

# Análisis por el Método de los Elementos Finitos de las tensiones en la zona de contacto herramienta-viruta.

**M. Rodríguez Madrigal\*, J. Batista de Aguiar\*\*, M. Jacas Cabrera\*.**

\*Instituto Superior Politécnico *José A. Echeverría* (ISPJAE)  
Departamento de Tecnología de Construcción de Maquinarias  
Facultad de Ingeniería Mecánica.

Calle 127 s/n, CUJAE, Marianao 15, Ciudad Habana, Cuba.

Teléfono: 53 7-260 2267, Fax: 53 7-267 7129.

E-mail: ¡Error! Marcador no definido.

\*\*Departamento. Eng. Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. USP. Sao Pablo. Brasil.

E-mail: ¡Error! Marcador no definido.

(Recibido el 23 de septiembre del 2001, aceptado el 14 de diciembre del 2001)

## Resumen

En este trabajo ha sido empleado el método de los elementos finitos para modelar las tensiones en la zona de contacto herramienta-viruta en un proceso de corte ortogonal. Se ha empleado una formulación de Lagrange actualizada para solucionar la no linealidad del fenómeno. El comportamiento elasto-plástico del material ha sido formulado mediante las ecuaciones de Prandtl-Reuss y la teoría de endurecimiento por deformación para resolver la ecuación constitutiva elasto-plástica del proceso de corte ortogonal. Se han obtenido la tensión normal y la tensión de cizallamiento en la zona de contacto herramienta-viruta, definiéndose las zonas de adherencia y deslizamiento.

**Palabras claves:** corte ortogonal, contacto herramienta-viruta, método de los elementos finitos, proceso de corte de metales.

## 1. Introducción.

La naturaleza de la interface formada entre la superficie de ataque de la herramienta de corte y la viruta en la zona de contacto es de fundamental importancia en la eficiencia de los procesos de fabricación por arranque de viruta. Es bien conocido [1-3] que las condiciones de fricción en la interface de la herramienta y la viruta tienen una influencia significativa en los fenómenos del desgaste de la herramienta y en el acabado de la superficie maquinada. La acción del corte crea excepcionales condiciones tribológicas en la zona de contacto herramienta-viruta, tales como deformación plástica entre la herramienta y el material de la viruta, lo cual provoca ligas atómicas en la mayor parte del área de contacto.

Por tal motivo, ha sido de interés en el desarrollo de la Teoría de corte de metales el estudio de la distribución de las tensiones normales y de cizallamiento en esta zona. Algunos de los principales modelos sobre la distribución de tensiones en la zona de contacto herramienta-viruta fueron propuestos por Zorev [4], Kato y Yamaguchi [5]. Una importante contribución al estudio de la zona de contacto herramienta-viruta fue

realizada por Trent [6, 7], quien definió las zonas de adherencia y deslizamiento durante la salida de la viruta a través de la superficie de ataque de la herramienta.

## 2. Zona de contacto herramienta-viruta.

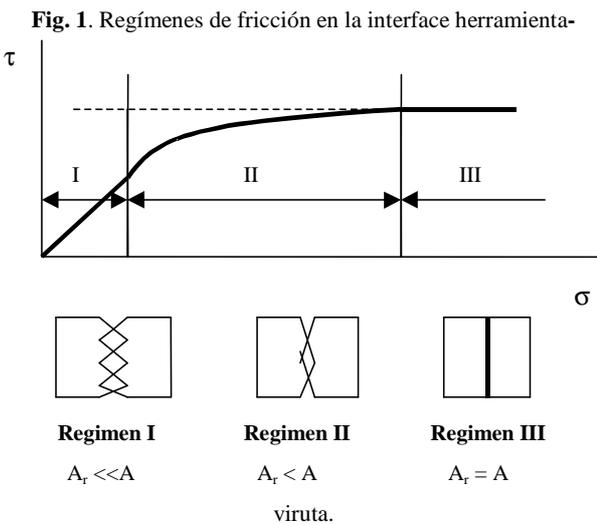
En la interface herramienta-viruta existe un íntimo contacto entre la pieza y la herramienta, con altas presiones que provocan deformaciones plásticas en una importante zona de este contacto y un alto coeficiente de fricción, lo cual origina una importante fuente de generación de calor que afecta las propiedades del material de la herramienta y de la pieza.

Cuando estas superficies entran en contacto durante el trabajo el área de contacto real  $A_r$  es mucho menor que el área de contacto aparente  $A$  debido a las microirregularidades de las superficies, por esta razón el contacto se establece en apenas unos picos de las irregularidades.

Con el avance de la herramienta una gran presión se aplica sobre una parte de la superficie de contacto provocando un aplastamiento con deformación plástica

en las superficies, sobre todo en la zona más próxima al filo de la herramienta, esta presión tiende a disminuir hasta un valor cero en el punto donde se rompe el contacto de la viruta con la superficie de ataque de la herramienta.

Shaw [2] identificó tres regímenes diferentes de fricción a lo largo de esta zona de contacto, los cuales se muestran en un gráfico de esfuerzos cortantes ( $\tau$ ) y normales ( $\sigma$ )

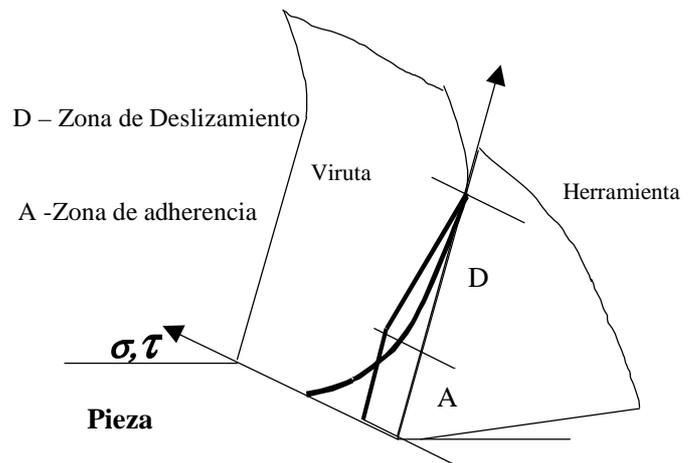


En experimentos realizados con varias combinaciones de materiales de la pieza y la herramienta, Trent [3] determinó que en el contacto viruta-herramienta existen dos zonas: una próxima al filo de la herramienta donde existe un íntimo contacto (denominada zona de adherencia) y otra donde existe un movimiento relativo entre las dos superficies en contacto (denominada zona de deslizamiento). En la zona de adherencia existe un área de intenso cizallamiento próxima a la superficie de la herramienta, pero no necesariamente en la misma. En esta zona la camada del material de la pieza que esta en contacto con la herramienta está estacionaria, pero a una distancia entre 0.01 – 0.08 mm la velocidad del material de la pieza es igual a la velocidad de la viruta.

Por lo tanto, en la zona de contacto herramienta-viruta se establece que cuando la tensión de cizallamiento equivalente es mayor que la tensión límite  $\bar{\tau}_f > \tau_{lim}$  no ocurre ningún desplazamiento relativo entre el material de la pieza y la superficie de ataque de la herramienta, siendo esta la característica de la zona de adherencia.

Cuando la tensión de cizallamiento equivalente es menor o al menos que la límite  $\bar{\tau}_f \leq \tau_{lim}$ , entonces existe movimiento relativo entre las superficies, siendo esta la característica de la zona de deslizamiento.

La distribución de tensiones normal ( $\sigma$ ) y de cizallamiento ( $\tau$ ) en la zona de contacto herramienta-viruta fue establecida por Zorev [4], en la cual se definen las zonas de adherencia y de deslizamiento. La Fig 2 muestra el modelo de Zorev de las tensiones en la zona de contacto herramienta-viruta.



**Fig. 2.** Modelo de tensiones de la zona de contacto de Zorev.

Según Zorev [4], las tensiones normales son máximas cerca del filo de la herramienta y decrecen exponencialmente hasta el valor cero en el punto donde se rompe el contacto de la viruta con la superficie de ataque de la herramienta. Por su parte las tensiones de cizallamiento son máximas y constantes en la zona de adherencia, disminuyendo linealmente hasta cero en el punto final del contacto herramienta-viruta.

### 3. Modelo Físico del Corte Ortogonal.

El modelo físico del proceso de corte está basado en el corte ortogonal, este modelo es mostrado en la Fig. 3, donde aparecen la pieza que será elaborada y la herramienta de corte. La pieza tiene una longitud de 16 mm, una altura de 4mm y un ancho de 4mm, el ángulo de incidencia de la herramienta será  $\alpha = 8^\circ$ , el ángulo de ataque será de  $\gamma = 0^\circ$  y  $\gamma = 10^\circ$  con el objetivo de determinar su influencia en las tensiones en la zona de contacto. La profundidad de corte  $t_c=2\text{mm}$ . La velocidad de corte es de 60m/min.

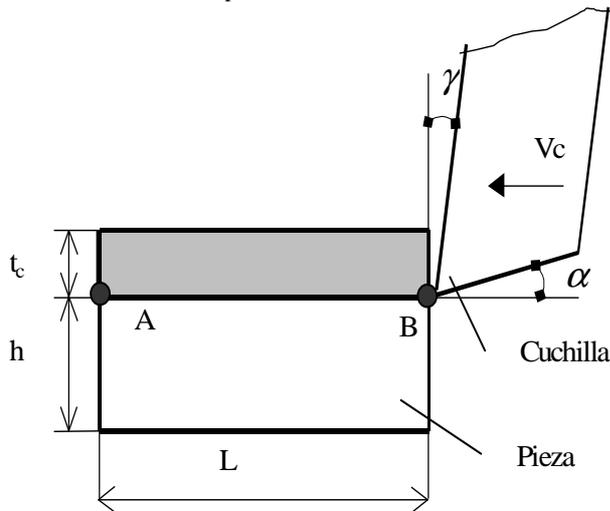


Fig. 3. Modelo físico del proceso de corte ortogonal.

El material de la pieza será un acero de bajo carbono AISI 1020.

La tensión de fluencia del material fue obtenida por [3] en ensayos de compresión, a temperaturas de  $700^{\circ}\text{C}$ , y a una velocidad de deformación de  $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ . La ecuación empírica de la tensión de fluencia obtenida por Shirakashi y Maekawa, incluye el efecto de la temperatura, del endurecimiento por deformación y de la razón de deformación

El material de la herramienta es de acero rápido M 35.

#### 4. Modelo de elementos finitos.

El modelo de elementos finitos se realiza sobre la base de idealizar el fenómeno físico, para esto se establecen las restricciones necesarias al sistema, así como las condiciones de fronteras y el sistema de carga. Por lo tanto basado en el esquema del modelo físico, fueron establecidas las condiciones de fronteras para el modelo, según la Fig 4.

En las superficies externas de la pieza, definidas por BCDE fue impuesta una restricción al desplazamiento en los ejes xy. La viruta que sale por la superficie de ataque de la herramienta, representada por las líneas FGHA, tiene desplazamientos en los ejes xy. La herramienta de corte tiene posibilidades de movimiento sólo en el eje x. Para la determinación de las tensiones en la superficie de contacto herramienta-viruta será tenido en cuenta el fenómeno de adherencia y deslizamiento.

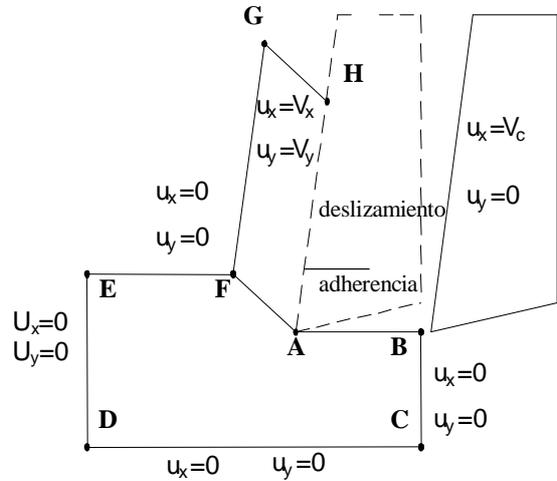


Fig. 4. Condiciones de frontera

#### 5. Malla de elementos finitos.

A partir de las condiciones de fronteras impuestas, tanto la pieza como la herramienta de corte son convertidas en una malla de elementos finitos. En las Fig. 5 y 6 se muestran las mallas de elementos finitos para ángulos de ataque  $\gamma = 0^{\circ}$  y  $\gamma = 10^{\circ}$ .

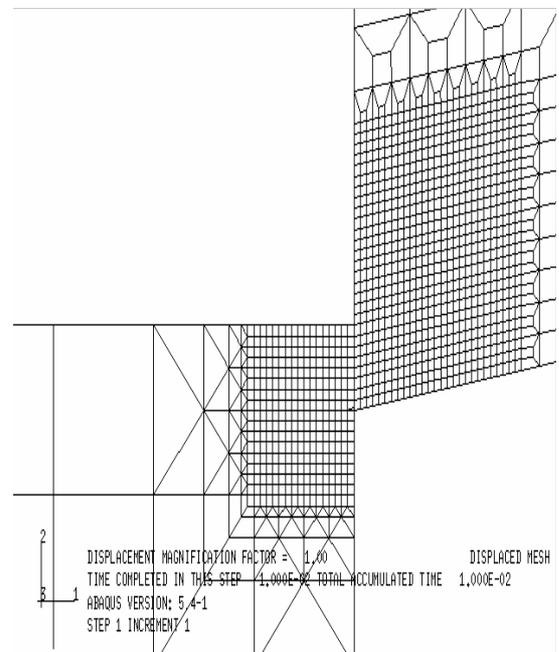


Fig. 5 Malla de EF.  $t_c=0.4 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 0^{\circ}$

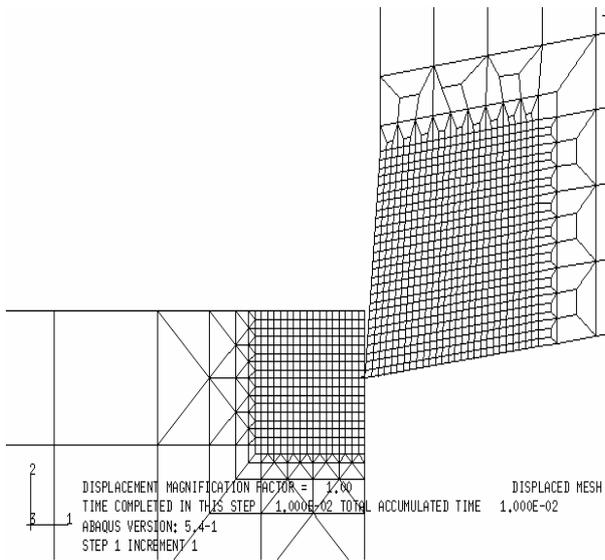


Fig. 6. Malla de EF  $t_c=0.4 \text{ mm}$   $\gamma = 10^0$ .

## 6. Modelación del contacto.

En el proceso de corte, la parte del material de la pieza que es convertida en viruta, se desliza sobre la superficie de ataque de la herramienta, provocando una zona de contacto con alta fricción entre ambas superficies. El contacto entre estas superficies, provoca una zona de altas tensiones y de gran generación de calor.

Los problemas de contacto son modelados por elementos finitos, usando superficies básicas de contacto. En el proceso de corte, la modelación del contacto es extremadamente complicada, por el hecho de que una de las superficies, la de la viruta, no existe inicialmente en el modelo, sino que se forma en la medida que transcurre el proceso.

Para la modelación del contacto entre la viruta y la herramienta, se empleó la teoría de contacto entre dos cuerpos deformables, del programa de elementos finitos ABAQUS, [8]. Según esta teoría se definen dos superficies de contacto, siendo una principal o maestra (*master surface*), y la otra esclava (*slave surface*).

En la Fig. 7, se muestra un esquema del proceso de corte, las superficies 2 y 3 inicialmente no existen como entidades independientes, sus elementos forman parte del cuerpo sólido de la pieza.

Con el desplazamiento de la herramienta hacia la pieza, ocurre gradualmente la formación de la viruta y de estas dos superficies, como entidades independientes en el modelo.

Con la formación de la viruta, la superficie 2 pasa a ser la superficie maquinada y la superficie 3, entra en

contacto con la superficie 7 (superficie de ataque de la herramienta).

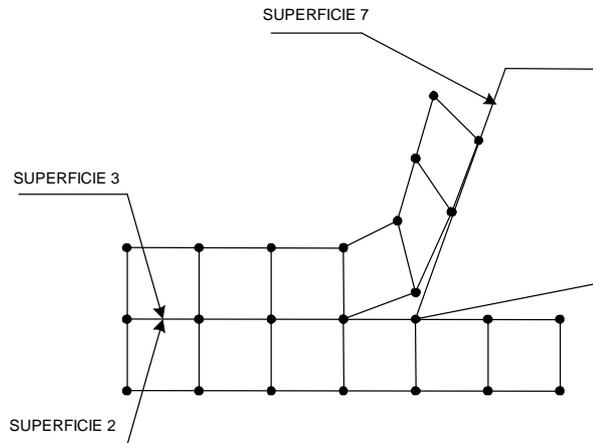


Fig. 7. Modelo de contacto.

En la medida en que se forma la superficie 3, los elementos de contacto de la misma se activan como una superficie de contacto, que se desplazará sobre una línea de deslizamiento (*slide line*), definida por los elementos de la superficie 7. Estos elementos conforman una superficie de contacto entre dos cuerpos deformables.

## 7. Resultados del modelo de elementos finitos.

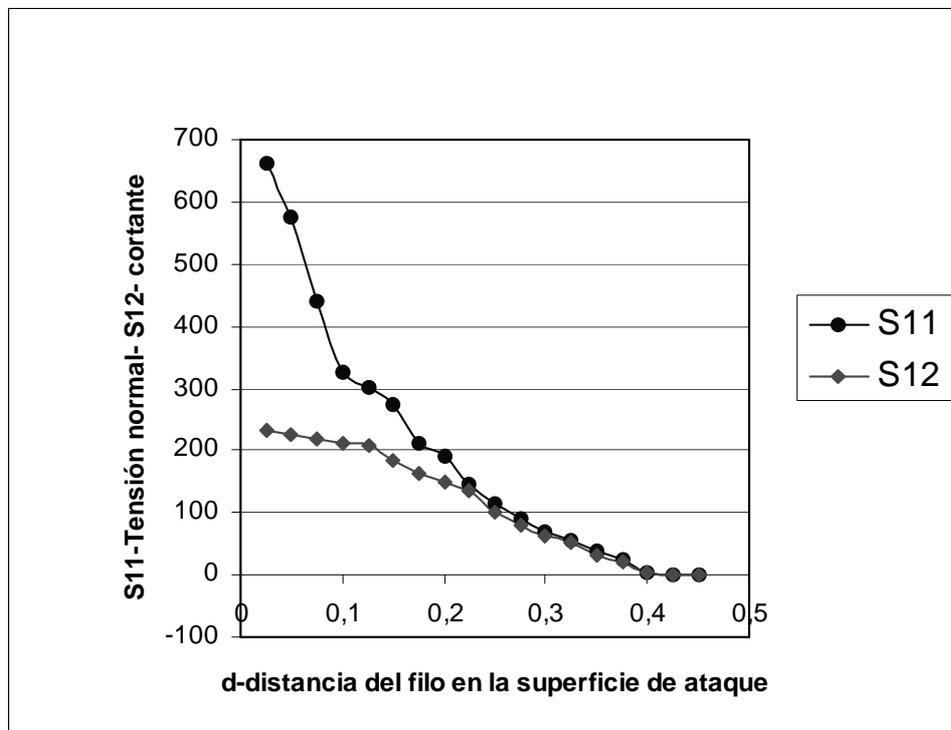
Como antes fue declarado, el modelo de Zorev [4] se ha establecido como el más aceptado, para describir las tensiones en la superficie de contacto herramienta-viruta. Este modelo tiene en cuenta el fenómeno de adherencia y deslizamiento entre las superficies de la viruta y la pieza.

Según este modelo, las tensiones normales toman su valor máximo en el filo de corte y decrecen exponencialmente hasta el punto donde se pierde el contacto entre la viruta y la herramienta, mientras que la tensión de cizallamiento, asumida en este modelo, como tensión de fricción, permanece constante en la zona de adherencia, disminuyendo linealmente en la zona de deslizamiento hasta el valor cero, en el punto donde la viruta deja de hacer contacto con la herramienta.

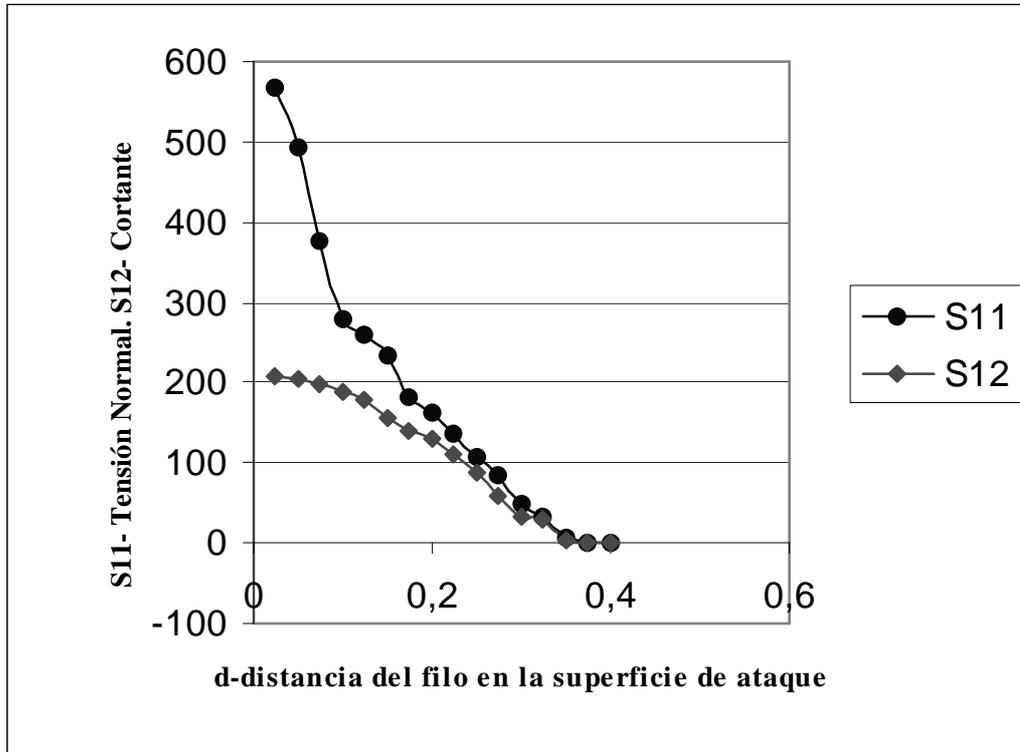
Aunque este modelo es válido conceptualmente, estudios posteriores realizados por Kato y Yamaguchi [5], así como por Chandrasekaran y Kapoor [6], demostraron que el comportamiento de la distribución de tensiones en la superficie de contacto herramienta-viruta depende del tipo de material de la pieza y de la herramienta, y la distribución de tensiones propuesta por Zorev sufre variaciones significativas.

En el modelo de elementos finitos del proceso de corte ortogonal, para el maquinado de un acero de bajo carbono AISI 1020, con una herramienta de acero rápido M35, realizado por el autor [7] fueron calculadas las tensiones de contacto, para una profundidad de corte  $t_c=0.4$  mm y ángulos de ataque de la herramienta  $\gamma = 0^\circ$  y  $\gamma = 10^\circ$ . La Fig. 8 muestra los resultados de

las tensiones normales y de las tensiones de cizallamiento en la superficie de contacto herramienta-viruta, para el caso de  $t_c=0.4$  mm y  $\gamma = 0^\circ$ . En la Fig. 9 se brindan los resultados para la variante evaluada con ángulo de ataque  $\gamma = 10^\circ$ .



**Fig. 8.** Tensiones normales y de cizallamiento (MPa) en la superficie de contacto herramienta-viruta.  $t_c=0.4$ ,  $\gamma = 0^\circ$



**Fig. 9.** Tensiones normales y de cizallamiento (MPa) en la superficie de contacto herramienta-viruta.  $t_c=0,4$ ,  $\gamma = 10^0$

Comparando las figuras 8 y 9, se observa que el aumento del ángulo de ataque de la herramienta disminuye el valor de la tensión normal y de la tensión tangencial. La longitud de contacto herramienta-viruta, también decrece en una magnitud de 0.025 mm, según se puede ver en estas figuras.

El comportamiento de las tensiones normal y de cizallamiento no varía con el aumento del ángulo de ataque, ya que esta variación depende en lo fundamental de las propiedades del material de la pieza y la herramienta.

La profundidad de corte no tiene una marcada influencia en las tensiones de la superficie de contacto, según fue demostrado por Kato y Yamaguchi [5].

## 8. Conclusiones.

- El modelo de elementos finitos ha permitido determinar las tensiones en la zona de contacto herramienta-viruta.
- Como pudo observarse los resultados obtenidos concuerdan con los principales modelos establecidos en la literatura.

- Se demostró la influencia del ángulo de ataque de la herramienta en el valor de las tensiones en dicha zona, así como en la longitud del contacto herramienta-viruta y en las zonas de adherencia y de deslizamiento.
- Este trabajo ratifica una vez más la validez del método de los elementos finitos para el estudio del complicado fenómeno del corte de los metales.

## 9. Bibliografía.

- 1) Boothroyd, G.; Knight, W. A. "Fundamentals of machining and machine tools". New York: Marcel Dekker, 1989.
- 2) Shaw, M. C.; Ber, A.; Mamin, P.A. "Friction Characteristics of Sliding Surfaces Undergoing Subsurface Plastic Flow". Trans. ASME. J. Basic Eng. V. 82. Pp342-346. June.1960.
- 3) Trent, E. M. "Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide tools – Part II: Conditions of Seizure at the Tool/Work Interface". Journal of the Iron and Steel Institute". Pp. 923-932. Nov. 1963.

- 4) Zorev, N. M. "Interrelationship Between Shear Processes Occurring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting". Proc. Int. Prod. Eng. Res. Conf. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. Pp. 42-49. Sept. 1963.
  - 5) Kato, S.; Yamaguchi, K.; Yamada, M. "Stress Distribution at the Interface Between Tool and Chip in Machining". Journal of Engineering for Industry. Pp. 683-689. May 1972.
  - 6) Chandrasekaran, H.; Kapoor, D. V. "Photoelastic Analysis of the Tool-Chip Interface Stresses". Journal of Engineering for Industry. Trans, ASME. Series B. V. 87. N<sup>o</sup>. 4. Nov. 1965. Pp. 495-502.
  - 7) Melchor, R. M. "Modelación por elementos finitos de un proceso de corte ortogonal" Tesis de Doctorado. 2001. ISPJAE. Habana. Cuba.
- "ABAQUS". Theory Manual. Version 5.4. Ed. Hibbitt. Karlsson and Sorensen. USA 1994

---

## Stress analysis by Finite element Method in tool-cutting zone.

### Abstract:

The finite element method has been used to obtain the stress model in the tool-cutting contact zone in an orthogonal cutting process. An updated Lagrange formulation has been used to solve the nonlinearity of the elasto-plastic phenomenon behavior of the material. This behavior has been formulated by means of the Prandtl-Reuss equations and the theory of deformation by hardening, in order to solve the elasto-plastic equation of orthogonal cutting process. The normal and shear stresses in tool-cutting zone has been obtained, defining the adherence and sliding zones.

**Key words:** Orthogonal cut , tool-cutting contact, finite element method, steel cutting process.