

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DEL DESGASTE DE UN INSERTO CNMG 12 04 08 - PM
43 25 EN OPERACIONES DE TORNEADO MEDIANTE UN
MODELO NUMÉRICO Y SU VALIDACIÓN.**

**ANÁLISIS DE DESGASTE DE UN INSERTO CNMG 12 04 08 – PM
43 25 EN OPERACIONES DE TORNEADO CON VELOCIDADES DE
CORTE DE 320 Y 285 m/min.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

LOZANO BRITO JHON FERNANDO

jhon.lozano@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. SARMIENTO BORJA EDGAR FERNANDO M.Sc.

edgar.sarmiento@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, JHON FERNANDO LOZANO BRITO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



JHON FERNANDO LOZANO BRITO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JHON FERNANDO LOZANO BRITO, bajo mi supervisión.

ING. EDGAR SARMIENTO M.Sc.
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

NOMBRE_REVISOR1
REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

NOMBRE_REVISOR2
REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JHON LOZANO

EDGAR SARMIENTO

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, mis padres Efrén y Suzana y mi hermano Geovanny. De quienes aprendí con el ejemplo que no existen imposibles si se trabaja y se esfuerza diariamente. Gracias a su apoyo incondicional he podido culminar esta gran etapa de mi vida.

Jhon Fernando Lozano Brito

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y a mi hermano por ser ese pilar fundamental en mi vida. Su apoyo, consejos y enseñanzas hicieron de mi la persona que ahora soy.

A mi director del trabajo el Ing. Edgar Sarmiento por permitirme realizar este proyecto bajo su dirección, por las enseñanzas y la paciencia que ha tenido conmigo durante el desarrollo del trabajo.

A todos mis amigos de la facultad, quienes me han acompañado desde el inicio de la carrera y quienes se han ido uniendo en el trayecto, por todas las experiencias buenas y malas que tuvimos dentro y fuera de nuestra querida poli.

Finalmente, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y todos quienes la conforman, docentes y personal administrativo, por hacer de mi estancia aquí la mejor etapa de mi vida.

Jhon Fernando Lozano Brito

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Máquinas CNC.....	2
1.4.2 Plaquita CNMG 12 04 08-PM 4325.....	6
1.4.3 Métodos numéricos en procesos de torneado	12
1.4.4 Software de análisis por elementos finitos.....	14
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1 Diagrama de flujo de la metodología.....	16
2.2 Ecuaciones que gobiernan el modelo numérico	17
2.2.1 Ley de comportamiento del material.....	17
2.2.2 Ley de daño de Johnson Cook	17
2.3 Diseño del modelo numérico.....	18
2.3.1 Preprocesamiento.....	18
2.3.2 Procesamiento.....	25
2.3.3 Elección de Parámetros de corte.....	32
2.3.4 Post Procesamiento.....	33
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	35
3.1 Resultados Obtenidos.....	35
3.2 Validación de resultados obtenidos.....	37
3.3 Variación de parámetros	39
3.3.1 Simulación para la velocidad de corte $v=228$ m/min.....	39

3.3.2 Simulación para la velocidad de corte $v = 255$ m/min	41
3.4 Discusión de resultados	42
3.5 Conclusiones.....	44
3.6 Recomendaciones	45
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
5. ANEXOS.....	48
ANEXO I	48
ANEXO II	51

RESUMEN

El presente trabajo muestra el desgaste sufrido por el inserto CNMG 12 04 08 PM 43 25 luego de operaciones de torneado CNC. Describe el desarrollo de un modelo numérico bidimensional de dinámica explícita en el paquete computacional ANSYS v18.1. Las ecuaciones que gobiernan este modelo están dadas por la Ley de Comportamiento de los Materiales propuesta por Johnson-Cook y su Ley de daño, además del Modelo de corte Ortogonal. El modelo numérico inicia con el CAD de las geometrías del inserto y de la pieza de trabajo, posteriormente se incluyen los materiales de cada uno y sus propiedades. Luego se establecen los parámetros de corte, condiciones de frontera, tiempos de simulación e intervalos de tiempo. Una vez configurados estos datos se procede a simular el proceso de mecanizado. Finalmente, los resultados obtenidos de las simulaciones se validan con resultados de desgaste obtenidos experimentalmente en la tesis de Picho [11]. Con el modelo validado se realiza una variación en ciertos parámetros de corte con la finalidad de encontrar una relación entre la velocidad de corte y el desgaste sufrido por el inserto CNMG 12 04 08 PM 43 25.

PALABRAS CLAVE: ANSYS, inserto, desgaste, torneado, Johnson-Cook, ortogonal.

ABSTRACT

The present work shows the wear suffered by the CNMG 12 04 08 PM 43 25 insert after CNC turning operations. Describes the development of a two-dimensional numerical model of explicit dynamics in the ANSYS v18.1 computational package. The equations that govern this model are given by the Behavior Law of Materials proposed by Johnson-Cook and his Damage Law, in addition to the Orthogonal Shear Model. The numerical model begins with the CAD of the geometries of the insert and the workpiece, later the materials of each one and their properties are included. Then the cutting parameters, boundary conditions, simulation times and time intervals are established. Once these data are configured, the machining process is simulated. Finally, the results obtained from the simulations are validated with wear results obtained experimentally by Picho [11]. With the validated model, a variation is made in certain cutting parameters in order to find a relationship between the cutting speed and the wear suffered by the CNMG 12 04 08 PM 43 25 insert.

KEYWORDS: ANSYS, insert, wear, turning, Johnson-Cook, orthogonal

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El presente trabajo muestra el desgaste que sufre una herramienta de corte para un Torno CNC. Específicamente, en este trabajo se observa el desgaste sufrido por el inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25. Este inserto es usado como herramienta de corte en operaciones de torneado CNC en el Laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Para realizar este trabajo se tiene como antecedente la Tesis de pregrado del señor Picho [11] en la cual se realizó un estudio experimental del desgaste sufrido en el inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25. En esta tesis se definieron datos relevantes como el material de las probetas usadas, el tipo de herramienta y sus parámetros de corte (velocidad, profundidad, avance, ángulos) que gobiernan el experimento. Estos datos fueron usados para el desarrollo de este trabajo de integración curricular.

Para observar el desgaste del inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25 se desarrollaron modelos numéricos en el software de elementos finitos ANSYS v18.1. Estos modelos fueron basados en el modelo de corte ortogonal, la ley de comportamiento de los materiales propuesta por Johnson-Cook y en los parámetros de corte usados en el estudio experimental.

Se inició con el modelado CAD de las geometrías del inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25 y de la pieza de trabajo. Luego de una revisión del estado del arte se incluyeron los materiales, sus propiedades y coeficientes de las ecuaciones gobernantes.

Dentro de la interfaz de ANSYS se establecieron todas las condiciones de contorno necesarias antes de las simulaciones. Adicionalmente se definió el tiempo de simulación y un mallado de buena calidad previo a las simulaciones.

Como punto de partida se realizaron dos simulaciones con dos velocidades de corte de la herramienta y manteniendo constantes los demás parámetros. De estas simulaciones se pudo observar y cuantificar el desgaste sufrido en el inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25 y posteriormente validarlo con los datos experimentales de desgaste de Picho [11].

Finalmente, una vez validado el modelo numérico se realizaron dos simulaciones adicionales. Para esto se disminuyó la magnitud de la velocidad de corte de la herramienta en dos ocasiones y se analizó la relación entre la velocidad de corte y el desgaste sufrido en el inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25.

1.1 Objetivo general.

Analizar el desgaste del inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25 en operaciones de torneado mediante un modelo numérico y su validación.

1.2 Objetivos específicos.

1. Recopilar información existente sobre el estado del arte de modelos numéricos sobre el desgaste de insertos.
2. Simular el desgaste del inserto CNMG 120408-PM 4325 mediante un modelo numérico.
3. Validar el modelo numérico con datos experimentales.
4. Analizar y discutir los resultados obtenidos del modelo numérico.

1.3 Alcance

El trabajo desarrollado muestra el desgaste que sufre el inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25 luego de un proceso de torneado CNC. Se realizan dos simulaciones en el software ANSYS basadas en las ecuaciones de Johnson-Cook para la ley de comportamiento de los materiales y en el modelo de corte ortogonal.

De las simulaciones se obtienen valores de desgaste sufrido por el inserto para dos condiciones de trabajo específicas, es decir, se determina el desgaste cuando la velocidad de corte de la herramienta es de 285 m/min y 320 m/min. Estos resultados son validados con los resultados del estudio experimental de Picho [11].

Finalmente se realiza dos variaciones en la velocidad, se grafica los resultados y mediante una regresión se determina la relación que existe entre la velocidad de corte y el desgaste sufrido por inserto.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Máquinas CNC

Anteriormente, para controlar el movimiento de máquinas-herramientas tradicionales se han utilizado levas y otros tipos de mecanismos [1]. Hoy en día esto se lo realiza mediante el control numérico por computador (CNC), esto quiere decir que el movimiento está guiado por un programa previamente desarrollado.

Estas máquinas tienen un sistema sofisticado que ha permitido crear elementos y piezas con geometrías complejas y reducir el margen de tolerancia, pudiendo así tener procesos y aplicaciones donde la exactitud es predominante. Se utiliza máquinas CNC en los

procesos productivos donde se necesite una precisión, fabricación de esas pequeñas y múltiples.

Las máquinas CNC admiten un control remoto desde su ordenador y tienen la capacidad de realizar cambios de herramienta de manera automática, según la norma ISO 6983 [19] el control numérico está definido como el control automático de una máquina herramienta o de un proceso industrial manejado por un equipo que utiliza comandos de códigos digitales ingresados en tiempo real.

El control numérico tiene la función de establecer el posicionamiento de los ejes de la máquina mediante el control de los motores, esto se dará mediante actuadores y sensores.

Torno CNC

Es la máquina herramienta utilizada para fabricar piezas y objetos cilíndricos utilizando una cuchilla o inserto mientras la pieza está en rotación.

El torno CNC proporciona una potencia determinada que dará la velocidad de rotación de la pieza mientras se ejecuta el avance de la herramienta a una profundidad de corte especificada



Figura 1: Torno CNC

Fuente [8]

Parámetros de corte en torneado CNC

Velocidad de rotación: Está definida como la velocidad a la cual gira la pieza a ser mecanizada, se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{1000*v}{\pi D} \quad (1)$$

En donde:

N: Velocidad de rotación (Rev./min)

D: diámetro de la pieza en (mm)

V: Velocidad de corte (m/min)

Velocidad de corte: Es la velocidad de la superficie de la pieza en rotación que está en contacto con el inserto de corte, este parámetro debe ser elegido antes de iniciar el mecanizado considerando diferentes aspectos como: calidad requerida de la pieza final, tipo de herramienta de corte utilizada, material, la penetración de cada pasada, y el avance de la herramienta.

La siguiente ecuación calcula la velocidad de corte

$$V_c = \frac{\pi D_m n}{1000} \quad (2)$$

Donde:

Vc: velocidad de corte

Dm: diámetro de la pieza de trabajo en (mm)

n: velocidad del husillo (RPM)

Tabla 1: Efectos de la velocidad de corte

Fuente [propia]

Efectos de la velocidad de corte	
Vc muy alta	Vc muy baja
Desgaste muy rápido del filo de la herramienta	Mala evacuación de la viruta
Perdida de precisión debido a la deformación del filo de la herramienta	Baja productividad
Mal acabado superficial	Elevación de costos del mecanizado

Avance: Es la distancia que se mueve la herramienta de corte en dirección al eje de rotación de la pieza por cada revolución dada por el husillo, de tal manera la medida de avance será en mm/rev.

Del mismo modo este avance se dará considerando la calidad que se desea dar al trabajo final, la potencia que se tenga de la maquina y la relación con la profundidad en cada pasada.

Profundidad de corte: se refiere a la distancia que penetra la herramienta de manera perpendicular al eje de rotación de la pieza en cada pasada.

Se debe tener en cuenta la cantidad de remoción de material, la precisión requerida y potencia de la máquina-herramienta.

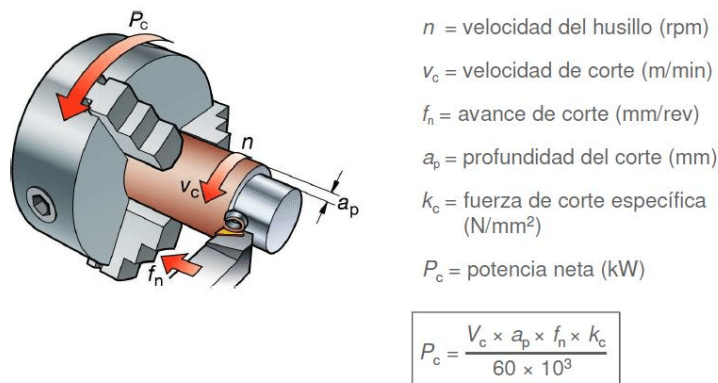


Figura 2: Parámetros de corte

Fuente [9]

Insertos de corte para torno CNC

Los insertos o pastillas de carburo son herramientas de corte de una sola pieza o individuales, poseen varios puntos de corte dependiendo de la geometría del inserto. Son ampliamente usados debido a su adaptabilidad a diferentes tipos de maquinado y a su bajo costo.

Los insertos van sujetos a un portaherramientas mediante diferentes tipos de sujeción, los más comunes o los más utilizados son mediante abrazaderas y tornillos. Existe otra forma no muy usual que es mediante soldadura entre el inserto y el portaherramientas, pero este tipo de sujeción se ha dejado de usar últimamente.

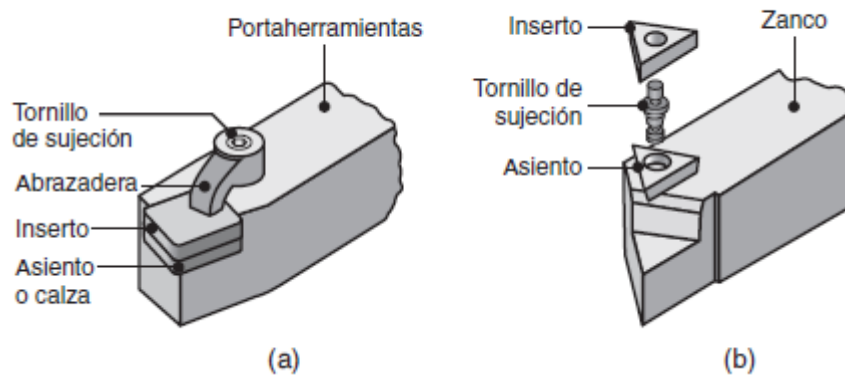


Figura 3: Mecanismos de sujeción de insertos

Fuente:[2]

1.4.2 Plaquita CNMG 12 04 08-PM 4325

En el presente proyecto se realizará el estudio del desgaste del inserto CNMG 12 04 08-PM 4325 para lo cual se presentan a continuación sus principales características y parámetros de corte. En el Anexo I se puede encontrar información detallada del significado de la denominación del inserto.

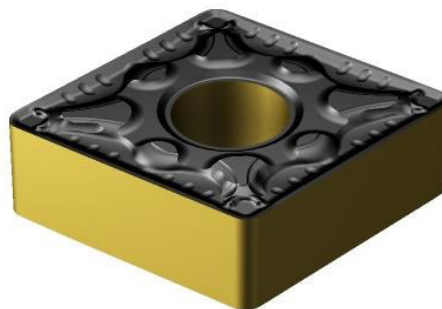


Figura 4: Inserto CNMG 120408-PM-4325

Fuente:[4]

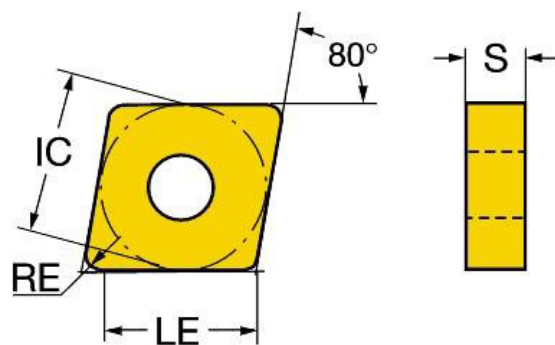


Figura 5: Representación Gráfica

Fuente:[4]

Clasificación de material, nivel 1 (TMC1ISO) P K	Tipo de operación (CTPT) Medium
Código de modelo de montaje de plaquita (IFS) 2	Tamaño y forma de plaquita (CUTINTSIZESHAPE) CN1204
Número de filos (CEDC) 4	Diámetro de círculo inscrito (IC) 12,7 mm
Código de forma de plaquita (SC) C	Longitud efectiva del filo (LE) 12,0959 mm
Radio de punta (RE) 0,7938 mm	Propiedad filo Wiper (WEP) false
Mano (HAND) N	Calidad (GRADE) 4325
Sustrato (SUBSTRATE) HC	Recubrimiento (COATING) CVD TiCN+Al2O3+TiN
Grosor de plaquita (S) 4,7625 mm	Ángulo de incidencia principal (AN) 0 deg
Sensor embedded property (SEP) 0	Peso del elemento (WT) 0,0091 kg
Release date (ValFrom20) 2013-06-23	
Valores iniciales	
P ap 3 mm(0.5-5.5) fn 0.3 mm/r(0.15-0.5) vc 310 m/min(365-255)	K ap 3 mm(0.5-5.5) fn 0.3 mm/r(0.15-0.5) vc 185 m/min(240-140)

Figura 6: Especificaciones inserto

Fuente:[4]

Materiales de las herramientas de corte

Dentro de la industria está presente una extensa variedad de materiales usados en las herramientas de corte con propiedades y características que diferencian a unas de otras.

Entre los principales materiales utilizados están:

- Aceros de alta velocidad
- Aleaciones de cobalto
- Herramientas recubiertas
- Cerámicos
- Nitruro de boro cúbico
- Cerámicos con base de nitruro de silicio

- Carburos
- Diamante policristalino (PCD)
- Materiales reforzados con triquitas y nanomateriales.

Todos los materiales descritos poseen propiedades como: gran resistencia a la fractura, buena resistencia al desgaste, elevada resistencia al impacto, alta tenacidad y una gran capacidad de mantener su dureza frente a las altas temperaturas que se generan durante un proceso de maquinado [4].

Geometría de las herramientas de corte

Las plaquitas de corte o insertos están disponibles en una variedad de formas, como cuadrada, redonda, diamante con dos esquinas de 80°, triángulo, rombo con dos esquinas de 55°, rombo con dos esquinas de 35°. Estas formas afectan directamente la resistencia del filo, es decir, si es menor el ángulo incluido, la resistencia del filo también será menor. [2] Por otro lado, la herramienta tiene mayor versatilidad y accesibilidad debido al menor ángulo, como se observa en la figura 7.

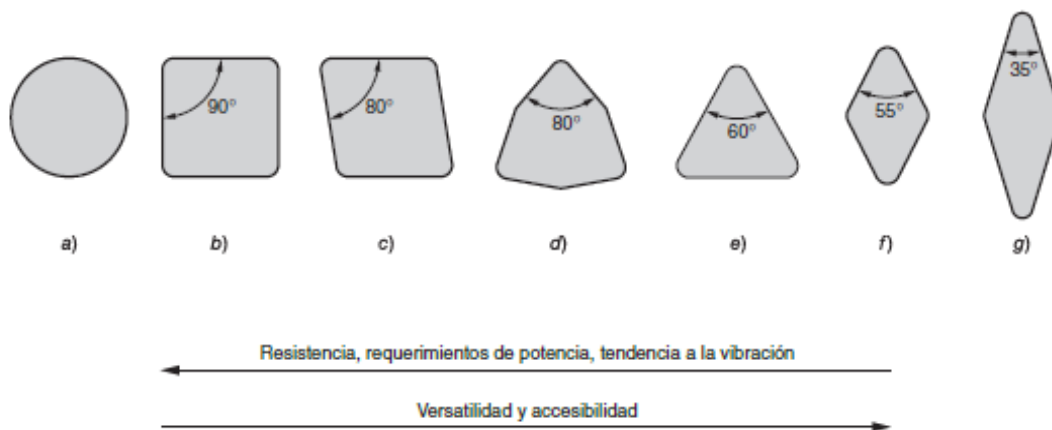


Figura 7: Geometría vs resistencia del inserto

Fuente:[1]

Ángulo de posición o de ataque (KAPR)

“El ángulo de posición KAPR o ángulo de inclinación (PISR) es aquel que se forma entre el filo del inserto y la dirección de avance, influye en el espesor de la viruta, dirección de las fuerzas de corte y longitud del filo de corte” [3].



Figura 8: Ángulo KAPR y PSIR

Fuente [3]

Tabla 2: Comparación entre ángulo de posición grande y pequeño

Fuente [3]

Ángulo de posición grande	Ángulo de posición pequeño
Menor tendencia a la vibración	Fuerzas dirigidas axial y radialmente
Fuerzas se dirigen hacia la porta pinzas	Mayor tendencia a la vibración
Mayores fuerzas de corte, en especial en la entrada y salida del corte	Reducción del desgaste en entalla de la plaquita
	Carga reducida en el filo
	Desprendimiento de viruta fina

Radio de punta del inserto para torneado

Es un factor determinante en las operaciones de torneado, influye de manera significativa en el acabado superficial, desprendimiento de viruta y además influye en la resistencia del inserto de corte [4].

Las características de cada tamaño de radio de puntas se explican en la siguiente tabla.

Tabla 3: Tamaño del radio de punta

Fuente [4]

Radio de punta pequeño	Radio de punta grande
Profundidad de corte reducida	Velocidades de avance grandes
Reduce la vibración	Grandes profundidades de corta
Filo débil	Gran seguridad del filo
Mejora rotura de la viruta	Mayores fuerzas radiales

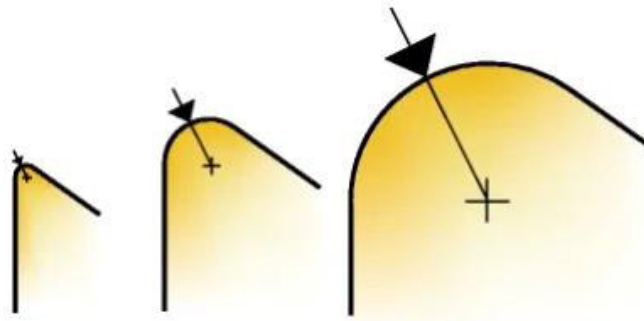


Figura 9: Radio de punta

Fuente:[4]

Desgaste del inserto de corte

El desgaste del filo cortante del inserto produce su pérdida de forma, reduce la eficiencia del corte, provoca además un desgaste prematuro de la herramienta y finalmente el fallo del inserto de corte con una gran similitud a la falla por temperatura.

“El desgaste se produce en dos lugares del inserto de corte: en la parte superior de la superficie de inclinación y en el flanco o superficie de incidencia” [1], de esta forma se puede diferenciar dos tipos de desgaste: Desgaste de cráter y desgaste de flanco como se observa a continuación:

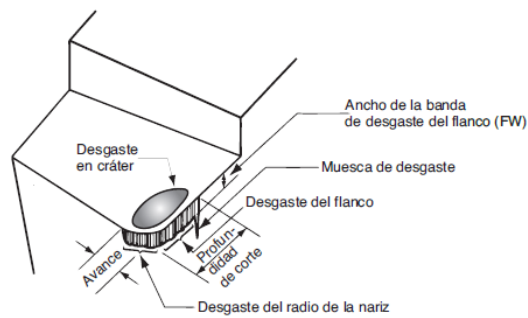


Figura 10: Tipos de desgaste

Fuente: [1]

Desgaste de cráter: Se produce por el deslizamiento de la viruta contra la superficie de la herramienta de corte, es consecuencia de grandes esfuerzos y elevadas temperaturas provocadas por la interacción de la herramienta de corte y la viruta que se desprende. El desgaste de cráter se mide por su área o por su profundidad.

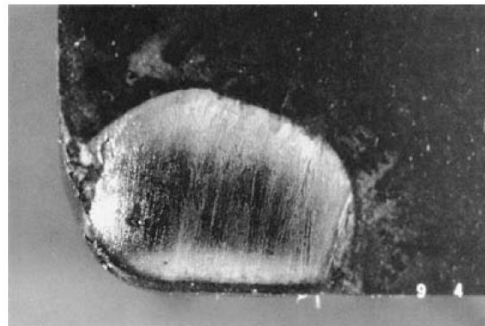


Figura 11: Desgaste en cráter

Fuente: [1]

Desgaste de flanco: Este tipo de desgaste es producto del rozamiento entre la nueva superficie generada en la herramienta luego de una pasada y la cara del flanco adyacente al filo de corte, se puede medir por el espesor del desgaste conocido también como banda de desgaste (FW).



Figura 12: Desgaste de flanco

Fuente:[1]

1.4.3 Métodos numéricos en procesos de torneado

Método de elementos finitos

Es un procedimiento de cálculo que se basa en ecuaciones diferenciales para la resolución de problemas ingenieriles y se debe tener mucha consideración en lo siguiente:

- El objeto bajo estudio se dividirá en partes de menor tamaño denominadas “elementos”
- Los elementos son definidos mediante conexiones “denominadas nodos”
- El mallado es la unión de todos sus elementos y nodos en una pieza, la sumatoria de los elementos es finalmente el objeto a ser estudiado.

Etapas del Método de elementos finitos

En general este método está constituido por cinco etapas: Concepto, modelización, análisis, interpretación, aceptación.

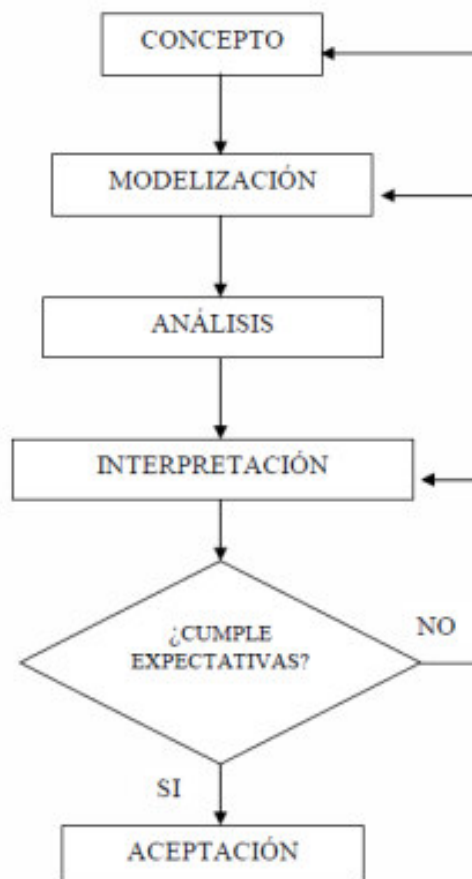


Figura 13: Etapas MEF

Fuente:[7]

Modelización: también denominada etapa de preprocesamiento. En esta etapa se realiza el diseño del objeto bajo análisis, además se establecen condiciones iniciales o de contorno.

Análisis: Esta etapa realiza el modelo numérico del modelo de elementos finitos.

Interpretación: En esta etapa se interpretan los datos obtenidos y se acepta o rechaza el modelo numérico.

Aceptación: Es la etapa final, donde se obtienen las conclusiones del modelo diseñado.

Modelo de corte ortogonal

Para este modelo el enfoque de corte ortogonal simplifica la operación de maquinado. Las operaciones son bastante complejas y este “es un modelo simplificado que desprecia muchas de las complejidades geométricas y describe la mecánica de los procesos con buena precisión”. [1].

“Una herramienta de corte realiza un movimiento perpendicular en dirección a la velocidad de corte y la presión que ejerce el filo de la herramienta de corte contra la pieza de trabajo produce un esfuerzo cortante a lo largo de un plano provocando la falla del material y produciendo la separación de la viruta.” [1]

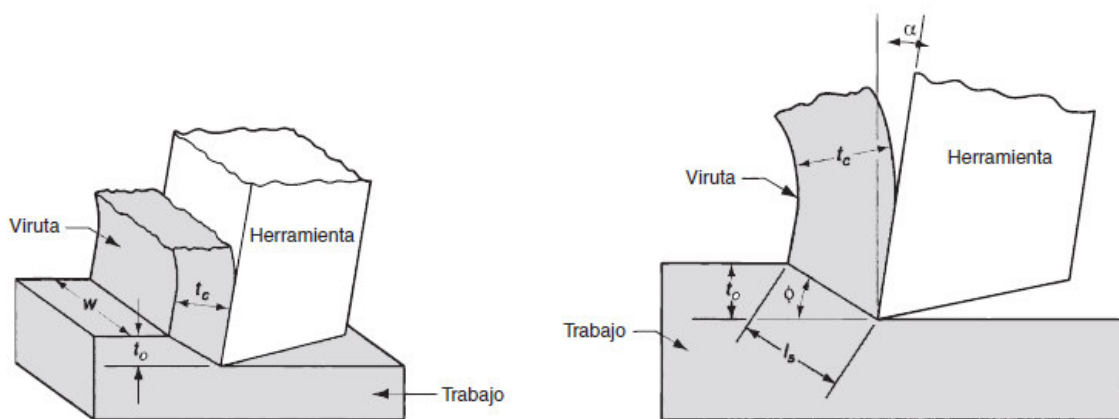


Figura 14: corte ortogonal

Fuente [1]

Con la adaptación del torneado al modelo de corte ortogonal se tiene una visualización simplificada del maquinado en una forma lineal como se observa a continuación.

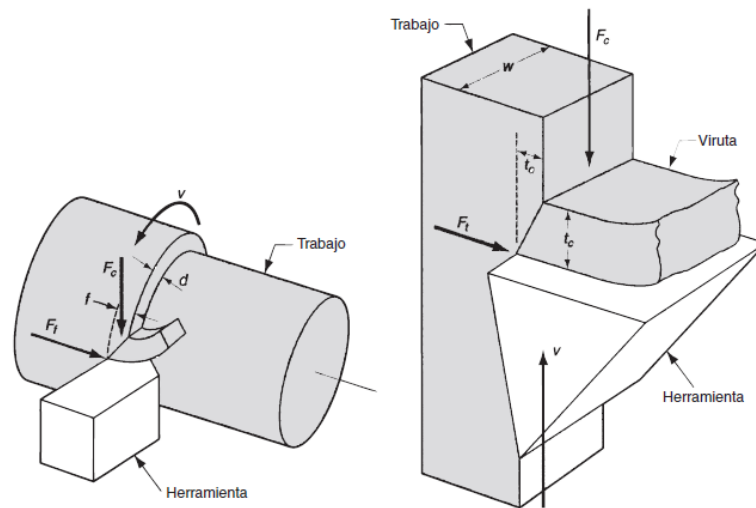


Figura 15: torneado a ortogonal

Fuente [1]

Operación de torneado	Modelo de corte ortogonal	Nomenclatura usada por nuestra autoría
Avance $f =$	Espesor de la viruta antes del corte t_o	=Profundidad de corte e
Profundidad $d =$	Ancho del corte w	=Avance s
Velocidad de corte $V =$	Velocidad de corte V_c	=Velocidad de corte V_c
Fuerza de corte $F_c =$	Fuerza de corte F_c	=Fuerza de corte F_c
Fuerza de avance $F_f =$	Fuerza de empuje F_t	=Fuerza de empuje F_t

Figura 16: Nomenclatura Corte Ortogonal

Fuente [1]

1.4.4 Software de análisis por elementos finitos.

En los trabajos de ingeniería realizar pruebas experimentales puede tener elevados costos y un largo tiempo de ejecución, por lo que, las simulaciones por elementos finitos es una alternativa para estudiar ciertos procesos de ingeniería evitando estos inconvenientes. ANSYS es un software comercial que nos brinda una interfaz gráfica amigable con el usuario y admite la simulación de varios fenómenos como: transferencia de calor, mecánica estructural, procesos dinámicos, flujo de fluidos, etc.

Una ventaja de realizar una simulación es conocer la funcionalidad y cualidades técnicas de los procesos antes de su fabricación física.

Existen otros programas de simulación por elementos finitos, entre los que destacan:

- Abaqus
- Altair Hyperworks Suite
- Comsol Multiphysics
- Simulation Mechanical
- AutoFEM Análisis

Todos los programas de simulación cuentan con la información de las características del objeto de estudio, también de las condiciones a las que serán sometidas.

En el presente trabajo se eligió el software ANSYS al ser un programa disponible dentro de la facultad y también por su versatilidad, interfaz intuitiva que se adapta a cualquier nivel del diseñador [10].

2. METODOLOGÍA

2.1 Diagrama de flujo de la metodología

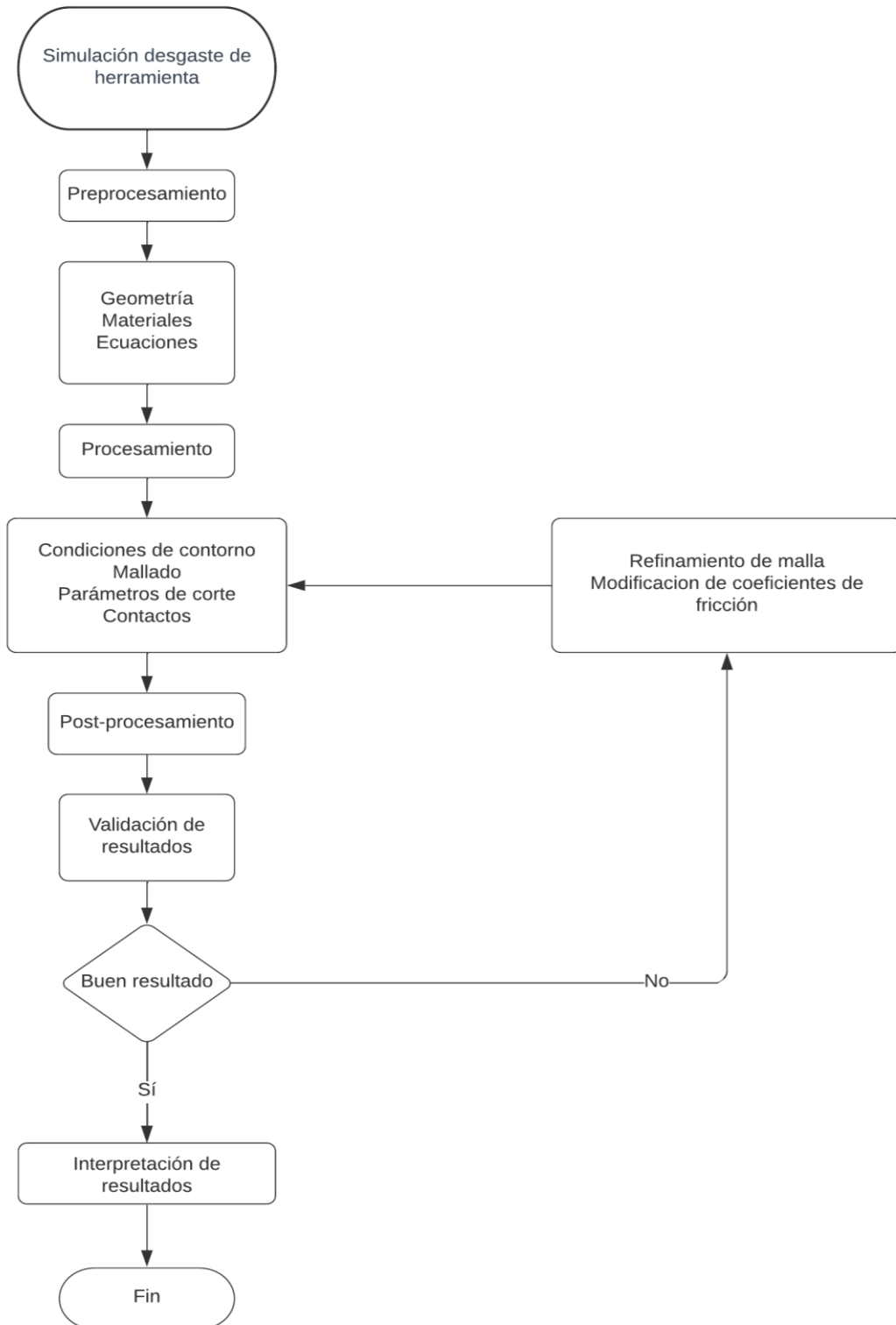


Figura 17:Diagrama de flujo

Fuente [propia]

2.2 Ecuaciones que gobiernan el modelo numérico

2.2.1 Ley de comportamiento del material

La ley de Johnson-Cook demuestra el comportamiento de un material el cual es afectado por grandes deformaciones, temperaturas y velocidades de deformación. [7]. Considera condiciones relevantes para el estudio de los materiales y sus características elásticas, plasticidad, viscosidad y térmicas. Es por esto que este modelo también es denominado como: termo-visco-plástico. Está definido de la siguiente forma por la expresión:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = [A + B * \varepsilon^n] * \left[1 + C * \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] * \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

Donde:

A: Límite elástico al operar a temperatura ambiente

B: Endurecimiento causado por la deformación plástica

n: Coeficiente de endurecimiento debido a la deformación plástica del material

C: Sensibilidad a la velocidad de deformación

m: Sensibilidad a la temperatura.

ε : Deformación plástica efectiva

$\dot{\varepsilon}$: velocidad de deformación plástica efectiva

$\dot{\varepsilon}_0$: velocidad de deformación referencial

T_f : temperatura de fusión de cada material

T_0 : temperatura ambiente.

2.2.2 Ley de daño de Johnson Cook

“La rotura de material en un evento de impacto es un proceso bastante complejo porque se producen al mismo tiempo una gran deformación, altas velocidades de deformación, gradientes térmicos elevados y grandes tensiones. Es por eso que se necesita un modelo que tenga en cuenta todos estos efectos”. [16]

“De esta forma Johnson y Cook proponen la ecuación para interpretar el daño de los materiales como una degradación de su resistencia como consecuencia de los efectos de carga, térmicos o químicos” [16]. La siguiente expresión define esta ley de la siguiente manera:

$$\varepsilon^{-f} = [D_1 + D_2 * \exp(D_3 * \bar{\sigma})][1 + D_4 * \ln(\varepsilon_{pl})] \left[1 + D_5 * \left(\frac{T - T_0}{T_m - T}\right)\right] \quad (4)$$

Donde:

ε^{-f} : Deformación de fallo equivalente

$\bar{\sigma}$: Esfuerzo equivalente

ε_{pl} : Deformación plástica equivalente

D1, D2, D3, D4, D5: Coeficientes de daño del material

T_m : Temperatura de fusión del material

T_0 : Temperatura ambiente (25°C)

2.3 Diseño del modelo numérico

El proceso de simulación por elementos finitos está dividido en tres partes: Preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

2.3.1 Preprocesamiento

Geometrías

Para el desarrollo del modelo numérico se inicia con el modelo CAD de la geometría simplificada en dos dimensiones. Cabe mencionar que debido al poder computacional requerido para el desarrollo de la simulación se modelará y procesará solo el área de interés de los elementos en estudio.

El modelo CAD fue desarrollado en el apartado CAD de ANSYS SpaceClaim con las dimensiones mostradas en las figuras 18 y 19.

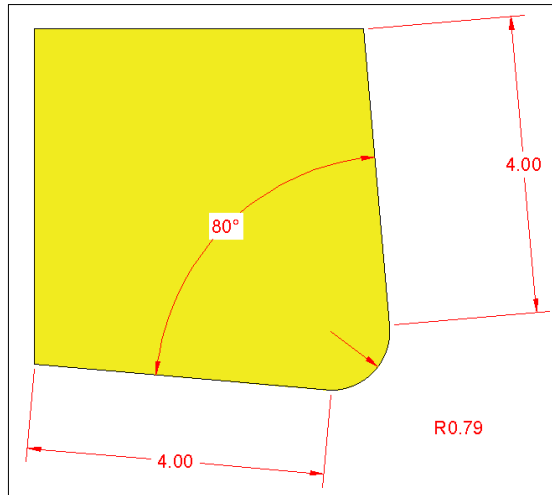


Figura 18: punta de inserto

Fuente: [propia]

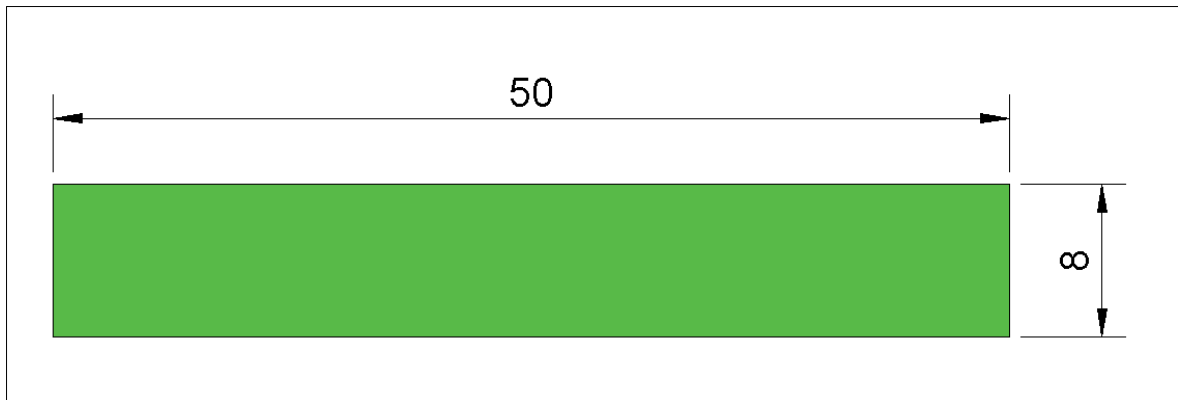


Figura 19: Pieza de trabajo

Fuente[propia]

En el modelo CAD ya se incluyen los valores de profundidad y del ángulo de incidencia definidos en el estudio experimental de Picho [11].

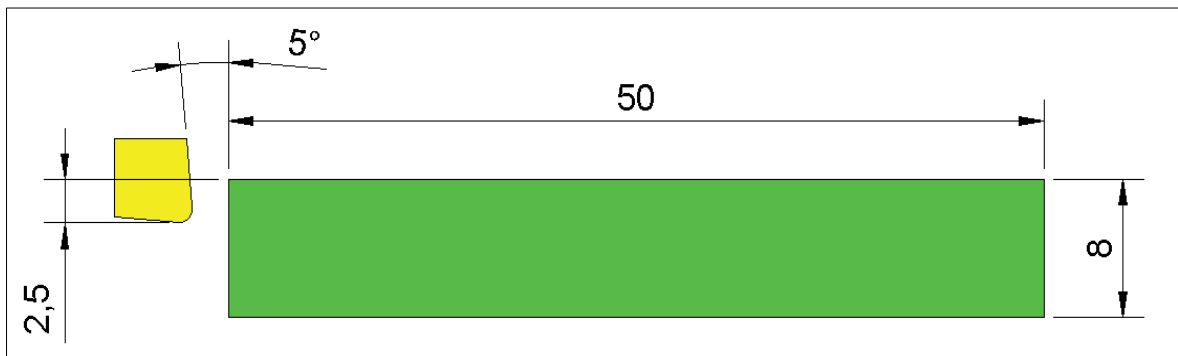


Figura 20: Ángulo y profundidad

Fuente [Propia]

Propiedades de los materiales

Los materiales que intervienen en la simulación se representan en la tabla 4. Estos materiales corresponden a los datos tomados de la tesis de Picho [11].

Tabla 4: Materiales del modelo numérico

Fuente[propia]

N°	Material	Elemento
1	Acero AISI 1018	Pieza de trabajo
2	Carburo de Tungsteno	Inserto de corte

Dentro de los componentes del sistema en ANSYS se encuentra el apartado de datos de ingeniería “Engineering Data” en donde se introducen los materiales que intervendrán en la simulación con sus respectivas propiedades y datos de las ecuaciones que gobiernan el modelo.

A continuación, en las tablas 5 y 6 se muestran las propiedades para el acero AISI 1018 y para el carburo de tungsteno.

Propiedades Acero AISI 1018.

Tabla 5: Propiedades Acero AISI 1018

Fuente [12]

Material: AISI 1018	
Densidad: 7900 kg/m ³	
Elasticidad Isotrópica	Módulo de Young: 200 GPa
	Coefficiente de Poisson: 0,29
Esfuerzo de fluencia: 370 MPa	
Esfuerzo último: 440 MPa	
Conductividad Térmica: 52 W/m*K	
Calor específico: 440 J/Kg*K	
Temperatura de fusión: 1798 K	
Constantes del modelo de Jonhson & Cook	
A: 738,76 MPa	
B: 392,78 MPa	
n: 0,4396	
C: 0,0064	
M: 1,05	
Temperatura de fusión: 1798 K	
Constantes de daño:	
D1: 0,1555	
D2: 0,9900	
D3: 1,8890	
D4: 0,0420	
D5: -1,8235	

Outline of Schematic A2, C2, D2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			
3	AISI 1018			C:\Users\Jhon Lozano\Documents\TESIS DESGASTE PLAQUITA\SIMULA

Properties of Outline Row 3: AISI 1018					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7900	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus an...			
6	Young's Modulus	2E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,29			
8	Bulk Modulus	1,5873E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7,7519E+10	Pa		
10	Tensile Yield Strength	370	MPa		
11	Tensile Ultimate Strength	440	MPa		
12	Isotropic Thermal Conductivity	52	W m ⁻¹ K ⁻¹		
13	Specific Heat	440	J kg ⁻¹ K ⁻¹		
14	Johnson Cook Strength				
15	Strain Rate Correction	First-Order			
16	Initial Yield Stress	392	MPa		
17	Hardening Constant	738	MPa		
18	Hardening Exponent	0,4396			
19	Strain Rate Constant	0,0064			
20	Thermal Softening Exponent	1,05			
21	Melting Temperature	1798,2	K		
22	Reference Strain Rate (/sec)	1			
23	Johnson Cook Failure				
24	Damage Constant D1	0,1555			
25	Damage Constant D2	0,99			
26	Damage Constant D3	1,889			
27	Damage Constant D4	0,042			
28	Damage Constant D5	-1,8235			
29	Melting Temperature	1798,2	K		
30	Reference Strain Rate (/sec)	1			

Figura 21: Propiedades AISI 1018 en ANSYS

Fuente [propia]

Propiedades Carburo de Tungsteno

Tabla 6: Propiedades Carburo de Tungsteno

Fuente [13]

Material: Carburo de Tungsteno	
Densidad: 14770 kg/m ³	
Elasticidad Isotrópica	Módulo de Young: 620 GPa
	Coefficiente de Poisson: 0,22
Esfuerzo de fluencia: 330 MPa	
Esfuerzo último: 370 MPa	
Conductividad Térmica: 95 W/m*K	
Calor específico: 250 J/Kg*K	
Temperatura de fusión: 1768 K	
<i>Constantes del modelo de Jonhson & Cook</i>	
A: 3 GPa	
B: 89 GPa	
n: 0,65	
C: 0,0	
M: 1	
Temperatura de fusión: 1768 K	
<i>Constantes de daño:</i>	
D1: 0	
D2: 0,0019	
D3: -3	
D4: 0	
D5: 0	

Outline of Schematic A2, C2, D2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	
5	CARBURO DE TUNGSTENO			C:\Users\Jhon Lozano\Documents\TESIS DESGASTE PLAQUITA\SIMULA	

Properties of Outline Row 5: CARBURO DE TUNGSTENO

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	14770	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus an...			
6	Young's Modulus	5,5E+11	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,22			
8	Bulk Modulus	3,2738E+11	Pa		
9	Shear Modulus	2,2541E+11	Pa		
10	Tensile Yield Strength	330	MPa		
11	Tensile Ultimate Strength	370	MPa		
12	Isotropic Thermal Conductivity	95	W m ⁻¹ K ⁻¹		
13	Specific Heat	250	J kg ⁻¹ K ⁻¹		
14	Johnson Cook Strength				
15	Strain Rate Correction	First-Order			
16	Initial Yield Stress	3000	MPa		
17	Hardening Constant	89000	MPa		
18	Hardening Exponent	0,65			
19	Strain Rate Constant	0			
20	Thermal Softening Exponent	1			
21	Melting Temperature	1768	K		
22	Reference Strain Rate (/sec)	1			
23	Johnson Cook Failure				
24	Damage Constant D1	0			
25	Damage Constant D2	0,0019			
26	Damage Constant D3	-3			
27	Damage Constant D4	0			
28	Damage Constant D5	0			
29	Melting Temperature	1768	K		
30	Reference Strain Rate (/sec)	1			

Figura 22: Carburo de tungsteno ANSYS Fuente

[propia]

2.3.2 Procesamiento

Una vez definidas las geometrías, materiales y sus propiedades, se comienza a definir el modelo numérico dentro del componente de Dinámica Explícita “Explicit Dynamics” en la interfaz de proyectos de ANSYS como se muestra en las figuras 23 y 24.

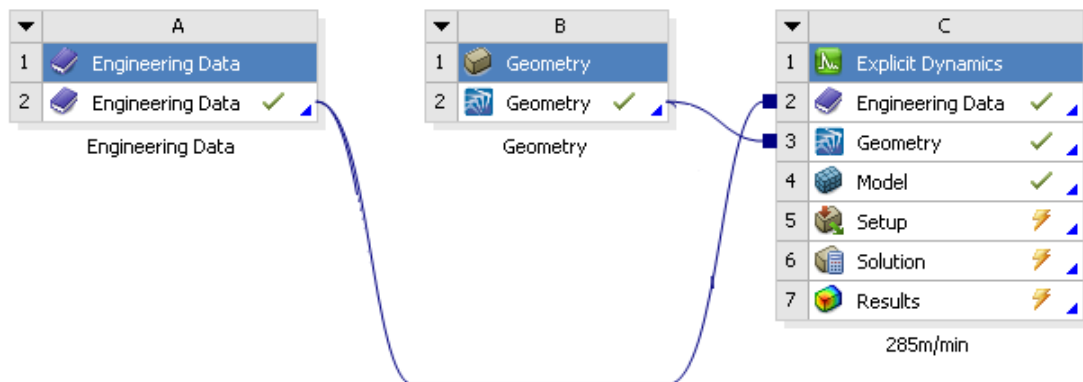


Figura 23: Interfaz de proyectos ANSYS

Fuente: [propia]

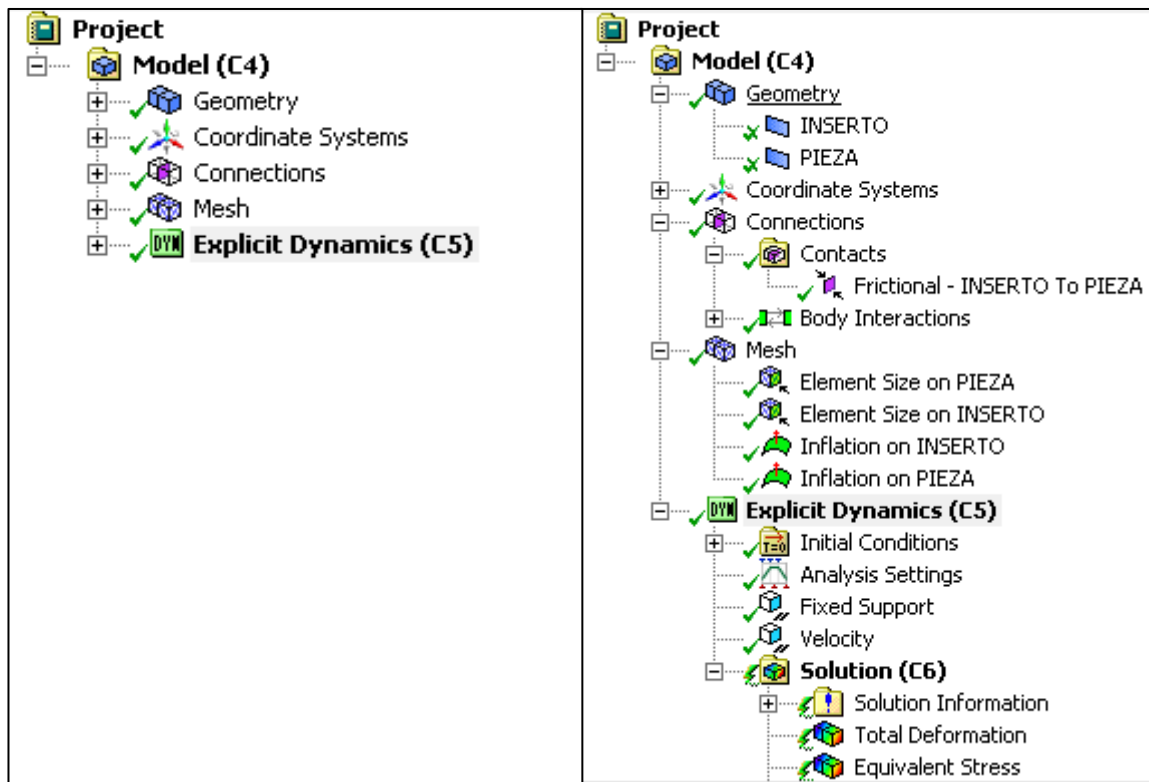


Figura 24: Interfaz Explicit Dynamics

Fuente [propia]

Geometría

Se asignarán los materiales que fueron definidos anteriormente a las geometrías, en ambos casos los elementos se definirán como flexibles o deformables. La tabla 7 muestra como serán asignados los materiales.

Tabla 7: Materiales y comportamiento

Fuente [1]

N°	Elemento	Material	Comportamiento
1	Pieza de trabajo	Acero AISI 1018	Flexible
2	Inserto de corte	Carburo de Tungsteno	Flexible

Conexiones

Se configuró un movimiento con fricción entre las superficies involucradas, esta información esta detallada en la tabla 8.

Tabla 8: Coeficientes de fricción

Fuente [6]

Tipo de contacto	Friccional
Coefficiente de fricción estático	0,5
Coefficiente de fricción dinámico	0,3

Los valores de los coeficientes fueron tomados en referencia al estudio de Hernandez[6].

Se establecieron las áreas que entrarán en contacto durante la operación, al ser una simulación bidimensional las áreas corresponden a las aristas del inserto de corte y a las aristas de la pieza como se detalla en las figuras. 25 y 26.

Las aristas del inserto de corte corresponden al cuerpo de contacto, mientras las aristas de la pieza de trabajo corresponden al cuerpo objetivo.

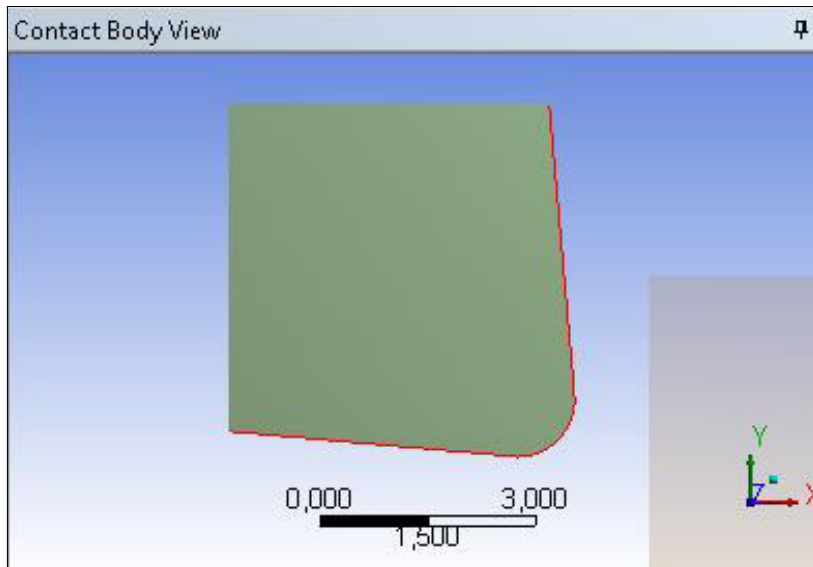


Figura 25: Cuerpo de contacto

Fuente[propia]

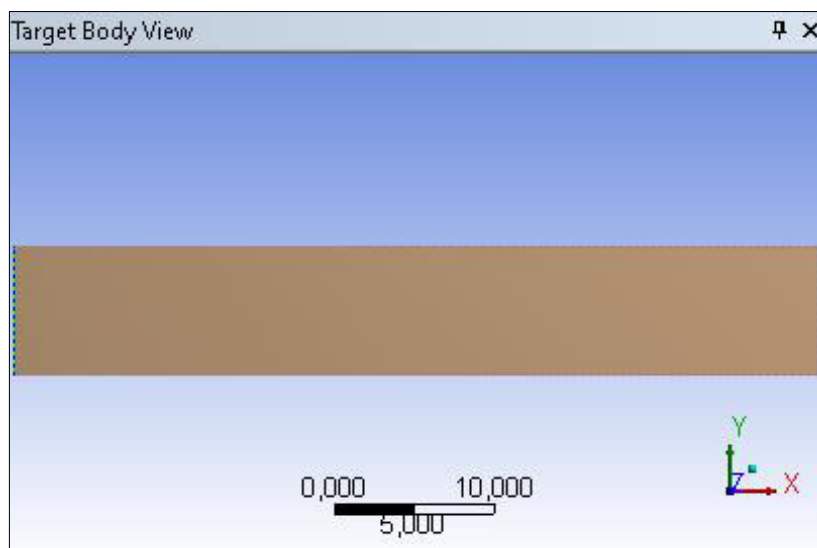


Figura 26: Cuerpo objetivo

Fuente [propia]

Mallado

El software ANSYS por defecto aplica un mallado estándar para un análisis general, en nuestro caso es necesario conocer con más detalle el efecto de los esfuerzos y deformaciones que actuando en determinados sectores de la geometría producen desgaste en el inserto de corte.

Para este estudio se parte de un mallado inicial que tiene como referencia el tamaño del elemento finito establecido en el estudio de Hernández [6]. El cual define el mallado con elementos cuadriláteros de 0,5mm, posteriormente es necesario realizar un refinamiento de la malla, descrito a continuación, hasta llegar a un mallado óptimo que permita validar los resultados obtenidos de las simulaciones con los resultados obtenidos por medio de ensayos experimentales en la tesis de Picho [11].

El mallado final usado se realizó con ayuda de la herramienta BODY SIZING, en esta se define un tamaño de elemento finito de 0,5 mm para ambas superficies inserto y pieza de trabajo. Posteriormente con el uso de la herramienta INFLATION se realiza un refinamiento de la malla en los bordes de contacto.

En el inserto de corte se define una transición suave de 10 capas con una tasa de crecimiento de 1,1 mientras que en la pieza de trabajo se definen 20 capas con una tasa de crecimiento de 1 como se observa con más detalle en las figuras 27 y 28.

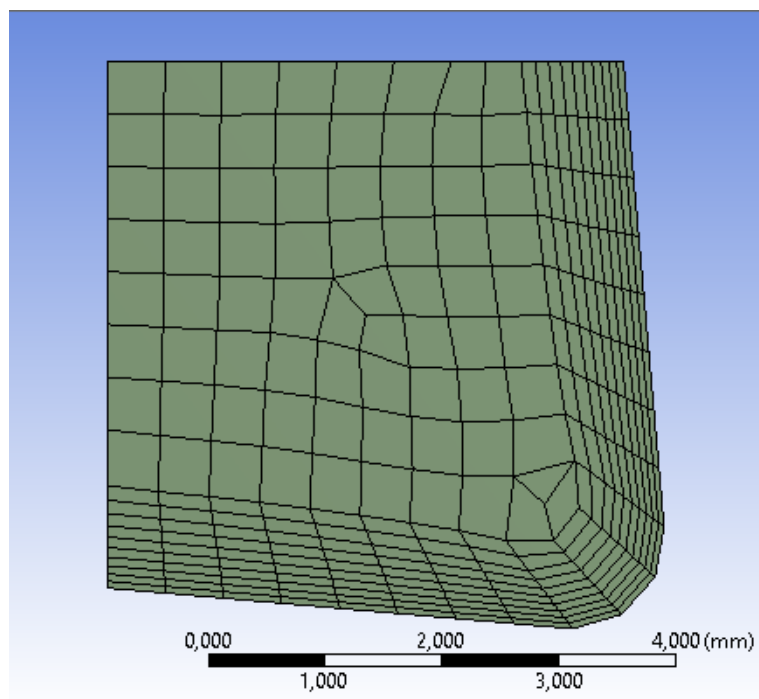


Figura 27: Mallado inserto CNMG

Fuente[propia]

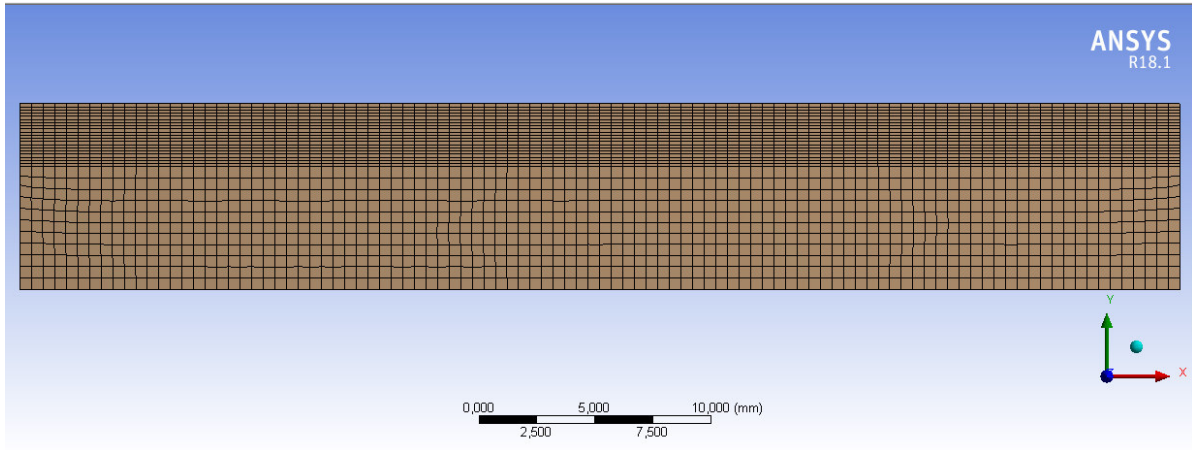


Figura 28: Mallado pieza de trabajo

Fuente[propia]

La malla obtenida usa elementos finitos cuadrangulares de segundo orden y tiene 3524 nodos y 3364 elementos.

Calidad de la malla

La calidad del mallado se examinó en base al criterio de métrica “Skewness” o de oblicuidad usado para elementos finitos bidimensionales, esta es una de las principales medidas de calidad del mallado, determina que tan cerca de un elemento regular se encuentra el elemento finito.

En la tabla 9 se encuentran enumerados los rangos de valores de oblicuidad y la calidad de elemento finito correspondiente.

Tabla 9: Rangos de calidad de mallado

Fuente [14]

Valor de Oblicuidad “Skewness”	Calidad
1	Deformada
0.9 — < 1	Mala
0.75 — 0.9	Pobre
0.5 — 0.75	Razonable
0.25 — 0.5	buena
> 0 — 0.25	Excelente
0	Equilátera

En la siguiente figura se observa la calidad del mallado obtenido.

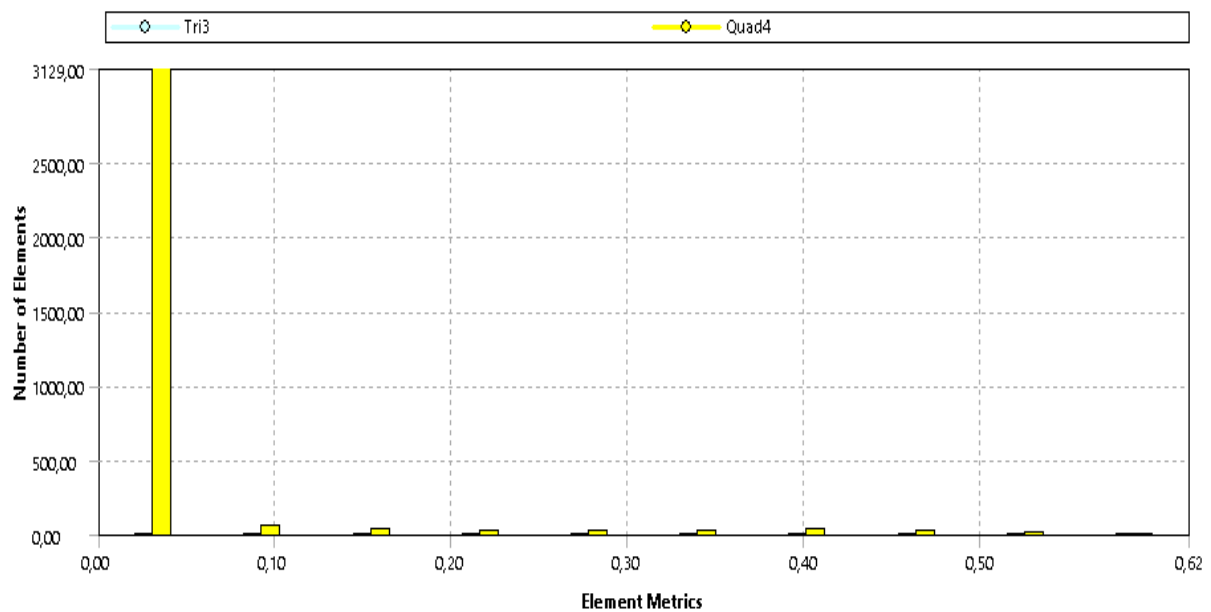


Figura 29: Calidad de la malla obtenida

Fuente[propia]

En base a la figura 30 se observa un valor de oblicuidad o “Skewness” menor a 0,1 por lo que basándonos en la tabla 10 se observa que la calidad del mallado es excelente.

Dinámica Explícita

Para el desarrollo de este modelo numérico se usó un enfoque de dinámica explícita “Explicit Dynamics”. Este enfoque es más apropiado para la resolución de problemas ingenieriles en los que existen grandes deformaciones dependientes del tiempo como: choques, explosiones, impactos, etc. La dinámica explícita permite la captura de propiedades físicas de eventos a corto plazo para productos sujetos a fuerzas dinámicas transitorias altamente no lineales. Es una buena herramienta para resolución de problemas como:

- Análisis cuasi-estáticos
- Impactos a velocidades elevadas
- Deformación del material producida por cargas severas.
- Falla y fragmentación de materiales.
- Diseño de equipamiento deportivo.

- Maquinados con comportamiento plástico no lineal.
- Simulaciones de caída.

En la figura 30 se muestra una comparación entre los enfoques explícito e implícito, aquí se observa que la principal diferencia es el incremento del tiempo, es decir, en la resolución implícita, cada incremento de tiempo debe converger, pero se puede establecer un incremento de tiempo bastante largo. Por otro lado, en la dinámica explícita un modelo no tiene que converger en cada incremento de tiempo y se pueden obtener soluciones precisas con incrementos de tiempo muy pequeños.

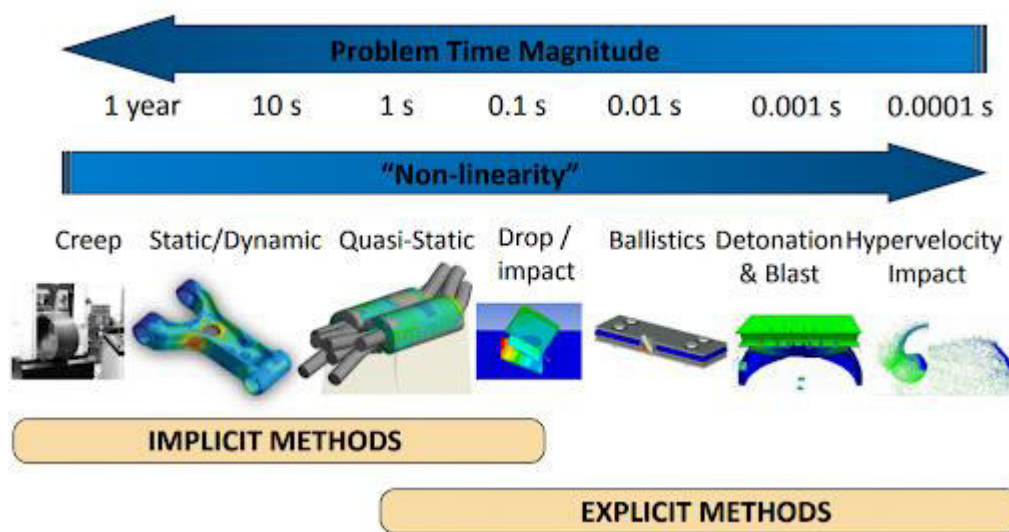


Figura 30: Análisis Explícito vs Análisis Implícito

Fuente [15]

Dentro de los ajustes para el análisis “Analysis Settings” se definió el tiempo de simulación y los intervalos como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10 : Tiempos de simulación

Fuente[6] [16]

Analysis Settings	
Tiempo de simulación	0,002 [s]
Intervalo o incremento de tiempo	1e-12 [s]

Los valores de la tabla 11 se tomaron como referencia del estudio de Hernández [6] y de la tesis de Gonzales y Álvaro [15].

Dentro de la sección de dinámica explícita se definen también las condiciones de contorno que intervienen en el modelo numérico previo a la simulación.

Se definen dos aristas como fijas en la superficie de la pieza de trabajo. En la figura 31 se muestran las aristas seleccionadas para la pieza de trabajo que son la arista inferior y la arista lateral derecha.



Figura 31: Aristas fijas

Fuente: [propia]

2.3.3 Elección de Parámetros de corte

“La elección de los parámetros de corte se ha basado en la norma ASME B94.55M [17] que indica los valores de avance, profundidad y radio de la punta de la herramienta. La norma recomienda que al menos cuatro velocidades de corte deben ser escogidas para cada condición de corte, es recomendado que las velocidades de corte sucesivas lleven una relación constante. Para lo cual, se tiene que para las herramientas de acero de alta velocidad (HSS), carburos y cerámicos, los índices de crecimiento para velocidades constantes son 1.06, 1.12 y 1.25 respectivamente.” [11]

“Finalmente, como se va a trabajar con un carburo recubierto, el índice utilizado es 1.12, y a partir de este se seleccionaron las cuatro velocidades de corte que se usaron para determinar la vida útil del inserto. La primera velocidad de corte se la elige del valor más bajo del recomendado por el fabricante (285 m/min), de ahí ese valor se multiplica por tal índice y se obtiene una aproximación de la siguiente velocidad de corte”. [11]

Para un posterior análisis del desgaste sufrido en función de la velocidad de corte de la herramienta se calcularon dos velocidades de menor valor dividiendo la velocidad de 285m/min por el índice de crecimiento de 1,12 definido anteriormente.

A partir de las condiciones mencionadas se muestran en la tabla 11 las condiciones de corte para este modelo.

Tabla 11: Condiciones de corte del modelo numérico

Fuente: [17]

Inserto	CNMG 120408 PM 4325	
Velocidad de corte (m/min)	285	320
Profundidad de corte (mm)	2,50	

La velocidad de corte como se muestra en la figura 32 se asigna únicamente en una arista del inserto de corte, esta idea proviene del hecho de que debemos evitar aplicar una velocidad sobre un cuerpo deformable. [18]

El valor de la profundidad está tomado de lo recomendado por la norma ASME B94.55M [17].

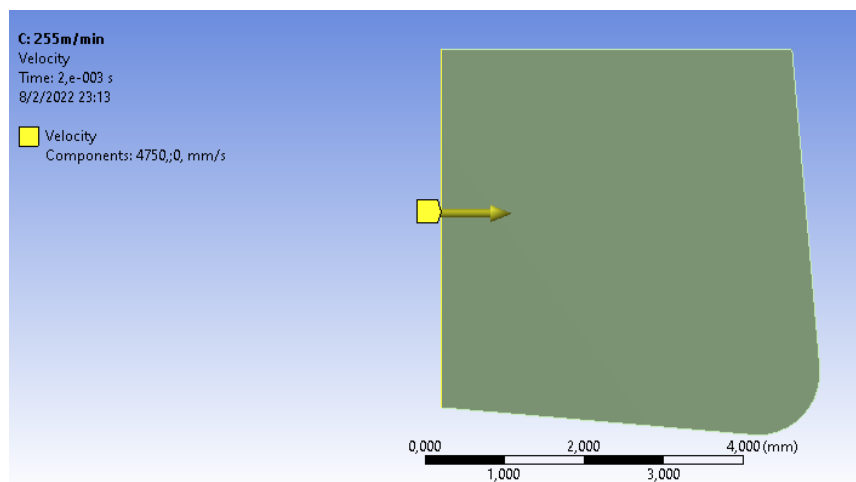


Figura 32: Velocidad de corte herramienta

Fuente[propia]

2.3.4 Post Procesamiento

Simulación

Se realizaron dos simulaciones variando la magnitud de la velocidad de corte con los valores que se mencionaron en la tabla 11.

A continuación, en las figuras 34 y 35 se muestran las simulaciones realizadas para cada velocidad y sus resultados.

Simulación para la velocidad de 285 m/min

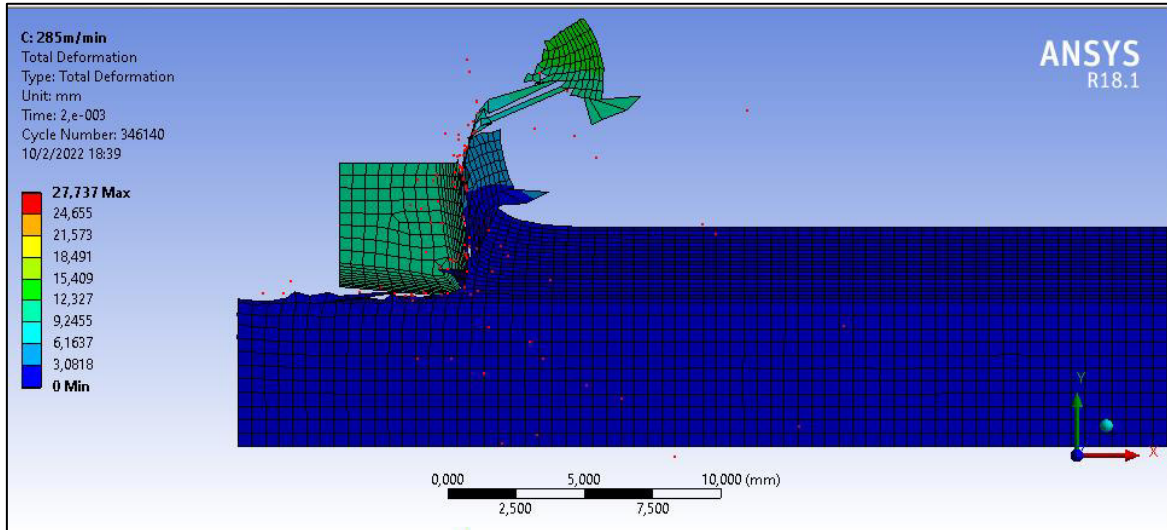


Figura 33: Simulación a 285 m/min

Fuente[propia]

Simulación para la velocidad de 320 m/min

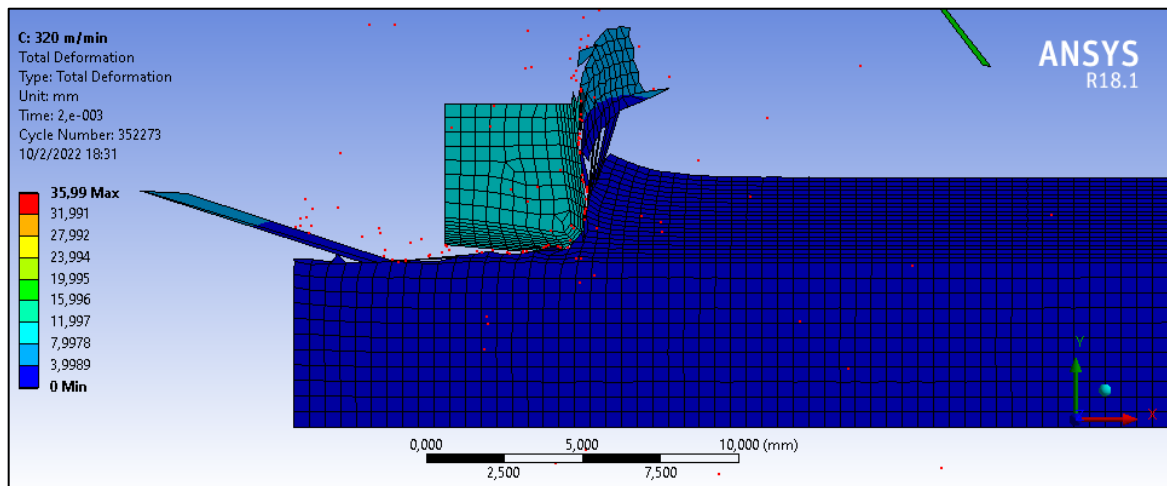


Figura 34: Simulación a 320 m/min

Fuente[propia]

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados Obtenidos

En cada simulación se obtiene el desgaste sufrido en la superficie del inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25, este desgaste no puede ser medido directamente dentro de la interfaz de ANSYS por lo cual se exportan estas geometrías a otro software CAD con el fin de poder cuantificar este desgaste.

A continuación, se muestran los desgastes obtenidos en el inserto de corte para las velocidades de 285 y 320 m/min.

Las figuras 35 y 36 muestran el desgaste sufrido por el inserto cuando se simula a una velocidad de corte igual a 285 m/min

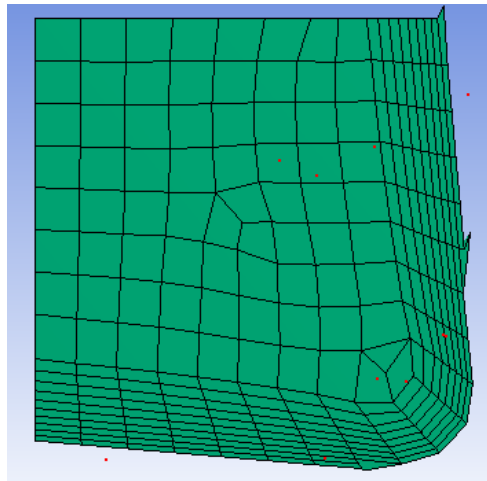


Figura 35: Inserto Desgastado $v=285\text{m/min}$

Fuente[propia]

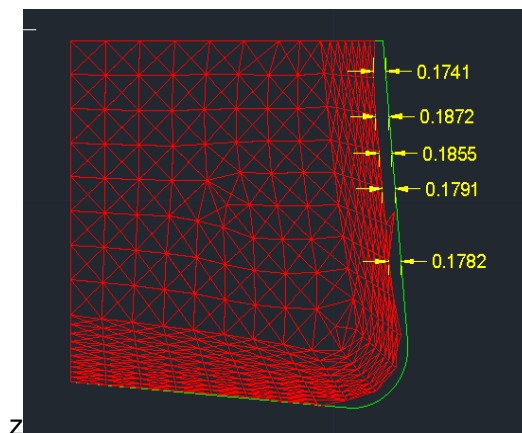


Figura 36: Mediciones de desgaste a $v=285\text{m/min}$

Fuente[propia]

Con estas mediciones en la tabla 12 se obtiene el valor promedio del desgaste en el inserto para esta velocidad de corte.

Tabla 12: Desgaste promedio $v=285\text{m/min}$

Fuente[propia]

Mediciones(mm)					
1	2	3	4	5	Promedio
0,1741	0,1872	0,1855	0,1791	0,1782	0,1807

Las figuras 38 y 39 muestran el desgaste sufrido por el inserto cuando se simula a una velocidad de corte igual a 320 m/min

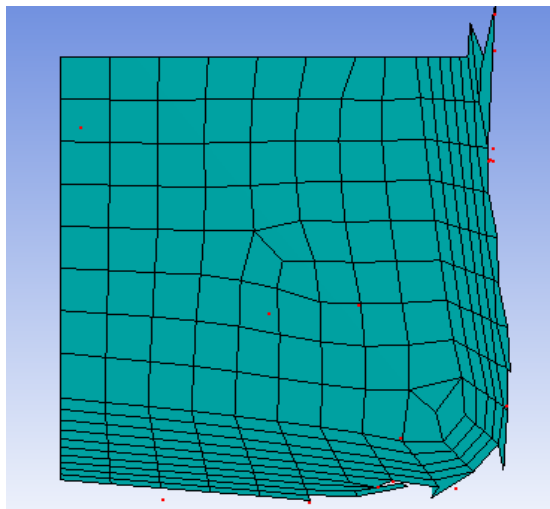


Figura 37: Inserto desgastado $v=320\text{m/min}$

Fuente [propia]

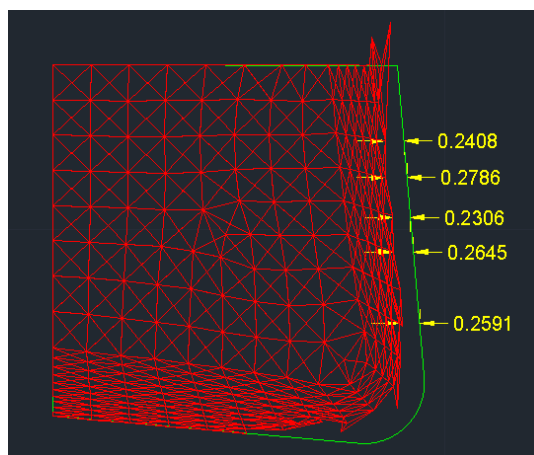


Figura 38: Mediciones de desgaste $v=320\text{m/min}$

Fuente[propia]

Tabla 13: Desgaste promedio v=320m/min

Fuente [propia]

Mediciones(mm)					
1	2	3	4	5	Promedio
0,2408	0,2786	0,2306	0,2645	0,2591	0,2547

3.2 Validación de resultados obtenidos

Del análisis experimental del desgaste del inserto de corte se tienen los siguientes datos mostrados en la figura 39 para la velocidad de 285 m/min y en la figura 40 para la velocidad de 320 m/min.

EPN	RESULTADOS DE DESGASTE V_{B_B} vs TIEMPO DE MECANIZADO				
Diámetro del eje = 101,6 mm (4")					
Inserto = CNMG 120408 PM4325					
Velocidad de avance (fn) = 0,25 mm/rev					
Penetración (ap) = 2,5 mm					
Velocidad de corte (Vc) = 285 m/min					
Longitud de mecanizado = 350 mm					
PROBETA	Pasadas Totales	Pasada Ref.	Tiempo real pasada (min)	Tiempo Acumulado (min)	Desgaste (μ m)
	0	0	0,00		
B-10	1	1	1,50	1,50	159,78
	2	2	1,42	2,92	160,16
	3	3	1,33	4,25	160,86
	4	4	1,30	5,55	161,61
	5	5	1,18	6,73	166,18
	6	6	1,10	7,83	168,77
	7	7	1,03	8,87	169,05
	8	8	0,97	9,83	171,82
B-09	9	3	1,32	11,15	172,80
	10	4	1,27	12,42	174,49
	11	5	1,17	13,58	177,18
	12	6	1,10	14,68	178,45
	13	7	1,00	15,68	180,60
	14	8	0,93	16,62	181,49

Figura 39: Resultados experimentales v=285m/min

Fuente [picho]

EPN	RESULTADOS DE DESGASTE VB _B vs TIEMPO DE MECANIZADO				
Diámetro del eje =		101,6 mm		(4")	
Inserto =		CNMG 120408 PM4325			
Velocidad de avance (fn) =		0,25 mm/rev			
Penteración (ap) =		2,5 mm			
Velocidad de corte (Vc) =		320 m/min			
Longitud de mecanizado =		350 mm			
PROBETA	Pasadas Totales	Pasada Ref.	Tiempo real pasada (min)	Tiempo Acumulado (min)	Desgaste (µm)
	0	0	0,00		
B-06	1	1	1,33	1,33	125,77
	2	2	1,27	2,60	130,61
	3	3	1,18	3,78	134,22
	4	4	1,12	4,90	149,47
	5	5	1,07	5,97	150,35
	6	6	0,98	6,95	162,92
	7	7	0,92	7,87	165,48
	8	8	0,85	8,72	191,14
B-15	9	1	1,32	10,03	223,55
	10	2	1,23	11,27	233,61
	11	3	1,17	12,43	234,38
	12	4	1,07	13,50	240,77
	13	5	0,99	14,49	250,52
	14	6	0,93	15,42	252,12
	15	7	0,87	16,29	258,79

Figura 40: Resultados experimentales v=320m/min

Fuente[picho]

En la tesis de Picho [11] se realizó la medición del desgaste sufrido en el inserto luego de cada pasada, en dicho trabajo se ensayaron 12 probetas las cuales estaban repartidas de tal forma que para las velocidades más bajas (285 y 320 m/min) al ser necesaria una cantidad mayor de pasadas para obtener desgaste se usaron 8 probetas, mientras que para las velocidades más altas (355 y 400 m/min) se requirió un menor número de pasadas y por ende fueron usadas 4 probetas.

De esta forma, en el inserto que operó a la velocidad de corte más alta sólo se tiene registro del desgaste hasta la pasada número 12, es por esta razón que se tomó como referencia ese número de pasada para validar los resultados ya que esta cantidad de pasadas es común para todas las velocidades analizadas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se valida los resultados obtenidos de las simulaciones con los resultados experimentales mostrándose esto en la tabla 14.

Tabla 14: Validación de resultados

Fuente [11]

Vc	Experimental (um)	Simulación (um)	Error
285 m/min	178,45	180,72	1,3 %
320 m/min	240,77	254,72	6 %

De la tabla 14 se observa que el modelo desarrollado es válido para visualizar el desgaste del inserto de corte para las velocidades de 285 y 320 m/min ya que se obtuvieron resultados con errores menores al 6%.

3.3 Variación de parámetros

Una vez realizada la validación del modelo numérico, el presente trabajo plantea analizar adicionalmente el desgaste sufrido por el inserto CNMG 12 04 08 - PM 43 25 cuando este opera a dos velocidades más bajas de la recomendada por el fabricante (285 m/min). Estas velocidades fueron obtenidas al dividir la velocidad de 285m/min por el factor de crecimiento 1,12 que se mencionó en la definición de los parámetros de corte.

Las velocidades que se obtuvieron son de 228 y 255 m/min. Para estas velocidades se usaron los mismos parámetros de corte y se obtuvo lo siguiente:

3.3.1 Simulación para la velocidad de corte $v=228$ m/min

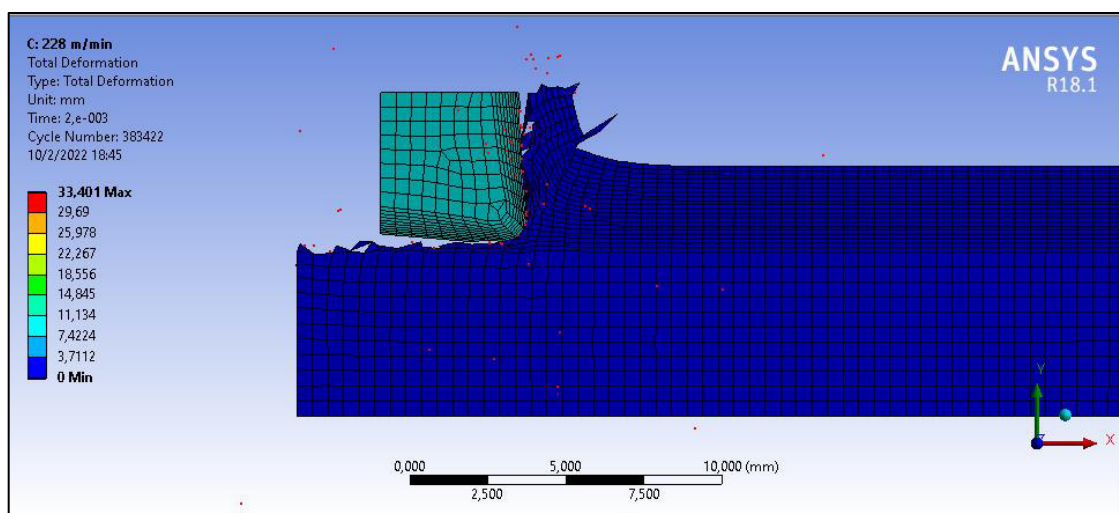


Figura 41: Simulación $v=228$ m/min

Fuente[propia]

La figura 43 muestra el estado final del inserto luego de la simulación a la velocidad de corte de 228m/min.

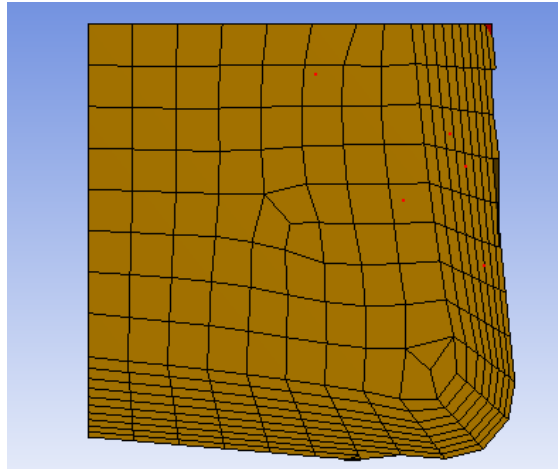


Figura 42: Inserto desgastado v=228m/min

Fuente[propia]

Las mediciones del desgaste sufrido a esta velocidad se observan en la figura 44 y su promedio se muestra con más detalle en la tabla 15.

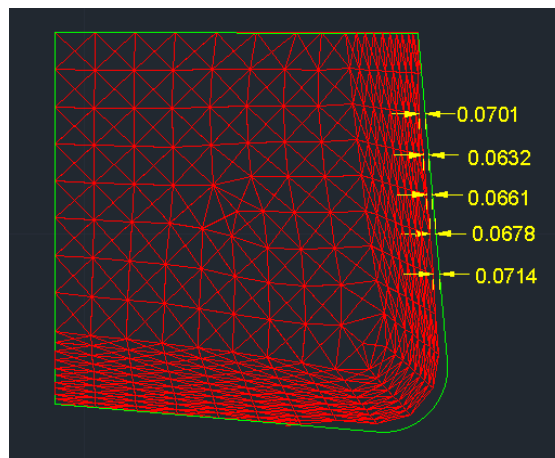


Figura 43: Medición de desgaste v=228m/min

Fuente[propia]

Tabla 15: Desgaste promedio v=228m/min

Fuente [propia]

Mediciones(mm)					
1	2	3	4	5	Promedio
0,0701	0,0632	0,0661	0,0678	0,0714	0,0677

3.3.2 Simulación para la velocidad de corte $v= 255 \text{ m/min}$

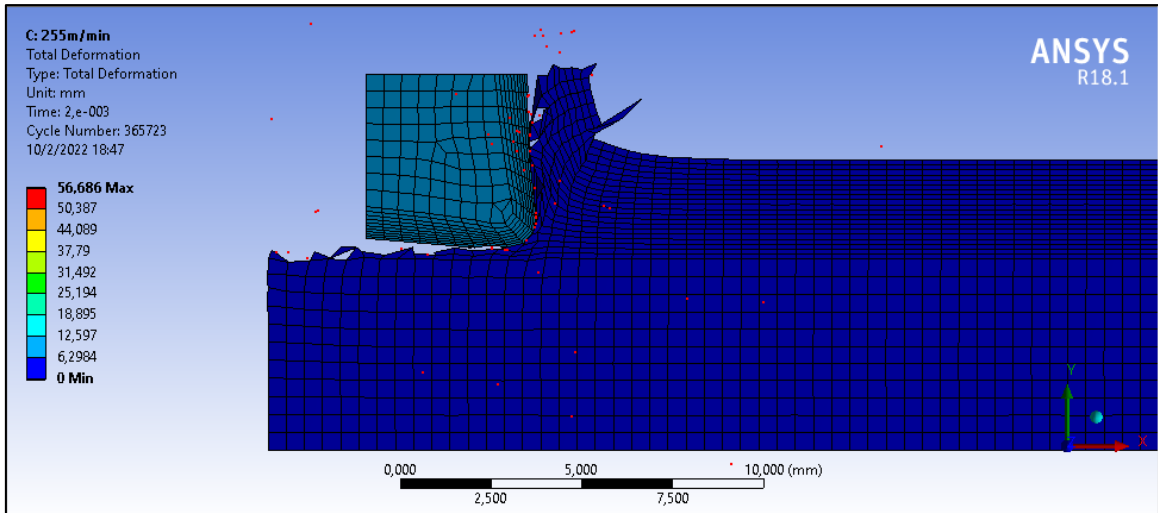


Figura 44: Simulación $v=255\text{m/min}$

Fuente[propia]

Las figuras 46 y 47 muestran el desgaste sufrido por el inserto luego la simulación a la velocidad de 255m/min.

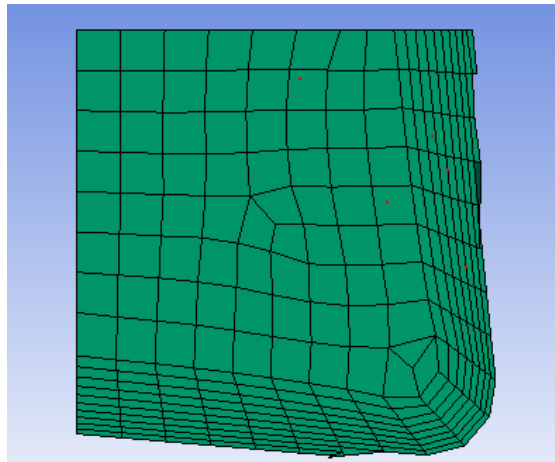


Figura 45: Desgaste inserto $v=255\text{m/min}$

Fuente [propia]

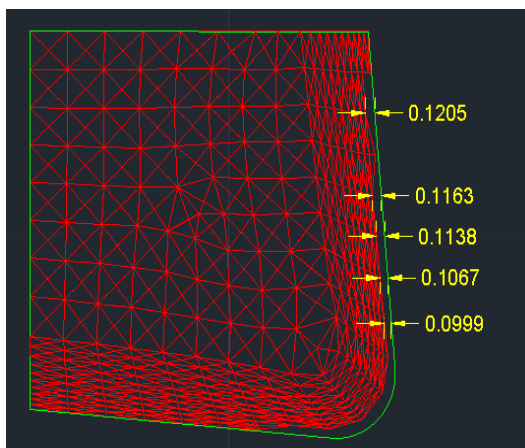


Figura 46: Mediciones de desgaste $v=255\text{m/min}$

Fuente [propia]

En la tabla 16 se muestra el valor del desgaste promedio para esta velocidad.

Tabla 16: Desgaste promedio $v=255\text{m/min}$

Fuente [propia]

Mediciones(mm)					
1	2	3	4	5	Promedio
0,1205	0,1163	0,1138	0,1067	0,0999	0,1114

3.4 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en todas las simulaciones a diferentes velocidades de operación se presentan como resumen en la tabla 17.

Tabla 17: Resultados obtenidos

Fuente[propia]

Velocidad (m/min)	Desgaste (um)
228	67,72
255	111,44
285	180,72
320	254,72

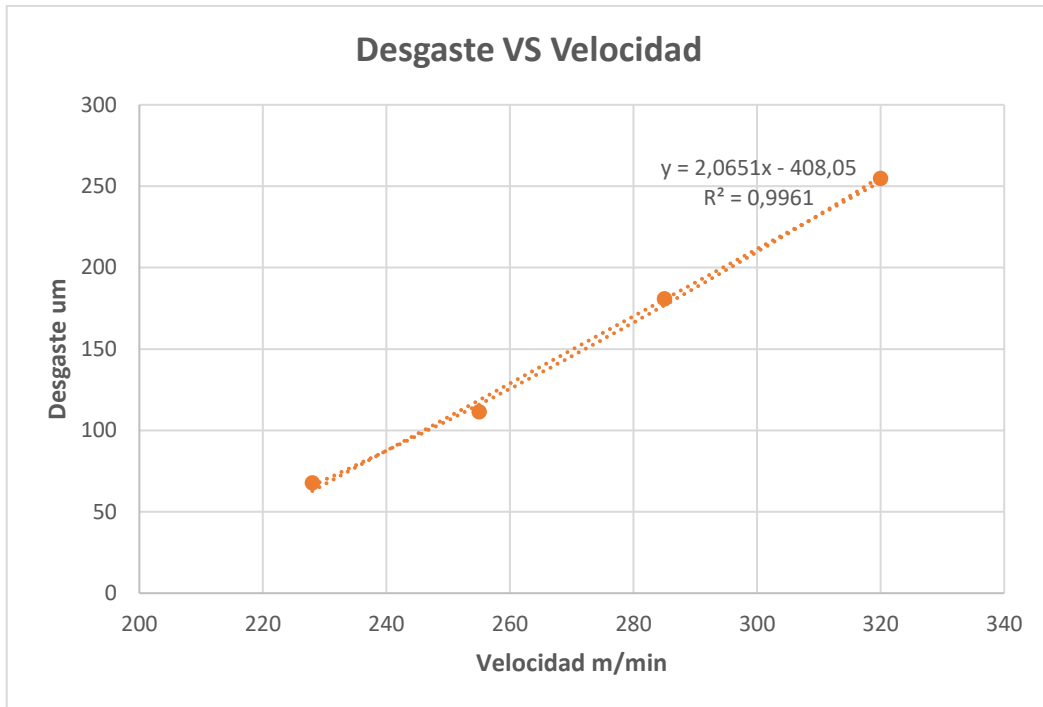


Figura 47: Desgaste vs Velocidad de corte

Fuente[propia]

Cos los datos de la gráfica se realiza una regresión para obtener la relación entre el desgaste sufrido por el inserto y la velocidad de corte de la herramienta obteniéndose una función lineal que relaciona estos parámetros con la siguiente expresión:

$$y = 2,0651x - 408,05$$

Podemos expresar esta ecuación de la siguiente manera:

$$D = 2,0651 * Vc - 408,05 \quad (5)$$

En donde:

D: Desgaste del inserto de corte en um

Vc: Velocidad de corte en m/min

Esta ecuación obtenida nos permite determinar el valor promedio del desgaste que sufre el inserto CNMG 12 04 08 PM 43 25 en el intervalo de velocidades de corte entre [228 m/min – 320 m/min] para las condiciones de corte mencionadas en el desarrollo de este trabajo.

3.5 Conclusiones

El desarrollo de un modelo numérico de corte ortogonal para el proceso de torneado basado en las ecuaciones de Johnson & Cook de la ley del comportamiento de los materiales nos permitió analizar el desgaste del inserto CNMG 12 04 08 PM 43 25 en operaciones de torneado y validarlo con estudios experimentales para velocidades de corte entre 285 y 320 m/min.

La información recopilada en el estado del arte fue relevante en el desarrollo del modelo numérico, proporcionó gran número de datos valiosos además de algunos criterios que permitieron simplificar de cierta forma el gasto computacional que este tipo de simulaciones conlleva.

Los resultados obtenidos en este trabajo fueron validados con valores de desgaste del inserto CNMG 12 04 08 PM 43 25 obtenidos experimentalmente en el trabajo de Picho [11]. De esta validación se obtuvieron resultados muy satisfactorios con errores de 1,3% y 6 % para las velocidades de 285 y 320 m/min respectivamente. Con esto se concluye que el modelo numérico desarrollado en este trabajo es válido para las velocidades y parámetros de corte establecidas.

Una variación de velocidades de corte hacia dos valores menores de las establecidas permitió observar el comportamiento del desgaste con respecto a la velocidad de corte, obteniendo de esta gráfica una ecuación válida para cuantificar el desgaste existente en el inserto CNMG 12 04 08 PM 43 25 luego de un proceso de torneado. Esta ecuación será factible en el rango de velocidades de corte entre 228 a 320 m/min con las condiciones de corte establecidas en el desarrollo de este trabajo.

Manteniendo constantes otros parámetros de corte (profundidad y avance) se observó que la diferencia de desgaste del inserto entre la velocidad más baja con respecto a la velocidad más alta es de aproximadamente 4 veces su valor. Esto muestra la gran influencia que tiene la velocidad de corte durante un proceso de mecanizado en la determinación de su vida útil.

Una gran ventaja del uso de paquetes computacionales como ANSYS en el estudio de procesos de mecanizado es la reducción de costos en la realización de ensayos experimentales ya que con un correcto desarrollo una simulación puede obtener muy buenos resultados y una vez validada la simulación se pueden realizar análisis en menores tiempos.

Quedó evidenciado que para desarrollar este Trabajo de Integración Curricular fue necesaria la aplicación de conocimientos de asignaturas de todos los niveles de la carrera, en este caso fueron utilizados conocimientos en CAD, CNC, Diseño de Máquinas, Dibujo Mecánico, Elementos finitos, Procesos de Manufactura, entre otros. Es necesario también poseer un criterio ingenieril que nos permita tomar las mejores decisiones para resolver las dificultades que pueden presentarse en el proceso de elaboración del trabajo.

3.6 Recomendaciones

Es recomendable aplicar el refinamiento de la malla únicamente a las zonas que entrarán en contacto, no es necesario realizarlo a toda la superficie, se ahorra tiempo de simulación y poder computacional requerido.

Se recomienda realizar un análisis tridimensional del desgaste sufrido por el inserto, con los resultados de las simulaciones en tres dimensiones se podrá tener una idea más clara de cómo está distribuido el desgaste en las caras del inserto.

Se recomienda como trabajos futuros, una vez validados los resultados realizar una variación en los otros parámetros de corte como: profundidad, avance o materiales. Esto con el objetivo de analizar la influencia que tiene cada uno de estos parámetros en la formación del desgaste en el inserto.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. P. Groover, "Fundamentos de Manufactura Moderna", Tercera Ed, Mc. Graw Hill, 2007.
- [2] S. Kalpakjian, "Manufactura, Ingeniería y Tecnología". Quinta Edición., PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008.
- [3] SANDVIK Coromant, "Manual de Torneado", 2022, [Online], Available: <https://www.sandvik.coromant.com>
- [4] SANDVIK Coromant, "Plaquita CNMG 120408 PM 4325", [Online], Available: <https://www.sandvik.coromant.com>
- [5] M. Martos, "Simulación Numérica del Proceso de Mecanizado con Corte Ortogonal de Inconel 718.", Universidad Carlos III, Madrid, 2007.
- [6] K. Hernández, E. Martínez and J. Pabón, "Simulación del Desgaste de Herramienta en Procesos de Torneado", Universidad de Pamplona, Vol. 1, 2018
- [7] P. Martínez, "Simulación Numérica de un Proceso de Corte Ortogonal: Estudio de las Fuerzas de Corte y Avance.", Universidad Carlos III, Madrid, 2017.
- [8] ROMI, "Torno ROMI C420", [Online], Available: <https://www.romi.com/es/productos/linea-romi-c-3/>
- [9] Researchgate, "Guía práctica para la selección de insertos de mecanizado", [Online], Available: <https://www.researchgate.net/publication/315741844>)
- [10] Proyecta Estudio, "Programas de análisis de elementos finitos.", [Online], Available: <https://proyectaestudio.es/programas-de-analisis-de-elementos-finitos-top-5/>
- [11] L. A. Picho, "Estudio del Desgaste de la Plaquita CNMG 120408-PM 4325 en Función de los Parámetros de Mecanizado en Torneado CNC.", Escuela Politécnica Nacional., vol. 1, Quito., 2019
- [12] M.F. Buchely, X. Wang, D.C Van Aken, R. J. O'Malley, S. Lekakh, and K. Chandrashekhara, "The Use of Genetic Algorithms to Calibrate Johnson-Cook Strength and Failure Parameters of AISI/SAE 1018 Steel.", J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME, vol. 141, no.2, 2019. doi: 10.1115/1.4042382.
- [13] T. J. Holmquist, G. R. Johnson, and W. A. Gooch, "Modeling the 14.5 mm BS41 Projectile for Ballistic Impact Computations.", vol 75, pp 73-86, 2014

- [14] ANSYS, Inc., “ANSYS Meshing Guide”, Realise 18.1 junio 2017 ANSYS, Inc.
- [15] CAD/CAM/CAE Tech., “Implicit vs Explicit Analysis.”, [Online], Available: <https://cadcamcaetech.blogspot.com/>
- [16] H. Álvaro, and D. Gonzáles., “Estudio del Comportamiento de Limado Ortogonal del Acero ASTM A-36 Mediante un Modelo Numérico y su Validación.”, Escuela Politécnica Nacional., vol. 1, Quito, 2021.
- [17] AMERICAN NATIONAL STANDARD, “Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools.”, ANSI/ASME B.94.55M-1998, New York, Reaffirmed 2003.
- [18] F. Salvatore, S. Saad, and H. Hamdi, “Modeling and Simulation of Tool Wear During the Cutting Process.”, Procedia CIRP, vol. 8, pp. 305-310, 2013.
- [19] ISO (International Organization for Standardization)., “Automation Systems and Integration - Numerical Control of Machines - Program Format and Definitions of Address Words - Part 1: Data Format for Positioning, Line Motion and Contouring Control Systems.”, ISO 6983-1:2009.

5. ANEXOS

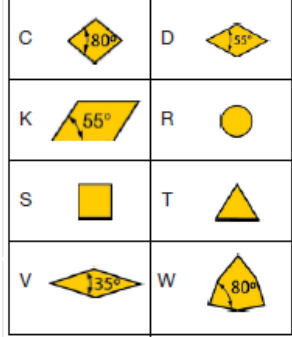

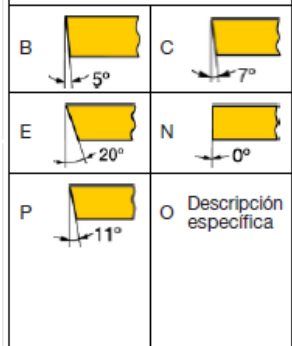
ANEXO I

Información del inserto CNMG 12 04 08 PM 43 25

Plaquitas para torneado en general

Plaquitas, métrica

C	N	M	G	12	04	08	-		-	PF
1	2	3	4	5	6	7		8	9	12

<p>1 Forma de la plaquita</p> 	<p>3 Tolerancias, sistema métrico</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th><i>s</i></th> <th><i>IC / W</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>G</td> <td>±0.13</td> <td>±0.025</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>±0.13</td> <td>±0.05 - ±0.15¹⁾</td> </tr> <tr> <td>U</td> <td>±0.13</td> <td>±0.08 - ±0.25¹⁾</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>±0.025</td> <td>±0.025</td> </tr> </tbody> </table> <p>1)Varía según el tamaño de <i>IC</i>. Véase más abajo.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Círculo inscrito <i>IC</i>mm</th> <th colspan="2">Tipo de tolerancia</th> </tr> <tr> <th>M</th> <th>U</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3.97</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5.56</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6.0</td> <td rowspan="5">±0.05</td> <td rowspan="5">±0.08</td> </tr> <tr> <td>6.35</td> </tr> <tr> <td>8.0</td> </tr> <tr> <td>9.525</td> </tr> <tr> <td>10.0</td> </tr> <tr> <td>12.0</td> <td rowspan="2">±0.08</td> <td rowspan="2">±0.13</td> </tr> <tr> <td>12.7</td> </tr> <tr> <td>15.875</td> <td rowspan="3">±0.10</td> <td rowspan="3">±0.18</td> </tr> <tr> <td>16.0</td> </tr> <tr> <td>19.05</td> </tr> <tr> <td>20.0</td> <td rowspan="2">±0.13</td> <td rowspan="2">±0.25</td> </tr> <tr> <td>25.0</td> </tr> <tr> <td>25.4</td> <td rowspan="2">±0.15</td> <td rowspan="2">±0.25</td> </tr> <tr> <td>31.75</td> </tr> <tr> <td>32.0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Para plaquitas positivas <i>IC</i> es el radio válido para un vértice agudo.</p>	Tipo	<i>s</i>	<i>IC / W</i>	G	±0.13	±0.025	M	±0.13	±0.05 - ±0.15 ¹⁾	U	±0.13	±0.08 - ±0.25 ¹⁾	E	±0.025	±0.025	Círculo inscrito <i>IC</i> mm	Tipo de tolerancia		M	U	3.97			5.0			5.56			6.0	±0.05	±0.08	6.35	8.0	9.525	10.0	12.0	±0.08	±0.13	12.7	15.875	±0.10	±0.18	16.0	19.05	20.0	±0.13	±0.25	25.0	25.4	±0.15	±0.25	31.75	32.0			<p>3 Tolerancias, pulgadas</p>  <p>A: Diámetro teórico del círculo inscrito en la plaquita. T: Grosor de la plaquita. B: Véanse las figuras.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo</th> <th>B:</th> <th>A:</th> <th>T:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>±.0002</td> <td>±.001</td> <td>±.001</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>.0002</td> <td>.001</td> <td>.005</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>.0005</td> <td>.001</td> <td>.001</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>.0005</td> <td>.001</td> <td>.005</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>.001</td> <td>.001</td> <td>.001</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>.0002</td> <td>.0005</td> <td>.001</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>.001</td> <td>.001</td> <td>.005</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>.0005</td> <td>.0005</td> <td>.001</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>.0002</td> <td>.002-.005</td> <td>.001</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>.0005</td> <td>.002-.005</td> <td>.001</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>.001</td> <td>.002-.005</td> <td>.001</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>.002-.005</td> <td>.002-.005</td> <td>.005</td> </tr> <tr> <td>U</td> <td>.005-.012</td> <td>.005-.010</td> <td>.005</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>.002-.010</td> <td>.002-.004</td> <td>.001</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo	B:	A:	T:	A	±.0002	±.001	±.001	B	.0002	.001	.005	C	.0005	.001	.001	D	.0005	.001	.005	E	.001	.001	.001	F	.0002	.0005	.001	G	.001	.001	.005	H	.0005	.0005	.001	J	.0002	.002-.005	.001	K	.0005	.002-.005	.001	L	.001	.002-.005	.001	M	.002-.005	.002-.005	.005	U	.005-.012	.005-.010	.005	N	.002-.010	.002-.004	.001
Tipo	<i>s</i>	<i>IC / W</i>																																																																																																																				
G	±0.13	±0.025																																																																																																																				
M	±0.13	±0.05 - ±0.15 ¹⁾																																																																																																																				
U	±0.13	±0.08 - ±0.25 ¹⁾																																																																																																																				
E	±0.025	±0.025																																																																																																																				
Círculo inscrito <i>IC</i> mm	Tipo de tolerancia																																																																																																																					
	M	U																																																																																																																				
3.97																																																																																																																						
5.0																																																																																																																						
5.56																																																																																																																						
6.0	±0.05	±0.08																																																																																																																				
6.35																																																																																																																						
8.0																																																																																																																						
9.525																																																																																																																						
10.0																																																																																																																						
12.0	±0.08	±0.13																																																																																																																				
12.7																																																																																																																						
15.875	±0.10	±0.18																																																																																																																				
16.0																																																																																																																						
19.05																																																																																																																						
20.0	±0.13	±0.25																																																																																																																				
25.0																																																																																																																						
25.4	±0.15	±0.25																																																																																																																				
31.75																																																																																																																						
32.0																																																																																																																						
Tipo	B:	A:	T:																																																																																																																			
A	±.0002	±.001	±.001																																																																																																																			
B	.0002	.001	.005																																																																																																																			
C	.0005	.001	.001																																																																																																																			
D	.0005	.001	.005																																																																																																																			
E	.001	.001	.001																																																																																																																			
F	.0002	.0005	.001																																																																																																																			
G	.001	.001	.005																																																																																																																			
H	.0005	.0005	.001																																																																																																																			
J	.0002	.002-.005	.001																																																																																																																			
K	.0005	.002-.005	.001																																																																																																																			
L	.001	.002-.005	.001																																																																																																																			
M	.002-.005	.002-.005	.005																																																																																																																			
U	.005-.012	.005-.010	.005																																																																																																																			
N	.002-.010	.002-.004	.001																																																																																																																			
<p>2 Ángulo de incidencia de la plaquita</p> 																																																																																																																						

4 Tipo de plaquita		5 Tamaño de plaquita											
A		Q		Longitud de filo, métrico		C	D	R	S	T	V	W	K
G		R		<i>iC</i> mm	<i>iC</i>								
M		T		3.18	1/8"					05			
N		W		3.97	5/32"					06		02	
P		X		5.0	7/32"			05					
				5.56			06	09					
				6.0			07			11	11	04	
				6.35	1/4"	06							
				8.0				08					
				9.525	3/8"	09	11	09	09	16	16	06	16 ¹⁾
				10.0				10					
				12.0				12					
				12.7	1/2"	12	15	12	12	22	22	08	
				13			13				13		
				15.875	5/8"	16		15	15	27			
				16.0				16					
				19.0	3/4"	19		19	19	33			
				20.0				20					
				25.0				25 ¹⁾					
				25.4	1"	25		25 ²⁾	25				
				31.75	1 1/4"								
				32				31					
								32					

El círculo inscrito se indica en 1/8".

¹⁾ Para la forma de plaquita K (KNMX, KNUX) sólo se indica la longitud teórica de la arista de corte.

1) Diseño métrico
2) Diseño en pulgadas

6 Espesor de plaquita, <i>s</i> mm, pulgadas			
	<i>s</i>	<i>s</i>	
Métrica		Pulgadas	
01 <i>s</i> = 1.59	1	<i>s</i> = .0625	
T1 <i>s</i> = 1.98	(1.2)	<i>s</i> = .075	
02 <i>s</i> = 2.38	(1.5)	<i>s</i> = 3/32	
03 <i>s</i> = 3.18	2	<i>s</i> = 1/8	
T3 <i>s</i> = 3.97	(2.5)	<i>s</i> = 5/32	
04 <i>s</i> = 4.76	3	<i>s</i> = 3/16	
05 <i>s</i> = 5.56	4	<i>s</i> = 1/4	
06 <i>s</i> = 6.35	5	<i>s</i> = 5/16	
07 <i>s</i> = 7.94	6	<i>s</i> = 3/8	
09 <i>s</i> = 9.52	6.3	<i>s</i> = .394	
10 <i>s</i> = 10.00	7.6	<i>s</i> = .475	
12 <i>s</i> = 12.00			

7 Radio de punta, <i>r_c</i> mm, pulgadas		
	<i>r_c</i>	
Métrico:	Pulgada:	Dimensiones reales: pulgadas
00 = 0	00	Redondas
01 = 0.1	03	.004
02 = 0.2	0	.008
04 = 0.4	1 = 1/64	.0156
05 = 0.5		
08 = 0.8	2 = 1/32	.0312
10 = 1.0		
12 = 1.2	3 = 3/64	.047
15 = 1.5		
16 = 1.6	4 = 1/16	.0625
24 = 2.4	6 = 3/32	.094
32 = 3.2	8 = 1/8	.125

8 Estado del filo	
F	Filo de corte agudizado
A	Filo con tratamiento ER (ANSI)
E	Arista de corte tratada ER
T	Faceta negativa
K	Facetas negativa dobles
S	Faceta negativa y filo de corte con tratamiento ER

9 Sentido de la herramienta	
R	
L	
N	

10 Anchura del chafilán métrica, pulgadas	
	<i>b_{γn}</i>
Métrico:	
010 <i>b_{γn}</i> = 0.10	
025 <i>b_{γn}</i> = 0.25	
070 <i>b_{γn}</i> = 0.70	
150 <i>b_{γn}</i> = 1.50	
200 <i>b_{γn}</i> = 2.00	
Pulgada:	
03 <i>b_{γn}</i> = .003	
08 <i>b_{γn}</i> = .008	
30 <i>b_{γn}</i> = .030	
60 <i>b_{γn}</i> = .060	
80 <i>b_{γn}</i> = .080	

Para obtener más información, consultar los códigos en la página A76

11 Ángulo de chafilán	
	<i>γ_n</i>
	15 <i>γ_n</i> = 15°
	20 <i>γ_n</i> = 20°

12 Opción del fabricante	
El código ISO está compuesto por nueve símbolos incluyendo 8 y 9 que se utilizan solamente cuando es necesario. Además, el fabricante puede añadir otros tres, p. ej.:	WF = Wiper – acabado - WMX = Wiper, mecanizado medio - PF = ISO P – acabado PR = ISO P – desbaste

Figura 48: Significado siglas del inserto






<p>P</p>  <p>Steel</p>	<p>M</p>  <p>Stainless steel</p>	<p>K</p>  <p>Cast iron</p>	<p>O</p>  <p>Non ISO</p>
<p>N</p>  <p>Non-ferrous metal</p>	<p>S</p>  <p>Super-alloys and titanium</p>	<p>H</p>  <p>Hard material</p>	

Figura 49: Materiales ISO

Fuente [4]

ANEXO II

Resultados de esfuerzo equivalente (Von Mises)

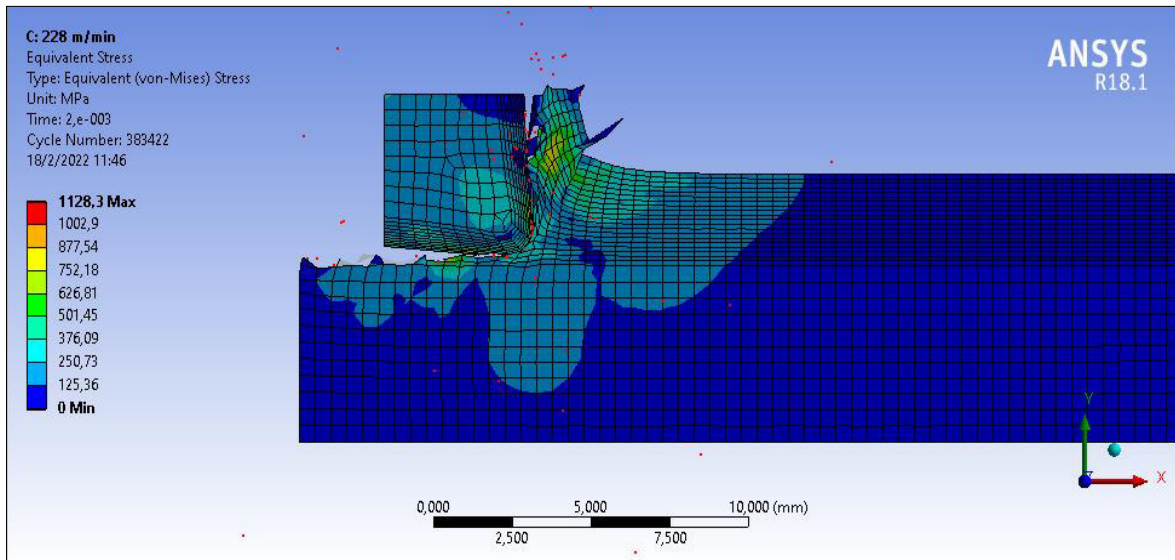


Figura 50: Esfuerzo equivalente v=228 m/min

Fuente[propia]

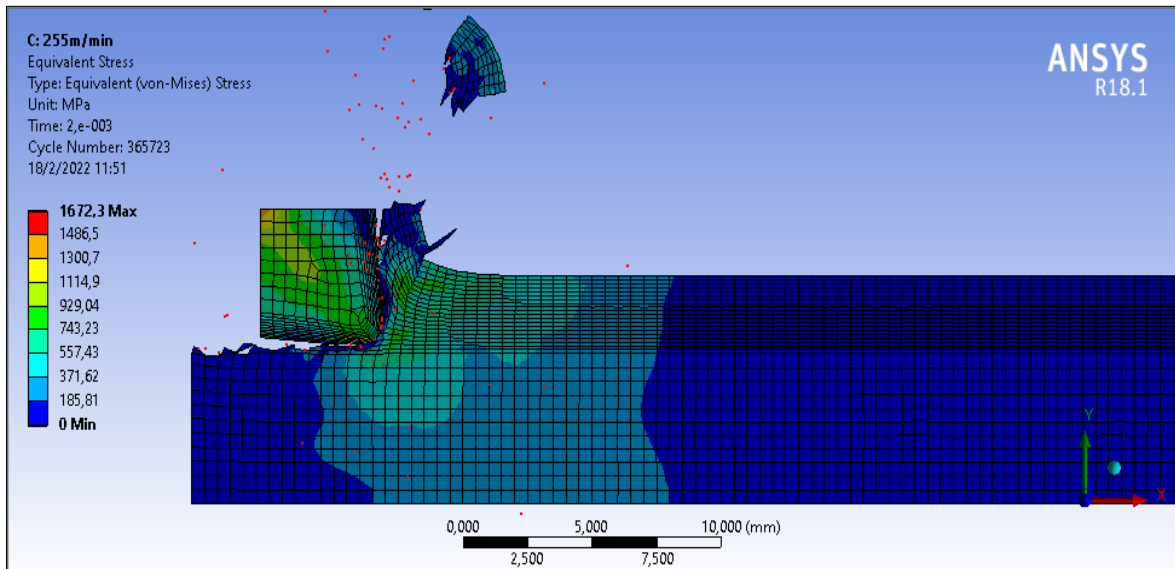


Figura 51: Esfuerzo equivalente v=255m/min

Fuente [Propia]

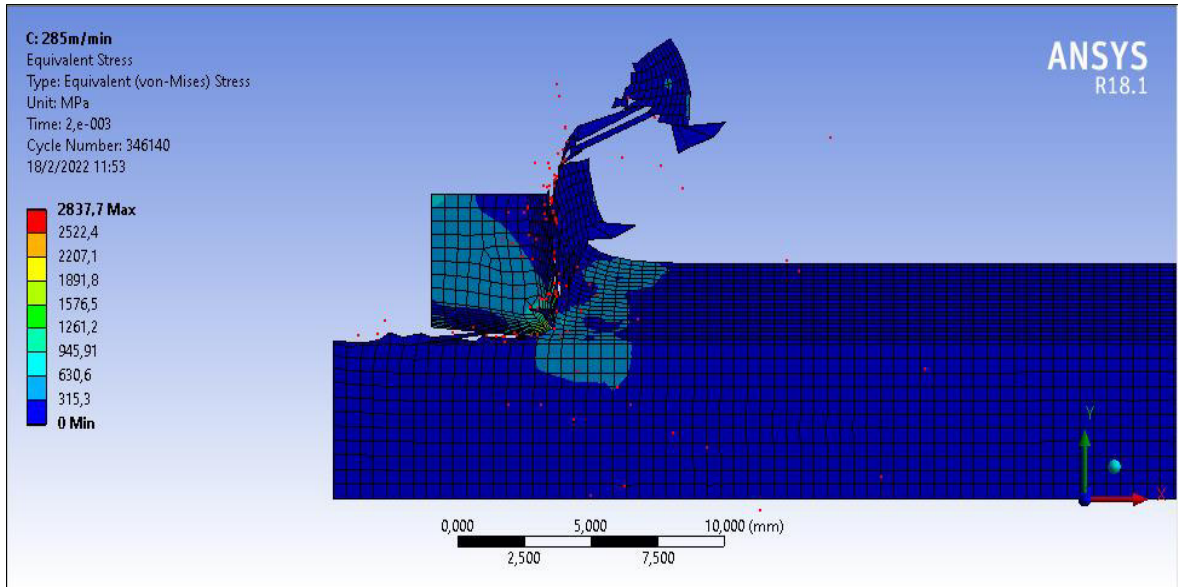


Figura 52:Esfuerzo equivalente v=285m/min

Fuente [Propia]

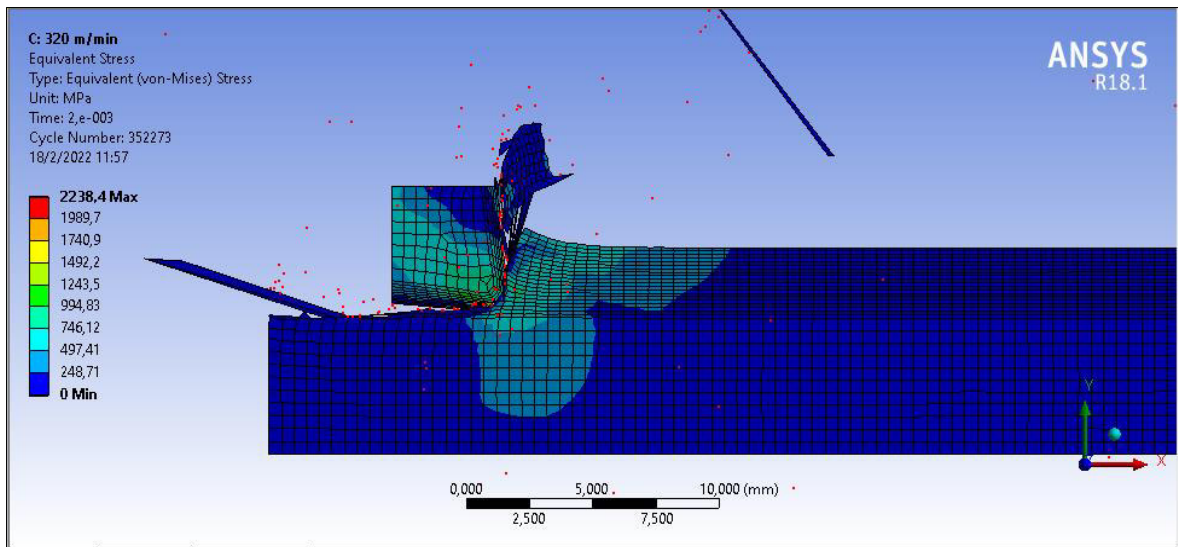


Figura 53:Esfuerzo equivalente v=320m/min

Fuente [Propia]

Resultados de deformación total

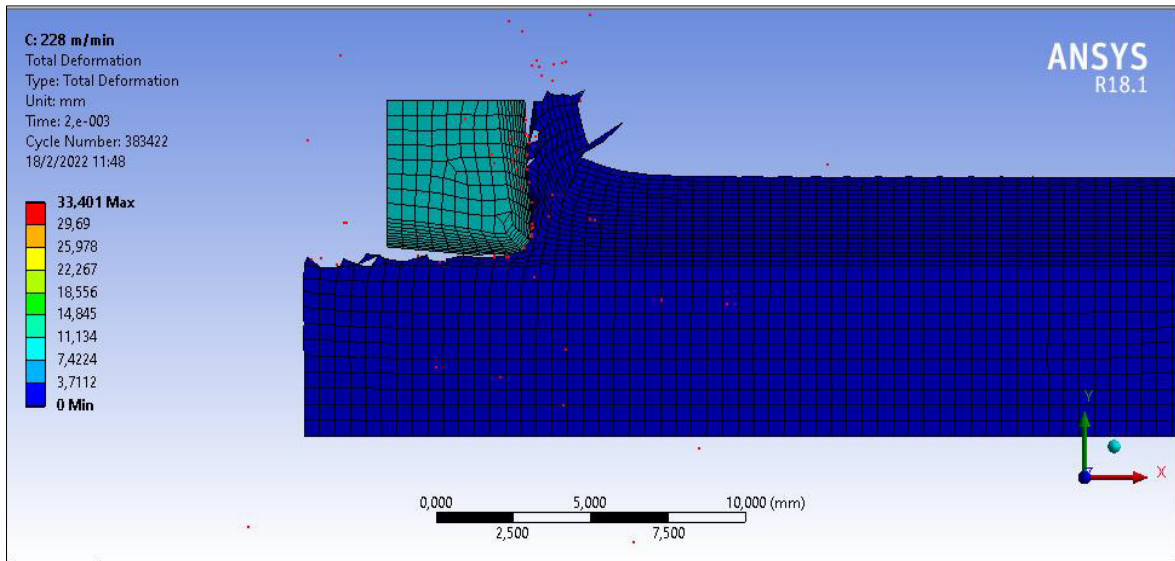


Figura 54: Deformación Total v=228m/min

Fuente [Propia]

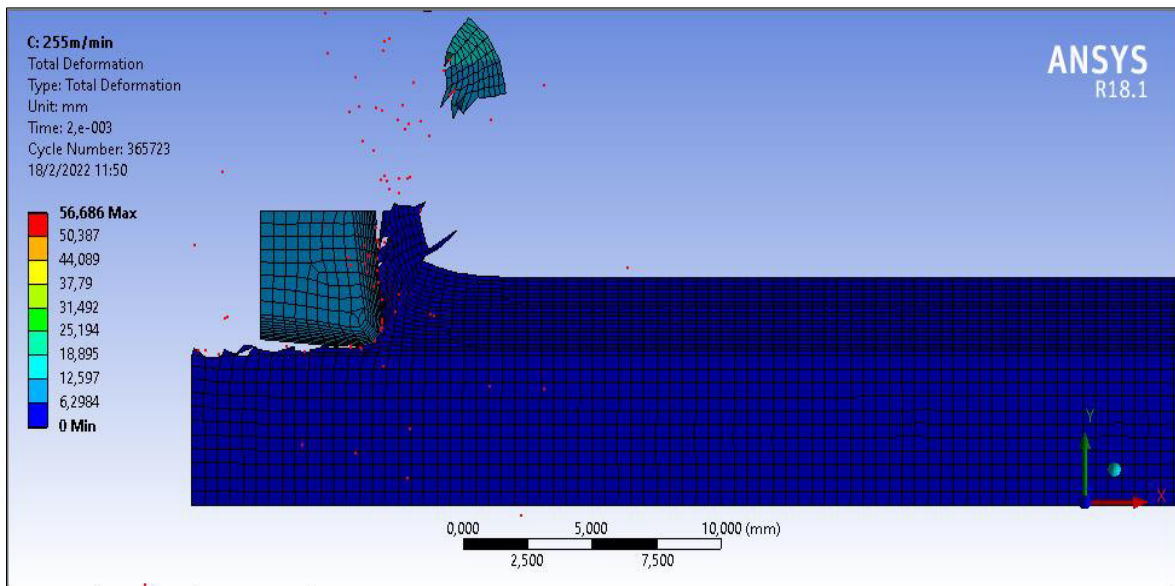


Figura 55: Deformación Total v=255m/min

Fuente [Propia]

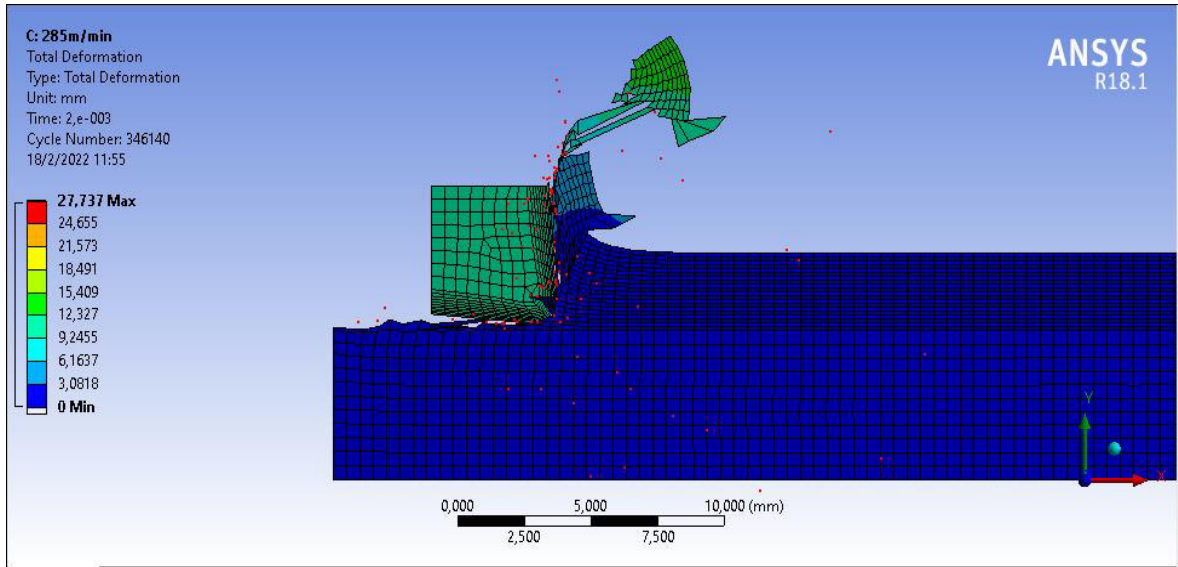


Figura 56: Deformación Total v=285m/min

Fuente [Propia]

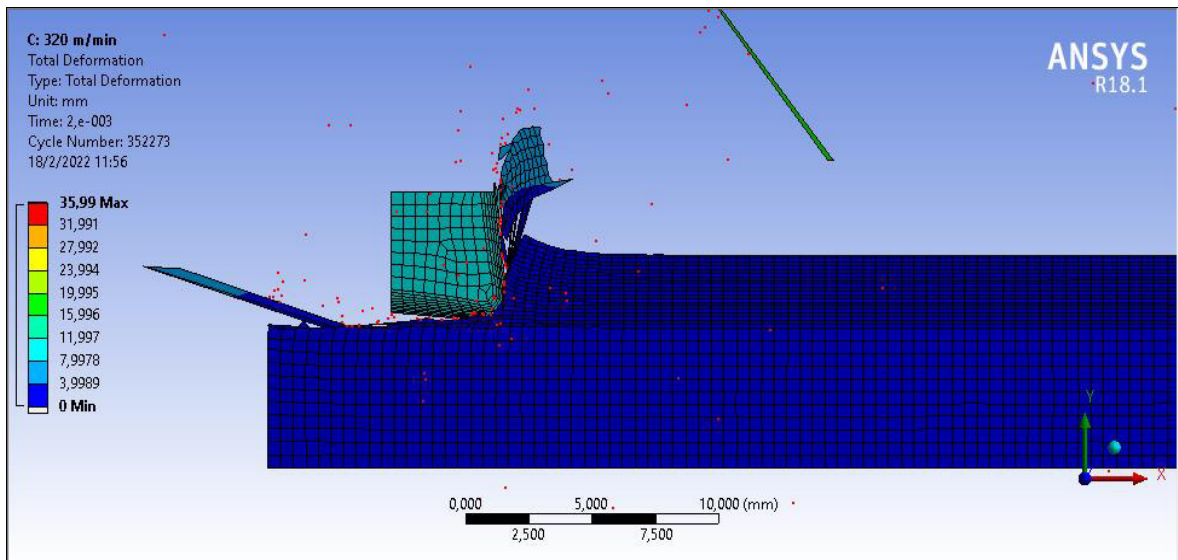


Figura 57: Deformación Total v=320 m/min

Fuente: [Propia]