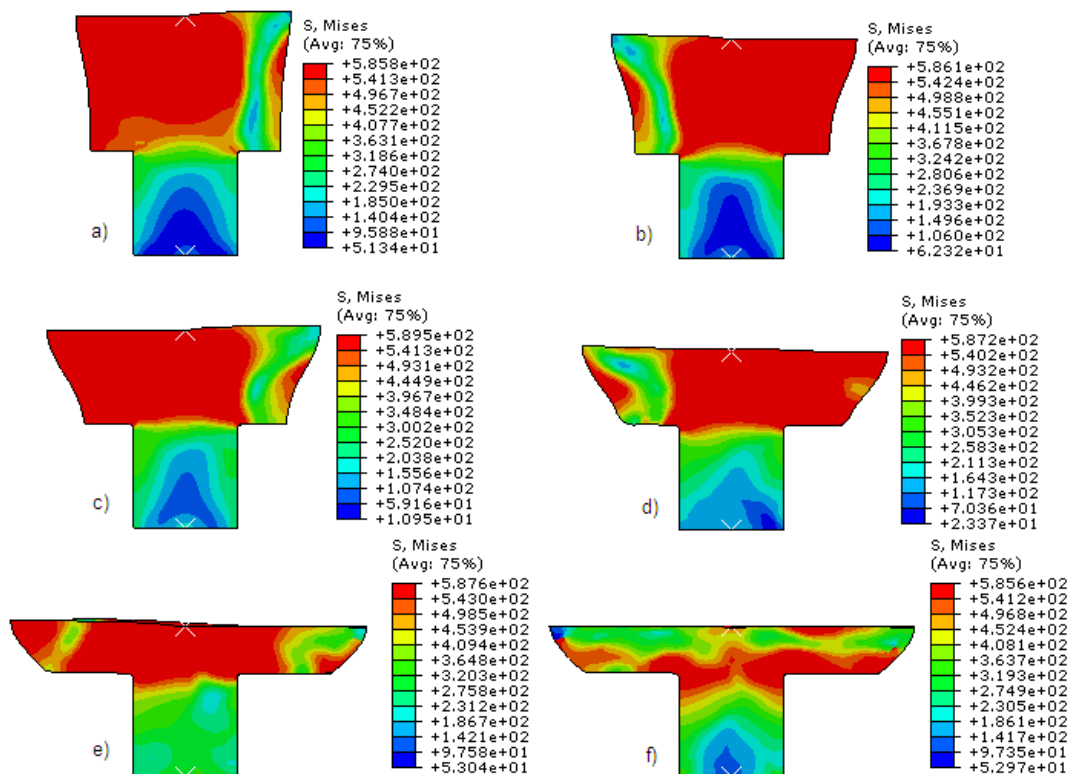


Figura 4. 8 Historia de la evolución del esfuerzo en la pieza de trabajo.

4.4 Fuerza y momento de forja.

Posiblemente la carga de formado es el aspecto más importante a considerar entre los procesos de forja. Al observar el desarrollo de la carga ilustrada en la Figura 4. 9, se aprecia un rápido incremento al inicio del contacto entre los moldes y la pieza de trabajo; dicho incremento es notoriamente mayor para el proceso convencional, en cuyo caso la carga se eleva hasta los 100 *kN* en tanto que la carga en forja rotatoria se eleva hasta 31 *kN* en el mismo incremento de tiempo, es decir, 3.2 veces mayor que la carga axial para el proceso rotatorio. Posteriormente el desarrollo de ambas curvas revela una disminución en la pendiente de la curva, dicha pendiente es menor para el proceso rotatorio, y en una última etapa, la pendiente aumenta nuevamente en ambos procesos. No obstante, la pendiente es mucho mayor en el proceso de forja convencional. Durante toda la simulación, la carga axial se mantiene en niveles inferiores para el proceso rotatorio y como resultado, al final de la simulación, la máxima carga de forja convencional al final de la simulación es de 585 *kN* en tanto que la carga de forja rotatoria máxima alcanza los 136 *kN* que representa una cuarta parte, aproximadamente, de la carga obtenida en forja convencional; esta disminución en la carga de forja representa la principal ventaja del proceso rotatorio frente al proceso convencional. Para completar la deformación total en la pieza de trabajo en el proceso de forja rotatoria, el generador debe ejecutar una vuelta completa después de que ha detenido su desplazamiento ($t = 2.625s$), en ese tiempo la carga axial disminuye drásticamente hasta 7.966 *kN* al final de la simulación.

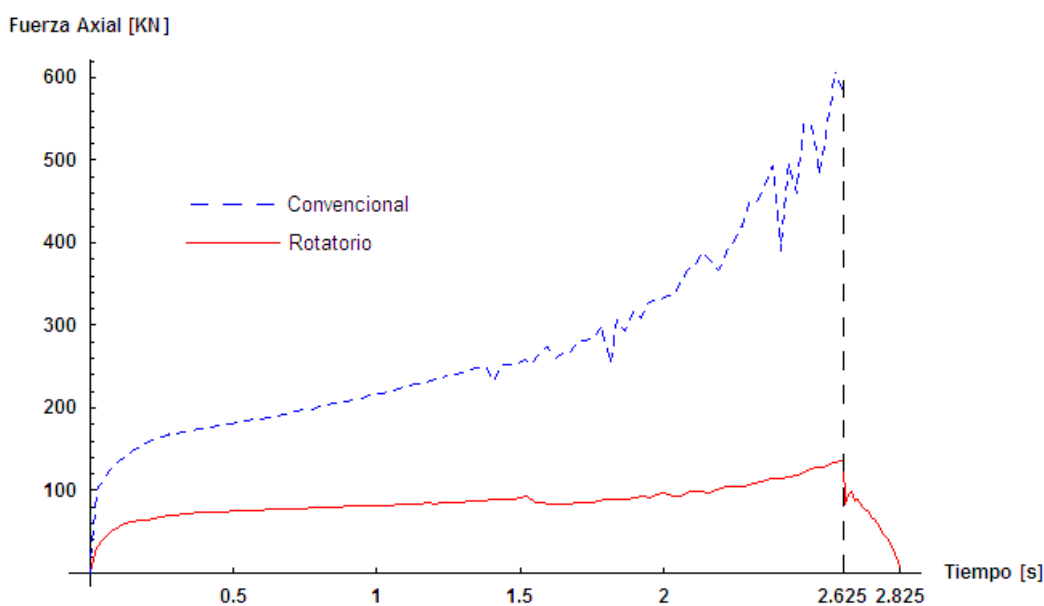


Figura 4. 9 Desarrollo de la carga axial con el tiempo; rojo – forja rotatoria, azul – forja convencional.

Otro parámetro importante a considerar en el proceso de forja rotatoria es el momento de forja; debido a que el generador superior debe oscilar sobre la pieza de trabajo a cierta velocidad, existirá un momento de reacción en el molde inferior debido a este movimiento de las herramientas. En la Figura 4. 10 se presenta el desarrollo del momento de forja con el tiempo de la simulación. Se observa en una primera etapa que al iniciarse el contacto entre el molde superior y la pieza de trabajo el momento se incrementa rápidamente; cuando ha alcanzado un valor de 58 Nm , la pieza de trabajo se encuentra en una etapa en la cual la deformación es muy estable; la magnitud del momento de forja se eleva lentamente con una pendiente casi constante debido al crecimiento del diámetro en la superficie superior y el desarrollo paulatino de la zona plástica. Cuando la deformación plástica ha penetrado la distancia axial y toca la superficie inferior de la pieza, el desarrollo de la curva se torna menos estable; su pendiente comienza a elevarse nuevamente como resultado de la extensión de la zona plástica y mantiene este comportamiento hasta que la herramienta superior detiene su avance axial. Una vez que el molde superior se ha detenido, el momento de forja decrece rápidamente mientras la herramienta termina la deformación en la pieza de trabajo, este hecho indica que existe una mayor dependencia del momento de forja con respecto al avance axial del generador en comparación con el movimiento oscilatorio del mismo.

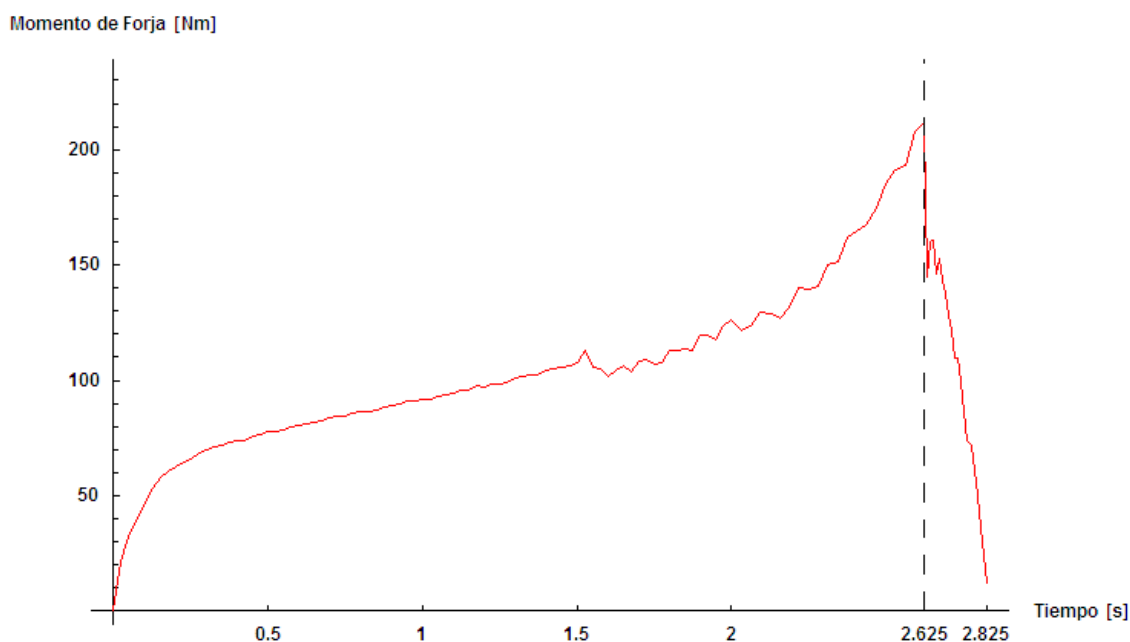


Figura 4. 10 Desarrollo del momento de forja con el tiempo.

4.5 Variación del coeficiente de fricción.

Al incluir condiciones de fricción más severas en el modelo presentado, la malla seleccionada no permitió que el análisis se completara debido a la distorsión excesiva de los elementos. Para este caso en particular, fue necesario crear una nueva malla para prevenir la distorsión de dichos elementos.

La nueva malla se muestra en la Figura 4. 11. Se utilizó la técnica de mallado por barrido frontal en la geometría, los elementos presentan una torsión de 20° en dirección contraria al giro del molde superior a lo largo de la pieza de trabajo, esto con la finalidad de disminuir la distorsión de la malla por efecto del movimiento oscilatorio del molde. Esta nueva malla está conformada en su totalidad por 15,608 elementos hexagonales y 19,553 nodos. La torsión provocada en los elementos de la malla permitió disminuir la deformación provocada por el movimiento del molde, de esta manera el análisis para los diferentes coeficientes de fricción pudo ser completado.

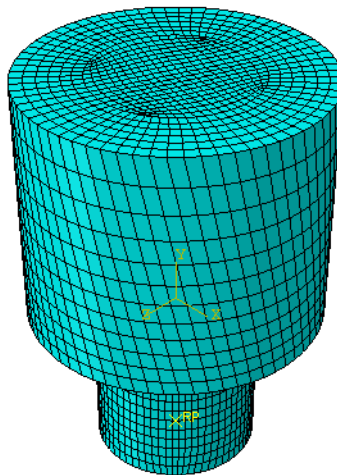


Figura 4. 11 Nueva definición de la malla.

La diferencia máxima entre los valores de carga axial obtenidos para las dos mallas utilizadas en el presente trabajo fue de 10.9%. Pese a que la nueva malla exhibe un valor mayor de carga axial, las proporciones entre los diferentes coeficientes de fricción deberían mantenerse.

En todas las simulaciones previas se utilizó un coeficiente de fricción constante $\mu = 0.15$. Para observar la influencia de las condiciones de fricción en ambos procesos, el coeficiente se modificó de acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 4. 1, manteniendo sin cambios los otros parámetros del proceso.

Tabla 4. 1 Variación del coeficiente de fricción.

Caso	Coeficiente de fricción	Ángulo [°]	Avance "S"[mm/rev]
1	0	4	0.8
2	0.15	4	0.8
3	0.2	4	0.8
4	0.3	4	0.8
5	0.4	4	0.8
6	0.5	4	0.8

En la Figura 4. 12 se observa la influencia del coeficiente de fricción sobre la carga de forja para los procesos de forja rotatoria y forja convencional. Como se esperaba, la carga axial para forja convencional se incrementa para condiciones de fricción más severas; en cambio, la carga para forja rotatoria no presenta una clara tendencia a incrementarse o disminuir por efecto de las condiciones de fricción. Debido al continuo movimiento del generador superior sobre la pieza de trabajo, se presenta poca adherencia entre las superficies en contacto; de esta manera, la fuerza provocada por la fricción se ve disminuida y existe menor restricción al flujo del material en la dirección radial. Como consecuencia, la carga axial muestra cierta independencia en relación a las condiciones de contacto; por esta razón, la carga de formado en el proceso rotatorio no sufre cambios significativos debido al cambio en el coeficiente de fricción.

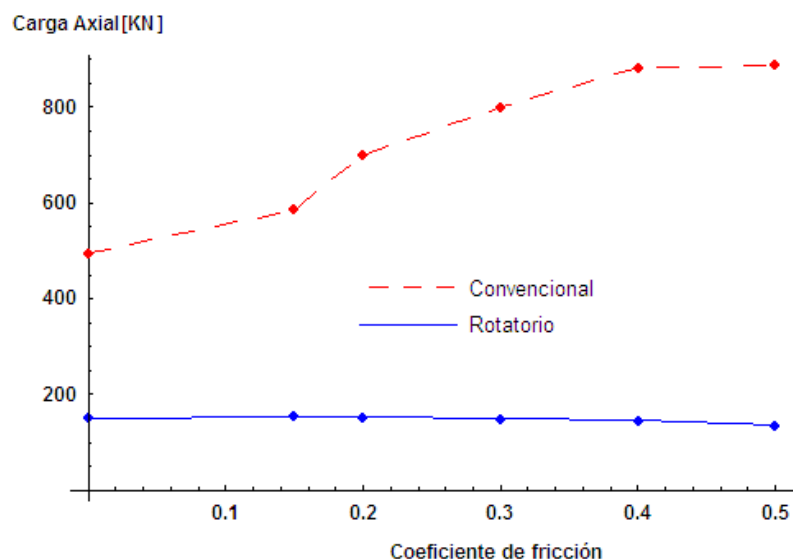


Figura 4. 12 Efecto del coeficiente de fricción sobre la carga axial.

Las condiciones en la intercara influyen principalmente en el momento de forja para el proceso rotatorio. La curva de comportamiento con diferentes coeficientes de fricción se muestra en la Figura 4. 13, se aprecia que el momento de forja se incrementa conforme las condiciones de fricción se muestran más severas. Dicho incremento es prácticamente lineal, en consecuencia con coeficientes de fricción elevados, se incrementa el momento de forja para hacer girar el molde superior sobre la pieza de trabajo. Es importante mantener una buena lubricación durante el proceso para conservar valores bajos del momento de forja, y de esta manera extender el tiempo de vida de los moldes evitando el desgaste provocado por el excesivo rozamiento.

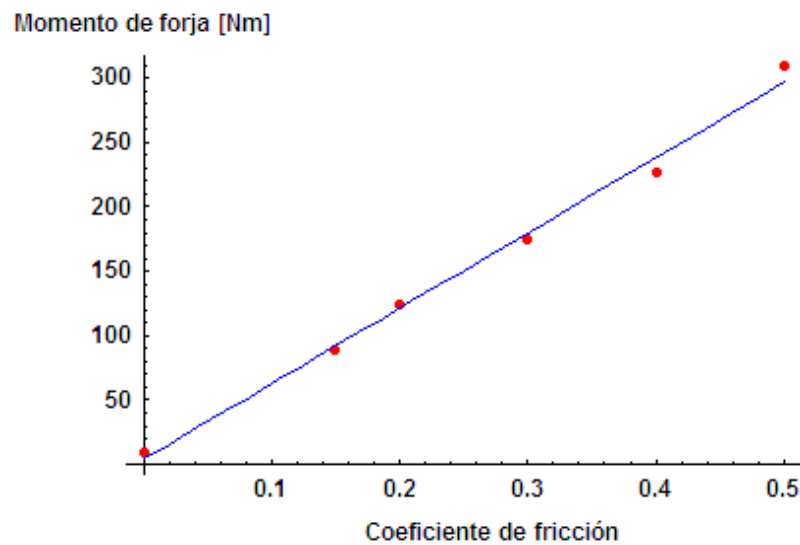


Figura 4. 13 Efecto del coeficiente de fricción sobre el momento de forja.

4.6 Variación del avance por revolución S .

Para observar el efecto de la velocidad de formado en el proceso de forja rotatoria se plantea conveniente utilizar el modelo propuesto con diferentes condiciones de velocidad en los moldes para observar su efecto tanto en el flujo de material como en los parámetros de carga y momento para el proceso. De acuerdo con los trabajos realizados por Hua Lin y Han Shingui en 2008, el comportamiento del proceso se ve afectado por la combinación de los parámetros de velocidad de los moldes, n (velocidad de rotación) y v (velocidad de avance axial), que en conjunto dan lugar al parámetro avance por revolución S . En base a este hecho, se plantearon cuatro velocidades de avance por revolución S para el modelo propuesto en este trabajo como se enlista en la Tabla 4. 2.

Tabla 4. 2 Variación del avance por revolución.

Caso	Avance por revolución S [mm/rev]
1	0.8
2	0.6
3	0.4
4	0.2

Al concentrarse la región plástica cerca de la superficie de contacto con el generador superior, la evolución del diámetro muestra diferencias al disminuir la velocidad de avance. En la Figura 4. 14 se muestra la evolución del diámetro superior con respecto al avance axial del generador. El patrón de comportamiento de todas las curvas es similar, en esta ocasión el ancho del escalón representa el avance por revolución, en tanto que la altura del escalón muestra el aumento en la longitud del diámetro. Al disminuir el avance, el diámetro crece en menor proporción a cada vuelta del generador, es decir, el incremento en la deformación plástica se ve reducido como resultado de una velocidad de avance menor. Pese a esta reducción, la deformación total en ese punto llega a ser mayor debido al número de revoluciones necesarias para completar la deformación. La evolución de las curvas muestra que el diámetro crece más rápidamente con velocidades de avance inferiores, esta diferencia se puede apreciar más claramente al comparar la curva para un avance $S = 0.2$, cuyo desarrollo es mayor desde el inicio de la simulación, en cambio, las velocidades de avance $S = 0.4$, $S = 0.6$ y $S = 0.8$ no muestran una clara tendencia al inicio del proceso.

Como se muestra en la Figura 4. 15 las dimensiones del diámetro superior varían para diferentes valores de S ; en esta curva se percibe que al disminuir el avance, el diámetro final de la pieza tiende a aumentar. El avance por revolución tiene influencia en la extensión de la región plástica en la dirección axial principalmente, ya que al disminuir el avance S la región plástica penetra una menor distancia axial en la pieza de trabajo y se expande más lentamente, como resultado la deformación que se obtiene es menos homogénea en la dirección axial, también se presenta mayor flujo de material en la dirección radial provocando que el ensanchamiento de la superficie superior sea más evidente. Este ensanchamiento no se comporta de manera lineal en relación con la velocidad de avance, existe un mayor aumento en el diámetro superior para velocidades de $S = 0.8$ y $S = 0.6$; en cambio, mientras el avance decrece, la diferencia entre los valores obtenidos para el diámetro superior se vuelve menos evidente.

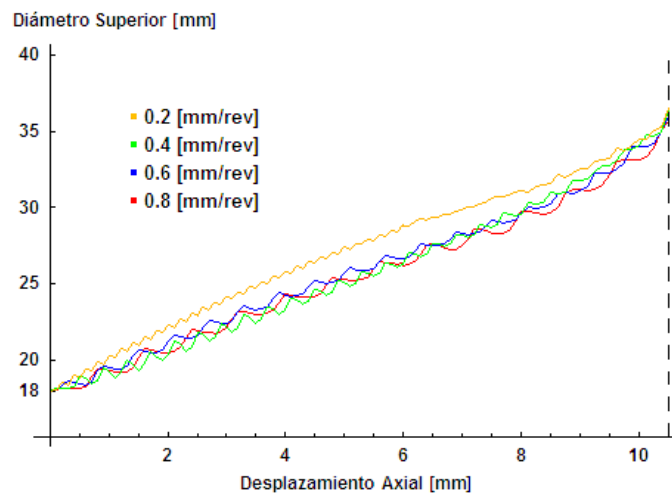


Figura 4. 14 Evolución del diámetro superior.

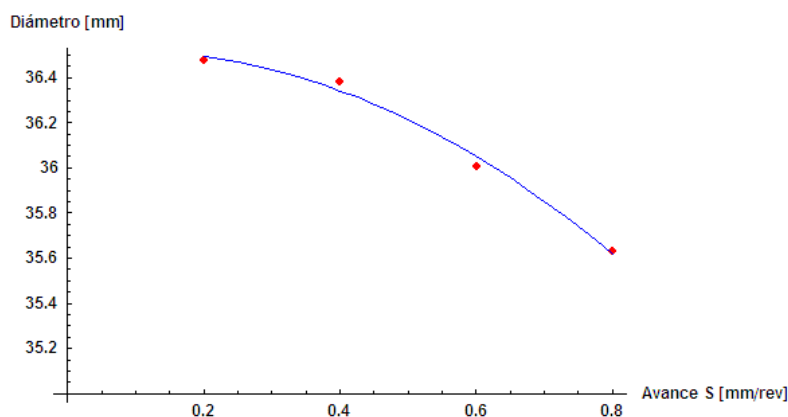


Figura 4. 15 Efecto de la velocidad de avance sobre el diámetro superior.

En los perfiles que se ilustran en la Figura 4. 16 se observa la geometría final de la pared cilíndrica de la pieza de trabajo, la diferencia entre las dimensiones finales pueden observarse claramente entre los diferentes perfiles. Como era de esperarse, no sólo el diámetro superior se ve afectado por el cambio en la velocidad de avance, el diámetro inferior presenta variaciones entre los diferentes modelos. El patrón propio del efecto de hongo se hace presente en todos los modelos, es decir, un diámetro mayor en la superficie superior y un diámetro menor en la superficie inferior, sin embargo las formas de los perfiles presentan diferencias entre sí. Las curvas más homogéneas, con respecto al avance del molde, se presentan para velocidades de $S = 0.8$ y $S = 0.6$ cuyas geometrías son muy similares entre sí, prácticamente la misma diferencia en la longitud de los perfiles se mantiene en toda la altura de la pieza. En contraste para velocidades de avance inferiores, el cambio en la geometría es muy notorio, el diámetro superior para las curvas de avance $S = 0.4$ y $S = 0.2$ presentan una mayor diferencia entre los diámetros superiores e inferiores debido al desarrollo de la región plástica.

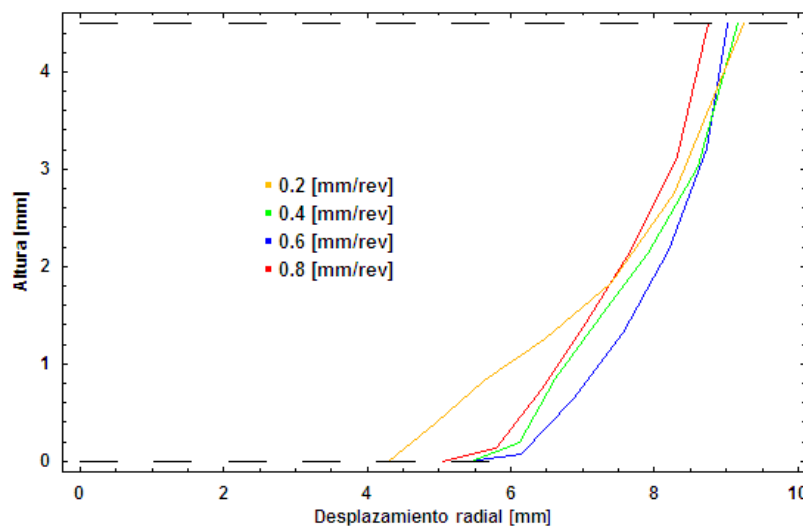


Figura 4. 16 Perfiles obtenidos en la pieza de trabajo para diferentes velocidades de avance.

Para poder cuantificar la deformación no homogénea que se hace presente en la pieza de trabajo, es conveniente utilizar la definición de ensanchamiento de la pared cilíndrica empleada por Hua Lin y Han Shingui en 2008, definida de la siguiente manera:

$$\varphi_D = \frac{D_{sup} - D_{inf}}{D_0};$$

En donde φ_D es el ensanchamiento de la pared cilíndrica, D_{sup} es el diámetro de la superficie superior; D_{inf} es el diámetro en la superficie inferior y D_0 es el diámetro inicial de la pieza de trabajo. Con esta transformación es posible apreciar más claramente la tendencia de la deformación en la pieza de trabajo.

Los resultados presentados en la Figura 4. 17 muestran que la pared cilíndrica es más homogénea cuando se presentan velocidades de avance mayores a $S = 0.6$ en tanto que, cuando se presentan velocidades de avance inferiores, el ensanchamiento de la pared cilíndrica comienza a crecer exponencialmente. Este hecho se debe a que la extensión en la dirección axial de la región plástica se torna más fácil para velocidades de avance mayores provocando que una región mayor de la pieza de trabajo se deforme bajo los efectos del generador superior evitando así que la deformación se concentre en una pequeña región y entregue como resultado un perfil en la pared más homogéneo.

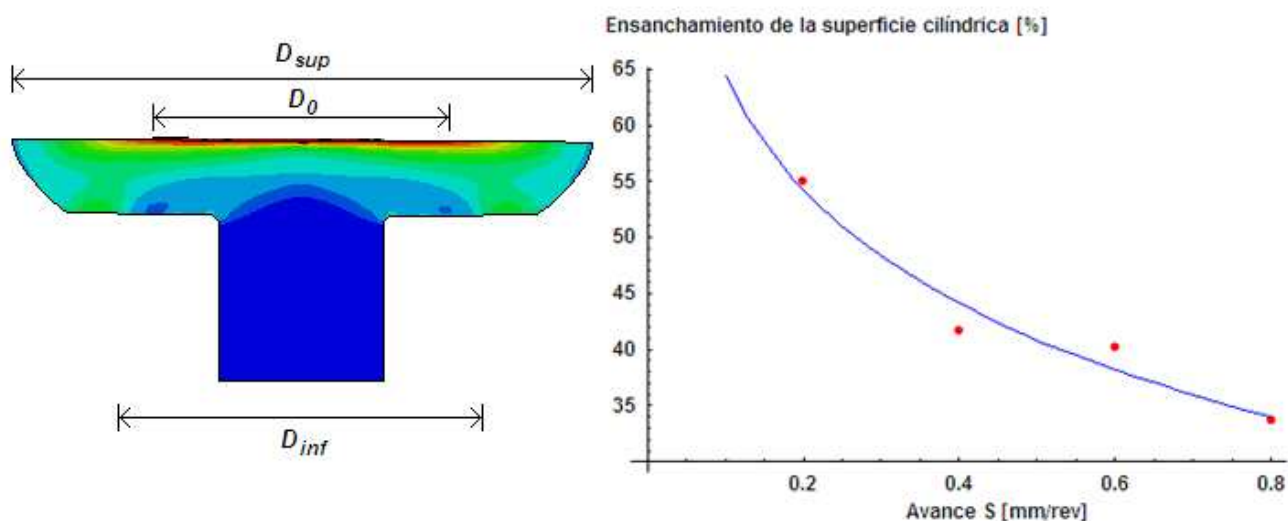


Figura 4. 17 Efecto del avance sobre la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo.

Como se mencionó antes, empleando velocidades de avance pequeñas la región plástica demora más tiempo en extenderse sobre toda la pieza de trabajo provocando una deformación menos homogénea, este hecho también influye en el comportamiento de la carga axial y el momento de forja. En la Figura 4. 18 se muestran los resultados obtenidos en la carga axial de forja para las diferentes velocidades de avance propuestas. Como era de esperarse, la carga se incrementa con velocidades de avance mayores ocasionado por una mayor extensión de influencia de la región plástica. No obstante, el incremento no se comporta linealmente con respecto a la velocidad de avance, de hecho, se observa que la carga axial sufre un incremento mayor para velocidades de avance menores a $S = 0.6 \frac{mm}{rev}$ según lo muestra la línea de tendencia de la Figura 4. 18, es decir, el control de la carga de forja puede realizarse exitosamente mediante la variación del avance dentro de este rango. Sin embargo, utilizando velocidades de avance superiores no se obtiene el mismo control sobre la carga de forja, la ganancia obtenida en el proceso mediante el control del avance resulta menos eficiente en este caso.

El momento de forja exhibe un comportamiento similar, el valor máximo de momento disminuye al reducir el avance. Se observa la misma tendencia con respecto al avance, el incremento de la magnitud del momento de forja es más significativo conforme se reduce el avance dentro del rango evaluado en el presente trabajo. La influencia del avance sobre el momento de forja pierde relevancia al incrementar el avance, por tal motivo es de esperarse que se obtenga un mayor control del momento cuando se mantienen magnitudes pequeñas en la velocidad de avance.

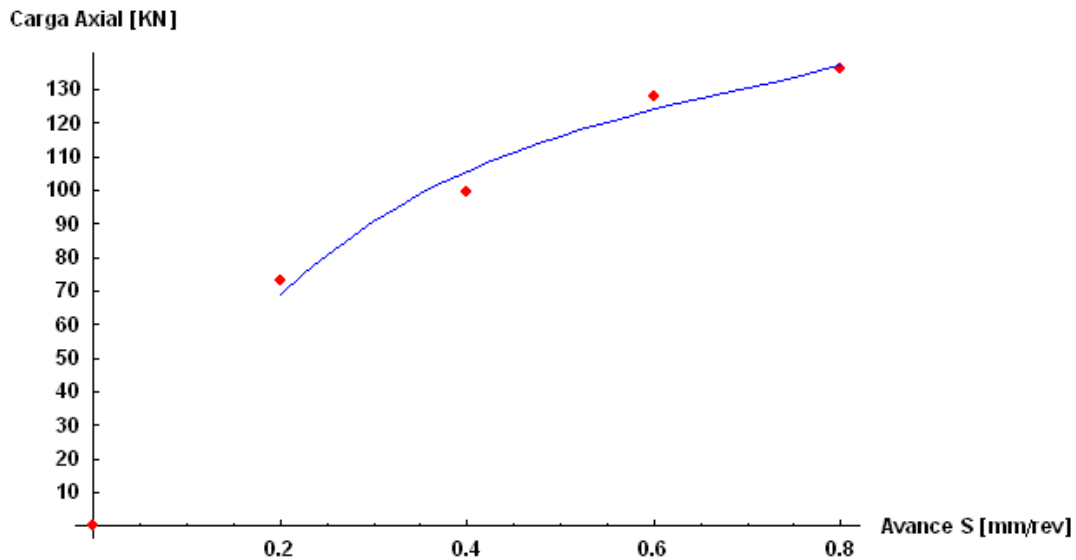


Figura 4. 18 Efecto del avance sobre la Carga Axial.

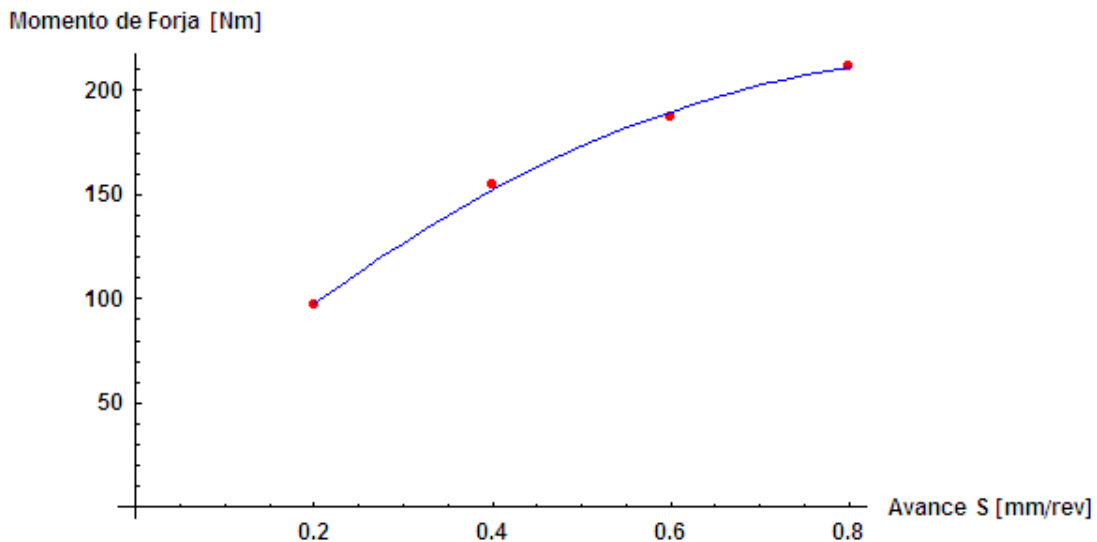


Figura 4. 19 Efecto del avance sobre el momento de forja.

4.7 Variación del ángulo de inclinación α en el molde superior.

Otro parámetro importante a considerar debido a la influencia que presenta en el flujo del material y los parámetros de fuerza y momento en el proceso, es el ángulo de inclinación del generador superior α . Para poder estudiar su efecto, se planteó en el presente trabajo, variar el ángulo del generador según se muestra en la Tabla 4. 3 manteniendo para este fin el mismo avance S en todas las simulaciones.

Tabla 4. 3 Variación del ángulo de inclinación.

Caso	Ángulo del molde [°]	Avance por Revolución "S"[mm/rev]
1	1	0.8
2	2	0.8
3	3	0.8
4	4	0.8
5	5	0.8

En la Figura 4. 20 se advierte el efecto de la variación del ángulo de inclinación del molde en el área de contacto con la superficie de la pieza de trabajo. Se hace evidente que el área de contacto aumenta conforme el ángulo del molde es más pequeño y disminuye para ángulos de inclinación mayores. También puede notarse que esta diferencia en el área de contacto es mucho más clara para un ángulo de 1° y disminuye progresivamente conforme el ángulo decrece, tanto que para los ángulos de 4° y 5° la diferencia entre ambos es mínima.

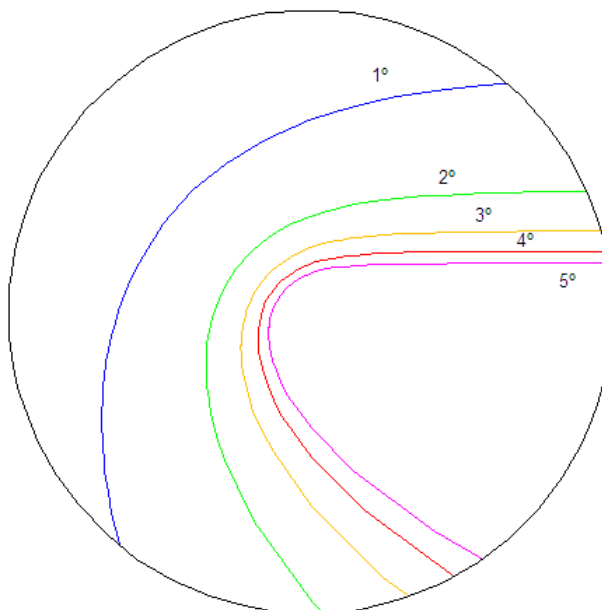


Figura 4. 20 Efecto del ángulo de inclinación sobre el área de contacto.

Con un incremento en el área de contacto con la pieza de trabajo, la zona de deformación plástica debe aumentar proporcionalmente, ocasionando que se extienda a mayor velocidad y generando una deformación mucho más homogénea dentro de la pieza de trabajo. En la Figura 4. 21 se presentan los perfiles de la pared cilíndrica obtenidos para las variaciones en el ángulo del molde enunciadas con anterioridad. Como era de esperarse el perfil obtenido para un ángulo de 1° muestra la menor diferencia entre los diámetros superior e inferior, esto debido a que la extensión de la región plástica dentro de la pieza se extiende más fácilmente en la dirección axial, permitiendo que el diámetro en la superficie inferior se incremente más en comparación con los demás ángulos propuestos para el generador. Las curvas para 2° y 3° revelan un desarrollo mayor del diámetro superior con respecto al inferior en mayor proporción en relación con la curva obtenida para 1° . En cambio, los perfiles obtenidos para los ángulos de 4° y 5° exhiben la mayor diferencia entre sus diámetros superior e inferior, este hecho indica que el progreso de la región plástica se ha visto reducido debido a la disminución en el ángulo y en consecuencia la mayor deformación se concentra en la superficie superior.

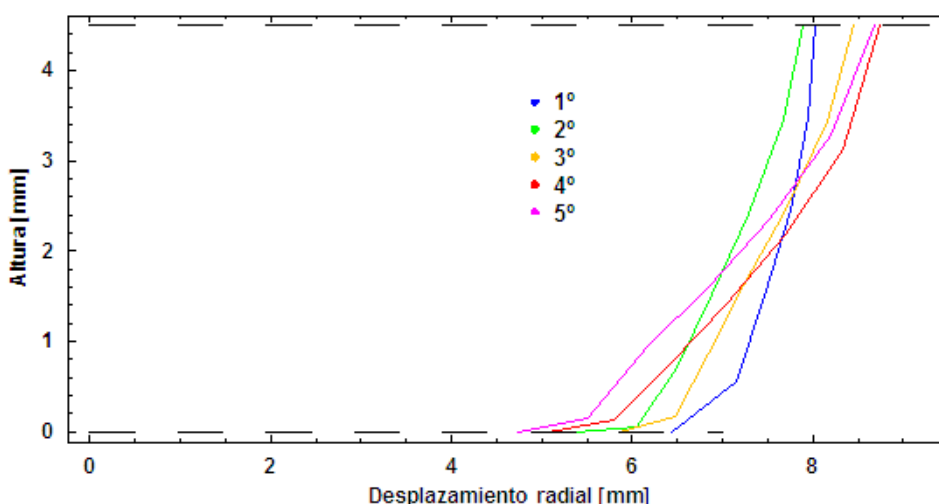


Figura 4. 21 Efecto del ángulo de inclinación sobre el perfil de la pared cilíndrica.

Para cuantificar el grado de deformación no homogénea de la pared cilíndrica, nuevamente se empleó el concepto de ensanchamiento de la superficie cilíndrica definido anteriormente. En la Figura 4. 22 se expone el efecto del ángulo sobre este parámetro. Se aprecia que la pared cilíndrica obtenida mediante un ángulo de 1° en el molde superior, tiene el menor porcentaje de ensanchamiento, esto indica que la superficie es la más homogénea dentro del rango especificado en este trabajo.

Como era de esperarse, la superficie muestra un mayor porcentaje de ensanchamiento para ángulos más grandes, es decir, la deformación se torna menos homogénea cuando se aumenta el ángulo de inclinación en el generador superior. En conclusión, el flujo del material que provoca en la pared cilíndrica un mayor grado de heterogeneidad, puede controlarse variando el ángulo de inclinación del molde.

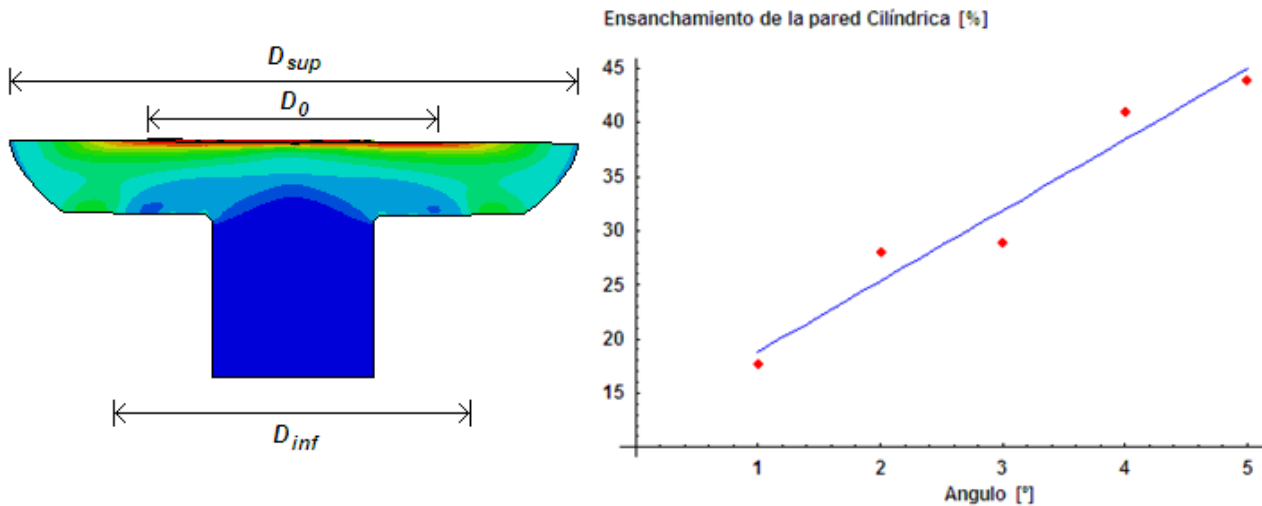


Figura 4. 22 Efecto del ángulo sobre el ensanchamiento de la pared cilíndrica.

Los parámetros de carga y momento también se ven influenciados por el aumento o reducción en la superficie de contacto entre el molde y la pieza de trabajo. La carga máxima de forja y el momento de reacción en el molde superior se muestran en las Figura 4. 23 y Figura 4. 24 respectivamente. Ambas curvas revelan un comportamiento similar, tanto la carga como el momento de forja disminuyen gradualmente con el aumento en el ángulo de inclinación; sin embargo, esta reducción no se comporta de manera lineal, es decir, este ahorro tanto en la carga como en el momento de forja se torna menos eficiente para ángulos mayores a 3°. En cambio, ambos parámetros manifiestan un incremento exponencial dentro del rango de 1° a 3°. Este comportamiento puede explicarse al observar la superficie de contacto obtenida para diferentes ángulos, tanto la carga y el momento exhiben un comportamiento similar debido a que dependen del área de contacto entre el generador y la pieza de trabajo, al incrementar el área de contacto también se incrementa la región plástica y se extiende más fácilmente dentro de la pieza de trabajo, por consiguiente tanto mayor sea el área de contacto mayor será el incremento en la carga axial y el momento de forja.

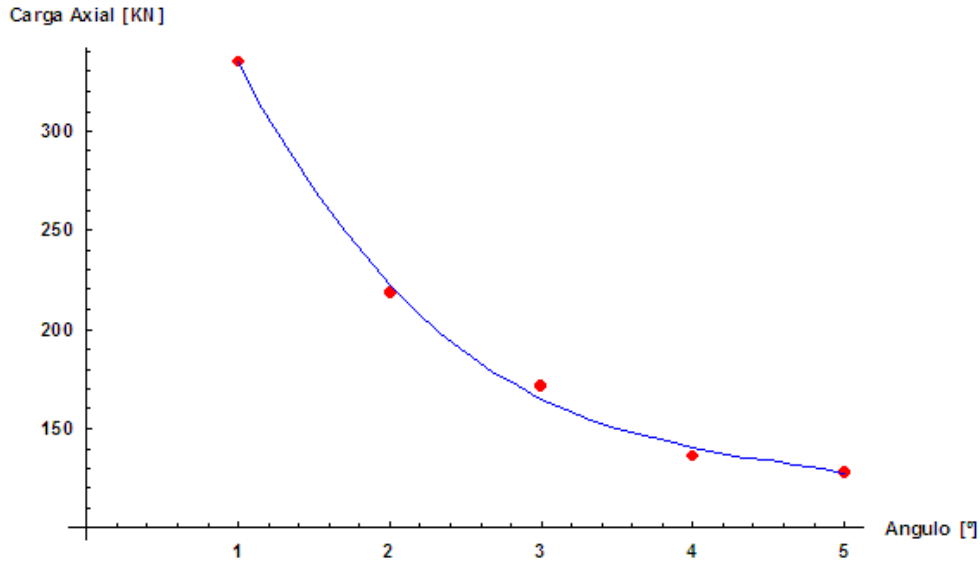


Figura 4. 23 Efecto del ángulo de inclinación sobre la carga axial.

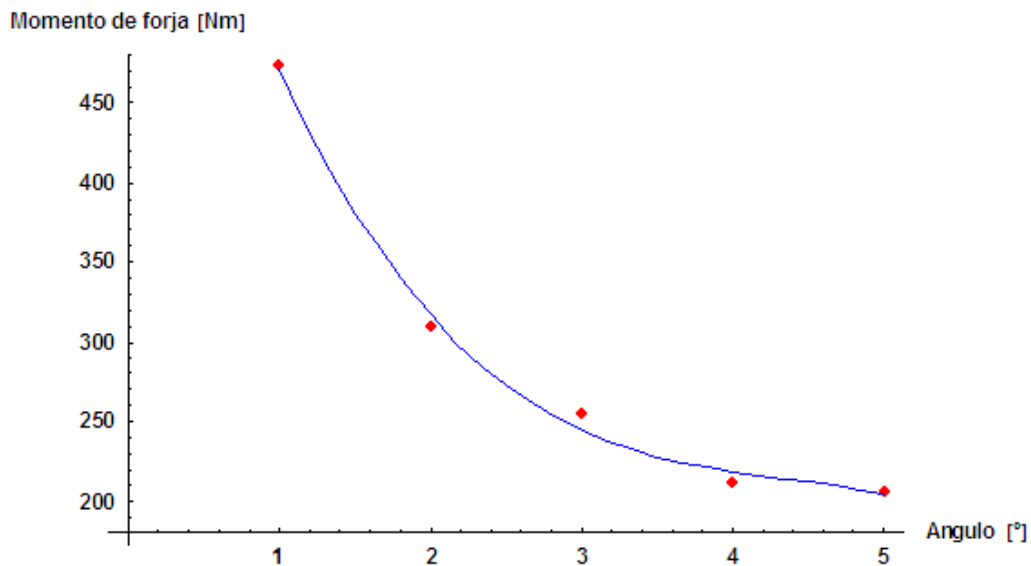


Figura 4. 24 Efecto del ángulo de inclinación sobre el momento de forja.

El movimiento del generador sobre la pieza de trabajo, origina una fuerza radial sobre el molde superior. Esta fuerza se vuelve importante debido a que debe mantenerse en niveles suficientemente bajos y de esta manera no se comprometa el marco de la prensa empleada. El porcentaje que representa la fuerza radial en la magnitud de la fuerza empleada por la prensa para producir la deformación en la pieza de trabajo se indica en la Figura 4. 25, el porcentaje de dicha fuerza se incrementa con una inclinación mayor del molde superior, no obstante, el mayor incremento en porcentaje de la carga radial se observa entre 1° y 2° y comienza a reducirse de tal manera que el incremento entre 4° y 5° es mucho menor.

La magnitud de la carga radial, en cambio, no continúa aumentando con el ángulo de inclinación, su variación con respecto de ángulo del molde se exhibe en la Figura 4. 26. La gráfica sufre un aumento significativo en el rango de 1-2 °, esto indica que el mayor incremento en la carga radial se presenta en ángulos pequeños, esto se debe a que la carga es muy elevada, y pese a que la carga radial representa un menor porcentaje de la carga total muestra un valor más alto, en comparación con inclinaciones mayores del molde. Posteriormente la carga decrece a un ritmo menor, esto se debe a que la magnitud de la carga máxima es afectada principalmente por la carga axial, al reducirse la carga axial se reduce la magnitud máxima de la carga de forja. Esta reducción afecta proporcionalmente la carga radial, por esta razón, su magnitud no continúa incrementándose con el ángulo de inclinación. De acuerdo a los resultados obtenidos con el modelo presentado, la carga radial no aumenta en magnitud con ángulos de inclinación mayores, al contrario, la carga se reduce. En consecuencia, el mayor riesgo para el equipo, debido a la carga radial generada en el proceso, se presenta para ángulos pequeños.

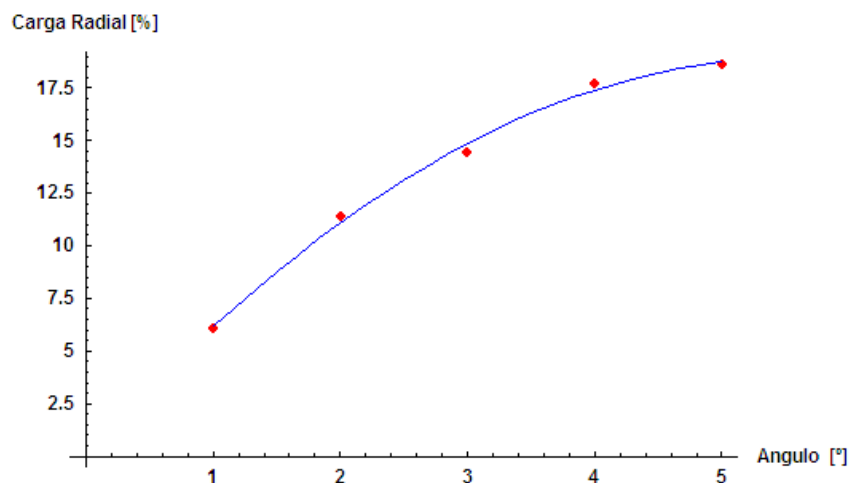


Figura 4. 25 Efecto del ángulo en el porcentaje de la carga radial.

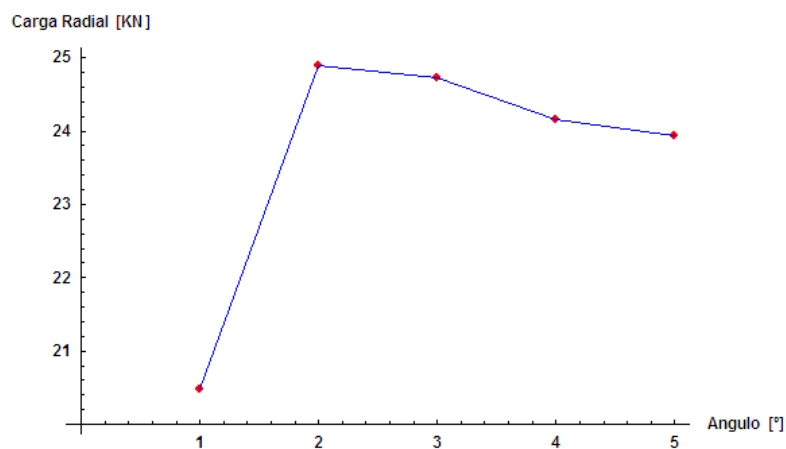


Figura 4. 26 Efecto del ángulo sobre la carga radial.

Capítulo 5 Conclusiones.

Dentro del modelado y simulación de procesos de manufactura, resulta fundamental una construcción adecuada de la malla utilizada para el análisis. Sin embargo, cuando se presentan cambios importantes en la geometría de la pieza, resulta necesario el empleo de métodos y técnicas de remallado con la finalidad de obtener una solución aproximada que describa correctamente la evolución del proceso.

Para construir la malla empleada en el presente trabajo, se utilizaron las técnicas de partición de dominio e inserción de nodos en la geometría de la pieza inicial, con estas herramientas se consiguieron diferentes densidades de mallado de acuerdo a la deformación esperada en cada zona, no obstante, resultó necesario el uso de técnicas de remallado para poder representar correctamente la deformación final de la pieza. Así mismo, se empleó el método de remallado adaptativo **ALE** (Arbitrario Lagrangiano-Euleriano) con elementos enteramente hexaédricos, debido a que es posible obtener un mejor control del remallado con este tipo de elementos. Sin embargo, esta herramienta presenta inconvenientes cuando se trabaja con diferentes densidades de mallado en la geometría; principalmente, se encontró un remallado indeseable en ciertas zonas debido a que los métodos de reposicionamiento suavizan la distorsión de la malla en toda la región, esto provoca que las densidades de mallado previamente definidas sean afectadas por el método de reposicionamiento. La división del proceso en diferentes pasos o etapas permitió incorporar diferentes controles de remallado a las particiones realizadas en la geometría. Mediante el empleo de diversas condiciones de remallado en las diferentes etapas de la simulación, el método ALE fue capaz de entregar una solución eficiente al proceso de forja rotatoria.

Debido a la cantidad de elementos en la geometría de la pieza y el tamaño de los mismos, el tiempo de incremento que estabiliza el sistema resultó muy pequeño, este hecho influyó directamente en el número de incrementos necesarios para llevar a cabo la simulación y el tiempo de cálculo utilizado. Con el fin de manipular el número de incrementos, de manera que pueda hacerse más eficiente en comparación con los resultados obtenidos por Canta T. en 1998, se hizo uso de la técnica de escalamiento de masa, de forma que la solución obtenida fuese lo suficientemente aproximada a un costo computacional aceptable. Los valores obtenidos con el uso de diversos factores de escalamiento no mostraron grandes divergencias entre los valores comparativos de carga axial; sin embargo, cuando se eleva demasiado el factor de escalamiento, se presenta distorsión excesiva en algunos elementos de la malla.

Aunque puede parecer atractivo el empleo de altos factores de escalamiento de masa debido a la obtención de un costo computacional bajo, deben considerarse, además de los efectos inerciales, la distorsión en los elementos puesto que ésta ocasiona que la geometría predicha presente inconsistencias que pueden afectar la simulación. Por otro lado, al disminuir el factor de escalamiento, también se reduce la distorsión de los elementos, sin embargo, se encontró que por debajo de un factor de 10000 el tiempo de cálculo se incrementa en forma considerable.

Al comparar la deformación y el flujo de material entre los procesos de forja convencional y orbital se aprecian claras diferencias entre ambos. En el proceso convencional, la deformación plástica se concentra en el centro de la pieza y se desarrolla en dirección radial hacia el exterior de la misma, la región plástica se expande en la pieza de trabajo desde el inicio del proceso. En cambio, en el proceso de forja rotatoria, la deformación plástica se concentra en la zona de contacto con el generador superior y se desarrolla hacia abajo en la dirección axial de la pieza. Al término del proceso, se observa una distribución uniforme de la deformación, no obstante, se revela la existencia de una pequeña zona en la parte inferior de la pieza en donde no se presenta deformación plástica. Esta heterogénea distribución de la deformación, característica del proceso orbital, determina el tipo de piezas que pueden ser fabricadas mediante este proceso, esto es, preferentemente aquellas que requieran una mayor cantidad de deformación y flujo de material en un extremo de la pieza.

En el proceso convencional, la fricción entre los moldes y la pieza de trabajo ocasiona que la pared cilíndrica se deforme en la parte central de la pieza, tomando la forma de un barril. Por el contrario, en el proceso de forja rotatoria, el movimiento combinado del molde superior provoca flujo radial en la superficie superior, como resultado se encontró un mayor desarrollo del diámetro superior (efecto de hongo) en comparación con el diámetro inferior. El material de la pieza de trabajo muestra una torsión en la misma dirección del giro del molde; la torsión se extiende en toda la dirección radial de la superficie superior, en cambio, en la superficie inferior la torsión se presenta cercana a la superficie cilíndrica y disminuye conforme se acerca al centro de la pieza.

La carga axial de deformación resultó cuatro veces menor en el proceso de forja rotatoria en comparación con la requerida para forja convencional, este hecho revela que existe un ahorro importante por disminución en la carga de formado, pese a esto, el proceso rotatorio requiere una mayor cantidad de tiempo para completar la deformación. El ahorro que puede presentar el proceso de forja rotatoria en comparación con el proceso convencional debe estudiarse para cada caso en particular, ya que el ahorro en la carga de forja puede no ser sustancialmente importante si se compara con el tiempo y la producción necesaria, lo cual en lugar de representar un beneficio puede ocasionar pérdidas.

Para poder completar la simulación del proceso con diferentes coeficientes de fricción resultó necesario utilizar una nueva malla debido a que la deformación provocada por las condiciones en la intercara ocasionó una distorsión excesiva en los elementos. La nueva malla se generó con una torsión en dirección contraria al movimiento del generador; esta nueva malla presentó un mejor desempeño debido a la dirección en los elementos permitiendo así completar la simulación.

El coeficiente de fricción reveló importantes diferencias en las cargas de forja entre los procesos estudiados. Mientras que la carga en forja convencional muestra una clara tendencia a incrementarse conforme el coeficiente de fricción crece, el proceso rotatorio no muestra el mismo comportamiento. En este caso, la carga se mantiene prácticamente sin cambios, este hecho revela que la carga axial no depende del coeficiente de fricción presente en la intercara. Por otro lado, el momento de forja mostró una tendencia casi lineal con respecto de las condiciones de contacto.

Al disminuir el avance por revolución, se encontró que la región plástica disminuye su extensión ocasionando que el efecto de hongo se torne más evidente, al final de la simulación, el ensanchamiento en la pared cilíndrica muestra valores mucho más elevados con avances pequeños y en consecuencia presenta una mayor relevancia con estos valores. Al existir una región plástica menos desarrollada, la carga y el momento de forja también se ven afectados. La carga y el momento de forja disminuyen gradualmente con el avance, esta disminución se torna más evidente mientras el avance disminuye. Cuando la velocidad de avance es superior a 0.6 mm/rev , el incremento tanto en la carga como en el momento de forja se aprecian disminuidos. En consecuencia, la carga y el momento de forja son más sensibles al cambio en el avance por revolución mientras menor sea la magnitud del avance.

El efecto del ángulo de inclinación causa variación del área de contacto entre el generador y la pieza. Al incrementar el ángulo de inclinación, el área de contacto entre el generador y la pieza de trabajo disminuye gradualmente, esto provoca que la deformación plástica se extienda menos, provocando un mayor grado de ensanchamiento en la pared cilíndrica. Al existir un área de contacto menor sobre la pieza, tanto la carga como el momento disminuyen proporcionalmente a esta disminución. Cuando la inclinación se ubica superior a los 4° , la disminución en estos parámetros es apenas perceptible; en cambio, con inclinaciones inferiores a este valor se percibe un aumento significativo. Como resultado de la inclinación del molde superior, existe una carga en dirección radial de la pieza de trabajo. La carga radial aumenta en porcentaje de la carga total de forja conforme aumenta el ángulo de inclinación; sin embargo, la magnitud máxima de la carga radial se obtuvo para 2° y posteriormente presentó un ligero descenso. Esto revela que inclinaciones superiores a 2° no presentan un riesgo a la integridad del equipo empujado, debido a que la carga no continúa aumentando; sin embargo, manejar inclinaciones superiores a 4° realmente no representa una ventaja al proceso, en cuestión de la carga de formado o momento de forja.

Bibliografía y Referencias.

1. ASM Handbook, *Forming and Forging*, Ed. International Handbook Committee, E. U. A., 2000.
2. Canta T., Frunza D., Sabadus D., Tintelecan C., *Some aspects of energy distribution in rotary forming process*, Journal of Materials Processing Technology, Rumania ,1998.
3. Choi S., Na K. H., Kim J. H., *Upper-bound analysis of the rotary forging of a cylindrical billet*, Journal of Materials Processing Technology, Corea del Sur, 1997.
4. Dieter George E., *Mechanical Metallurgy*, Ed. McGraw-Hill, E.U.A., 1988.
5. Dixit Prakash M., Dixit Uday S., *Modeling of Metal Forming and Machining Processes*, Ed. Springer-Verlag, Londres, 2008.
6. Frey Pascal Jean, George Paul-Louis, *Mesh Generation. Application to finite Element*, Hermes Science, Reino Unido, 2000.
7. Grozav Sorin-Dumitri, CRAI Alina, *Relative spiral feed during orbital deformation in the analyse of technological parameters in orbital deformation*, Fascicle of Management and Technological Engineering, Rumania, 2007.
8. Guangchun Wang, Guoqun Zhao, *Simulation and analysis of rotary forging a ring workpiece using finite element method*, Finite Elements in Analysis and Design, China, 2002.
9. Guangchun Wang, Jing Guan, Guoqun Zhao, *A photo-plastic experimental study on deformation of rotary forging a ring workpiece*, Journal of Materials Processing Technology, China, 2005.
10. Guangchun Wang, Kemin Xue, Yan Lu, *Methods of dealing with some problems in analyzing rotary forging with the FEM and initial application to a ring workpiece*, Journal of Materials Processing Technology, China, 1997.
11. Guangchung Wang, Gouqun Zhao, *A three-dimensional rigid-plastic FEM analysis of rotary forging deformation of a ring workpiece*, Journal of Materials Processing Technology, China, 1999.
12. Han Xinghui, Hua Lin, *3D FE modeling simulation of cold rotary forging of a cylinder workpiece*, Material and Design, China, 2008.
13. Han Xinghui, Hua Lin, *Effect of size of the cylindrical workpiece on the cold rotary-forging process*, Material and Design, China, 2009.
14. Horvath Radu, Muntean Petru, Muntean Rodica, *Fabrication of the spur gear through oscillating forging*, 5th International Meeting of the Carpathian Region Specialists in the field of gears, 2004.

15. Hosford William F., Cadell Robert M., *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Ed. Cambridge University Press, E.U.A., 2007.
16. Jesús del Río, *Conformación plástica de materiales metálicos (en frío y en caliente)*, CIEDOSSAT 2000, España, 2005.
17. Kobayashi Shiro, Oh Soo-Ik, Altan Taylan, *Metal Forming and the Finite-Element Method*, Ed. Oxford University Press, E. U. A., 1989.
18. Lange Kurt, *Handbook of Metal Forming*, Ed. McGraw-Hill, E.U.A., 1985.
19. Li G., Jinn J. T., Wu W. T., Oh S. I., *Recent development and applications of three-dimensional finite element modeling in bulk forming processes*, Journal of Materials Processing Technology, Corea del Sur, 2001.
20. Liu G., Yuan S. J., Wang Z. R., Zhou D. C., *Explanation of the mushroom effect in the rotary forging of a cylinder*, Journal of Materials Processing Technology, China, 2004.
21. Montoya I., Santos M. T., Pérez I., González B., Puigjaner J. F., *Kinematic and sensitivity analysis of rotary forging process by means of simulation model*, ©Springer/ESAFORM 2008, España, 2008.
22. Muntean Petru, Horvath Radu, Muntean Rodica, *Fabrication of the bevel gear through orbital forging*, 5th International Meeting of the Carpathian Region Specialists in the field of gears, 2004.
23. Oh Hung-Kuk, Choi Seogou, *A study on center thinning in the rotary forging of a circular plate*, Journal of Materials Processing Technology, Corea del Sur, 1997.
24. Oh Hung-Kuk, Choi Seogou, *Ductile fracture in the central region of a circular plate in rotary forging*, Journal of Materials Processing Technology, Corea del Sur, 1997.
25. Park J. H., Kim Y. H., Jin Y. E., *Experimental investigation of the forming parameters of the rotational upset forging process*, Journal of Materials Processing Technology, Corea del Sur, 2001.
26. Sheu J. J., Yu C.H., *The die failure prediction and prevention of the orbital forging process*, Journal of Materials Processing Technology, Taiwan, 2008.
27. Shirgaokar Manas, *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*, ASM International, E. U. A., 2004.
28. SHULER GmbH, *Metal Forming Handbook*, Ed. Springer-Verlag, E. U. A., 1998.
29. Simulia, *Abaqus Documentation V 6.8*, 2006.
30. Standring P. M., *Characteristic of rotary forging as an advanced manufacturing tool*, Journal of Engineering Manufacture, E. U. A., 2001.
31. Tschaetsch Heinz, *Metal Forming Practise*, Ed. Springer-Verlag, E. U. A., 2006.

32. Yuan Shijian, Wang Xiaohong, Liu Gang, Chou Decheng, *The precision forming of pin parts by cold-drawing and rotary-forging*, Journal of Materials Processing Technology, China, 1999.