

Análisis de confiabilidad para herramientas de corte aplicado al proceso de taladrado

Carmen Elena Patiño Rodríguez^a, Gilberto Francisco Martha de Souza^b*

(Recibido el 27 de abril de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

a Grupo Gestión de la Calidad. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Antioquia. A. A. 1226, Medellín, Colombia.

b Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de São Paulo. Avenida Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 N.o 380. CEP 05508-900. São Paulo, Brasil.

Resumen

Se presenta un análisis teórico de confiabilidad para herramientas de corte utilizadas en maquinado y aplicado al proceso de taladrado. Para calcular la confiabilidad, se asume que la vida de la herramienta de corte puede ser modelada por una distribución de probabilidad y la falla se define como el instante en el cual la herramienta de corte alcanza un desgaste de flanco superior a un valor preestablecido. Dado lo anterior, es posible definir una función de densidad acumulada (FDA) para la distribución de probabilidad del desgaste que indica la posibilidad de que la herramienta se desgaste hasta un cierto nivel durante un tiempo específico de uso. Basados en los resultados obtenidos experimentalmente se calculan los parámetros para la distribución de probabilidad y la curva de confiabilidad.

----- *Palabras clave:* confiabilidad, procesos de manufactura, taladrado, amef, desgaste de herramienta.

Reliability analysis of cutting tools applied to drilling process

Abstract

This study presents a theoretical reliability analysis of mechanical manufacturing process of a cutting tool subject to flank wear. The process reliability is a statistical relation between cutting tool, operator and machine-tool. The cutting tool life is modeled with a probability function representing the chance that a critical wear magnitude is achieved in a given time period. Parameters for this probability function are calculated based on experimental analysis, as well as on reliability of a cutting tool.

----- *Key words:* reliability, fmea, manufacturing process, drilling process, cutting tools wear.

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+4+210 55 79, fax: +57+4+263 82 82, Correo electrónico: cpatino@udea.edu.co (C. Patiño Rodríguez).

Introducción

En la búsqueda de alternativas para aumentar el desempeño de los productos, los investigadores le están prestando gran atención al desarrollo de estudios cuyo objetivo es el mejoramiento del proceso, ya que se ha comprobado que el éxito del producto depende en gran medida del proceso de fabricación. Desde los años 60 se aprecia en el ámbito mundial un resurgimiento en la aplicación de métodos estadísticos por parte de la industria; cabe resaltar que este resurgimiento es debido a la necesidad de reducir la posibilidad de que un producto sea fabricado con defectos que impidan su funcionamiento, lo que puede llevar a que este falle prematuramente.

Ahora bien, se ha observado que gran parte de los defectos son causados por los errores cometidos durante el proceso de fabricación, estos defectos están asociados principalmente a las variaciones existentes en el sistema compuesto por la pieza de trabajo, la máquina, el dispositivo de fijación y la herramienta de corte. Sumado a lo anterior, se tiene que todas las herramientas de corte se desgastan inevitablemente durante el maquinado y continúan haciéndolo hasta llegar al final de su vida, teniendo así un efecto negativo sobre proceso de maquinado. El desgaste de la herramienta de corte resulta de la interacción entre la herramienta y la pieza, siendo el producto de la combinación de factores mecánicos, térmicos, químicos y abrasivos, que cambian la geometría de la arista de corte. Como es un efecto inevitable se convierte en uno de los modos de falla más importantes de un proceso de maquinado, existiendo gran preocupación en conocer su comportamiento, para intentar controlar sus efectos sobre la pieza maquinada.

La técnica de confiabilidad es empleada para evaluar la probabilidad de que un componente, que esté siendo sometido a condiciones específicas de uso, opere con éxito durante un período predeterminado. Es decir, la aplicación de técnicas de confiabilidad permite la evaluación de la probabilidad de que un equipo, proceso o producto falle. De esta forma las técnicas de

confiabilidad pueden utilizarse para modelar el desgaste de las herramientas en maquinado y así prever la probabilidad de que la herramienta de corte alcance un valor específico de desgaste, durante el tiempo de uso de esta.

Para demostrar la aplicabilidad de estos conceptos en la previsión de la vida útil de la herramienta, se realizó un estudio del desgaste de brocas helicoidales a partir de ensayos controlados de taladrado, realizados en cuerpos de prueba de acero de bajo carbono. En estos ensayos se midió el desgaste de las aristas de corte de cada broca, asociándose a este nivel de desgaste una función de distribución probabilidad. Para así definir la probabilidad de que la broca alcance cierto nivel de desgaste después de la realización de un número controlado de agujeros.

Análisis de confiabilidad

El término confiabilidad puede ser definido como la probabilidad de que durante un período determinado, un componente, equipo, o sistema realice las operaciones para las cuales fue diseñado sin presentar fallas. Debe notarse que para definir confiabilidad es necesario definir primero un desempeño específico, así como también las condiciones y el período de utilización.

Para determinar la confiabilidad de cualquier sistema es necesario definir la función del sistema, al igual que las situaciones o condiciones que le hacen perder la funcionalidad y las consecuencias de estas sobre el sistema; también es importante definir las condiciones del experimento [1].

La operación de cualquier sistema se puede definir por dos eventos:

E_1 = Sistema operando adecuadamente.

E_2 = Sistema operando en estado de falla.

Dado que estos dos eventos son eventos mutuamente excluyentes, es posible expresar la confiabilidad de acuerdo con la ecuación (1):

$$R(t) = P(T > t) \quad R(t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

Donde $R(t)$ representa la confiabilidad del componente y $F(t)$ la probabilidad de que este falle. La confiabilidad siempre decrece, entonces cuanto mayor sea el período de operación mayor será la probabilidad de que el sistema falle, lo cual está representado en la figura 1.

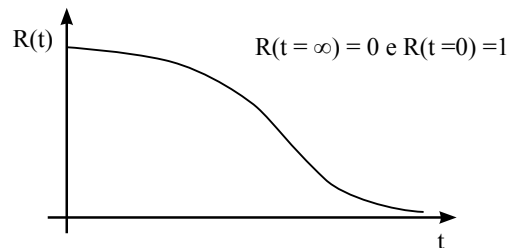


Figura 1 Curva genérica para la confiabilidad

De otro lado, cuando se analiza la confiabilidad de un sistema normalmente se puede evaluar usando diagrama de bloques, análisis de modos y efectos de falla —FMEA (del inglés failure modes and effects analysis)— o el análisis por árbol de fallas —FTA (del inglés fault tree analysis)—. En este estudio se utiliza el análisis tipo FMEA, que es un método usado para identificar los puntos vulnerables de un sistema; para esto es necesario enumerar los posibles modos de falla, considerando las características de operación del sistema y definir las consecuencias o efectos que cada uno de estos modos de falla tendrá sobre el sistema.

En casos como el aquí expuesto el análisis tipo FMEA identifica y busca prevenir las fallas que dependen de la manufactura, además identifica los procesos críticos permitiendo verificar los componentes y los subsistemas que deben recibir atención especial. Cualquier análisis tipo FMEA es basado en cinco preguntas básicas:

¿Cuáles son los modos de falla? ¿Cuáles son los efectos, sobre el sistema, de estas fallas? ¿Qué tan críticos son estos efectos? ¿Cómo detectar la falla? ¿Cuáles son las medidas contra estas fallas, que evitan o minimizan los efectos?

El análisis tipo FMEA es un método analítico estandarizado para detectar y eliminar problemas

existentes y potenciales de forma sistemática y completa. La principal ventaja de este análisis es documentar los procesos que analiza e identificar los modos de falla causados por la interacción de los sistemas con otros sistemas y subsistemas.

Modelo de confiabilidad para proceso de maquinado

La confiabilidad del proceso de desgaste de una herramienta, utilizada en operaciones de maquinado, representa la probabilidad de que en un tiempo T , el valor de este desgaste alcance un nivel V_B^* , considerado crítico [2]. Como el desgaste de una herramienta corte es un mecanismo acumulativo, la confiabilidad de esta debe ser representada por una función distribución de probabilidad que simule tasas de falla crecientes en función del tiempo, siendo las más representativas las distribuciones Normal, Weibull y Lognormal. Este análisis difiere del que es presentado por Freiheit [3] quien propone que la función de densidad de probabilidad para el desgaste de la herramienta es una distribución exponencial, lo cual equivale a suponer que la tasa de falla de la herramienta es constante, dejando de considerar que el mecanismo de desgaste es inevitable y progresivo.

A continuación se ilustra el cálculo de la confiabilidad de una herramienta de maquinado, suponiendo que el desgaste sigue una distribución Lognormal [2]; según el procedimiento presentado por otros autores como Hitomi [2], El Wardani [4], y Wang [5], quienes demostraron que el desgaste de la herramienta y la vida de la misma se puede modelar estadísticamente utilizando las variables compartidas. Cuando el desgaste sigue otra distribución es posible seguir este procedimiento y encontrar la confiabilidad en términos del tiempo de vida de la herramienta.

Sea v_B una variable aleatoria, que representa el desgaste de flanco de la herramienta, siendo este desgaste función de las condiciones de corte y del error estadístico, como está expresado en la ecuación (2):

$$v_B = \psi(f, v, d, t, \gamma, r) \cdot \theta(\xi) \quad (2)$$

Donde, f es el avance, v la velocidad de corte, d es la profundidad de corte, t el tiempo de corte, γ el ángulo de la arista transversal de la herramienta y r el radio de la herramienta; Ψ representa la función que relaciona estas variables, que en este caso es la función de Taylor, y ξ representa la función del error estadístico.

La ecuación de Taylor es una expresión empírica utilizada para prever el desgaste de flanco de las herramientas de maquinado en función de las condiciones de corte. Entre tanto, experimentalmente, los valores obtenidos para el desgaste de flanco presentan dispersión con relación al valor previsto por la ecuación de Taylor, siendo esta dispersión representada por la función del error ξ .

Asumiendo que el desgaste de la herramienta sigue una distribución Lognormal, la media de la distribución definida en la ecuación (3), que corresponde al valor mediano del desgaste del flanco, en un tiempo específico de utilización de la herramienta y está representado por V_{B_0} :

$$V_B = E[\ln(v_B)] = E[\ln(\Psi(f, v, d, t, \gamma, r))] + E[\xi] \quad (3)$$

La variabilidad del sistema estará dada por el cuadrado de la diferencia existente entre el valor esperado (correspondiente al valor resultante de la ecuación que relaciona las variables) y el valor real obtenido en los ensayos de desgaste; la varianza representada por el símbolo σ^2 , está definida en la ecuación (4).

$$\begin{aligned} \text{Var}[\ln(v_B)] &= E[(\ln(v_B - V_{B_0}))^2] \Rightarrow \\ \text{Var}[\ln(v_B)] &= E[\xi] \Rightarrow \\ \text{Var}[\ln(v_B)] &= \sigma^2 \end{aligned} \quad (4)$$

De este modo la función de densidad de probabilidad para la distribución del desgaste de flanco de la herramienta se expresa por la ecuación (5):

$$f(v_B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot v_B} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln v_B - \ln(C_0 f^{b_1} \cdot v^{b_2} \cdot d^{b_3} \cdot \gamma^{b_4} \cdot r^{b_5} \cdot t^{b_6}))^2} \quad (5)$$

Suponiendo que la herramienta comienza el corte en $t = 0$ y que la falla de la herramienta ocurre en el tiempo $t = T$, entonces la probabilidad de falla, $F(T)$, y la confiabilidad de la herramienta, $R(t)$, definidas en el tiempo de falla, se representan por la ecuación (6).

$$F(T) = P(t \leq T) = \int_0^T f(t) dt \quad (6)$$

$$R(T) = 1 - F(T) \Rightarrow$$

$$R(T) = 1 - \int_0^T f(t) dt \quad (7)$$

Por otro lado se puede afirmar que la probabilidad de falla de la herramienta es la posibilidad de que esta falle en un tiempo t especificado, debido a que el desgaste, en este tiempo, alcanzó el desgaste límite, V_B^* , esta definición está representada en la ecuación (8):

$$P(v_B \geq V_B^*) = 1 - \int_0^{V_B^*} f(v_B) dv_B \quad (8)$$

Ahora bien, considerando la evolución del desgaste de la herramienta, presentada en la figura 2, se verifica que para cada instante del tiempo existe una probabilidad de que el desgaste de la herramienta sea inferior a V_B^* , siendo esta probabilidad reducida con el aumento del tiempo de utilización de la herramienta.

En la figura 2, se puede observar que así como existe una distribución probabilística para el desgaste alcanzado en un tiempo t , existe también una distribución de probabilidad para el tiempo en que la herramienta alcanza el desgaste V_B^* , y que en el tiempo T_1 el valor del desgaste mediano es V_B^* , este concepto está representado en la ecuación (9).

$$\begin{aligned} P(T < t) &= P(v_B \geq V_B^*) \\ \int_0^t f(t) \cdot t dt &= 1 - \int_0^{V_B^*} f(v_B) \cdot v dv_B \end{aligned} \quad (9)$$

De lo anterior se tiene que la confiabilidad de la herramienta en el tiempo t , determinada en función del desgaste de la misma:

$$R(t) = 1 - P(T < t)$$

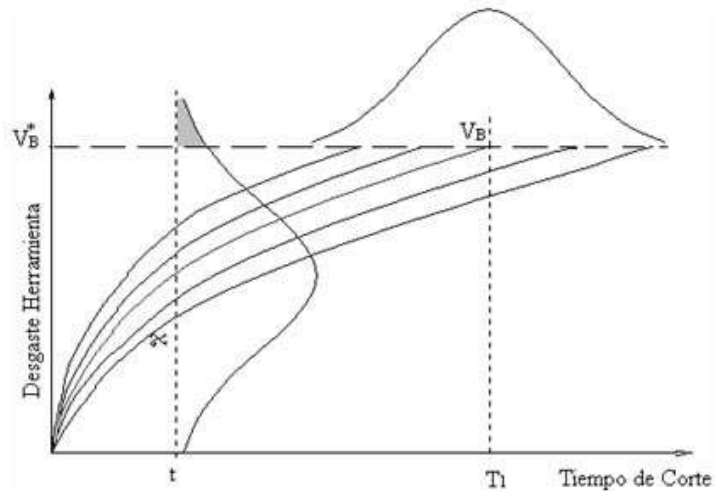


Figura 2 Relación entre el desgaste de la herramienta y tiempo de corte [2]

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \left(\frac{\sigma}{b_6}\right) \cdot t} \cdot e^{-\left[\frac{h(T_1) - h(t)}{\sqrt{2} \cdot \left(\frac{\sigma}{b_6}\right)}\right]^2} dt \quad (10)$$

Análisis experimental del desgaste de herramientas en el proceso de taladrado

El análisis experimental se realiza en el proceso de taladrado que está definido como el proceso de remoción de material que produce superficies cilíndricas internas llamadas agujeros [6]. Para llevar a cabo el proceso de taladrado es necesario que la herramienta o la pieza gire y que simultáneamente la herramienta o la pieza se mueva según una trayectoria que coincide o que es paralela con el eje principal de la máquina. Es importante resaltar que el proceso de taladrado puede presentar problemas a medida que la profundidad del agujero aumenta, debido a que el flujo de viruta y el acceso del líquido lubricante se torna más difícil [7].

En la primera etapa del análisis de confiabilidad es necesario establecer las variables relevantes para definir la función del proceso, la importancia de dichas variables en la cadena productiva, y las fallas del proceso que pueden causar agujeros

fuera de las especificaciones. Al mismo tiempo este análisis sirve para verificar la importancia del desgaste de la herramienta de corte dentro de las fallas del proceso. Estas variables se definen utilizando el diagrama de causa-efecto presentado en la figura 3, y realizando el análisis de modos y efectos de falla (FMEA).

El diagrama de causa-efecto muestra la relación existente entre la obtención de agujeros fuera de las especificaciones y los parámetros importantes tanto en el proceso como en la operación; estos parámetros están representados en efectos denominados proceso, parámetros dinámicos y otros (vibraciones, errores de operación, entre otros). Obsérvese que el desgaste de la herramienta está involucrado en la mayoría de las causas principales. El agujero fuera de las especificaciones puede ser causado por errores de localización, errores en la dimensión y errores en la cilíndricidad del agujero, entre otros. Los errores de dimensión son causados por el desgaste de la herramienta, los procesos de formación de la viruta y por la vibración de la máquina como es mostrado experimentalmente por Furnee [8].

La herramienta presenta los más complejos modos de falla, lo que puede convertirla en el elemento más relevante en el momento de

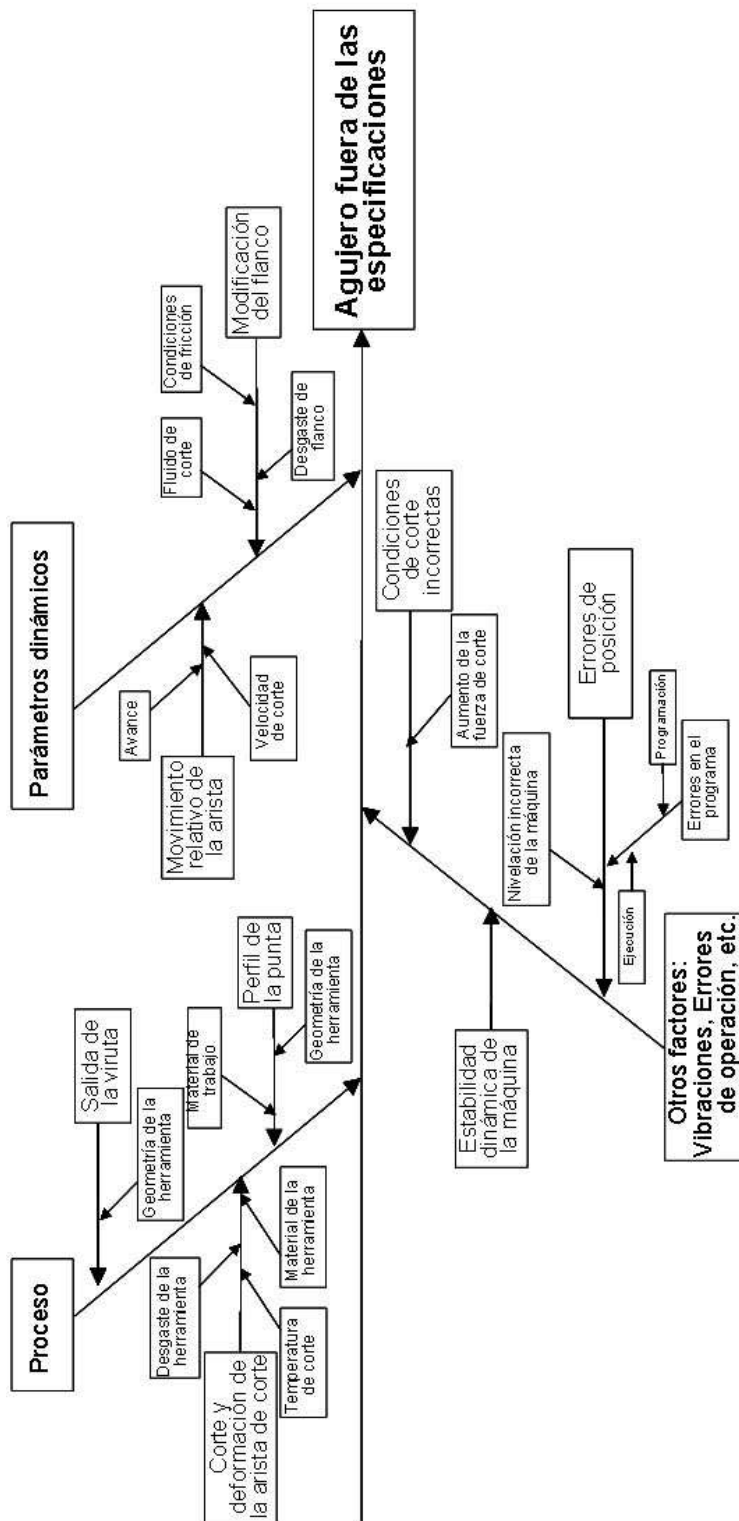


Figura 3 Diagrama causa-efecto para el proceso de taladrado

evitar agujeros fuera de las especificaciones, dado que los errores que dependen del operario pueden ser controlados con el entrenamiento y la implementación de análisis de métodos y movimientos y los errores de la máquina pueden tener una tasa de ocurrencia prácticamente constante y de frecuencia reducida, a través del empleo de la práctica de mantenimiento preventivo [9]. Por estas razones el análisis experimental realizado en este estudio tiene como objetivo caracterizar la confiabilidad de la herramienta de corte para el proceso de taladrado, encontrando para esta la distribución de probabilidad para el desgaste de flanco en dicha herramienta.

La broca presenta principalmente dos tipos de desgaste: el desgaste de flanco (V_B) y en cráter (K_B) tal como se indica en la figura 4. El primer tipo de desgaste se presenta en el extremo donde la velocidad de corte es mayor y el segundo es observado sobre la superficie de salida de la viruta.

Se observa que la variación del desgaste de flanco es alta y por esto existen diversos valores considerados como límites superiores para el desgaste, que dependen de la zona donde se le esté midiendo. Los valores recomendados, por fabricantes, para el desgaste en brocas, varían entre 0,120 mm y 0,30 mm, en función de su diámetro y del material utilizado. Estos valores para el desgaste de flanco están asociados con la

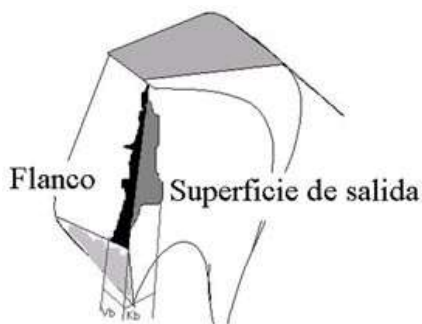


Figura 4 Definición del desgaste en cráter y de flanco en brocas [10]

pérdida de capacidad del proceso, para obtener agujeros conforme a las tolerancias previamente especificadas.

Analizando el proceso de taladrado y dada la relación existente entre el desgaste de la herramienta con los errores dimensionales y la rugosidad final del agujero, es importante analizar separadamente el proceso de desgaste de la herramienta, caracterizando las principales causas asociadas a este. Para esto se emplea el análisis tipo FMEA, conforme se muestra en la tabla 1.

En este trabajo el desgaste de flanco se mide en el extremo del filo cortante de la broca (figura 4), donde se espera que la magnitud del desgaste sea mayor, ya que la velocidad de corte es mayor en esta zona.

La herramienta utilizada para realizar los ensayos que permiten determinar la distribución de probabilidad es una broca de acero rápido M2. Los ensayos de taladrado fueron realizados con cuerpos de prueba de acero AISI 1016, en forma de prisma rectangular y realizando 3 líneas cada una con 25 agujeros, con las dimensiones y presentadas en la figura 5.

Para determinar el desgaste de flanco, se realizó un análisis de la superficie de la broca utilizando una lupa estereoscópica, *NIKON-SMZ80*, de alta calidad con cámara digital *JVC TKC1380* incorporada, con resolución de 250X.

Se ensayaron 10 brocas de 5 mm de diámetro, asignando un cuerpo de prueba para cada una. Inicialmente se hacen 20 agujeros, debido a que en una fase preliminar se determinó que antes de este número de agujeros la magnitud del desgaste era muy pequeña y no era posible establecer un valor para medirlo. Luego de abrir los 20 agujeros, en cada cuerpo, se hacen secuencias de 5 agujeros hasta completar máximo 45 agujeros de prueba o hasta que la broca falle. Las condiciones de taladrado se mantuvieron para todas las secuencias de agujeros (tabla 2). No se utilizó fluido lubricante a lo largo de los experimentos. Este procedimiento no está normalizado.

Tabla 1 Análisis de modos y efectos de las fallas para el desgaste de la broca

<i>Funciones</i>	<i>Modos de falla</i>	<i>Causas</i>	<i>Efectos</i>
Obtener agujeros cilíndricos de diámetro ϕ y profundidad h , conforme a los requisitos de diseño	Desgaste excesivo de la broca	Velocidad de corte fuera de lo especificado por el fabricante	Diámetro o altura fuera de las tolerancias geométricas y dimensionales exigidas Rugosidad superficial superior al valor especificado
		Avance superior al indicado en la hoja de procesos	
		Material fuera del especificado (más duro)	
		Fundición de la viruta y adhesión en la broca.	
		Salida incorrecta o deficiente de la viruta durante el taladrado	
Problemas de lubricación, falta de lubricación, dirección incorrecta del lubricante (no hacia la punta de la broca) o uso inadecuado de lubricante			

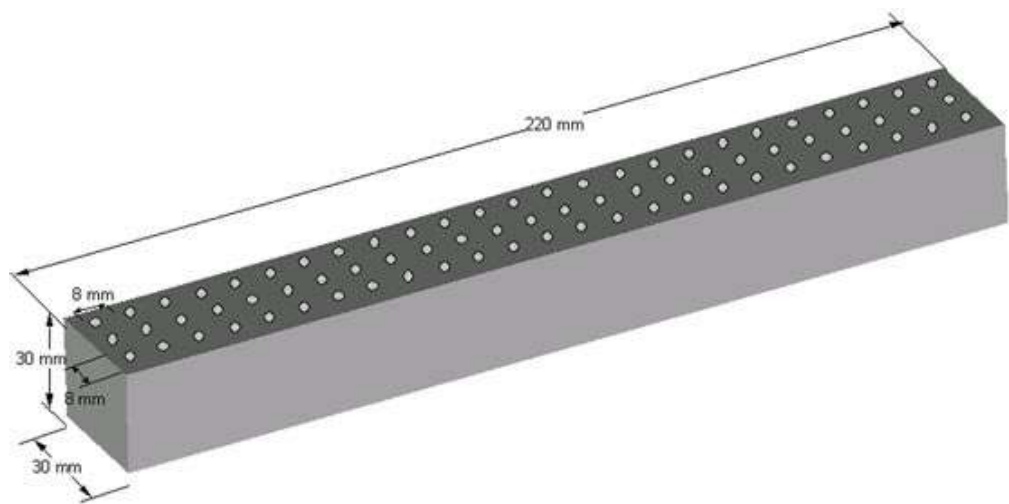


Figura 5 Cuerpo de prueba

En la lupa estereoscópica, con aumento de 25 veces, se fotografiaron las dos aristas de corte de cada una de las 10 brocas. Las fotografías fueron tomadas antes de comenzar los ensayos y al terminar cada una de las secuencias de 5 agujeros, obteniendo así, informaciones sobre el desgaste de flanco,

para cada broca, después de la realización de 0, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 agujeros.

Las mediciones de desgaste son hechas estableciendo y midiendo la diferencia existente entre la posición de la arista de corte en la broca nueva y

Tabla 2 Condiciones de operación

Diámetro de la broca (mm)	5
Profundidad del agujero (mm)	25
Avance (mm/rev)	0,025
Rotación (rpm)	4.000
Velocidad de corte ¹ (mm/min)	62.831
Lubricación	No hubo

1 $v = N \cdot \pi \cdot D$ donde N representa la rotación de la máquina y D el diámetro de la broca.

la posición de esta arista después de efectuados un número dado de agujeros, en la misma broca. Para conseguir esto, la imagen de la broca nueva es sobrepuesta a la imagen de la broca después del taladrado y en esta nueva imagen son establecidas líneas de referencia para la arista de corte de la broca nueva y la arista de corte de la broca usada, tal como se indica en la figura 6.

Este procedimiento se siguió para cada una de las dos aristas de corte de las 10 brocas utilizadas en el estudio. De esta forma, después de la realización de un número de agujeros, se tienen 20 valores para la magnitud del desgaste de flanco, valores suficientes para caracterizar la función densidad de probabilidad asociada al nivel de desgaste de flanco de la broca.

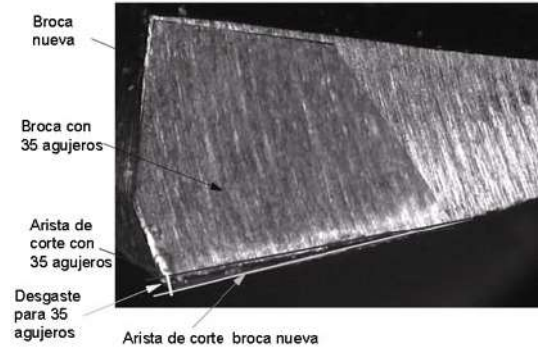


Figura 6 Procedimiento para establecer desgaste de flanco broca número 9 agujero 35

Los datos son presentados de forma gráfica en la figura 7 donde se puede observar que no todas las brocas lograron concluir el ensayo, debido a que estas fallaron antes de realizar los 45 agujeros, como es el caso de la broca número 4 que realizó apenas 30 agujeros, siendo esto un indicador de la variabilidad existente en el comportamiento de las mismas. Se verifica que el desgaste es creciente en función del aumento del número de agujeros realizado, y además que la tasa de crecimiento del desgaste no es constante. Obsérvese que entre 40 y 45 agujeros la tasa de crecimiento del desgaste es más elevada, indicando que el instante de falla de la broca está cerca. Este

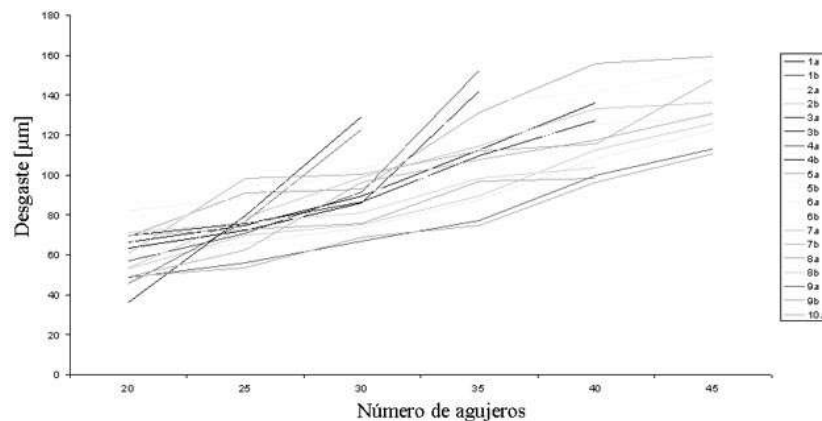


Figura 7 Evolución del desgaste de flanco para 10 brocas en función del número de agujeros

instante de falla es caracterizado por la incapacidad de la broca de realizar la operación de taladrado. Resáltase también que hay una buena coherencia entre las magnitudes de desgaste de flanco registradas para las dos aristas cortantes de una misma broca.

Los valores del desgaste, para un determinado número de agujeros, pueden determinar la función de densidad de probabilidad que expresa la variación probabilística del desgaste de flanco de la broca, después de realizados un número de agujeros predefinidos. Para esto se considera los valores de desgaste obtenidos en los ensayos realizados. Para determinar la función de densidad de probabilidad fue utilizado el *software* Weibull 6++, encontrando que la distribución que mejor modela el fenómeno de desgaste de flanco es la distribución Lognormal; sin embargo cabe resaltar que la segunda mejor distribución es la distribución de Weibull con dos parámetros y se puede verificar que estas dos distribuciones son muy próximas por tanto, no sería extraño encontrar que para algunas condiciones, la distribución que mejor explique el comportamiento del desgaste de flanco de la herramienta sea la distribución de Weibull. En la figura 8 se muestran las funciones de densidad de probabilidad para la magnitud del desgaste en función del número de agujeros realizados (20, 30, 35, 40, 45). El tiempo para ejecución de un agujero es 15 segundos, siendo este el valor utilizado en la transformación de número de agujeros realizados para tiempo de trabajo de la broca.

La curva que une los valores medios del desgaste para cada tiempo de operación, representa la variación del desgaste en función del tiempo de operación de la broca, la cual puede ser usada como referencia para definir el tiempo de vida de la herramienta, considerando una magnitud

de desgaste admisible. Este último es definido en función del efecto del aumento del desgaste sobre el acabado superficial y sobre las tolerancias dimensionales y geométricas del agujero.

Al fijar un valor máximo admisible para el desgaste, se tiene que el tiempo de operación de la broca, asociado a este valor máximo también es una variable aleatoria, como fue mostrado en la sección 2, y se puede demostrar que la evolución del desgaste para diferentes brocas no es constante.

Utilizándose el procedimiento propuesto por Hitomi [2], se fija un valor máximo admisible para el desgaste y a partir de las curvas de desgaste de las aristas de corte de las 10 brocas utilizadas se define la distribución de los tiempos de operación en los cuales se alcanza este valor de desgaste de flanco. Fijando el valor de desgaste admisible en 120 μm , se obtiene la probabilidad de que la brocas alcancen este valor en cada secuencia de agujeros, estos valores son presentados en la tabla 4, observando que la probabilidad que la broca falle, aumenta cuando es el número de agujeros aumenta.

Utilizando la ecuación de Taylor mejorada, con los coeficientes y exponentes aproximados para las condiciones del experimento, se encontraron los valores que se presentan en la tabla 3.

Con esta estimación se puede observar que la ecuación de Taylor considera los valores de carácter determinístico y no probabilístico, su estimación es puntual y no considera la distribución de probabilidad que existe en cada punto.

Con esta información se define la función de densidad de probabilidad asociada al tiempo de operación de las brocas hasta que el desgaste $V_B = 120 \mu\text{m}$ sea alcanzado, esta función de densi-

Tabla 3 Valores para la estimación del desgaste a partir de la ecuación de Taylor

Tiempo (min)	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25
Desgaste de flanco estimado (μm)	58,82	76,15	90,75	109,57	119,50	137,58

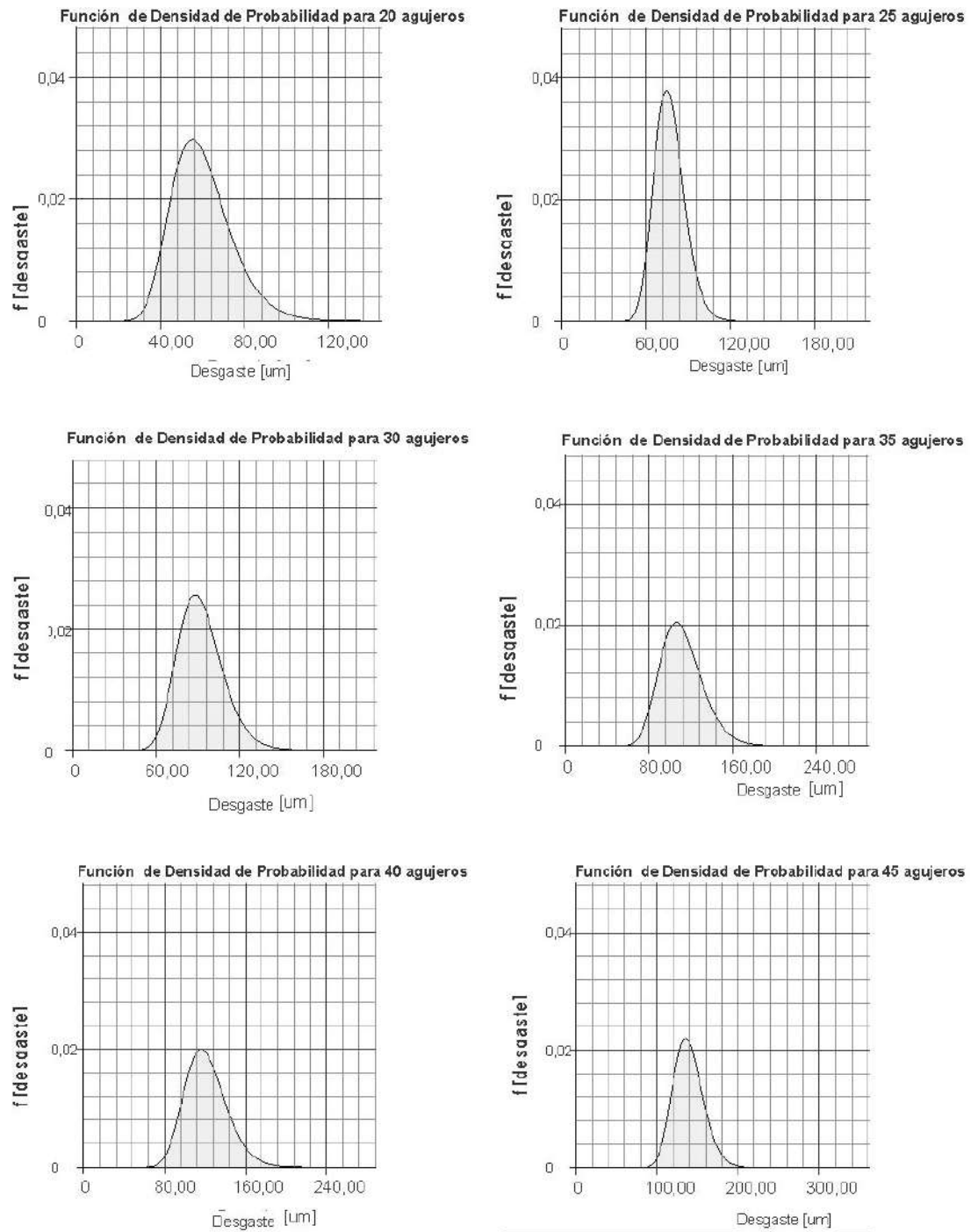


Figura 8 Curvas de densidad de probabilidad para la distribución del desgaste de flanco en función del número de agujeros realizados por la broca

Tabla 4 Valores de confiabilidad de la herramienta cuando el desgaste de flanco $V_b = 120 \mu\text{m}$

Número de agujeros	$P (V_b < 120)$
20	0,001084
25	0,000539
30	0,053967
35	0,307287
40	0,490106
45	0,849090

dad de probabilidad esta indicada en la figura 9. Encontrándose una distribución Lognormal con un tiempo medio de operación de 10,03 min y un coeficiente de variación de 0,0359.

Teniendo la función de densidad de probabilidad se puede obtener la confiabilidad en función del tiempo de taladrado, la cual es observada en la figura 10. Se puede concluir que cuando el tiempo de taladrado sobrepasa los 8,40 min la confiabilidad de la herramienta decrece rápidamente, y para el caso en estudio, este tiempo corresponde

al tiempo medio indicado para la sustitución de la herramienta, para evitar que esta opere con un desgaste de flanco mayor a la magnitud fijada, ya que eso perjudicaría la calidad del agujero.

Conclusiones

La confiabilidad de un proceso de fabricación puede ser entendida como la capacidad que este tiene para producir piezas de acuerdo con una especificación dimensional y geométrica. En este estudio se analizó cualitativamente el proceso de taladrado, estableciéndose las fallas del proceso y los elementos que permiten estimar el desempeño y específicamente la confiabilidad de la herramienta.

Para evaluar el desgaste de una herramienta de maquinado se realizó el análisis probabilístico del desgaste de flanco, encontrando así la confiabilidad cuando se preestablece que el desgaste de flanco máximo admisible es de $120 \mu\text{m}$. Se determinó la distribución de densidad de probabilidad que representa la variación del desgaste de flanco para condiciones específicas de operación

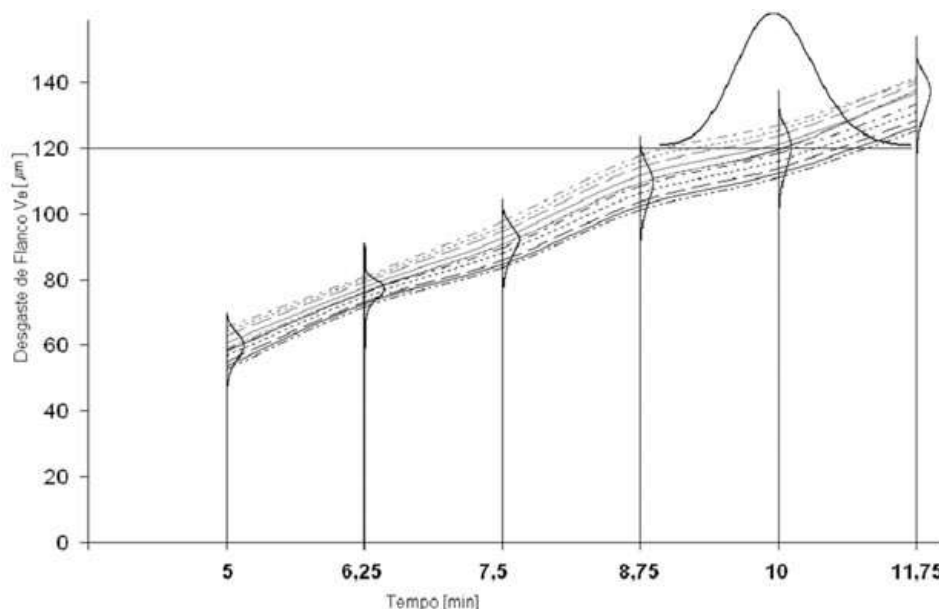


Figura 9 Función de densidad de probabilidad en función del tiempo de taladrado

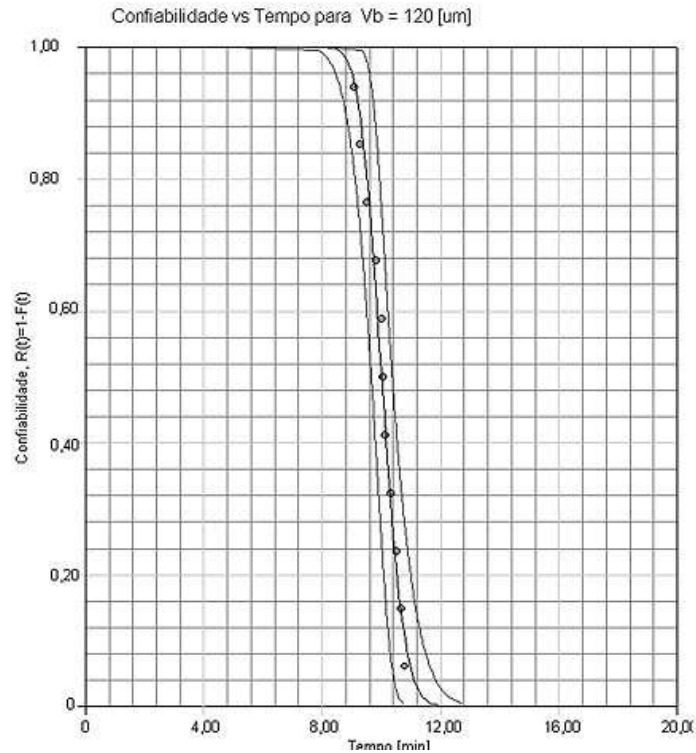


Figura 10 Confiabilidad de la herramienta en función del tiempo de maquinado

de una broca de acero rápido, encontrando que la distribución que mejor modela este fenómeno es la distribución Lognormal, verificando que la probabilidad de que la broca falle aumenta al aumentar el número de agujeros.

Conocida la probabilidad de que la broca falle, es posible conocer el tiempo de vida de la herramienta y establecer políticas de sustitución de la misma que minimicen la producción de piezas defectuosas. Como se ha demostrado, un proceso se puede definir como la relación estadísticamente independiente entre la herramienta, el operario y la máquina.

Referencias

1. R. Ramakumar. *Engineering Reliability*. New York. Prentice Hall. 1993. p. 442.
2. K. Hitomi, N. Nakamura, S. Inoue. "Reliability Analysis of cutting tools". En: *Journal of Engineering for Industry*. Vol. 101. N.º 2. 1979. pp. 185-190.
3. T. Freiheit, J. Hu. "Impact of machining parameter on machine reliability and system productivity". En: *Transactions of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 124. 2002. pp. 296-304.
4. T. El Wardany, M. Elbestawi. "Prediction of tool failure rate in turning hardened steels". En: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 13. N.º 1. 1997. pp. 1-16.
5. K. Wang, W. Lin, F. Hsu. "A new approach for determining the reliability of a cutting tool". En: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 17. 2001. pp. 705-909.
6. S. Kalpakjian, S. Schmid. *Manufacturing Engineering and Technology*. New York. Prentice-Hall. 2001. p. 1148.
7. L. Doyle. *Manufacturing Processes and Materials for Engineers*. New York. Prentice-Hall. 1985. p. 926.
8. R. J. Furnee, C. L. Wu, A. G. Ulsoy. "Statistical analysis of the effects of feed, speed, and wear on hole quality in drilling". En: *Transactions of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 122. 2000. pp. 267-273.

9. C. E. Patiño. *Confiabilidade aplicada ao processo de manufatura de sistemas mecânicos*. Tesis de Maestría. EPUSP-PMR. 2004. p. 156.
10. S. A. Sandvik, Coromant. *Ferramentas Rotativas*. 1999. p. 224.