Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Determinación de profundidad máxima de corte en acero 1018 y aluminio 6061 T6 con herramientas de acero rápido M42

Determination of maximum depth of cut in 1018 steel and 6061 T6 aluminum with M42 high speed steel tools

Romero-Mitre, R.D.*, López-Rodríguez, S., Hernández-Corona, J.L., Galaviz-Rodríguez, J.V.

Universidad Tecnológica de Tlaxcala Carr. a El Carmen Xalpatlahuaya, S/N, C.P. 90500. Huamantla, Tlaxcala, México.

roman.romero@uttlaxcala.edu.mx*; sonnysutt@uttlaxcala.edu.mx; coronaluis@uttlaxcala.edu.mx; galaviz_4@uttlaxcala.edu.mx

Innovación tecnológica: Productividad máxima en maquinado de desbaste.

Aplicación empresarial: Industria metalmecánica.

Recibido: 17 junio 2024
Aceptado: 09 enero 2025

Abstract

The objective of this research work is to define the maximum depth of cut that can be applied for the roughing operation in the milling process. This research study focuses on the use of 1018 steel and 6061 T6 aluminum both of them of a high level of machinability and widely used in this processes, using economical tools such as M42 high speed steel, in diameters of 3.18, 4.76, 6.35 and 9.53 mm. The purpose of this is to maximize the productivity of the mentioned process, with its consequent time optimization and cost reduction. The methodology applied is design of experiments with a single factor, n levels (since this was defined by each tool) and 5 replicates, in this case the factor is the depth cut and the levels are the different values assigned to the factor mentioned, with this, it was possible to find a maximum depth of cut for each tool diameter in function of the material strength of the tool, with is directly proportional to the corresponding cross section area. The new aspect of this is that it has documented the behavior of the tools in combination with the machining of the raw material mentioned above to obtain maximum exploitation of these. Finally, we add the feed factor with two levels low (0.05 mm/tooth) and high (0.1 mm/tooth) to the one factor experiments initially considered**,** to make more complete this

work, which gives as a result an indispensable physical-mathematical relationship in the determination of the maximum depth of cut, the involved variables in the resulting equation are the maximum depth of cut and the recommended feed, which are mutually dependent, if the feed is reduced, it can increase the depth of cut proportionally and vice versa.

Keywords: Depth of cut, Roughing, M42 high speed steel, Milling, Machining, 1018 steel, 6061 T6 aluminum.

Resumen

El objetivo de este trabajo de investigación es definir la máxima profundidad de corte que puede aplicarse para la operación de desbaste en un proceso de fresado. Este estudio se centra en el uso del acero 1018 y el aluminio 6061 T6 ambos de un alto nivel de maquinabilidad y ampliamente utilizados en estos procesos, usando herramientas económicas como lo son las de acero rápido M42, en diámetros de 3.18, 4.76, 6.35 y 9.53 mm, el propósito de esto es maximizar la productividad del proceso mencionado, con su consecuente optimización de tiempos y reducción de costos. La metodología aplicada es el diseño de experimentos con un solo factor, n niveles (ya que así se definieron por cada herramienta) y 5 réplicas, en este caso el factor es la profundidad de corte y los niveles son los diferentes valores asignados al factor en cuestión, con esto se pudo encontrar una profundidad máxima de corte para cada diámetro de herramienta en función de la resistencia del material de la misma, la cual es directamente proporcional al área de la sección transversal correspondiente. Lo novedoso de esto es que se tiene documentado el comportamiento de las herramientas en combinación con el maquinado de la materia prima mencionada para obtener un máximo aprovechamiento de estas. Por último, se agrega el factor del avance con dos niveles: bajo (0.05 mm/diente) y alto (0.1 mm/diente), a los experimentos de un factor inicialmente considerados, para hacer más completo este trabajo, lo cual da como resultado una relación físico-matemática indispensable en la determinación de la profundidad máxima de corte, las variables involucradas en la ecuación resultante son la profundidad máxima de corte y el avance recomendado, los cuales son mutuamente dependientes, si se reduce el avance se puede aumentar la profundidad de corte de forma proporcional y viceversa.

Palabras clave: Profundidad de corte, Desbaste, Acero rápido M42, Fresado, Maquinado, Acero 1018, Aluminio 6061 T6.

1. Introducción

La profundidad de corte es una variable crítica del proceso de fresado que requiere de ser definida de manera precisa a través de herramientas matemáticas apoyadas en datos, como el tipo de cálculo que se realiza para las revoluciones por minuto y el avance del mismo.

Al realizar la revisión de las publicaciones más reciente del tema de fresado, se encontró que para la determinación de la profundidad de corte (1) sólo indica valores de velocidad de corte, avance por diente y anchos de corte, por su parte (2), únicamente menciona los conceptos de fresado convencional y CAM, (3) en su estudio de simulación de maquinado no considera a la profundidad de corte, asimismo (4) en su trabajo de fresado

paramétrico sólo toma en cuenta las fórmulas de velocidad de corte y avance, (5) en su publicación sobre la dinámica del maquinado y optimización de parámetros del proceso, sólo indica los efectos de las vibraciones en el proceso, sin tocar la variable de profundidad de corte, (6) menciona que la calidad de los componentes fresados depende de los factores de profundidad de corte, avance, velocidad de corte, etc., sin ahondar más en el tema, por su lado (7) indica que la profundidad crítica de corte en el fresado decrece con el incremento en el avance, sin presentar ningún dato ni fórmula al respecto, en un estudio sobre el desgaste de fresas, (8) muestra los datos de avance, rpm y profundidad de corte sin indicar como se definen o calculan, (9) en su capítulo de fresado no indica ningún tipo de variable del proceso, (10) muestra un ejemplo de parámetros de fresado con una profundidad de corte de 26 mm para una operación de escuadrado para una fresa enteriza de 16 mm de diámetro para maquinar una aleación de titanio $TiAl_6V_4$, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante de la herramienta, sin mostrar tablas o fórmulas al respecto y (11) en su capítulo de fresado indica fundamentos del mismo sin especificar como se define la profundidad de corte.

Por otra parte (12) indica que al maquinar aluminio 6061 T6 con una herramienta de acero rápido de 4 mm de diámetro encuentra que con una profundidad de corte de 0.32 mm y 250 mm/min de avance se logra la deflexión óptima de 31.22 μm. En cuanto a (13) afirma que en el fresado la relación de la profundidad de corte y el avance es de gran importancia, pero las bases que permitirían el mayor aprovechamiento de este fenómeno aún están sin explicar. Asimismo, (14) realizaron experimentos de ángulos de corte desde 10° hasta 45° en un Centro de Maquinado Vertical de 5 ejes con un cortador de punta de bola cónico en aluminio 7075 T6, con profundidades de corte desde 0.6 mm hasta 2.4 mm en incrementos de 0.2 mm, con la finalidad de monitorear en tiempo real esta variable y determinar su efecto en la calidad de la pieza. Otro trabajo importante sobre la profundidad de corte lo realizó (15) para monitorear variaciones significativas de la profundidad de corte durante el fresado frontal de componentes parecidos a una red. El fabricante (16) en su manual de herramientas de carburo para fresado indica que la profundidad de corte debe ser definida apropiadamente de acuerdo al método de maquinado, la materia prima y la geometría del filo de corte. La profundidad de corte es determinada al multiplicar el diámetro o el radio de la punta de bola por un coeficiente fijo. En lo que respecta a (17) en su manual de fresado con insertos indica que la profundidad de corte (a_p) es la diferencia entre el radio de agujero sin mecanizar y el radio una vez mecanizado, además que el valor máximo de a_p está limitado principalmente por el tamaño de plaquita y la potencia de la máquina, también se indica que en aplicaciones de mecanizado pesado se utilizan fresas con plaquitas y diámetros grandes. La velocidad de corte es normal, pero valores altos de a_p (profundidad de corte) y f_z (avance por diente), combinados con un valor grande de a_e (ancho de corte) hacen que resulte muy productivo, también indica que de manera específica la profundidad de corte máxima para diversas fresas planeadoras de insertos de carburo desde 40 mm hasta 500 mm de diámetro y profundidades de corte máximas desde 10 mm hasta 18 mm.

Como se observa, existe aún una gran área de oportunidad para determinar la profundidad de corte en el fresado.

Las principales aportaciones de este trabajo son la determinación de la profundidad de corte máxima para el desbaste de la materia prima arriba mencionada en conjunto con los cortadores de acero rápido en los diámetros trabajados a la velocidad de corte

recomendada y con los avances por diente en los niveles antes mencionados, también un resultado importante es la determinación de la ecuación que relaciona el avance y la profundidad de corte como variables inseparables que permite obtener una amplia gama combinaciones de las mismas con el propósito de obtener el máximo aprovechamiento de la herramienta.

La importancia de la propuesta presentada radica en la especificidad de los parámetros encontrados de profundidad de corte máxima y su relación con el avance, usando el acero 1018 y el aluminio 6061 T6 como materia prima y el acero rápido M42, a diferencia de otros autores que no presentan la metodología ni los resultados correspondiente, como se mencionan en esta parte.

La hipótesis que se plantea es que las variables de profundidad de corte máxima y el avance recomendado, combinados dan como resultado la mayor productividad en la remoción de material en la fase de desbaste en el fresado y con esta relación, se pueden realizar numerosas combinaciones a partir de los datos encontrados en las tablas de resultados de dicha relación.

2. Materiales y métodos experimentales

2.1 Herramientas de corte y materia prima

Las herramientas de corte seleccionadas fueron cortadores verticales planos de acero rápido M42 con una composición química de 1.10% de carbono, 0.30% de manganeso, 0.30% de silicio, 3.75% de cromo, 1.15% de vanadio, 1.50% de tungsteno, 9.50% de molibdeno y 8.00% de cobalto, con diámetros de 3.18, 4.76, 6.35 y 9.53 mm de 4 filos, por ser de amplio uso en operaciones de desbaste, para la fabricación de piezas de tamaño pequeño y mediano, que abarcan en gran medida la gama de dimensiones a maquinar por el proceso de fresado, tanto en talleres de PYMES como en empresas grandes y la materia prima seleccionada son el acero al carbono 1018 (0.15%C-0.20%C, 0.60%Mn-0.90%Mn, 0.040%P_{max} y 0.050%S_{max}) y el aluminio 6061 T6 (0.8%Mg-1.2%Mg, 0.4%Si-0.8%Si, 0.7%Fe_{max}, 0.15%Cu-0.4%Cu, 0.15%Mn_{max}, 0.04%Cr-0.35%Cr, 0.25Zn_{max}, 0.15%Ti_{max}, de un alto nivel de maquinabilidad y son de uso común en las operaciones de fresado, estos dos materiales pertenecen a los grupos de materiales P (aceros en general) y N (aluminios) de acuerdo con (18), con lo cual los datos a obtener podrán aplicarse a los materiales de estos grupos.

La forma de la materia prima fueron placas, en donde se maquinó a una longitud de 125 mm en forma lineal.

2.2 Máquina utilizada

La máquina que se utilizó es un Centro de Maquinado Vertical de 3 ejes (HAAS VF2) de 20 HP de potencia, con una capacidad de 7500 rpm, 600 mm de carrera en el eje X, 400 mm en el eje Y y 300 mm en el eje Z, con 20 herramientas en el carrusel, a través de un puerto USB se seleccionaron los programas previamente realizados en una computadora con software de CAD CAM, en donde se capturaron los parámetros de revoluciones por minuto, avance, avance de entrada, profundidad de corte y distancias de referencia previamente definidas en el diseño de experimentos.

2.3 Métodos experimentales

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología realizada, en este caso se realiza el mismo procedimiento variando el avance por diente de 0.05 a 0.1 mm/diente (2 niveles de los experimentos) en todas las combinaciones de herramienta de acero rápido M42 con los diámetros estudiados y los materiales también previamente definidos. La velocidad de corte se mantiene constante, lo mismo que las distancias de

referencia en el programa de CAD CAM (claro, retracción, distancia de seguridad y avance de penetración), además de la distancia de acercamiento físico en el Centro de Maquinado Vertical para que los tiempos de maquinado no se alteren por las variaciones que se pudieran presentar si existiesen condiciones diferentes para cada experimento.

Por otra parte, las fórmulas de los cálculos de revoluciones y avances se realizan una sola vez para cada combinación de diámetro de herramienta y materia prima, por lo que las variaciones entre cada experimento son los valores de la profundidad de corte que inician desde un valor bajo de referencia (0.05 mm) para la herramienta de 3.18 mm de diámetro, por ejemplo, hasta un máximo definido por la distancia inmediata inferior a la falla de la herramienta por rotura en combinación con el avance previamente calculado. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología.

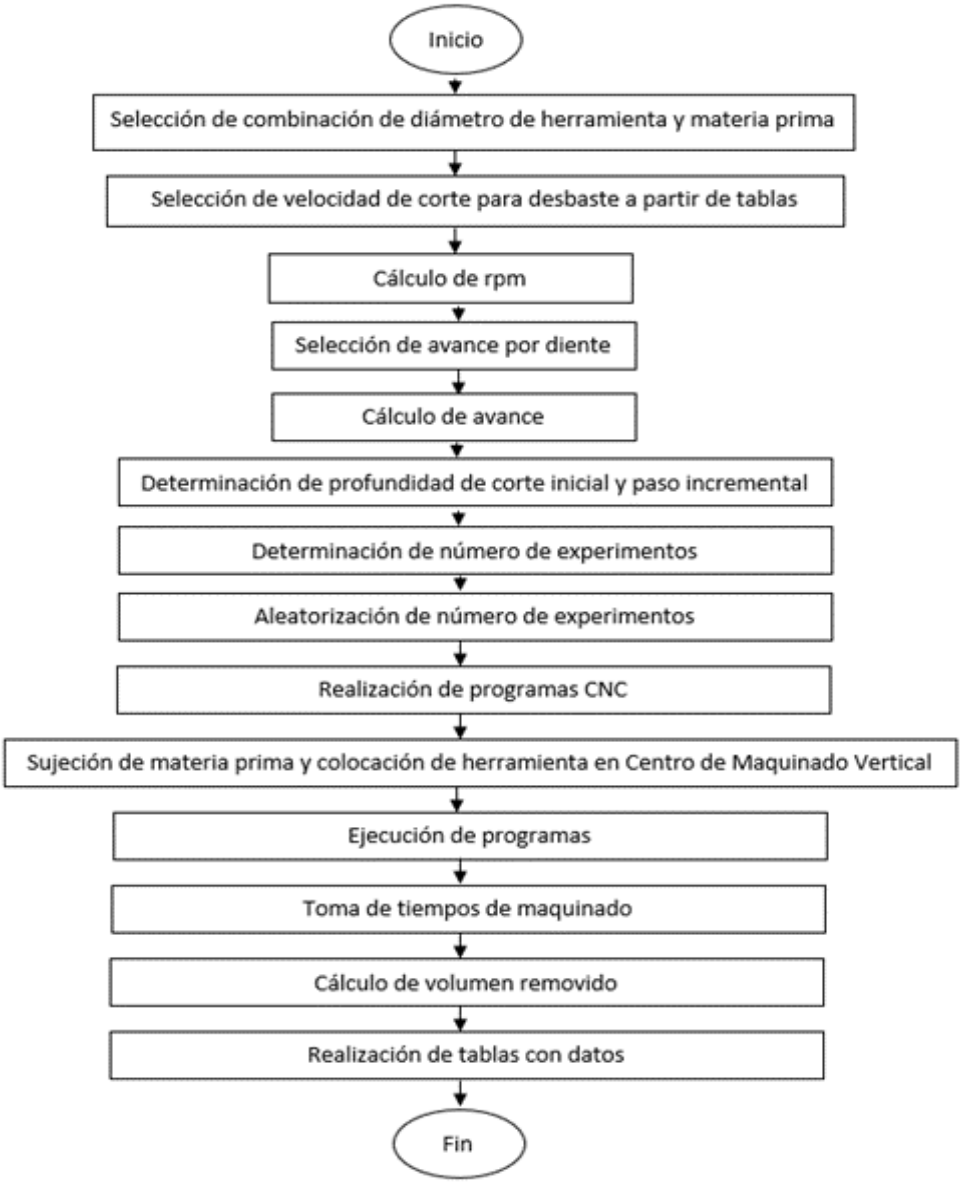

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.

El desglose de la metodología se presenta a continuación:

La velocidad de corte para una combinación de herramienta de acero rápido M42 y acero de libre maquinado como el 1018 de acuerdo con (19) es de 30 a 45 m/min y para aluminio es de 50 a 300 m/min, por lo que se toman los valores más bajos para la operación de desbaste y de acuerdo con esto se calculan las revoluciones por minuto, posteriormente con el dato de las rpm obtenidas, se calculan los avances de 0.1 mm/diente (Avance 1) y se define un avance de 0.05 mm/diente (Avance 2) y tomando en cuenta que todas las herramientas son cortadores planos de 4 dientes, se realiza la tabla 1.

Tabla 1. Combinaciones de diámetros de herramientas, materia prima, rpm y avance.

No	Diámetro (mm)	Materia prima	RPM	Avance 1	Avance 2
1	3.18	Acero 1018	3007	1209	604.5
2	3.18	Aluminio 6061 T6	5042	2048	1024
3	4.76	Acero 1018	2005	802	401
4	4.76	Aluminio 6061 T6	3361	1364	682
5	6.35	Acero 1018	1504	602	301
6	6.35	Aluminio 6061 T6	2521	1024	512
7	9.53	Acero 1018	1003	401	200.5
8	9.53	Aluminio 6061 T6	1681	684	342

Enseguida se define la profundidad de corte inicial y sus respectivas réplicas, como se muestra en la tabla 2, en donde los datos corresponden al cortador vertical plano de 3.18 mm de diámetro y esto mismo se realiza para cada combinación de diámetro de cortador y materia prima.

Tabla 2. Número de corridas del experimento.

Profundidad de corte (mm)	Número de corrida				
0.05	1	2	3	4	5
0.10	6	7	8	9	10
0.15	11	12	13	14	15
0.20	16	17	18	19	20
0.25	21	22	23	24	25
0.30	26	27	28	29	30
0.35	31	32	33	34	35
0.40	36	37	38	39	40

Se generan en Excel los números aleatorios a estos 40 experimentos propuestos y se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Aleatorización de experimentos.

Secuencia de prueba	Número de corrida	Profundidad de corte (mm)	Secuencia de prueba	Número de corrida	Profundidad de corte (mm)	Secuencia de prueba	Número de corrida	Profundidad de corte (mm)
1	9	0.10	15	11	0.15	29	23	0.25
2	35	0.35	16	34	0.35	30	21	0.25
3	18	0.20	17	6	0.10	31	10	0.10
4	16	0.20	18	25	0.25	32	20	0.20
5	1	0.05	19	36	0.40	33	2	0.05

6	32	0.35	20	31	0.35	34	12	0.15
7	13	0.15	21	38	0.40	35	27	0.30
8	19	0.20	22	29	0.30	36	24	0.25
9	3	0.05	23	8	0.10	37	28	0.30
10	37	0.40	24	39	0.40	38	7	0.10
11	15	0.15	25	22	0.25	39	14	0.15
12	17	0.20	26	30	0.30	40	5	0.05
13	4	0.05	27	40	0.40			
14	33	0.35	28	26	0.30			

A partir de los datos de la tabla 1 y de la secuencia de experimentos de la tabla 3 se establecen los parámetros principales para la generación de los programas de Control Numérico Computarizado, en los cuales además se consideran como constantes el avance de penetración a 100 mm/min, este parámetro se selecciona debido a que es una velocidad baja, la cual permite cuidar la integridad de la herramienta al entrar con suavidad en la materia prima, la distancia de seguridad de 1 mm, que permite llegar de manera rápida y segura a la superficie del material a maquinar, no es un valor como lo sugiere el software de CAD CAM que es de 10 mm, lo cual implicaría que el inicio de la remoción de material tardara 10 veces más de lo que se consigue con el de 1 mm, y tampoco es un valor muy bajo que pudiera colisionar con la superficie de la materia prima en caso de tener irregularidades muy grandes, el avance por diente de 0.1 mm/min, este parámetro también se selecciona en base al cuidado de la herramienta, un avance mayor provoca un desgaste prematuro de la herramienta, 4 filos del cortador vertical plano, con 4 filos se consiguen mayores avances que con 2 filos, pero menores de 6 filos, lo que permite tener un balance entre un avance muy bajo o muy alto, todo esto en función del cuidado de la herramienta y la aplicación de refrigerante, para evitar que la herramienta se funda con la materia prima. Con estas condiciones de maquinado, se generan los programas CNC correspondientes para cada corrida y se prepara la materia prima en el Centro de Maquinado Vertical VF2, así también se coloca la herramienta correspondiente, se corren los programas y se obtienen los datos de tiempo de maquinado directamente del panel del Centro de Maquinado Vertical, y volumen removido por unidad de tiempo se calcula en base a la ecuación 1 (20).

$$MRR = w * d * f_r \qquad \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde:

$MRR = Remoción\ de\ material\ (\frac{mm^3}{\min})$, $w = Ancho\ de\ corte\ (mm)$,

$d = Profundidad\ de\ corte\ (mm)$, $f_r = Velocidad\ de\ remoción\ (\frac{mm}{\min})$

3. Resultados

Se presentan los resultados de los experimentos en la tabla 4 que corresponden a la combinación de acero 1018 y 3.18 mm de diámetro de un cortador vertical plano de acero rápido M42, en donde se observa el número de pasadas, el tiempo de maquinado y el volumen removido.

De esta forma se establece de manera específica la capacidad de corte de la herramienta a diferencia de (21), que indica que las profundidades típicas de desbaste son de 2-5 a 20 mm de manera muy general. Por otra parte, en la tabla 4 se observa el tiempo de maquinado que está en función del avance

calculado en la tabla 1, lo cual representa un dato exacto que contrasta con lo que indica (22) que las pasadas de desbaste se harán a una velocidad de avance baja, en su descripción de un desbaste para la fabricación de una ranura.

Tabla 4. Tiempos y volúmenes de maquinado.

Número de corrida	Número de pasadas	Tiempo de maquinado (min:s)	Volumen removido (mm^3)	Número de corrida	Número de pasadas	Tiempo de maquinado (min:s)	Volumen removido (mm^3)
9	5	0:46	198	38	Rotura	---	---
35	Rotura	---	---	29	4	0:37	396
18	4	0:37	317	8	5	0:46	198
16	4	0:37	317	39	Rotura	---	---
1	10	1:33	198	22	4	0:37	396
32	Rotura	---	---	30	Rotura	---	---
13	4	0:37	238	40	Rotura	---	---
19	4	0.37	317	26	3	0:28	357
3	10	1:33	198	23	4	0:37	396
37	Rotura	---	---	21	4	0:37	396
15	4	0:37	238	10	5	0:46	198
17	4	0:37	317	20	4	0:37	317
4	10	1:33	198	2	10	1:33	198
33	Rotura	---	---	12	4	0:37	238
11	4	0:37	238	27	3	0:28	357
34	Rotura	---	---	24	4	0:37	396
6	5	0:46	198	28	3	0:28	357
25	4	0:37	396	7	5	0:46	198
36	Rotura	---	---	14	4	0:37	238
31	Rotura	---	---	5	10	1:33	198

En la figura 2 se observa la gráfica de los datos de la tabla 4, el comportamiento del número de pasadas (variable independiente) el cual es directamente proporcional al tiempo de maquinado (variable dependiente), el número de pasadas es inversamente proporcional a la profundidad de corte, por lo que entre mayor profundidad de corte menor será el tiempo de maquinado hasta llegar a un máximo en lo referente a la profundidad de corte y por consiguiente a un mínimo en lo que respecta al tiempo de maquinado, dependiendo del diámetro del cortador vertical plano, esto tiene gran importancia como lo menciona (23) en lo referente a la minimización del costo de maquinado. Por otro lado, a mayor diámetro del cortador, mayor profundidad de corte se puede lograr, esto se observa claramente en las tablas 5 a 8, lo cual coincide con lo establecido por (24) en su fórmula de esfuerzo cortante que es lo que ocurre en la herramienta.

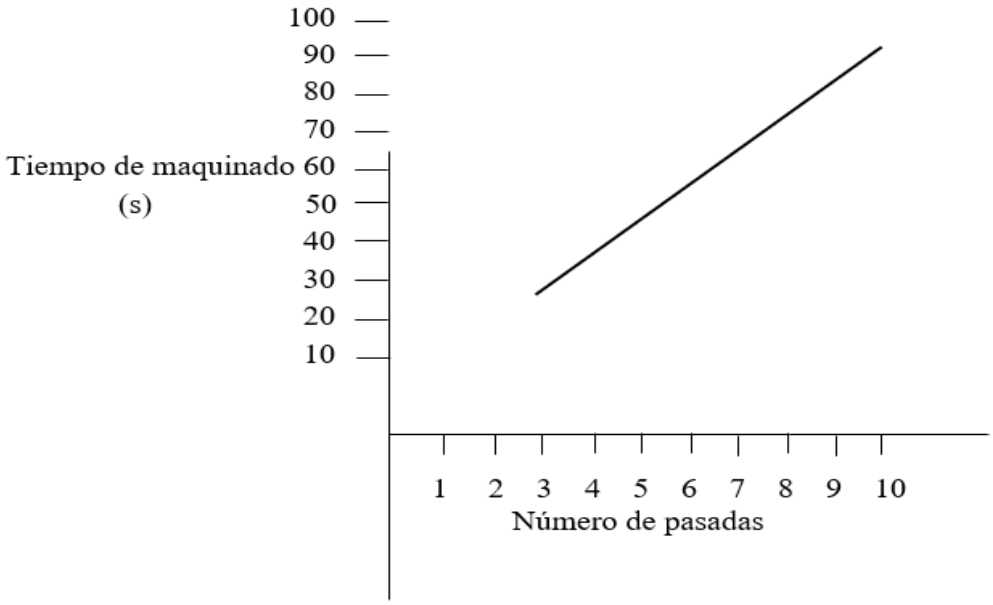

Figura 2. Gráfica de número de pasadas contra tiempo de maquinado.

En la figura 3 se observan los diversos maquinados realizados sobre el acero 1018 con la herramienta de 6.35 mm de diámetro, que es otra de las herramientas utilizadas en este trabajo de investigación, la longitud de referencia es 125 mm y el ancho del corte corresponde al diámetro de la herramienta.

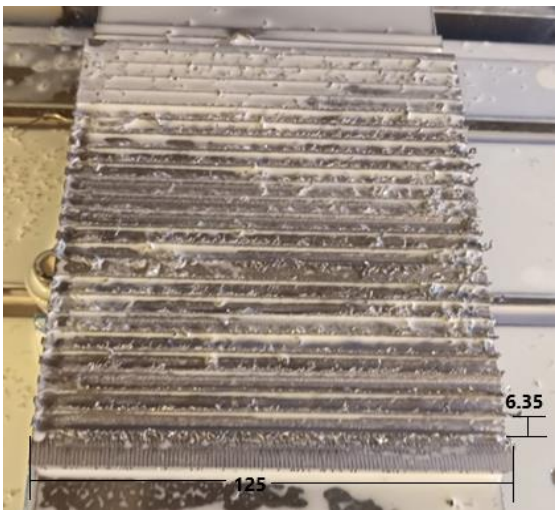

Figura 3. Maquinado de placa de acero 1018, con herramienta de 6.35 mm de diámetro.

En la figura 4 se observan los maquinados correspondientes al aluminio 6061 T6 con la herramienta de 4.763 mm de diámetro, estos maquinados son de las corridas del diseño de experimentos correspondiente, cuya profundidad de corte inicial se toma de 2 mm, ya que ese fue el parámetro máximo de la herramienta inmediata inferior (3.18 mm) previamente utilizada en los experimentos, en este caso los diversos maquinados se comportan de manera similar a los indicados en la figura 2, con la gran diferencia de que las profundidades de corte son mayores, al ser un material más suave que el acero 1018.

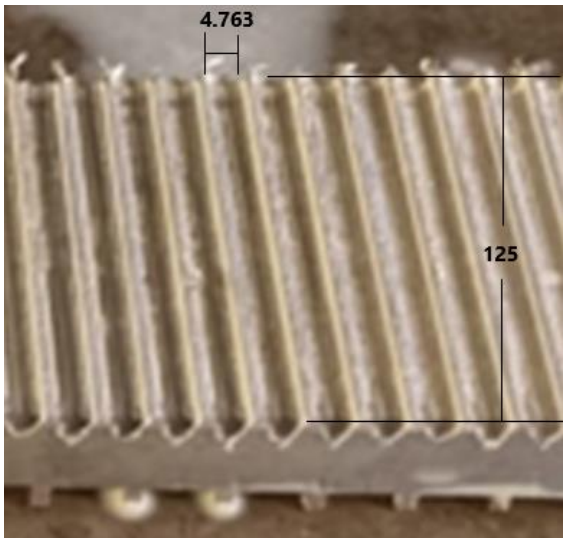

Figura 4. Desbaste de aluminio 6061 T6 con herramienta de 4.763 mm de diámetro.

En base a los datos de tiempos y volúmenes de maquinado, se ve en el caso de las corridas 1 a 10 en donde los volúmenes de maquinado son los mismos ($198\,mm^3$), el tiempo es inversamente proporcional a la profundidad de corte, al tener como constantes el ancho de corte, que está definido por el diámetro del cortador vertical plano y el avance, que es el mismo en todas las operaciones de desbaste por estar en función de la velocidad de corte, por lo que se puede establecer la igualdad de volúmenes con la ecuación 2.

$$VR_1 = VR_2 \qquad \textbf{(Ec. 2)}$$

En donde:
$VR_1 = Volumen\ removido\ 1 \quad VR_2 = Volumen\ removido\ 2$

El volumen removido 1 (VR_1) está integrado por el ancho de corte w (diámetro de la herramienta), la profundidad de corte 1 (d_1), el avance (f_r) y el tiempo de maquinado 1 (Tm_1) y el volumen removido 2 (VR_2) está integrado por el ancho de corte w (diámetro de la herramienta), la profundidad de corte 2 (d_2), el avance f_r y el tiempo de maquinado 2 (Tm_2), se realiza la sustitución de estas variables en la ecuación 2 lo que nos da como resultado la ecuación 3.

$$w * d_1 * f_r * T_{m1} = w * d_2 * f_r * T_{m2} \qquad \textbf{(Ec.3)}$$

Al eliminar los términos de ancho de corte y avance por ser comunes a ambos lados de la ecuación, se obtiene la ecuación 4.

$$d_1 * T_{m1} = d_2 * T_{m2} \qquad \textbf{(Ec.4)}$$

En la ecuación 4 se puede observar que, para mantener la igualdad, si se incrementa la profundidad de corte el tiempo de maquinado debe reducirse de manera proporcional y en el caso de las corridas 6 a 10 donde la profundidad de corte es el doble de las corridas 1 a 5, por consiguiente, el tiempo de maquinado es la mitad del valor obtenido en las primeras corridas. Esto tiene como consecuencia que al utilizar la profundidad máxima de corte el tiempo de maquinado alcance un mínimo, lo que, en términos de eficiencia, se logra una maximización de la misma, al no haber una mejor relación de tiempo como variable dependiente, el cual es crítico en las operaciones de maquinado y la profundidad de corte como variable independiente que está en función del diámetro de la herramienta, el material de la herramienta (resistencia), el material a maquinar y el avance.

Esta proporcionalidad tiene un límite que es la profundidad de corte máxima, por lo que este procedimiento se aplicó para el acero 1018 y el aluminio 6061 T6 en conjunto con los diámetros de 3.18, 4.76, 6.35 y 9.53 mm, de cortadores verticales planos de acero rápido M42. Estos diámetros de herramientas son de uso común en operaciones de desbaste de piezas pequeñas y medianas que se trabajan principalmente en talleres de PYMES. El límite indicado se determina en base a que después de ese parámetro la herramienta sufre una rotura que hace inservible a la misma, este límite se alcanza al producirse el esfuerzo cortante simple de rotura, ya que la fuerza cortante está en función del área proyectada de corte integrada por el diámetro de la herramienta y la profundidad de corte, por lo que a mayor profundidad de corte, mayor fuerza necesaria a vencer en la materia prima y por consiguiente mayor esfuerzo cortante que al aumentar de manera progresiva alcanza el límite de la resistencia en la herramienta y se rompe en el cambio de sección transversal del cortador vertical plano (cambio de diámetro de corte a diámetro de zanco).

Como resultados, se presentan las tablas 5, 6, 7 y 8 que pueden tomarse como referencia para el maquinado de acero 1018 y aluminio

6061 T6, con cortadores verticales planos de acero rápido M42 en operaciones de desbaste.

Tabla 5. Parámetros para desbaste para acero 1018 con cortadores de acero rápido M42 con avance de 0.1 mm/diente.

Diámetro de cortador vertical plano (mm)	RPM	Avance (mm/min)	Profundidad máxima de corte (mm)
3.18	3007	1209	0.3
4.76	2005	802	0.6
6.35	1504	602	0.7
9.53	1003	401	1.4

Tabla 6. Parámetros para desbaste para acero 1018 con cortadores de acero rápido M42 con avance de 0.05 mm/diente.

Diámetro de cortador vertical plano (mm)	RPM	Avance (mm/min)	Profundidad máxima de corte (mm)
3.18	3007	604.5	0.6
4.76	2005	401	1.2
6.35	1504	301	1.4
9.53	1003	200.5	2.8

Tabla 7. Parámetros para desbaste para aluminio 6061 T6, con cortadores de acero rápido M42 con avance de 0.1 mm/diente.

Diámetro de cortador vertical plano (mm)	RPM	Avance (mm/min)	Profundidad máxima de corte (mm)
3.18	5042	2048	1
4.76	3361	1364	2
6.35	2521	1024	4
9.53	1681	684	6

Tabla 8. Parámetros para desbaste para aluminio 6061 T6 con cortadores de acero rápido M42 con avance de 0.05 mm/diente

Diámetro de cortador vertical plano (mm)	RPM	Avance (mm/min)	Profundidad máxima de corte (mm)
3.18	5042	1024	2
4.76	3361	682	4
6.35	2521	512	8
9.53	1681	342	12

De estas tablas se nota como el avance y la profundidad de corte tienen una relación que da como resultado una constante, es decir, se conserva el valor correspondiente que es el resultado de la multiplicación de los parámetros de las variables mencionadas, el valor obtenido con avances de 0.1 mm/diente, por ejemplo, de la tabla 7 al multiplicar el valor 2048 mm/min (avance) por el de la profundidad de corte máxima (1 mm) correspondiente, es el mismo al avance de 0.05 mm/diente que se observa en la tabla 8 referente a la misma herramienta, que corresponde a 1024 mm/min (avance) por la profundidad de corte máxima (2 mm), lo que concuerda con lo establecido por (7) y de lo cual se infiere la ecuación 5.

$$f_1 a_{pmax1} = f_2 a_{pmax2} \qquad \textbf{(Ec. 5)}$$

Con lo cual se pueden establecer diferentes condiciones de maquinado, ponderando el avance o la profundidad de corte, pero tomando en cuenta los datos de las tablas correspondientes, como se realiza en el cálculo de las revoluciones por minuto y de los avances a través de fórmulas y de datos de tablas.

De acuerdo con (25), la profundidad de corte en el maquinado es un parámetro crucial influenciado por la rigidez de la máquina, la pieza de trabajo y las herramientas de corte. Su selección juega un rol vital para llevar a cabo operaciones eficientes y productivas.

Como lo indica (26), cada operación de maquinado implica una estrategia de profundidad de corte.

Por su parte (27) menciona que la profundidad de corte máxima posible depende principalmente del diámetro del cortador, para diámetros arriba de 20 mm, es de hasta 4 veces el diámetro y para pequeños diámetros de menos de 3 mm es hasta 10 veces el diámetro.

4. Conclusiones

1. La relación de materia prima con material de la herramienta es el fundamento para la determinación de la velocidad de corte que sirve para el cálculo de las revoluciones por minuto y del avance por diente recomendado en las operaciones de desbaste.
2. El diámetro de las herramientas es una referencia para definir los parámetros de revoluciones por minuto y por consiguiente de avances, así como para establecer los valores de las profundidades de corte máximas.
3. La profundidad de corte es crítica en un proceso de maquinado de desbaste porque de la determinación adecuada de la misma, se podrán tener tiempos de maquinado óptimos, un desgaste normal de la herramienta, en función de la velocidad de corte recomendada por el fabricante y del avance por diente recomendado igualmente por el mismo, para tener condiciones de corte que permitan agregar valor a las piezas de forma económica y competitiva.
4. Los resultados obtenidos en las tablas 5, 6, 7 y 8 cumplen con la encomienda de tener parámetros confiables para planear y ejecutar operaciones de fresado de desbaste en los materiales acero 1018 y aluminio 6061 T6, usando cortadores verticales planos de acero rápido M42, para los diámetros de 3.18, 4.76, 6.35 y 9.53 mm.
5. Los resultados mostrados en las tablas 5 a 8 referente a la profundidad máxima de corte y su avance correspondiente, confirman la hipótesis planteada al obtenerse la productividad más alta en la remoción de material en la fase de desbaste en el fresado, ya que parámetros inferiores resultarán en tiempos mayores de maquinado y parámetros superiores son inviables porque ocurre la rotura de la herramienta correspondiente.
6. En lo referente a la aportación de la ecuación (5) es una herramienta que puede permitir usar diferentes combinaciones de profundidades de corte y avances tomando como referencia los indicados en las tablas 5 a 8, de manera que, si se requiere definir un avance por diente diferente a los indicados en este trabajo, se toman los avances y profundidades de corte correspondiente a la herramienta y se despeja la profundidad de corte de manera que se puede calcular este parámetro de manera segura.
7. El aprovechamiento de la máxima capacidad de una herramienta está en función de los parámetros de avance y profundidad de corte de manera que una profundidad de corte máxima reducirá el número de pasadas y un avance compatible con esta asegurará un tiempo mínimo de maquinado

cuidando la integridad de la herramienta para que su duración sea normal.

La intención de este trabajo es que sirva de referencia para determinar tanto la profundidad de corte máxima, como su correspondiente relación con el avance, también para su aplicación en la industria, en talleres PYMES, en empresas grandes de maquinado, en laboratorios y talleres de las instituciones de educación media superior y superior.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades y el apoyo otorgado por la Universidad Tecnológica de Tlaxcala, en especial en la utilización del laboratorio de CAD CAM.

6. Referencias

(1) Gomeringer, R., Kilgus, R., Menges, V., Oersterle, S., Rapp, T., Scholer, C., Stenzel, A., Stephan, A., Wieneke, F, (2022) Tabellenbuch Metall, Europa Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG Düsselberger

(2) Prümmer, M. (2020) Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem der Leistungsfähigkeit verketteter Fertigungssysteme in der mechanischen Fertigung des Werkzeugbaus, Apprimus Verlag, Aachen.

(3) Zhang, W., Wan, M. (2016) Milling Simulation Metal Milling Mechanics, Dynamics and Clamping Principles, John Wiley and Sons Inc., Great Britain and United States.

(4) Ahola, J. (2014) Creo Parametric Milling, Klaava Media, Finland.

(5) Urbikain, G., Olvera, D. (2021) Machining Dynamics and Parameters Process Optimization, Applied Sciences, MDPI Switzerland.

(6) López, L.N., Urbicain, G., (2019) Machining – Recent Advances, Applications and Challenges, Applied Sciences, MDPI Switzerland.

(7) Hai, N.T., Huy, N.X., Amine, K., Lam, T.D., (2024) EIA International Conference on Renewable Energy and Sustainable Manufacturing, Springer.

(8) Jirapipattanaporn, P., Chanpariyavatevong, A., Lawanont, W., Boongsood, W., (2023) Recent Advances in Manufacturing and Engineering Processes, Springer, Singapore.

(9) Contreras, L.E., Vargas, L.F., Ríos, R.A. (2018), Procesos de Fabricación en Metales, Ediciones de la U, Bogotá, Colombia.

(10) Urbikain, G., Olvera, D. (2023), Procesos de Mecanizado Convencional, Editorial Aula Magna Mc. Graw Hill Interamericana de España S.L., España.

(11) Selig, C. (2016), CNC Fräsen & Drehen, Grundlagen, Praxis & Tipps für Modellbauer, Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden Germany.

(12) Nghiep, T.N., Ahmed, A.D. Sarhan, Hideki Aoyama, Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace Aluminum 6061-T6 alloy, Elsevier, Volume 125, September 2018, pages 476-495.

(13) János Kundrák, Bernhard Karpuschewski, Zoltán Pálmai, Csaba Felhő, Tamás Makkai, Dmytro Borysenko. The energetic characteristics of milling with changing cross-section in the definition of specific cutting force by FEM method, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Elsevier, Volume 32, January 2021, Pages 61-69.

(14) Da-Ming Shi, Tao Huang, Xiao-Ming Zhang, Shuang Zao. Real-time monitoring of depth of cut in the multi-axis milling process with ball-end cutter, ScienceDirect Elsevier Volume 102, 2021, Pages 287-292.

(15) Shubham Vaishnav, K.A. Desai. Long Short-Term Memory-Based Cutting Depth Monitoring System for End Milling Operation, Journal of Computing and Information Science in Engineering, Volume 2, Issue 5, March 25, 2022.

(16) Mitsubishi (2024) https://www.mmc-carbide.com/permanent/courses/70/depth-of-cut.html

(17) Sandvik Coromant (2024) Manual de fresado.

(18) Sandvik Coromant (2017) Rotierende Werkzeuge.

(19) Krar, F.S., Check, A.F. (2002) Tecnología de las Máquinas Herramientas, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

(20) De Garmo, E.P., Black, J.T., Kosher, R.A (2019) Materiales y Procesos de Fabricación, McMillan.

(21) Barbosa, M. A., Mar, O.C.E., Molar, O.J.F. (2019), Manufactura Conceptos y Aplicaciones, Instituto Nacional de México, Grupo Editorial Patria, Azcapotzalco, Ciudad de México.

(22) Pernía, E.A., Blanco, F.J., Sierra, S.J.M., Martínez del Pisón, A.F.J. (2018) Prácticas de mecanizado en torno y fresadora, Universidad de la Rioja Servicio de Publicaciones.

(23) Kalpakjian, S., Schmid, S.R., Manufactura, Ingeniería y Tecnología Volumen 1 Tecnología de Materiales, (2014), PEARSON, México, Naucalpan de Juárez, Estado de México.

(24) Jaramillo, S.H.E. (2017) Resistencia de Materiales: algunos temas especiales, Programa Editorial Universidad Autónoma de Occidente,

(25) Prototool (2024) Achieving Essentials: The Relationship and Calculation Formulas of Feed Rate, Depth of Cut and Cutting Speed

(26) Harvey (2024) Diving Into Depth of Cut: Peripheral, Slotting & HEM Approaches.

(27) Machiningdoctor (2024) Depth of cut (Milling), machiningdoctor.com/machinistglossary/depth-of-cut-milling/

(28) Grzesik, W. (2017) Advanced Machining Processes of Metallic Materials Theory, Modelling and Applications, Elsevier B.V.

(29) Davim, J.P. (2016) Metal Cutting Technologies Progress and Current Trends, Walter De Gruyter GmbH Berlin/Munich/Boston.

(30) Hardt, M. (2022) Modeling the Metal Behavior Under Metal Cutting Conditions, Apprimus Verlag, Aachen.

(31) Stephenson, D.A., Agapiou, J.S. (2016) Metal Cutting Theory and Practice, CRC Press Taylor and Francis Group.

(32) Davim, J.P (2016) Design of Experiments in Production Engineering, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.

(33) Shi, H. (2018) Metal Cutting Theory New Perspectives and New Approaches, Springer International Publishing AG 2018.

(34) Silberschmidt, V.V. (2020) Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques, Elsevier, Ltd.

(35) L. Morelli, N. Grossi, A. Scippa, G. Campatelli (2021) Depths of cut

identification in 3-axis milling using cutting force spectrum, MM Science Journal, ISSN 1805-0476 Special Issue HSM 2021, Darmstadt, Germany, pages 5015-5022.

(36) Marija Durkovic, Goran Mladenovic, Ljubodrag Tanovic, Gradimir Danon, (2018), Impact of feed rate, milling depth and tool rake angle in peripheral milling of oak wood on the cutting force, Maderas, Ciencia y Tecnología ISSN: 0717-3644, pages 25-34.

(37) Milton F. Coba Salcedo, Carlos Acevedo Peñaloza, Guillermo Valencia Ochoa (2018), Effects of Depth of Cut on Cylindrical Milling Process in Steel Casting: A Numerical Study, International Journal of Chem Tech Research, ISSN: 0974-4290 Vol. 11 Np. 08, pp 232-237.

(38) Groover, M. (2017) Fundamentos de Manufactura Moderna, Mc Graw Hill.

(39) M. Rasidi Ibrahim, A. Afiff Latif, M. Fahrul Hassan, A.M. Arifin, A. Zahid Amran (2017), Effect of Feed Rate and Depth Cut on Cutting Forces and Surface Roughness When End Milling of Mild Steel using NOVIANO cutting tool, Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Rabat, Morocco.

(40) High-Feed Milling Tungaloy– Catálogo 2024.

(41) Sorotec Cutting Parameters (Face Milling Cutter) Calculation and Practical Hints, (2024), Sorotec GmbH Withig 12.

(42) Manual Walter Prototyp (2024) Dynamic milling with the MD133 Supreme achieve perfect results more productively.

(43) Introduction to Milling Tools and their Application Identification and Application of Cutting Tools for Milling (2016) Machining Cloud Smart Manufacturing.

(44) Nandhagopal, S., Nashreen, J., Siyas Mahmood, S., Neshikamai, J.A., Pradeep Kumar. (2024) Investigating the Effect of Cutting Speed, Feed Rate and Radial Depth of Cut on Tool Wear on Turning of Al-1060 Alloy by High-Speed Cutting Tools, ICAMDMS.

(45) Ojolo Sunday Joshua, Money Ochuko David, Ismail Oluwarotimi Sikiru, (2015) Experimental Investigation of Cutting Parameters of Surface Roughness Prediction during End Milling of Aluminum 6061 under MQL (Minimum Quantity Lubrication) Journal of Mechanical Engineering and Automation pp 1-13.

(46) End Mill Techical Data 2018 Master Catalog.

(47) Cristina Biris, Gabriel Racz (2017). Researches regarding the reducing of burr size by optimising the cutting parameters on a CNC milling machine, MATEC Web of Conferences 112 IMan E&E 2017.

(48) Janos Kundrak, Angelos P. Markopoulos, Tamás Makkai, István Deszpoth, Antal Nagy (2018) Analysis of the Effect of Feed on Chip Size Ratio and Cutting Forces in Face Milling for Various Cutting Speeds, Journal Manufacturing Technology June 2018 Vol. 18 No. 3 ISSN 1213-2489 PP 431-438.

(49) Milling-Depth of Cut and Feed Zoner Catalog 2024.

(50) Sirer Albayrak, Serdar Mercan, Hikmet Karacam (2022) Reducing Sound Level by Optimizing Cutting Parameters on CNC Milling Machines, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, ISSN: 2602-3350, pp 62-73.