



①9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

①1 Número de publicación: **2 345 116**

⑤1 Int. Cl.:
G05B 19/41 (2006.01)
B23Q 15/14 (2006.01)

①2

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑨6 Número de solicitud europea: **06425400 .6**
⑨6 Fecha de presentación : **14.06.2006**
⑨7 Número de publicación de la solicitud: **1868054**
⑨7 Fecha de publicación de la solicitud: **19.12.2007**

⑤4 Título: **Método para fresar ranuras en piezas de trabajo taladradas.**

④5 Fecha de publicación de la mención BOPI:
15.09.2010

④5 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
15.09.2010

⑦3 Titular/es: **VIGEL S.p.A.**
Via Mappano 15/A
10071 Borgaro Torinese, TO, IT

⑦2 Inventor/es: **Giovanelli, Gian Luca y**
Gay, Andrea

⑦4 Agente: **Mir Plaja, Mireia**

ES 2 345 116 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para fresar ranuras en piezas de trabajo taladradas.

5 La presente invención se refiere a un método para fresar ranuras en piezas de trabajo taladradas por medio de una fresa de disco giratorio movida a lo largo de un recorrido en torno al taladro bajo el control de una unidad de control numérico.

10 Las unidades convencionales de control numérico están diseñadas para obedecer un conjunto de instrucciones predefinidas, y entre las mismas predominan las instrucciones para mover una herramienta o cabezal portafresas a lo largo o bien de un recorrido recto o bien de un arco circular, a una velocidad preestablecida, entre dos puntos definidos en tres coordenadas rectangulares. Por lo tanto, cada vez que se desea un tipo diferente de movimiento, el mismo se debe descomponer en una sucesión de segmentos rectos o circulares. Para cada uno de estos segmentos, el control establecerá un patrón por el cual el árbol de la herramienta en primer lugar se acelerará hasta la velocidad deseada de movimiento, a continuación se mantendrá a una velocidad constante durante la parte central de su desplazamiento, y finalmente se desacelerará hasta pararse durante la última parte del segmento.

20 Se conoce bien el fresado de ranuras circulares en la pared de un taladro cilíndrico, en su mayoría como asientos para juntas tóricas o anillos elásticos, por medio de una fresa de disco que se hace orbitar o girar en torno a las superficies internas de manera que los dientes de la fresa corten el metal a una profundidad deseada. El control numérico de la máquina herramienta se programa por lo tanto para mover la herramienta hacia delante a lo largo del eje del taladro hacia la posición axial de la ranura deseada; a continuación, para mover la herramienta a lo largo de un recorrido radial recto hasta que dé un bocado en el material de la pared a la profundidad deseada de la ranura; a continuación, para hacer girar la herramienta a lo largo de un recorrido circular con el fin de cortar la ranura; y finalmente para mover la herramienta de vuelta a una posición axial a lo largo de un recorrido radial recto similar cuando se ha completado la revolución en torno al taladro.

30 Con el procedimiento anterior de ranurado, la ranura en general se corta extrayendo una capa de viruta que tiene el mismo grosor que la profundidad deseada de la ranura. La extracción de una viruta tan gruesa en una sola pasada somete al vástago de la herramienta a esfuerzos considerables de torsión y flexión, que son de naturaleza vibratoria, debido a los dientes discontinuos. Estos esfuerzos tienen un efecto negativo sobre la calidad del acabado de la ranura y además someten a los dientes de corte a un desgaste considerable, lo cual da como resultado un acortamiento de la vida de la herramienta y un acabado rugoso de la ranura. Si se desea, particularmente en el caso de una ranura muy profunda, cortar la ranura en dos o más pasadas, entonces se debe efectuar repetidamente el mismo procedimiento que anteriormente (es decir, recorrido de aproximación, recorrido circular, recorrido de retroceso), con diámetros crecientes, aunque con una pérdida considerable del tiempo de procesado.

40 Por otra parte, cuando la fresa de disco se aproxima a la pared, sus dientes se encuentran bruscamente con una resistencia tanto tangencial como radial del material de la pieza de trabajo, dando origen a un esfuerzo tanto de torsión como de flexión que actúa sobre su vástago. Como el vástago de la herramienta tiene una rigidez limitada, el mismo se desviará así en un grado pequeño aunque no despreciable y, posteriormente, se relajará cuando la herramienta comience a seguir un recorrido tangencial a la pared a medida que corta la ranura. Estas fluctuaciones dan origen a protuberancias o irregularidades en la ranura, que se combinan con los defectos antes mencionados.

45 Para minimizar los defectos anteriores, se ha propuesto que la fresa de disco siga un recorrido semicircular, en lugar de recto, en su aproximación a la pared del taladro, de manera que la herramienta ataque el material con un ángulo agudo; además se sigue un recorrido semicircular similar cuando se retira la herramienta. Aunque esta maniobra así conduce a una transición más gradual y resulta sencilla de implementar en una unidad de control convencional, presenta solamente una influencia favorable moderada sobre las protuberancias provocadas por el contacto inicial entre la herramienta y la pieza de trabajo, y no remedia el inconveniente de los esfuerzos en los que incurre la fresa de disco durante el mecanizado de una sola pasada y de corte profundo.

50 El documento US 2005/0246052 da a conocer un método para calcular un recorrido espiral de una herramienta para una fresa mediante el cual una región circular se puede fresar en pasadas sucesivas. El método usa pares de semicírculos que no son concéntricos con respecto al centro de la geometría circular. No obstante, las matemáticas del método son complejas, y requieren que se programe de forma especial un ordenador de aplicación general. Por otra parte, las transiciones entre los semicírculos siguen acarreado discontinuidades que afectan negativamente a la calidad de acabado del área fresada. En el documento US 4.704.688 se da a conocer un método de interpolación similar, que implica nuevamente un nivel considerable de esfuerzo de cálculo, y no parece ser ejecutable en una unidad de control convencional. Finalmente, ninguno de los métodos afronta el problema antes mencionado del encuentro brusco de la herramienta con la pared del taladro.

65 El objetivo principal de la presente invención es por lo tanto proporcionar un método para controlar fresas de disco con el fin de fresar ranuras en piezas de trabajo taladradas, por medio de unidades de control convencionales y con una precisión más elevada y un acabado mejor que los que se pueden obtener con técnicas de control convencionales.

Otro objetivo de la invención es que el método anterior no implique un consumo exagerado de tiempo de mecanización.

Otro objetivo de la invención es que el método anterior permita cortar fácilmente una ranura en varias pasadas con profundidades crecientes, de manera que el esfuerzo probado sobre la herramienta se mantenga bajo, y se prolongue la vida de la misma.

Un objetivo adicional consiste en proporcionar un método que sea sencillo de implementar en una unidad convencional de control numérico según la norma en vigor DIN 66025, por medio de instrucciones comunes.

Los objetivos anteriores, así como otros objetivos y ventajas que se pondrán de manifiesto a partir de la siguiente descripción, se logran con la invención en un método para fresar ranuras en piezas de trabajo taladradas, que presenta las características enumeradas en la reivindicación 1, mientras que las otras reivindicaciones exponen otras características ventajosas, aunque secundarias de la invención.

A continuación se describirá más detalladamente la invención en referencia a una realización preferida, no exclusiva, mostrada a título de ejemplo no limitativo en los dibujos adjuntos, en los cuales:

la fig. 1 es una vista esquemática, en sección transversal axial, de una fresa de disco a medida que la misma corta una ranura circular en una pieza de trabajo taladrada;

la fig. 2 es una vista en sección transversal realizada a lo largo de las líneas II-II de la fig. 1;

la fig. 3 es una vista esquemática en un plano en ángulo recto con respecto a la vista de la fig. 1, que muestra el recorrido seguido por la fresa de disco para cortar una ranura en la pared del taladro, según la técnica anterior;

la fig. 4 es una vista similar a la fig. 3, que muestra un recorrido modificado según la técnica anterior,

la fig. 5 es una vista similar a la fig. 3, que muestra el recorrido seguido por la fresa de disco según las enseñanzas de la invención;

la fig. 6 es un diagrama que muestra una parte de un recorrido de una herramienta según las enseñanzas de la invención.

En referencia las figs. 1 y 2, un cabezal portafresas 10 de una máquina herramienta no mostrada tiene un árbol giratorio 12 en el que se monta una fresa 14 de disco de tres dientes. El cabezal portafresas se ha movido previamente para situar la fresa de disco coaxialmente dentro de un taladro 16 realizado en una pieza 18 de trabajo que tiene un radio R , en una posición a lo largo del eje z en la que, en la pared del taladro 16, se va a fresar una ranura circular 20 que tiene una profundidad h . Bajo el control de una unidad de control numérico (no mostrada), el cabezal portafresas se puede mover para conducir la fresa 14 de disco a lo largo de un recorrido deseado de manera que su borde de corte extraiga material de la pared con el fin de crear la ranura 20 con la misma anchura que la fresa de disco y con un radio $R + h$ en el fondo de la ranura.

Tal como se muestra en la fig. 3, el procedimiento convencional de la técnica anterior es programar el control numérico para: - mover el árbol 12 con una instrucción de movimiento recto desde el eje z del taladro a lo largo de un recorrido radial 22 hasta un punto P en el que el borde de corte de la fresa 14 de disco ha dado un bocado frontalmente en la pared 16 a la profundidad requerida; - mover el árbol 12 con una instrucción de movimiento circular para recorrer un círculo completo 24 en torno al eje z volviendo al punto P ; - mover el árbol 12 con una instrucción de movimiento recto desde el punto P de vuelta al eje z a lo largo de un recorrido radial 26.

Tal como se ha indicado anteriormente, el procedimiento de la fig. 3 da origen a una rugosidad en las paredes y el fondo de la ranura, particularmente con una protuberancia visible en el punto en el que la fresa de disco comienza y finaliza en la parte circular de su recorrido. Para reducir dicha protuberancia, se ha propuesto usar una modificación del procedimiento de la fig. 3, tal como se muestra en la fig. 4.

El procedimiento de la fig. 4 es similar a la fig. 3, pero el primer segmento de recorrido recto desde el eje z al punto P se sustituye por un recorrido semicircular 28, con lo cual una aproximación tangencial a la superficie de la pared sustituye la aproximación frontal de la fig. 3. Además, el segmento recto desde el punto P de vuelta al eje del taladro se sustituye por un recorrido semicircular 30. La parte central 24 del recorrido total se deja sin variaciones a un círculo completo. Esta significación garantiza una aproximación suave que reduce la protuberancia anterior en un cierto nivel, pero que no alivia los otros defectos mencionados en la introducción.

Para optimizar el acabado de la ranura y prolongar la vida de la herramienta, sería deseable que, en lugar de extraer el grosor completo de material en una pasada, se pudiera desbastar el material de la pieza de trabajo sin interrupciones en un viruta fina, obteniéndose progresivamente la profundidad final deseada de la ranura con varias pasadas.

ES 2 345 116 T3

Esto se podría lograr, desde un punto de vista matemático, si el recorrido por el que se desplaza el borde corte de la herramienta sigue idealmente una espiral de Arquímedes, según se define, en coordenadas polares con origen en el eje z del taladro, mediante la siguiente ecuación:

$$r(\theta) = R + \frac{h}{(2\pi N)} \cdot \theta \quad (1)$$

en la que

r es la distancia radial del borde del corte desde el eje del taladro,

R es el radio de partida;

h es la profundidad de la ranura;

N es el número de revoluciones completas necesarias para alcanzar la profundidad h, correspondiente sustancialmente a la relación entre la profundidad de la ranura h y el grosor deseado de la viruta;

θ es el ángulo en torno al eje del taladro.

El radio de partida R coincidirá normalmente con el radio del taladro, aunque de forma más general es el radio de partida para el corte, es decir, del círculo en el que se posiciona el borde del corte como preparación para ejecutar el recorrido de corte de la ranura. Por ejemplo, el radio R podría ser ligeramente menor que el radio del taladro, cuando se prefiera iniciar la trayectoria espiral algo adelantada con respecto al punto de contacto.

La ecuación (1) se refiere a la posición del borde de corte de la herramienta. En la práctica, si la fresa de disco tiene un radio F, la aproximación inicial del árbol a la pared del taladro se debe reducir en la misma cantidad, de manera que la ec. (1) se convierte en:

$$r(\theta) = R - F + \frac{h}{(2\pi N)} \cdot \theta$$

Para su uso con controles numéricos, las coordenadas de la espiral recorrida por el árbol se deben expresar en coordenadas rectangulares de la manera siguiente:

$$x(\theta) = (R - F + \frac{h}{(2\pi N)} \cdot \theta) \cdot \cos \theta$$
$$y(\theta) = (R - F + \frac{h}{(2\pi N)} \cdot \theta) \cdot \sin \theta$$

A medida que θ aumenta desde un valor inicial arbitrario, los puntos x, y se mueven hacia delante a lo largo del recorrido espiral requerido. En la aplicación real de un mecanizado mediante controles numéricos convencionales, se tendría que realizar una aproximación de la espiral mediante una lista finita de puntos obtenida incrementando progresivamente θ en incrementos $\Delta\theta$, y se usarían instrucciones convencionales de movimiento recto para mover la herramienta en pasos rectilíneos desde un punto siguiente, de manera que se obtiene una aproximación de la trayectoria requerida en forma de una secuencia de segmentos rectilíneos. En la fig. 5 se muestra el recorrido espiral resultante, en el que el recorrido espiral 32 finaliza en el punto Q, desde el cual un recorrido semicircular 34 de enlace prosigue hacia el punto T, en el que concluye el corte con un recorrido circular completo, final, 36, con radio $R + h$, mostrado en línea de trazos, tal como se explicará de forma más detallada posteriormente.

No obstante, con la interpolación anterior de líneas rectas de la espiral, se debería usar un incremento muy pequeño $\Delta\theta$ para obtener una calidad aceptable de la espiral, y se debería programar un número muy elevado de pequeños desplazamientos. Esto resultaría engorroso y poco práctico, consumiría una cantidad extremada de tiempo, y tendría un efecto negativo sobre la calidad del acabado, debido a las incesantes aceleraciones y deceleraciones.

Por lo tanto, según la invención, la interpolación se optimiza en el tiempo y la calidad del acabado se mejora usando la instrucción de suavización NC proporcionada en las unidades convencionales de control numérico DIN 66025. La instrucción de suavización (o instrucción ADIS) permite que la unidad de control solape la parte final de un segmento de desplazamiento con la parte inicial del siguiente segmento, sin detener realmente el movimiento interpolado del cabezal portafresas, evitándose de este modo una secuencia, incómoda y que consume mucho tiempo, de arranques y paradas y esquinas redondeadas en el recorrido segmentado.

ES 2 345 116 T3

Esto se muestra en el diagrama de la fig. 6, en el que a un segmento rectilíneo 38 le sigue otro segmento rectilíneo 40 que tiene una dirección diferente. Una fresa de disco (no mostrada) se desplaza a lo largo del segmento con un patrón de velocidad que incluye una rampa 42 de aceleración hasta una velocidad escalar máxima, mantiene esa velocidad durante un tramo 40, a continuación normalmente iniciaría una rampa 46 de deceleración bajando hasta la velocidad cero antes de comenzar en el siguiente segmento. Según la invención, se programa una instrucción ADIS antes del final de cada segmento, de manera que la unidad de control comenzará a desviarse hacia la dirección del siguiente segmento, siguiendo un recorrido 48 de redondeo que fusiona entre sí los dos segmentos adyacentes, sin una pérdida significativa de velocidad.

De este modo, puede observarse que cuando se alterna una secuencia de instrucciones de desplazamiento recto para los segmentos sucesivos con instrucciones ADIS según se ha descrito anteriormente, el cabezal portafresas seguirá un recorrido uniforme, redondeado, que constituye una mejor aproximación a la espiral deseada de Arquímedes, a una velocidad sustancialmente uniforme, y con un número menor de puntos de los que serían necesarios de otro modo, es decir, con un mayor intervalo entre pasos $\Delta\theta$.

El parámetro de espacio de avance a proporcionar como argumento al ADIS no es crítico. Se ha observado que la elección más apropiada actualmente es la posición central del segmento rectilíneo en el recorrido espiral total, es decir, aproximadamente la mitad del producto del radio del círculo de base por los pasos del ángulo, ó $R \cdot \Delta\theta/2$. No obstante, se pueden seleccionar con resultados aceptables otros valores, antes o después del punto central.

El intervalo entre pasos $\Delta\theta$ tampoco es crítico, y depende del grado de precisión requerido y el tiempo de ciclo permitido. Para muchas aplicaciones, se ha observado que resulta apropiado un valor de 5° , aunque este valor puede variar ampliamente, y, dependiendo de las circunstancias, podría muy bien dividirse por la mitad o doblarse.

La aproximación inicial de la herramienta al bocado inicial en el taladro seguirá preferentemente la “aproximación suave” mencionada en la introducción, es decir, un recorrido semicircular que finaliza en la pared del taladro, aunque también es aceptable un movimiento radial recto, debido a que cualquier protuberancia que se produjera pertenece a un área del metal que será extraída en la siguiente revolución del cabezal portafresas. Por otro lado, la última revolución de la herramienta debe ser necesariamente circular en lugar de espiral, de manera que la ranura acabada tenga una profundidad constante. No resultaría apropiado desviar el recorrido desde la espiral a un círculo, ya que no existe una tangente común entre las dos curvas en la transición, de manera que el mecanizado quedaría comprimido por la discontinuidad.

Por lo tanto, para proporcionar una transición sencilla desde el recorrido espiral a un recorrido circular final, la invención prevé que la herramienta siga un recorrido intermedio de enlace o fusión durante un alcance limitado, por ejemplo, durante media revolución. Preferentemente, el recorrido de fusión es un semicírculo que tiene una tangente común con el recorrido circular final, coaxial con el taladro, que debe ser seguido por la herramienta para completar la ranura. Aunque un recorrido de enlace diseñado de esta manera no producirá ninguna discontinuidad en su punto final T (véase fig. 5), en donde se fusiona con el recorrido circular final, tendrá necesariamente una discontinuidad con la cola del recorrido espiral en Q, aunque dicha discontinuidad no provoca ninguna irregularidad en la ranura acabada, ya que la parte de material en donde se produce será extraída posteriormente durante la pasada circular final.

Aunque un recorrido de enlace semicircular es la elección más preferida, se pueden usar arcos circulares de una amplitud diferente, e incluso recorridos compuestos rectos-curvados.

Si el cabezal portafresas continuara girando a la misma velocidad de alimentación con la que aumenta su distancia radial con respecto al eje del taladro, la velocidad de corte en el borde de la fresa de disco aumentaría progresivamente. Por consiguiente, para mantener constante la velocidad de corte en un valor deseado, en cada incremento $\Delta\theta$ a lo largo de la espiral la unidad de control debería volver a calcular la velocidad de alimentación del cabezal portafresas. El cálculo, tal como puede resultar evidente para expertos en la materia, consiste en multiplicar el valor deseado de la velocidad de corte por la relación actual entre las distancias radiales del eje de herramienta y del borde de corte con respecto al eje del taladro, es decir

$$f = \frac{r}{(r + F)} \cdot c$$

en donde

c es la velocidad de corte deseada;

f es la velocidad de alimentación requerida en el árbol;

r es la distancia radial actual del árbol con respecto al eje del taladro;

F es el radio de la fresa de disco.

ES 2 345 116 T3

El método de fresado de ranuras de la invención resulta sencillo de programar en unidades de control numérico convencionales compatibles con la DIN66025 que usen únicamente instrucciones convencionales de desplazamiento recto y circular (instrucciones G1, G2 y G3) así como instrucciones ADIS, además de instrucciones para los cálculos comunes aritméticos y trigonométricos. Se proporciona a continuación un ejemplo de programación de NC que materializa los principios de la presente invención, en el que las letras XXX en las primeras ocho líneas del programa son espacios reservados para cifras específicas que se usarían en la programación real:

Ejemplo de programación con comentarios

10	N130	R505 = XXX	;diámetro de círculo de base
	N140	R508 = XXX	;diámetro de círculo final
15	N150	R504 = XXX	;número de revoluciones
	N160	R510 = XXX	;alimentación a lo largo de la espiral (en el eje de la herramienta)
20	N170	R511 = XXX	;alimentación durante rev de redondeo y rev de limpieza (en el eje de la herramienta)
25	N180	R509 = XXX	;incremento en la última semirrevolución
30	N190	R506 = XXX	;paso angular
	N200	R501 = XXX	;ángulo de partida
35	N210	R507 = R508-R509	;punto de partida para semirrevolución de redondeo
	N220	R500 = ((R507-R505)/2)/R504	;profundidad de ranura/número de revs
40	N230	G3 X=(R505/2) Y1=0 CR=(R505/4) F=R510	;semirrev para aproximación al círculo de base
45	N240	WORK:	;calcular coordenadas de la espiral
	N250	IF R501 == R504*360	;comparar ángulo actual con ángulo esperado total
50	N260	GOTO END	
	N270	ENDIF	
55	N280	R501 = R501+R506	;incrementar ángulo en cada bucle
	N290	ADIS = (R505/2+R500/360*R501)*R506/2	;redondear dinámicamente
60	N300	R502 = (R505/2+R500/360*R501)*COS(R501)	;calcular coordenada X
	N310	R503 = (R505/2+R500/360*R501)*SIN(R501)	;calcular coordenada Y
65	N315	R510 = R511*(R505/2+R500/360*R501/ (R505/2+10,6+R500/360*R501)	;calcular velocidad de alimentación en el eje de herramienta, de manera que la

ES 2 345 116 T3

			velocidad de alimentación del borde de corte permanezca constante
5	N320	G1 X=R502 Y1 =R503 F=R510	;mover al punto de coordenada (X, Y)
10	N330	GOTOB WORK	
	N340	END:	
15	N350	G3 X=(R508/2) Y1=0 CR=(R508-(R509/2))/2	;última semirrev para redondeo
		F=R510	
	N360	G3 I=AC(0) J=AC(0)	;realizar rev completa de acabado
20			
	N370	G3 G9X=0 Y1=0 CR=R508/4	;reinicializar máquina al centro del círculo de base
25	N380	END2:	

La ventaja principal proporcionada por el método es que las ranuras presentan un acabado definitivamente mejor que el que se podría lograr con planteamientos anteriores, principalmente debido a que, por contraposición al mecanizado convencional, las ranuras se desbastan progresivamente en una viruta continua fina de grosor uniforme durante un número deseado de revoluciones, con un esfuerzo menor y una vida más prolongada de la herramienta. Por otra parte, las ranuras obtenidas con el método de la invención quedan completamente exentas de protuberancias u otras irregularidades provocadas por el acoplamiento inicial y el desacoplamiento final de la herramienta a la pieza de trabajo, ya que dichas irregularidades son siempre desbastadas en todos los casos por una pasada posterior.

REIVINDICACIONES

1. Método para fresar ranuras en piezas de trabajo taladradas, en el que una unidad de control numérico compatible con la DIN66025 se programa para mover un árbol que es portador de una fresa de disco a una posición dentro del taladro en la que el borde de corte de la fresa de disco está cerca de la pared del taladro en una posición axial deseada y para, a continuación, mover el árbol a lo largo de un recorrido plano preestablecido con el fin de cortar una ranura en la pared del taladro.

caracterizado porque dicha unidad de control se programa para determinar dicho recorrido plano mediante las siguientes etapas:

- emitir una secuencia de instrucciones para provocar desplazamientos rectos del árbol entre puntos sucesivos definidos por coordenadas rectangulares x , y que se calculan mediante las ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} x(\theta) &= (R - F + \frac{h}{(2\pi N)} \cdot \theta) \cdot \cos \theta \\ y(\theta) &= (R - F + \frac{h}{(2\pi N)} \cdot \theta) \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \text{for } \theta = \theta_0, \theta_0 + \Delta\theta, \theta_0 + 2\Delta\theta, \theta_0 + 3\Delta\theta, \dots$$

en las que

R es el radio del taladro,

F es el radio de la fresa de disco,

h es la profundidad de la ranura,

N es aproximadamente la relación entre la profundidad de la ranura (h) y el grosor deseado de la viruta,

θ es el ángulo en torno al eje del taladro,

θ_0 es el ángulo inicial,

$\Delta\theta$ es un paso angular deseado;

hasta que se alcanza un punto pre-final (Q) en el que dicho borde de corte está a una distancia menor que h/N con respecto al fondo deseado de la ranura;

- emitir instrucciones ADIS respectivas de forma alternada con las instrucciones anteriores de desplazamiento recto para fusionar cada uno de dichos desplazamientos rectos con el siguiente;
- provocar que el árbol siga un recorrido de fusión desde dicho punto pre-final (Q) a un punto final (T) que se sitúa en un círculo que tiene un radio $R - F + h$;
- provocar que el árbol siga un recorrido circular final coaxial al taladro con radio $R - F + h$ y que se prolonga durante un círculo completo desde dicho punto final (T).

2. Método de la reivindicación 1, **caracterizado** porque dicho recorrido de fusión es un arco circular desde el punto pre-final (Q) al punto final (T) y que tiene una tangente común con dicho recorrido circular final.

3. Método de la reivindicación 2, **caracterizado** porque dicho arco circular es un semicírculo que tiene su centro situado en un diámetro del taladro que pasa a través del punto final (T).

4. Método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado** porque dichas instrucciones ADIS se parametrizan con un valor que es aproximadamente la mitad del producto de la suma del radio del taladro (R) y el incremento de profundidad (h/n) en cada paso por dicho paso angular predeterminado ($\Delta\theta$).

