

Capítulo 6

Conclusiones

A la luz de los resultados obtenidos, cabe realizar varias interpretaciones a distintos niveles, fruto del proceso de realización del presente Documento. Por un lado se concretarán algunas ideas nacidas al albor de las gráficas obtenidas, y por otro lado se explicarán algunos conceptos surgidos a través del estudio profundo del desgaste y del proceso mismo de creación del Trabajo Fin de Máster.

6.1. El desgaste como función de la fricción

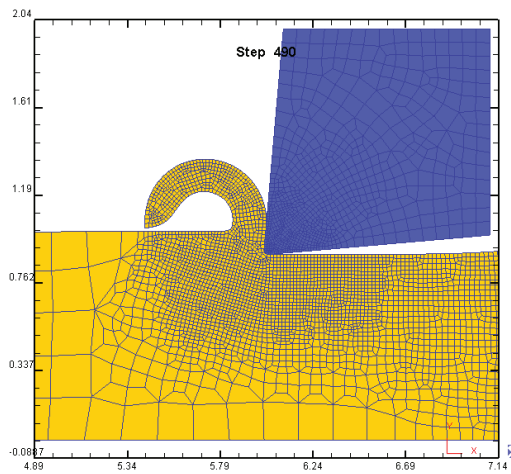
Una vez se comprende el desgaste como fruto del contacto y desplazamiento relativo entre materiales, y bajo el marco de los procesos de mecanizado y la concreción del corte ortogonal, se pueden entender varios conceptos relativos al comportamiento del fenómeno. Se ha de distinguir claramente entre las dos zonas de estudio, esto es, dos tipos de desgaste diferentes, flanco y cráter. La forma de las gráficas obtenidas mapean el fenómeno de manera radicalmente diferente. El hecho de utilizar 2 puntos diferentes en cada zona permitiría diferenciar el comportamiento por zonas, si se diera. En los casos simulados no se da tal cosa, por lo que los datos de zonas iguales se comportan esencialmente igual. Antes de comenzar con las conclusiones de los tipos de desgaste hay que indicar un fenómeno que afecta directamente al desgaste en cráter, el comportamiento de la viruta.

6.2. Comportamiento de la viruta

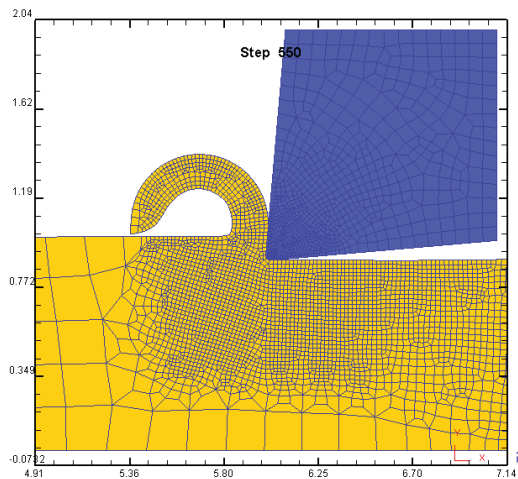
Como otros estudios ya comentados indican anteriormente, aunque de forma muy superficial, la viruta varía con la fricción[52], de forma que para un valor de fricción bajo el radio de curvatura es menor que para un valor de fricción alto.

En el trabajo realizado se estudia el comportamiento en 11 valores del coeficiente de fricción, de forma que se ha tenido la oportunidad de, por un lado, ratificar el resultado de Cheriguene, y por otro ampliar grandemente dicho concepto y detallarlo. Pese a que pueda parecer un subproducto sin más importancia de la variación de la fricción, influye grandemente en el desgaste de cráter, sobre el que se habla más tarde.

Se ofrece a continuación la evolución de la viruta para los once valores de fricción, donde se observa la evolución de la viruta:

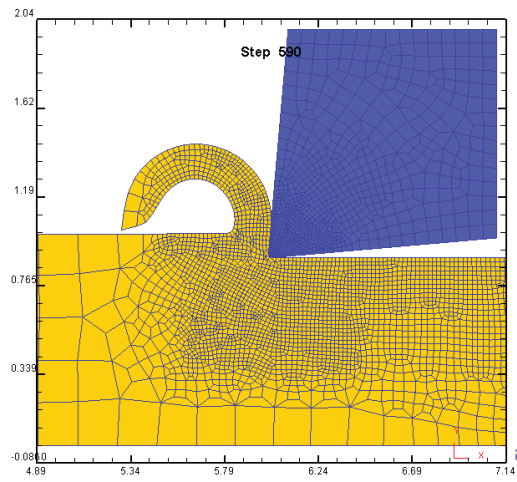


a) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0

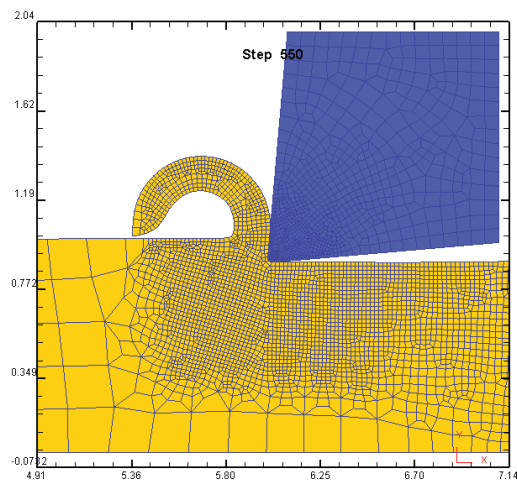


b) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,1

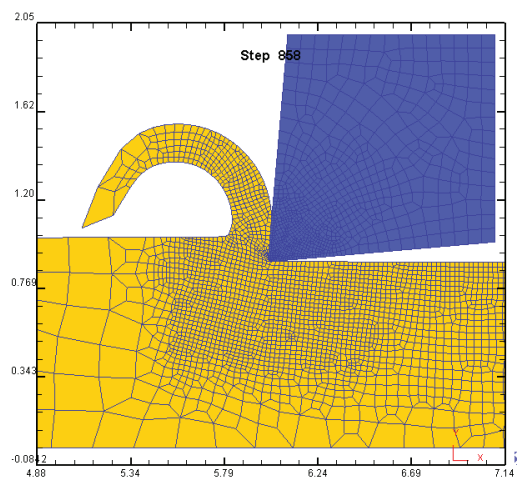
Figura 6.1: Evolución de la viruta, fricción 0 y 0,1.



c) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,2

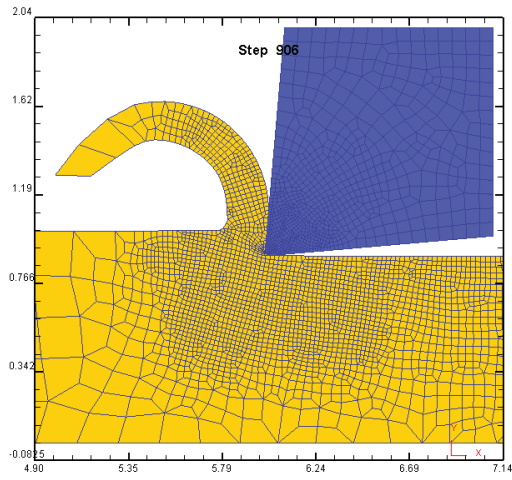


d) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,3

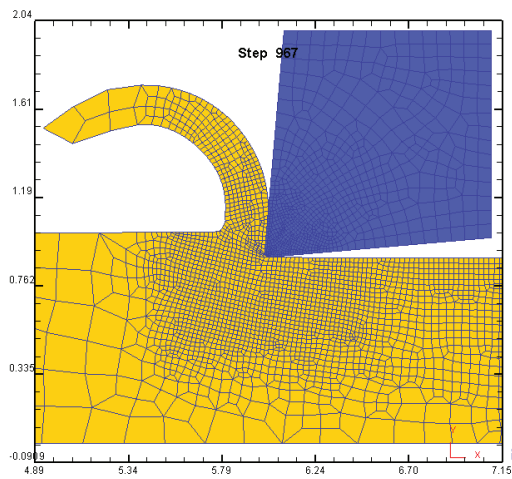


e) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,4

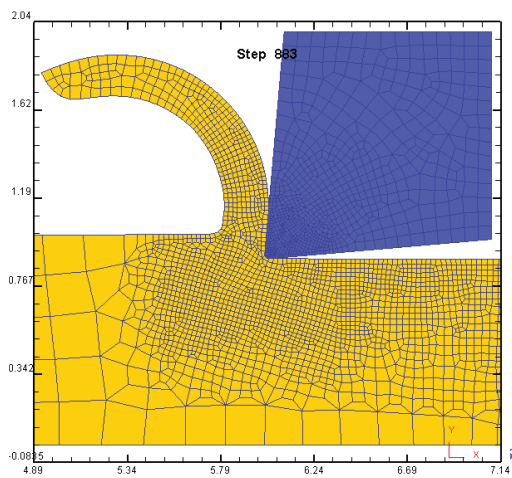
Figura 6.2: Evolución de la viruta, fricción 0,2, 0,3, 0,4.



f) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,5

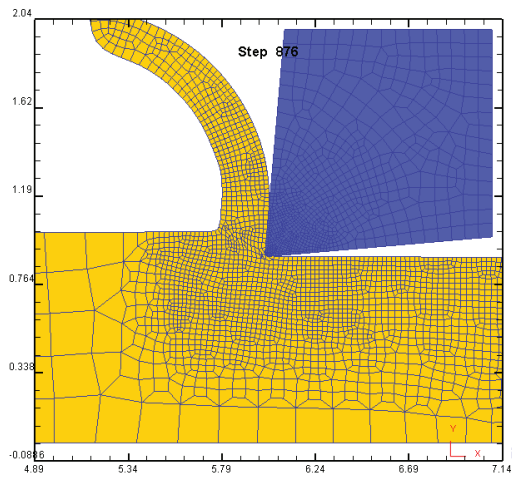


g) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,6

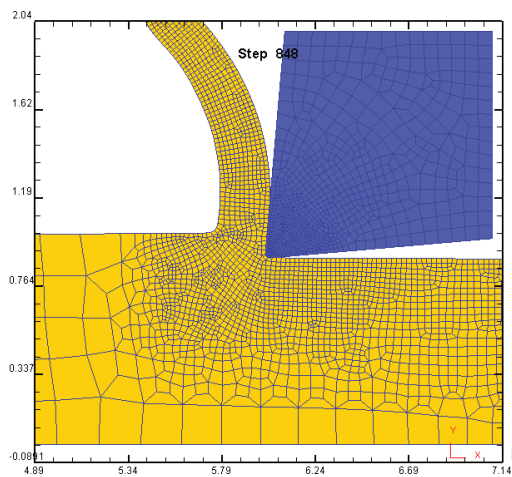


h) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,7

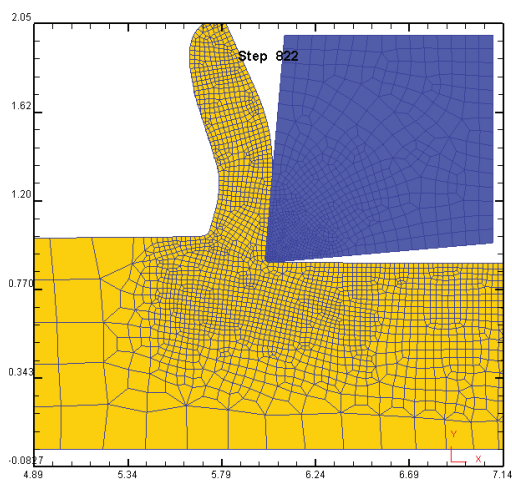
Figura 6.3: Evolución de la viruta, fricción 0,5, 0,6, 0,7.



i) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,8



j) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 0,9



k) Viruta para el coeficiente de fricción igual a 1

Figura 6.4: Evolución de la viruta, fricción 0,8, 0,9, 1.

6.3. Zonas de desgaste

Se ofrecen a continuación las conclusiones según tipos de desgaste estudiados, de flanco y de cráter.

6.3.1. Desgaste de flanco

El comportamiento del desgaste de flanco es razonablemente sencillo, pues es de proporcionalidad directa. Conforme aumenta el coeficiente de fricción, aumenta el desgaste, siguiendo una ecuación lineal con ordenada en el origen mayor que cero:

$$y = A + Bx, A, B > 0$$

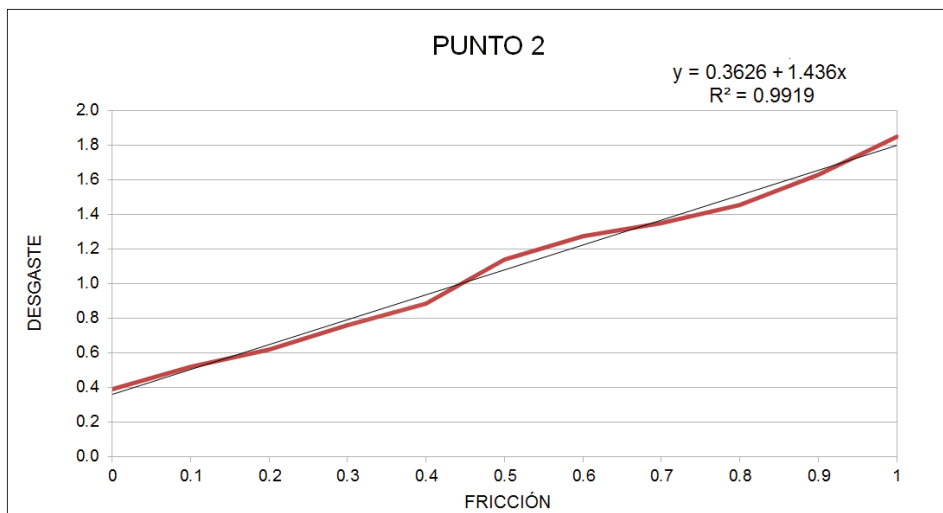


Figura 6.5: Desgaste de flanco de un AISI 4340.

Los coeficientes A y B de la ecuación son función de los materiales de la herramienta y la pieza, sin embargo en ningún momento cambian de signo. El desgaste es mayor según aumenta la fricción.

La ordenada en el origen, A, indica que no se puede, en ningún momento, hacer cero el desgaste, por muy baja que sea la fricción. Siempre ocurrirá desgaste aunque esté la superficie lubricada.

6.3.2. Desgaste de cráter

El desgaste de cráter es algo más complejo que el de flanco, ya que no es lineal. El desgaste en los puntos estudiados crece con la fricción hasta un máximo y empieza a disminuir. La

forma aproximada de la función, en aquellos puntos que tienen desgaste incluso para fricción nula es una ecuación parabólica de esta forma:

$$y = A + Bx + Cx^2, A \geq 0, B > 0, C < 0$$

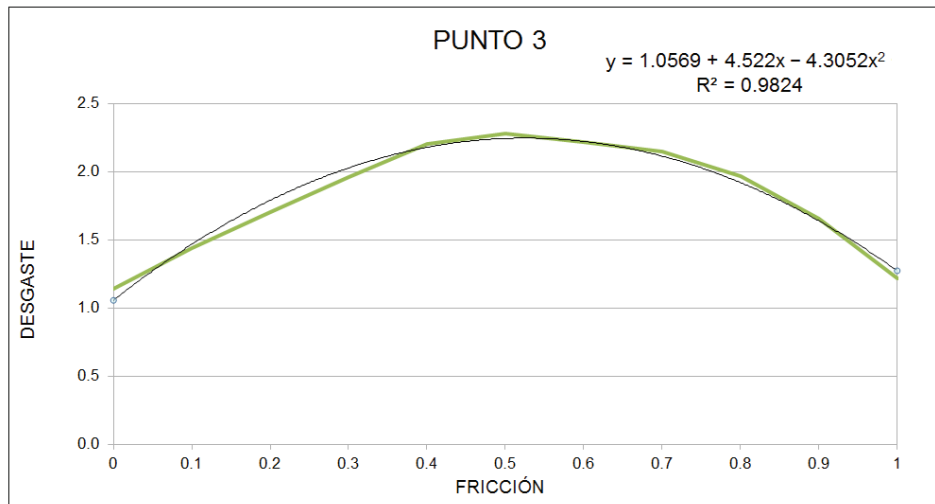


Figura 6.6: Desgaste de cráter de un AISI 1030.

Los coeficientes no tienen un comportamiento tan sencillo como en el caso anterior, debido a la disposición de los puntos de estudio. En la disposición de los puntos para el estudio del desgaste de cráter se ha de tener en cuenta uno de los fenómenos asociados al aumento de la fricción estudiados un poco antes, la variación de la curvatura de la viruta conforme se aumenta la fricción.

El hecho de que el radio de curvatura aumente con la fricción supone que el área de contacto de la pieza y la herramienta varía también. Esto implica un comportamiento del desgaste un poco más confuso que en el caso del flanco. Al ir aumentando la fricción y con ésta el radio de curvatura, también se intensifican los esfuerzos del desgaste en la zona del cráter. El aumento de la superficie no es relevante hasta que se llega a un máximo en el cual se empieza a repartir el desgaste lo suficiente como para que a nivel de punto el mismo disminuya. Esto no quiere decir que el desgaste sea menor a partir del máximo, si no que está más repartido.

Un hecho revelador sobre este fenómeno es que en alguno de los casos uno de los puntos sobre los que se estudia el desgaste de cráter tiene valores nulos para fricción nula, y empieza a arrojar valores mayores que cero cuando la fricción aumenta.

Capítulo 7

Trabajos Futuros

En este capítulo se presentan algunas ideas que pueden servir de líneas futuras de trabajo, nacidas como consecuencia del desarrollo del presente Documento.

7.1. Sobre el estudio del desgaste

Una de las líneas de investigación que más claras se vislumbran a la luz del presente Trabajo es la experimentación para cuantificar adecuadamente el comportamiento del desgaste. Para ello se propone tomar un acero AISI 1045, pues es sobre el que mejor se ajustan las curvas descritas ya que los coeficientes de Usui están calculados ya para este material, y estudiar el desgaste producido en la herramienta. Por un lado se puede ajustar el comportamiento descrito y obtener un coeficiente de fricción de las gráficas obtenidas.

Además se puede intentar estudiar la relación entre la fricción y el radio de viruta. Puede ser interesante tener un indicador de la fricción a través del estudio geométrico de la viruta.

En aquellos casos en los que se pueda variar el coeficiente de fricción mediante lubricación, se puede intentar conseguir ajustar las curvas de desgaste a fricción aunque probablemente las dificultades técnicas asociadas hagan de esto algo bastante complicado.

7.2. Sobre los datos de entrada

La base de datos de materiales MADAMS es una de las fuentes para las ecuaciones que modelan el comportamiento de los materiales en el programa utilizado, lo cual da entidad tanto al código como al presente Documento pues, al menos, los materiales están introducidos con datos fidedignos.

Sin embargo puede entenderse que falta un conjunto de geometrías de insertos representadas de forma fidedigna, que permitan hacer predicciones sobre las mismas, sobretodo en

lo referente a la fricción. Sería interesante ocuparse de integrar y estudiar las plaquitas con rompevirutas disponibles en el mercado o en laboratorio, pues permitiría estudiar el efecto sobre la viruta de las mismas.

Asimismo, se entiende como algo interesante estudiar las posibles diferencias entre modelos de comportamiento distintos para el mismo material.

Capítulo 8

Anexos

A la presente Memoria se añaden tres documentos que completan la información de la misma, pero que no tienen cabida en esta.

El Anexo I: Notas acerca del uso de Deform-2D, detalla el procedimiento adecuado para realizar las simulaciones utilizando el código comercial Deform-2D.

El Anexo II: Manual de uso de Excel, explica los archivos utilizados y los pasos que se han realizado para llevar a cabo la manipulación correcta de los datos arrojados por las simulaciones realizadas.

El Anexo III: Resultados de las simulaciones, contiene las gráficas con los datos de desgaste de las simulaciones de los casos indicados en el capítulo 5 “Resultados obtenidos” tal y como se obtienen del módulo de post-procesado de Deform-2D.

Bibliografía

- [1] Layard, A. G., *A Popular Account of Discoveries at Nineveh*, J. C. Derby, New York, 1854.
- [2] Stribeck, R., *Kugellager für beliebige Belastungen*, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Vol. 45, 1901.
- [3] Stribeck, R., *Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager*, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 46, 1902.
- [4] Archard, J. F., *Contact and Rubbing of Flat Surfaces*, Journal of Applied Physics, Vol. 24, Issue 8, 1953, p. 981.
- [5] Usui, E., Shirakashi, T., Kitagawa, T., *Analytical Prediction of cutting Tool Wear*, Wear, Vol. 100, 1984, pp. 129-151.
- [6] Huang, Y., Liang, S. Y., *Modeling of CBN Tool Flank Wear Progression in Finish Hard Turning*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 126, 2004, pp. 98-106.
- [7] Bhushan, B., *Principles and applications of tribology*, JOHN WILEY & SONS, INC., New York, 1999.
- [8] Ruan, H. et al. *The Investigation of Tool Wear in Metal Machining Using Finite Element Method*. Key Engineering Materials, 395, 2009, pp. 407-408.
- [9] Wassdahl, J., *Modeling of Wear Mechanisms in Mechanical Cutting*, Master Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, 2006.
- [10] Albarracín Aguillón, P. R., *Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz*, Lotodoa, Colombia, 1993.
- [11] Smith, C. B., *Guiza: Cómo se construyó La Gran Pirámide*, Editorial Crítica, Madrid, 2007. ISBN: 9788484328889.
- [12] Amontons, G., *Histoire de l'Académie Royale des Sciences avec les Mémoires de Mathématique et de Physique*, 1699, p. 206.

- [13] Telescope, T., *The Newtonian System of Philosophy Adapted to the Capacities of Young Gentlemen and Ladies, and familiarized and made entertaining by Objects with which they are intimately acquainted*, London, 1761.
- [14] Bowden, F. P., Tabor, D., *The friction and lubrication of solids*, 1950, pp. 87-89.
- [15] Griffith, W. P., Morris, P. J. T., *Charles Hatchett FRS (1765-1847), Chemist and Discoverer of Niobium*, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 57, No. 3, 2003, pp. 299-316.
- [16] Reye, T., *Zur Theorie der Zapfengreibund*, Der Civilingenieur 4, 1860, pp. 235-255.
- [17] Thurston, R. H., *Friction and lubrication - Determination of the laws and co-efficients of friction by new methods and with new apparatus*, Trübner and Co., Ludgate Hill, London, 1879.
- [18] Woydt, H., Wäsche, R., *The history of the Stribeck cruve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens*, Elsevier, Amsterdam, 2010.
- [19] Hersey, M. D., *The Laws of Lubrication of Horizontal Journal Bearings*, J. Wash. Acad. Sci., Vol. 4, 1914, pp. 542-552.
- [20] Jost, P., *Tribology: How a word was coined 40 years ago*, Tribology & Lubrication Technology, Vol. 3, 2006, pp. 24-28.
- [21] Holm, R., *Electrical Contacts*, H. Gerber, Stockholm, 1946.
- [22] Meng, H. C., Ludema, K. C., *Wear models and predictive equations: their form and content*, Wear, Vol. 182, 1995, pp. 443-457. Xie, L., *Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method*, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe, 2004.
- [23] Hegadekatte, V., Huber, N., Kraft, O., *Finite Element based simulation of dry sliding wear*, Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 13, 1975, pp. 57-75.
- [24] Yuksel, C., Kahraman, A., *Dynamic tooth loads of planetary gear sets having tooth profile wear*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 39-7, 2004, pp. 695-715.
- [25] Flores, P., *Modeling and simulation of wear in revolute clearance joints in multibody systems*, Mechanism and Machine Theory, Vol 44, 2009, pp. 1211-1222.
- [26] Zhang, B., Bagchi, A., *Finite element simulation of chip formation and comparison with machining experiment*, Journal of Engineering for Industry, Vol. 116-8, 1994, pp. 289-297.
- [27] Klamecki, B. E., *Incipient chip formation in metal cutting - a three dimension finite element analysis*, Ph. D. dissertation, University of Illinois, 1973.

- [28] Okushima, K., Kakino, Y., *The residual stress produced by metal cutting*, Ann. CIRP, Vol. 20-1, 1971, pp. 13-14.
- [29] Bacaria, J. L., Dalverny, O., Pantale, O., Rakotomalala, R., and Caperaa, S., *2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193 (39-41 SPEC. ISS.), 2004, pp. 4383-4399.
- [30] Shi, G. Q., Deng, X. M., Shet, C., *A finite element study of the effect of friction in orthogonal metal cutting*, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 38, 2002, pp. 863-883.
- [31] McClain, B., Batzer, S. A., Maldonado, G. I., *A numeric investigation of the rake face stress distribution in orthogonal machining*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 123, 2002, pp. 114-119.
- [32] Monaghan, J., MacGinley, T., *Modelling the orthogonal machining process using coated carbide cutting tools*, Computational Materials Science, Vol. 16, 1999, pp. 275-284.
- [33] Ng, E.G., Aspinwall, D. K., Brazil, D., and Monaghan, J., *Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, 1999, pp. 885-903.
- [34] Ceretti, E., Lucchi, M., Altan, T., *FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 95, 1999, pp. 17-26.
- [35] Özel, T., Altan, T., *Determination of workpiece flow stress and friction at the chip.tool contact for high-speed cutting*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, 2000, pp. 133-152.
- [36] Xie, L., *Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method*, Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe, 2004.
- [37] Shatla, M., Kerk, C., Altan, T., *Process modeling in machining. part II: validation and applications of the determined flow stress data*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, 2001, pp. 1659- 1680.
- [38] Movahhedy, M. R., Altintas, Y., Gadala, M. S., *Numerical analysis of metal cutting with chamfered and blunt tools*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, 2002, pp. 178-187.
- [39] Kim, K. W., Lee, W. Y., Sin, H.C., *A finite-element analysis of machining with the tool edge considered*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 86, 1999, pp. 45-55.
- [40] Dillon, O. W., Zhang, H., *An analysis of cutting using a grooved tool*, International Journal of Forming Processes, Vol. 3 (1-2), 2000, pp. 115-130.
- [41] Lin, Z. C., Lin, Y. Y., *A study of oblique cutting for different low cutting speeds*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, 2001, pp. 313-325.

- [42] Gu, L.Z., Wang, D., Xing, L., Chang, J., Chen, G.J., *Computer simulation and optimization of metal cutting process for mild carbon steels*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, 2002, pp. 60-65.
- [43] Ng, E.G., Aspinwall, D. K., *Modelling of hard part machining*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 127, 2002, pp. 222-229.
- [44] Liu, C.R., Guo, Y.B., *Finite element analysis of the effect of sequential cuts and tool-chip friction on residual stress in a machined layer*, International Journal of Mechanical Science, Vol. 42, 2000, pp. 1069-1086.
- [45] Chuzhoy, L., Devor, R. E., and Kapoor, S.G., *Machining simulation of ductile iron and its constituents, part 1: estimation of material model parameters and their validation*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 125-5, 2003, pp. 181-191.
- [46] Yang, X. P., Liu, C.R., *A new stress-based model of friction behavior in machining and its significant impact on residual stresses computed by Finite Element Method*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, 2002, pp. 703-723.
- [47] Özel, T., *Modeling of hard part machining: effect of insert edge preparation in CBN cutting tools*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, 2003, pp. 284-293.
- [48] Yen, Y. C., Söhner, J., Weule, H., Schmidt, J. and Altan, T., *Estimation of tool wear of carbide tool in orthogonal cutting using FEM simulation*, Journal of Materials Processing Technology, 146 (1), 2004, pp. 82-91.
- [49] Söhner, J., Yen, Y. C., *Estimation of tool wear in metal cutting with the finite element method –a progress report-*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, 2004, pp. 82-91.
- [50] Takeyama, H., Murata, R., *Basic investigations on tool wear*, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 85, 1963, pp. 33-38.
- [51] Outeiro, J. C., Umbrello, D., Pina, J. C., Rizzuti, S., *Modelling of Tool Wear and Residual Stress during Machining of AISI H13 Tool Steel*, MATERIALS PROCESSING AND DESIGN; Modeling, Simulation and Applications; NUMIFORM '07; Proceedings of the 9th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. AIP Conference Proceedings, Vol. 908, 2007, pp. 1155-1160.
- [52] Cheriguene, R., *Estudio numérico de los fenómenos de contacto en el mecanizado*, Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Organización Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [53] Yan, F. G., Yue, C.X., Liu, X. L., Li, Y. F., Ji, S. Y., *2D Estimate of Tool Wear in Hard Cutting Operation: Tool Wear and Simulation of Hard Cutting Process under Steady State*, Advanced Materials Research, Vol. 69-70, 2009, pp. 306-310.