



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LIMADO ORTOGONAL DEL ACERO ASTM A-36 MEDIANTE UN MODELO NUMÉRICO Y SU VALIDACIÓN

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

**ALVARO SIMBAÑA HENRY DAVID**  
henry.alvaro@epn.edu.ec

**GONZÁLEZ ULCUANGO DAVID EDUARDO**  
david.gonzalez@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. SARMIENTO BORJA EDGAR FERNANDO, M.Sc.**  
edgar.sarmiento@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR: ING. CESÉN ARTEAGA MARIO ALBERTO, M.Sc.**  
mario.cesen@epn.edu.ec

Quito, Octubre de 2021

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alvaro Simbaña Henry David y González Ulcuango David Eduardo.

---

Ing. Edgar Sarmiento M.Sc.  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Ing. Mario Cesén M.Sc.  
**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Henry David Alvaro Simbaña y David Eduardo González Ulcuango**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra 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.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Henry David Alvaro Simbaña

---

David Eduardo González Ulcuango

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres Martín y Rosa, quienes han sido mi sustento y a lo largo de los años me han brindado el apoyo y ánimo necesario para seguir adelante y lograr mis metas. A mis hermanos Sebastián y Diego por su apoyo incondicional. A Aracely quien ha estado pendiente del progreso de este trabajo e incluso antes cuando aún cursaba mis materias y me brindó la ayuda, cariño, ánimos y todo lo que su noble corazón es capaz de entregar. A mis amigos y compañeros que creyeron en mí y me han alentado a continuar, entre ellos destaco a Henry, John y Cristhian.

Henry David Alvaro Simbaña

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo escrito a mis padres Wilson y Virginia, quienes estuvieron presentes en todo el proceso y trayecto de vida universitaria, brindándome todo su apoyo para poder conseguir este, una de mis metas más importantes en mi vida.

David Eduardo González Ulcuango

## **AGRADECIMIENTO**

Un profundo agradecimiento al Ing. Edgar Sarmiento M.Sc. quien nos ha ayudado en todas las inquietudes de este trabajo con la paciencia y comprensión propias de un honorable profesor entregado a su profesión. A todos los docentes a lo largo de mi vida universitaria quienes se encargaron de inculcarme sus conocimientos y hacer que ame la carrera en la que me especializo, así como a su personal administrativo quienes me ayudaron con mis dudas con la mayor cordialidad.

Henry David Alvaro Simbaña

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres y mi hermana que me dieron el apoyo incondicional y la confianza necesaria para siempre seguir luchando.

A todos mis amigos: Alexis, Alex, Bryan, Joseth, Stefy, Salo, Danilo, Valeria+, Lucho, Tío David y en especial al Chino y Kelly que en uno que otro fin de semana lograron desestresarme y apoyarme en mi vida universitaria dando consejos y siendo aconsejado por lo abrumadora que muchas veces fue; en las grandes recepciones Danilo.

En la universidad agradezco a cada uno de los compañeros, maestros y todo aquel que estuvieron conmigo en esta trayectoria con días buenos y malos que nos enseñaron mucho y se apreciaba tanto la sinceridad con la que compartimos todo. Al grupo de los babacos con quienes comenzamos este camino universitario: Luis, Bryan C., Fer, Fer Colla, Lupita, Santiago, Iveth esas grandes amistades que agradezco hayan perdurado desde el inicio de la carrera.

A los mijines: Teo, Joss, Kevin, Kari, Jessy, Josue, Xavier, con quienes tuvimos muchas clases conjuntamente e hizo que la cooperación en las mismas sea mucho más fácil el camino por la vida universitaria y las giras a montaña.

A nuestro apreciado director del proyecto, Ing. Edgar Sarmiento M. Sc, por brindarnos la oportunidad de participar en este proyecto que, a pesar del momento tan difícil que fue realizar una tesis en plena pandemia nos supo apoyar con todos sus conocimientos y ayudar a superar los obstáculos difíciles que aparecieron en el camino.

Y finalmente, a la persona con la que ha estado conmigo desde el inicio de mi carrera universitaria y ahora al final de la misma, que con los tantos problemas que han aparecido me da brindando todo su apoyo, tiempo y amor. Anita muchas gracias por caminar conmigo y luchar a mi lado.

David Eduardo González Ulcuango

# Índice de Contenidos

|   |            |
|---|------------|
| <b>RESUMEN</b> .....                                      | <b>XV</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                     | <b>XVI</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                                 | <b>1</b>   |
| Pregunta de Investigación .....                           | 2          |
| Objetivo general .....                                    | 2          |
| Objetivos específicos.....                                | 2          |
| <b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....                             | <b>3</b>   |
| 1.1 Proceso de mecanizado por arranque de viruta.....     | 3          |
| 1.1.1 Fundamentos del arranque de viruta .....            | 3          |
| 1.1.2 Movimientos de arranque de viruta .....             | 4          |
| 1.1.3 Parámetros de corte de la limadora .....            | 7          |
| 1.1.4 Viruta.....   | 11         |
| 1.2 Modelo de corte ortogonal.....                        | 14         |
| 1.2.1 Ángulos de la herramienta de corte .....            | 14         |
| 1.2.2 Fuerzas en el corte ortogonal.....                  | 16         |
| 1.2.3 Aproximación al torneado por corte ortogonal .....  | 18         |
| 1.2.4 Cálculo analítico .....                             | 19         |
| 1.3 Materiales .....                                      | 20         |
| 1.3.1 Acero ASTM A-36.....                                | 20         |
| 1.3.2 Herramientas de corte .....                         | 21         |
| 1.4 Modelos de comportamiento viruta-herramienta .....    | 24         |
| 1.4.1 Modelo de Johnson-Cook.....                         | 26         |
| 1.4.2 Ley de daño de Johnson-Cook .....                   | 28         |
| 1.5 Método de elementos finitos .....                     | 29         |
| 1.5.1 Funcionamiento del método de elementos finitos..... | 29         |
| 1.5.2 Software de elementos finitos .....                 | 31         |
| 1.5.3 Pasos para el Análisis de Elementos Finitos .....   | 32         |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 1.5.4    | Métodos de análisis en elementos finitos .....   | 32        |
| 1.5.5    | Dinámica Explícita en ANSYS (Explicit Dynamics) .....                                    | 33        |
| 1.5.6    | Aproximación, error y convergencia .....   | 34        |
| <b>2</b> | <b>METODOLOGÍA .....</b>   | <b>37</b> |
| 2.1      | Modelo numérico .....  | 39        |
| 2.1.1    | Geometría y ángulos de la herramienta .....  | 39        |
| 2.1.2    | Propiedades del material y ecuaciones constitutivas del modelo numérico .....            | 40        |
| 2.1.3    | Mallado del modelo .....   | 41        |
| 2.1.4    | Condiciones de contorno .....  | 41        |
| 2.2      | Simulación de proceso de mecanizado para validación .....                                | 42        |
| 2.2.1    | Geometría y Ángulos de corte .....   | 43        |
| 2.2.2    | Datos de material .....  | 44        |
| 2.2.3    | Mallado del modelo .....   | 46        |
| 2.2.4    | Modelo numérico .....  | 48        |
| 2.2.5    | Resultados .....   | 50        |
| 2.3      | Simulación del proceso de mecanizado por corte ortogonal para el acero<br>ASTM-A36 ..... | 52        |
| 2.3.1    | Geometría y Ángulos de corte .....   | 53        |
| 2.3.2    | Datos de material .....  | 54        |
| 2.3.3    | Mallado del modelo .....   | 57        |
| 2.3.4    | Modelo numérico .....  | 57        |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>60</b> |
| 3.1.1    | Esfuerzos equivalentes .....   | 60        |
| 3.1.2    | Fuerzas de corte .....   | 65        |
| 3.1.3    | Deformación plástica .....   | 68        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>71</b> |
| 4.1      | Conclusiones .....   | 71        |
| 4.2      | Trabajos futuros .....   | 72        |
|          | <b>Referencias Bibliográficas .....</b>  | <b>74</b> |

|   |    |
|---|----|
| <b>Anexos</b> .....   | 76 |
| ANEXO I Resultados de fuerza de corte de simulación con el Acero ASTM A-36.....                           | 76 |
| ANEXO II Resultados de esfuerzos equivalentes de simulación con el acero ASTM<br>A-36.....                | 80 |
| ANEXO III Resultados de deformación plástica equivalente de la simulación con el acero<br>ASTM A-36 ..... | 86 |
| ANEXO IV Velocidades de corte utilizadas para torno en diferentes materiales .....                        | 92 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 Máquina Herramienta Limadora .....   | 4  |
| Figura 1.2 a) Movimiento en el limado. b) Movimiento en el torneado. c) Movimiento en el fresado. d) Movimiento en el taladrado.....      | 5  |
| Figura 1.3 Movimientos de corte en un proceso de limado.....  | 6  |
| Figura 1.4 Gráfico para ajuste de la Velocidad de Corte en [m/min] de una Limadora. ....  | 8  |
| Figura 1.5 Avance de una Limadora. ....   | 9  |
| Figura 1.6 Geometrías de la viruta en función del Avance vs. Velocidad de Corte en un proceso de torneado.....                            | 10 |
| Figura 1.7 Geometrías de la viruta en función del Avance vs. Profundidad de corte en el proceso de torneado.....                          | 11 |
| Figura 1.8 Clasificación de tipos de virutas. a) Discontinuo. b) Continua. c) Continua con acumulación en el borde. d) Dentada .....      | 13 |
| Figura 1.9 Eficiencia de una limadora.....  | 19 |
| Figura 1.10 Gráfica Temperatura vs. Dureza Rockwell HRC en diferentes materiales. ....  | 22 |
| Figura 1.11 Influencia del aumento de la temperatura y la velocidad de deformación en la tensión. ....                                    | 27 |
| Figura 1.12 Procedimiento para llevar a cabo el método de los elementos finitos (FEM).....  | 30 |
| Figura 1.13 Aplicaciones de Dinámica Explícita. ....  | 34 |
| Figura 1.14 Representación gráfica de las relaciones entre el error de redondeo y el error de truncamiento.....                           | 35 |
| Figura 2.1 Metodología para el desarrollo del estudio.....  | 38 |
| Figura 2.2 Modelo de simulación usado en un corte ortogonal y sus condiciones de contorno.....  | 42 |
| Figura 2.3 Dimensiones de la pieza de trabajo.....  | 43 |
| Figura 2.4 Dimensiones de la herramienta de corte. Ángulos de corte. Dimensión de corte. ....   | 43 |
| Figura 2.5 Modelo de la pieza de trabajo y la herramienta de corte. ....  | 44 |
| Figura 2.6 Propiedades del material ACERO AISI 4340, constantes de material de Johnson y Cook y constantes de daño de Johnson y Cook..... | 46 |
| Figura 2.7 Calidad ortogonal del mallado .....  | 47 |
| Figura 2.8 Modelo 3D de malla generada de la pieza de trabajo y la herramienta de corte. ....   | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.9 Diagrama de componentes utilizados para la simulación de Dinámica Explícita en ANSYS.....   | 48 |
| Figura 2.10 Superficies fijas de la pieza de trabajo en el proceso de simulación.....  | 48 |
| Figura 2.11 Superficies sin desplazamiento en el eje Y en la pieza de trabajo en el modelo 3D. a)Perfil izquierdo. b) Perfil derecho.....  | 49 |
| Figura 2.12 Dirección de la velocidad en la herramienta de corte.....  | 50 |
| Figura 2.13 Modelo 3D del proceso de corte a los 0,0002 [s].....   | 50 |
| Figura 2.14 Gráfica Tiempo vs. Fuerza de corte en el proceso de simulación de validación.....  | 51 |
| Figura 2.15 Dimensiones de la pieza de trabajo.....  | 53 |
| Figura 2.16 Dimensiones de la herramienta de corte. Ángulos de corte. Dimensiones de corte.....  | 53 |
| Figura 2.17 Modelos 2D de la pieza de trabajo y la herramienta de corte<br>a) Profundidad de corte 0,1[mm]. b) Profundidad de corte 0,2[mm]. c) Profundidad de corte 0,4[mm] d) Profundidad de corte 0,8[mm]. .....                    | 54 |
| Figura 2.18 Propiedades del material ACERO A 36, constantes de material de Johnson y Cook y constantes de daño de Johnson y Cook.....  | 56 |
| Figura 2.19 Modelos 2D de la malla generada en la pieza de trabajo y la herramienta de corte. a) Profundidad de corte 0,1[mm]. b) Profundidad de corte 0,2[mm]. c) Profundidad de corte 0,4[mm] d) Profundidad de corte 0,8[mm]. ..... | 57 |
| Figura 2.20 Diagrama de componentes utilizados para la simulación de Dinámica Explícita en ANSYS.....  | 58 |
| Figura 2.21 Superficies fijas de la pieza de trabajo en el proceso de simulación.....  | 58 |
| Figura 2.22 Superficies sin desplazamiento en el eje Z en la pieza de trabajo en el modelo 3D. a)Perfil izquierdo. b) Perfil derecho.....  | 59 |
| Figura 3.1 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a varias velocidades de corte y $e=0.4$ [mm].....  | 60 |
| Figura 3.2 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a varias profundidades de corte y $V_c=200$ [m/min].....   | 61 |
| Figura 3.3 Esfuerzo Equivalente 2D. $V_c=200$ [m/min]. $e=0.4$ [mm] .....  | 62 |
| Figura 3.4 Esfuerzo Equivalente ISO. $V_c=200$ [m/min]. $e=0.4$ [mm].....  | 62 |
| Figura 3.5 Fuerzas de corte variando la profundidad de corte y manteniendo la velocidad de corte constante.....  | 66 |
| Figura 3.6 Fuerzas de corte variando la velocidad de corte y manteniendo la Profundidad de corte constante.....  | 66 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.7 Tendencia de las fuerzas de corte a aumentar por efecto del aumento de la profundidad de corte. (Fuente: [Propia]) ..... | 67 |
| Figura 3.8 Representación gráfica de las potencias obtenidas .....  | 68 |
| Figura 3.9 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a varias velocidades de corte y $e=0.4[\text{mm}]$ .....                      | 69 |
| Figura 3.10 Gráfica de Deformación Elástica vs. Tiempo a varias profundidades de corte y $V_c=0.4[\text{mm}]$ . .....               | 69 |
| Figura 3.11 Deformación Plástica promedio 2D. $V_c=200[\text{m/min}]$ . $e=0.4[\text{mm}]$ . .....                                  | 70 |
| Figura 3.12 Deformación Plástica promedio ISO. $V_c=200[\text{m/min}]$ . $e=0.4[\text{mm}]$ . .....                                 | 70 |
| Figura A1.1 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y $e=0.1[\text{mm}]$ .....                                      | 76 |
| Figura A1.2 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y $e=0.2[\text{mm}]$ . .....                                    | 76 |
| Figura A1.3 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y $e=0.4[\text{mm}]$ . .....                                    | 77 |
| Figura A1.4 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y $e=0.8[\text{mm}]$ . .....                                    | 77 |
| Figura A1.5 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y $V_c=170[\text{m/min}]$ .....                               | 78 |
| Figura A1.6 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y $V_c=200[\text{m/min}]$ .....                               | 78 |
| Figura A1.7 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y $V_c=236[\text{m/min}]$ .....                               | 79 |
| Figura A1.8 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y $V_c=280[\text{m/min}]$ .....                               | 79 |
| Figura A2.1 Gráfica de esfuerzo equivalente a $t=0.00015[\text{s}]$ y $e=0.1[\text{mm}]$ .a) 2D.<br>b) ISO .....                    | 80 |
| Figura A2.2 Gráfica de esfuerzo equivalente a $t=0.00015[\text{s}]$ y $e=0.2[\text{mm}]$ .a) 2D.<br>b) ISO.....                     | 80 |
| Figura A2.3 Gráfica de esfuerzo equivalente a $t=0.00015[\text{s}]$ y $e=0.4[\text{mm}]$ .a) 2D.<br>b) ISO.....                     | 81 |
| Figura A2.4 Gráfica de esfuerzo equivalente a $t=0.00015[\text{s}]$ y $e=0.8[\text{mm}]$ .a) 2D.<br>b) ISO.....                     | 81 |
| Figura A2.5 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.1[\text{mm}]$ .....                 | 82 |
| Figura A2.6 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.2[\text{mm}]$ .....                 | 82 |
| Figura A2.7 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.4[\text{mm}]$ .....                 | 83 |

|   |    |
|---|----|
| Figura A2.8 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.8$ [mm].          | 83 |
| Figura A2.9 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=170$ [m/min].   | 84 |
| Figura A2.10 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=200$ [m/min].  | 84 |
| Figura A2.11 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=236$ [m/min].  | 85 |
| Figura A2.12 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=280$ [m/min].  | 85 |
| Figura A3. 1 Gráfica de deformación plástica a $t=0.00015$ [s] y $a=0.1$ [mm].a) 2D.<br>b) ISO.                   | 86 |
| Figura A3. 2 Gráfica de deformación elástica a $t=0.00015$ [s] y $a=0.2$ [mm].a) 2D.<br>b) ISO.                   | 86 |
| Figura A3. 3 Gráfica de deformación elástica a $t=0.00015$ [s] y $a=0.4$ [mm].a) 2D.<br>b) ISO.                   | 87 |
| Figura A3. 4 Gráfica de deformación elástica a $t=0.00015$ [s] y $a=0.8$ [mm].a) 2D.<br>b) ISO.                   | 87 |
| Figura A3. 5 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.1$ [mm].         | 88 |
| Figura A3. 6 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.2$ [mm].         | 88 |
| Figura A3. 7 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.4$ [mm].         | 89 |
| Figura A3. 8 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y $e=0.8$ [mm].         | 89 |
| Figura A3. 9 Gráfica de Deformación Elástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=170$ [m/min].  | 90 |
| Figura A3. 10 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=200$ [m/min]. | 90 |
| Figura A3. 11 Gráfica de Deformación Elástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=236$ [m/min]. | 91 |
| Figura A3. 12 Gráfica de Deformación Elástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y $V_c=280$ [m/min]. | 91 |
| Figura A4. 2 Velocidad de corte para diferentes materiales en un torno.   | 92 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.1 Variaciones de la pieza a través de la práctica del proceso. ....                                     | 4  |
| Tabla 1.2 Movimientos de las máquinas herramientas .....  | 6  |
| Tabla 1.3 Tabla de velocidades de corte resumida para torno. ....   | 7  |
| Tabla 1.4 Intervalo de velocidad según el material para limadora. ....  | 8  |
| Tabla 1.5 Condiciones de los ángulos formados por la viruta.....  | 15 |
| Tabla 1.6 Clave de conversión: operación de torneado contra corte ortogonal .....                               | 18 |
| Tabla 1.7 Eficiencia de una limadora .....  | 20 |
| Tabla 1.8 Propiedades del Acero ASTM A-36.....  | 21 |
| Tabla 1.9 Composiciones típicas de aceros rápidos T.....  | 23 |
| Tabla 1.10 Composiciones típicas de aceros rápidos tipo M .....   | 23 |
| Tabla 2.1 Propiedades utilizadas para la simulación del proceso de corte. ....                                  | 40 |
| Tabla 2.2 Propiedades del acero AISI 4340 .....   | 45 |
| Tabla 2.3 Materiales y su comportamiento en la simulación.....  | 48 |
| Tabla 2.4 Valores de Fuerza de corte y Errores porcentuales. ....   | 51 |
| Tabla 2.5 Velocidades y Profundidades de corte utilizadas. ....   | 52 |
| Tabla 2.6 Propiedades del acero ASTM A-36 .....   | 55 |
| Tabla 2.7 Materiales y comportamiento en la simulación.....   | 58 |
| Tabla 3.1 Valores de esfuerzos equivalentes promedios de las simulaciones<br>realizadas.. .....                 | 60 |
| Tabla 3.2 Esfuerzo equivalente analítico ( $\sigma_{AB}$ ) para cada uno de los casos simulados....             | 64 |
| Tabla 3.3 Error porcentual de los esfuerzos equivalentes obtenidos por calculo analítico<br>por simulación..... | 65 |
| Tabla 3.4 Fuerza de corte promedio de las simulaciones .....  | 66 |
| Tabla 3.5 Valores obtenidos de potencia en las simulaciones.....  | 67 |
| Tabla 3.6 Valores de Deformación plástica promedio de las simulaciones realizadas .....                         | 68 |

## RESUMEN

El mecanizado es un proceso que transforma un material en bruto o productos semielaborados, en elementos con geometría definida mediante el conformado de los materiales ya sea por arranque, deformación o adhesión. Por lo que se refiere al conformado por arranque de viruta, para la industria es importante la optimización de este proceso con el fin de obtener la mayor cantidad de piezas maquinadas al menor costo y en menor tiempo. Los métodos tradicionales para obtener los parámetros de corte correctos son muy costosos, entonces, como respuesta a este problema se han creado modelos numéricos que utilizan el método de elementos finitos junto con el conocimiento de las propiedades mecánicas y físicas del material ayudando a predecir satisfactoriamente un conformado por arranque de viruta real.

El presente trabajo tiene como objetivo la evaluación de diferentes alternativas de corte ortogonal para un proceso de limado usando el método de elementos finitos por medio del software ANSYS Explicit Dynamics. La investigación inició buscando procedimientos anteriores para usarlos como base en este proyecto, se validó el procedimiento de simulación con una investigación similar realizada por Krishnakumar [1]. Usando el método establecido y validado de manera correcta, se procedió a determinar la fuerza de corte, esfuerzo equivalente, deformación elástica y deformación plástica con un total de 16 simulaciones con diferentes configuraciones de velocidad de corte y profundidad de corte, para un corte ortogonal en un acero ASTM A-36. Finalmente, se realizó el análisis y la comparación de todos los resultados, encontrando los parámetros adecuados para que el corte ortogonal se lleve a cabo en cada condición evaluada.

**Palabras clave:** Elementos finitos, simulación, corte ortogonal, mecanizado, Jhonson y Cook.



## ABSTRACT

Machining is a process that transforms a raw material into an element with defined geometry by chip detachment, for the industry is important the optimization of this process in order to obtain most machined parts at the lowest cost and in less time. Traditional methods for obtaining the correct cutting parameters are very expensive, so in response to this problem numerical models have been created that use the finite element method along with knowledge of the mechanical and physical properties of the material helping to simulate a real machining process.

This work aims to assess different orthogonal cutting alternatives for a shaping process using the finite element method using the ANSYS Explicit Dynamics software. The investigation began by looking for previous procedures to use as the basis for this project, the simulation procedure was validated with similar research Krishnakumar [1]. Using the correctly established and validated method, the cutting force, equivalent stress, elastic deformation and plastic deformation were determined with a total of 16 simulations with different cutting speed, depth of cut configurations for orthogonal cutting in an ASTM A-36 steel. Finally, an analysis and comparison of all results was performed finding the appropriate parameters for an orthogonal cut to be carried out in each condition evaluated.

**Keywords:** finite element, simulation, orthogonal cutting, machining, Johnson and Cook.

# **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LIMADO ORTOGONAL DEL ACERO ASTM A-36 MEDIANTE UN MODELO NUMÉRICO Y SU VALIDACIÓN**

## **INTRODUCCIÓN**

La optimización de procesos productivos ha tomado gran fuerza en las empresas con el fin de ganar ventaja sobre su competencia, la ingeniería mecánica está fuertemente relacionada con varios procesos productivos importantes, uno de ellos es el conformado por arranque de viruta. Mejorar los procesos productivos en este tipo de mecanizado toma varios significados como son el estudio de los materiales usados en las herramientas de corte, automatización de las máquinas herramientas, selección correcta de los parámetros de corte para cada material, etc.

El presente estudio centra sus investigaciones en el método de selección de los parámetros de corte, tradicionalmente estos parámetros eran determinados por el método prueba y error, es decir, se maquinaban materiales a distintas condiciones y según el resultado final se determinaba si los parámetros escogidos eran beneficiosos o contraproducentes para el maquinado. Sin embargo, para la realización de este tipo de mejoras, la vía más común son los ensayos experimentales que terminan siendo un gasto excesivo de dinero, tiempo y desgaste de las máquinas.

Actualmente, en respuesta a los inconvenientes del método prueba y error en el proceso de este tipo de mecanizado se realizan simulaciones utilizando el método de los elementos finitos, la simulación predice el comportamiento de un material sometido a corte sin utilizar el material estudiado, es decir, tan solo necesita de sus propiedades físicas, un modelo matemático, definición de las condiciones de frontera y un procesamiento computacional capaz de realizar los cálculos necesarios; los actuales software que utilizan el método de elementos finitos ofrecen la ventaja de valorar diferentes escenarios para un mismo proceso, en base a esto obtener los mejores resultados y considerarlos para aplicarlos en la industria.

Uno de los procesos por arranque de viruta más básicos y fáciles de entender es el limado mecánico utilizando una máquina herramienta, debido a que utiliza el corte ortogonal que es considerado como la base para la existencia de mecanizados por arranque de viruta más complejos y a su vez una simplificación de los mismos.

Definir un modelo numérico de corte ortogonal es un gran aporte para predecir el comportamiento de la interacción herramienta-pieza, y así determinar mejores parámetros de corte, maximizar la producción de viruta con la mayor duración de las herramientas de corte y mejorar el rendimiento de las máquinas herramientas. Esta predicción ofrece una manera fácil y económica de ahorrar tiempo, dinero y material en procesos de corte por arranque de viruta. “La ejecución de simulaciones es de gran utilidad en procesos de fabricación, ya que reduce tanto los tiempos de cálculo a emplear, como el recurso a otros tipos de ensayos costosos”. [2]

## **Pregunta de Investigación**

¿Cuál es el comportamiento de un material con distintos parámetros de corte y condiciones de carga para un limado por medio de corte ortogonal?

## **Objetivo general**

Estudiar el comportamiento de limado ortogonal del acero ASTM A-36 mediante un modelo numérico y su validación

## **Objetivos específicos**

- Recopilar información sobre los modelos numéricos usados para la simulación del proceso de mecanizado de limado ortogonal.
- Simular el proceso de mecanizado de limado ortogonal mediante el método de elementos finitos.
- Validar el modelo numérico del limado ortogonal con información del estado del arte.
- Analizar y discutir los resultados.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Proceso de mecanizado por arranque de viruta

### 1.1.1 Fundamentos del arranque de viruta

En la industria el material que se desprende de una pieza se denomina viruta la cual es removida por máquinas-herramientas como el torno, la fresadora, la limadora, el taladro, etc., su forma va a depender de muchas variables como el tipo de mecanizado, las propiedades de la pieza, el material y la forma de la herramienta implementada, el ángulo de la herramienta con respecto al material, la profundidad de corte, la velocidad de corte, etc. La selección correcta de los parámetros ofrecerá a la viruta una forma que no interfiera con el proceso de trabajo, es decir, que no sea larga y se acumule en la zona de trabajo de la máquina.

El mecanizado es una actividad indispensable en la industria, razón por la cual, se hace un esfuerzo en la constante optimización de los procesos que conllevan esta actividad. Se trabaja en mejores máquinas con características favorables a obtener resultados finales que cumplan con estándares de calidad y ocupando menos recursos.

El acabado superficial de una pieza maquinada juega un papel muy importante, dado que, un mal acabado podría representar concentradores de esfuerzos en la pieza reduciendo su vida útil lo que hace necesario que la viruta que sale del material deba presentar las mejores características que sólo se dan aplicando las mejores condiciones de trabajo, condiciones que se buscan determinar en este trabajo con la ayuda de herramientas tecnológicas y modelos matemáticos que sustituirá al método tradicional de prueba y error que requieren un mayor gasto de tiempo y recursos.

#### 1.1.1.1. Elementos en un proceso de mecanizado por arranque de viruta

Todo proceso de corte se conforma por tres partes que son:

**Herramienta.** - Se define como el elemento material con una o varias aristas o filos. Por medio de su llamada cara de incidencia, en contacto con la superficie a mecanizarse del material y por último la cara de desprendimiento, permite el desprendimiento del material llamado viruta.

Hay dos tipos de herramientas, las herramientas enterizas en las que el 100% de su volumen es del mismo material y las herramientas de plaquitas o insertos cuando existe más de un material, generalmente, el material diferente está en la parte activa y son unidas

por medio de fijación mecánica por tornillos, bridas o fijación por soldadura, al mango de la herramienta.

**Pieza:** Es el material que tendrá una transformación durante la ejecución del proceso. Tiene tres variaciones como se muestra en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1 Variaciones de la pieza a través de la práctica del proceso.**

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <b>Estado inicial o preforma</b> | La pieza se presenta con un sobredimensionamiento con respecto a las dimensiones finales a obtener.   |
| <b>Estado de operación</b>       | Por medio de operaciones sucesivas de la máquina herramienta sobre la pieza, se elimina el material sobrante aproximando a la geometría final. <ul style="list-style-type: none"><li>• A la mitad existe un procedimiento de desbaste.</li><li>• Al último se da el procedimiento de acabado.</li></ul> |
| <b>Estado final</b>              | La pieza se encuentra dentro de las especificaciones dimensionales de diseño.   |

(Fuente: [3])

**Máquina-Herramienta.** - Es la combinación de diferentes dispositivos que en conjunto se desplaza relativamente entre la herramienta de corte y la pieza para retirar el exceso de material sobrante en la pieza.



Figura 1.1 Máquina Herramienta Limadora  
(Fuente: [4])

### 1.1.2 Movimientos de arranque de viruta

El proceso de corte se efectúa por la acción de 3 movimientos, muchos autores los consideran como movimientos relativos para que se produzca la interacción entre pieza y la herramienta, son generados por la máquina-herramienta que da

la suficiente energía para que el proceso se lleve a cabo. Hay tres formas para conseguir estos movimientos relativos que son:

- Cuando la herramienta se encuentra en movimiento y la pieza se encuentra estática.
- Cuando la pieza se encuentra en movimiento y la herramienta se encuentra estática.
- Cuando tanto la herramienta y la pieza se encuentran en movimiento.

La figura 1.2 muestra la representación de los movimientos descritos en distintas máquinas-herramientas.

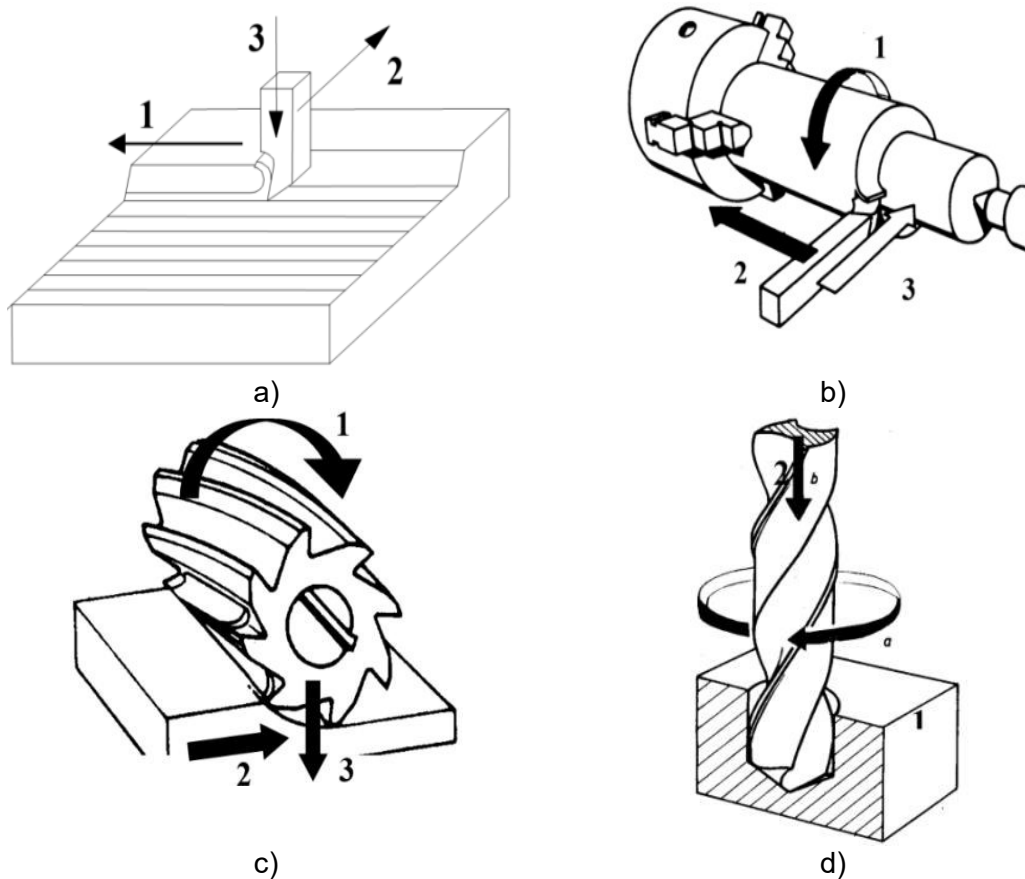


Figura 1.2 a) Movimiento en el limado. b) Movimiento en el torneado. c) Movimiento en el fresado. d) Movimiento en el taladrado.  
(Fuente: [2])

Los movimientos obtenidos son:

**Movimiento de corte ( $M_c$ ).** - Este movimiento se encarga principalmente del arranque de una sección de material o también llamada eliminación del material. Este movimiento es el que consume mayor parte de la potencia empleada por la máquina herramienta.

**Movimiento de avance ( $M_a$ ).** - En conjunto con el movimiento de corte, este movimiento se encarga del arranque continuo de material, en pocas palabras se encarga de la conducción que debe seguir la herramienta para el fin en común. [3]

**Movimiento de penetración ( $M_p$ ).** - Este movimiento determina la profundidad del corte, por ende, el espesor de la viruta que se arranca.

**Movimiento de aproximación ( $M_x$ ).** - Este movimiento no es considerado como un movimiento de corte porque la acción del movimiento no causa el arranque de material, entonces, es una mezcla de movimientos que ayuda a posicionar a la herramienta de corte para empezar con el mecanizado por arranque de viruta.

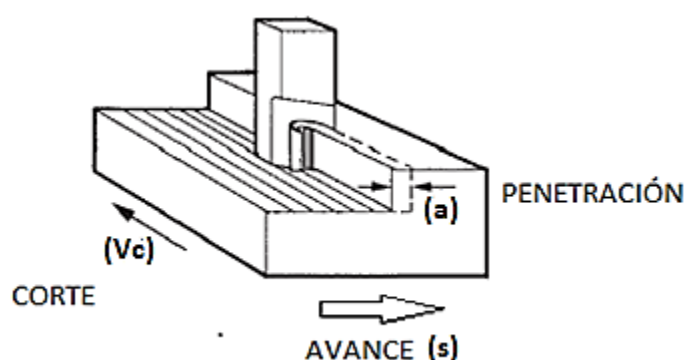


Figura 1.3 Movimientos de corte en un proceso de limado.  
(Fuente: [5])

El movimiento de corte y avance se presentan de dos formas, lineal y circular. En la tabla 1.2 se visualizan estos movimientos en las máquinas-herramientas más conocidas.

**Tabla 1.2 Movimientos de las máquinas herramientas**

| Herramienta        | Movimiento | Tipo de movimiento | Portador    |
|--------------------|------------|--------------------|-------------|
| <b>Limadora</b>    | Mc         | Lineal             | Herramienta |
|                    | Ma         | Lineal             | Pieza       |
| <b>Cepilladora</b> | Mc         | Lineal             | Pieza       |
|                    | Ma         | Lineal             | Herramienta |
| <b>Torno</b>       | Mc         | Circular           | Pieza       |
|                    | Ma         | Lineal             | Herramienta |
| <b>Fresadora</b>   | Mc         | Circular           | Herramienta |
|                    | Ma         | Lineal             | Pieza       |
| <b>Taladradora</b> | Mc         | Circular           | Herramienta |
|                    | Ma         | Lineal             | Herramienta |

(Fuente: [6])

### 1.1.3 Parámetros de corte de la limadora

Para mecanizar una pieza se necesitan de tres parámetros de corte que trabajando en conjunto permiten el desprendimiento de viruta generando un redimensionamiento de la pieza con el fin de llegar al resultado deseado. Dependiendo de la máquina-herramienta los parámetros tomarán nomenclaturas distintas, para este estudio los parámetros de corte que se detallan están en función de un avance lineal presentado en la limadora.

#### 1.1.3.1 Velocidad de corte ( $V_c$ )

En procesos que incluyen el movimiento circular de una de las partes, la herramienta de corte en el caso de una fresadora y la pieza de trabajo en el caso del torno; también, en la limadora el movimiento longitudinal entre la herramienta de corte y la pieza, la velocidad de corte es el parámetro más importante y es una velocidad lineal cuantificada en [m/min].

Las velocidades de corte varían dependiendo la máquina-herramienta, en la tabla 1.3 se observan las velocidades de corte utilizadas para el torno en aceros sin alear, cuyos valores se encuentran entre 10-280 [m/min]. El acero sin alear St 37 es el material equivalente al acero A-36, material utilizado para esta investigación. Los materiales de las herramientas de corte son: SS de acero rápido y el S1 de metal duro según DIN (Deutsches Institut für Normung). La tabla completa se observa en el Anexo IV.

**Tabla 1.3** Tabla de velocidades de corte resumida para torno.

| Material        | Herr.    | Ángulos de corte |     | Avance en [mm/rev]                      |     |     |     |     |     |
|-----------------|----------|------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |          |                  |     | 0,1                                     | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 3,2 |
|                 |          |                  |     | Velocidad de corte ( $V_c$ ) en [m/min] |     |     |     |     |     |
| Útil            | $\alpha$ | $\gamma$         |     |   |     |     |     |     |     |
| Acero sin alear | SS       | 8°               | 14° | -                                       | 60  | 45  | 34  | 25  | 19  |
|                 | S1       | 5°               | 10° | 280                                     | 236 | 200 | 170 | 67  | 56  |
| St 50, St 60    | SS       | 8°               | 14° | -                                       | 44  | 32  | 24  | 18  | 14  |
|                 | S1       | 5°               | 10° | 240                                     | 205 | 175 | 145 | 50  | 42  |
| St 70           | SS       | 8°               | 14° | -                                       | 32  | 24  | 18  | 13  | 10  |
|                 | S1       | 5°               | 10° | 200                                     | 170 | 132 | 106 | 34  | 27  |

(Fuente: [23])

Para el caso de la limadora la velocidad de corte está en función de la frecuencia del carnero (N) y la longitud de carrera ( $L_c$ ), entonces, viendo las especificaciones técnicas de la máquina se sabrá la frecuencia de trabajo y según la figura 1.4 se tendrá la longitud de carrera límite con la que se trabajará.



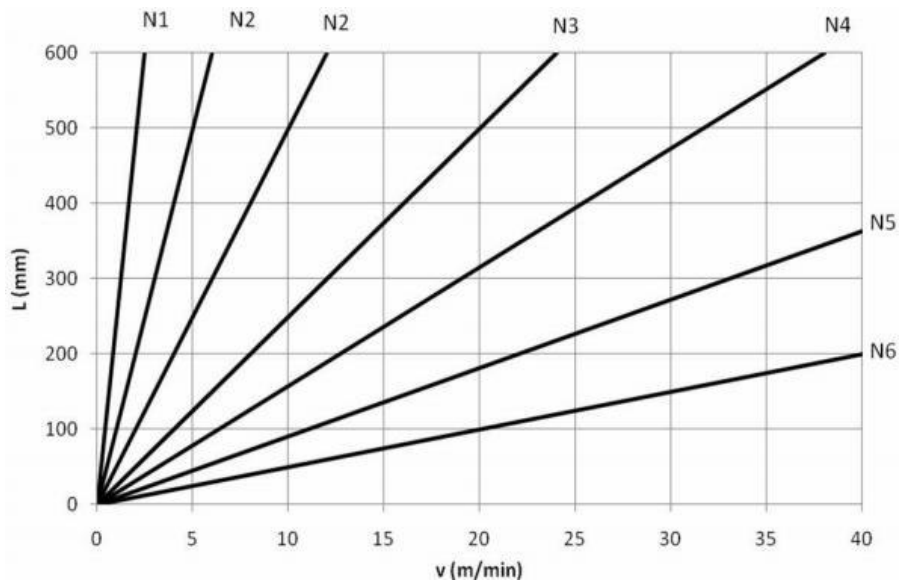


Figura 1.4 Gráfico para ajuste de la Velocidad de Corte en [m/min] de una Limadora.  
(Fuente: [3])

Finalmente, la velocidad de corte dependerá del material con el que se trabaja, en la tabla 1.4 se detalla el intervalo de velocidad según el material.

**Tabla 1.4 Intervalo de velocidad según el material para limadora.**

| MATERIAL                  | Resistencia<br>(Kgf/mm <sup>2</sup> ) | Velocidad de corte<br>(m/min) |          | Avance<br>(mm/doble<br>golpe) | Profundidad<br>de corte<br>(mm) |
|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|---------------------------------|
|                           |                                       | HSS                           | CARBUROS |                               |                                 |
| <b>Aceros laminados</b>   | 35-50                                 | 12--<br>20                    | 50-80    | 0.1-4                         | 0.2-8                           |
|                           | 55-70                                 | 8-14                          | 40-60    | 0.1-3                         | 0.2-8                           |
|                           | 75-90                                 | 6-12                          | 30-45    | 0.1-2                         | 0.2-4                           |
| <b>Aceros moldeados</b>   | 40-50                                 | 8-12                          | 30-50    | 0.2-3                         | 0.2-4                           |
|                           | 60-70                                 | 6-10                          | 15-30    | 0.2-2                         | 0.2-4                           |
|                           | Cascara<br>dura                       | 2-3                           | 5-10     | 0.32-5                        | 3-8                             |
| <b>Fundiciones grises</b> | 16-30                                 | 10-<br>20                     | 20-60    | 0.32-5                        | 0.5-8                           |
| <b>Bronce y Latón</b>     | 25-45                                 | 20-<br>60                     | 40-80    | 0.32-5                        | 0.5-8                           |
| <b>Aluminio</b>           | 35-45                                 | 40-<br>80                     | 40-80    | 0.1-1                         | 0.5-8                           |

(Fuente: [3])

Comparando la tabla 1.3 y 1.4, es evidente la diferencia de velocidades de corte utilizadas en cada máquina-herramienta.

La velocidad de corte seleccionada para el maquinado debe ser precisa tomando en cuenta la capacidad de la máquina-herramienta y el material de trabajo, las consecuencias de una mala elección de este parámetro son:

#### **Velocidad de corte muy alta**

- Desgaste rápido en la cara de incidencia de la herramienta de corte.
- Deformación plástica en la pieza de trabajo.
- Calidad y tolerancia de la superficie deficientes.

#### **Velocidad de corte baja**

- Filo de aportación en la herramienta de corte.
- Mala evacuación de la viruta.
- Excesivo tiempo de maquinado.

### **1.1.3.2 Avance (s)**

Es el movimiento encargado de que la herramienta de corte cubra toda el área de corte, dependiendo de la máquina-herramienta con la que se trabaja, esta velocidad toma distintas unidades, en el caso de una limadora se mide en [mm/carrera] aplicado a la herramienta de corte.

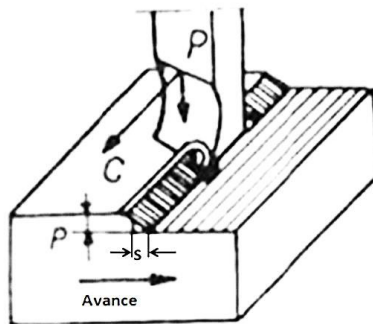


Figura 1.5 Avance de una Limadora.  
(Fuente: [4])

Al igual que la velocidad de corte y la profundidad, un mal manejo de la velocidad de avance representa distintas dificultades en el mecanizado que son:

#### **Velocidad de avance muy alta**

- Superficie resultante con alta rugosidad.
- Mayor probabilidad de rotura en la herramienta de corte.
- Altas temperaturas.
- Mayores esfuerzos por parte de la máquina-herramienta.

### Velocidad de avance baja

- Aplicable para materiales dúctiles de viruta larga.
- Mayor tiempo de maquinado y mayor costo.
- Superficie resultante de buena calidad.

La velocidad de corte y la velocidad de avance están estrechamente relacionadas a tal punto que la disminución o aumento de cualquier parámetro ofrecerá distintas geometrías a la viruta como se observa en la figura 1.6.

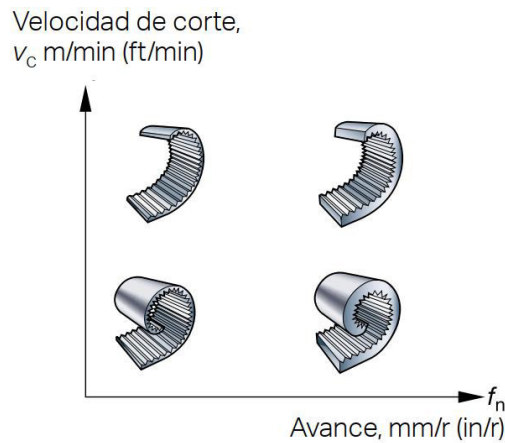


Figura 1.6 Geometrías de la viruta en función del Avance vs. Velocidad de Corte en un proceso de torneado  
(Fuente: [7])

La geometría de viruta que se genera en un proceso de torneado es muy similar a la geometría que se genera en un proceso de limado.

#### 1.1.3.3 Profundidad de corte (a)

Cada pasada del elemento de corte desprende material y la cantidad de material desprendido está en función de la profundidad a la que la herramienta de corte entra en la pieza de trabajo que normalmente es expresada en milímetros. El cálculo de este parámetro para un maquinado en superficies planas se expresa como:

$$a = E_i - E_f \quad (1.1)$$

Donde:

$E_i$  = Espesor inicial

$E_f$  = Espesor después del paso de la herramienta de corte.

La profundidad de corte por ser uno de los tres parámetros de corte afectan el rendimiento del mecanizado por lo que el valor que se usa va a tener las siguientes consecuencias:

- Un valor de profundidad alto gana una mayor tasa de remoción de material generando una reducción en el costo del mecanizado.
- Aumentar la profundidad de corte requiere de un mayor esfuerzo por parte de la máquina-herramienta, si excede en el valor se provocarán dificultades en el rendimiento y vibraciones.
- Si la pieza de trabajo tiene una dureza elevada y la profundidad de corte es excesiva, romperá la herramienta de corte.

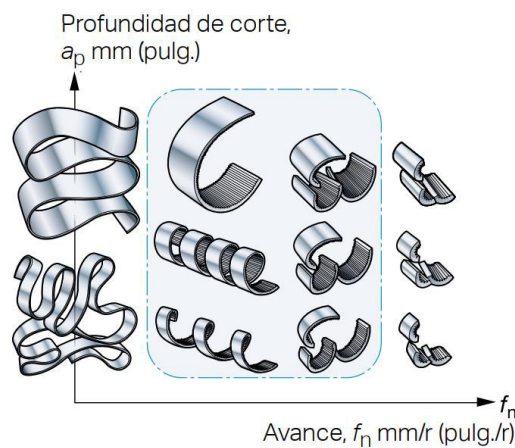


Figura 1.7 Geometrías de la viruta en función del Avance vs. Profundidad de corte en el proceso de torneado  
(Fuente: [7])

## 1.1.4 Viruta

Es un fragmento de material excedente, producto de un proceso de corte que tiene una geometría de lámina curvada o espiral. Se obtiene por medio de herramientas de corte.

En el mercado existe un sin número de herramientas de corte, por ejemplo, cuchillas de torno, cuchillas de fresadora, brocas, etc. que al momento de desbastar una superficie producen la denominada viruta. [2]

### 1.1.4.1 Mecanismo de formación de la viruta

La formación de viruta en un proceso de corte se explica mediante tres parámetros que son:

Zona primaria: En esta zona se produce la mayor deformación del proceso teniendo como consecuencia el desprendimiento de viruta y su orientación con respecto al eje horizontal da origen al ángulo de corte ( $\Phi$ ). La zona primaria es ínfima, es decir, está en el orden de

las décimas de milímetros y para el modelo de corte ortogonal el espesor de esta zona es nulo.

Zona secundaria: Esta zona es producto de la fricción entre la cara inclinada de la herramienta de corte y la superficie de la viruta desprendida. Ambas zonas se ilustran en la figura 1.8.

Material: Las propiedades del material maquinado definen las propiedades y geometría de la viruta generada. Más adelante se explica con mayor detenimiento este tema.

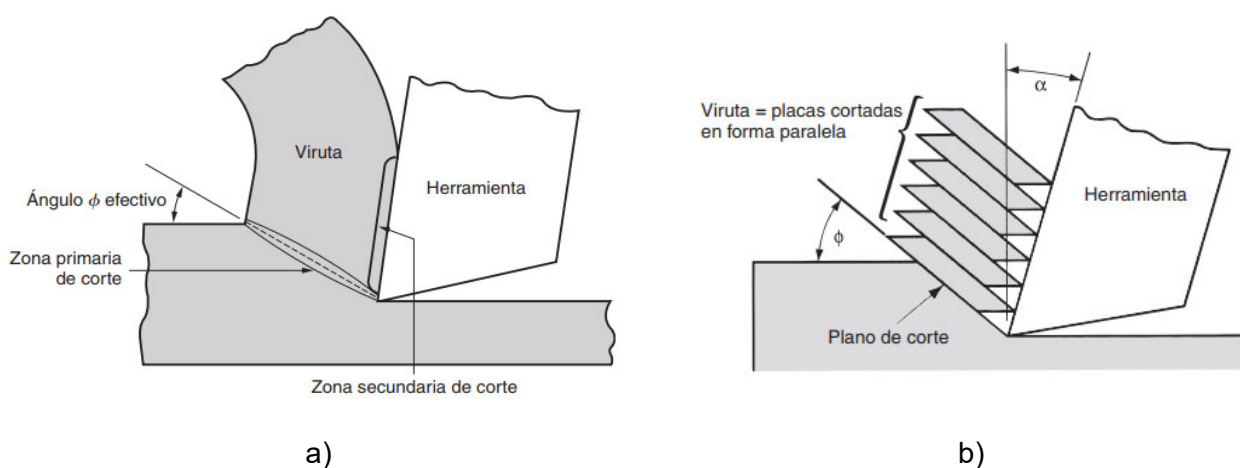


Figura 1.8 Deformación cortante durante la formación de viruta. a) Visión realista de la formación de la viruta. b) Visión aproximada del corte ortogonal (Fuente: [8])

### 1.1.4.2 Tipos de Viruta

La forma de la viruta provee información acerca del proceso de corte, dependiendo de su geometría se determina si el proceso es adecuado o tiene problemas a corregir. Los tipos de viruta son determinados por 3 parámetros que son: [9]

- Propiedades del material base
- Geometría de la herramienta de corte
- Parámetros de corte (profundidad de corte, velocidad de corte, ángulo de la herramienta)

Cada tipo de viruta influye de forma distinta en el acabado superficial de la pieza y el desarrollo de la operación de corte, por ejemplo, influyen en la vida de la herramienta de corte, la vibración de la máquina herramienta y el traqueteo de la misma [9].

La viruta tiene dos superficies; una está en contacto con la herramienta de corte o también llamada cara de ataque, esta se diferencia en la viruta por ser brillante o bruñida y la otra que no tiene contacto alguno presentando una apariencia áspera.

Los distintos tipos de viruta son:

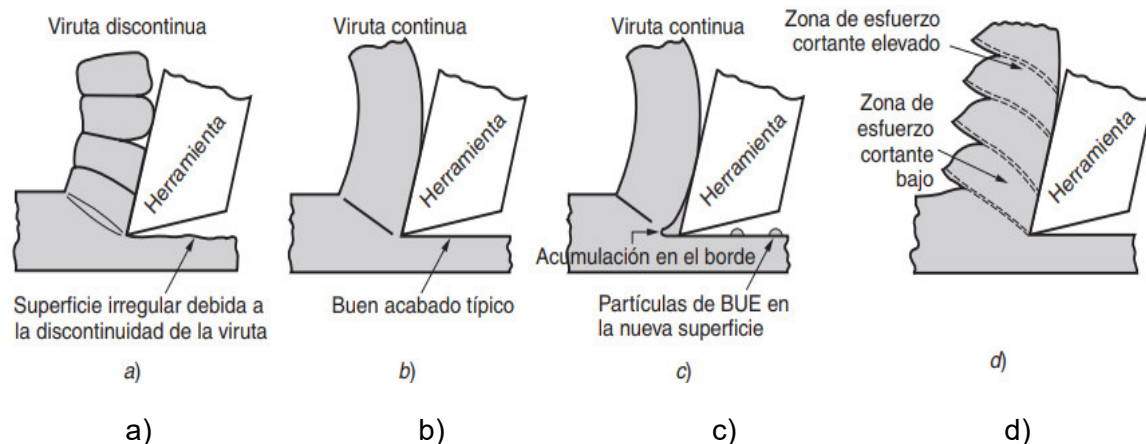


Figura 1.8 Clasificación de tipos de virutas. a) Discontinuo. b) Continuo. c) Continuo con acumulación en el borde. d) Dentada  
(Fuente: [8])

**Virutas discontinuas.** – Se forman al maquinar materiales frágiles o materiales que contienen puntos de gran concentración de esfuerzo tales como: hierro fundido, aceros con inclusiones de sulfuro de manganeso, etc. La forma de salida de este tipo de viruta se da en segmentos separados, además que imparten una forma irregular en las superficies de maquinado, esto se debe a causas como bajas velocidades de corte, altas fricciones entre la herramienta de corte y la viruta y profundidades de corte muy grandes. [8]

**Virutas continuas.** – Se forman en la mayoría de los materiales dúctiles como el hierro forjado, el acero de bajo contenido de carbono, el cobre y el aluminio, se procesan a velocidades de corte relativamente altas. Tienen una forma larga y continua. Su desventaja está en que al ser largas y continuas se enredan fácilmente en la herramienta de corte o la máquina herramienta ocasionando problemas en el corte. [8]

**Viruta continua con acumulación de borde.** - Se forman en los materiales dúctiles cuando se utilizan velocidades de corte bajas, esto produce junto con la fricción que se adicionen porciones de material de la pieza en el filo de la herramienta de corte; a este fenómeno se lo conoce como acumulación de borde, el cual tiene un comportamiento cíclico; se forma y crece, luego se vuelve inestable y tiende a la rotura. Aparece en la herramienta de corte donde disminuyendo su vida útil, y en la pieza mecanizada como porciones de material en la superficie desbastada. [8]

**Viruta dentada.** – Son llamadas también como virutas semicontinuas porque tienen una forma de sierra producida por una formación cíclica de viruta de alta resistencia seguido de una viruta de baja resistencia. Los materiales donde aparecen este tipo de virutas son en los metales de difícil maquinado tales como superaleaciones, aceros inoxidables austeníticos y aleaciones de titanio. [8]

## 1.2 Modelo de corte ortogonal

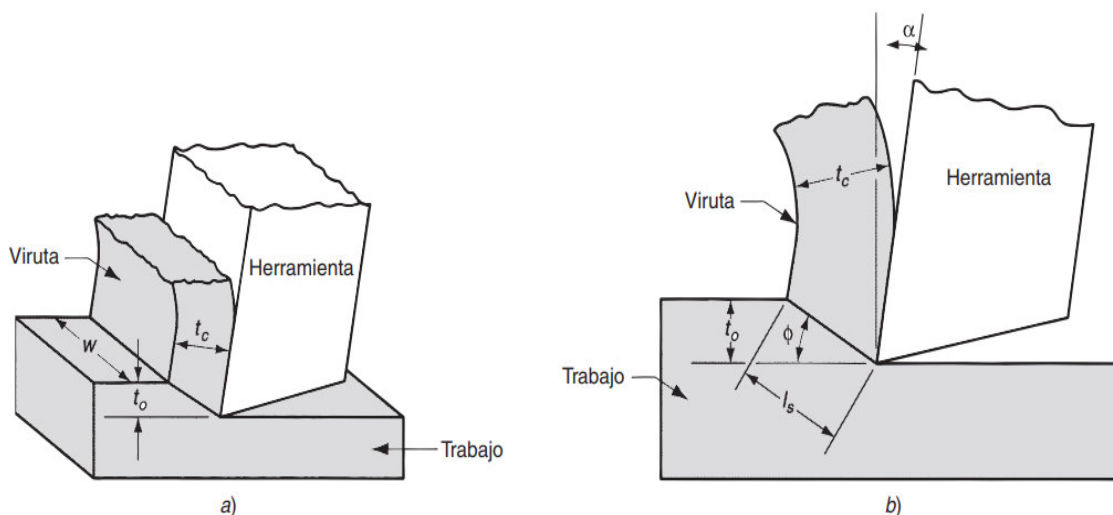


Figura 1.10 Modelo de corte ortogonal. a) modelo en tres dimensiones. b) modelo en dos dimensiones.  
(Fuente: [8])

Con la idea de simplificar operaciones de maquinado complejas, se dispuso un modelo que corrija las complejidades que se presentan y además tenga la capacidad de describir los procesos con una gran precisión. Este modelo es llamado como modelo de corte ortogonal, que como se observa en la figura 1.10 es presentada en dos y tres dimensiones, no obstante el principio es el mismo, la herramienta de corte realiza un movimiento perpendicular en dirección a la velocidad de corte ( $V_c$ ) 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, conocido como plano de corte, provocando la falla del material y produciendo la separación de la viruta. [8]

### 1.2.1 Ángulos de la herramienta de corte

Para el corte ortogonal los ángulos de la herramienta de corte tienen una gran importancia en el proceso de corte, a continuación, se presentan los tres principales ángulos de corte presentes en la herramienta de corte.

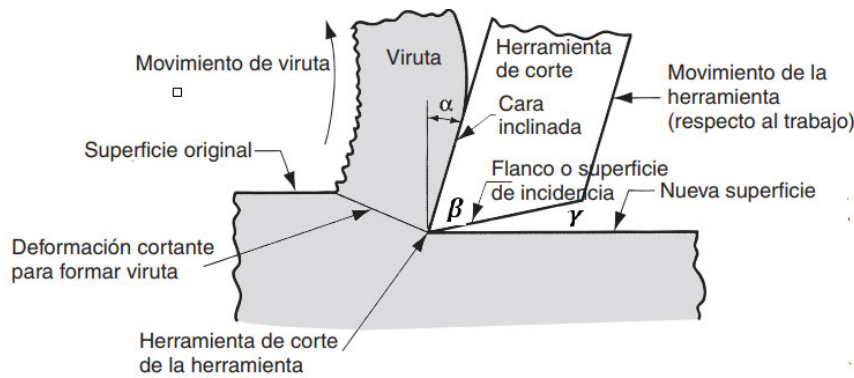


Figura 1.11 Proceso de maquinado y sus ángulos de corte.  
(Fuente: [8])

**Ángulo de filo ( $\beta$ ):** Es el ángulo formado por la cara de incidencia y desprendimiento de la herramienta de corte.

**Ángulo de incidencia ( $\gamma$ ):** Es el ángulo formado por la cara de incidencia de la herramienta y la superficie mecanizada. Si este ángulo es demasiado pequeño el rozamiento excesivo producirá vibraciones y temperaturas excesivas, al contrario, si el ángulo es muy alto la herramienta pierde filo.

Para la selección adecuada de este ángulo se debe considerar el material de la herramienta de corte y la pieza mecanizada.

**Ángulo de inclinación ( $\alpha$ ):** Es el ángulo formado por la dirección normal a la velocidad de corte ( $V_c$ ) y la dirección de desprendimiento de la viruta. A grandes valores del ángulo de desprendimiento la penetración será mayor y el corte será mejor, sin embargo, se perderá filo rápidamente, al contrario, un ángulo pequeño generará grandes temperaturas que afectarán las propiedades de la pieza.

Los ángulos están en función de la herramienta de corte y el material, como se detalla en la tabla 1.4:

**Tabla 1.5 Condiciones de los ángulos formados por la viruta.**

| MATERIAL             | HERRAMIENTA        |             |              |                 |             |              |
|----------------------|--------------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|--------------|
|                      | Acero rápido (HSS) |             |              | Metal duro (HM) |             |              |
|                      | $[\alpha_n]$       | $[\beta_n]$ | $[\gamma_n]$ | $[\alpha_n]$    | $[\beta_n]$ | $[\gamma_n]$ |
| Acero HB < 175       | 8                  | 67          | 15           | 6               | 74          | 10           |
| Acero 175 < HB < 250 | 8                  | 74          | 8            | 5               | 77          | 8            |
| Acero HB > 250       | 6                  | 84          | 0            | 5               | 79          | 6            |
| Acero inoxidable     | 8                  | 67          | 15           | 5               | 82          | 3            |
| Fundición < 250      | 8                  | 74          | 8            | 6               | 74          | 10           |
| Fundición > 250      | 6                  | 84          | 0            | 5               | 82          | 3            |
| Cobre                | 10                 | 50          | 30           | 8               | 67          | 15           |
| Aluminio             | 10                 | 45          | 35           | 9               | 66          | 15           |

(Fuente: [3])



## 1.2.2 Fuerzas en el corte ortogonal

El corte ortogonal tiene la facilidad de presentar en un solo plano las fuerzas que actúan en el corte, estas fuerzas son ordenadas en tres grupos que a la vez se clasifican dependiendo la zona en la que actúan, es decir, dos grupos actúan sobre la viruta y uno sobre la herramienta de corte; tienen distintas componentes tanto en magnitud como en dirección, sin embargo, comparten la misma fuerza resultante en magnitud.

El primer grupo de fuerzas tiene como componente a la fuerza de fricción  $F$  que representa el rozamiento de la viruta al deslizarse sobre la cara de ataque de la herramienta de corte y toma la dirección de la cara de ataque; como segunda componente está la fuerza normal a la fricción  $N$  y es perpendicular a  $F$ . El segundo grupo de fuerzas consta de  $F_s$  y  $F_n$  las cuales actúan sobre el plano de corte;  $F_s$  representa la fuerza requerida para que se produzca el corte en dicho plano y  $F_n$  toma una dirección perpendicular a  $F_s$ . Ambos grupos son representados en la figura 1.12 a.

Por último, están las fuerzas que actúan en la herramienta de corte, la conforma la fuerza de corte  $F_c$  que va en dirección de la velocidad de corte y representa el trabajo requerido para mover la herramienta de corte sobre la pieza de trabajo una longitud especificada, y la fuerza de empuje  $F_t$  que es perpendicular a  $F_c$  representadas en la figura 1.12b.[8]

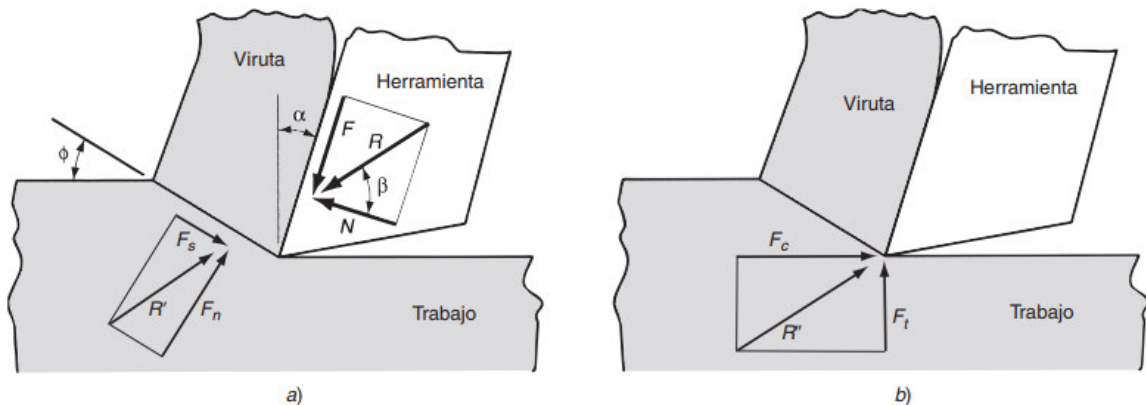


Figura 1.12 Grupo de fuerzas en el corte ortogonal: a) Fuerzas que actúan sobre la viruta en el corte ortogonal, b) Fuerzas que actúan sobre la herramienta y son medibles.  
(Fuente: [8])

En la práctica, monitorear las fuerzas de los dos primeros grupos es complicado porque sus direcciones varían en base a la posición de la herramienta y los parámetros de corte, en cambio, en el tercer grupo al siempre tener de referencia la dirección de la velocidad de corte es práctico encontrar las componentes de  $F_t$  y  $F_c$  por medio de un dinamómetro, y

partiendo de esos datos obtener las otras componentes utilizando ecuaciones matemáticas. [8]

Los tres grupos de fuerzas se visualizan por medio de un diagrama de relaciones geométricas como se observa en la figura 1.13.

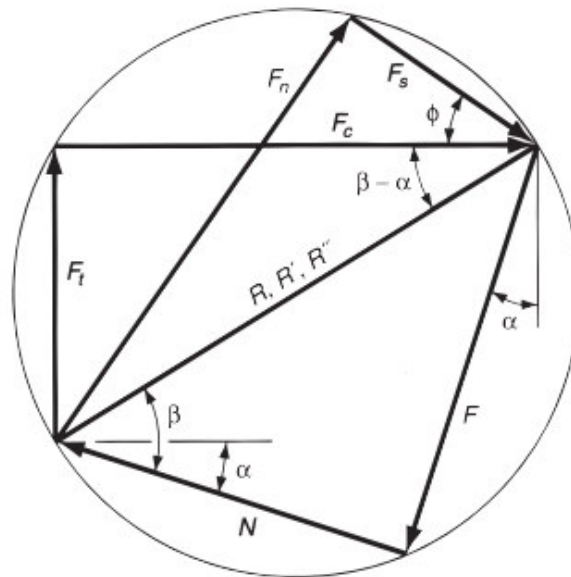


Figura 1.13 Relación geométrica de las fuerzas en el corte ortogonal  
(Fuente: [25])

En base a la figura 1.13, se obtiene:

$$R = F + N = F_s + F_n = F_c + F_t \quad (1.2)$$

$$F = F_c * \text{sen } \alpha + F_t * \cos \alpha \quad (1.3)$$

$$N = F_c * \cos \alpha - F_t * \text{sen } \alpha \quad (1.4)$$

$$F_s = F_c * \cos \phi - F_t * \text{sen } \phi \quad (1.5)$$

$$F_n = F_c * \text{sen } \phi + F_t * \cos \phi \quad (1.6)$$

Donde:

$F$  = Fuerza de fricción

$N$  = Fuerza normal a la fricción

$F_s$  = Fuerza cortante

$F_n$  = Fuerza normal a la cortante

$F_c$  = Fuerza de corte

$F_t$  = Fuerza de empuje

### 1.2.3 Aproximación al torneado por corte ortogonal

El torneado es un proceso comúnmente usado, la aproximación de este proceso de mecanizado por medio del corte ortogonal permite tener una visualización más sencilla del proceso de mecanizado por arranque de viruta a una forma lineal, con la condición de que el avance sea menor a la profundidad de corte, con la finalidad de que el corte tenga más lugar en la dirección de avance.

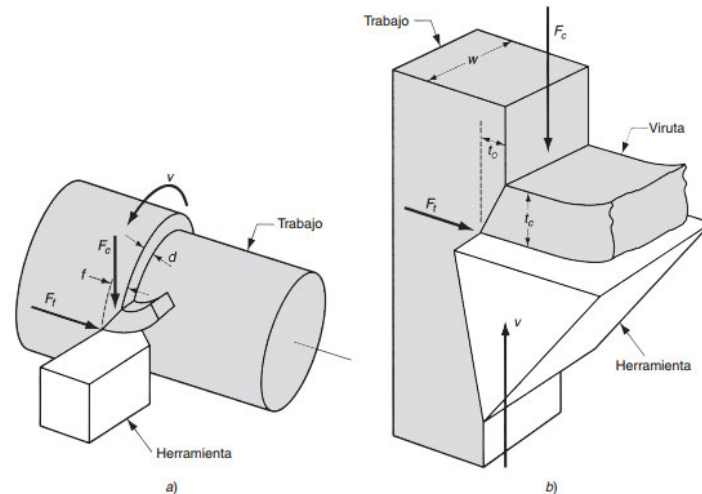


Figura 1.14 Aproximación del torneado por el modelo ortogonal: a) Torneado, b) Corte ortogonal correspondiente.  
(Fuente: [8])

La nomenclatura que se usa en el torneado está basada en las condiciones de corte y difiere de la nomenclatura en el corte ortogonal, pero están muy ligadas conjuntamente.

A continuación, se presenta una tabla de conversión de nomenclatura entre las dos operaciones.

**Tabla 1.6 Clave de conversión: operación de torneado y corte ortogonal**

| 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 $F_t$                |

(Fuente: [8])

Las nomenclaturas utilizadas en los diferentes procesos dependen de los autores y sus bibliografías adquiridas, para este trabajo se ha escogido la nomenclatura detallada en la tabla 1.5 y está basada en la nomenclatura del folleto de producción por virutaje [10] y la nomenclatura del modelo de corte ortogonal.

## 1.2.4 Cálculo analítico

### Esfuerzo equivalente

Usando el criterio de Von Mises se obtiene el esfuerzo equivalente generado en un corte ortogonal, las siguientes ecuaciones permiten el cálculo analítico de los esfuerzos equivalentes. [11]

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{(a/a_c) \cos \alpha}{1 - (a/a_c) \sin \alpha}\right) \quad (1.7)$$

$$F_s = F_c * \cos \phi - F_t * \sin \phi \quad (1.8)$$

$$k_{AB} = \frac{F_s * \sin \phi}{a * s} \quad (1.9)$$

$$\sigma_{AB} = \sqrt{3} * k_{AB} \quad (1.10)$$

Donde:

$a_c =$  Espesor de viruta a la salida

$k_{AB} =$  Promedio de esfuerzo cortante

$\sigma_{AB} =$  Esfuerzo equivalente

### Potencia en el limado mecánico

Es posible calcular la potencia necesaria para que la máquina-herramienta conociendo las fuerzas que actúan en el proceso de corte, para la limadora el valor de la potencia se obtiene de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{P_c}{n * 4500} + \frac{P_{rozamiento}}{n * 4500} [Cv] \quad (1.11)$$

La ecuación se divide en dos partes, la primera representa las fuerzas generadas en el corte de la herramienta representada con  $P_c$  y se obtiene del producto [23]:

$$P_c = K_s * a * s * V \quad (1.12)$$

La segunda parte de la ecuación representa el trabajo hecho por la máquina-herramienta, es decir, la fricción, el peso de sus componentes, etc. y se representa como:

$$P_{rozamiento} = Q * f * V \quad (1.13)$$

Donde:

$Q$  = Peso del carnero

$f$  = Coeficiente de rozamiento entre carnero y guía

$V_c$  = Velocidad de corte

En esta investigación no se considera el trabajo hecho por la máquina herramienta, sin embargo, para un caso de aplicación real se debe aumentar estos valores dependiendo de la máquina herramienta que se vaya a usar.

El factor  $\eta$  representa la eficiencia de la máquina-herramienta la cual depende del mecanismo que usa la misma, el tiempo de vida, etc. a continuación se presenta una tabla con valores referenciales de eficiencia. [10]

**Tabla 1.7 Eficiencia de una limadora**

| Condiciones de la Máquina                                | $\eta$    |
|--|-----------|
| Máquinas muy anticuadas, con muchos engranajes y correas | 0.50-0.60 |
| Máquinas de motor individual con reductor o correa plana | 0.70-0.75 |
| Máquinas de motor individual, con correas trapezoidales  | 0.80-0.85 |
| Máquinas con motor acoplado directamente                 | 0.85-0.90 |

(Fuente: [10])

## 1.3 Materiales

### 1.3.1 Acero ASTM A-36

En la industria los aceros son muy utilizados a pesar de su gran densidad, una de las razones de la gran demanda en este material es la posibilidad de prefabricar las piezas reduciendo tiempos de fabricación, otra ventaja es su comportamiento lineal ante esfuerzos aplicados antes de llegar al esfuerzo de fluencia. Cuando la vida útil de un acero termina

se puede recuperar parte de la inversión vendiéndola ya sea para otras construcciones o para chatarra.

El acero ASTM A-36 es el acero más utilizado en el país presentando las siguientes características.

**Tabla 1.8 Propiedades del Acero ASTM A-36.**

| <b>CARACTERÍSTICAS DEL ACERO ASTM A-36</b> |                        |                          |
|--|------------------------|--------------------------|
| <b>Propiedad</b>                           | <b>SI</b>              | <b>S. Inglés</b>         |
| Esfuerzo a la fluencia mínimo              | 248 MPa                | 36.3 kPSI                |
| Esfuerzo a la tensión                      | 345 Mpa                | 50.038 kPSI              |
| Elongación mínima en 50 mm                 |                        | 23%                      |
| Elongación mínima en 200 mm                |                        | 20%                      |
| Módulo de elasticidad                      | 210 Gpa                | 29000 KSI                |
| Densidad                                   | 7.85 g/cm <sup>3</sup> | 0.284 lb/in <sup>3</sup> |
| Coefficiente de Poisson                    |                        | 0.3                      |
| <b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>                 |                        |                          |
| Carbono                                    |                        | 0.26%                    |
| Cobre                                      |                        | 0.20%                    |
| Hierro                                     |                        | 99.00%                   |
| Manganeso                                  |                        | 0.75%                    |
| Fosforo                                    |                        | ≤ 0.04%                  |
| Azufre                                     |                        | ≤ 0.05%                  |

(Fuente: [3])

Con respecto a su presencia en el mercado, están casi todos los perfiles y tamaños, a excepción de perfiles W, H e IR. Al tener tanto protagonismo en la industria se los usa en:

- Placas de Conexión
- Anclajes de barras redondas lisas (OS) y perfiles (LI)
- Cuerdas Superiores e Inferiores de Armaduras (LI)
- Montantes y Diagonales de Armaduras (LI)
- Largueros Tipo Joist (OS ó LI)
- Contravientos de Cubiertas (OS)

### **1.3.2 Herramientas de corte**

En el mecanizado por arranque de viruta se presentan circunstancias que conllevan altas temperatura, grandes esfuerzos y fricción excesiva por lo que la herramienta de corte debe tener propiedades mecánicas y físicas que manejen óptimamente las distintas circunstancias adversas. Las propiedades de la herramienta de corte deben cumplir:

- Alta tenacidad.
- Conservar su dureza a altas velocidades y temperaturas.
- Mantener su filo a pesar de la fricción.
- Resistencia a la fatiga.
- Evitar la fusión con la pieza de trabajo.

Las primeras herramientas de corte fueron fabricadas con aceros al carbono que a pesar de tener una buena dureza la perdían al alcanzar una temperatura de 250 °C, para solucionar esta deficiencia en la dureza tuvo que agregarse elementos aleados dando origen a los aceros rápidos o de alta velocidad con la característica de mantener su dureza a una temperatura de 600°.

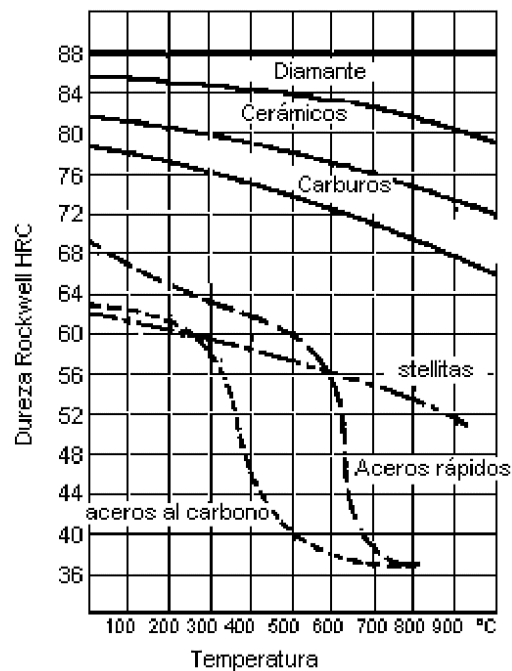


Figura 1.9 Gráfica Temperatura vs. Dureza Rockwell HRC en diferentes materiales.  
(Fuente: [12])

### 1.3.2.1 Aceros Rápidos

Los aceros rápidos que hay en el mercado son muchos, sin embargo, hay dos grupos gobernantes que son:

**Acero rápido tipo T:** Tienen como principal soluto al tungsteno, además de también contener cromo, cobalto, silicio, manganeso y vanadio.

**Acero rápido tipo M:** El soluto dominante es el molibdeno, además de los elementos característicos del acero rápido tipo T.

La cantidad de cada elemento aleante da origen a distintas herramientas de corte, siendo estas:

**Tabla 1.9 Composiciones típicas de aceros rápidos T.**

| <b>ACEROS RÁPIDOS TIPO T</b> |          |          |          |           |           |           |           |           |
|------------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Tipo (%wt)</b>            | <b>C</b> | <b>W</b> | <b>V</b> | <b>Cr</b> | <b>Co</b> | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>Mo</b> |
| <b>T1</b>                    | 0.75%    | 18.00%   | 1.00%    | 4.00%     | -         | 0.30%     | 0.30%     | 0.70%     |
| <b>T2</b>                    | 0.80%    | 18.00%   | 2.00%    | 4.00%     | -         | 0.30%     | 0.30%     | 0.60%     |
| <b>T4</b>                    | 0.75%    | 18.00%   | 1.00%    | 4.00%     | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     | 0.70%     |
| <b>T5</b>                    | 0.80%    | 18.00%   | 2.00%    | 4.00%     | 8.00%     | 0.30%     | 0.30%     | 0.80%     |
| <b>T6</b>                    | 0.80%    | 20.00%   | 1.80%    | 4.50%     | 12.00%    | 0.30%     | 0.30%     | 0.70%     |
| <b>T8</b>                    | 0.75%    | 14.00%   | 2.00%    | 4.00%     | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     | 0.70%     |
| <b>T15</b>                   | 1.50%    | 12.00%   | 5.00%    | 4.00%     | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     | 0.50%     |

(Fuente: [13])

**Tabla 1.10 Composiciones típicas de aceros rápidos tipo M**

| <b>ACEROS RÁPIDOS TIPO M</b> |          |          |          |           |           |           |           |           |
|------------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Tipo (%wt)</b>            | <b>C</b> | <b>W</b> | <b>V</b> | <b>Cr</b> | <b>Co</b> | <b>Mo</b> | <b>Si</b> | <b>Mn</b> |
| <b>M1</b>                    | 0.85%    | 1.50%    | 1.00%    | 3.75%     | -         | 8.50%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M2 tipo 1</b>             | 0.85%    | 6.00%    | 2.00%    | 4.00%     | -         | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M2 tipo 2</b>             | 1.00%    | 6.00%    | 2.00%    | 4.00%     | -         | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M3 tipo 1</b>             | 1.05%    | 6.00%    | 2.50%    | 4.00%     | -         | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M3 tipo 2</b>             | 1.20%    | 6.00%    | 3.00%    | 4.00%     | -         | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M4</b>                    | 1.30%    | 5.50%    | 4.00%    | 4.00%     | -         | 4.50%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M6</b>                    | 0.80%    | 4.00%    | 1.50%    | 4.00%     | 12.00%    | 5.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M7</b>                    | 1.00%    | 1.75%    | 2.00%    | 3.75%     | -         | 8.75%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M10 tipo 1</b>            | 0.85%    | -        | 2.00%    | 4.00%     | -         | 8.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M10 tipo 2</b>            | 1.00%    | -        | 2.00%    | 4.00%     | -         | 8.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M15</b>                   | 1.50%    | 6.50%    | 5.00%    | 4.00%     | 5.00%     | 3.50%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M30</b>                   | 0.80%    | 2.00%    | 1.25%    | 4.00%     | 5.00%     | 8.00%     | 0.30%     | 0.30%     |
| <b>M33</b>                   | 0.90%    | 1.50%    | 1.15%    | 3.75%     | 8.00%     | 9.50%     | 0.30%     | 0.30%     |

(Fuente: [14])

### 1.3.2.2 Carburos

Los carburos son compuestos químicos creados combinando carbono con otros elementos metálicos, típicamente estos materiales son el titanio, el tantalio y el tungsteno. El material resultante se caracteriza por su rigidez, su alta resistencia al desgaste, a la presión y al calor.

Las propiedades de los carburos son mejoradas mediante la adhesión de distintos recubrimientos que son:



**Recubrimientos-CVD (Chemical vapor deposition):** Es la reacción entre el carburo y una combinación de carbonitruro de titanio, alúmina y nitruro de titanio (MT-Ti (C, N), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y TiN). La adhesión se provoca a temperaturas entre 700 y 1050 °C y se tiene como resultado una mayor tenacidad y resistencia al desgaste.

**Recubrimiento-PVD (Physical vapor deposition):** La adhesión se da mediante la evaporación de un metal que reacciona con otro elemento químicamente, la temperatura de trabajo de este recubrimiento va entre 400 y 600°C. Los principales metales utilizados son nitruro de titanio, carbonitruro de titanio, y nitruro de titanio y aluminio. Actualmente se hace una combinación de estos metales adhiriendo distintas capas al inserto, agregando una mayor resistencia al desgaste.

**Carburo cementado:** El recubrimiento se forma por prensado de polvos o por moldeo de inyección y el material utilizado es un material metalúrgico en polvo compuesto por partículas de carburo de tungsteno y un aglutinante rico en cobalto. [7]

## 1.4 Modelos de comportamiento viruta-herramienta [5]

Varias han sido las investigaciones para modelar el comportamiento de un material sometido a cargas exteriores y las ecuaciones constitutivas han sido el medio que los investigadores han encontrado para describir el fenómeno idealmente, obteniendo el esfuerzo aplicado en función de variables como la deformación, la velocidad de deformación, la temperatura, etc. Cada material durante su vida ha sido expuesto a diferentes condiciones que influirán en el comportamiento final, sin embargo, un análisis idealizado que se acerque a la realidad sirve para modelar matemáticamente el fenómeno. [15]

Para la idealización del material se toman tres criterios distintos, que pueden ser considerados individualmente o una combinación de ellos, estos son:

**Modelo elástico:** El material presenta una deformación al aplicarse una fuerza, sin embargo, recupera su forma inicial al dejar de aplicar la fuerza.

**Modelo plástico:** El material presenta una deformación al aplicarse una fuerza sin recuperar su forma inicial al dejar de aplicar la fuerza.

**Modelo viscoso:** Deformación progresiva del material al aplicar una fuerza constante a lo largo del tiempo.

Las ecuaciones constitutivas se obtienen de dos formas distintas que son:

**Ecuaciones constitutivas fenomenológicas:** Se obtienen por un ajuste de curva de datos obtenidos experimentalmente, la obtención por este método es relativamente sencillo, pero depende de la precisión de las pruebas tomadas al material.

**Ecuaciones constitutivas basadas en modelos físicos:** Estas ecuaciones se basan en criterios micro estructurales del material, considerando sus características y propiedades, este punto de vista ofrece una mayor precisión en los resultados, sin embargo, los parámetros considerados en las ecuaciones no son fáciles de conseguir y están en pleno desarrollo.

En la actualidad existen muchos modelos que sirven para simular la rápida deformación de un material, algunos de ellos son:

### Johnson-Cook

Este modelo es usado para analizar el comportamiento de resistencia de los materiales, típicamente metales, sometidos a grandes tensiones, altas tasas de deformación y altas temperaturas, cada término es explicado en el apartado 1.4.1.

$$\bar{\sigma} = [A + B \cdot \varepsilon_p^n] \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left( 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right) \quad (1.14)$$

### Zerilli-Armstrong

Zerilli y Armstrong propuso una relación constitutiva más sofisticada basada en el uso de dinámicas de dislocación. Los efectos del endurecimiento por deformación, el endurecimiento por velocidad de deformación y el ablandamiento térmico están incluidos en la formulación, también, se ha incluido el efecto del tamaño de grano.

Se presentan dos ecuaciones, la primera sirve para elementos con estructura BCC y la segunda los materiales con estructura FCC.

$$\sigma_{eq} = C_0 + C_1 \exp \left( -C_3 T + C_4 T \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) + C_5 \varepsilon^n \quad (1.15)$$

$$\sigma_{eq} = C_0 + C_2 \varepsilon^{0.5} \exp \left( -C_3 T + C_4 T \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \quad (1.16)$$

### Oxley

Donde  $\sigma_1$ , el esfuerzo del material en  $\varepsilon = 1,0$  y  $n$  es el índice de endurecimiento por deformación. Estos dependen de la velocidad de la temperatura modificada.

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \varepsilon^n \quad (1.17)$$

$$T_{mod} = \left(1 - v \log \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) T \quad (1.18)$$

### Maekawa et al.

Para una velocidad de deformación y un rango de temperatura constante.

$$\sigma_{eq} = A \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right)^M e^{aT} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right)^{-m} \left[ \int e^{\frac{-aT}{N}} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{1000}\right)^{-m/N} d\varepsilon \right]^N \quad (1.19)$$

### Calamaz et al.

Este modelo es considerado como una extensión del modelo de Johnson-Cook. Donde D y p son parámetros que dependen de la temperatura de la pieza a ser mecanizada.

$$\sigma_{eq} = \left\{ [A + B \cdot \varepsilon_p^n] \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\bar{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - T_H^m) \right\} \left[ D + (1 - D) \left[ \tanh \left( \frac{1}{(\varepsilon_p + p)^r} \right) \right] \right]^s \quad (1.20)$$

$$D = 1 - \left(\frac{T}{TM}\right)^d, P = \left(\frac{T}{TM}\right)^b \quad (1.21)$$

#### 1.4.1 Modelo de Johnson-Cook

El modelo preferido para materiales que sufren altas velocidades de deformación generalmente es el propuesto por Johnson y Cook que utiliza una combinación del modelo viscoso y plástico. El modelo considera altas velocidades de deformación y temperatura adiabática, es decir, no considera una transferencia de calor. El esfuerzo se expresa como:

$$\bar{\sigma} = [A + B \cdot \varepsilon_p^n] \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\bar{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - T_H^m) \quad (1.22)$$

$$T_H = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (1.23)$$

Donde:

$A$  = Límite elástico a temperatura ambiente

$B$  = Endurecimiento por deformación plástica

$n$  = Parámetro adimensional del endurecimiento por deformación plástica

$C$  = Sensibilidad a la velocidad de deformación

$m$  = Sensibilidad a la temperatura

$\varepsilon_p$  = Deformación plástica efectiva

$\dot{\varepsilon}_p$  = Velocidad de deformación

$\dot{\varepsilon}_0$  = Velocidad de deformación de referencia

$T_m$  = Temperatura de fusión del material

$T_0$  = Temperatura ambiente

En el modelo de Johnson y Cook se observan tres términos muy característicos que están en función de la velocidad de deformación y la temperatura, y también, toma en cuenta la ley de endurecimiento por deformación. Todos estos parámetros incrementan o disminuyen los valores de las tensiones como se observa en la figura 1.11.

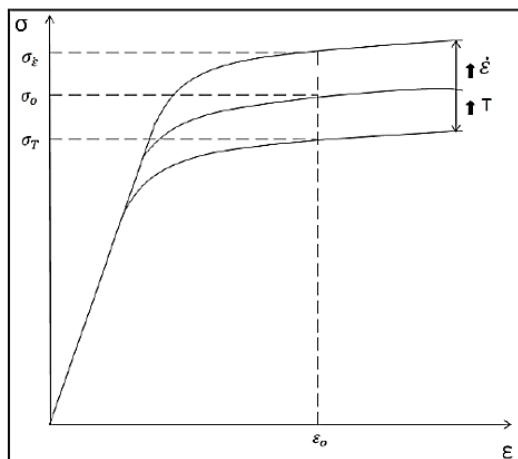


Figura 1.10 Influencia del aumento de la temperatura y la velocidad de deformación en la tensión.  
(Fuente: [16])

#### 1.4.1.1 Obtención de los parámetros de Johnson-Cook

Los parámetros de Johnson-Cook necesarios para la ecuación son obtenidas experimentalmente mediante pruebas de deformación que brindan datos específicos que

ayudan a obtener uno a uno los parámetros, lo primero que hay que entender es que la ecuación de Johnson-Cook representa la línea de deformación que sufre el material bajo altas tasas de deformación.

El parámetro A del modelo es el límite elástico a bajas tasas de tensión.

Los parámetros B y n son encargados del fortalecimiento uniforme al generarse la deformación. Estos parámetros se calculan únicamente en pruebas cuasi estáticas, es decir, las cargas aplicadas son a baja velocidad.

El parámetro m tiene considera el ablandamiento del material ante el aumento de temperatura generado por la fricción entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo.

El parámetro C se encarga de representar la recristalización del material ante las altas tasas de deformación que sufre el material durante el corte, es decir, de los efectos de intensidad de deformación. Sólo es posible calcularlo con los datos de la tasa de deformación de tensiones. [17]

## 1.4.2 Ley de daño de Johnson-Cook

La rotura de material durante una colisión es un problema complejo debido a la aparición simultánea de altas deformaciones, tensiones, cambios de temperatura y grandes velocidades de deformación, por tanto, se necesita un planteamiento matemático que tenga en cuenta estos efectos. Johnson y Cook introdujeron una teoría que interpreta la rotura como una reducción en la resistencia del material debido a cuestiones térmicas, de carga o químicas.

La ecuación se presenta como:

$$\varepsilon^{-f} = [D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \bar{\sigma})][1 + D_4 \cdot \ln(\varepsilon_{pl})] \left[ 1 + D_5 \cdot \left( \frac{T - T_0}{T_m - T} \right) \right] \quad (1.24)$$

Donde:

$\varepsilon^{-f}$  = Deformación de fallo equivalente

$\bar{\sigma}$  = Esfuerzo equivalente

$\varepsilon_{pl}$  = Deformación plástica equivalente

$D_1, D_2, D_3, D_4$  y  $D_5$  = Parámetros propios del material

$T_m$  = Temperatura de fusión del material

$T_0$  = Temperatura ambiente

## 1.5 Método de elementos finitos

En ingeniería obtener soluciones exactas a problemas que están definidos por numerosas variables y complejas ecuaciones gobernantes es muy difícil, razón por la cual, en la práctica se utilizan métodos que proporcionan valores aproximados a las cantidades de interés, uno de ellos es el método de los elementos finitos (FEM) el cual es un método numérico que resuelve problemas estáticos y dinámicos en cuerpos sometidos a distintas condiciones de contorno y son descritos mediante ecuaciones diferenciales parciales o como una minimización de función.

El método consiste en presentar al problema como un ensamblaje de elementos finitos, es decir, fraccionar en muchos elementos a la entidad de estudio ya sea un sólido, un líquido, etc. Dependiendo de la naturaleza del problema que puede ser estructural, de transferencia de calor, elasticidad, etc. se utilizan funciones de aproximación para cada elemento finito en términos nodales, es decir, se plantean ecuaciones que tienen como incógnita los vértices de cada elemento finito, logrando transformar un problema físico continuo en un problema de elementos finitos discretizado con valores nodales desconocidos y expresados en un sistema de ecuaciones lineal. [18]

El método de los elementos finitos cuenta con las siguientes ventajas:

- 1) Un problema continuo contiene infinitos grados de libertad lo que hace imposible resolverlos en un computador, en cambio, al dividir el problema en partes finitas teniendo a los desplazamientos nodales como incógnitas hace posible resolverlo en computadora.
- 2) Su campo de aplicación en la ingeniería es amplio, es utilizado desde problemas estructurales con geometrías complejas hasta problemas de transferencia de calor.
- 3) Se pueden utilizar diferentes materiales para diferentes elementos.
- 4) Se pueden calcular los problemas no lineales, incluyendo la no linealidad del material y los problemas de no linealidad geométrica (gran deformación).

### 1.5.1 Funcionamiento del método de elementos finitos

Como requisito para aplicar el método FEM el problema debe definirse por ecuaciones diferenciales que representan la expresión matemática del principio de conservación de masa, energía o momento, dichas ecuaciones son complementadas con condiciones de contorno que definen lo que sucede a los límites del problema. En casos simples la ecuación gobernante junto con las condiciones de contorno es resuelta analíticamente obteniendo su solución exacta, sin embargo, la mayoría de los problemas en ingeniería son

definidos por ecuaciones diferenciales complejas que dificultan el enfoque analítico y hace necesario el uso de métodos numéricos para llegar a una aproximación de la solución. El método FEM transforma la ecuación diferencial parcial en un conjunto equivalente de expresiones más simples que generalmente son términos integrales, obteniendo una definición del problema más conveniente para métodos aproximados como es el FEM; la definición integral equivalente es conectada a aproximaciones de elementos finitos con la finalidad de discretizar la expresión integral en un sistema lineal para un conjunto de valores constantes desconocidos (valores nodales) ubicados en un vector  $\{U\}$ , siendo dicho vector la solución aproximada por el método de elementos finitos.[19]

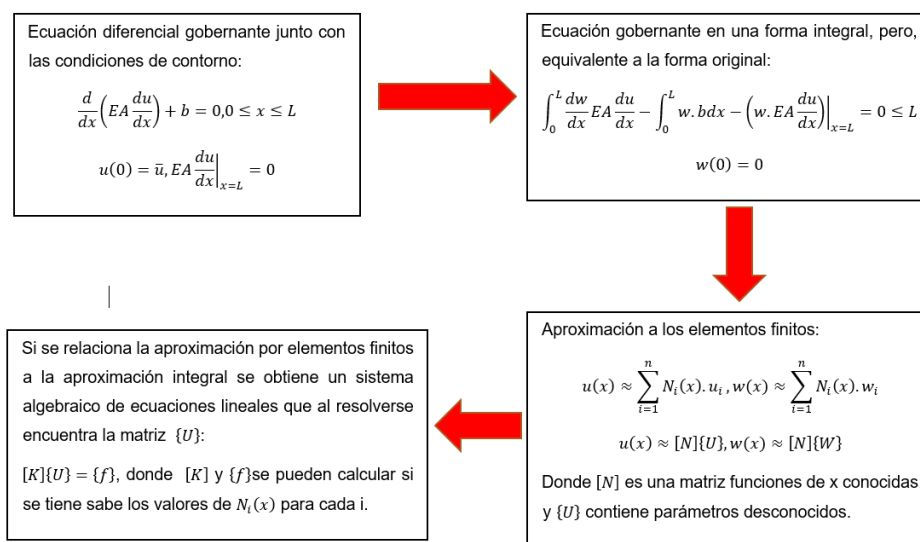


Figura 1.11 Procedimiento para llevar a cabo el método de los elementos finitos (FEM).  
(Fuente: [16])

Los nodos son la base del método de los elementos finitos (FEM) y se definen como puntos específicos en un elemento finito en los que el valor de la variable de campo debe calcularse explícitamente. Existen dos tipos de nodos, los nodos exteriores que son ubicados en los límites del elemento finito y por medio de ellos es posible conectar más elementos finitos adyacentes, y los nodos interiores que no se encuentran en los límites del elemento finito, por lo tanto, no sirven para conectarse con otro elemento finito. Generalmente las expresiones matemáticas en el FEM sirven para encontrar los valores de las variables de campo en los nodos exteriores, si se requiere de otro valor dentro del elemento finito se utilizan interpolaciones con los valores nodales conocidos.

Dado que, los nodos exteriores son los puntos de conexión de elemento a elemento las ecuaciones de FEM avalan que en las conexiones nodales el valor de la variable es el mismo para cada elemento conectado al nodo, garantizando la continuidad de la variable de campo en los nodos, es decir, se evita tener vacíos en el dominio del problema, sin embargo, muchas veces los valores de interés en realidad son los gradientes de la variable

de campo y dicha gradiente no necesariamente es continua, por ejemplo, en una estructura el método FEM ofrece como resultado desplazamientos, pero, para el análisis del problema un ingeniero analiza esfuerzos y deformaciones de la estructura que son definidos por la derivada del desplazamiento. Las discontinuidades en los gradientes de la variable de campo sirven para analizar la precisión y la convergencia de la solución. [18]

## 1.5.2 Software de elementos finitos

Los sistemas para resolver en el método FEM incluyen muchas variables y se necesita de un computador para llegar a la solución, por lo que, se han desarrollado muchos programas de elementos finitos; los programas que existen en la actualidad suelen ser vendidos por empresas privadas e incluyen una interfaz gráfica de usuario adecuada para facilitar su uso. Uno de los programas más populares es ANSYS que fue de los primeros en permitir el análisis no lineal.

La creación del lenguaje SAP inició una familia de soluciones de software actualmente distribuidas por Computers and Structures, con sede en Berkeley. Los principales programas de esta familia, que son utilizados en ingeniería civil y enfatizan el diseño sísmico son SAP 2000, ETABS y Perform3D.

Otros programas muy populares en FEM son ABAQUS, originalmente creado por David Hibbitt y ahora vendido por Simulia, y LS-DYNA, originalmente creado por John Hallquist de Livermore National Laboratory y ahora vendido por Liver more Software and Technology Corporation (LSTC). En cualquier programa, hay muchas características, incluido el análisis no lineal de sólidos y estructuras. También puede incluir código personalizado y es atractivo para los investigadores porque permite la compatibilidad con hardware de computación paralela de alto rendimiento. [18]

A continuación, se enlista algunos de los softwares más populares en la actualidad.

- ABAQUS
- ANSYS
- COMSOL Multiphysics
- Nastran
- Simulation Mechanical (Autodesk)

Cada software tiene su propio sistema, plataforma, y método para resolver los problemas, sin embargo, siempre siguen el principio del método de los elementos finitos. En este trabajo el software elegido fue ANSYS por la familiaridad que se tiene con el programa en



materias de la carrera, su plataforma es amigable con el usuario y el procedimiento para simular es sencillo.

### 1.5.3 Pasos para el Análisis de Elementos Finitos

Independientemente del problema que esté en desarrollo ciertos pasos en la formulación de elementos finitos son comunes a todos estos análisis, ya sean estructurales, de transferencia de calor, de fluidos o de algún otro problema. Estos pasos están incluidos en los softwares que hay en el mercado y son:

**Pre-procesamiento:** En este paso se desarrolla el modelo del problema junto con las condiciones de contorno, este subproceso se organiza de la siguiente manera:

- Definir el dominio geométrico del problema.
- Definir el tipo o los tipos de elementos que se utilizarán
- Definir las propiedades materiales de los elementos.
- Definir la geometría de los elementos que participan en el problema.
- Definir las conectividades de elementos (mallar el modelo).
- Definir las restricciones físicas (condiciones de contorno).
- Definir las cargas.

**Solución:** Durante la fase de solución, el software de elementos finitos ensambla las ecuaciones en forma de matriz y calcula los valores desconocidos de las variables de campo primario. A continuación, los valores calculados se utilizan mediante sustitución inversa para calcular variables derivadas adicionales, como fuerzas de reacción, esfuerzos de elementos y flujo de calor. Como no es raro que un modelo de elementos finitos esté representado por decenas de miles de ecuaciones, se utilizan técnicas de solución especiales para reducir los requisitos de almacenamiento de datos y el tiempo de cálculo.

**Post-procesamiento:** En esta parte se analiza y evalúa los resultados obtenidos, el programa generalmente ofrece los resultados en varios formatos, gráficas con colores, tablas, gráficas de datos etc. El o los encargados del proyecto evalúan la veracidad de los resultados, para ello se debe tener las bases suficientes para decidir si el problema fue resuelto o no. [20]

### 1.5.4 Métodos de análisis en elementos finitos

En la solución a problemas no lineales y no estáticos se encuentran dificultades. La obtención de la respuesta a los problemas no lineales y no estáticos se consigue por dos caminos distintos.

La variable tiempo en los problemas de ingeniería juega un papel fundamental, si el problema analizado tiene cargas aplicadas lentamente se considera como un problema cuasi-estático convirtiéndolo en un problema independiente del tiempo, sin embargo, cuando en el problema los efectos de la aceleración son significativos la dependencia del tiempo es necesaria y el análisis es distinto al caso anterior, dicho esto, el análisis de elementos finitos se ha distribuido en dos categorías que son: [19]

#### **1.5.4.1 Método implícito**

En este método el desplazamiento, la velocidad y la aceleración en el tiempo  $t_{i+1}$  están acoplados lo que hace necesario aplicar la ecuación gobernante en ese instante para obtener los valores del siguiente intervalo de tiempo, es decir, la solución del problema es obtenida en varios pasos y la solución del paso actual es basada en los datos de la solución anterior. Llevar a cabo este algoritmo de solución hace necesario resolver un sistema de ecuaciones lineales e invertir una matriz de coeficientes en cada intervalo de tiempo.

Para problemas dinámicos y no lineales invertir la matriz en cada intervalo es un trabajo muy pesado que termina en un procesamiento robusto, sin embargo, el tiempo de duración del problema no tiene limitación como en el caso del método explícito

#### **1.5.4.2 Método explícito**

En el caso del método explícito el algoritmo se ocupa de resolver la aceleración considerando la matriz de masas como agrupada, es decir, una matriz diagonal en la que la inversión para un intervalo de tiempo distinto solo se da en la diagonal. Teniendo el valor de la aceleración en  $n$  se calcula directamente la velocidad en  $n+1/2$  y el desplazamiento en  $n+1$ , en definitiva, cuando se tienen los resultados en el tiempo  $t_i$  las respuestas en el tiempo  $t_{i+1}$  son obtenidas en relación con los resultados del tiempo anterior.

A pesar de que los cálculos para un paso de tiempo en algoritmos explícitos son más rápidos que los de los implícitos la aplicación de este método no es estable en tiempos prolongados por lo que está restringida a tiempos cortos, por lo general están en el orden de los microsegundos, por norma general el tiempo debe ser menor al paso de tiempo de Courant, es decir, el tiempo que tarda una onda de sonido en viajar a través de un elemento. [19]

#### **1.5.5 Dinámica Explícita en ANSYS (Explicit Dynamics)**

El problema de corte ortogonal es un proceso donde el material sufre altas tasas de deformación, un análisis estructural normal es incapaz de simular la dinámica del problema, razón por la cual, es necesario usar métodos explícitos que analizan problemas no lineales

de sólidos, líquidos, gases e incluso interacciones entre ellos (Figura 1.13). ANSYS cuenta en su interfaz el modelo de interacción de Dinámica Explícita (Explicit Dynamics) la cual tiene las características de análisis en problemas no lineales ya descritas.

Es importante aclarar que el análisis explícito se usa en casos donde las tasas o las velocidades de deformación son altas, por lo general cuando se supera las 10 unidades/segundo o 10m/s respectivamente, si no es el caso el análisis implícito es suficiente. [21]

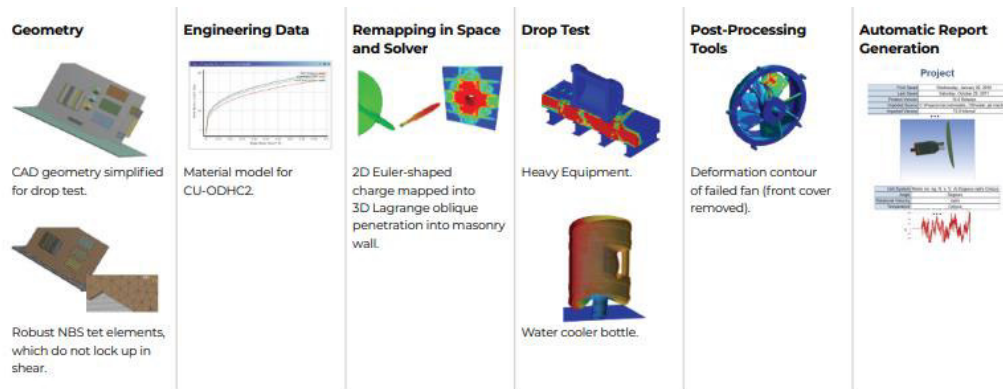


Figura 1.12 Aplicaciones de Dinámica Explícita.  
(Fuente: [19])

## 1.5.6 Aproximación, error y convergencia

Se ha mencionado que para aplicar el método de los elementos finitos se modifican las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el problema a una forma integral para luego discretizarla en una expresiones matriciales, con las modificaciones obviamente no se obtiene la solución exacta del problema, teniendo por definición al método de elementos finitos como un método de aproximación y la precisión de los resultados depende de que tanto coinciden las modificaciones con las expresiones matemáticas originales.

Para evaluar la aproximación de los resultados obtenidos se manejan dos conceptos que son:

### 1.5.6.1 Error

El error se define como la diferencia entre el valor exacto y el valor aproximado obtenido por el método de los elementos finitos, entonces, el error se interpreta como una medida cuantitativa de que tanto se aproxima la solución aproximada a la solución real. Se tienen dos tipos de errores que son:

**Error de redondeo.** – En problemas matemáticos un número decimal puede tener infinitos componentes, obviamente no todos son tomados en cuenta por lo que se escoge un

número limitado para su representación. El procesamiento computacional usa entre 7 y 14 cifras decimales lo cual generalmente es suficiente para la solución de un problema, sin embargo, pueden surgir errores por las siguientes causas:

- Errores humanos, es decir, una mala digitación numérica en el ingreso de datos
- Cuando las cantidades manejadas son muy pequeñas y el número de decimales disponibles no es suficiente.

**Error de truncamiento.** - Los errores de truncamiento surgen al utilizar métodos de solución aproximados en vez de un método matemático preciso. Además, para obtener conocimiento de las propiedades de dichos errores se regresa a la formulación matemática utilizada extensamente en los procedimientos numéricos para manifestar Funcionalidades en forma polinomial: Serie de Taylor.

Los errores tienen un papel fundamental en el análisis de elementos finitos, en la figura 1.14 se muestra el punto de regresión disminuido, donde el error de redondeo no muestra las ventajas de la reducción del tamaño del crecimiento.

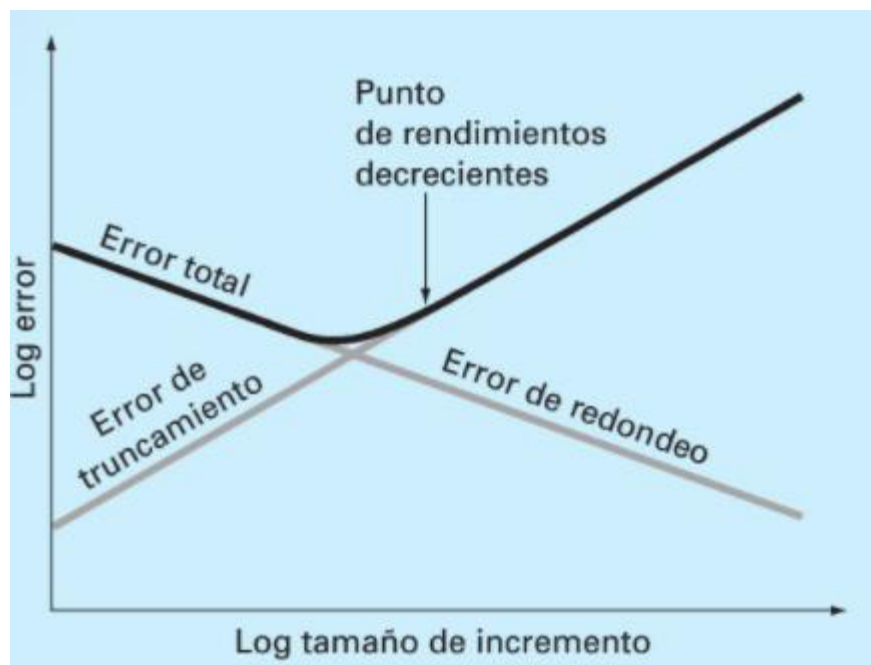


Figura 1.13 Representación gráfica de las relaciones entre el error de redondeo y el error de truncamiento.  
(Fuente: [18])

### **1.5.6.2 Convergencia**

El mallado para debe cubrir la mayoría de la geometría con los elementos finitos, si no se tiene un mallado adecuado para la solución del problema, los resultados aproximados no serán semejantes a los resultados reales, la convergencia se define como las condiciones de malla tanto en tamaño como en forma necesarias para que la solución aproximada sea análoga a la solución real. [19]

La convergencia es comprobable en casos donde se tiene la solución real y la comparación se hace efectiva, sin embargo, en los problemas donde no se tiene la solución la convergencia no es garantía de que los resultados son verídicos, en consecuencia, se hace un análisis basado en tres aspectos que son:

1. Convergencia numérica
2. Razonabilidad
3. Concordancia con las leyes físicas
4. Razonabilidad de las discontinuidades en el valor de las variables derivadas

## 2 METODOLOGÍA

El proceso de limado comparte similitudes con el corte ortogonal por la forma en cómo se lleva a cabo y las características que comparten, toda esta información se vio con anterioridad en el estado del arte. Por medio de una herramienta de corte con geometría básica se aplica una carga perpendicular a la dirección de la velocidad de corte generando el desprendimiento de material en la pieza mecanizada en una sola dirección.

El proceso de simulación se distribuye en tres partes:

La primera parte es el preprocesamiento, se inicia modelando la herramienta de corte junto con un prisma rectangular que representa la pieza que será mecanizada, en el software Solidworks 2015 y exportándola a ANSYS. Como siguiente paso se investigan las propiedades del material, dado que, en un proceso de corte cada material dependiendo de sus características y propiedades tiene un comportamiento diferente al ser mecanizado, junto con dichas propiedades se selecciona el modelo numérico propuesto por Johnson y Cook, que presenta el mejor comportamiento ante grandes deformaciones en un material, obteniendo las constantes del material útiles para el modelo propuesto.

La segunda parte de la simulación es el procesamiento, en donde se resuelve el problema por medio del software de elementos finitos escogido, es decir, con el modelo de interacción de Dinámica Explícita (Explicit Dynamics) contenido en la plataforma de ANSYS. Para este fin el software requiere algunos requisitos, los cuales son:

- Definir el comportamiento de rigidez.
- Asignar las propiedades de material que corresponden a cada cuerpo.
- Definir los contactos que actuarán en la simulación.
- Mallar todos los cuerpos.
- Escoger el tiempo de simulación.
- Definir las condiciones de contorno.
- Escoger los resultados que serán a analizados posteriormente.

Finalmente, se realiza el post-procesamiento en donde se analizan los resultados obtenidos en la simulación, se hacen comparaciones con resultados experimentales de otras investigaciones para determinar la veracidad del método y si es necesario se hacen correcciones en el preprocesamiento y/o en el procesamiento.

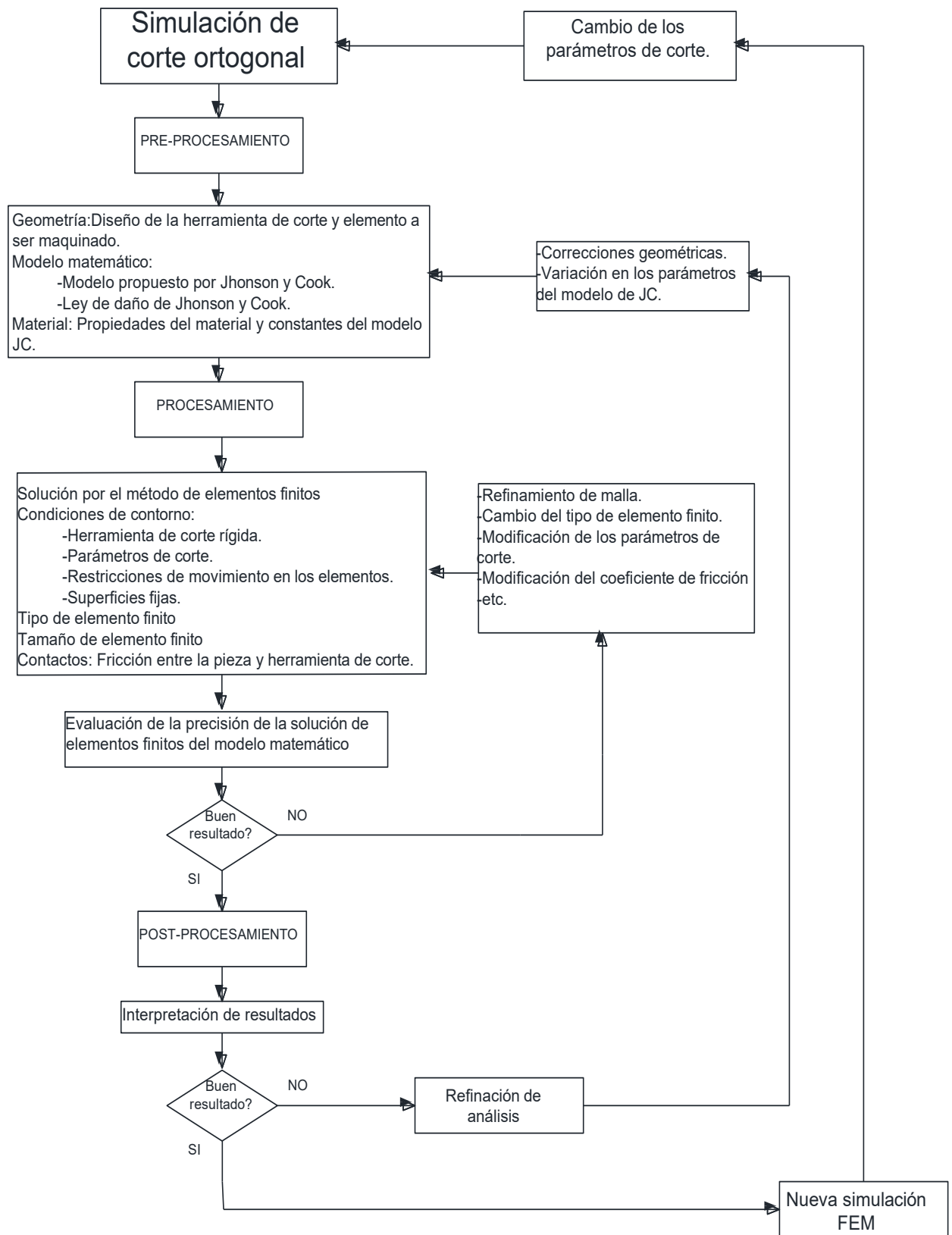


Figura 2.1 Metodología para el desarrollo del estudio.  
(Fuente: [Propia])

## **2.1 Modelo numérico**

En esta sección se tiene como objetivo la explicación del modelo numérico que se utilizó para la simulación de un proceso de corte ortogonal por medio del método de elementos finitos utilizando el software ANSYS 18.1.

El proceso de mecanizado considerado en este trabajo como corte ortogonal fue simulado teniendo como ecuaciones gobernantes a las propuestas por Johnson y Cook. Los parámetros de dichas ecuaciones correspondientes a la pieza de trabajo fueron consultados en B. O'Toole [22], un estudio de pruebas experimentales ya existentes y de estos datos depende mayoritariamente la geometría y resultados del análisis por elementos finitos; con respecto a la herramienta de corte, en este trabajo se la consideró como un cuerpo rígido, es decir, no presentará ninguna deformación antes o después del proceso de mecanizado, sin embargo, este cambio no afecta el proyecto debido a que el estudio se centra en el análisis del material de la pieza mecanizada.

La metodología de simulación está basada en el paper de Krishnakumar [1] en el cual se realiza el proceso de mecanizado utilizando el material AISI 4340, dicho trabajo contiene resultados experimentales y de simulación, se siguieron los pasos del trabajo de referencia adaptándolos al software ANSYS 18.1 con la finalidad de obtener un procedimiento de simulación y verificar que dicho procedimiento es aplicable al acero A36, material simulado en este trabajo.

### **2.1.1 Geometría y ángulos de la herramienta**

Para simular el proceso de corte ortogonal se necesitan dos cuerpos, la herramienta de corte y la pieza de trabajo que será maquinada. La herramienta de corte fue diseñada de la forma más simple, los ángulos principales fueron escogidos en base al prontuario tablas para la industria metalúrgica [23] y la pieza de trabajo fue creada como un prisma rectangular, ambas geometrías fueron dimensionadas en concordancia a la capacidad de los equipos computacionales disponibles para el proyecto y el tiempo de procesamiento en cada simulación.

SolidWorks 2015 fue el software utilizado tanto para la creación como para el ensamblaje de los cuerpos, es necesario decir que, en el ensamblaje se configura el avance y profundidad de corte. El archivo generado en el software tendrá el formato parasolid.x\_t con el propósito de exportarlo fácilmente a la plataforma de ANSYS 18.1.



## 2.1.2 Propiedades del material y ecuaciones constitutivas del modelo numérico

En el proceso de mecanizado las propiedades del material determinan la geometría de la viruta generada, por tanto, en el software se consideran las propiedades físicas y mecánicas más importantes, así como, las constantes del material necesarias que requiere la ecuación de Johnson y Cook para utilizarse en el método de elementos finitos. La tabla 2.1 contiene las propiedades requeridas en ANSYS para simular el corte ortogonal.

**Tabla 2.1 Propiedades utilizadas para la simulación del proceso de corte.**

| Propiedades  |   |
|--|---|
| Densidad (Density)                                     |   |
| Elasticidad Isotrópica                                 | Módulo de Young (Young's modulus)         |
|  | Coefficiente de Poisson (Poisson's ratio) |
|  | Módulo de compresión (Bulk modulus)       |
|  | Módulo de cortante (Shear modulus)        |
| Esfuerzo de fluencia (Tensile yield strength)          |   |
| Esfuerzo último (Tensile ultimate strength)            |   |
| Conductividad térmica (Isotropic thermal conductivity) |   |
| Calor específico (Specific heat)                       |   |
| Temperatura de fusión (Melting temperature)            |   |

(Fuente: [Propia])

Además de las propiedades del material se necesitan ecuaciones gobernantes para resolver matemáticamente el problema de corte ortogonal, en este proyecto se han elegido dos ecuaciones constitutivas que pertenecen a los mismos autores, la primera se enfoca en el comportamiento del material que está siendo desbastado y la segunda representa el material que ha sido desprendido en el mecanizado, es decir, la viruta. Estas ecuaciones son:

- Ley de comportamiento del material propuesta por Johnson y Cook

$$\bar{\sigma} = [A + B \cdot \varepsilon_p^n] \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - T_H^m) \quad (1.22)$$

$$T_H = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (1.23)$$

- Ley de daño de Johnson y Cook

$$\varepsilon^{-f} = [D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \bar{\sigma})][1 + D_4 \cdot \ln(\dot{\varepsilon}_{pl})] \left[ 1 + D_5 \cdot \left( \frac{T - T_0}{T_m - T} \right) \right] \quad (1.24)$$

Para más información revisar el apartado 1.4 donde se explica cada una de estas ecuaciones y sus componentes.

### 2.1.3 Mallado del modelo

Después de la exportación de la geometría de la pieza y la herramienta de corte, ANSYS por medio del modelo de interacción de dinámica explícita (Dynamics Explícit), se realizará el mallado de las geometrías tridimensionales.

Para realizar el mallado los puntos más importantes por definir son la forma y el tamaño de del elemento. En el paper de Krishnakumar [1] a estos los definen con una forma hexaédrica y un tamaño de 0.01 [mm]. De manera que con la intención de replicar el proceso lo más similar posible, se intentara utilizar los mismos parámetros. La forma hexaédrica se la adopto sin problema debido a que es sencilla y permite una menor capacidad computacional, por otro lado, utilizar tamaños de elemento de 0.01 [mm] representa una gran capacidad computacional y por ende no se podrían realizar simulaciones con tiempos idóneos y obtener resultados óptimos que no varíen en gran medida en comparación con los resultados obtenidos en el paper de Krishnakumar [1]. Por tal razón, se procederá a realizar un proceso de optimización con varias simulaciones de prueba con diferentes tamaños de elemento y sus análisis de independencia de malla, comenzando con tamaños de elemento de 0.1 [mm] y disminuyendo proporcionalmente 0.01 [mm], hasta encontrar un valor optimo donde los resultados no varíen en gran medida y conjúntame no represente una gran capacidad computacional para obtenerlos.

### 2.1.4 Condiciones de contorno

Para realizar un proceso de simulación de corte ortogonal es necesario definir las condiciones de contorno en el proceso de nuestro modelo. En la figura 2.2 se aprecia cada una de estas condiciones de contorno. La superficie inferior y la superficie del extremo de la pieza donde terminaría el proceso de corte deben permanecer fijas, su propósito es

limitar el movimiento horizontal y vertical de la pieza a ser mecanizada. En base al sistema de coordenadas de la figura 2.2 se debe tomar en cuenta que la reacción en el eje Z debe ser cero. Con estas condiciones, en la parte superior de la pieza, produce la formación de la viruta.

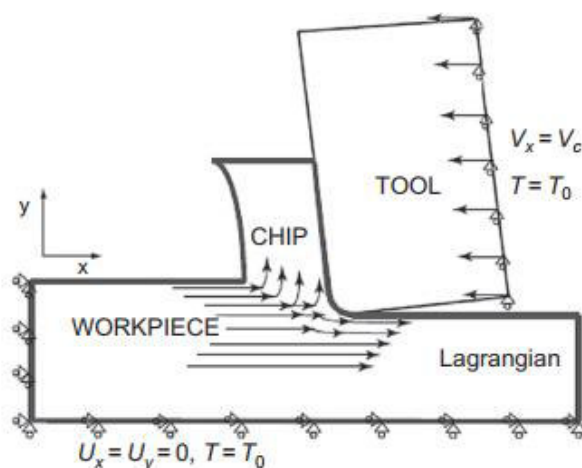


Figura 2.2 Modelo de simulación usado en un corte ortogonal y sus condiciones de contorno. (Fuente: [5])

Definir la velocidad de corte es otro parámetro muy importante, para el estudio se define en base al material de la pieza a ser mecanizada y la herramienta de corte.

Para el corte ortogonal después de la deformación, aparece un corte denominado como corte secundario resultante del parámetro de la fricción, para el estudio se toma como coeficiente de fricción al valor de 0.5 definido en el paper de Krishnakumar [1].

## 2.2 Simulación de proceso de mecanizado para validación

La principal finalidad de este apartado es la utilización de toda la información definida en el apartado 2.1; realizar la simulación de corte ortogonal para comparar los resultados obtenidos de nuestro proceso y los resultados tanto experimentales como simulados, definidos en Krishnakumar [1]. Para validar que nuestro proceso permite realizar una simulación de corte ortogonal de manera correcta y obtener resultados óptimos.

En el estudio de referencia, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos para predecir el efecto de las fuerzas de corte en el material de trabajo durante el torneado de múltiples pasadas del acero AISI 4340. La morfología de la viruta y la variación de fuerza durante el mecanizado también se cuantifican utilizando el modelo numérico de elementos finitos. El modelo de material de Johnson y Cook y el modelo de daño de Johnson y Cook. El modelo de elementos finitos desarrollado en este estudio fue validado con los datos experimentales de Krishnakumar [1], mediante el estudio de la morfología de la viruta y la

variación de la fuerza de corte durante el mecanizado. Los resultados indican que existe una buena correlación entre los resultados numéricos y los resultados experimentales. [1]

Se tomó los datos experimentales y se los comparo con los resultados del modelo numérico nuestro para poder validar nuestro proceso y posteriormente realizar estudios con el acero ASTM A-36, el cual está definido en el apartado 2.3 y es la finalidad de este estudio.

## 2.2.1 Geometría y Ángulos de corte

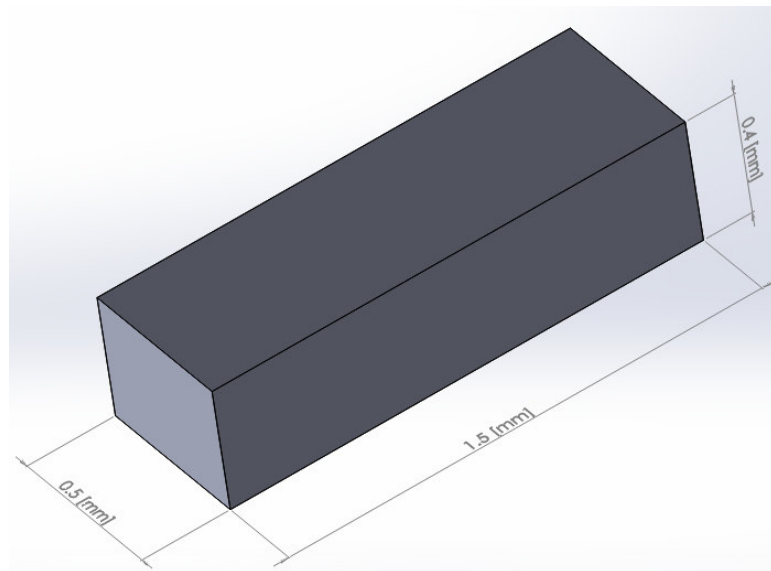


Figura 2.3 Dimensiones de la pieza de trabajo.  
(Fuente: [Propia])

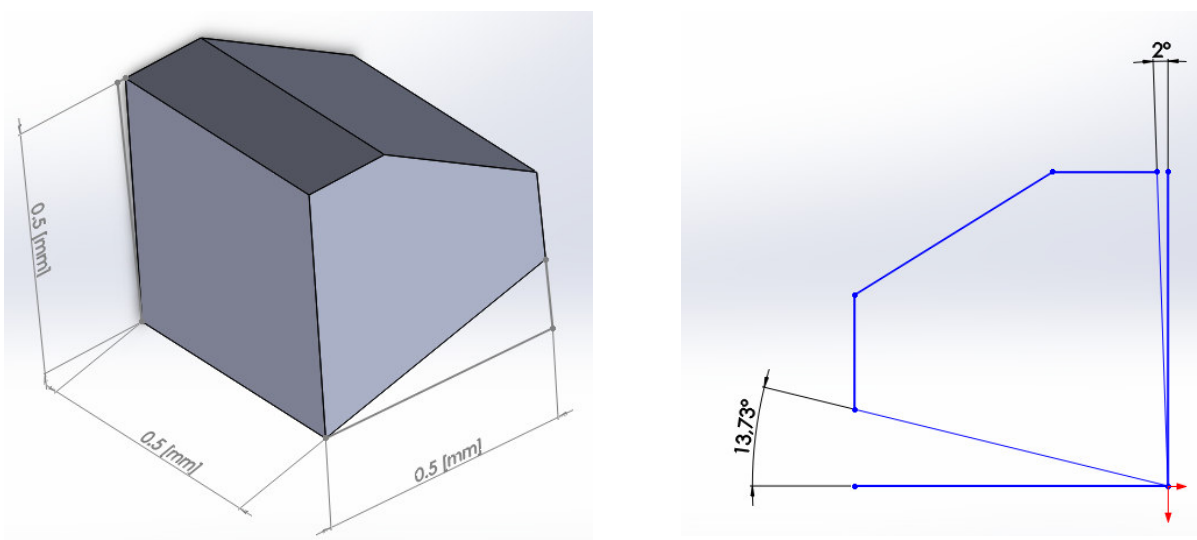


Figura 2.4 Dimensiones de la herramienta de corte. Ángulos de corte. Dimensión de corte.  
(Fuente: [1])

En este punto, Krishnakumar [1] sólo muestra el ángulo de incidencia ( $\alpha$ ) con un valor de  $2^\circ$ ; al no tener el valor del ángulo de inclinación ( $\gamma$ ), se tomó utilizó el método de proporción geométrica y se obtuvo el valor  $13.73^\circ$ .

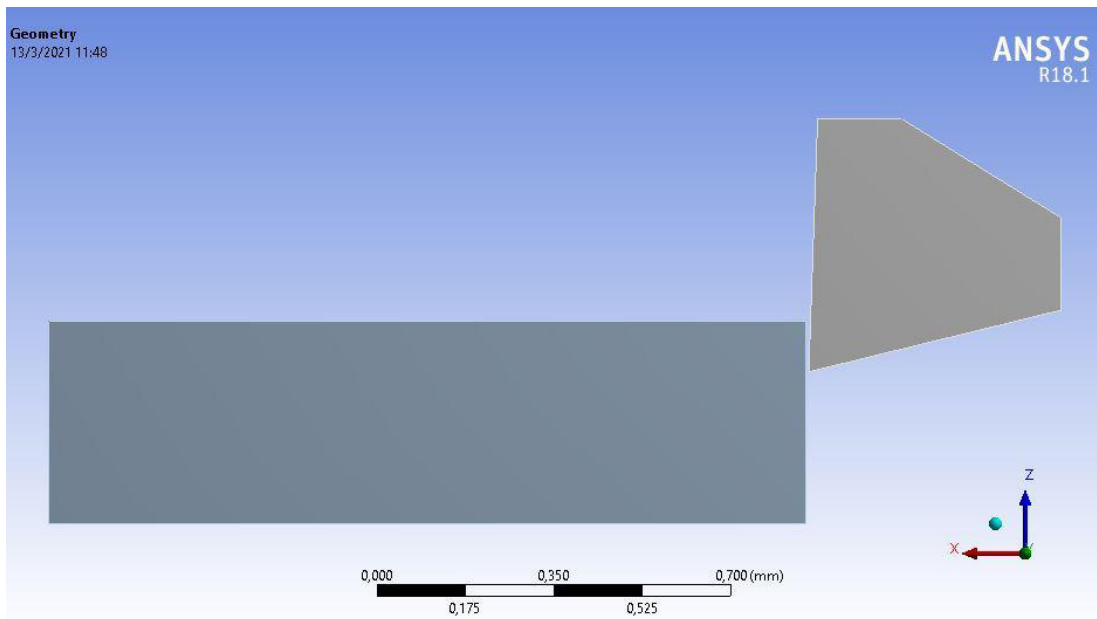


Figura 2.5 Modelo de la pieza de trabajo y la herramienta de corte.  
(Fuente: [Propia])

## 2.2.2 Datos de material

La interfaz de ANSYS 18.1 permite la programación de cada uno de los valores de las propiedades necesarias del material de la pieza a ser mecanizada, en el modelo numérico. Cada uno de estos valores está definido en la tabla 2.2 y en la figura 2.6 se muestra la interfaz de programación de las propiedades en ANSYS.

**Tabla 2.2 Propiedades del acero AISI 4340**

| <b>Propiedades del acero AISI 4340</b>                               |                           |
|--|---------------------------|
| Densidad   | 7800 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Módulo de Young  | 210 [GPa]                 |
| Coefficiente de Poisson  | 0.3                       |
| Esfuerzo de fluencia   | 600 [MPa]                 |
| Esfuerzo ultimo  | 880 [MPa]                 |
| Conductividad térmica  | 47.7 [W/(°C*m)]           |
| Calor especifico   | 475 [J/(°C*kg)]           |
| <b>Modelo de comportamiento del material de Johnson y Cook</b>       |                           |
| A=Límite elástico a temperatura ambiente                             | 490 [MPa]                 |
| B=Endurecimiento por deformación plástica                            | 600 [MPa]                 |
| n=Parámetro adimensional del endurecimiento por deformación plástica | 0.21                      |
| C=Sensibilidad a la velocidad de deformación                         | 0.015                     |
| m=Sensibilidad a la temperatura                                      | 0.6                       |
| Temperatura de fusión  | 1525 [°C]                 |
| <b>Modelo de daño de Johnson y Cook</b>                              |                           |
| D1   | 0.05                      |
| D2   | 3.44                      |
| D3   | -2.12                     |
| D4   | 0.002                     |
| D5   | 0.61                      |

(Fuente: [1])

| Property                       | Value              | Unit                               |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Material Field Variables       | Table              |                                    |
| Density                        | 7800               | kg m <sup>-3</sup>                 |
| Isotropic Elasticity           |                    |                                    |
| Derive from                    | Young's Modulus... |                                    |
| Young's Modulus                | 2,1E+11            | Pa                                 |
| Poisson's Ratio                | 0,3                |                                    |
| Bulk Modulus                   | 1,75E+11           | Pa                                 |
| Shear Modulus                  | 8,0769E+10         | Pa                                 |
| Tensile Yield Strength         | 600                | MPa                                |
| Tensile Ultimate Strength      | 880                | MPa                                |
| Isotropic Thermal Conductivity | 47,7               | W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>  |
| Specific Heat                  | 475                | J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Johnson Cook Strength          |                    |                                    |
| Strain Rate Correction         | First-Order        |                                    |
| Initial Yield Stress           | 490                | MPa                                |
| Hardening Constant             | 600                | MPa                                |
| Hardening Exponent             | 0,21               |                                    |
| Strain Rate Constant           | 0,015              |                                    |
| Thermal Softening Exponent     | 0,6                |                                    |
| Melting Temperature            | 1525               | C                                  |
| Reference Strain Rate (/sec)   | 1                  |                                    |
| Johnson Cook Failure           |                    |                                    |
| Damage Constant D1             | 0,05               |                                    |
| Damage Constant D2             | 3,44               |                                    |
| Damage Constant D3             | -2,12              |                                    |
| Damage Constant D4             | 0,002              |                                    |
| Damage Constant D5             | 0,61               |                                    |
| Melting Temperature            | 1525               | C                                  |
| Reference Strain Rate (/sec)   | 1                  |                                    |

Figura 2.6 Propiedades del material ACERO AISI 4340, constantes de material de Johnson y Cook y constantes de daño de Johnson y Cook.  
(Fuente: [Propia])

### 2.2.3 Mallado del modelo

En Krishnakumar [1] se realizó un mallado con elementos cuadráticos y un tamaño de 0.01 [mm] para un proceso de corte ortogonal bidimensional, sin embargo, en este trabajo el análisis es tridimensional y aparecen más elementos en el mallado que necesitan un mayor procesamiento para llegar a la solución, es por eso que se decidió utilizar elementos hexaédricos de 0.04 [mm], con la finalidad de reducir la carga computacional en la simulación, sin afectar los resultados.

La malla obtenida tiene 7100 elementos con 8726 nodos y su calidad se midió en base a la métrica de calidad ortogonal, donde para ser considerado un mallado óptimo, las calidades deben estar cercanas a la unidad y no ser menores a 0.1. En la figura 2.7 se muestra la calidad de la malla.

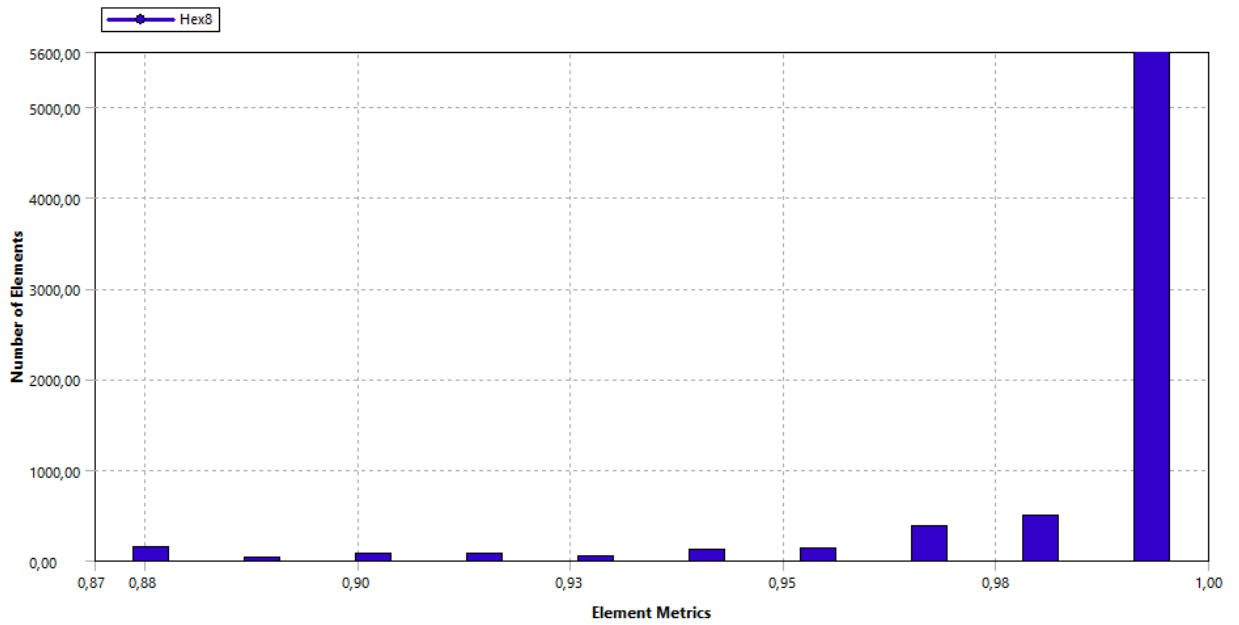


Figura 2.7 Calidad ortogonal del mallado  
(Fuente: [Propia])

En la calidad ortogonal el cálculo de valores es el coseno del ángulo formado entre el vector normal de las caras de un elemento y el vector formado entre el centroide del elemento y el centroide de dichas caras; para este caso casi en su totalidad los elementos tienen un valor de calidad cercana a la unidad, por lo tanto, se considera una malla de alta calidad.

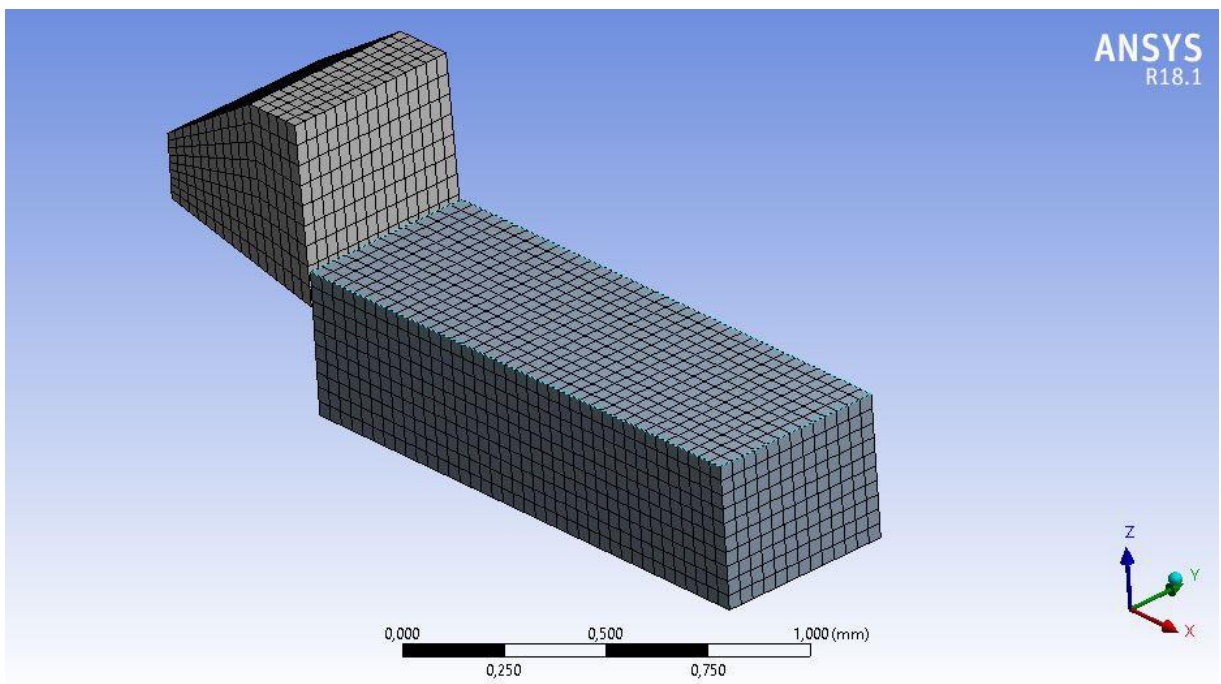


Figura 2.8 Modelo 3D de malla generada de la pieza de trabajo y la herramienta de corte.  
(Fuente: [Propia])



## 2.2.4 Modelo numérico

En base a los datos del material y la geometría, se realiza el análisis en la interfaz de Dinámica Explícita de Ansys Workbench 18.1.

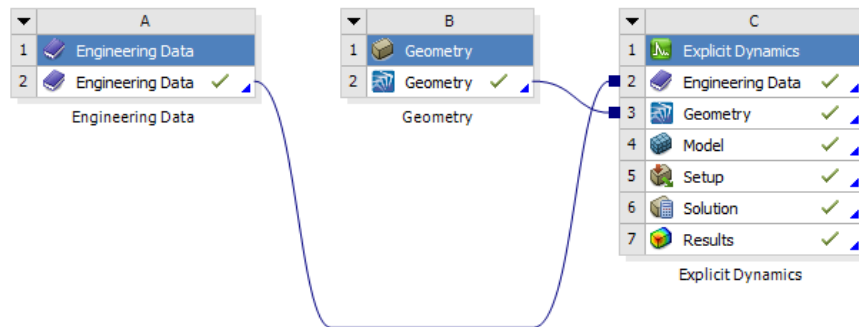


Figura 2.9 Diagrama de componentes utilizados para la simulación de Dinámica Explícita en ANSYS.

(Fuente: [Propia])

- Material

**Tabla 2.3 Materiales y su comportamiento en la simulación.**

| Pieza                | Material  |          |
|----------------------|-----------|----------|
| Pieza de trabajo     | AISI 4340 | Flexible |
| Herramienta de corte | -         | Rígido   |

(Fuente: [Propia])

**Nota:** Al considerar a la herramienta de corte como una pieza rígida, no se considera las propiedades del mismo y no afectan a la simulación del proceso de corte.

- Condiciones de contorno

Las dos caras de la pieza a ser maquinada deben ser consideradas fijas.

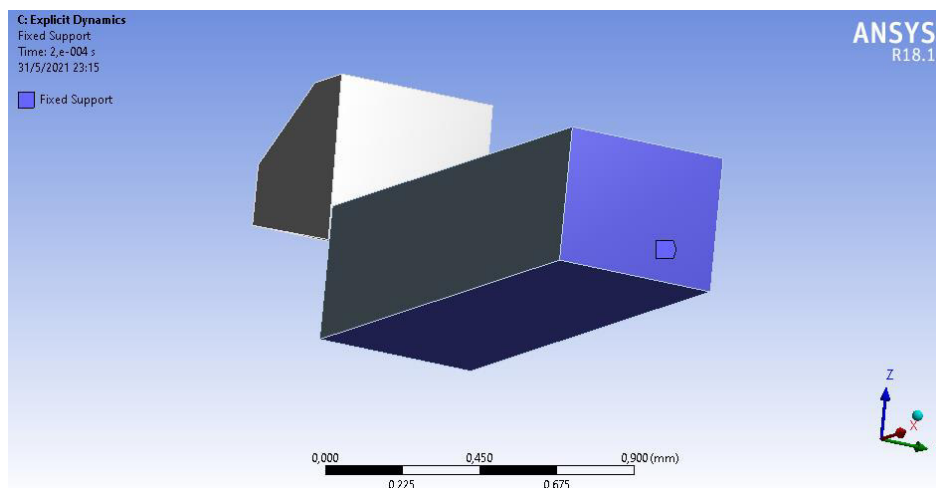
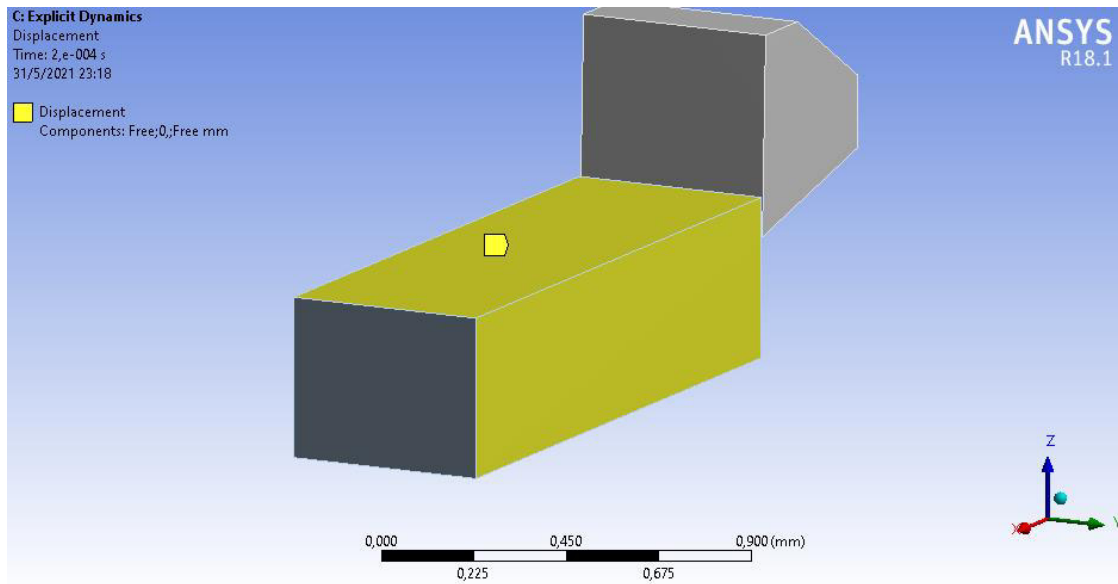


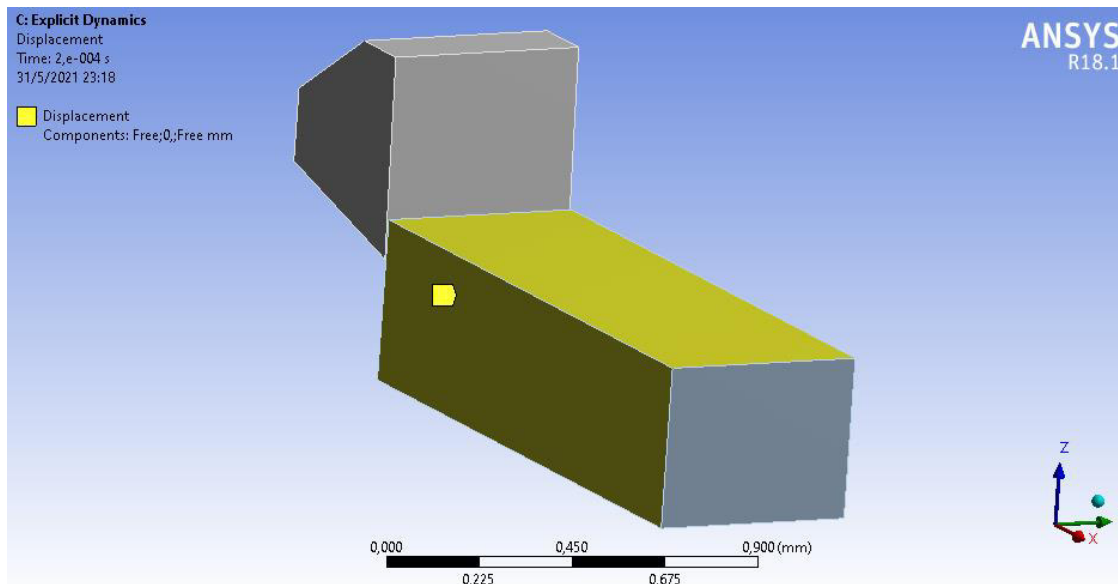
Figura 2.10 Superficies fijas de la pieza de trabajo en el proceso de simulación.

(Fuente: [Propia])

Tres caras se consideran sin desplazamientos en el eje Y.



a)



b)

Figura 2.11 Superficies sin desplazamiento en el eje Y en la pieza de trabajo en el modelo 3D.

a) Perfil izquierdo. b) Perfil derecho.

(Fuente: [Propia])

Velocidad de corte,  $V_c=70$  [m/min]

Profundidad de corte,  $a=0.1$  [mm]

Avance,  $s=0.5$  [mm]

Todos estos valores son tomados en base al estudio de referencia Krishnakumar [1].

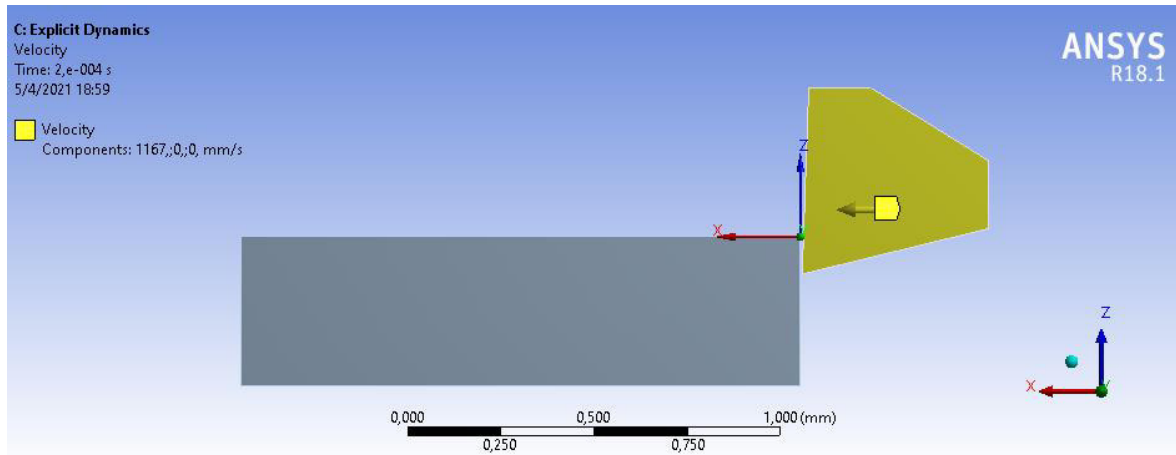


Figura 2.12 Dirección de la velocidad en la herramienta de corte.  
(Fuente: [Propia])

- Parámetros de simulación

Coefficiente de fricción: 0,5

Tiempo de simulación: 0,0002[s]

El valor de coeficiente de fricción esta tomado en base al estudio de referencia Krishnakumar [1] y el tiempo de simulación se tomó como un valor promedio donde la carga computacional es aceptable y la cantidad de valores obtenidos son suficientes para desarrollar un análisis concreto.

## 2.2.5 Resultados

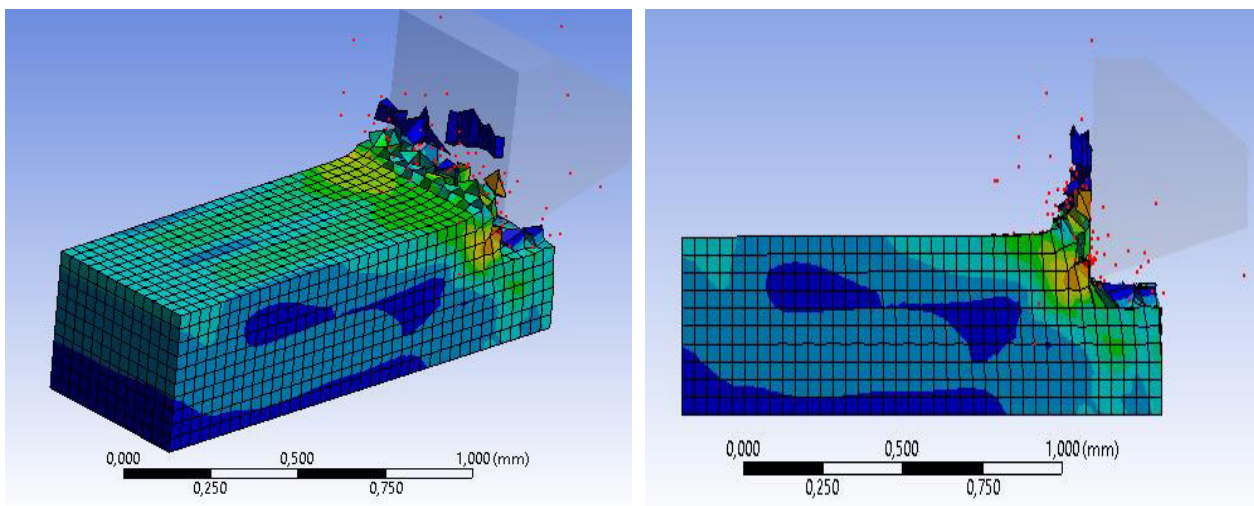


Figura 2.13 Modelo 3D del proceso de corte a los 0,0002 [s].  
(Fuente: [Propia])

En el proceso de simulación realizado en el estudio de referencia Krishnakumar [1], se realizó un proceso experimental con el cual validaron el proceso de simulación por medio de la fuerza de corte  $F_c$ . La finalidad del modelo numérico desarrollado en ANSYS por nuestra autoría es la comparación de los valores tanto experimental como simulado del estudio de referencia con los valores obtenidos de la simulación desarrollada por nuestra autoría, en la figura 2.14 se visualiza esta comparación.

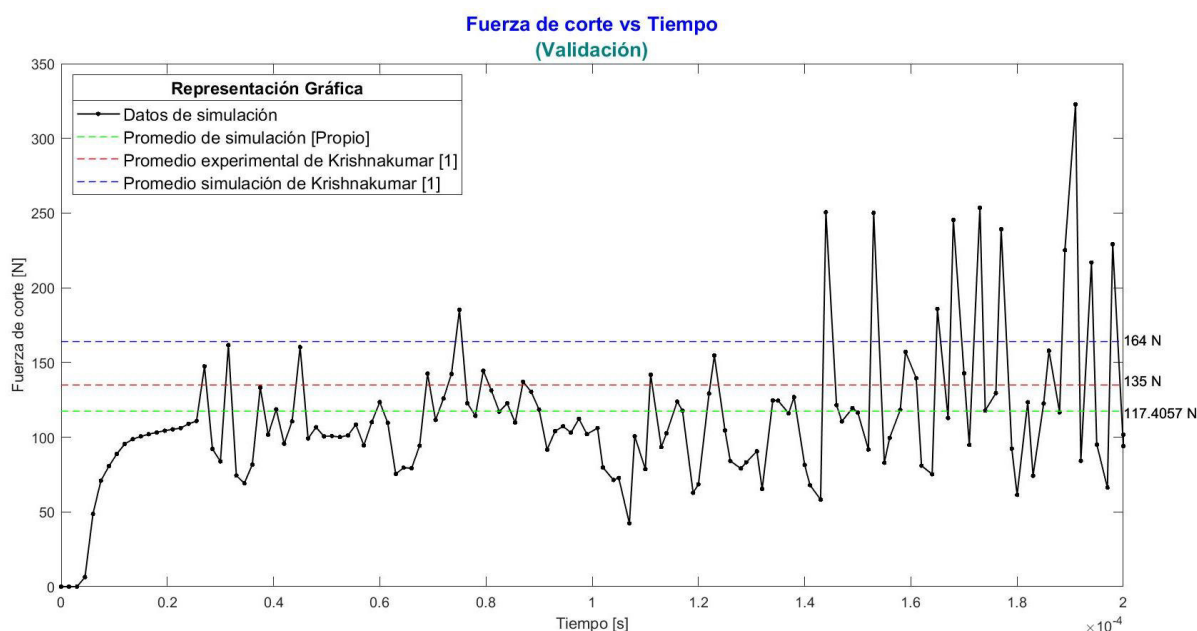


Figura 2.14 Gráfica Tiempo vs. Fuerza de corte en el proceso de simulación de validación. (Fuente: [Propia])

**Tabla 2.4 Valores de Fuerza de corte y Errores porcentuales.**

| Tipo de fuerza de corte                       | Valor [N] | Error [%] |
|---|-----------|-----------|
| Fuerza de corte Experimental Krishnakumar [1] | 135       | -         |
| Fuerza de corte Simulada Krishnakumar [1]     | 159,25    | 17,96     |
| Fuerza de corte Simulada [Propia]             | 117,4057  | 13,03     |

(Fuente: [Propia])

En el paper de Krishnakumar [1] se obtiene un porcentaje de error entre el valor de la fuerza de corte experimental y la fuerza de corte obtenida por simulación de 17.96%, mientras que al replicar el estudio con las mismas condiciones en el software ANSYS y en un modelo tridimensional, se obtuvo un error del 13,03%, por lo que se llega a la conclusión de que el modelo desarrollado es óptimo y puede ser utilizado como punto de partida para la simulación de un corte ortogonal para el acero ASTM A-36.

## 2.3 Simulación del proceso de mecanizado por corte ortogonal para el acero ASTM A-36

Este estudio se realizó con el propósito de investigar y modelar el comportamiento mecánico al mecanizar un acero ASTM A-36 por limado, por medio de un proceso de corte ortogonal en el software de elementos finitos ANSYS; se determinó la influencia de la velocidad de corte y profundidad de corte, en la interfaz herramienta-viruta sobre las fuerzas de corte, deformación plástica, deformación elástica y los esfuerzos equivalentes. Para lograr esto, se realizó un proceso de validación del modelo numérico desarrollado por nuestra autoría con base al proceso de simulación del paper de Krishnakumar [1]; el resumen del proceso de validación es discutido en el apartado 2.2.

Al validar el modelo numérico se obtuvo un dato importante, si se mantiene la profundidad de corte y varía la velocidad de corte los datos de esfuerzo varían ínfimamente, dato que ayudó a resolver un problema dentro del modelo de interacción de dinámica explícita (Dynamics Explícit) ,el cual es el tiempo de simulación, generalmente los tiempos de simulación en dinámica explícita van en el orden de los microsegundos y al tener velocidades de corte muy bajas en el limado como se observó en la tabla 1.4 se necesitan tiempos de simulación prolongados para tener resultados visibles, razón por la cual, se optó por utilizar velocidades de corte altas adecuadas para el acero ASTM A-36 utilizadas en un proceso de torneado mediante una herramienta de corte de carburo según DIN observadas en la tabla 1.3 y obtenidas en el prontuario tablas para la industria metalúrgica [23].

Trabajando con estas velocidades se reducen los tiempos de simulación teniendo resultados visibles y aptos para el análisis. En base a estos datos se hicieron 16 simulaciones variando la velocidad de corte y la profundidad de corte, los valores seleccionados se detallan en la tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Velocidades y Profundidades de corte utilizadas.**

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| <b>Velocidades de corte</b>   | 170 [m/min] |
|                               | 200 [m/min] |
|                               | 236 [m/min] |
|                               | 280 [m/min] |
| <b>Profundidades de corte</b> | 0,1 [mm]    |
|                               | 0,2 [mm]    |
|                               | 0,4 [mm]    |
|                               | 0,8 [mm]    |

(Fuente: [Propia])

### 2.3.1 Geometría y Ángulos de corte

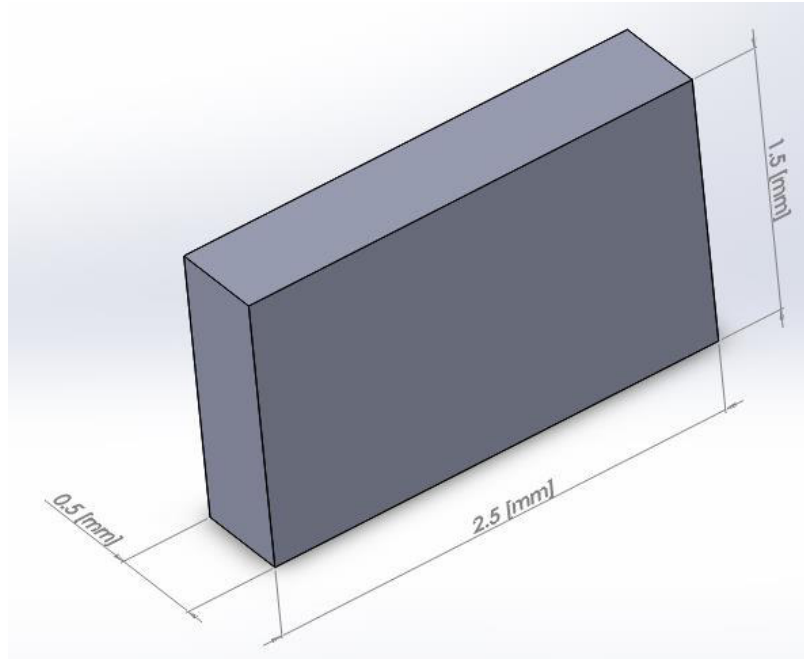


Figura 2.15 Dimensiones de la pieza de trabajo.  
(Fuente: [Propia])

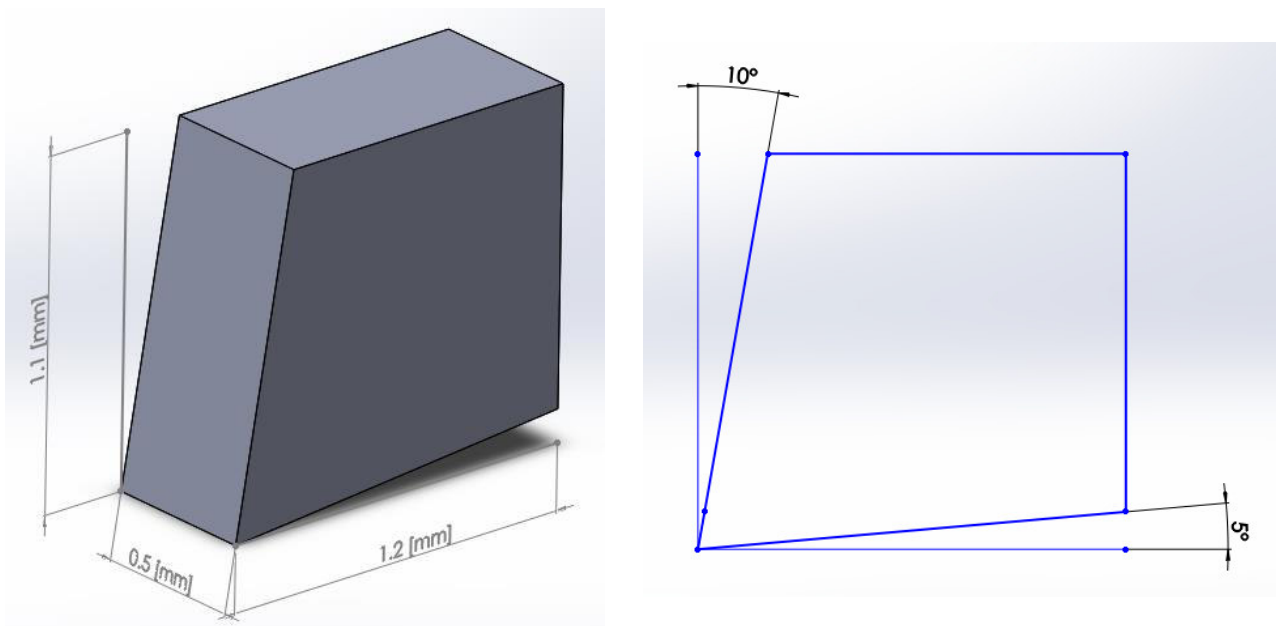


Figura 2.16 Dimensiones de la herramienta de corte. Ángulos de corte. Dimensiones de corte.  
(Fuente: [Propia])

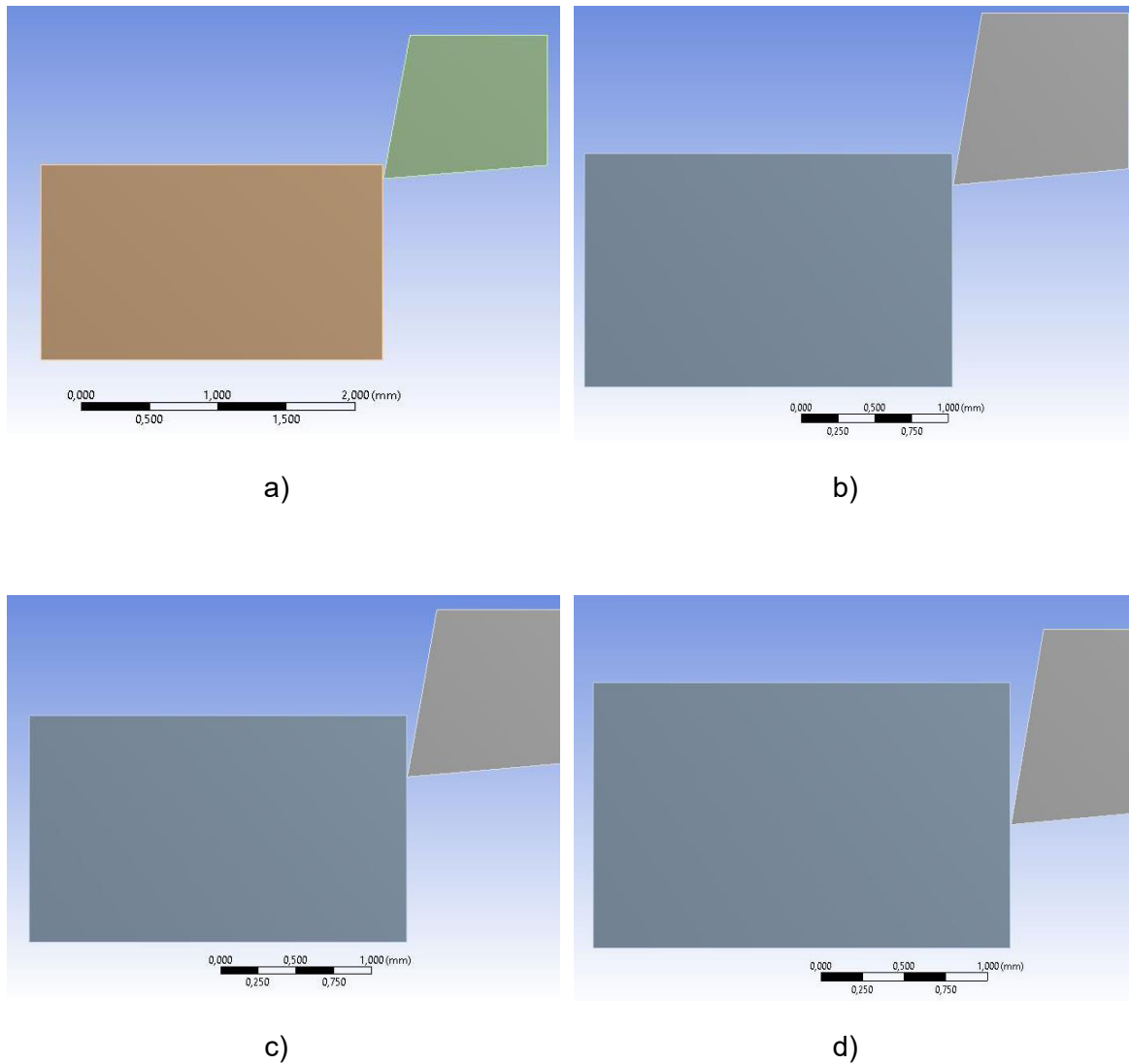


Figura 2.17 Modelos 2D de la pieza de trabajo y la herramienta de corte a) Profundidad de corte 0,1[mm]. b) Profundidad de corte 0,2[mm]. c) Profundidad de corte 0,4[mm] d) Profundidad de corte 0,8[mm].  
(Fuente: [Propia])

### 2.3.2 Datos de material

La interfaz de ANSYS 18.1 permite la programación de cada uno de los valores de las propiedades necesarias del material de la pieza a ser mecanizada, en el modelo numérico. Para el acero ASTM-A36 todos los valores de propiedades y constantes de Jhonson y Cook se tomaron en base al paper de Roy [24]. Cada uno de estos valores está definido en la tabla 2.6 y en la figura 2.17 se muestra la interfaz de programación de las propiedades en ANSYS.

**Tabla 2.6 Propiedades del acero ASTM A-36**

| <b>Propiedades del acero ASTM A-36</b>                               |                           |
|--|---------------------------|
| Densidad   | 7850 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| Módulo de Young  | 210 [GPa]                 |
| Coefficiente de Poisson  | 0.3                       |
| Esfuerzo de fluencia   | 248 [MPa]                 |
| Esfuerzo ultimo  | 345 [MPa]                 |
| Conductividad térmica  | 56 [W/(°C*m)]             |
| Calor específico   | 460 [J/(°C*kg)]           |
| <b>Modelo de comportamiento del material de Johnson y Cook</b>       |                           |
| A=Límite elástico a temperatura ambiente                             | 286.13 [MPa]              |
| B=Endurecimiento por deformación plástica                            | 500.15 [MPa]              |
| n=Parámetro adimensional del endurecimiento por deformación plástica | 0.2282                    |
| C=Sensibilidad a la velocidad de deformación                         | 0.022                     |
| m=Sensibilidad a la temperatura                                      | 0.917                     |
| Temperatura de fusión  | 1538 [°C]                 |
| <b>Modelo de daño de Johnson y Cook</b>                              |                           |
| D1   | 0.403                     |
| D2   | 1.107                     |
| D3   | -1.899                    |
| D4   | 0.00961                   |
| D5   | 0.3                       |

(Fuente: [24])



| Property                       | Value                     | Unit                               |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Material Field Variables       | Table                     |                                    |
| Density                        | 7850                      | kg m <sup>-3</sup>                 |
| Isotropic Elasticity           |                           |                                    |
| Derive from                    | Young's Modulus and Po... |                                    |
| Young's Modulus                | 2,1E+11                   | Pa                                 |
| Poisson's Ratio                | 0,3                       |                                    |
| Bulk Modulus                   | 1,75E+11                  | Pa                                 |
| Shear Modulus                  | 8,0769E+10                | Pa                                 |
| Tensile Yield Strength         | 2,482E+08                 | Pa                                 |
| Tensile Ultimate Strength      | 3,45E+08                  | Pa                                 |
| Isotropic Thermal Conductivity | 56                        | W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>  |
| Specific Heat                  | 460                       | J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Johnson Cook Strength          |                           |                                    |
| Strain Rate Correction         | First-Order               |                                    |
| Initial Yield Stress           | 2,8613E+08                | Pa                                 |
| Hardening Constant             | 5,0015E+08                | Pa                                 |
| Hardening Exponent             | 0,228                     |                                    |
| Strain Rate Constant           | 0,022                     |                                    |
| Thermal Softening Exponent     | 0,917                     |                                    |
| Melting Temperature            | 1538                      | C                                  |
| Reference Strain Rate (/sec)   | 1                         |                                    |
| Johnson Cook Failure           |                           |                                    |
| Damage Constant D1             | 0,403                     |                                    |
| Damage Constant D2             | 1,107                     |                                    |
| Damage Constant D3             | -1,399                    |                                    |
| Damage Constant D4             | 0,00961                   |                                    |
| Damage Constant D5             | 0,3                       |                                    |
| Melting Temperature            | 1538                      | C                                  |
| Reference Strain Rate (/sec)   | 1                         |                                    |

Figura 2.18 Propiedades del material ACERO A 36, constantes de material de Johnson y Cook y constantes de daño de Johnson y Cook.  
(Fuente: [Propia])

### 2.3.3 Mallado del modelo

Siguiendo el mismo proceso de mallado en el apartado 2.2.3, se tiene un mallado de elemento hexaédrico con un tamaño de 0.4 [mm].

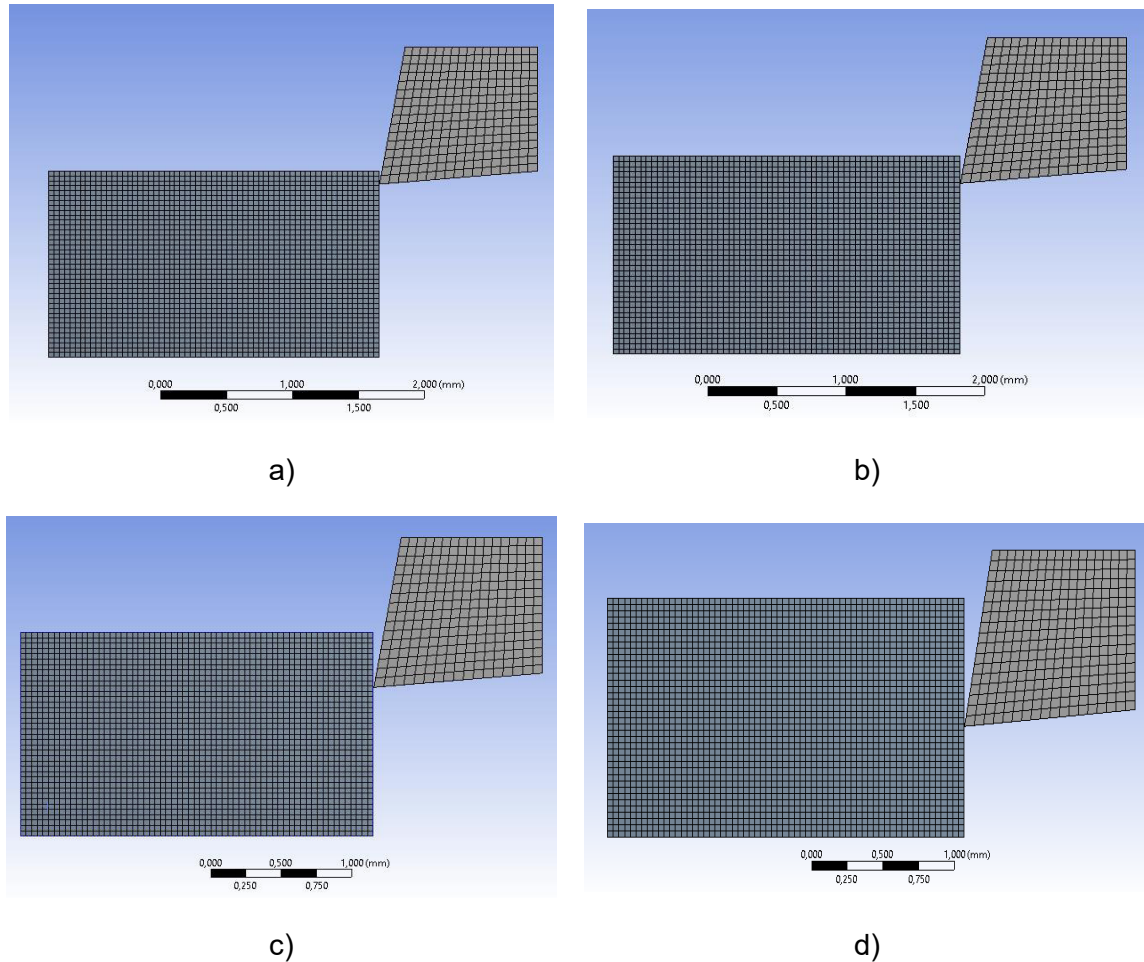


Figura 2.19 Modelos ED de la malla generada en la pieza de trabajo y la herramienta de corte. a) Profundidad de corte 0,1[mm]. b) Profundidad de corte 0,2[mm]. c) Profundidad de corte 0,4[mm] d) Profundidad de corte 0,8[mm].

(Fuente: [Propia])

La malla obtenida tiene 33298 elementos y 37698 nodos.

### 2.3.4 Modelo numérico

En base a los datos del material y la geometría, se realiza el análisis en la interfaz de Dinámica Explícita de Ansys Workbench 18.1.

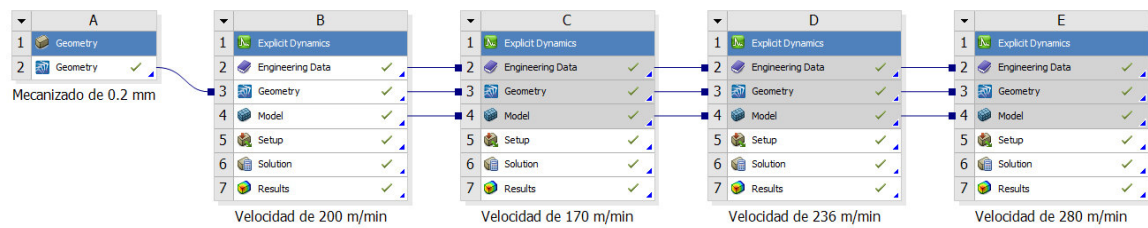


Figura 2.20 Diagrama de componentes utilizados para la simulación de Dinámica Explícita en ANSYS.

(Fuente: [Propia])

- Material

**Tabla 2.7 Materiales y comportamiento en la simulación.**

| Pieza                | Material |          |
|----------------------|----------|----------|
| Pieza de trabajo     | A 36     | Flexible |
| Herramienta de corte | -        | Rígido   |

(Fuente: [Propia])

**Nota:** Al considerar a la herramienta de corte como una pieza rígida, está de más poner un material al mismo, debido a que las propiedades del mismo no afectan a la simulación del proceso de corte.

- Condiciones de contorno

Las dos caras de la pieza a ser maquinada se consideran fijas.

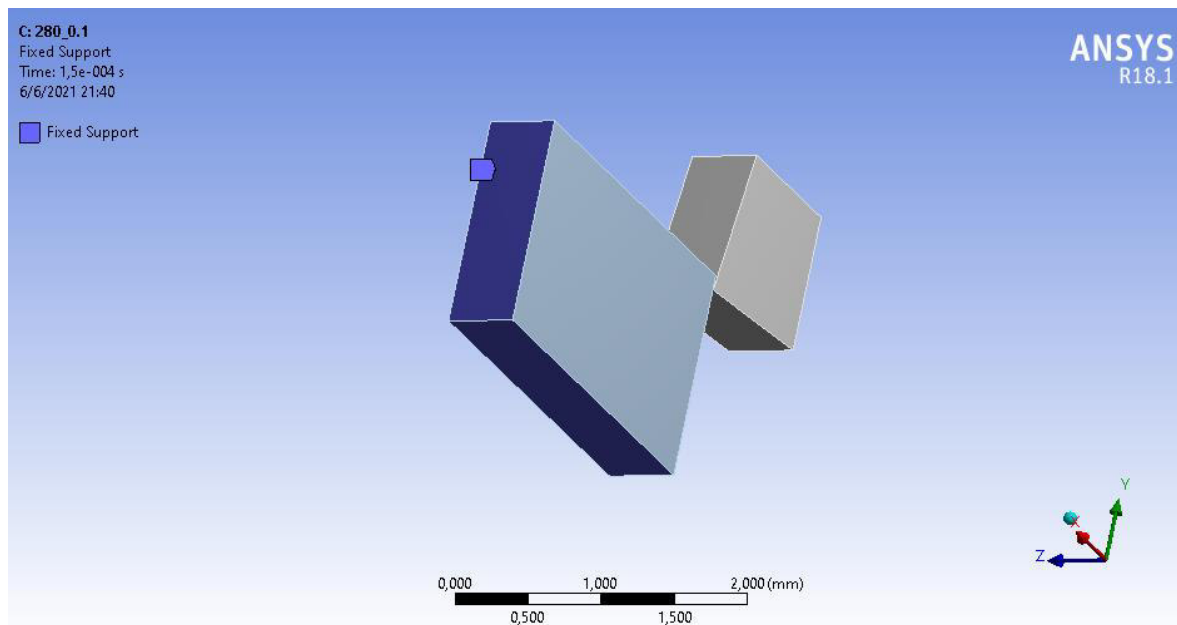


Figura 2.21 Superficies fijas de la pieza de trabajo en el proceso de simulación.

(Fuente: [Propia])

Tres caras se consideran sin desplazamientos en el eje Z.

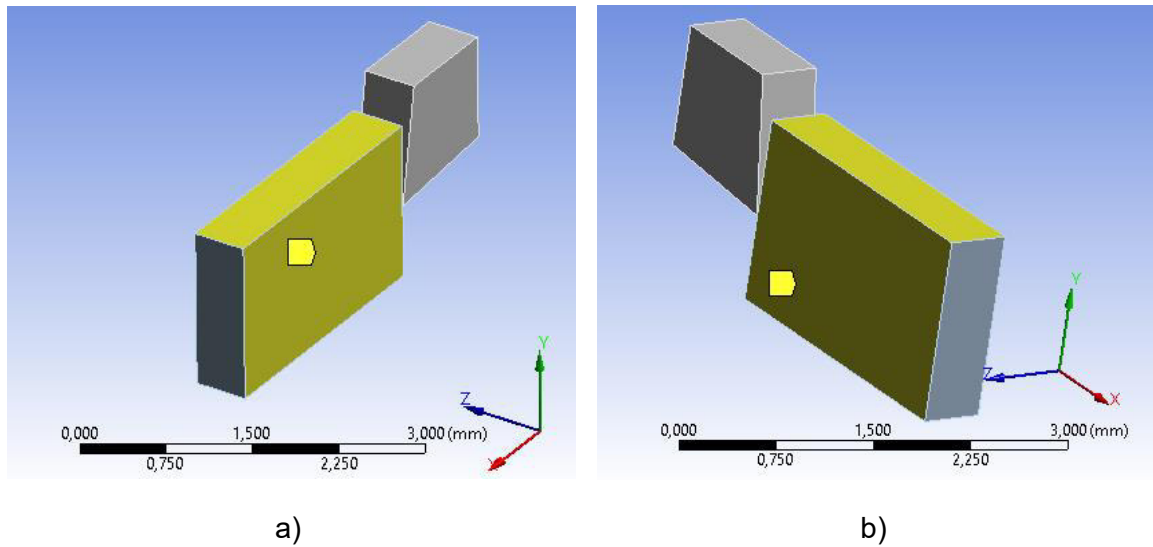


Figura 2.22 Superficies sin desplazamiento en el eje Z en la pieza de trabajo en el modelo 3D.  
a) Perfil izquierdo. b) Perfil derecho.  
(Fuente: [Propia])

En este caso se considera 4 diferentes tipos de velocidades para cada profundidad de corte.

- Velocidades de corte

170 [m/min], 200 [m/min], 236 [m/min] y 280 [m/min]

- Parámetros de simulación

Coefficiente de fricción: 0,5

Tiempo de simulación: 0,00015[s]

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó la validación en base a los datos experimentales obtenidos de Krishnakumar [1] y según lo observado en los resultados se decidió los parámetros y el número de simulaciones para este trabajo, las 16 simulaciones tuvieron su propio comportamiento y en esta sección se analizan los datos obtenidos en cada una.

#### 3.1.1 Esfuerzos equivalentes

Como criterio de evaluación estructural se usó el esfuerzo equivalente de Von Mises, que en términos generales se considera el criterio de preferencia a contrastar con el esfuerzo de fluencia de un material al determinar su integridad estructural, especialmente en un análisis de elementos finitos usando un material isotrópico.

Se obtuvo varios valores a través del tiempo en cada una de las configuraciones simuladas. En la tabla 3.1 se detallan los valores de esfuerzo equivalente promedio obtenidos en cada una de las configuraciones de diferentes velocidades de corte y profundidades de corte.

**Tabla 3.1 Valores de esfuerzos equivalentes promedios de las simulaciones realizadas.**

| Velocidad de corte [m/min] | Profundidad de corte [mm] |          |          |          |
|----------------------------|---------------------------|----------|----------|----------|
|                            | 0,1                       | 0,2      | 0,4      | 0,8      |
|                            | <b>[MPa]</b>              |          |          |          |
| <b>170</b>                 | 803,8247                  | 811,3547 | 809,6853 | 809,1006 |
| <b>200</b>                 | 790,2312                  | 809,8629 | 808,3841 | 813,4647 |
| <b>236</b>                 | 809,1476                  | 813,8359 | 812,7029 | 815,5029 |
| <b>280</b>                 | 808,9135                  | 814,6318 | 817,0959 | 820,5182 |

(Fuente: [Propia])

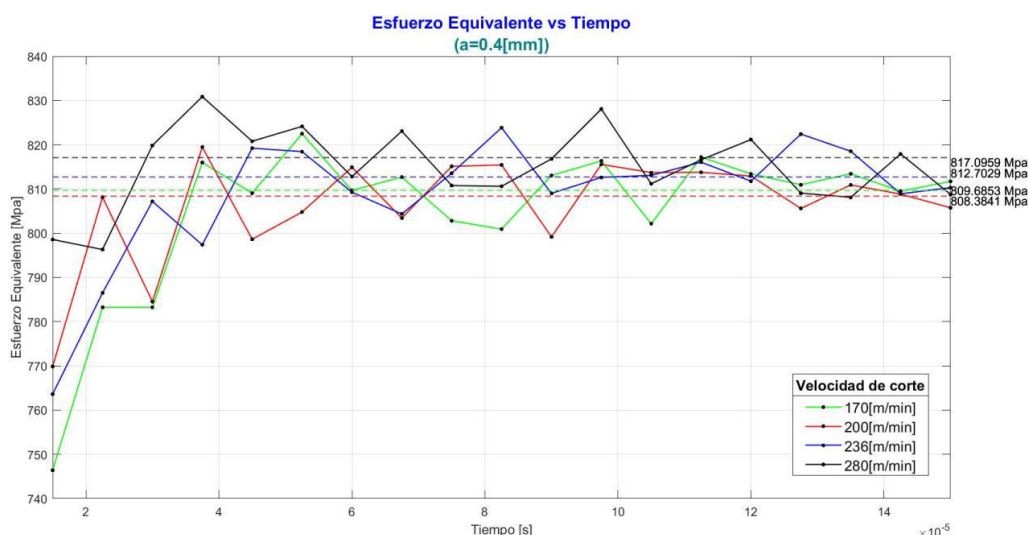


Figura 3.1 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a varias velocidades de corte y a=0.4[mm]. (Fuente: [Propia])

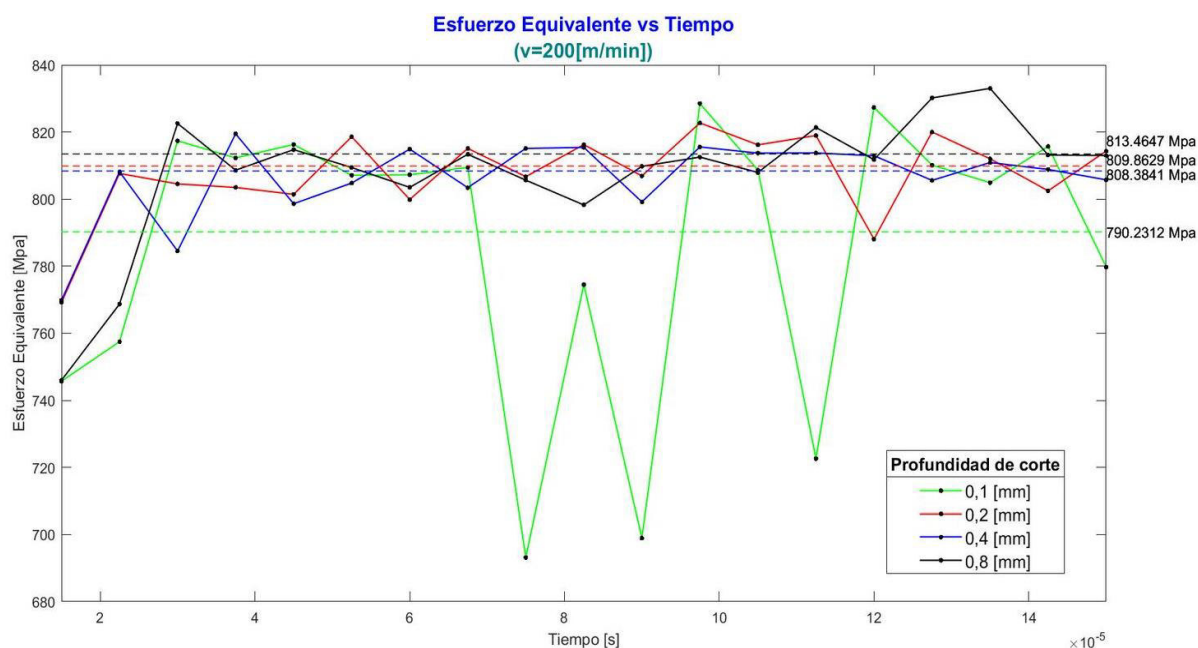


Figura 3.2 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a varias profundidades de corte y  $V_c=200[m/min]$   
(Fuente: [Propia])

En general se observa que el esfuerzo equivalente aumenta proporcionalmente con la profundidad de corte y la velocidad de corte, no en gran medida, pero existe un cambio. En todos los casos evaluados se presentan como se esperaba las zonas con mayor esfuerzo se sitúan en la zona principal en el proceso de corte.

Para la profundidad de corte 0.1 [mm] se observan picos con resultados muy bajos que se alejan del promedio de los resultados, este fenómeno es debido a que el contacto entre los elementos de mallado de la herramienta de corte y la pieza durante la simulación son pocos debido al tamaño de los mismos, y el programa en estos picos no puede realizar el análisis completo del fenómeno. Por otro lado, en las simulaciones con profundidades de corte de 0.2 [mm], 0.4 [mm] y 0.8 [mm] los elementos de mallado entre la herramienta de corte y la pieza durante la simulación son mayores en comparación con 0.1 [mm] y los resultados obtenidos tienden a mostrarse con rangos de mayor estabilidad.

Sin embargo, aunque existen estos picos fuera del promedio que pueden generar una menor precisión en el resultado final, estos se suman a los demás valores obtenidos y proporcionan una línea de tendencia acorde al resultado que se desea obtener.

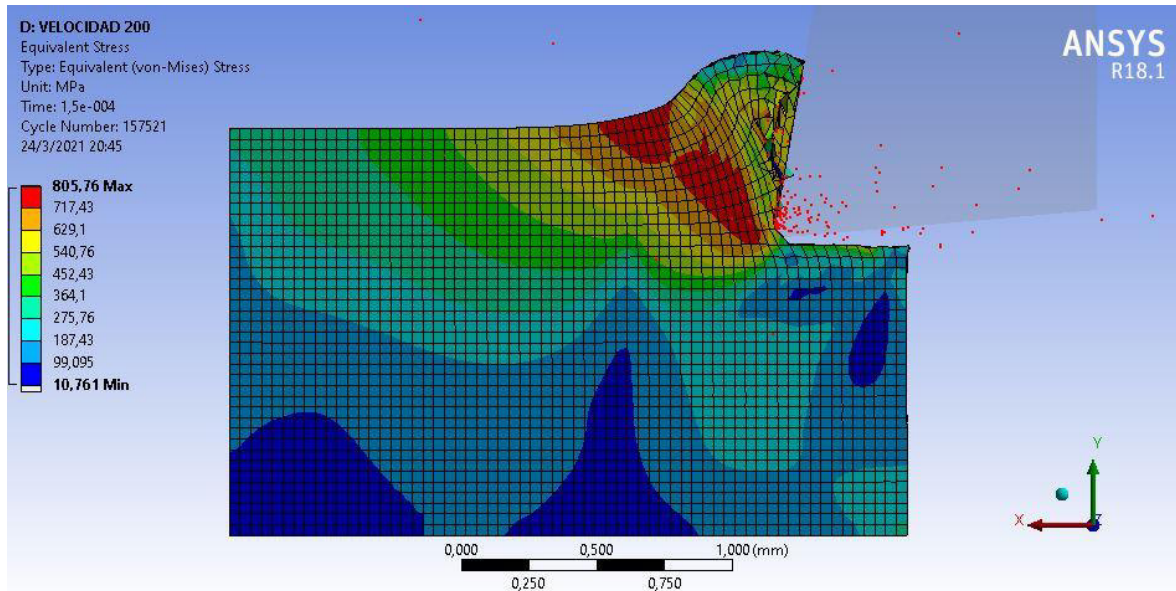


Figura 3.3 Esfuerzo Equivalente 2D.  $V_c=200[m/min]$ .  $e=0.4[mm]$   
 (Fuente: [Propia])

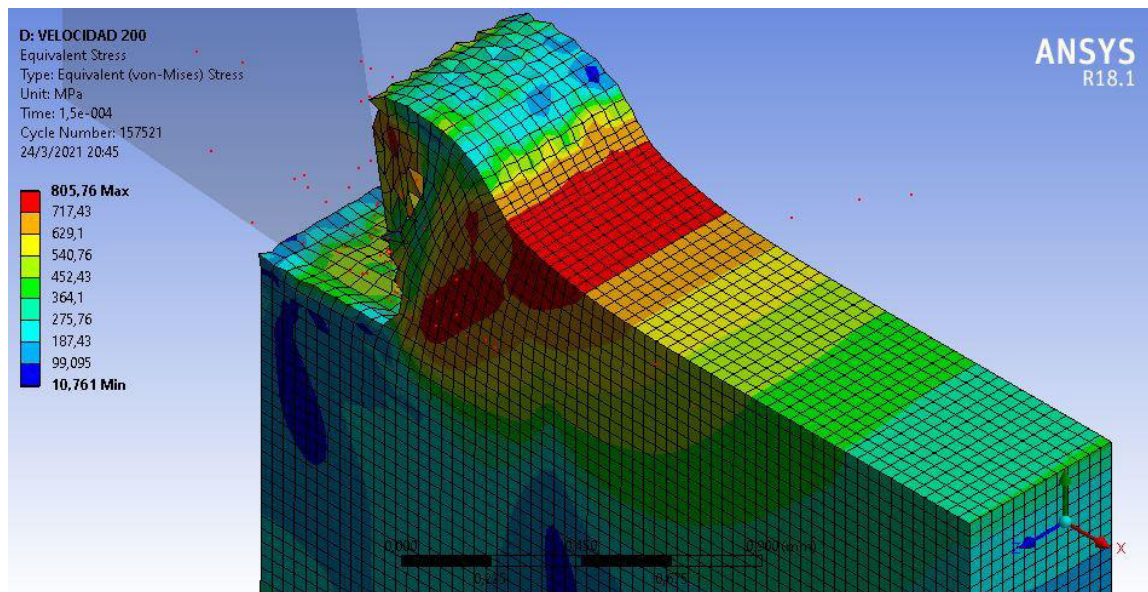


Figura 3.4 Esfuerzo Equivalente ISO.  $V_c=200[m/min]$ .  $e=0.4[mm]$   
 (Fuente: [Propia])

Las figuras mostradas de esfuerzo equivalente promedio solo representan ciertos casos de todas las simulaciones realizadas, para una mejor apreciación se puede encontrar las figuras de todas las simulaciones realizadas en el ANEXO II.

### 3.1.1.1 Cálculo analítico de esfuerzo equivalente

Con base al apartado 1.2.4 se realiza el cálculo analítico de los esfuerzos equivalentes. Se utiliza como parámetro de cálculo a la medida del espesor de la viruta después del corte

( $a_c$ ) sin embargo, se considera como despreciable la diferencia entre las medidas del espesor de la viruta antes y después del corte.

Los valores de fuerzas de corte ( $F_c$ ) y las fuerzas de empuje ( $F_t$ ) para cada uno de los casos se obtienen en base a las simulaciones realizadas.

### Ejemplo de calculo

$$V_c = 170 \left[ \frac{m}{min} \right]$$

$$a = 0,1 [mm]$$

$$s = 0,5 [mm]$$

$$\alpha = 10^\circ$$

Angulo de corte ( $\Phi$ )

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{(a/a_c) \cos \alpha}{1 - (a/a_c) \sen \alpha} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{(0,1/0,1) \cos 10^\circ}{1 - (0,1/0,1) \sen 10^\circ} \right)$$

$$\phi = 50^\circ$$

Fuerza cortante ( $F_s$ )

$$F_s = F_c * \cos \phi - F_t * \sen \phi$$

$$F_s = 49,58 [N] * \cos 50^\circ - 4,67 [N] * \sen 50^\circ$$

$$F_s = 28,29 [N]$$

Promedio de esfuerzo cortante ( $k_{ab}$ )

$$k_{AB} = \frac{F_s * \sen \phi}{a * s}$$

$$k_{AB} = \frac{28,29 [N] * \sen 50^\circ}{0,1 [mm] * 0,5 [mm]}$$

$$k_{AB} = 433,46 [MPa]$$

Esfuerzo equivalente ( $\sigma$ )

$$\sigma_{AB} = \sqrt{3} * k_{AB}$$

$$\sigma_{AB} = \sqrt{3} * 433,46 [MPa]$$

$$\sigma_{AB} = 750,78 [MPa]$$



**Tabla 3.2 Esfuerzo equivalente analítico ( $\sigma_{AB}$ ) para cada uno de los casos simulados.**

| Velocidad de corte (Vc) [m/min] | Profundidad de corte (a) [mm] | Espesor de la viruta a la salida (a <sub>c</sub> ) [mm] | Fuerza de corte (F <sub>c</sub> ) [N] | Fuerza de empuje (F <sub>t</sub> ) [N] | Fuerza cortante (F <sub>s</sub> ) [N] | Promedio de Esfuerzo cortante (k <sub>AB</sub> ) [Mpa] | Esfuerzo equivalente ( $\sigma_{AB}$ ) [Mpa] |
|---------------------------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| 170                             | 0,1                           | 0,1   | 49,58                                 | 4,67                                   | 28,29                                 | 433,46   | 750,78                                       |
|                                 | 0,2                           | 0,2   | 102,90                                | 11,38                                  | 57,43                                 | 439,91   | 761,94                                       |
|                                 | 0,4                           | 0,4   | 210,83                                | 26,43                                  | 115,27                                | 441,52   | 764,74                                       |
|                                 | 0,8                           | 0,8   | 360,27                                | 18,72                                  | 217,23                                | 416,03   | 720,58                                       |
| 200                             | 0,1                           | 0,1   | 51,85                                 | 6,69                                   | 28,20                                 | 432,07   | 748,36                                       |
|                                 | 0,2                           | 0,2   | 108,59                                | 16,41                                  | 57,23                                 | 438,39   | 759,31                                       |
|                                 | 0,4                           | 0,4   | 212,77                                | 28,26                                  | 115,12                                | 440,92   | 763,69                                       |
|                                 | 0,8                           | 0,8   | 381,94                                | 24,20                                  | 226,97                                | 434,67   | 752,87                                       |
| 236                             | 0,1                           | 0,1   | 56,48                                 | 9,96                                   | 28,68                                 | 439,33   | 760,95                                       |
|                                 | 0,2                           | 0,2   | 113,05                                | 19,73                                  | 57,55                                 | 440,85   | 763,58                                       |
|                                 | 0,4                           | 0,4   | 218,02                                | 32,38                                  | 115,34                                | 441,78   | 765,19                                       |
|                                 | 0,8                           | 0,8   | 390,12                                | 30,96                                  | 227,05                                | 434,83   | 753,14                                       |
| 280                             | 0,1                           | 0,1   | 49,47                                 | 4,00                                   | 28,74                                 | 440,30   | 762,62                                       |
|                                 | 0,2                           | 0,2   | 109,13                                | 16,24                                  | 57,71                                 | 442,09   | 765,73                                       |
|                                 | 0,4                           | 0,4   | 220,09                                | 33,86                                  | 115,53                                | 442,52   | 766,47                                       |
|                                 | 0,8                           | 0,8   | 405,04                                | 44,85                                  | 243,44                                | 445,10   | 770,93                                       |

(Fuente: [Propia])

Por otro lado, al considerar el valor obtenido de esfuerzo equivalente ( $\sigma_{AB}$ ) y el esfuerzo equivalente en la simulación ( $\sigma_S$ ), se realiza el cálculo de error obtenido entre estos dos valores.

$$\sigma_{AB} = 750,78 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_S = 803,82 \text{ [MPa]}$$

Error

$$E(\%) = \left| \frac{\sigma_{AB} - \sigma_S}{\sigma_{AB}} \right| * 100$$

$$E(\%) = \left| \frac{750,78 - 803,82}{750,78} \right| * 100$$

$$E(\%) = 7,06\%$$

**Tabla 3.3 Error porcentual de los esfuerzos equivalentes obtenidos por calculo analítico y por simulación.**

| Velocidad de corte (Vc) [m/min] | Profundidad de corte (a) [mm] | Esfuerzo equivalente ( $\sigma_{AB}$ ) [Mpa] | Esfuerzo equivalente ( $\sigma_s$ ) [Mpa] | Error (%) |
|---------------------------------|-------------------------------|--|---|-----------|
| 170                             | 0,1                           | 750,78                                       | 803,82                                    | 7,07      |
|                                 | 0,2                           | 761,94                                       | 790,23                                    | 3,71      |
|                                 | 0,4                           | 764,74                                       | 809,15                                    | 5,81      |
|                                 | 0,8                           | 720,58                                       | 808,91                                    | 12,26     |
| 200                             | 0,1                           | 748,36                                       | 811,35                                    | 8,42      |
|                                 | 0,2                           | 759,31                                       | 809,86                                    | 6,66      |
|                                 | 0,4                           | 763,69                                       | 813,84                                    | 6,57      |
|                                 | 0,8                           | 752,87                                       | 814,63                                    | 8,20      |
| 236                             | 0,1                           | 760,95                                       | 809,69                                    | 6,40      |
|                                 | 0,2                           | 763,58                                       | 808,38                                    | 5,87      |
|                                 | 0,4                           | 765,19                                       | 812,70                                    | 6,21      |
|                                 | 0,8                           | 753,14                                       | 817,10                                    | 8,49      |
| 280                             | 0,1                           | 762,62                                       | 809,10                                    | 6,09      |
|                                 | 0,2                           | 765,73                                       | 813,46                                    | 6,23      |
|                                 | 0,4                           | 766,47                                       | 815,50                                    | 6,40      |
|                                 | 0,8                           | 770,93                                       | 820,52                                    | 6,43      |

(Fuente: [Propia])

El promedio de error porcentual entre los esfuerzos equivalentes obtenidos por calculo analítico y por simulación varían entre 3,71% y 12,26%; por lo cual se considera a los valores de esfuerzos equivalentes promedios aceptables para ser considerados dentro del estudio.

### 3.1.2 Fuerzas de corte

En las simulaciones realizadas variando tanto la velocidad como la profundidad de corte se observa una tendencia creciente a medida que aumenta la profundidad de corte y se mantiene constante la velocidad de corte, al contrario, una tendencia invariable al mantener constante la profundidad de corte y variar la velocidad de corte, esto se observa en las siguientes figuras.

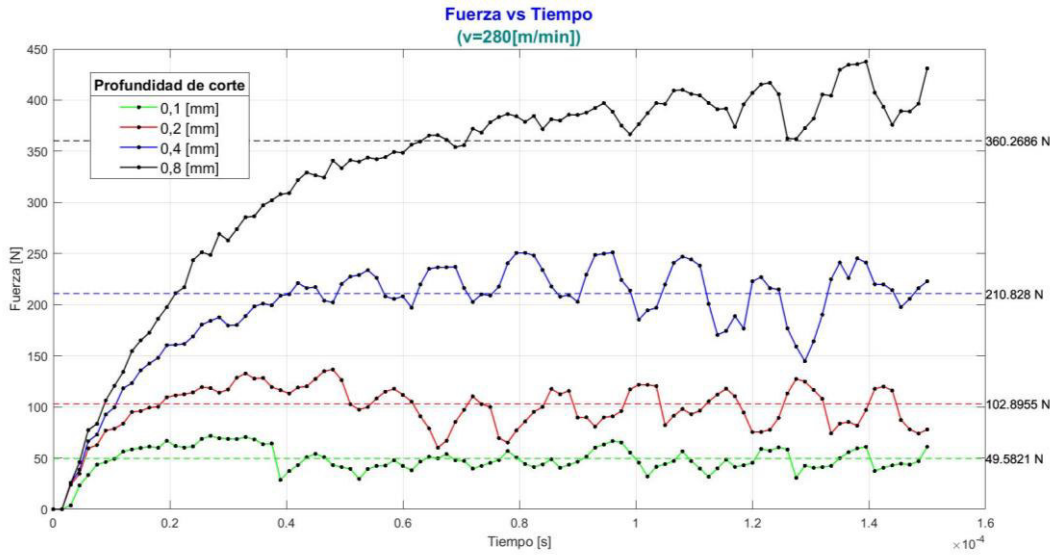


Figura 3.5 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y  $V_c=280[m/min]$ .  
(Fuente: [Propia])

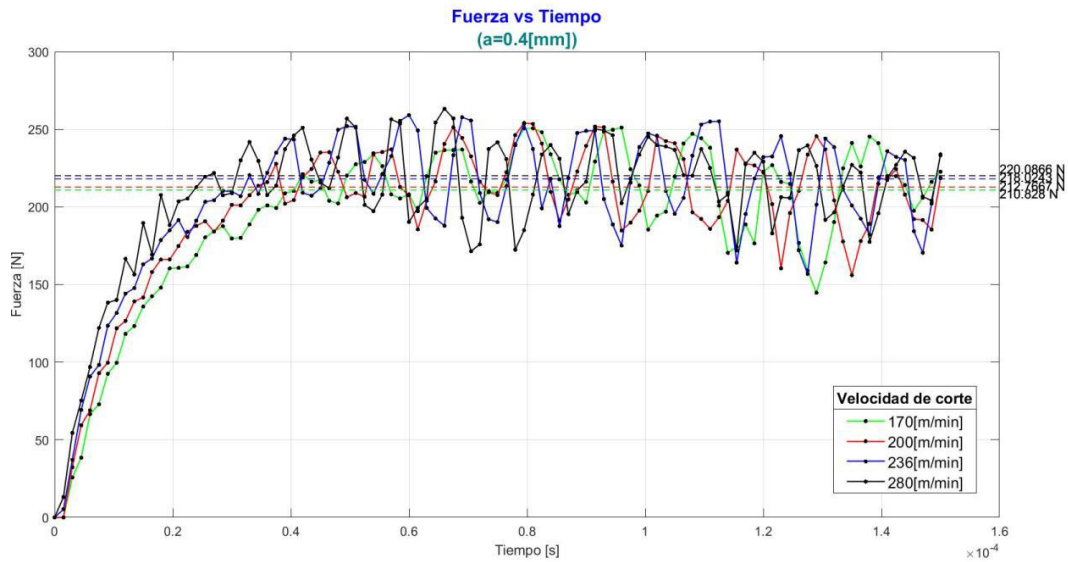


Figura 3.6 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y  $a=0.4[mm]$ .  
(Fuente: [Propia])

Resumiendo, se tiene los siguientes resultados:

**Tabla 3.4 Fuerza de corte promedio de las simulaciones**

| Velocidad de corte<br>[m/min] | Profundidad de corte [mm] |        |        |        |
|-------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
|                               | 0,1                       | 0,2    | 0,4    | 0,8    |
|                               | <b>[N]</b>                |        |        |        |
| <b>170</b>                    | 49,58                     | 102,90 | 210,83 | 360,27 |
| <b>200</b>                    | 51,85                     | 108,59 | 212,77 | 381,94 |
| <b>236</b>                    | 56,48                     | 113,05 | 218,02 | 390,12 |
| <b>280</b>                    | 49,47                     | 109,13 | 220,09 | 405,04 |

(Fuente: [Propia])

En los datos se aprecia una tendencia proporcional al aumento de profundidad de corte, es decir, a medida que aumenta el espesor aumenta la fuerza de corte promedio en una relación 2:1 apreciable en la siguiente figura.

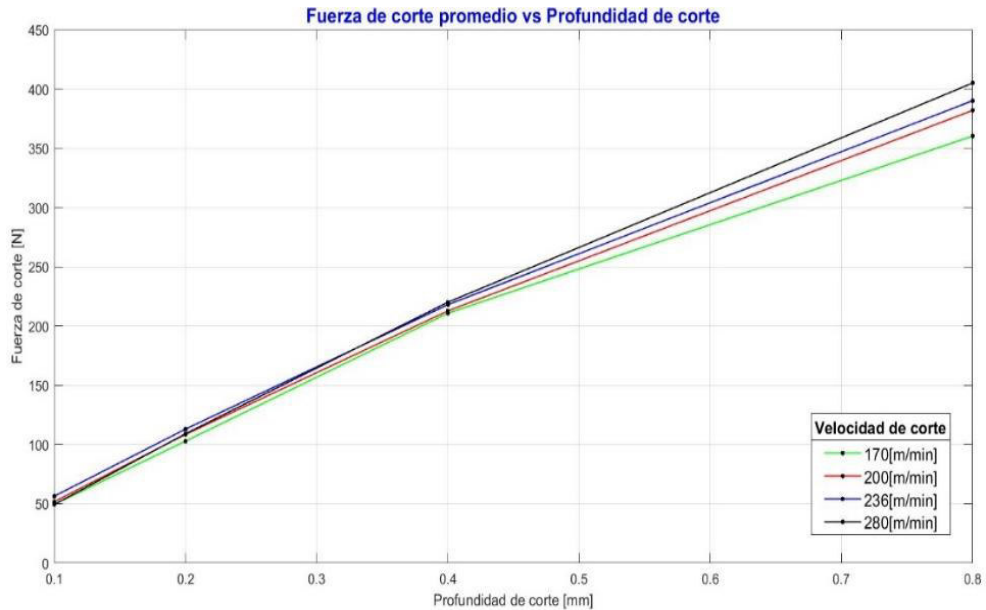


Figura 3.7 Tendencia de las fuerzas de corte a aumentar por efecto del aumento de la profundidad de corte. (Fuente: [Propia])

### 3.1.2.1 Potencia

En este trabajo se considera una eficiencia de 0.6, tomando en cuenta una limadora como la que se encuentra en el Laboratorio de Máquinas-Herramientas de la universidad. Finalmente se obtienen los siguientes valores:

**Tabla 3.5 Valores obtenidos de potencia en las simulaciones**

| Velocidad de corte<br>[m/min] | Profundidad de corte [mm] |       |       |       |
|-------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
|                               | 0,1                       | 0,2   | 0,4   | 0,8   |
|                               | [Cv]                      |       |       |       |
| <b>170</b>                    | 5,31                      | 11,02 | 22,58 | 38,58 |
| <b>200</b>                    | 6,53                      | 13,68 | 26,81 | 48,13 |
| <b>236</b>                    | 8,40                      | 16,81 | 32,42 | 58,00 |
| <b>280</b>                    | 8,73                      | 19,25 | 38,82 | 71,44 |

(Fuente: [Propia])

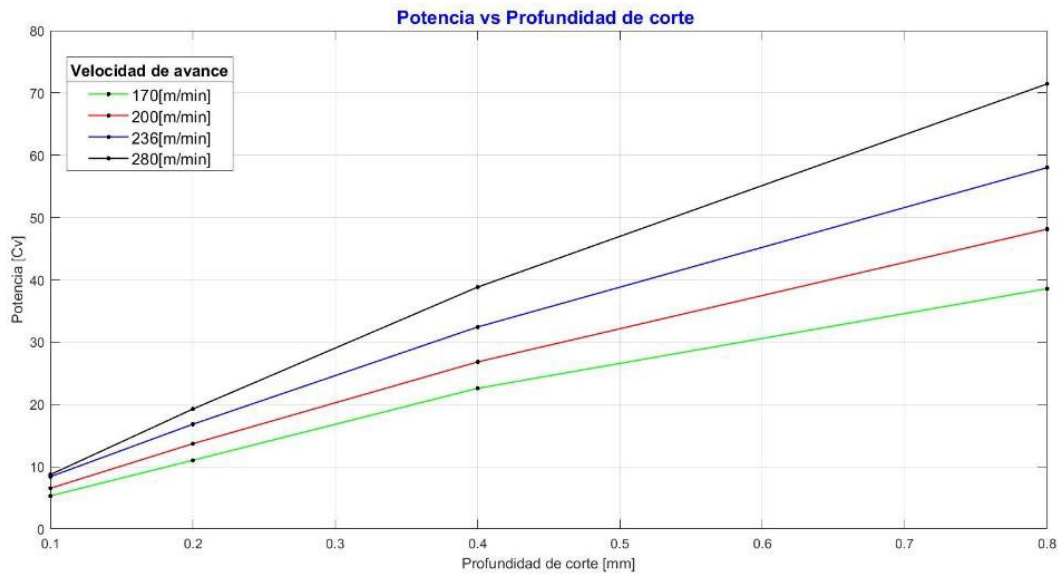


Figura 3.8 Representación gráfica de las potencias obtenidas  
(Fuente: [Propia])

Finalmente, como se esperaba la potencia tiene un comportamiento similar al de la fuerza de corte, a medida que la profundidad de corte aumenta, la potencia necesaria para realizar el mecanizado debe ser mayor.

### 3.1.3 Deformación plástica

En cuanto a la deformación plástica se mantiene un promedio a una velocidad de corte ( $V_c$ ) en cualquier variación de la profundidad de corte ( $a$ ), sin embargo, si la velocidad aumenta la deformación plástica también aumenta proporcionalmente. En la tabla 3.6 se muestran los valores de Deformación plástica promedio.

**Tabla 3.6 Valores de Deformación plástica promedio de las simulaciones realizadas**

| Velocidad de corte<br>[m/min] | Profundidad de corte [mm] |         |         |         |
|-------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|
|                               | 0,1                       | 0,2     | 0,4     | 0,8     |
|                               | [mm/mm]                   |         |         |         |
| <b>170</b>                    | 0,85588                   | 0,96173 | 0,88785 | 0,96723 |
| <b>200</b>                    | 0,88165                   | 1,0971  | 0,9867  | 0,98316 |
| <b>236</b>                    | 0,89101                   | 1,1266  | 1,0828  | 1,0032  |
| <b>280</b>                    | 0,91377                   | 1,1647  | 1,1178  | 1,048   |

(Fuente: [Propia])

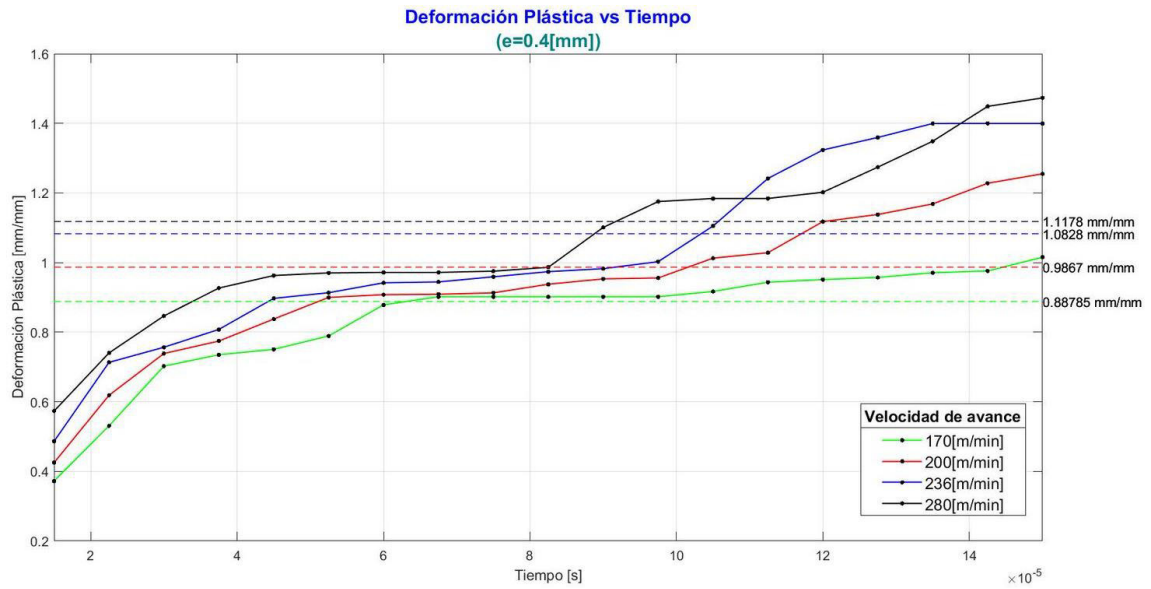


Figura 3.9 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a varias velocidades de corte y  $e=0.4$ [mm].  
(Fuente: [Propia])

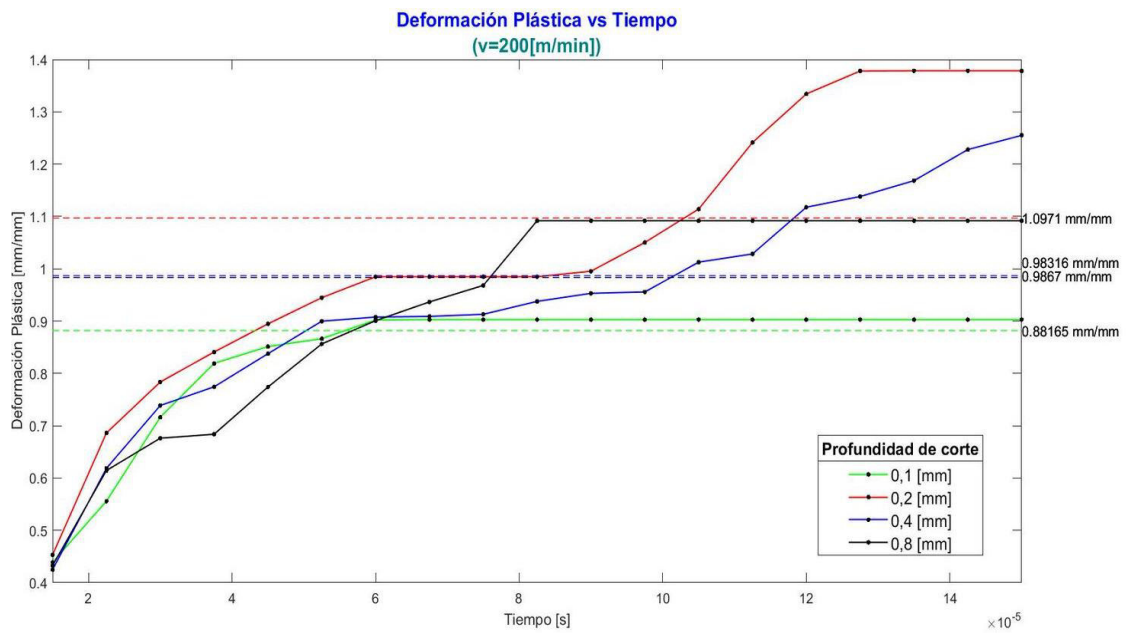


Figura 3.10 Gráfica de Deformación Plástica vs. Tiempo a varias profundidades de corte y  $V_c=0.4$ [mm].  
(Fuente: [Propia])

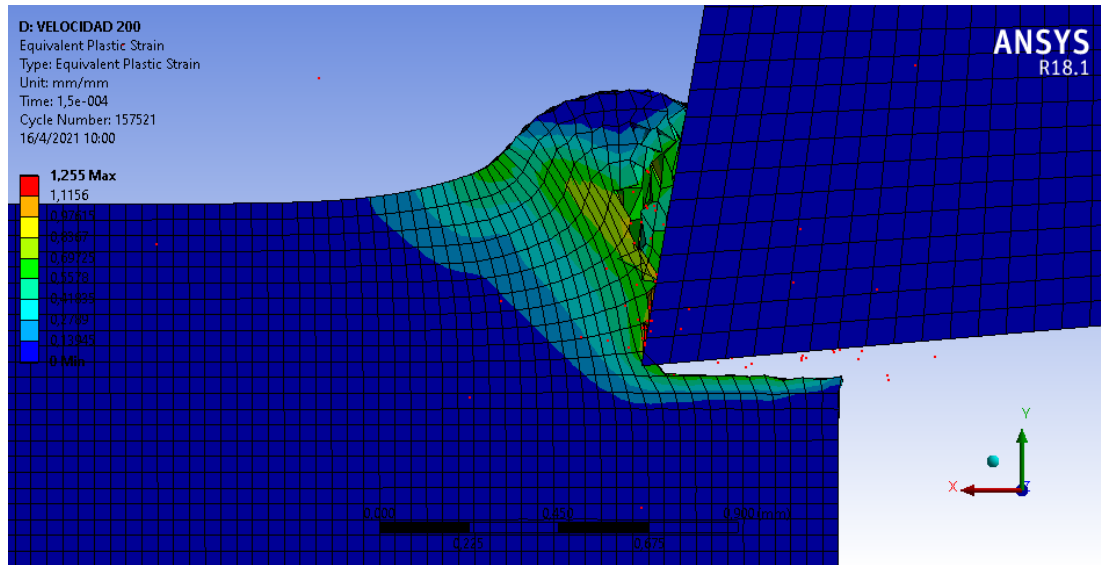


Figura 3.11 Deformación Plástica promedio 2D.  $V_c=200$ [m/min].  $e=0.4$ [mm].  
(Fuente: [Propia])

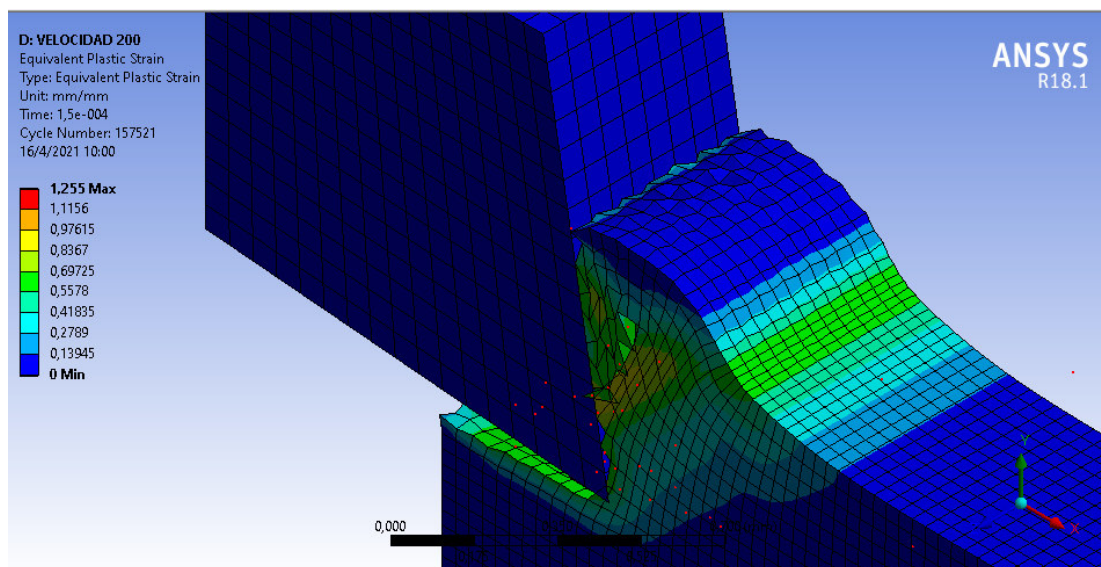


Figura 3.12 Deformación Plástica promedio ISO.  $V_c=200$ [m/min].  $e=0.4$ [mm].  
(Fuente: [Propia])

En las figuras 3.11 y 3.12 las zonas donde se producen mayor deformación plástica para la velocidad de corte ( $V_c$ ) de 200 [m/min] y una profundidad de corte ( $a$ ) de 0.4 [mm] para un proceso de corte ortogonal del acero ASTM-A36. El resto de los resultados se pueden visualizar de mejor manera en el Anexo III.

Con estos resultados el presente estudio analizo la influencia de la variación de los parámetros de corte; en el comportamiento del acero ASTM-A36.

## 4 CONCLUSIONES

### 4.1 Conclusiones

En el presente trabajo de titulación se desarrolló el estudio del comportamiento de modelo numérico usado para la simulación del proceso de mecanizado de limado ortogonal. Se recopiló información concerniente al corte ortogonal, donde cada uno de los parámetros que competen el mismo son muy importantes para tener un conocimiento amplio de cuál es el procedimiento correcto y cómo actúan cada uno de sus componentes.

Se estableció y detalló un análisis utilizando el método de los elementos finitos para realizar una simulación de corte ortogonal con distintas velocidades y profundidades de corte, logrando representar el comportamiento del material sometido a un proceso de corte.

El modelo numérico del presente estudio se validó con los datos experimentales realizados por Krishnakumar [1], revelando que los cambios de velocidad ante una profundidad de corte constante no varían los esfuerzos significativamente, permitiendo simular los procesos de corte con velocidades de corte mayores a las normales en un proceso de limado con el fin de obtener resultados visibles y solucionar el limitante temporal que presenta el método explícito de ANSYS.

Los valores de esfuerzo obtenidos en este estudio se encuentran en un rango relativamente constante de 790.2312 [MPa]-820.5182[MPa], por tal razón se concluye que el esfuerzo depende más de las propiedades del material que está siendo mecanizado y no significativamente con la velocidad de corte ( $V_c$ ) o la profundidad de corte ( $a$ ). Para confirmar los valores de esfuerzo obtenidos, se procedió a realizar un cálculo analítico de los mismos, obteniendo un rango de error entre 3.71%-12.26%, datos que justifican la conclusión emitida.

La fuerza obtenida en las simulaciones muestra que la variación de la profundidad de corte afecta directamente a la fuerza de corte, en el caso de la simulación con una profundidad de corte de 0,1 [mm] y una velocidad de corte 170 [m/min] se obtiene una fuerza promedio de 49,58 [N] mientras que para una profundidad de corte de 0,2 [mm] y una velocidad de corte 170 [m/min] se obtiene una fuerza promedio de 102.90 [N] teniendo un aumento del 107,54%, mientras que la simulación con una profundidad de corte de 0,1 [mm] y una velocidad de corte 200 [m/min] se obtiene una fuerza promedio de 51,85 [N], comparándola con la primera fuerza sólo existe un aumento del 4,58%, concluyendo que el cambio de velocidad ante una profundidad de corte constante no presenta cambios significativos como en el caso del cambio de profundidad de corte, es decir, la dureza del corte. Este comportamiento aún sigue evidenciado en el cálculo de la potencia, si se elige una excesiva



profundidad de corte y la potencia de la máquina no es adecuada para ella, la máquina-herramienta puede averiarse.

Se observa en los resultados obtenidos que mientras mayor sea la profundidad de corte la fuerza de corte aumentará siendo dicho parámetro el que más influye a la hora de mecanizar un material en cuanto al manejo de la máquina-herramienta, en términos de los datos obtenidos se observa un aumento de la fuerza de corte en un 727% comparando la fuerza de corte a una profundidad de 0,1 [mm] con la fuerza de corte a una profundidad de 0,8 [mm] manteniendo una velocidad de corte de 170 [m/min]. En el apartado 1.1.3 se mencionaron las consecuencias de escoger mal los parámetros de corte, por lo tanto, un criterio para seleccionar correctamente los parámetros es escoger la menor fuerza de corte generada en cada proceso, entonces, analizando la tabla 3.4 se concluye que para una profundidad de corte de 0,8 [mm] se trabaja con una velocidad de corte de 170 [m/min] y para una profundidad de corte de 0,1 [mm] con una velocidad de corte de 280 [m/min]. Por otro lado, para los casos de 0,2 [mm] y 0,4 [mm] los menores valores de fuerza se dan en 170 [m/min] cuando los recomendados por el prontuario tablas para la industria metalúrgica [23], deberían ser 200 [m/min] y 236 [m/min] respectivamente, sin embargo, los valores obtenidos en estas profundidades son algo fluctuantes por tanto se consideró un promedio de fuerzas para los casos de 0,2 [mm] y 0,4 [mm] y concluir que el rango de trabajo para los mismos estaría en velocidades de corte entre 200 [m/min] y 236 [m/min].

Para el caso de 0,2 [mm] se escoge 200 [m/min] y para 0,4 [mm] se escoge 236 [m/min] seleccionados en base a una interpolación con los valores extremos, estos valores a pesar de no tener la menor fuerza de corte tienen una mayor remoción de material, por lo tanto, un mayor rendimiento, sin embargo, se puede trabajar con parámetros de corte que generen menores fuerzas de corte.

Con la metodología aplicada en el presente trabajo es posible simular distintos materiales con distintos parámetros de corte y obtener la predicción del comportamiento sometido a corte para su respectivo análisis y decisión de cuáles son los parámetros de corte que conviene aplicar.

## 4.2 Trabajos futuros

- Estudio del desgaste de la herramienta de corte

El modelo numérico considera a la herramienta de corte como un cuerpo rígido, es decir, no hay deformación antes o después del proceso de corte. Esta afirmación no es aplicable para herramientas de corte utilizadas para varias pasadas y es necesario un estudio sobre el desgaste del material en base a un corte ortogonal.

- Comparación de soluciones al problema de corte ortogonal con diferentes modelos de comportamiento.

Las variables dentro de un proceso de corte son numerosas y varios autores han propuesto modelos numéricos que se enfocan en distintos puntos de vista, en este trabajo se ha escogido el modelo propuesto por Johnson y Cook, sin embargo, es posible aplicar otro modelo numérico con distintas ecuaciones gobernantes. La comparación de la precisión de los resultados de distintos modelos es importante para saber el modelo indicado para la simulación de un proceso de corte ortogonal.

- Simulación de corte ortogonal incluyendo los efectos de la temperatura

En un proceso de mecanizado real la fricción entre la herramienta de corte y el material genera un incremento de temperatura en los materiales por lo que se puede implementar este efecto en un modelo numérico para estudiar su influencia.

## Referencias Bibliográficas

- [1] P. Krishnakumar, K. Prakash Marimuthu, K Rameshkumar y K.I. Ramachandran, "Finite element simulation of effect of residual stresses during ortogonal machining using ALE approach", *Int. J. Machining and Machinibility of Materials*, Vol. 14, No. 3, 2013.
- [2] Esteban, M. M., Álvarez, A. D., Álvarez, J. D., Guisández, J. L. C., Garrido, M. H. M. (04/11/2019), "Capítulo 5. Conformado por Arranque de Viruta", obtenido el 03/05/2020, desde el sitio Web de OCW - UC3M: Available: <http://163.117.136.247/ingenieria-mecanica/tecnologia-mecanica/material-de-clase-1/ocw-capitulo5.pdf>
- [3] "Fundamentos de mecanizado", *Sistemas de producción de mecanizado*, departamento de Materiales Y Producción Aeroespacial, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos- UPM, Madrid.
- [4] G. Bavaresco, "Limadora/Cepilladora", *GABP Ingeniería*, [Online], Available: <https://silo.tips/download/limadora-cepilladora>
- [5] Wit Grzesik. "Advance machining processes of metallic materials, Theory, Modelling, and Applications". Segunda edicion, Elsevier, Polonia.
- [6] A. Salvatore, "Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes" Master thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2018.
- [7] SANDVIK Coromant, "Manual de Formación", 2017. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com>
- [8] M. P. Groover, "Fundamentos de manufactura moderna", McGraw-Hill, 2007, pp. 486 - 498.
- [9] G. F. Micheletti. *Tecnología Mecánica: Mecanizado por arranque de viruta*, Blume, Barcelona, 1980.
- [10] "Folleto de Producción por Virutaje", Semestre 2017-A, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [11] Tugruñ Özel, Erol Zeren, " Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting tests", *Int J. Materials Processing Technology*, 153-154; 1019-1025, 2004
- [12] M. Martos Nieto, "Simulación numérica del proceso de mecanizado con corte ortogonal de Inconel 718", *Engeneering Thesis*, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2017.

- [13] Herranz Sánchez-Cosgalla, Gemma. "Desarrollo de nuevas formulaciones de ligantes basadas en polietileno de alta densidad para el procesado de aceros rápidos tipo M2 mediante moldeo por inyección de metales". Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, 2004.
- [14] Mayoral de la Cruz, Manuel. "Efecto de la atmósfera de sinterización en piezas de acero rápido T15 conformadas mediante un proceso MIM modificado". Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid, 2000.
- [15] "Material de Consulta I", class notes for Ciencia de los Materiales, J.A. Aguilar Schafer, Universidad Rafael Landívar, Guatemala, 2013.
- [16] A. Miguelañez, "Simulación numérica del proceso de mecanizado: aplicado a aceros inoxidable", Engeneering Thesis, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2015.
- [17] A. Shrot y M. Bäker, "Determination of Johnson–Cook parameters from machining simulations", Computational Materials Science Volume 52, Issue 1, February 2012, Pages 298-304.
- [18] D. Hutton. Fundamentals of finite element analysis. 1st. ed. New York: McGraw-Hill, 2004. 222
- [19] I. Koutromanos. Fundamentals of finite elements analysis "linear finite element analysis". 1st. ed. Virginia: Wiley, 2018. 3333
- [20] O. C. Zienkiewics y R. L. Taylor. El método de los elementos finitos. 4ta. ed. Barcelona: McGraw-Hill, 1994. 111
- [21] ANSYS, Inc., ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide, Realise 18.1 Junio 2017 ANSYS, Inc.
- [22] B. O'Toole, "Modeling Plastic Deformation of Steel Plates in Hypervelocity Impact Experiments", The 13th Hypervelocity Impact Symposium, 2015. 555
- [23] Jütz H, Scharkus E y Lobert R, "Tablas para la industria metalurgica", 3ra edición. Republica Federal de Alemania: Reverte, 1976.
- [24] Roy, Shawoon, Trabia, Mohamed, O'Toole, Brendan, Thota, Jagadeep, Jennings, Richard, Somasundarum, Deepak, Matthes, Melissa, Becker, Steven, Daykin, Edward, Hixson, Robert, Machorro, Eric, Meehan, Timothy, Pena, Michael, Perez, Carlos, Sipe, Nathan, Crawford, Kristen, and Gardner, Steven. Plastic Deformation of Steel Plates under High Impact Loading. United States: N. p., 2013. Web.

## Anexos

### ANEXO I Resultados de fuerza de corte de simulación con el Acero ASTM A-36

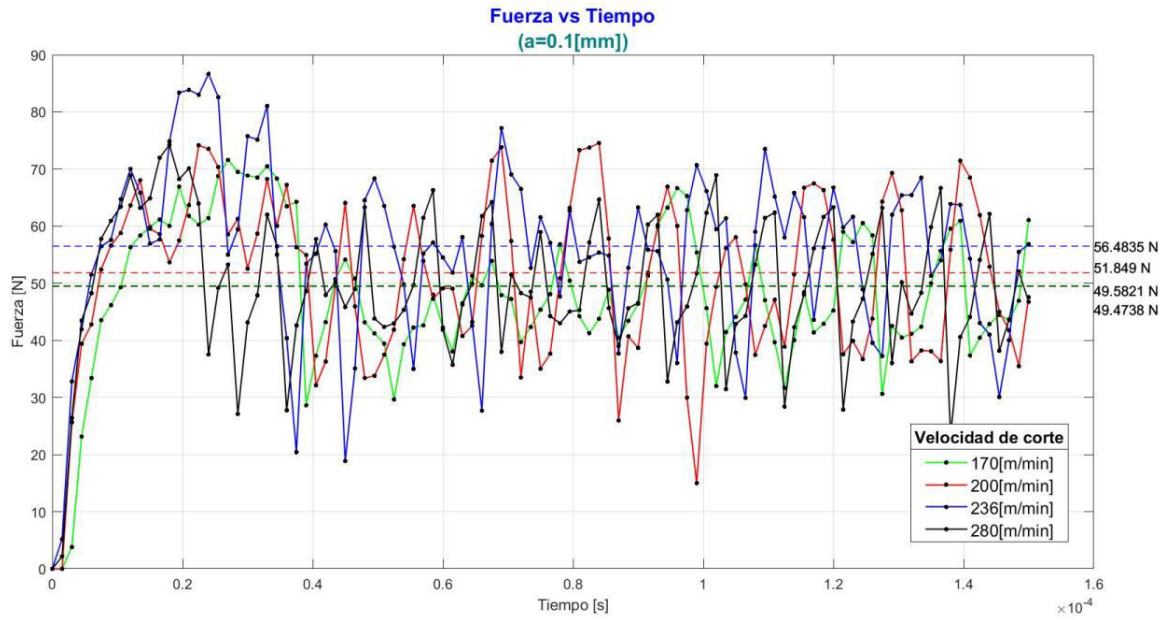


Figura A1.1 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y  $a=0.1$  [mm].  
(Fuente: [Propia])

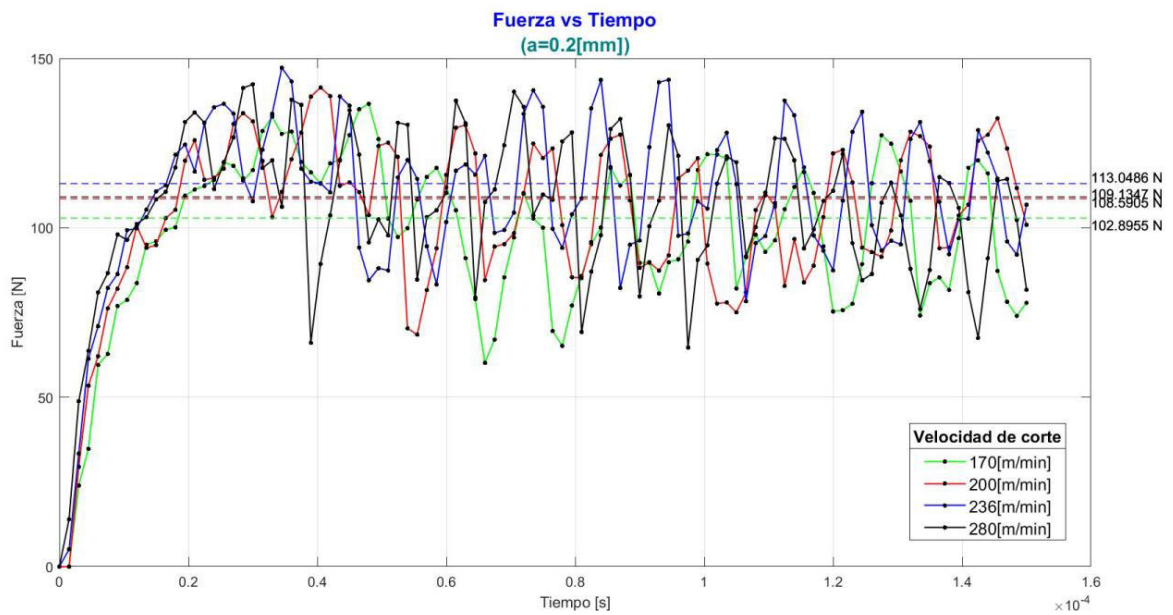


Figura A1.2 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y  $a=0.2$  [mm].  
(Fuente: [Propia])

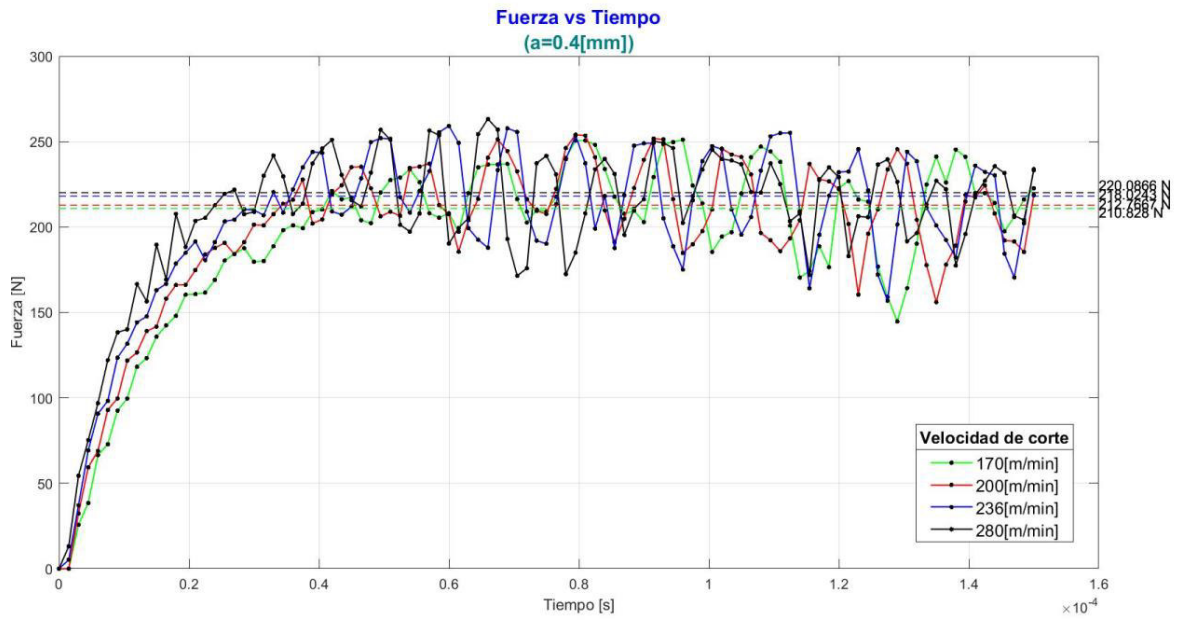


Figura A1.3 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y a=0.4[mm].  
(Fuente: [Propia])

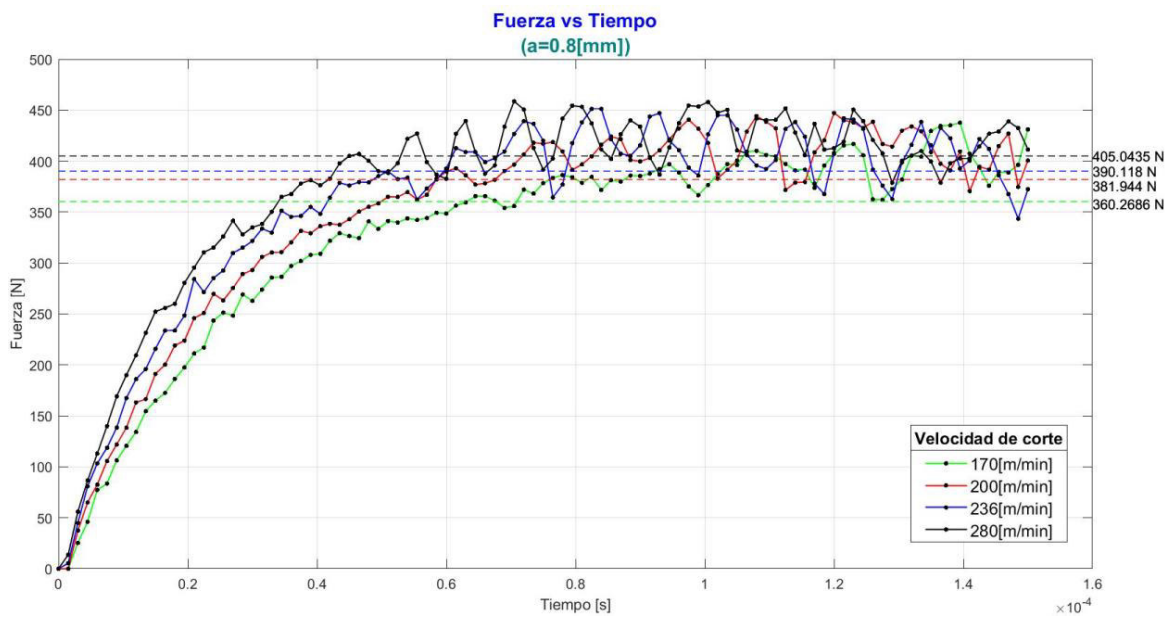


Figura A1.4 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias velocidades de corte y a=0.8[mm].  
(Fuente: [Propia])

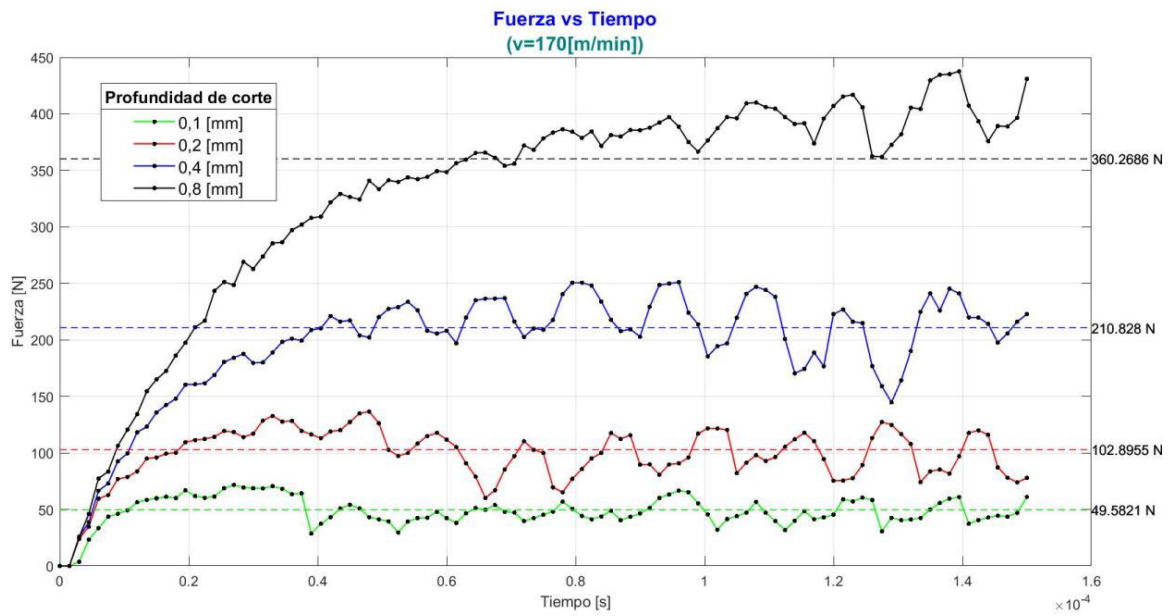


Figura A1.5 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y  $V_c=170$ [m/min].  
(Fuente: [Propia])

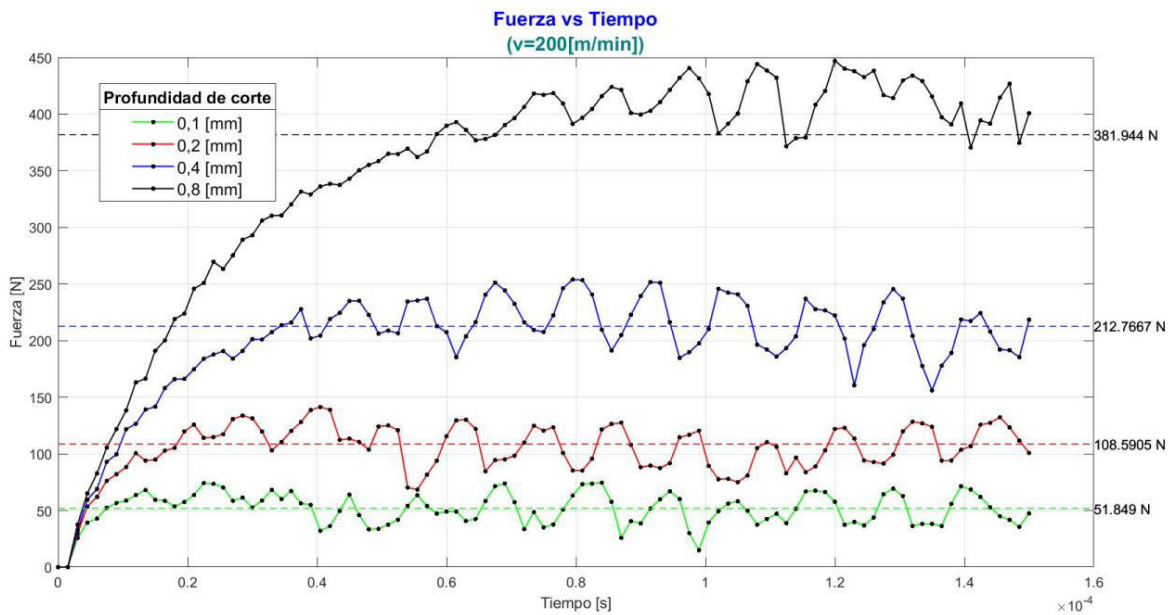


Figura A1.6 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y  $V_c=200$ [m/min].  
(Fuente: [Propia])

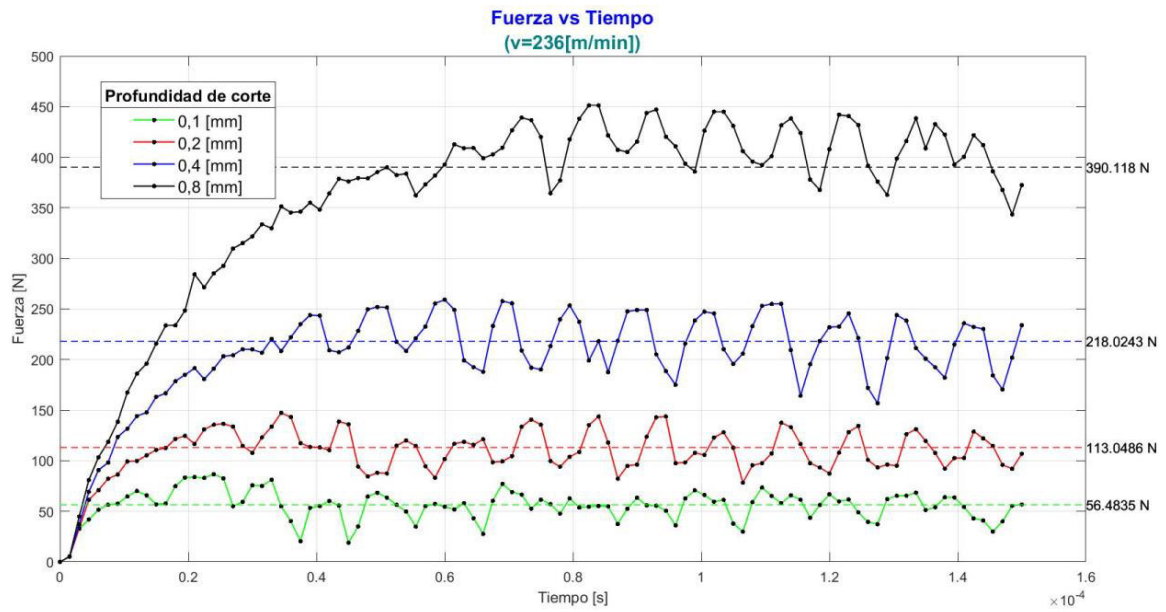


Figura A1.7 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y  $V_c=236$ [m/min].  
(Fuente: [Propia])

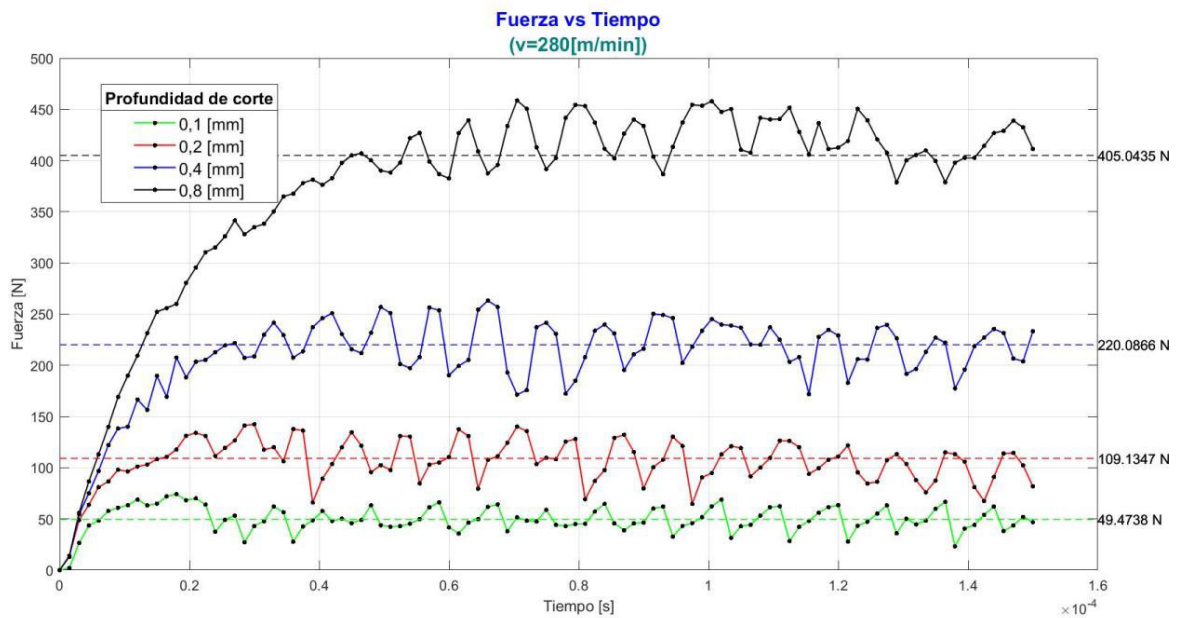


Figura A1.8 Gráfica Fuerza vs. Tiempo a varias profundidades de corte y  $V_c=280$ [m/min].  
(Fuente: [Propia])



## ANEXO II Resultados de esfuerzos equivalentes de simulación con el acero ASTM A-36

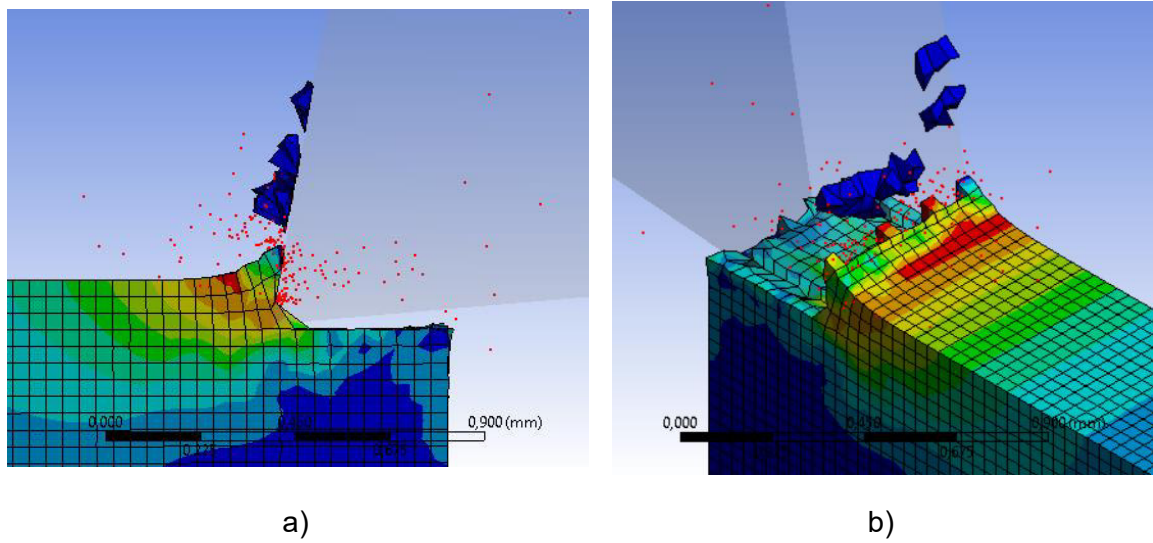


Figura A2.1 Gráfica de esfuerzo equivalente a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.1[mm]$ . a) 2D. b) ISO  
(Fuente: [Propia])

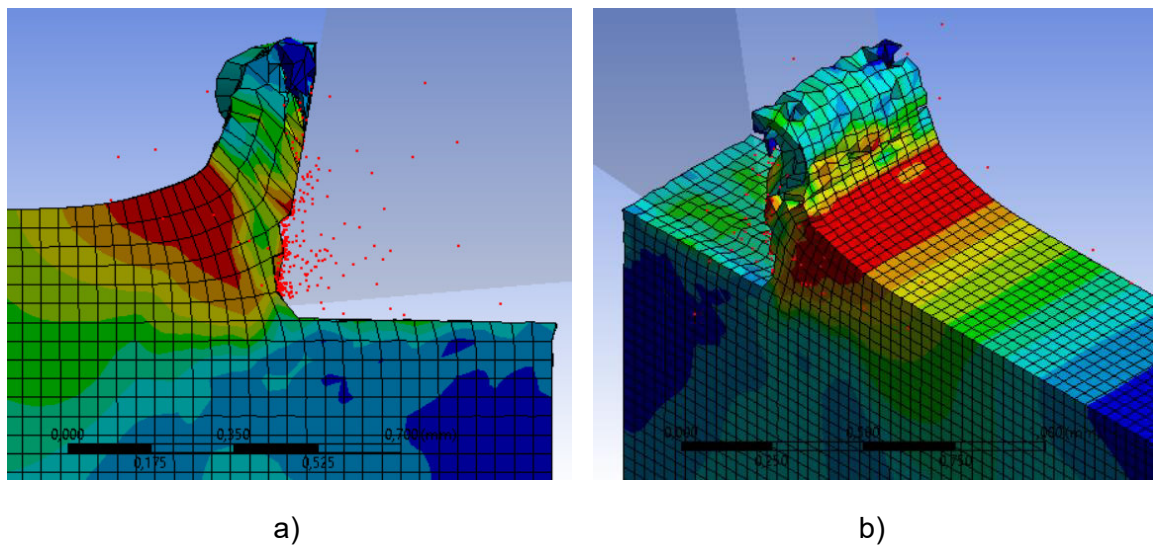
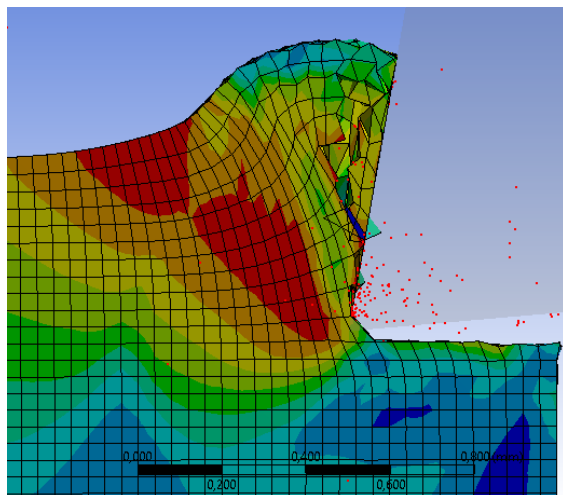
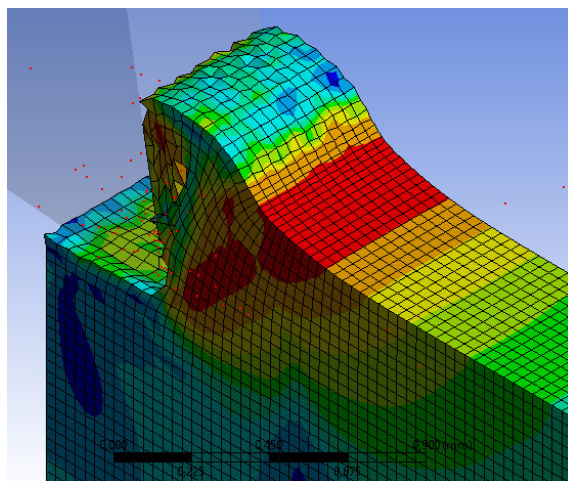


Figura A2.2 Gráfica de esfuerzo equivalente a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.2[mm]$ . a) 2D. b) ISO  
(Fuente: [Propia])

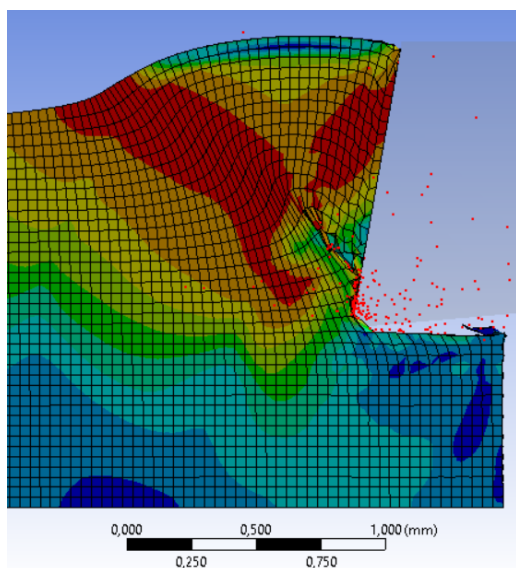


a)

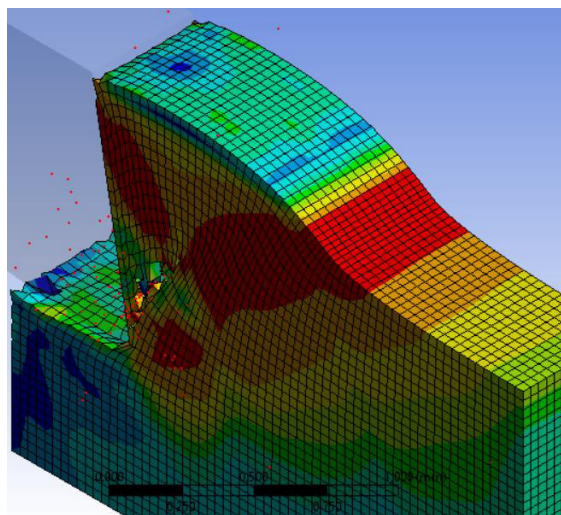


b)

Figura A2.3 Gráfica de esfuerzo equivalente a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.4[mm]$ . a) 2D. b) ISO  
(Fuente: [Propia])



a)



b)

Figura A2.4 Gráfica de esfuerzo equivalente a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.8[mm]$ . a) 2D. b) ISO  
(Fuente: [Propia])

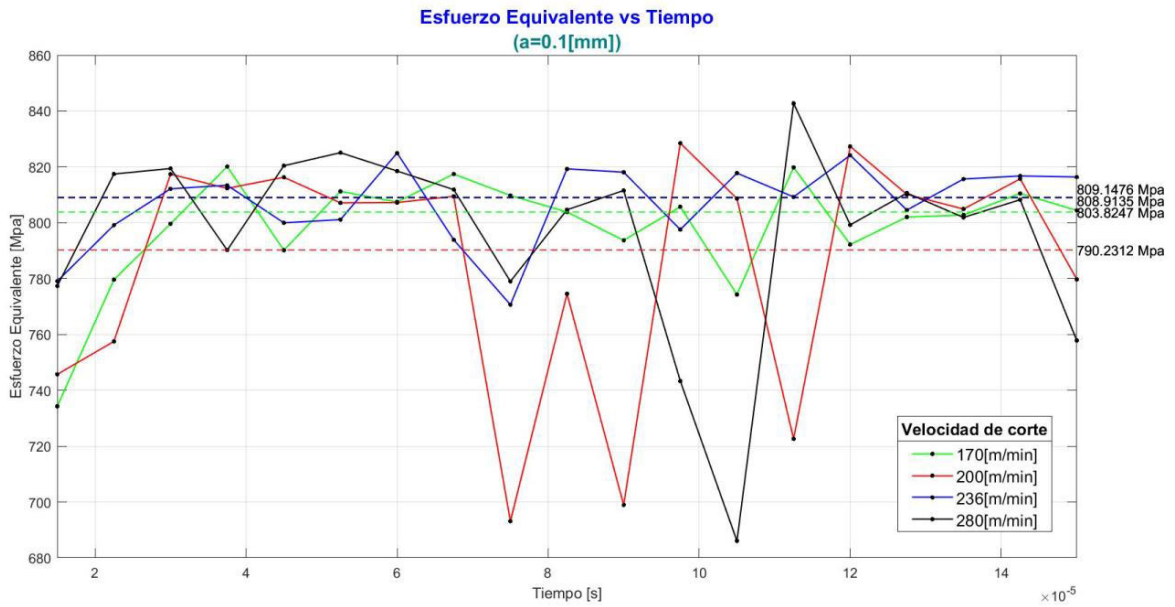


Figura A2.5 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y a=0.1[mm].  
(Fuente: [Propia])

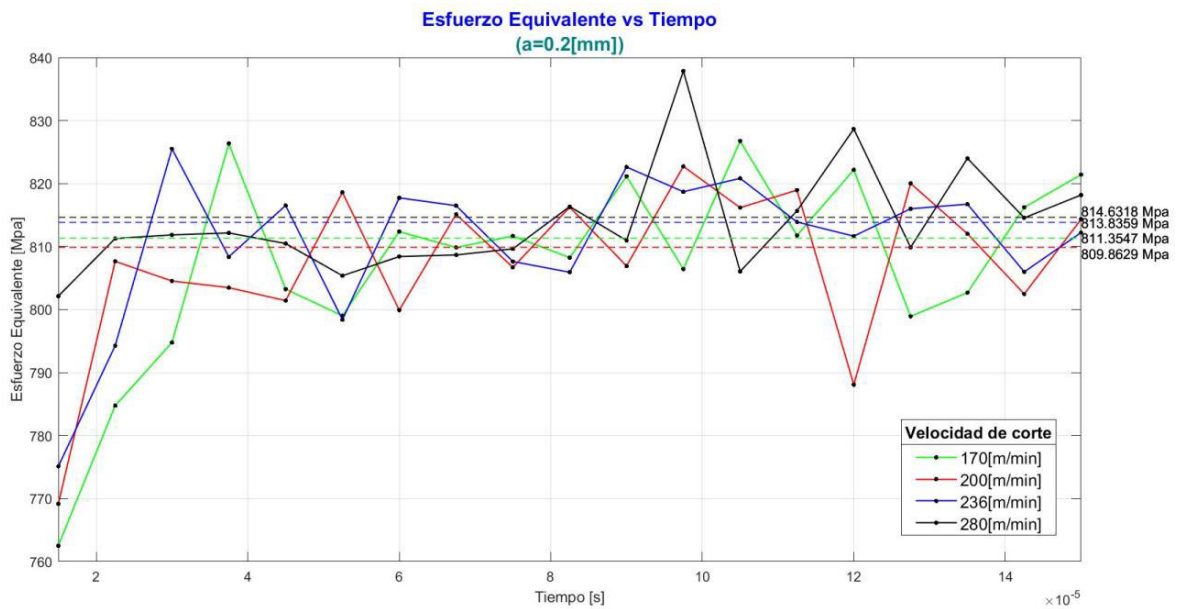


Figura A2.6 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y a=0.2[mm].  
(Fuente: [Propia])

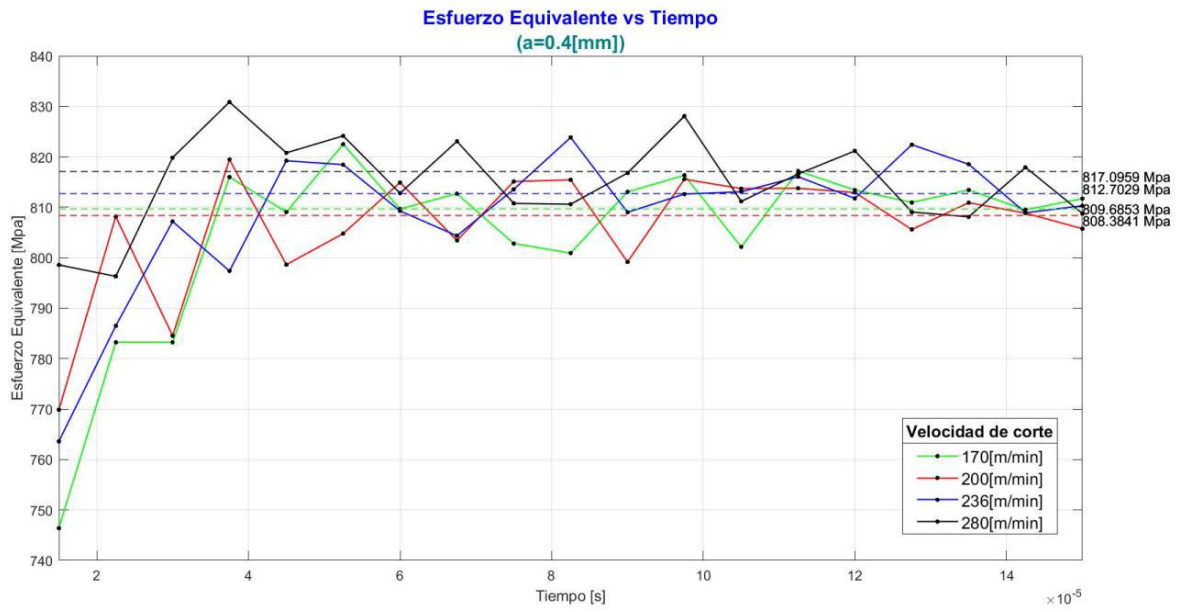


Figura A2.7 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y  $a=0.4[mm]$ .  
(Fuente: [Propia])

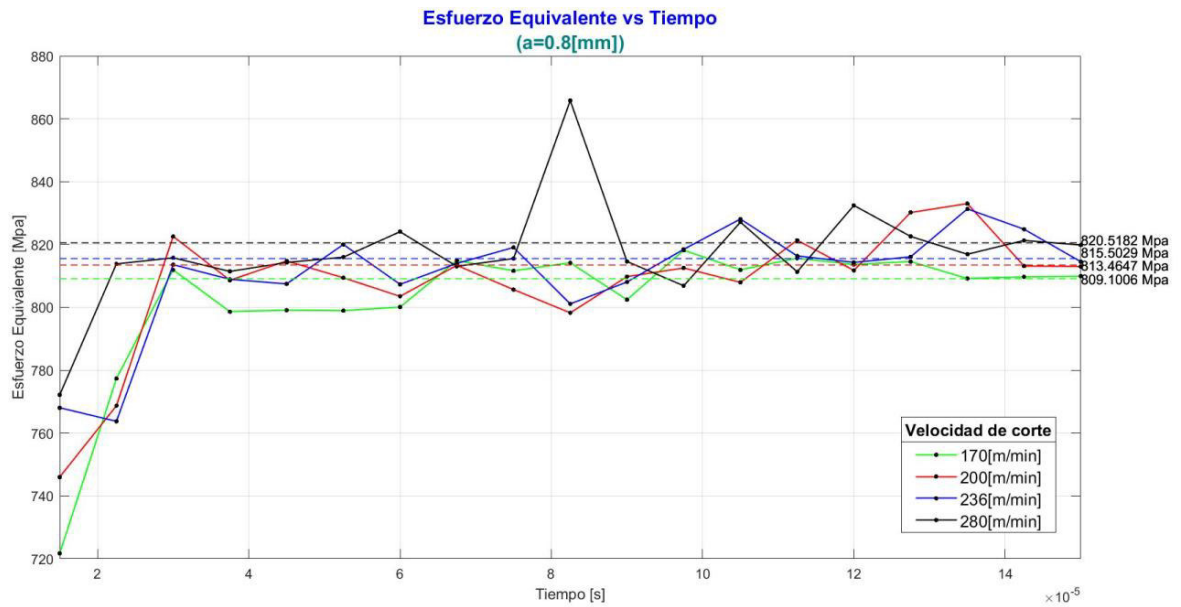


Figura A2.8 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y  $a=0.8[mm]$ .  
(Fuente: [Propia])

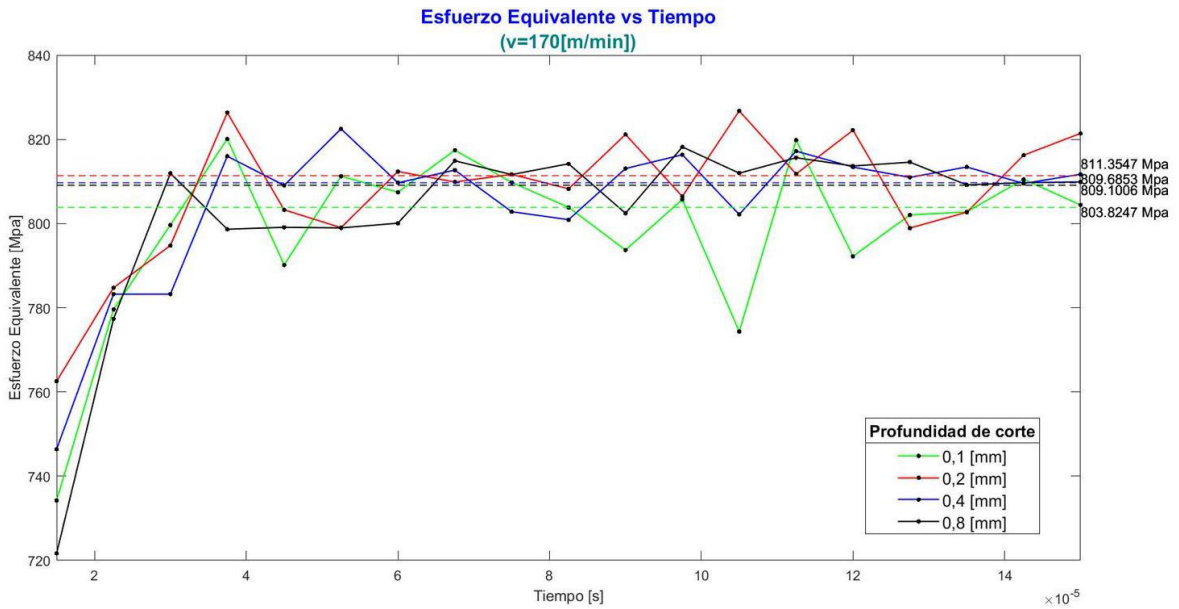


Figura A2.9 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=170[m/min]$ .  
(Fuente: [Propia])

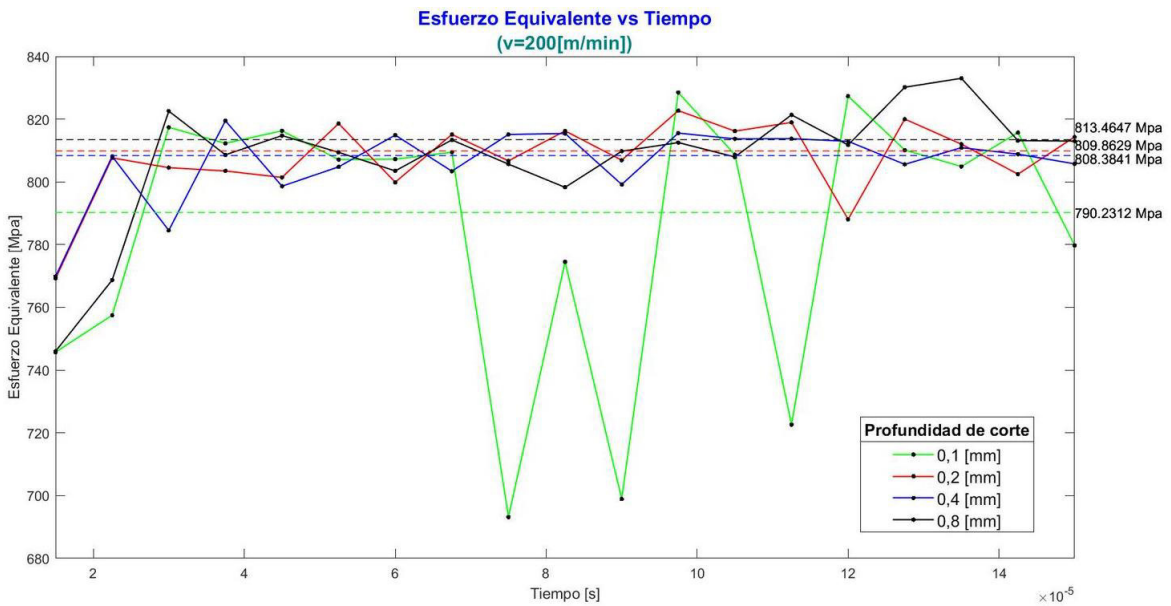


Figura A2.10 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=200[m/min]$ .  
(Fuente: [Propia])

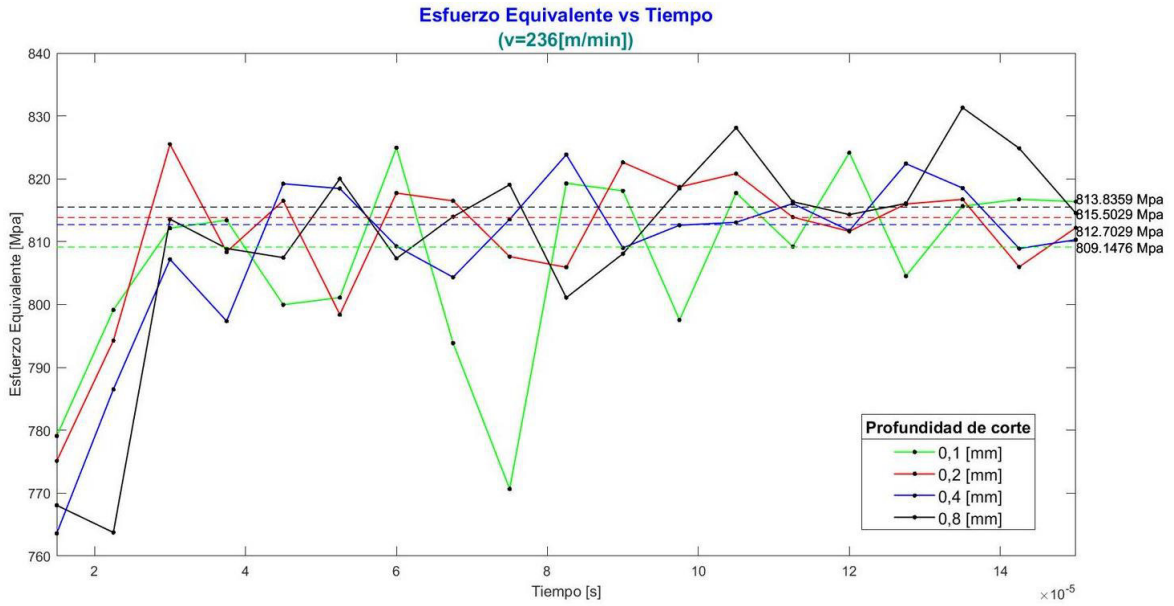


Figura A2.11 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=236[m/min]$ .  
(Fuente: [Propia])

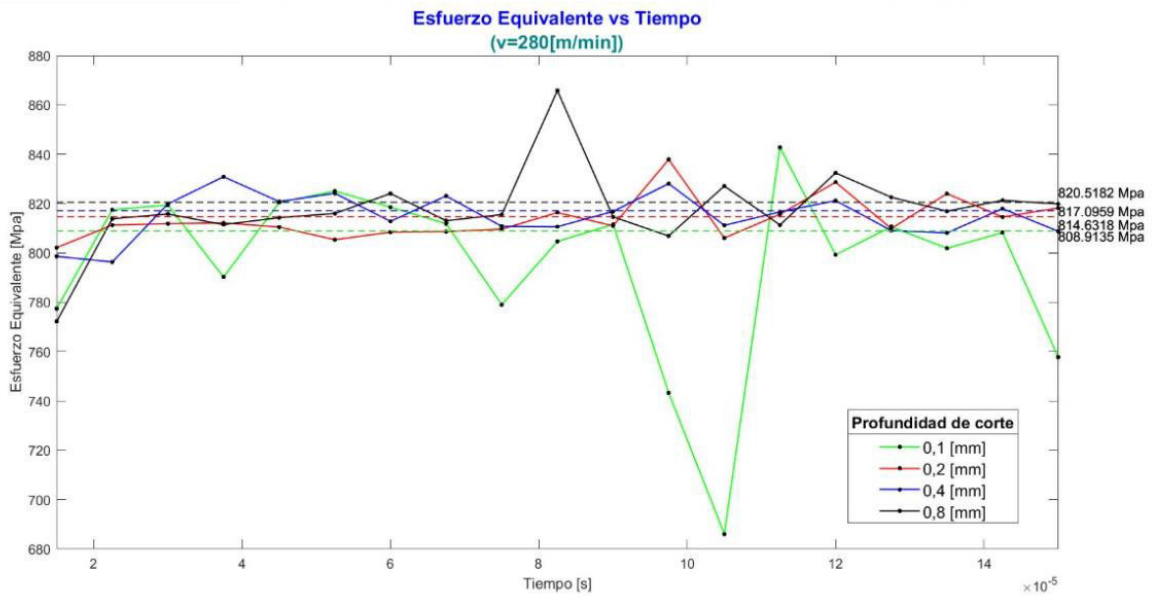


Figura A2.12 Gráfica de Esfuerzo Equivalente vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=280[m/min]$ .  
(Fuente: [Propia])

## ANEXO III Resultados de deformación plástica equivalente de la simulación con el acero ASTM A-36

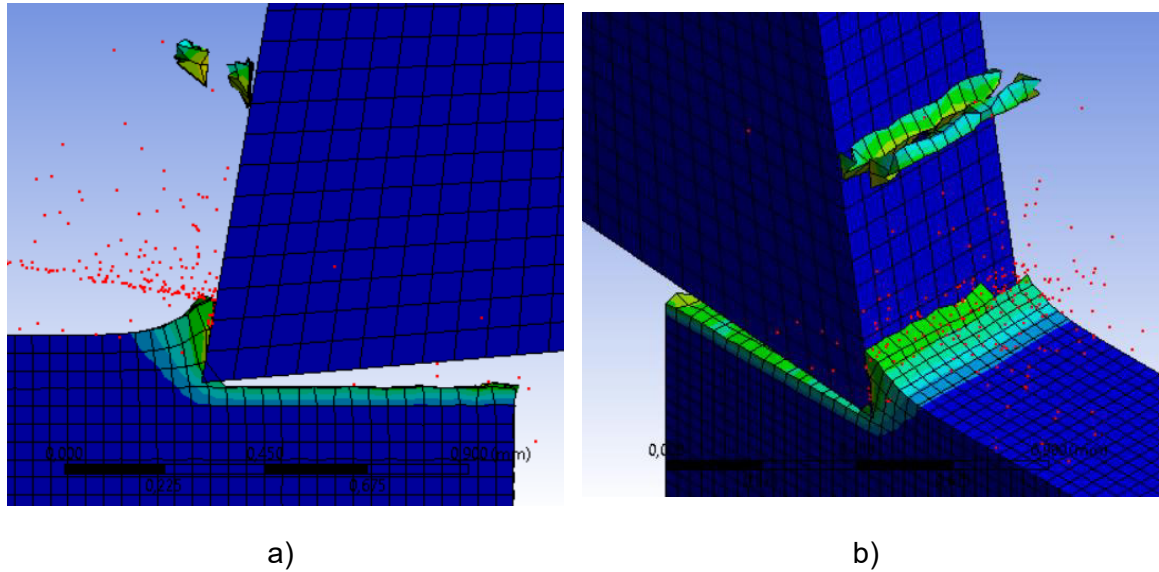


Figura A3. 1 Gráfica de deformación plástica a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.1[mm]$ .a) 2D. b) ISO.  
(Fuente: [Propia])

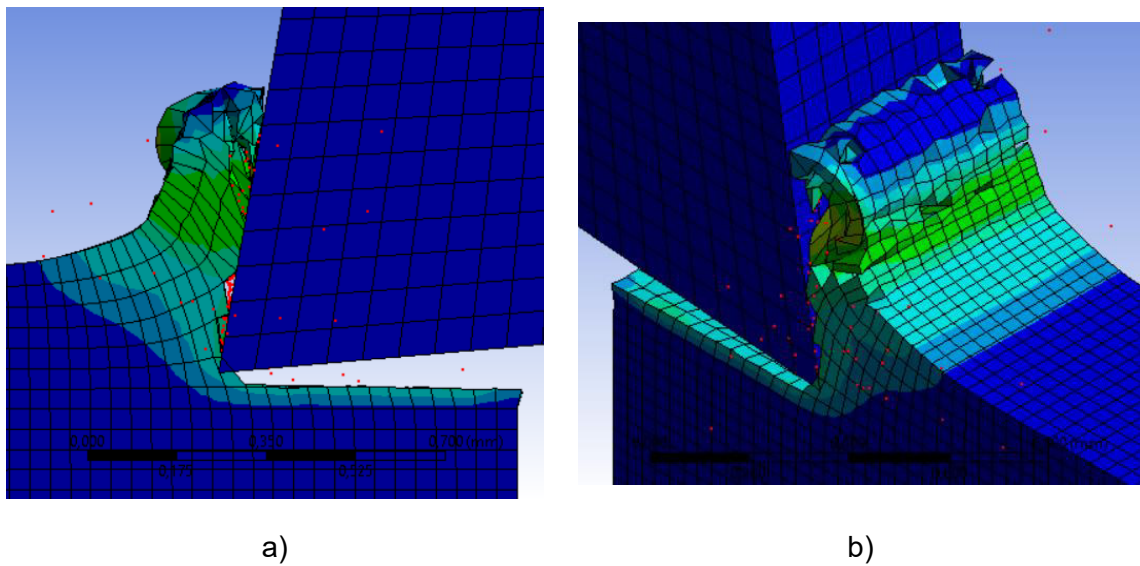
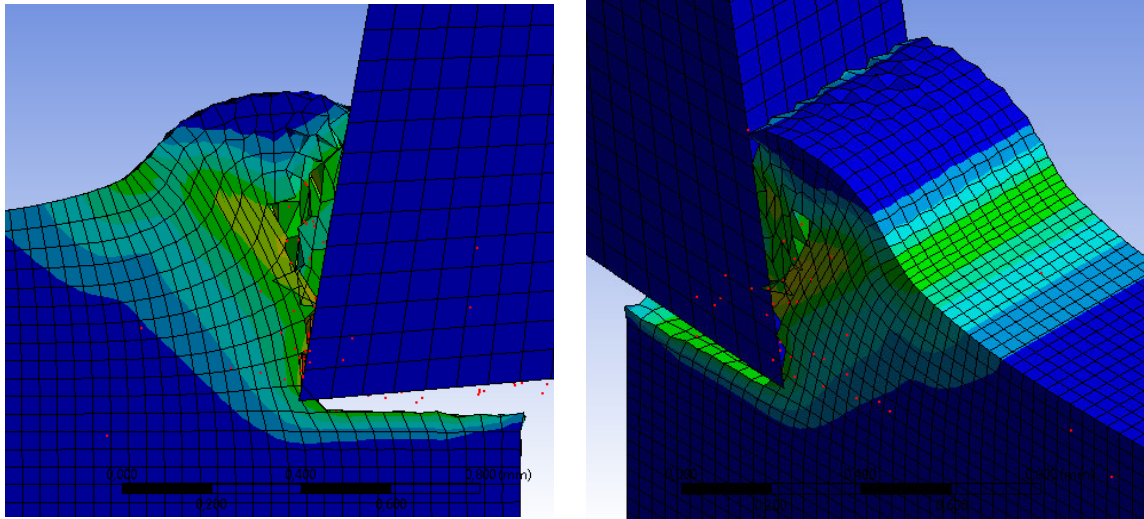


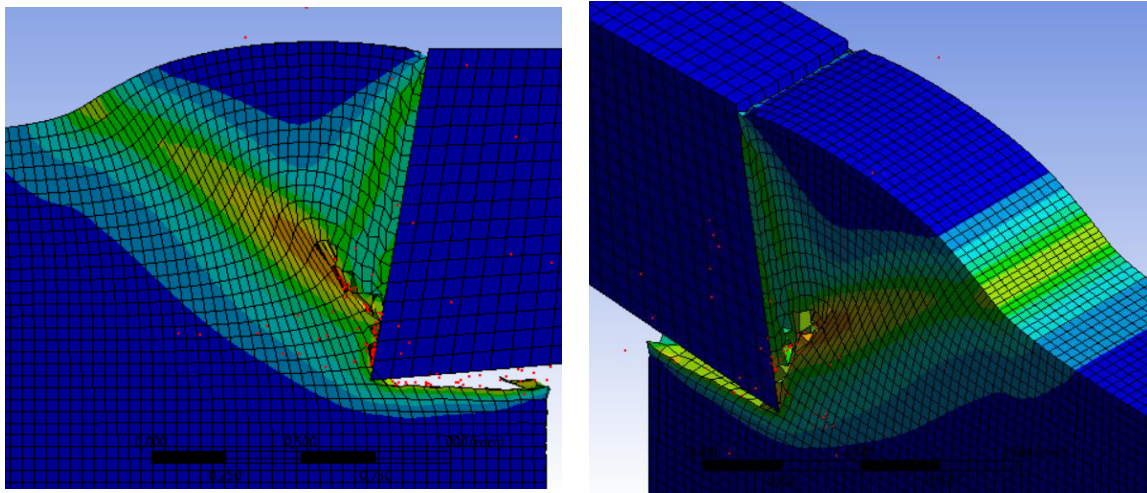
Figura A3. 2 Gráfica de deformación plástica a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.2[mm]$ .a) 2D. b) ISO.  
Figura A3.1  
(Fuente: [Propia])



a)

b)

Figura A3. 3 Gráfica de deformación plástica a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.4[mm]$ . a) 2D. b) ISO.  
(Fuente: [Propia])



a)

b)

Figura A3. 4 Gráfica de deformación plástica a  $t=0.00015[s]$  y  $a=0.8[mm]$ . a) 2D. b) ISO.  
(Fuente: [Propia])



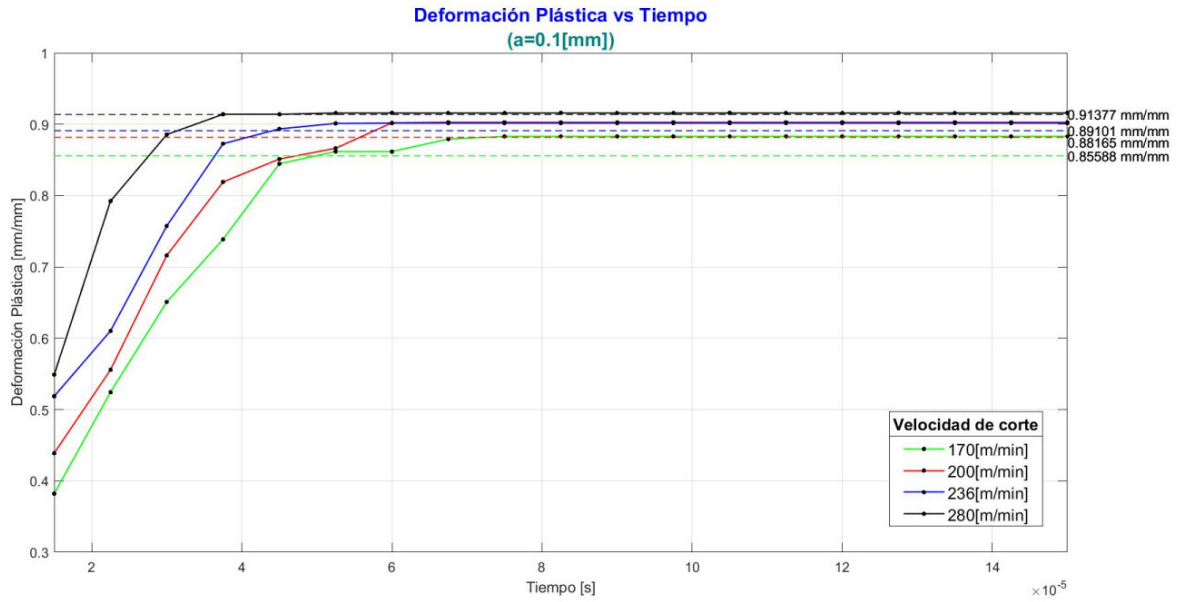


Figura A3. 5 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y a=0.1[mm].  
(Fuente: [Propia])

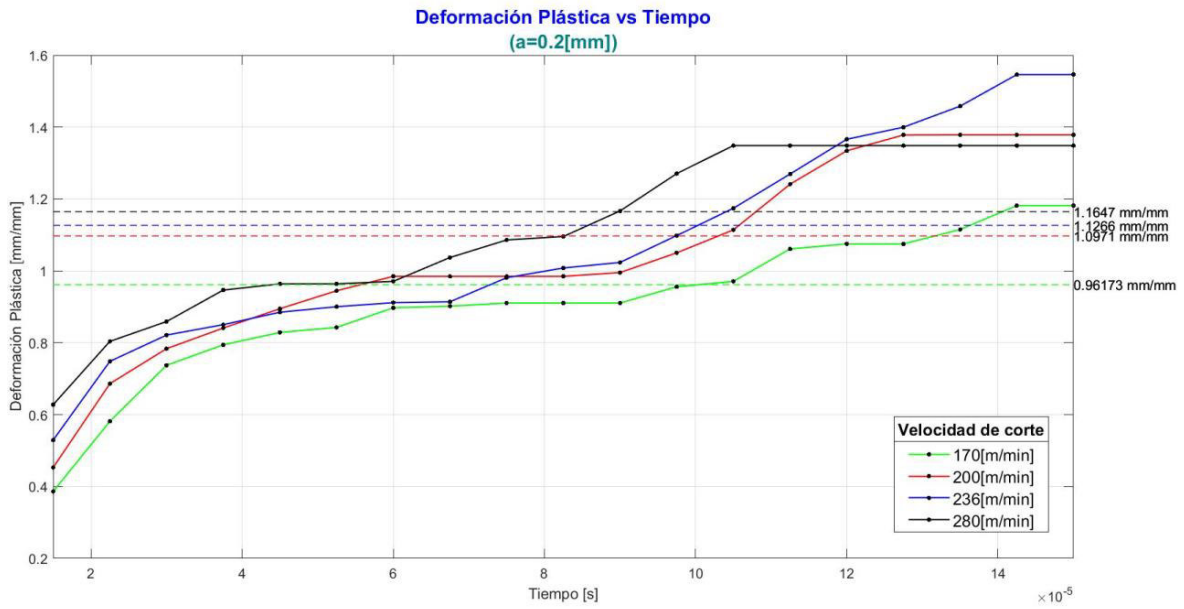


Figura A3. 6 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y a=0.2[mm].  
(Fuente: [Propia])

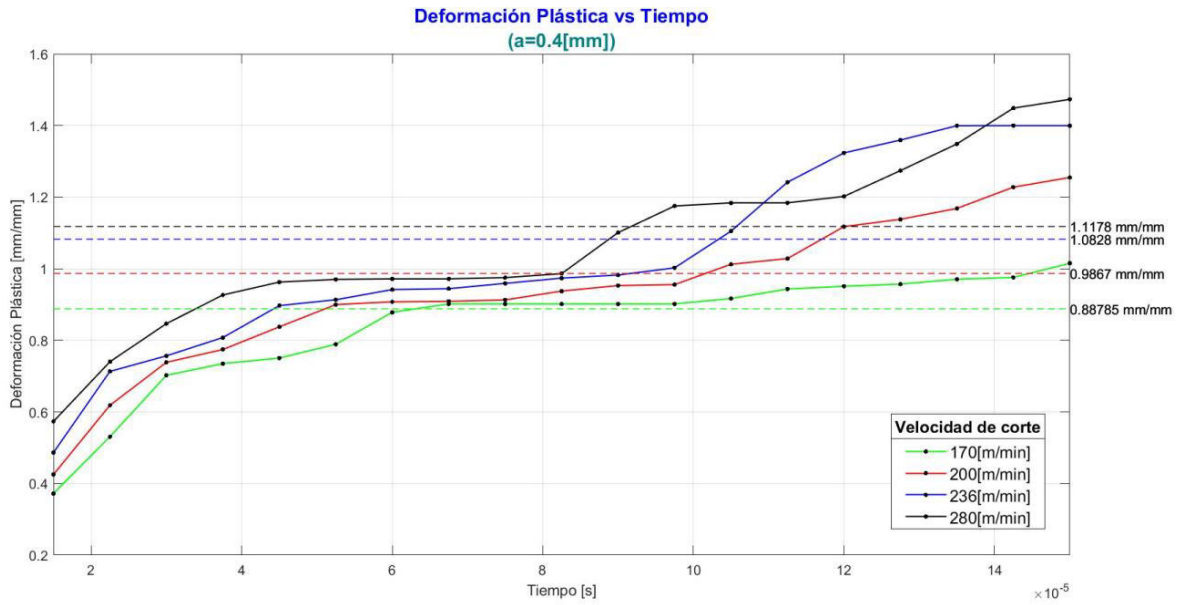


Figura A3. 7 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y a=0.4[mm].  
(Fuente: [Propia])

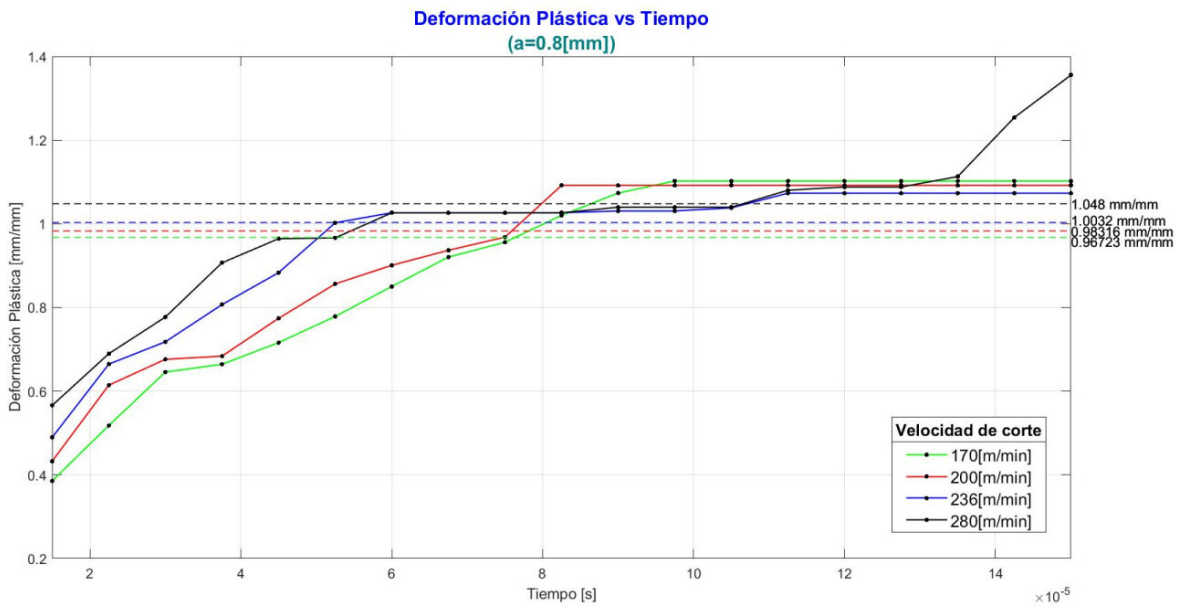


Figura A3. 8 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes velocidades de corte y a=0.8[mm].  
(Fuente: [Propia])

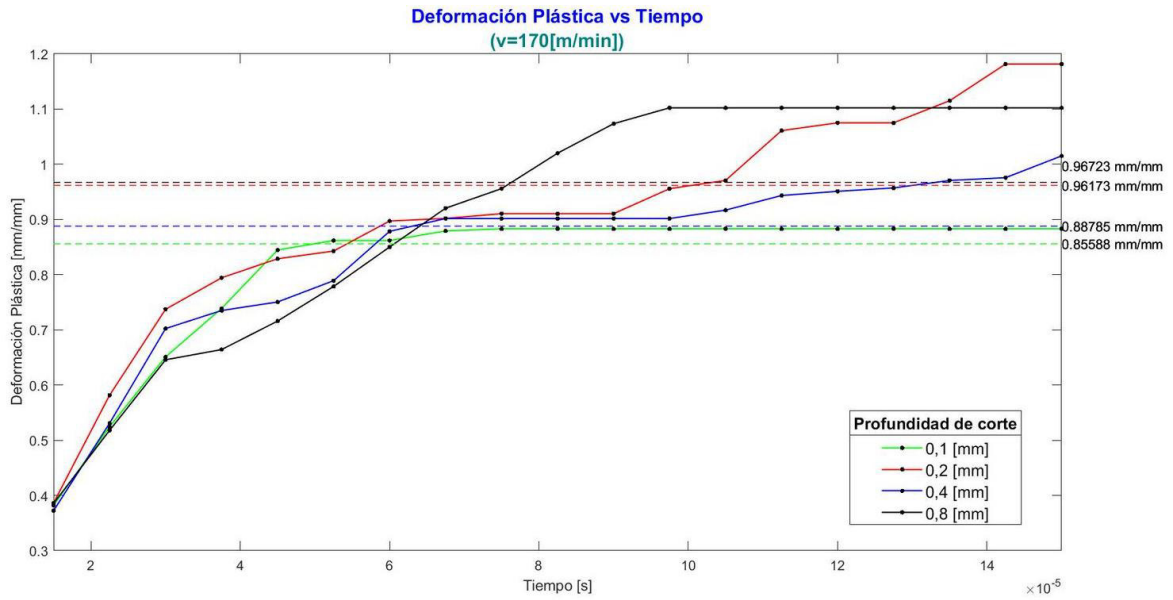


Figura A3. 9 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=170$ [m/min].  
(Fuente: [Propia])

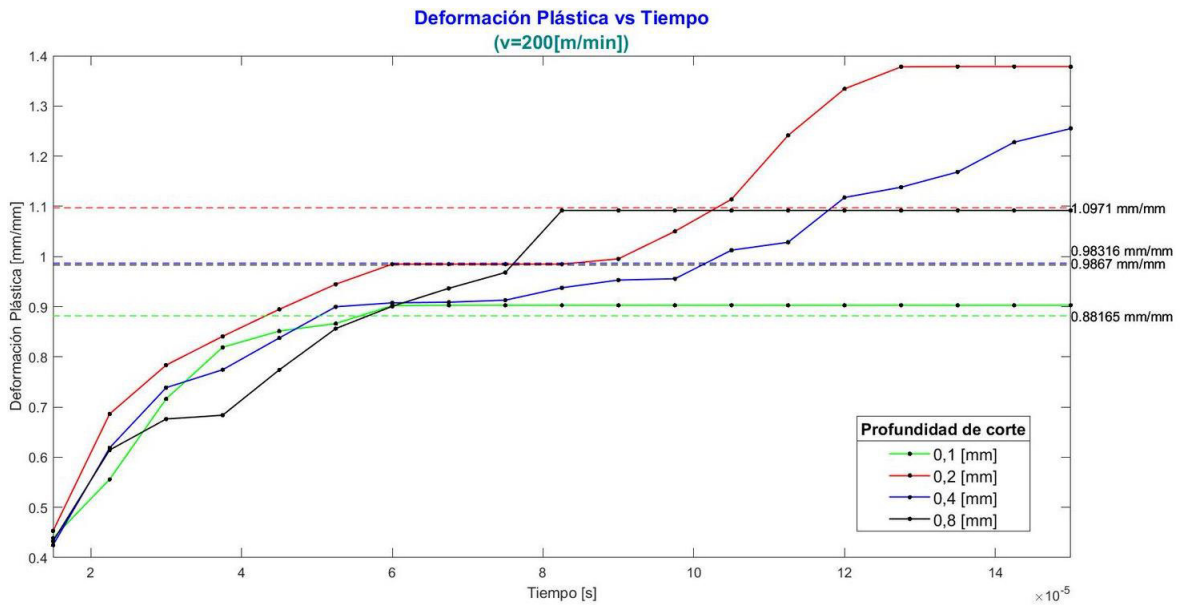


Figura A3. 10 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=200$ [m/min].  
(Fuente: [Propia])

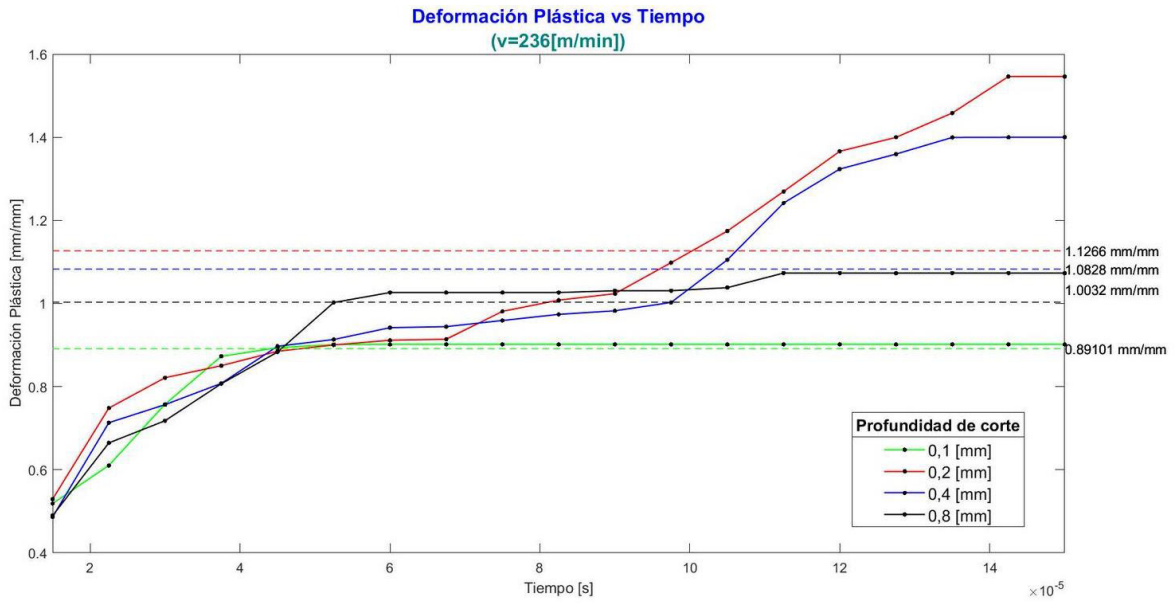


Figura A3. 11 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=236[m/min]$ .  
(Fuente: [Propia])

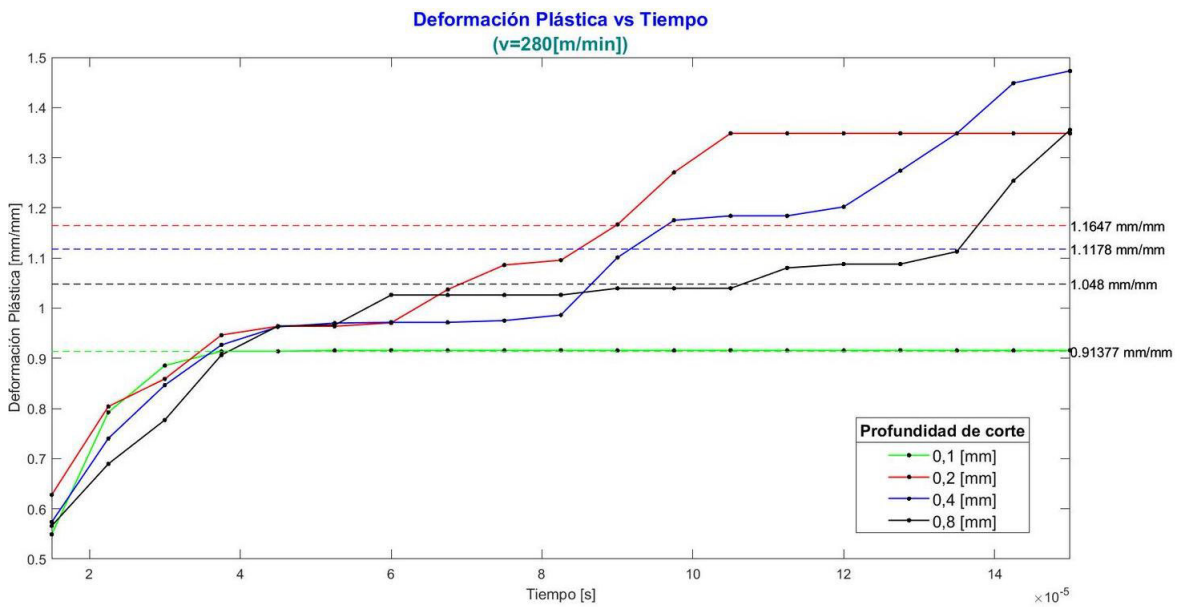


Figura A3. 12 Gráfica de Deformación plástica vs. Tiempo a diferentes profundidades de corte y  $V_c=280[m/min]$ .  
(Fuente: [Propia])


# ANEXO IV Velocidades de corte utilizadas para torno en diferentes materiales

Valores de orientación para vel. de corte-ángulo de corte-fuerza esp. de corte Extracto AWF 158

Los valores se refieren a corte en seco con:  
 útiles de ac. rápido para vel. de corte  $v_{100}$  (durac. herra. 60 min.)  
 útiles de metal duro para vel. de corte  $v_{240}$  (durac. herra. 240 min.)  
 áng. de posición  $\chi = 45^\circ$ , áng. punta  $\epsilon = 90^\circ$ , áng. inclinac.  $\lambda = 0 \dots 8^\circ$   
 con metales ligeros y materiales sintét. y prensados  $\lambda = 5 \dots 10^\circ$

Los valores de orientación sirven para profund. de corte hasta 5 mm, para  $> 5$  mm la velocidad de corte es un 10 ... 20% menor.

Los val. de la fza. espec. de corte son para una profund. de corte de 2...10 veces al avance.



| Material                                     | Util | Ángulos corte |           | Avance s en (mm rev)           |      |      |      |       |       | Avance s en mm rev  |      |      |      |
|--|------|---------------|-----------|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|---|------|------|------|
|  |      | $\chi$        | $\lambda$ | Velocidad de corte v' en m/min |      |      |      |       |       | Fuerza específica de corte ks Sección de tenalones N/tom <sup>2</sup> |      |      |      |
|  |      | cc            | γ°        | 0,1                            | 0,2  | 0,4  | 0,8  | 1,6   | 3,2   | 0,1   | 0,2  | 0,4  | 0,8  |
| Acero sin alea<br>St 34, St 37, St 42        | SS   | 8             | 14        | 60                             | 45   | 34   | 25   | 19    |       | 3500  | 2600 | 1900 | 1380 |
|  | S    | 5             | 10        | 280                            | 236  | 200  | 170  | * 67  | * 56  |   |      |      |      |
| St 50, St 60                                 | SS   | 8             | 14        | 44                             | 32   | 24   | 18   | 14    |       | 4100  | 2950 | 2150 | 1540 |
|  | S    | 5             | 10        | 240                            | 205  | 175  | 145  | * 50  | * 42  |   |      |      |      |
| St 70  | SS   | 8             | 14        | 32                             | 24   | 18   | 13   | 10    |       | 4400  | 3150 | 2300 | 1640 |
|  | S    | 5             | 10        | 200                            | 170  | 132  | 106  | * 34  | * 27  |   |      |      |      |
| Acero moldeado                               | SS   | 8             | 10        | 34                             | 25   | 19   | 14   | 11    |       | 3600  | 2600 | 1900 | 1380 |
|  | S    | 5             | 6         | 118                            | 100  | 85   | 71   | * 24  | * 20  |   |      |      |      |
| Aceros aleados                               | SS   | 8             | 10        | 24                             | 17   | 12   | 8,5  | 6     |       | 5000  | 3600 | 2600 | 1850 |
|  | S    | 5             | 6         | 150                            | 118  | 95   | 75   | * 24  | * 20  |   |      |      |      |
| Ac. Mn, ac. Cr-Ni<br>Ac. Cr-Mo               | SS   | 8             | 6         | 16                             | 11   | 8    | 5,6  |       |       | 5300  | 3800 | 2750 | 2000 |
|  | S    | 5             | 6         | 95                             | 75   | 60   | 50   | * 16  | * 13  |   |      |      |      |
| y otros aceros<br>aleados                    | SS   | 8             | 6         | 9,5                            | 6    |      |      |       |       | 5700  | 4100 | 3000 | 2150 |
|  | S    | 5             | 6         | 60                             | 48   | 38   | 32   | * 10  | * 8   |   |      |      |      |
| Ac. de herramientas                          | SS   | 8             | 6         |                                |      |      |      |       |       | 5700  | 4100 | 3000 | 2150 |
|  | S    | 5             | 6         | 50                             | 40   | 32   | 27   | * 8,5 | * 6,7 |   |      |      |      |
| Ac. duro al Mn                               | SS   |               |           |                                |      |      |      |       |       | 6600  | 4800 | 3500 | 2520 |
|  | S    | 5             | 6         | 40                             | 32   | 25   | 20   | * 6,7 | * 5,3 |   |      |      |      |
| Hierro fundido<br>GG-10, GG-15               | SS   | 8             | 0         | 48                             | 27   | 18   | 14   | 9,5   |       | 1900  | 1380 | 1000 | 720  |
|  | G    | 5             | 0         | 140                            | 118  | 95   | 80   | 67    |       |   |      |      |      |
| GG-20, GG-25                                 | SS   | 8             | 0         | 32                             | 18   | 13   | 9,5  | 6,3   |       | 2900  | 2080 | 1500 | 1080 |
|  | H    | 5             | 0         | 106                            | 90   | 75   | 63   | 53    |       |   |      |      |      |
| Fund. maleable                               | SS   | 8             | 10        | 43                             | 28   | 20   | 13   | 9     |       | 2400  | 1750 | 1250 | 920  |
|  | S    | 5             | 10        | 106                            | 90   | 75   | 63   | 53    |       |   |      |      |      |
| Aleaciones de Cu<br>latón                    | SS   | 8             | 0         | 125                            | 85   | 56   | 36   |       |       | 1600  | 1150 | 850  | 600  |
|  | G    | 5             | 6         | 600                            | 530  | 450  | 400  | 355   |       |   |      |      |      |
| Latón rojo                                   | SS   | 8             | 0         | 85                             | 63   | 48   | 34   | 24    |       | 1400  | 1000 | 700  | 520  |
|  | G    | 5             | 6         | 500                            | 450  | 375  | 335  | 300   |       |   |      |      |      |
| Fund. de bronce                              | SS   | 8             | 0         | 63                             | 53   | 43   | 36   | 28    |       | 3400  | 2450 | 1800 | 1280 |
|  | G    | 5             | 6         | 355                            | 280  | 236  | 200  | 180   |       |   |      |      |      |
| Metales ligeros<br>Aluminio técnico          | SS   | 12            | 30        | 400                            | 300  | 200  | 118  | 75    |       | 1050  | 760  | 550  | 400  |
|  | G    | 12            | 30        | 1320                           | 1120 | 950  | 850  | 710   |       |   |      |      |      |
| Aleaciones de Al<br>(11...13% Si)            | SS   | 12            | 18        | 100                            | 67   | 45   | 30   |       |       | 1400  | 1000 | 700  | 520  |
|  | G    | 12            | 18        | 224                            | 190  | 160  | 140  | 118   |       |   |      |      |      |
| Aleac. para émbolos<br>GAl-Si (11...13% Si)  | SS   | 12            | 14        | 25                             | 22   | 20   | 18   | 17    |       | 1250  | 900  | 650  | 480  |
|  | G    | 12            | 14        |                                |      |      |      |       |       |   |      |      |      |
| Aleaciones<br>de magnesio                    | SS   | 8             | 6         | 1000                           | 900  | 800  | 750  | 710   |       | 580   | 420  | 300  | 220  |
|  | G    | 5             | 6         | 1800                           | 1500 | 1250 | 1060 | 900   |       |   |      |      |      |
| Mat. sintét. y prens.<br>Goma dura           | SS   | 12            | 10        |                                |      |      |      |       |       | 480   | 350  | 250  | 180  |
|  | G    | 12            | 10        | 300                            | 280  | 250  | 224  | 200   |       |   |      |      |      |
| Masa prens., baquelita<br>Novotext, Pertinax | SS   | 12            | 14        |                                |      |      |      |       |       | 480   | 350  | 250  | 180  |
|  | G    | 12            | 14        | 280                            | 212  | 170  | 132  | 100   |       |   |      |      |      |

100

Figura A4. 2 Velocidades de corte para diferentes materiales en un torno. (Fuente: [23])