

# **MODELADO DE UN PROCESO DE CORTE ORTOGONAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**Ing. José Ramón Aguilera Nieves<sup>1</sup>, Ing. José Rafael Alas Hernández<sup>1</sup>, Ing. Rafael  
Vicente Gutierrez<sup>1</sup>, Dr. C. Marcelino Rivas Santana<sup>2</sup>, Dr. C. Ramón Quiza Sardiñas<sup>2</sup>**

*1. Universidad Politécnica Territorial del Alto Apure “Pedro  
Camejo”, Antiguo Hato Modelo, Carretera Nacional Vía el  
Samán.*

*2. Universidad de Matanzas, Vía Blanca Km.3, Matanzas,  
Cuba.*

## **Resumen.**

El corte ortogonal es uno de los enfoques más utilizados en el estudio del mecanizado, gracias a su simplicidad. Entre los modelos fenomenológicos actuales del corte ortogonal, no se encuentran algunos de los parámetros del proceso. Este trabajo trata una simulación a través del método de elementos finitos para modelar un proceso de corte ortogonal sobre una aleación *Ti-6Al-4V*. Dos parámetros serán seleccionados como variables independientes en el estudio: el avance  $f$  y la velocidad de corte  $V_c$ . Para obtener los valores de las variables dependientes en cada punto experimental, los cuales son: la fuerza de avance, la fuerza de corte, así como también la temperatura máxima alcanzada durante el proceso. El estudio ha ofrecido como principal resultado, una incidencia mayor del avance sobre las fuerzas, además de un incremento considerable de la temperatura en la interfase viruta – herramienta, a medida que aumentan tanto la velocidad de corte como el avance.

*Palabras claves:* Corte Ortogonal; Modelos; Estudio; Variables; Elementos Finitos; Incidencia.

---

## **Evolución del corte de metales**

El inicio del mecanizado se puede situar en el siglo XVIII cuando se aplicaba este proceso sobre madera aunque de manera limitada. No fue hasta principios del siglo XIX cuando se comenzó a expandir el uso del mecanizado sobre metales gracias a la revolución industrial y al desarrollo de las máquinas de vapor (Medina, 2013). A pesar del amplio despliegue de talleres y de nueva maquinaria durante este siglo, la remoción de material constituía un gran esfuerzo y un simple trabajo podía llevar una jornada completa.

Los primeros estudios sobre los procesos de mecanizado son atribuidos a Cocquilhat en 1851 determinando la cantidad de trabajo requerido para remover un volumen concreto de material en la operación de taladrado. J. Time explicó en 1870 el proceso de formación de viruta, complementado con los estudios de Tresca en 1873. Muy destacable es la aportación de Mallock en 1881 y sus teorías sobre la formación de la viruta por cizallamiento, el efecto de la fricción sobre la herramienta y los efectos de los lubricantes en el proceso de corte. Aportes todavía hoy aceptados.

Sin embargo el primer análisis detallado del mecanismo de formación de viruta es debido a Piispanen (1948); este modelo es conocido como el modelo de plano de deslizamiento (Martínez, 2011).

En la feria de París de 1900 se dio a conocer el que sin duda sería el precursor del mecanizado actual Frederick Taylor, quien presentó en dicha feria un mecanizado a gran velocidad en el que la herramienta no perdía sus propiedades ni en condiciones de altas temperaturas.

Otro gran avance en las herramientas de corte tuvo lugar en los años treinta cuando se comenzó a utilizar carburos cementados para la fabricación de herramientas, lo que derivó en una reducción de tiempos de mecanizado y una mayor duración de la herramienta.

Todavía en la actualidad y gracias al continuo estudio sobre materiales, fuerzas de corte, temperaturas, dimensiones y condiciones de contorno en general, se sigue avanzando en el desarrollo de nuevas y más eficientes herramientas de corte.

## **Evolución del método de elementos finitos**

Felippa (2004), tal como cita Peña (2013, p. 5), destaca entre otras cosas que el método de elementos finitos posee siglos de evolución, aunque el nombre del MEF se ha establecido recientemente. El empleo de métodos de discretizado espacial y temporal y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos es conocido desde la antigüedad, el concepto de elementos finitos parte de esa idea.

Los egipcios empleaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides. Arquímedes (287-212 a.C.) empleaba el mismo método para calcular el volumen de todo tipo de sólidos o la superficie de áreas. En oriente también aparecen métodos de aproximación para realizar cálculos; el matemático chino Lui Hui (300 d.C.) empleaba un polígono regular de 3072 lados para calcular longitudes de circunferencias, con lo que conseguía una aproximación al número  $\pi = 3,1416$ .

El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural, fundamentalmente en el campo aeroespacial. En la década de 1940 Courant propone la utilización de funciones polinómicas para la formulación de problemas

elásticos en subregiones triangulares, como un método especial del método variacional de Rayleigh-Ritz para aproximar soluciones.

Fueron Turner, Clough, Martin y Topp quienes presentaron el MEF en la forma aceptada hoy día. Ellos introdujeron la aplicación de elementos finitos simples (barras y placas triangulares con cargas en su plano) al análisis de estructuras aeronáuticas, utilizando los conceptos de discretizado y funciones de forma.

El trabajo de revisión de Oden presenta algunas contribuciones matemáticas importantes al MEF. Los libros de Przemieniecki y de Zienkiewicz y Holister presentan el MEF en su aplicación al análisis estructural. El libro de Zienkiewicz y Cheung o Zienkiewicz y Taylor presenta una interpretación amplia del MEF y su aplicación a cualquier problema de campos. En él se demuestra que las ecuaciones de los elementos finitos pueden obtenerse utilizando un método de aproximación de pesos residuales, tal como el método de Galerkin o de mínimos cuadrados. Esto difundió tanto interés entre los matemáticos para la solución de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales mediante el MEF, que ha producido una gran cantidad de publicaciones hasta tal punto que hoy en día el MEF está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada (Peña, 2013).

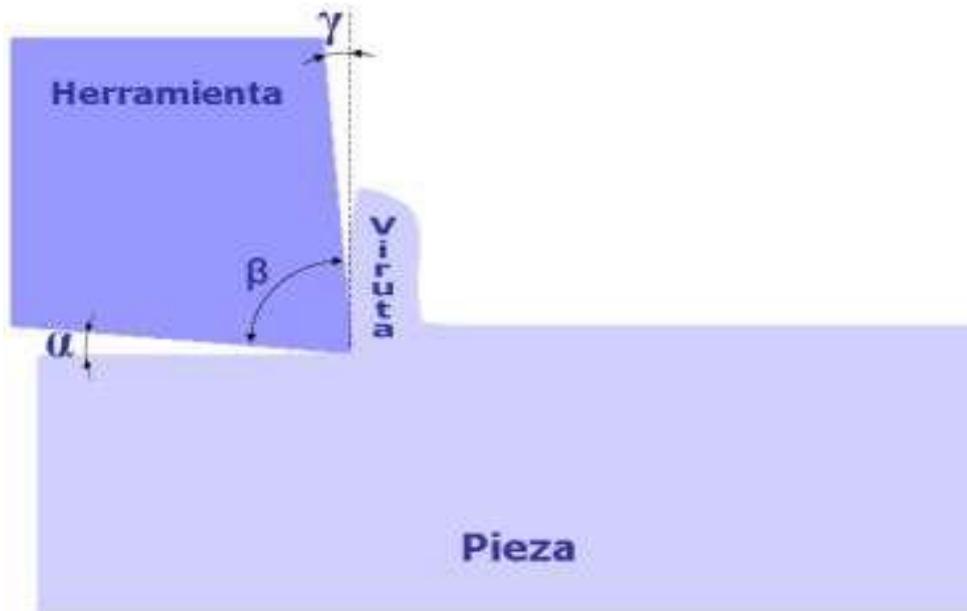
## **El corte de metales**

El maquinado es un proceso de manufactura en el que una herramienta de corte se utiliza para remover el exceso de material de una pieza de forma que el material que quede tenga la forma deseada. La acción principal de corte consiste en aplicar deformación en corte para formar la viruta y exponer la nueva superficie (Kalpakjian, 2002).

Según Groover (1997) existen dos clasificaciones básicas para los tipos de corte:

- Corte ortogonal
- Corte oblicuo

A continuación, en la figura 1. se muestra un modelo o esquema de un corte de tipo ortogonal:



*Figura 1. Corte ortogonal*

En la figura 1. se observan los ángulos siguientes:

$\alpha$  = ángulo de incidencia

$\beta$  = ángulo ó filo de la herramienta

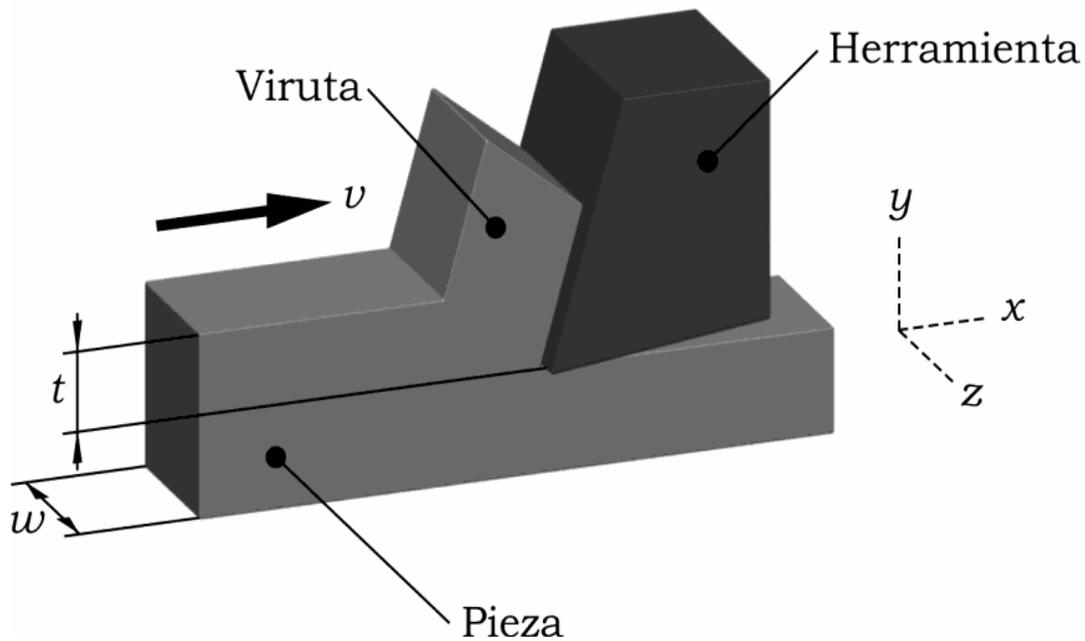
$\gamma$  = ángulo de desprendimiento

En cuanto a la temperatura de corte se puede decir que casi toda la energía se disipa en forma de calor y que dicho calor provoca altas temperaturas en la interfase de la viruta y la cuchilla.

### **El proceso de corte ortogonal**

La modelación del corte ortogonal, parte de las condiciones de corte (velocidad de corte  $V_c$ , ancho de la viruta sin deformar  $t$  y espesor de la viruta,  $\omega$ ), de las propiedades del material elaborado y de la geometría de la herramienta (Kalpakjian, 2002).

Por su parte Groover (1997) plantea que el corte ortogonal (ver Figura 2.) es aquel donde se supone que la dirección de corte es perpendicular al filo de la herramienta, de forma tal que todo el proceso puede considerarse como bidimensional. Convencionalmente se considera que la herramienta permanece fija mientras que se mueve la pieza, lo que correspondería a un proceso de torneado, pero ya que el movimiento es relativo, también puede aplicarse a un proceso de acepillado, donde la pieza permanece fija y la herramienta es la que se mueve.

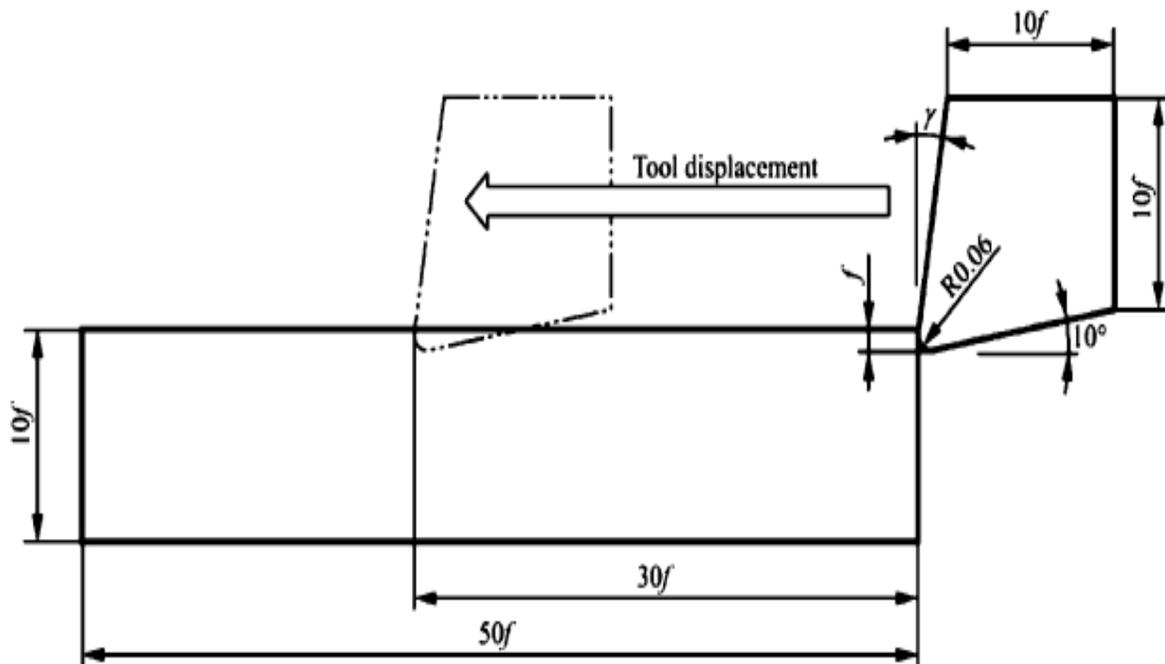


*Figura 2. Esquema general del corte ortogonal*

### **Formalización del modelo**

Para la modelación utilizando elementos finitos, se consideró hacer la simulación sobre aleación dura *Ti-6Al-4V*, tomándose como un material perfectamente rígido (Gong, Y. et al., 2010).

En la figura 3 se muestran las principales dimensiones geométricas consideradas en el modelo. La sección transversal de la herramienta se consideró diez veces más grande que el avance  $f$ , en cada punto experimental.



**Figura 3. Dimensiones geométricas del modelo**

El ángulo de incidencia se tomó de  $10^\circ$ , el radio del filo como 0,06 mm, mientras que el ángulo de ataque se tomó de  $5^\circ$ . La altura de la pieza y la longitud se tomaron 10 y 50 veces más grandes que el avance respectivamente. Esto garantiza que los límites del modelo estarán lo suficientemente lejos del área de corte. El proceso de corte fue analizado durante el tiempo correspondiente al desplazamiento de la herramienta a lo largo del 60% (30 veces el avance) de la longitud de la pieza.

En la temperatura ambiente se toma  $20^\circ$ , además en la interfaz herramienta - viruta se consideraron un factor de fricción de 0.6 y un coeficiente de transferencia de calor de  $45 \text{ N/s/mm/}^\circ\text{C}$ . Para las superficies libres (en la pieza y la herramienta) fue seleccionado un coeficiente de transferencia de calor de  $20 \text{ kW}/(^\circ\text{C m}^2)$ .

Para los parámetros de la operación, velocidad de corte  $V_c$  y avance  $f$ , se tomaron los correspondientes a un diseño factorial completo  $3^2$ , donde los respectivos niveles para ambos factores se ofrecen en la tabla 1.

<b>FACTORES EXPERIMENTALES</b>	<b>NIVELES</b>		
	<b>BAJO</b>	<b>MEDIO</b>	<b>ALTO</b>
<b>Velocidad de corte, <math>V_c</math> (m/min)</b>	100	200	300
<b>Avance, <math>f</math> (mm/rev)</b>	0,1	0,3	0,5

*Tabla 1. Diseño experimental para los parámetros de corte*

Por otro lado, el mallado fue seleccionado de acuerdo con el avance y con las posibilidades de cómputo poseídas, teniendo aproximadamente 400 elementos en el mallado tanto en la herramienta y como en la pieza.

### **Pre – simulación del modelo**

En la tabla siguiente se observan las nueve combinaciones correspondientes al diseño factorial  $3^2$ . Cabe destacar que la profundidad de corte en todos los experimentos fue de 0,5 mm.

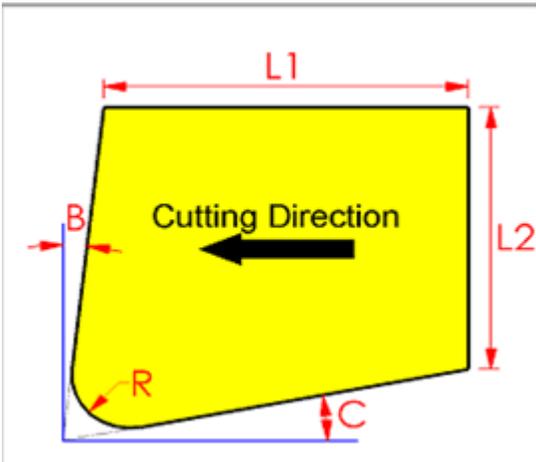
<b>N°</b>	<b>FACTORES EXPERIMENTALES</b>	
	<b><math>V_c</math> (m/min)</b>	<b><math>f</math> (mm/rev)</b>
<b>1</b>	100	0,1
<b>2</b>		0,3
<b>3</b>		0,5
<b>4</b>	200	0,1
<b>5</b>		0,3
<b>6</b>		0,5
<b>7</b>	300	0,1
<b>8</b>		0,3
<b>9</b>		0,5

*Tabla 2. Experimentos*

En esta parte del pre-procesamiento también se establecen las condiciones del proceso, las cuales son: temperatura ambiente, factor de fricción y coeficiente de transferencia de calor.

Luego se define la geometría de la herramienta de corte, la cual se observó previamente en la sección anterior. Se establece la forma de la herramienta y sus dimensiones. En la tabla 3

se observa dicha geometría en el paquete computacional para el nivel bajo del avance, es decir para:  $f = 0,1 \text{ mm/rev}$ .

<b>Esquema de la herramienta</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
 <p>El diagrama muestra una herramienta de corte amarilla con un ángulo de corte B en el lado izquierdo, un ángulo de salida C en el lado derecho, un radio de transición R en la esquina inferior izquierda y una longitud total L1. La altura de la herramienta es L2. Una flecha indica la dirección de corte hacia la izquierda.</p>	L1 (mm)	1
	L2(mm)	1
	B (grados)	5
	C(grados)	10
	R(mm)	0.06

**Tabla 3. Parámetros geométricos de la herramienta**

Lo que sigue es definir la geometría de la pieza, las cuales ya se observaron en la formalización del modelo. La tabla 4 muestra la introducción de dichas dimensiones en el DEFORM-2D Machining Cutting, considerando el nivel bajo para el avance ( $f = 0,1 \text{ mm/rev}$ ).

<b>Esquema de la pieza</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
 <p>El diagrama muestra una pieza rectangular amarilla con una altura A y una longitud B.</p>	A (mm)	1
	B (mm)	5

**Tabla 4. Parámetros geométricos de la pieza**

Posteriormente se realiza el posicionamiento de la herramienta de corte con respecto a la pieza de trabajo (ver figura 4).



**Figura 4. Posición de la herramienta**

El proceso de pre-simulación continúa con los controles de la simulación, estos son: número de pasos, el incremento de los mismos y la longitud del proceso de corte. Estos últimos parámetros determinan la duración de cada experimento y dependen, así como el mallado, del equipo computacional disponible.

### **Comportamiento de la fuerza de avance $F_x$**

Se estudiará la variación en función de los parámetros de corte analizados, que a saber son  $V_c$  (velocidad de corte en m/min) y  $f$  (avance en mm/rev). En el caso de la fuerza de avance, esta fue la que tuvo menor oscilación durante el proceso. En la figura siguiente se observa el comportamiento de  $F_x$  en el primer experimento, el cual tuvo la mayor variación de esta fuerza y corresponde a  $V_c = 100$  m/min y  $f = 0,1$  mm/rev.

### **Bibliografía.**

- Felippa, C. A., 2004. Introduction to Finite Element Methods. University of Colorado Boulder, USA.
- Filice, L.; Micari, F.; Rizzuti, S.; Umbrello, D., 2007. "A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (3-4), pp.709-714.
- Gong, Y.; Mabrouki T.; Nelias D.; Zhang Y., 2010. "FE-model for Titanium alloy (Ti-6Al-4V) cutting based on the identification of limiting shear stress at tool-chip interface". *Springer-Verlag*, pp. 11-23.
- Groover, . 1997. *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas*. Editorial Prentice Hall.

- Kalpakjian, S., 2002. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Editorial Pearson.
- Martínez, J., 2011. *Análisis Termomecánico Mediante Elementos Finitos de Procesos de Corte Ortogonal de INCONEL 718*. Proyecto Fin de Carrera para la Obtención del Título de Ingeniero Técnico Industrial Especialidad Mecánica. Madrid (España): Universidad Carlos III de Madrid.
- Medina, O., 2013. *Modelación del Corte Ortogonal Utilizando la Teoría Predictiva de Oxley*. Tesis Presentada en Opción al Título Académico de Master en Ingeniería Asistida por Computadora. Matanzas (Cuba): Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.
- Peña, J., 2013. *Análisis del Comportamiento de las Tensiones Tangenciales Alternantes Producidas por el Contacto en la Zona Próxima al Polo de Engrane en Engranajes Cilíndricos de Dientes Rectos*. Tesis en Opción al Título de Master en Ingeniería Asistida por Computadora. Matanzas (Cuba): Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.