SIMULACIÓN EN 3D DEL ARRANQUE DE VIRUTA EN TORNO PARA EL ACERO AISI 1045 BAJO JOHNSON COOK USANDO ANSYS

Flórez García Luis Carlos[1], González Rojas Hernán Alberto[2], Tabares Bocanegra Luván Stiven[3]

1. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, email: louis@utp.edu.co
2. Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Cataluña, email: hernan.gonzalez@upc.edu
3. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, email: lstabares@utp.edu.co

Resumen

En el presente trabajo se hace la simulación en tres dimensiones del arranque de viruta en torno para el Acero AISI 1045, en el cuál se utilizando el módulo de dinámica explícita del programa Ansys. Se usa un modelo para la herramienta de corte simulada como un cuerpo rígido y otro cuerpo deformable para el Acero AISI 1045, con geometría circular hueca para reducir el tiempo de simulación. En la herramienta de corte se utilizan los ángulos de corte de inclinación lateral y desprendimiento lateral, para un modelo de herramienta de corte lo más sencilla posible.

El objetivo del trabajo es evaluar los parámetros necesarios del material, el modelo de plasticidad y falla bajo Johnson and Cook para determinar esfuerzo deformación y observar el comportamiento de la viruta para el Acero AISI 1045 en el programa Ansys y así poder predecir esfuerzos, deformaciones, temperaturas y la forma de la viruta en escenarios reales.

Dentro de los resultados obtenidos se apreció un comportamiento de viruta cercano al real con los esfuerzos máximos equivalentes y deformaciones máximas equivalentes. Se analizan los esfuerzos y deformaciones máximos durante el tiempo de mecanizado simulado, también se realiza el análisis de la curva esfuerzo deformación sobre un nodo que hace parte de la viruta. Se analiza la temperatura generada durante el mecanizado y se halla el comportamiento de la viruta esperado, la cual debe enroscarse y quebrarse debido a la alta velocidad y profundidad de corte utilizada durante la simulación de acuerdo a la conducta real del mecanizado de un Acero AISI 1045, bajo los parámetros del modelo constitutivo seleccionado.

Palabras claves: Forma de la viruta, Johnson and Cook, Método de elementos finitos, Modelo constitutivo, Modelo de falla.

1. Introducción

El arranque de viruta es uno de los métodos generalizados de mecanizado de diferentes materiales [1]. Tiene un papel esencial para la mejora de la calidad de las piezas y componentes mecanizados ya que los diferentes parámetros de corte se pueden simular sin necesidad de perder material o gastar herramienta probando nuevos parámetros de corte e incluso predecir el acabado y comportamiento de la viruta para realizar un mecanizado más eficiente.

Valores de interés como esfuerzos, deformaciones y temperaturas producidos en la zona del mecanizado pueden ser analizados y así determinar si la herramienta de corte soportaría las cargas a las cuales va a ser sometida, si la herramienta soportará las temperaturas generadas durante el mecanizado o predecir fallas debido a las grandes cargas generadas durante el mecanizado [2].

Uno de los factores más importantes durante la simulación de un corte estriba en la escogencia de un modelo constitutivo preciso. Actualmente varios modelos constitutivos han sido desarrollados para representar el comportamiento del material durante el proceso de mecanizado [2].

El Acero AISI 1045 presenta un comportamiento de viruta continuo y poco quebradizo para condiciones normales de corte, incluso llegando a ser fluida continua en espiral [3]. Se espera que la viruta sea enroscada pero fraccionada en esta simulación.

Cuando se trabaja con mayor profundidad de corte menor será el enroscamiento de la viruta [3], aunque el aumento de la velocidad de corte no tiene un gran impacto en el enroscamiento de la viruta en las simulaciones.

El objetivo del presente trabajo es evaluar los parámetros necesarios en el método de elementos finitos para obtener una simulación del arranque de viruta en tres dimensiones que se aproxime al comportamiento real usando el modelo constitutivo de Johnson and Cook y las constantes de falla del material bajo el modelo de Johnson and Cook. Para ello se desarrolló el siguiente modelo en tres dimensiones para el arranque de viruta en torno de un Acero AISI 1045.

2. Modelado por elementos finitos en tres dimensiones del arranque de viruta en torno usando dinámica explícita

2.1. Ecuaciones que gobiernan la dinámica explícita [4]

Las ecuaciones diferenciales parciales a resolver en un análisis de dinámica explícita expresan la conservación de la masa, el momento y la energía en coordenadas Lagrangianas. Estas, junto con un modelo de material y un conjunto de condiciones iniciales y fronterizas, definen la solución completa del problema.

La densidad en cualquier momento se puede determinar a partir del volumen actual de la zona y su masa inicial de la siguiente forma:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \tag{1}$$

Las ecuaciones diferenciales parciales que expresan la conservación del momento relacionan la aceleración con el tensor de tensión σ_{ij}

$$\rho\ddot{x} = b_x + \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} \tag{2}$$

$$\rho\ddot{y} = b_y + \frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} \tag{3}$$

$$\rho\ddot{z} = b_z + \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \tag{4}$$

La conservación de la energía se expresa como:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho}\left(\sigma_{xx}\dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\varepsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\varepsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\varepsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\varepsilon}_{zx}\right) \tag{5}$$

Estas ecuaciones se resuelven explícitamente para cada elemento del modelo, basado en valores de entrada al final del paso de tiempo anterior. Se usan pequeños incrementos de tiempo para asegurar la estabilidad y precisión de la solución [4].

2.2. Descripción del modelo

El modelo para el arranque de viruta [5] fue simulado usando los siguientes parámetros: Una pieza circular de 20mm de diámetro con una perforación de 16mm de diámetro y un espesor de 2mm para la pieza. Se usa solo media circunferencia y junto con la perforación se busca reducir el tiempo de cálculo, manteniendo un espesor suficiente para que no exista un comportamiento que no sea adecuado, ver figura 2. El buril se modela con las dimensiones de 4x3x3mm.

Los buriles en el torneado tienen 6 ángulos que son: ángulo de inclinación lateral, ángulo de desprendimiento lateral, ángulo de desprendimiento frontal, ángulo de inclinación hacia atrás, ángulo de entrada complementario de la arista principal y ángulo de salida de la arista secundaria [6], como se aprecia en la Figura 1. Los ángulos usados en esta simulación son: ángulo de desprendimiento lateral de 12° y el ángulo de inclinación lateral de 16°, debido a que son la recomendación promedio para el mecanizado de acero.

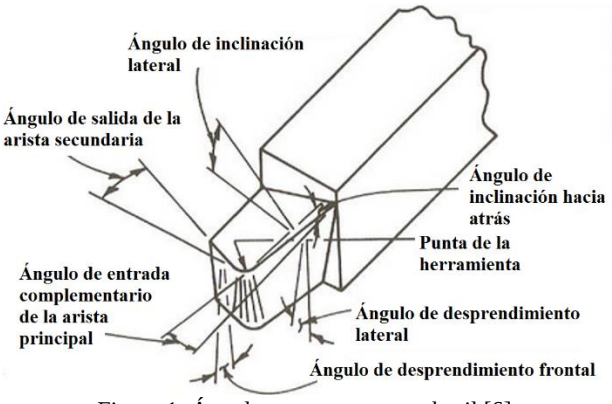

Figura 1: Ángulos presentes en un buril [6]

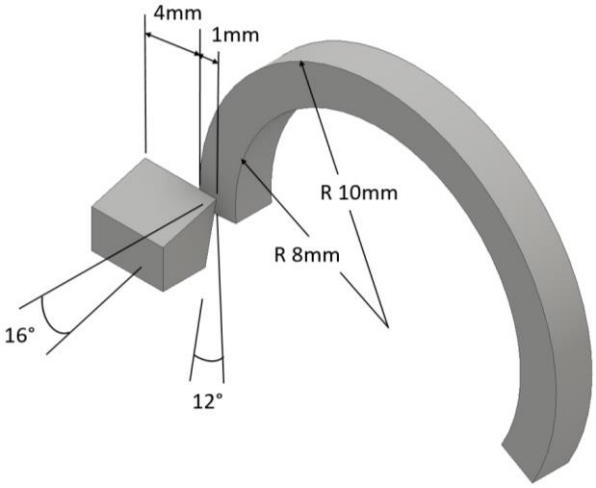

Figura 2: Modelo utilizado para la simulación

En el análisis el buril se asumirá como cuerpo rígido aplicando una velocidad a todos sus elementos y se le aplicarán los siguientes parámetros [7]:

Tabla 1: Parámetros de la herramienta de corte a 20 °C estándar [7]

Herramienta de corte	
Ángulo de desprendimiento lateral	12°
Ángulo de inclinación lateral	16°
Velocidad de avance	3342,3 mm/s
Profundidad de corte	1 mm

La herramienta de corte realiza un avance durante la mitad de la simulación, donde se detiene, el material a mecanizar sigue rotando hasta terminar la simulación, para poder apreciar el comportamiento de la viruta.

Para la pieza de Acero AISI 1045 [7, 8] tenemos

Acero AISI 1045	
Densidad	7800 kg/m^3
Módulo de Young	200 Gpa
Coeficiente de Poisson	0,3
Velocidad de giro	5000 rad/s
Calor específico	423 J/ kg °C

los siguientes parámetros:

Tabla 2: Parámetros de la pieza a 20 °C estándar [7, 8]

Durante la simulación se usa un coeficiente de fricción estático de 0,31 y un coeficiente de fricción dinámico de 0,1 para 3000 m/min [9,10].

2.3. Mallado del modelo

En el modelo de elementos finitos de la pieza a trabajarse usa un mallado uniforme de elementos hexaédricos dominantes. La pieza a trabajar tiene un tamaño de elemento de 0,067 mm, aproximadamente. La herramienta de corte tiene un tamaño de elemento de 0,6mm. La pieza a trabajar debe tener un tamaño adecuado de elemento para lograr una independencia de malla, si es demasiado grande se podrían obtener resultados que no son correctos y si es muy pequeño se elevaría demasiado el tiempo de cálculo.

Las características del mallado se pueden apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3: Características del mallado

Nodos	537487
Elementos	502375
Calidad mínima de elemento	0,89658
Calidad máxima de elemento	0,99999
Calidad promedio de elemento	0,99113
Desviación estándar para calidad de elemento	0,00855
Relación de aspecto mínima	1,00310
Relación de aspecto máxima	1,42160
Relación de aspecto promedio	1,11070
Calidad ortogonal mínima	0,89339
Calidad ortogonal máxima	1,00000
Calidad ortogonal promedio	0,99997

En la Figura 3 se puede observar el mallado obtenido.

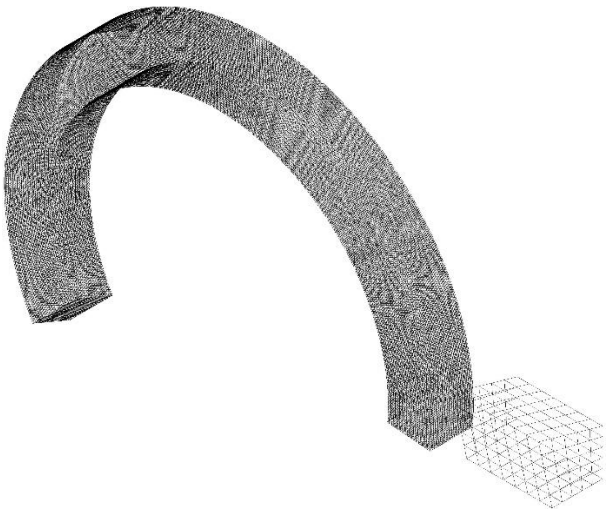

Figura 3: Mallado utilizado

2.3. Modelo constitutivo y de falla Johnson and Cook

En la simulación se agrega el modelo constitutivo de Johnson and Cook, para plasticidad y falla en este caso, otros modelos constitutivos también pueden ser utilizados si se tienen plenamente definidas las constantes, pero siempre se requieren los modelos de plasticidad y falla.

Durante las simulaciones se pudo determinar que todos los materiales aparentemente fallan igual si no se definen las constantes de falla para cada material en específico. Para el modelo de plasticidad Johnson and Cook [7, 8, 11, 12] se tienen las siguientes constantes:

Tabla 4: Plasticidad Johnson and Cook [7, 8, 11, 12]

Plasticidad Johnson And Cook AISI 1045	
A (Límite elástico)	553 MPa
B (Módulo de endurecimiento)	600 MPa
C (Coeficiente de sensibilidad a la tasa de deformación)	0,0134
n (Coeficiente de endurecimiento)	0,234
m (Coeficiente de ablandamiento térmico)	1
T_F (Temperatura de fusión)	1460 °C
T_0 (Temperatura ambiente)	20 °C
$\dot{\varepsilon}_0$ (Tasa de deformación plástica de referencia)	1 s^{-1}

El modelo de falla Johnson and Cook tiene las constantes [11, 12] mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5: Falla Johnson and Cook [11, 12]

Falla Johnson And Cook AISI 1045	
D1	0,06
D2	3,31
D3	-1,96
D4	0,0018
D5	0,58

3. Resultados

3.1. Resultados en las simulaciones

Para obtener los resultados se requirió realizar una gran cantidad de simulaciones, variando algunos parámetros para poder llegar a la simulación final.

En un principio se empezó a simular con velocidades de giro demasiado elevadas, hasta encontrar un mallado que mostrase una formación de viruta, al disminuir la velocidad de giro se observó un elevado incremento en el tiempo de simulación final.

Una vez ajustada la velocidad deseada se continuó mejorando el mallado, elevando aún más el tiempo de simulación, pero era necesario mejorar el mallado.

Esta simulación fue realizada con un procesador de 4 núcleos y con el mallado presentado, que puede ser mejorado, se obtuvo un tiempo de simulación de 12104 minutos, 202 horas o aproximadamente 8 días y medio.

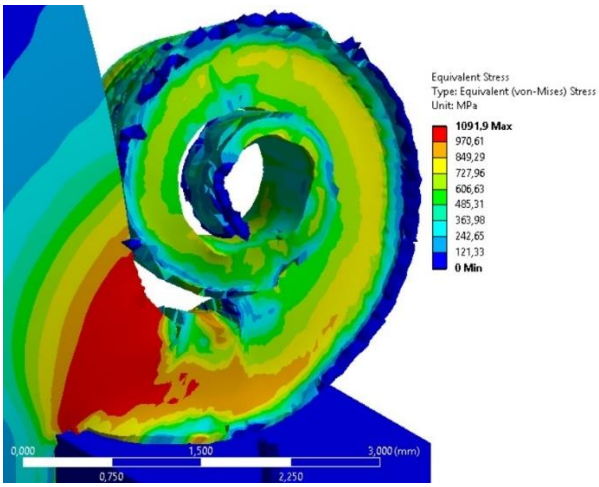

Figura 4: Esfuerzo equivalente máximo Von Mises

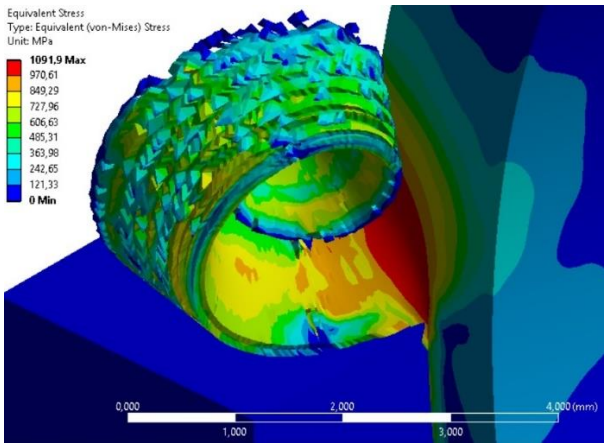

Figura 5: Esfuerzo equivalente máximo Von Mises desde otra perspectiva

En las figuras 4 y 5 se observa el comportamiento de la viruta y los esfuerzos producidos en esta, en donde obtenemos un esfuerzo máximo de 1091,9 MPa para las condiciones modeladas en el instante de tiempo que la simulación ha finalizado.

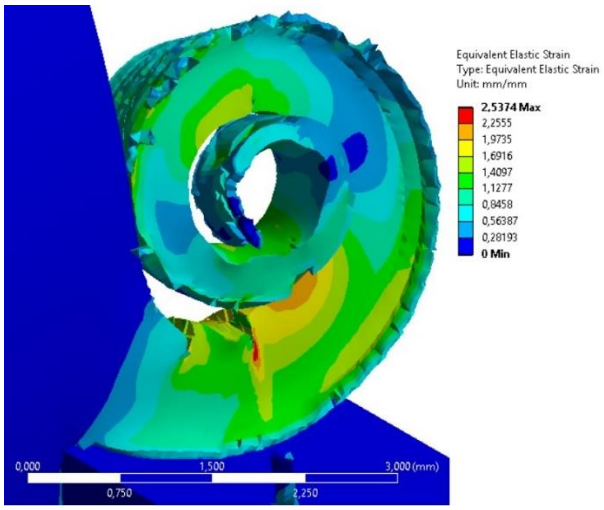

Figura 6: Deformación máxima equivalente Von Mises

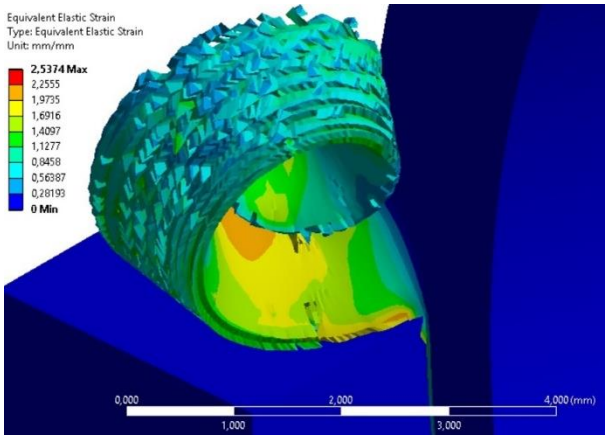

Figura 7: Deformación máxima equivalente Von Mises desde otra perspectiva

En las figuras 6 y 7 se observa el comportamiento de la viruta y las deformaciones producidas en esta, en donde obtenemos una deformación elástica equivalente máxima de 2,5374 mm/mm para las condiciones simuladas.

En las figuras 5 y 7 se observa desde el otro lado el comportamiento de la viruta, en donde se notan algunas grietas producidas durante el mecanizado, así como el máximo esfuerzo producido en el contacto entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo.

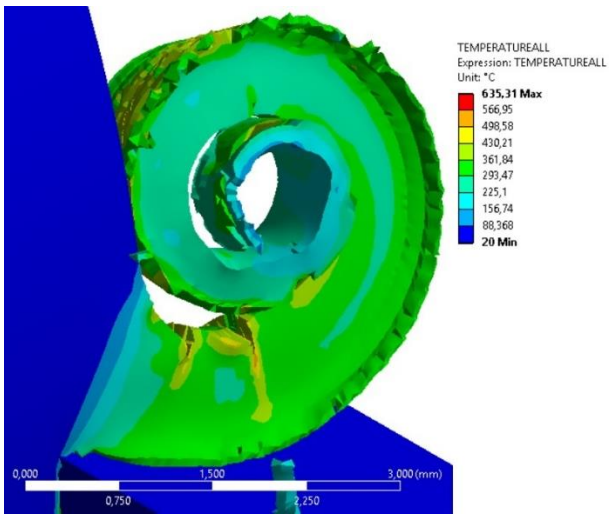

Figura 8: Temperaturas

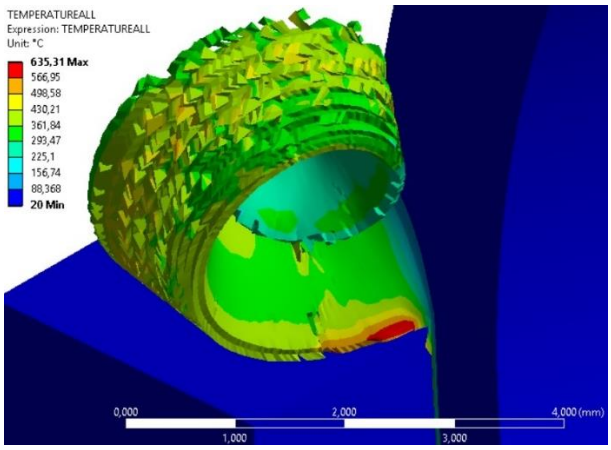

Figura 9: Temperaturas desde otra perspectiva

Las temperaturas máximas generadas durante el mecanizado fueron de 635,31 °C, temperatura muy alejada del punto de fusión del Acero AISI 1045 por lo cual no hay peligro de que se derrita el material. Además, esta temperatura no representa un cambio de estructura cristalina durante el mecanizado ya que se necesita como mínimo sobrepasar los 800 °C [13].

En la Figura 9, se observa que la temperatura máxima del mecanizado ocurre en la zona de desprendimiento de la viruta.

3.2. Esfuerzo equivalente Von Mises y deformación equivalente Von Mises

Con los resultados obtenidos durante la simulación, figura 10 y figura 11, se presenta una curva de esfuerzo máximo contra tiempo y de deformación máxima contra tiempo, con estos datos podremos realizar una gráfica esfuerzo deformación máximos posteriormente.

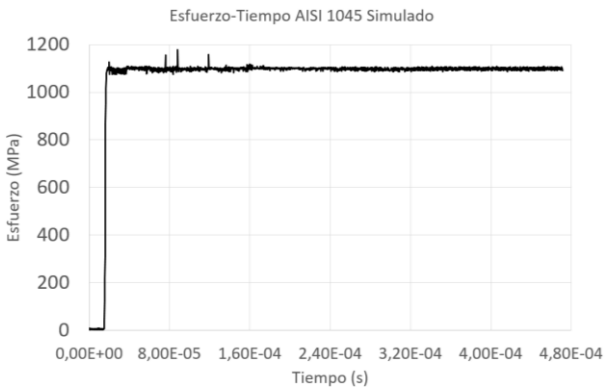

Figura 10: Esfuerzo máximo equivalente Von Mises durante el tiempo de simulación para el modelo Johnson and Cook

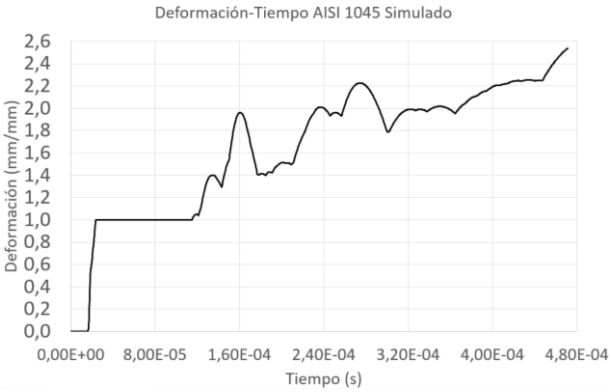

Figura 11: Deformación máxima equivalente Von Mises durante el tiempo de simulación para el modelo Johnson and Cook

Con los datos obtenidos durante la simulación se presenta la curva esfuerzo deformación máximos del Acero AISI 1045.

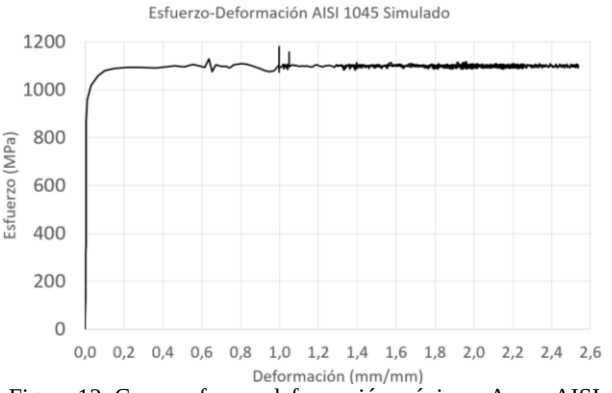

Figura 12: Curva esfuerzo-deformación máximos Acero AISI 1045

Como observa en la curva esfuerzo deformación tiene el comportamiento esperado, el mallado es fino pero se podría mejorar aún más y se deberían tomar más datos para apreciar el comportamiento como debería de ser, aunque se acerca al comportamiento real [14].

En la figura 13 se presenta la curva temperatura contra tiempo, durante la simulación la temperatura máxima alcanzada fue de 635,31 °C.

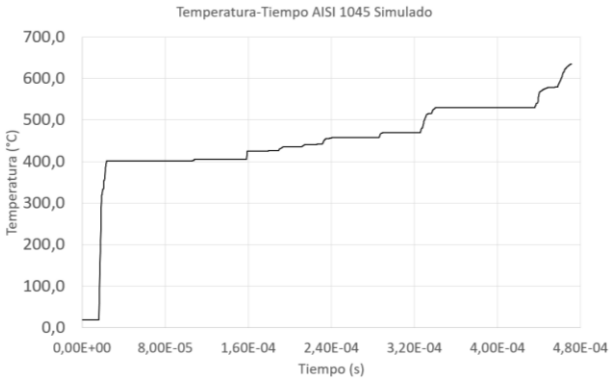

Figura 13: Temperatura máxima durante el tiempo de simulación para el modelo Johnson and Cook

En la figura 13 se observa que a medida que aumenta el avance de la herramienta, las temperaturas generadas durante el mecanizado aumentan. La curva esfuerzo deformación para un nodo durante el instante del mecanizado en un punto de interés (por donde la herramienta realiza el mecanizado) es la siguiente.

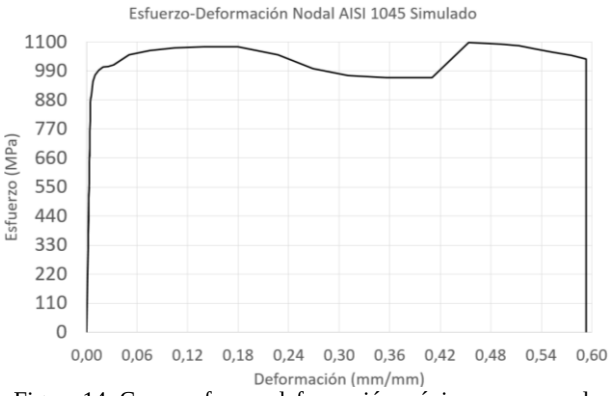

Figura 14: Curva esfuerzo-deformación máximos en un nodo Acero AISI 1045

En la figura 14 se observa el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación para el acero AISI 1045 bajo estas condiciones. El comportamiento es el esperado ya que es similar al comportamiento de deformación normal bajo carga axial (prueba de tracción). El comportamiento de la temperatura alcanzada por el material durante el mecanizado en el nodo de interés es el siguiente.

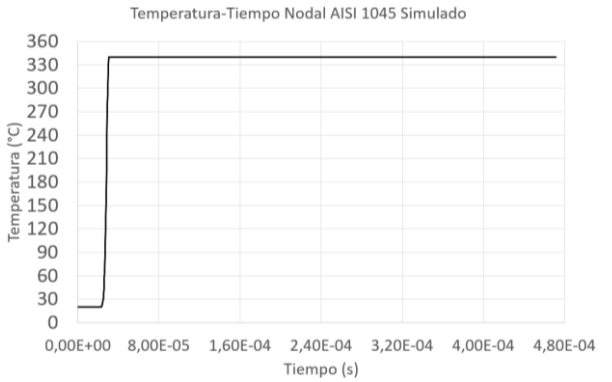

Figura 15: Curva Temperatura-tiempo máximo en un nodo Acero AISI 1045

En la figura 15 se observa que la temperatura del nodo llega a casi 340°C, por lo tanto, el material no corre peligro de llegar al punto de fusión ya que este está en 1460°C. Además, se puede decir que el acero no cambiará de estructura cristalina ya que para esto se necesita al menos 800°C para el Acero AISI 1045 [13]. Incluso durante la simulación el acero llega a 635,31 °C, por lo tanto, sigue sin cambiar de estructura cristalina.

Se observa que la viruta se rompe, pero la viruta del acero 1045 en condiciones normales no lo hace, esto se debe a la gran velocidad de giro de la pieza (3000 m/min), siendo que la velocidad de este material normalmente no supera los 100 m/min, y también esto se debe al gran avance que se está realizando durante la simulación el cual es de 1 mm/r, muy elevado, ya que normalmente es de 0,2 o 0,5 mm/r.

A pesar de todo, el comportamiento de la viruta no se aleja demasiado de lo esperado, la viruta se comporta como debe, ver figura 16, y se nota que se quiebra debido a las condiciones del corte.

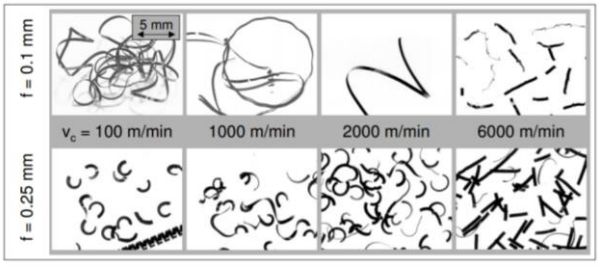

Figura 16: Comportamiento de la viruta AISI 1045, 1 mm de profundidad [10]

Realizando una comparación podemos apreciar las diferencias entre un mecanizado real y esta simulación.

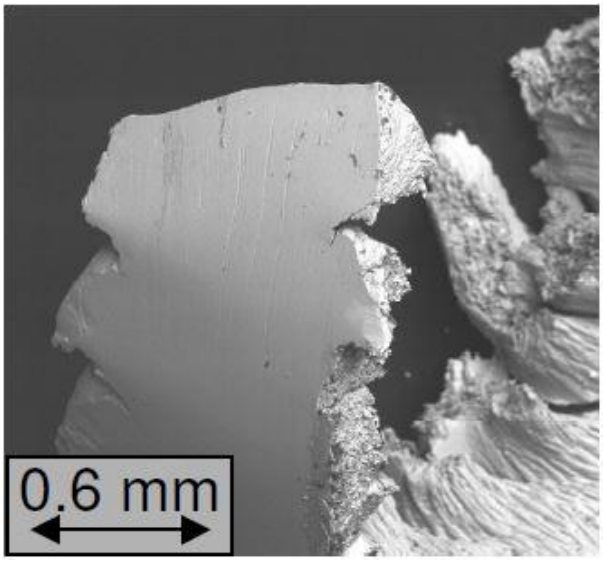

Figura 17: Parte inferior de la viruta AISI 1045 Avance=0,2 mm, Velocidad de corte= 100 m/min, Profundidad=1 mm [10]

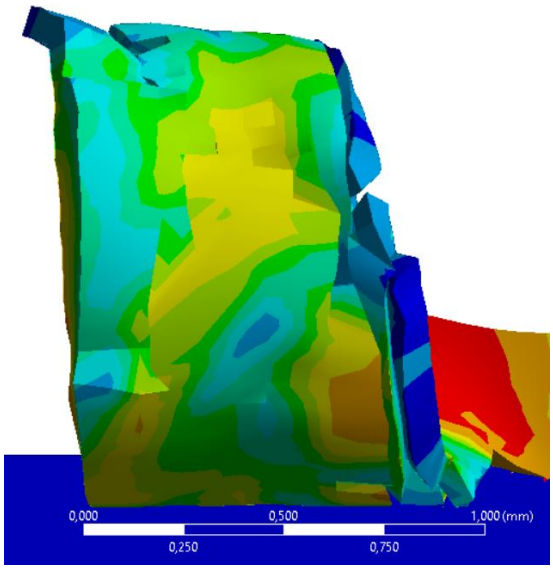

Figura 18: Parte inferior de la viruta AISI 1045 Avance=1 mm, Velocidad de corte= 3000 m/min, Profundidad=1 mm

En la figura 17 y 18 se observa el comportamiento de la viruta en la parte inferior, a pesar de estar a condiciones totalmente diferentes se observa un comportamiento simular.

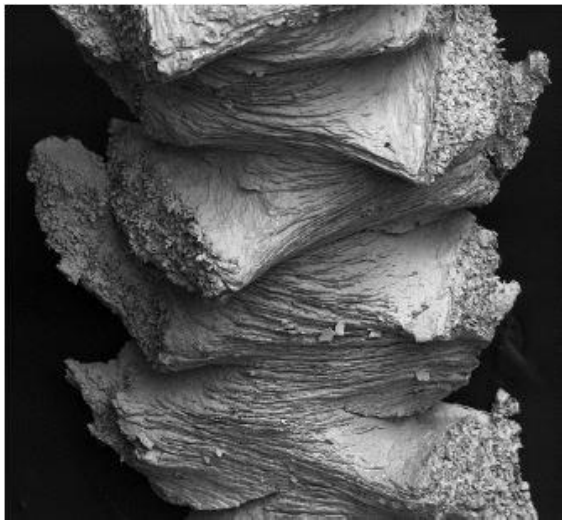

Figura 19: Parte superior de la viruta AISI 1045 Avance=0,2 mm, Velocidad de corte= 100 m/min, Profundidad=1 mm [10]

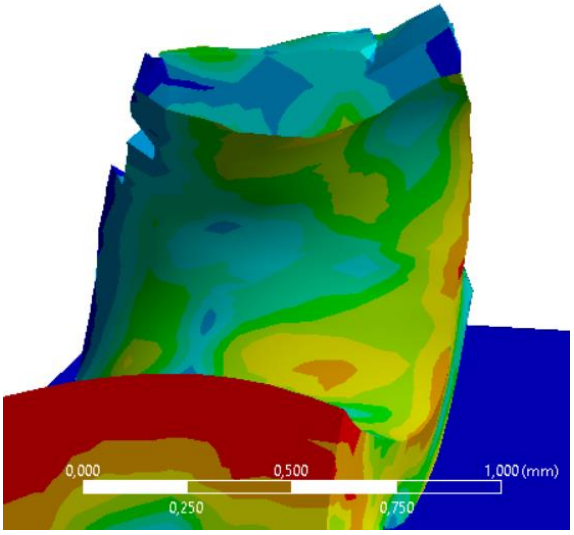

Figura 20: Parte superior de la viruta AISI 1045 Avance=1 mm, Velocidad de corte= 3000 m/min, Profundidad=1 mm

En las figuras 19 y 20 se observa el comportamiento de la viruta en la parte superior; en este caso el comportamiento si es muy diferente, debido a condiciones de corte y de mallado.

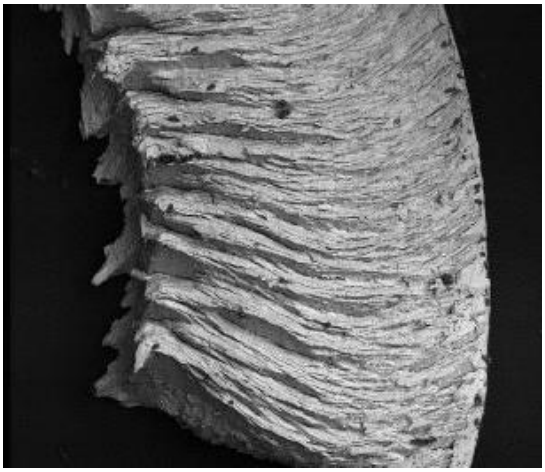

Figura 21: AISI 1045 Velocidad de corte= 1000 m/min, avance = 1mm [10]

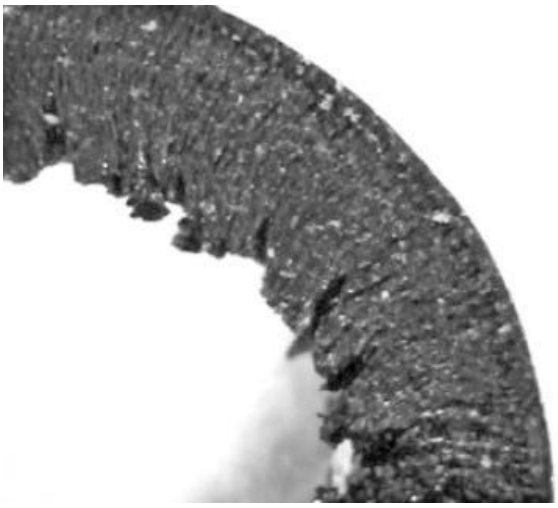

Figura 22: Comportamiento de la viruta AISI 1045, velocidad de corte= 25 m/min, avance = 1mm [15]

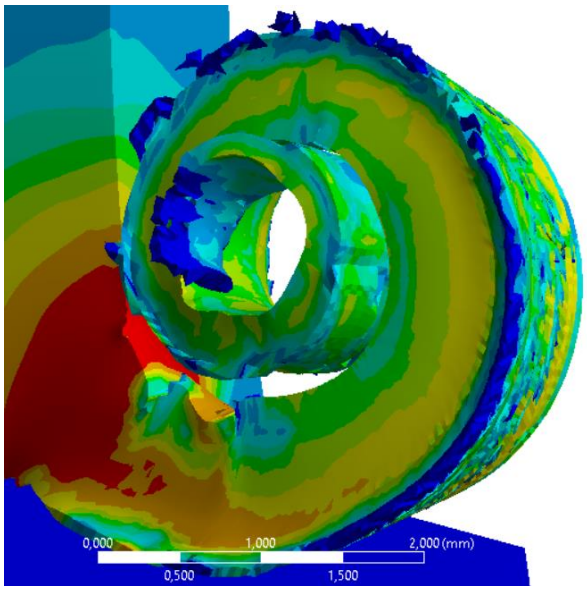

Figura 23: Comportamiento de la viruta AISI 1045 simulada, 1mm de profundidad y avance = 1mm

En la figura 21, 22 y 23 se muestran el comportamiento de la viruta a 1000 m/min, 25 m/min y 3000 m/min respectivamente, a pesar de todos los casos tienen diferentes condiciones de corte el comportamiento general de la viruta siempre es muy simular, incluso para el modelo simulado.

4. Conclusiones

En este trabajo se presenta un modelo de elementos finitos del arranque de viruta para el acero AISI 1045. Se sugiere agregar como mínimo los cuatro ángulos de corte esenciales en el mecanizado en torno, pues los buriles reales tienen más de dos ángulos.

Este modelo puede predecir el esfuerzo, la deformación y el comportamiento de la viruta para cualquier material plenamente definido para cualquier modelo de plasticidad y falla. En esta simulación se implementó el modelo Johnson and Cook y se comparó con los resultados experimentales disponibles en la literatura.

Se analizaron los parámetros de mallado necesarios para obtener un buen comportamiento de la viruta intentando reducir al máximo el tiempo de simulación y obteniendo resultados cercanos a comportamientos reales.

Entre mayor velocidad de corte menor es el tiempo de simulación, por lo tanto se buscó en la literatura la mayor velocidad de corte utilizada y se trabajó con este valor. El avance en el corte cambia el comportamiento de la viruta, a mayor avance más quebradiza es la viruta, a menor avance se vuelve continua.

Se sabe que durante un mecanizado la estructura cristalina de los materiales no cambia, y esto se pudo comprobar con esta simulación ya que no se llega a la temperatura mínima requerida para realizar un cambio de estructura cristalina.

Referencias

[1] I.S. Boldyrev, I.A. Shchurov, A.V. Nikonov, "Numerical Simulation of the Aluminum 6061-T6 Cutting and the Effect of the Constitutive Material Model and Failure Criteria on Cutting Forces' Prediction," Procedia Engineering 150 (2016) 866 – 870.

[2] M. Daoud, J.F. Chatelain, A. Bouzid, "Effect of rake angle-based Johnson and Cook material constants on the prediction of residual stresses and temperatures induced during AL2024-T3 machining process," International Journal of Mechanical Sciences, 2017.

[3] Heyao Shen, Minghong Wang, "Finite Element Simulation Analysis of Three-Dimensional Cutting Process Based on AISI 1045," IJRES Volume 3 Issue 8 (2015) 35-39.

[4] Ansys Workbench, Explicit Dynamics Analysis Guide. (2017). Ansys Inc.

[5] M. Mahnama, M.R. Movahhedy, "Application of FEM simulation of chip formation to stability analysis in orthogonal cutting process," Journal of Manufacturing Processes 14 (2012) 188–194.

[6] KADJ. (26 de marzo de 2014). Torno y fresadora [Entrada en blog]. METALMECANICA. Recuperado de http://metalmecanicakadj.blogspot.com.co/2014/03/torno-y-fresadora.html.

[7] J. Rech, C.Claudin, E.D'Eramo, "Identification of a friction model—Application to the context of dry cutting of an AISI 1045 annealed steel with a TiN-coated carbide tool," Tribology International 42 (2009) 738–744.

[8] G.G. Ye, S.F.Xue, W.Ma, M.Q.Jiang, Z.Ling, X.H.Tong, L.H.Dai, "Cutting AISI 1045 steel at very high speeds," International Journal of Machine Tools & Manufacture 56 (2012) 1–9.

[9] J.P. Davim, C. Maranhão, "A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis," Materials and Design 30 (2009) 160–165.

[10] S. Hoppe, "Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting", Ph.D. dissertation, directed by F. Klocke and E.h. mult. H. K. Tönshoff, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen der, 8 Dezember. 2003.

[11] Mohamed N.A. Nasr, "Effects of Sequential Cuts on Residual Stresses when Orthogonal Cutting Steel AISI 1045," Procedia CIRP 31 (2015) 118 – 123.

[12] C.Z.Duan, T.Dou, Y.J.Cai, Y.Y.Li, "Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel," International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 1, No. 5, May 2009.

[13] Carlos Bohorquez, Estephany Sabogal, Alvaro Rodriguez, Jorge Moreno, "Caracterización microestructural de un acero AISI/SAE 1045 tratado térmicamente en el intervalo intercrítico," Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica y Mecatrónica, Barranquilla, Colombia, 2013.

[14] AulaBach. Diagrama de esfuerzos y deformaciones. Recuperado de: http://aulabach.salesianosatocha.es/pluginfile.php/9792/mod_imscp/content/2/diagrama_de_esfuerzos_y_deformaciones.html

[15] Benjámin Borsos, András Csörgő, Anna Hidas, Bálint Kotnyek, Antal Szabó, Attila Kossa, Gábor Stépán, "Two-Dimensional Finite Element Analysis of Turning Processes," Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 61(1), pp. 44-54, 2017.