

Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial



Trabajo de Diploma

Título: Simulación del rayado de un sustrato de
aluminio AA1060-H18

Autor: Roberto Guerra Cabrera

Tutor: Ing. Reniel Estrada Yanes

Curso: 2015 – 2016

Resumen

En el siguiente trabajo se simuló en 2D el rayado de un sustrato elastoplástico de aluminio AA1060-H18 por un indentador de tipo Rockwell C para las velocidades de 53, 76 y 98 mm/s. El proceso de rayado no es más que la realización de una rayadura en la superficie de una probeta mediante un indentador en movimiento. Tanto la penetración del indentador como la fuerza de contacto generada se comportaron de forma similar para cada una de las velocidades, mientras que la energía asociada a la deformación mostró leves cambios en cuanto a las pendientes de sus curvas. Los resultados obtenidos en la simulación se mantuvieron semejantes a los obtenidos en la práctica.

Abstract

In this work was simulated the scratching of the elastoplastic aluminum substrate AA1060-H18 by a Rockwell C indenter type for speeds of 53, 76 and 98 mm/s in 2D model. The scratches process consist of performing a scratch on the surface of a substrate by moving an indenter. Both indenter penetration as the contact force generated behaved similarly for each of the speeds, while the energy associated with deformation showed slight changes in terms of its curve slopes. The results obtained in the simulation were maintained similar to those obtained in practice.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1 Estado del arte.....	3
1.1 Proceso de rayado.....	3
1.2 Fricción	3
1.3 Mecanismos de desgaste.....	4
1.3.1 – Desgaste erosivo	4
1.3.2 - El desgaste abrasivo	4
1.3.3 - El desgaste adhesivo.....	5
1.3.4 - Mecanismo de desgaste por fatiga	6
1.3.5 – Mecanismo de desgaste por corrosión	7
1.4 Rayado.....	7
1.5 Dureza al rayado.....	7
1.6 Diferentes simulaciones realizadas sobre el desgaste.....	8
1.7 Descripción del funcionamiento de la máquina donde se realizan los ensayos de rayado.....	10
Capítulo 2 Descripción del modelo y resultados de la simulación.....	12
2.1 Generalidades del modelo.....	12
2.2 Dimensiones de las piezas.....	12
2.3 Propiedades del material.....	13
2.4 Ensamble e Interacción.....	14
2.5 Pasos y Condiciones de Frontera.....	15
2.6 Mallado.....	16

2.7 Resultados de la simulación	16
2.7.1 Penetración del indentador:	17
2.7.2 Fuerza de contacto del indentador:	19
2.7.3 Energía utilizada en la deformación:.....	22
2.7.4 Cálculo del ancho de la huella	24
2.7.5 Número de dureza al rayado	25
2.7.6 Comparación de los resultados obtenidos en la simulación con los de la práctica	26
Conclusiones.....	27
Recomendaciones.....	28
Bibliografía	29

Pensamiento

Conseguir lo que quieres es tan difícil como no conseguir lo que quieres. Porque entonces tienes que averiguar qué hacer con ello, en lugar de averiguar que hacer sin ello.

David Levithan.

Dedicatoria

Este trabajo va dirigido especialmente a mi madre querida Iraida Cabrera Arbeláez pues ella ha sido el motor impulsor de mi barco a lo largo de esta travesía que ha durado cinco años, a mi padre por haberme dado toda la comprensión y apoyo del mundo cuando más lo necesitaba, a mi hermano, que es mi segundo padre, solo le puedo decir que sin él nada de esto hubiera sido posible y que le estoy infinitamente agradecido por todos los sacrificios que ha tenido que hacer para que yo pudiera cumplir mis sueños.

A mi familia, a mis amigos Damián Y Joel por darme ánimo en los momentos de flaqueza, a todos mis amigos de la carrera principalmente a Irma, Nailin, Isnel y especialmente a Laiss, esto te lo debo en gran parte a ti.

A todos los profesores que me han impartido clases desde primero hasta quinto, destacando con gran ahínco a mi tutor el Ing. Reniel Estrada Yanes por haber sido lo suficientemente comprensivo al no haberse dado por vencido conmigo.

En general le quiero dar gracias a todas las personas que han aportado su granito de arena para que yo pudiera graduarme y me sintiera orgulloso de decir soy Ing. Mecánico.

Introducción

En la actualidad uno de los retos más grandes que tiene el hombre es aumentar la vida útil de las estructuras y dispositivos mecánicos, además de mejorar su eficiencia y rendimiento. El desgaste superficial es uno de los principales inconvenientes con que los ingenieros se encuentran en la vida diaria, estos aparecen como resultado del contacto constante entre dichos dispositivos. Este fenómeno está presente en cualquier componente, accionamiento o máquina, por lo que es necesario conocer las propiedades mecánicas de las superficies de los materiales. El avance tecnológico en las industrias ha favorecido el desarrollo de los ensayos de rayado e indentación con el objetivo de conocer tanto la dureza como la resistencia al desgaste que tienen los materiales. La principal diferencia que existe entre ambos ensayos es que en el ensayo de indentación el indentador penetra una probeta, mientras que en el de rayado el indentador se desplaza con respecto a la probeta, tanto en uno como en otro se mide la huella creada en la superficie de la probeta.

Con el fin de tener una visión más detallada del ensayo de rayado, ahorrar tiempo de trabajo y sugerir estrategias que mejoren la eficiencia de la operación, en este trabajo se simula el proceso de rayado de un substrato de aluminio AA1060-H18 mediante un indentador Rockwell C para las velocidades de (53,76 y 98 mm/s).

Las simulaciones del desgaste del material por un indentador Rockwell C se realizan en el software Abaqus. Este resuelve casi todo tipo de inconvenientes, desde un simple análisis lineal hasta simulaciones complejas no lineales, utilizando el Método de Elemento Finito (MEF). Posee una amplia librería que permite modelar virtualmente cualquier geometría, así como su posibilidad de simular el comportamiento de una gran mayoría de materiales, permitiendo su aplicabilidad en distintas áreas de ingeniería. Abaqus es utilizado en muchos de los trabajos realizados sobre indentación y rayado de superficies, por lo que tiene una gran aceptación en la comunidad científica internacional.

En este proyecto es de vital importancia conocer las propiedades tribológicas del aluminio AA1060-H18, que es una aleación dúctil y ligera, con gran resistencia y excelentes características de acabado, el aluminio es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con calidad de excelencia y para trabajos que requieran buen acabado superficial. Posee excelente resistencia a la corrosión y acabado además de facilidad de soldadura y una resistencia parecida a la del acero. Adicionalmente a sus características naturales también tiene una (excelente conductividad, ligereza, nula toxicidad y no produce chispa) [5].

Problema científico:

Es necesario conocer la resistencia al rayado de la superficie de un sustrato de aluminio AA1060-H18, para ello se debe simular el rayado del sustrato para diferentes velocidades de deslizamiento del indentador y comparar los resultados con los de ensayos realizados en el laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial de la UCLV.

Objetivo General

Simular el rayado de un sustrato de aluminio AA1060-H18 por un indentador Rockwell C para determinar la resistencia al rayado de la superficie.

Objetivos Específicos

1. Investigar los antecedentes históricos de las simulaciones del desgaste.
2. Desarrollar la simulación del rayado de tres sustratos de aluminio AA1060-H18 con comportamiento elastoplástico para las velocidades de 53, 76 y 98 mm/s.
3. Comparar los resultados obtenidos en ensayos reales con los resultados de la simulación.

Capítulo 1 Estado del arte

1.1 Proceso de rayado

Según la norma ASTM G171-03 el ensayo de rayado consiste en la realización de una rayadura en una superficie sólida por un indentador con la punta de diamante con una geometría cónica, a lo largo de un recorrido determinado, con una velocidad y fuerza normal constante. Se determina el promedio del espesor de la huella dejada y ese valor se usa para calcular el número de dureza al rayado en unidades de presión. Como una opción, se puede medir la fuerza de rayado durante la realización del ensayo [1].

Esta norma permite la realización del ensayo tanto sin lubricación y a temperatura ambiente como con lubricación y a elevadas temperaturas siempre y cuando las condiciones del ensayo sean reportadas. El efecto de la humedad ambiental y otras condiciones atmosféricas pueden afectar los resultados en dependencia de la sensibilidad del material ensayado a las condiciones ambientales. Si tales efectos son detectados durante la realización del ensayo, deben tomarse medidas para controlar las condiciones ambientales y reportar las mismas [2].

1.2 Fricción

La fricción es la fuerza tangencial a la superficie común entre dos cuerpos en contacto es decir bajo la acción de una fuerza externa un cuerpo se mueve o tiende a moverse con respecto al otro. La fricción puede ser estática, cuando el cuerpo tiende a moverse, pero aún no logra hacerlo, o puede ser dinámica, cuando el cuerpo está en movimiento. En ambos casos existen respectivamente coeficientes de fricción estático y dinámico que dependen de las características de la superficie de los cuerpos en contacto [12].

1.3 Mecanismos de desgaste

El desgaste consiste en el daño superficial causado a un cuerpo sólido con la respectiva pérdida del material de su superficie debido al movimiento relativo con respecto a otro cuerpo o sustancia. Es decir, es la eliminación de material de una superficie como resultado de una acción mecánica relacionada con la fricción. Este puede ocurrir por diversos mecanismos, como: erosión, abrasión, adhesión y fatiga [1; 3;10;12].

1.3.1 Desgaste erosivo

Se conoce como desgaste erosivo cuando el material es desgastado por la acción de partículas sólidas que son transportadas por un fluido a altas velocidades y se mueven paralelas a la superficie.

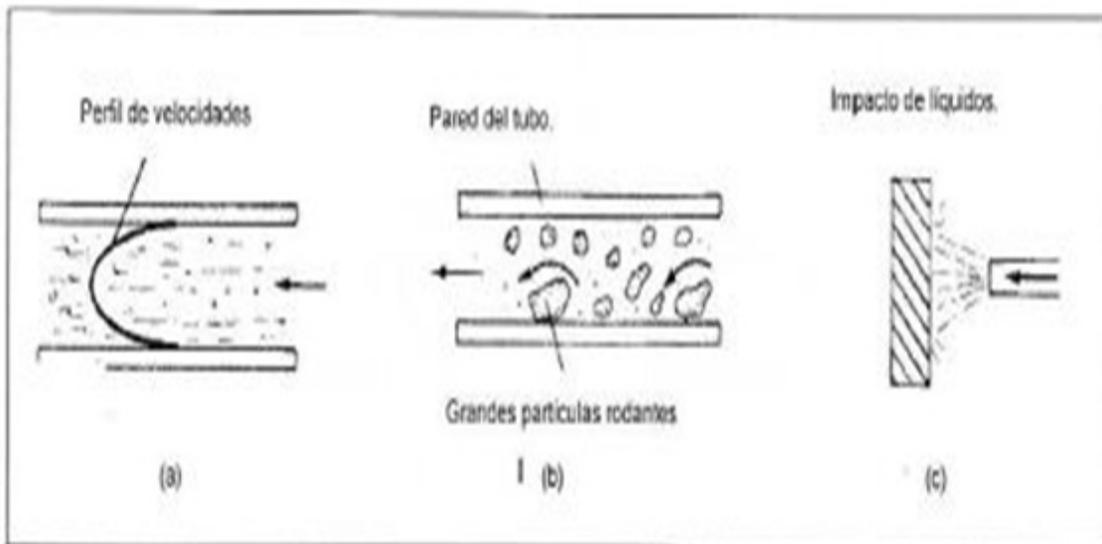


Figura 1.1- Erosión por lodos
(a) Erosión a altas velocidades (b) Conducción de rocas en tuberías (c) Impacto de líquidos.

1.3.2 El desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo ocurre cuando partículas y/o protuberancias duras dañan la superficie de un material más blando. Existen dos formas básicas de abrasión: abrasión por desgaste de dos cuerpos que ocurre cuando existen protuberancias duras en una superficie y son deslizadas sobre otra superficie, y abrasión por

desgaste de tres cuerpos que se manifiestan en sistemas donde las partículas pueden moverse o girar libremente entre dos superficies en contacto, ejemplo de esto aceites lubricantes contaminados en un sistema de deslizamiento. En general, la resistencia a la abrasión puede estar relacionada con la dureza del material, aunque esta relación no es directamente proporcional [14].

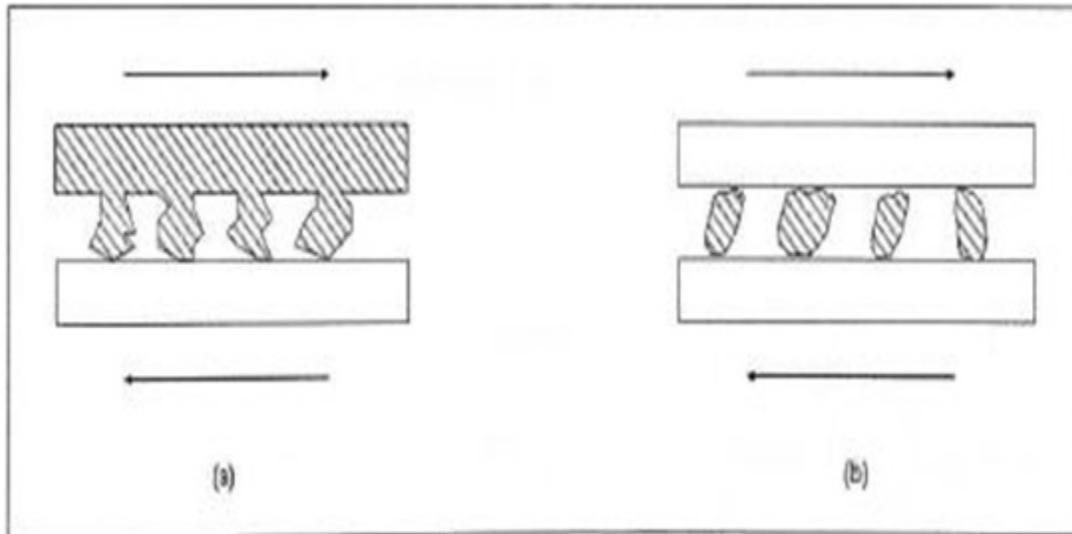


Figura 1.2- Tipos de abrasión
(a) Abrasión de dos cuerpos (b) Abrasión de tres cuerpos.

1.3.3 El desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo se pone de manifiesto cuando dos superficies se adhieren una a la otra muy fuertemente. La deformación que se produce antes de la separación de la partícula obtenida a través del desprendimiento del material como consecuencia del deslizamiento de una superficie sobre otra, es mucho mayor en un material dúctil. La partícula que ha sido separada de la aspereza puede permanecer unida a la otra aspereza como material transferido de una superficie a otra o puede ser liberada como partícula de desgaste. El desgaste por adhesión es el mecanismo más comúnmente detectado en el caso del desgaste, sin embargo, es el que menos se puede predecir.

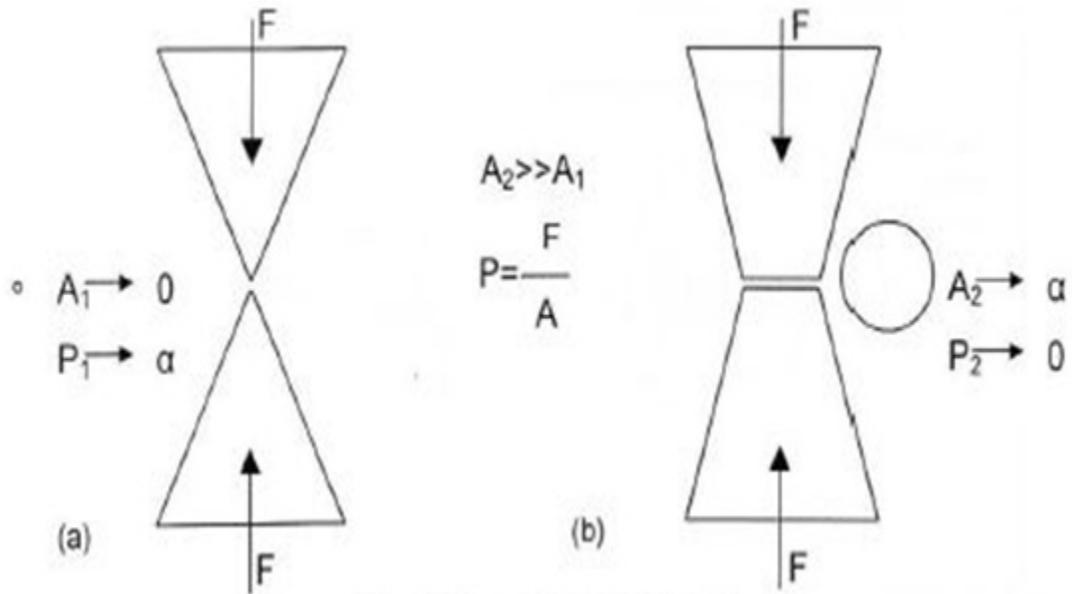


Figura 1.3- Desgaste adhesivo

(a) Alta presión de contacto por causa de la pequeña área en contacto. **(b)** La partícula se deforma plásticamente aumentando su área de contacto, produciéndose así la adhesión.

A → área de contacto F → fuerza P → presión de contacto.

1.3.4 Mecanismo de desgaste por fatiga

El mecanismo de desgaste por fatiga superficial es la consecuencia de esfuerzos cíclicos entre dos superficies en contacto. El coeficiente de fricción es muy importante pues en superficies lubricadas la adhesión es muy pequeña, pero cuando dicho coeficiente es muy alto aparecen zonas de grandes deformaciones creando grietas superficiales y subsuperficiales. La nucleación de la grieta bajo la superficie se produce en la región de máxima tensión cortante que depende de la geometría del material.

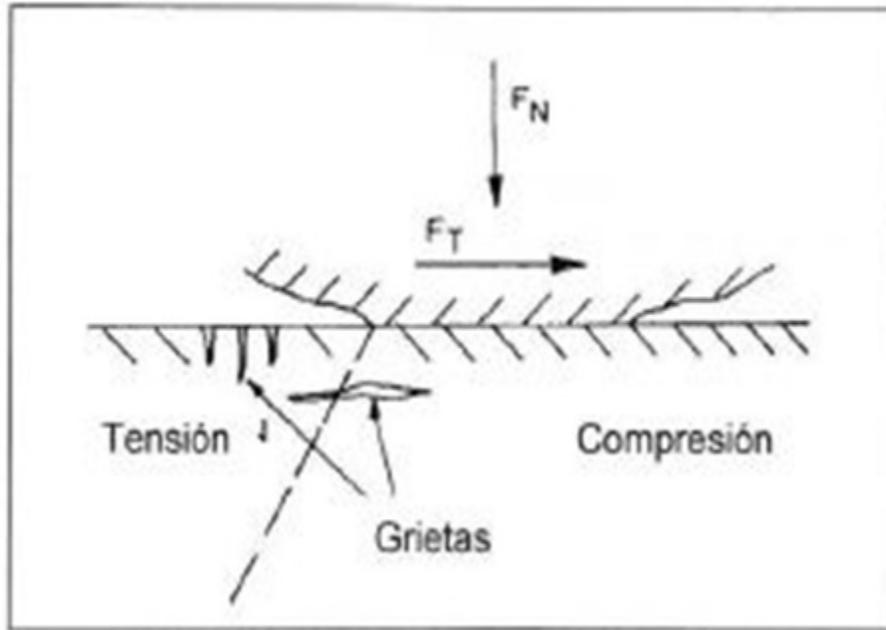


Figura 1.4- Desgaste por fatiga.

1.3.5 Mecanismo de desgaste por corrosión

El Mecanismo de desgaste por corrosión ocurre cuando una o ambas superficies interactúan química o electroquímicamente con el ambiente. La tasa de desgaste depende de las condiciones ambientales que afecten a las superficies. Para los biomateriales es de vital importancia este mecanismo de desgaste debido a que funcionan en un entorno muy agresivo, como el cuerpo humano.

1.4 Rayado

El rayado consiste en una ranura en la superficie de un sólido producida por el corte de dicha superficie por una protuberancia o partícula dura que se mueve sobre ella, por lo que se puede considerar como un tipo especial de abrasión [3].

1.5 Dureza al rayado

La dureza no es más que la resistencia mecánica que tiene un material al ser penetrado por otro material bajo la acción de una carga dada. El contacto entre estos cuerpos da como resultado una modificación del área del material menos resistente. El número de dureza de rayado se determina mediante la división de la

fuerza normal aplicada entre el área proyectada del contacto en el rayado. El área proyectada será entonces un semicírculo que tendrá un diámetro igual al ancho de la huella, como se muestra en la Figura 1.1 [16].

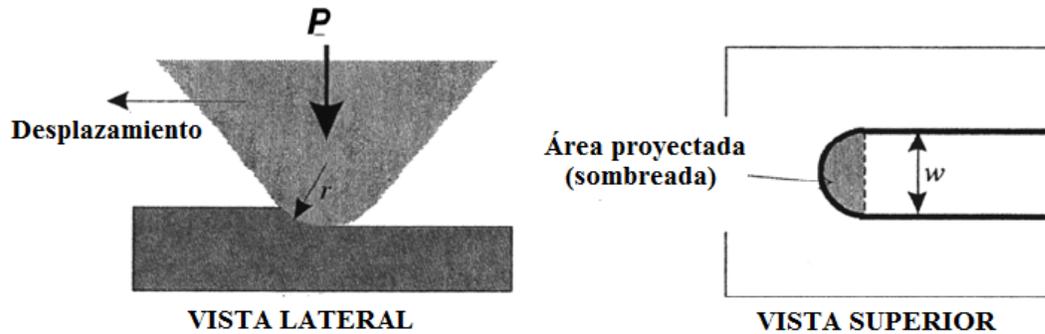


Figura 1.1- Vista superior y lateral del área proyectada.

1.6 Diferentes simulaciones realizadas sobre el desgaste.

A. Kocanda y P. Czyzewski [11], en el 2001, presentaron un método para optimizar la geometría del dado usando simulaciones mediante el MEF de los procesos de forja industrial con el fin de obtener un desgaste más bajo del dado. Determinaron las presiones de contacto y las distancias de deslizamiento de los cuerpos en contacto para varias condiciones de fricción y geometrías de la cavidad del dado. Plantearon que la tasa de desgaste depende de la presión de contacto y la distancia deslizada.

En el 2005, Roger Smith *et al* [13] utilizaron la técnica de dinámica molecular clásica para simular el desgaste producido por un indentador piramidal en la superficie de un sustrato de Ag con estructura cristalina fcc (cúbica centrada en las caras). Al comparar los resultados obtenidos con los de experimentos realizados a un sustrato de Ag policristalina constataron que aun siendo resultados razonables no eran muy similares, por ello plantean que en un futuro y con mayor potencia computacional será posible obtener mejores resultados. No obstante, la simulación les permitió identificar los mecanismos atómicos que tienen lugar en el rayado mostrando como las dislocaciones pueden propagarse durante el movimiento desde la punta del indentador y pueden cortar la superficie en planos de deslizamiento. La

extensión del deslizamiento producido por el rayado se redujo a temperatura ambiente en comparación con los cálculos realizados a 0 K. El coeficiente de fricción permaneció relativamente invariable con la variación del modelo o la temperatura. Además, plantean que los mecanismos precisos mediante los cuales ocurre el *stick-slip* y la fricción son muy dependientes de la velocidad de deslizamiento, temperatura y profundidad, además de la orientación de la punta del indentador.

R. Hernández, M.D. Riera y J.M. Prado [8] realizaron la simulación de desgaste en útiles de matriceria mediante la subrutina *umeshmotion* la cual actualiza la geometría de la zona en contacto, de forma automática, en cada incremento de tiempo, utilizando como base un modelo de desgaste. Dicha subrutina se sustenta en un análisis de mallado adaptativo ALE sobre ABAQUS/Standard. Los análisis realizados con mallado adaptativo en conjunción con la subrutina *UMESHMOTION*, predicen acertadamente las consecuencias de fenómenos de desgaste. La sumatoria de las pérdidas de volumen local, asociadas a las correcciones de posición de los nodos, convergen al volumen desgastado total estimado mediante el modelo de Archard, dicha convergencia mejora aumentando el número de correcciones realizadas durante el cálculo, lo que implica realizar un mayor número de incrementos. Las correcciones de posición impuestas por la subrutina dificultan de forma importante la convergencia de la solución, desviando notablemente al conjunto del equilibrio. Las dificultades se acentúan al utilizar un menor número de incrementos o en presencia de presiones de contacto fuertemente fluctuantes, lo que deriva en ambos casos, en variaciones de posición nodal bruscas. Para solventar dichas dificultades la subrutina cuenta con la posibilidad de sugerir el tamaño del incremento cuando la incrementación automática esta activada. En este tipo de análisis no se recomienda el uso de la estabilización viscosa, ya que en todos los casos desvía los resultados apreciablemente de la realidad.

R. Hernández, M.D. Riera y J.M. Prado [7] realizaron la simulación mediante el ABAQUS de un proceso de conformado y de un proceso de arranque de viruta para determinar el comportamiento mecánico tanto de las herramientas de conformado

como de las de mecanizado por arranque de viruta, y a partir de estos resultados implementar la incorporación de modelos de desgaste.

Mediante la dinámica molecular Xiaoli Hu, Sriram Sundararajan y Ashlie Martini [9], en 2014, realizaron un estudio del efecto de la fuerza adhesiva y la carga sobre la transferencia de material durante el desgaste de la superficie de un sustrato de Cu en contacto a nanoescala con un indentador de SiO₂. Cuantificaron el material transferido antes y después del deslizamiento aislando los resultados para los mecanismos de desgaste adhesivo y abrasivo. Como resultado obtuvieron que ambos mecanismos contribuyen a la transferencia de material durante el deslizamiento, aunque la contribución relativa depende de la carga aplicada y de la fuerza adhesiva. El número de átomos transferidos aumentó con la carga, trabajo de adhesión y distancia deslizada.

Utilizando también la dinámica molecular, en el 2015, S. J. Eder *et al* [6] simularon, a escala atómica, el proceso de abrasión de una superficie nanorugosa de Fe con múltiples partículas abrasivas duras para cuantificar la profundidad del desgaste, el área de contacto y la fuerza de fricción. Comprobaron que las leyes del desgaste a escala macroscópica pueden ser aplicadas a escala atómica.

1.7 Descripción del funcionamiento de la máquina donde se realizan los ensayos de rayado.

La facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial cuenta con una máquina para realizar ensayos de rayado. Dicha máquina está compuesta por un penetrador rígido (Indentador Rockwell C) y un dispositivo en el cual irán montadas las probetas. Sobre dicho indentador se aplicará la carga normal mientras este se desplaza con una velocidad constante sobre la superficie de la probeta. La forma del indentador es cónica con ángulo de $120 \pm 5^\circ$ y la punta debe ser esférica con $200 \pm 10 \mu\text{m}$ de radio, el material de la punta debe ser de diamante [2].

El proceso de rayado puede realizarse moviendo el indentador y manteniendo fija la probeta o moviendo la probeta y manteniendo fijo el indentador. La máquina debe

resistir las cargas normales, laterales y tangenciales producidas por el ensayo, para esto debe ser lo suficientemente rígida.



Figura 1.5- Máquina para realizar el ensayo de rayado existente en la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial.

Capítulo 2 Descripción del modelo y resultados de la simulación

2.1 Generalidades del modelo

La simulación se realiza en el software ABAQUS, pues mediante su módulo para el análisis por el método de elementos finitos permite obtener resultados acordes a las características del modelo; dicho programa es muy utilizado por varios investigadores para simular ensayos de rayado [7,8]. El software para obtener la información necesaria divide el modelo en diferentes pasos. Los resultados de la simulación permiten que se elaboren estudios los cuales disminuyan los ensayos en los laboratorios y los recursos materiales y energéticos.

El modelo realizado consiste de un indentador, tipo Rockwell C, que penetra a un substrato de Aluminio AA1060-H18 y después se desplaza horizontalmente una distancia de 30 mm a las velocidades (53, 76 y 98 mm/s), rayando la superficie del substrato.

2.2 Dimensiones de las piezas

Para el substrato se creó una pieza de tipo deformable. Su forma geométrica es sencilla consiste en un rectángulo con una altura de 5 mm y una base de 50 mm, como se muestra en la figura 2.1.

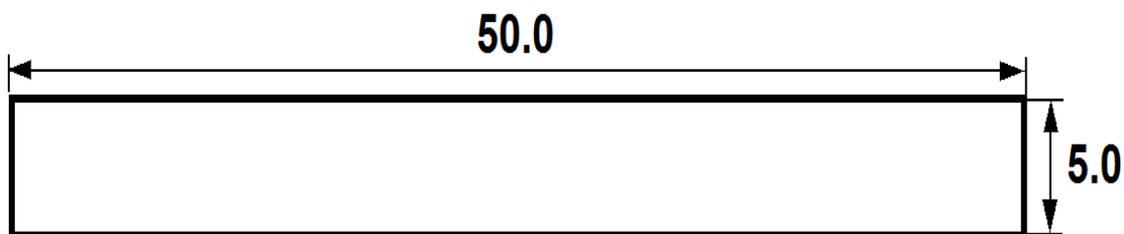


Figura 2.1- Dimensiones del substrato de Aluminio AA1060-H18.

El indentador fue definido como una pieza de tipo analítica rígida, con una geometría basada en las dimensiones del indentador Rockwell C, que no es mas que un cono con un ángulo de 120° y una punta semiesférica con un radio de 0.2 mm (200 μm), como se muestra en la figura 2.2.

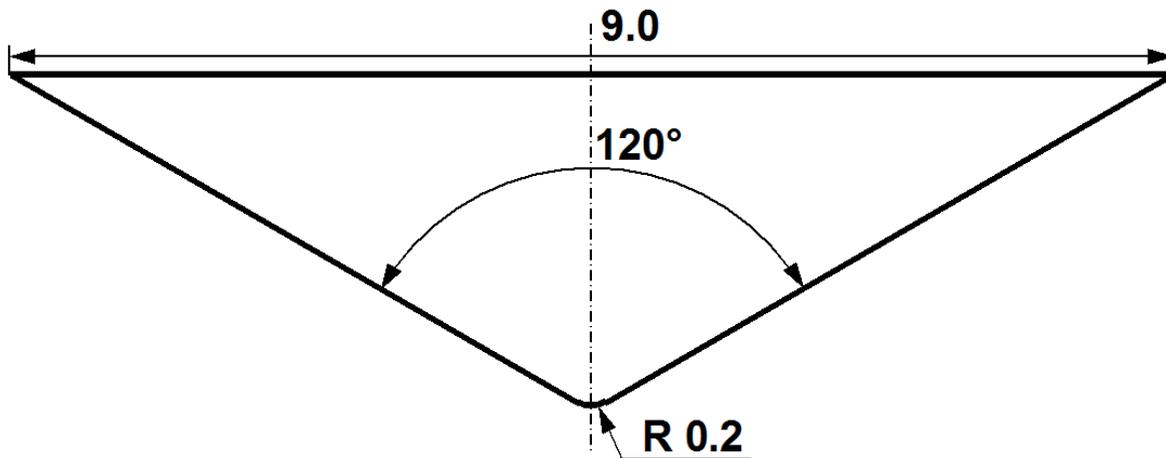


Figura 2.2- Dimensiones del indentador Rockwell C.

2.3 Propiedades del material

El material utilizado en el sustrato es la aleación de Aluminio AA1060-H18 que tiene un comportamiento elastoplástico.

Tabla 2.1 – Propiedades del Aluminio AA1060-H18

Comportamiento Elástico	
Parámetro	Valor
Módulo de Elasticidad	E = 68.9 GPa
Coefficiente de Poisson	V = 0.33

Comportamiento plástico			
Tensiones	Deformaciones	Tensiones	Deformaciones
124 Mpa	0.000 mm	233 Mpa	0.022 mm
144 Mpa	0.002 mm	237 Mpa	0.024 mm
166 Mpa	0.004 mm	240 Mpa	0.026 mm
179 Mpa	0.006 mm	244 Mpa	0.028 mm
190 Mpa	0.008 mm	247 Mpa	0.030 mm
199 Mpa	0.010 mm	251 Mpa	0.032 mm
206 Mpa	0.012 mm	254 Mpa	0.034 mm
212 Mpa	0.014 mm	257 Mpa	0.036 mm
218 Mpa	0.016 mm	262 Mpa	0.040 mm
223 Mpa	0.018 mm	265 Mpa	0.042 mm
228 Mpa	0.020 mm	268 Mpa	0.046 mm

2.4 Ensamble e Interacción

El indentador se colocó en contacto con la superficie superior del sustrato de Aluminio AA1060-H18 a una distancia de 10 mm con respecto al borde izquierdo, como se muestra en la figura 2.3.

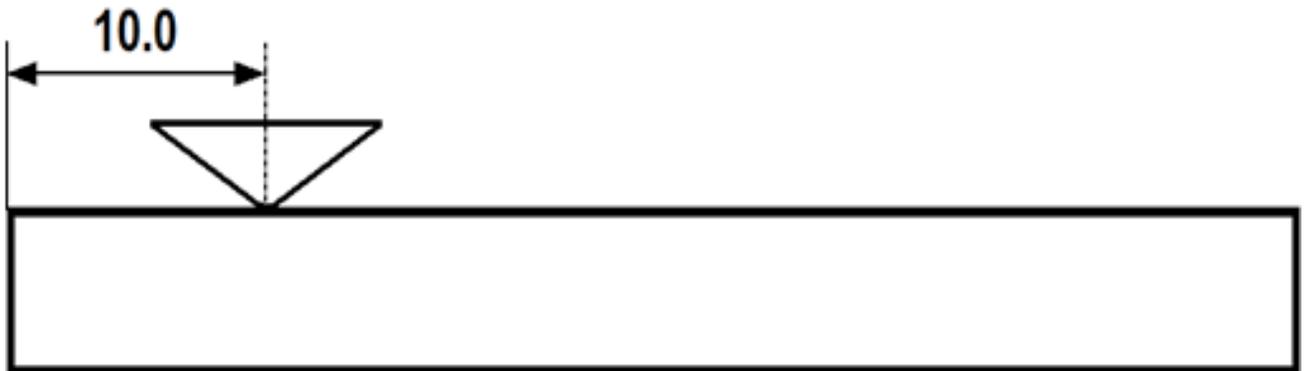


Figura 2.3- Esquema del ensamble.

2.5 Pasos y Condiciones de Frontera

El modelo consta de dos pasos, en el primer paso, de 1 s, se realiza la penetración del indentador sobre el sustrato; y en el segundo paso, se realiza el rayado de la superficie del sustrato mediante un movimiento del indentador hacia la derecha a distintas velocidades (53, 76 y 98 mm/s), dependiendo de estas velocidades el tiempo varía entre 1.57, 1.39 y 1.31 s respectivamente. Al sustrato se le quita cualquier grado de libertad tanto en su base como en sus dos laterales, pues así el indentador puede realizar la penetración y el rayado sin que la muestra de aluminio se mueva debido a su rigidez.

Además, en el primer paso, la fuerza que ejerce el indentador sobre la probeta es de 30 N, dicha fuerza actúa en sentido negativo al eje Y, o sea, hacia abajo, dicha fuerza es la que permite que se mantenga el contacto del indentador con el sustrato. La profundidad de penetración del indentador dependerá de la carga aplicada y de las propiedades mecánicas que ofrezca la muestra de aluminio. Después, en el segundo paso, el indentador se mueve 30 mm horizontalmente hacia la derecha. En ambos casos se restringe la rotación en el eje Z y en el primer paso se limita el movimiento del indentador en el eje X.

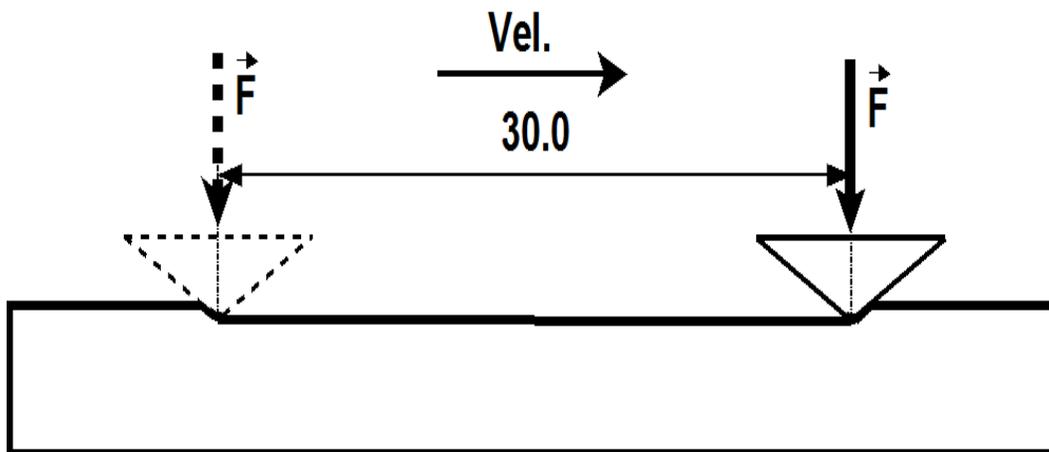


Figura 2.4- Proceso de rayado

2.6 Mallado

El mallado del sustrato cuenta, con un total de 25551 nodos para 25000 elementos del tipo CPS4R (cuadriláteros), con un tamaño global de elementos de 0.1 mm, como se muestra en la Figura 2.5

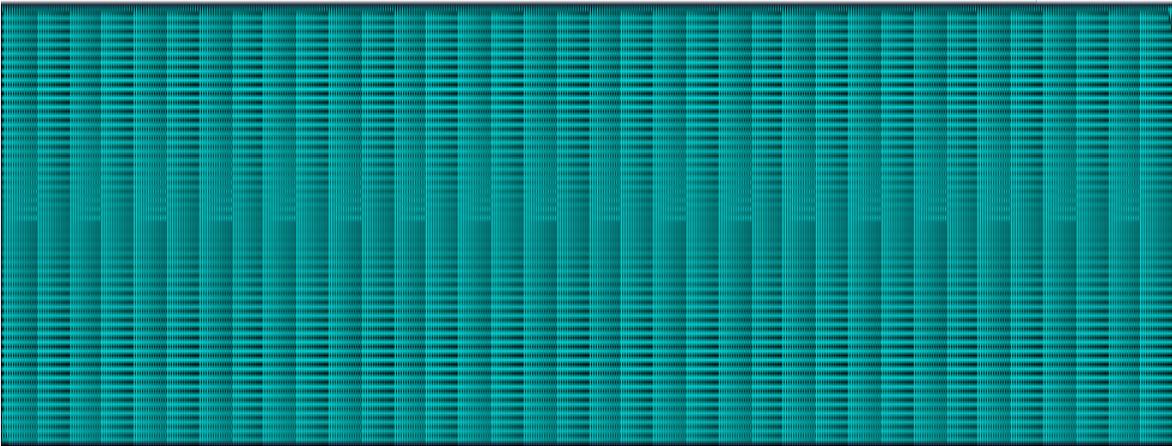


Figura 2.5- Mallado del sustrato.

Mientras que el indentador es analítico rígido y no necesita mallado, sólo se malla el sustrato.

2.7 Resultados de la simulación

En los resultados de la simulación se obtuvieron las tensiones equivalentes de Von Mises, tal y como se muestran en la Figura 2.6. En esta imagen se aprecia claramente como ocurre la deformación plástica en la superficie del sustrato, producto de dichas deformaciones aparecen tensiones remanentes. Además, en la zona de contacto entre el indentador y el sustrato es donde se produce la mayor concentración de tensiones.

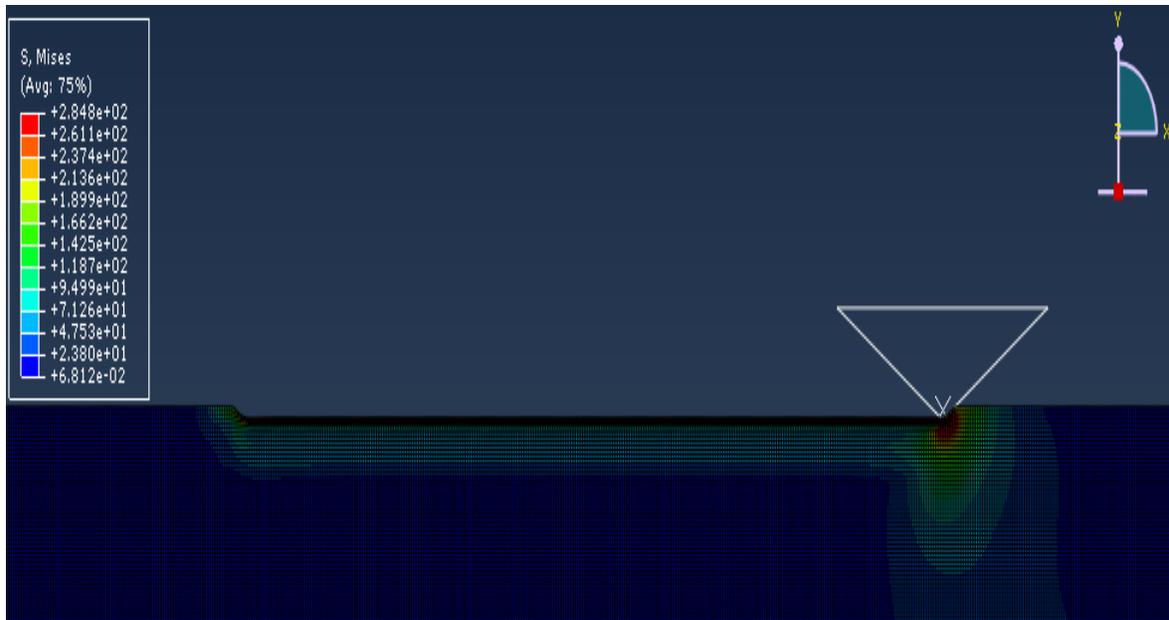


Figura 2.6- Tensiones y deformaciones del sustrato.

2.7.1 Penetración del indentador

La Figura 2.7, 2.8 y 2.9 muestran la penetración del indentador en el sustrato de aluminio para las velocidades de 53, 76 y 98 mm/s respectivamente, la cual se mantiene en un rango determinado para las distintas velocidades: para la primera velocidad la penetración oscila entre 0.16900 mm y 0.16986 mm, manteniéndose casi constante para una media de 0.16938 mm; para la segunda, el menor valor es de 0.1689 mm y el mayor de 0.1704 mm, y la media de 0.1695 mm, mientras que para la tercera, varía entre 0.1679 mm y 0.1692 mm, y la media es de 0.1688 mm. En todos los casos no se tomaron en cuenta los valores menores de 1.1 s pues no concuerdan con el valor de la penetración durante el proceso de rayado, este se debe al cambio entre el reposo en el eje x y el movimiento.

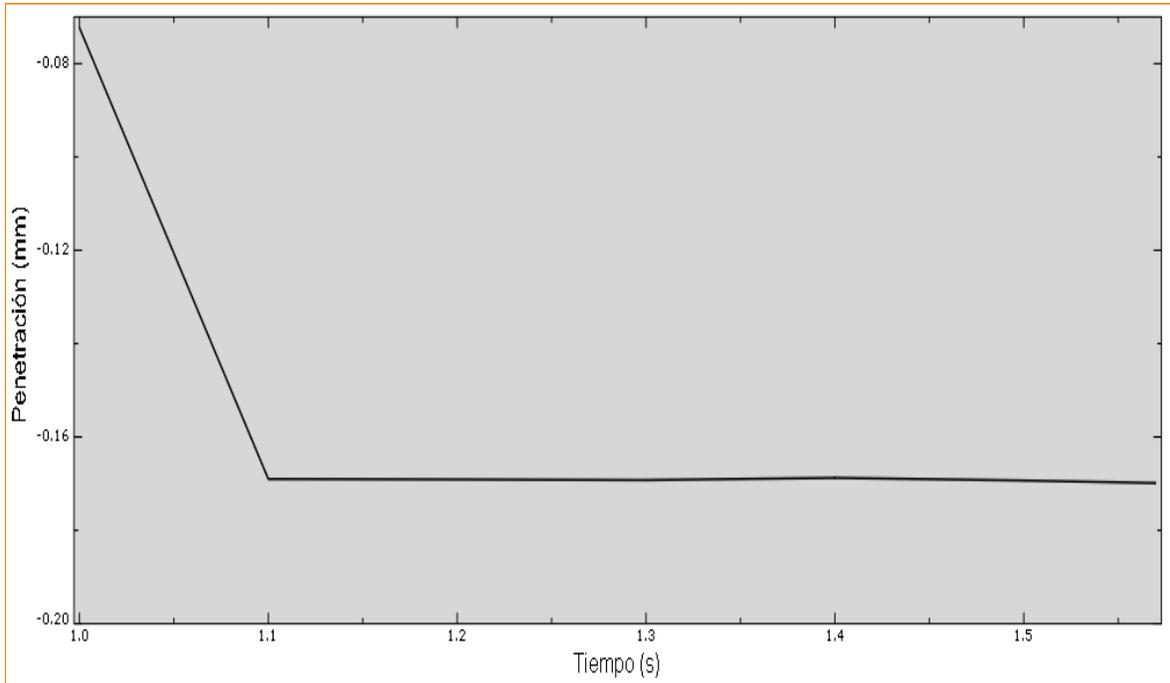


Figura 2.7- Desplazamiento del indentador en el eje Y con respecto al tiempo para una velocidad de 53 mm/s.

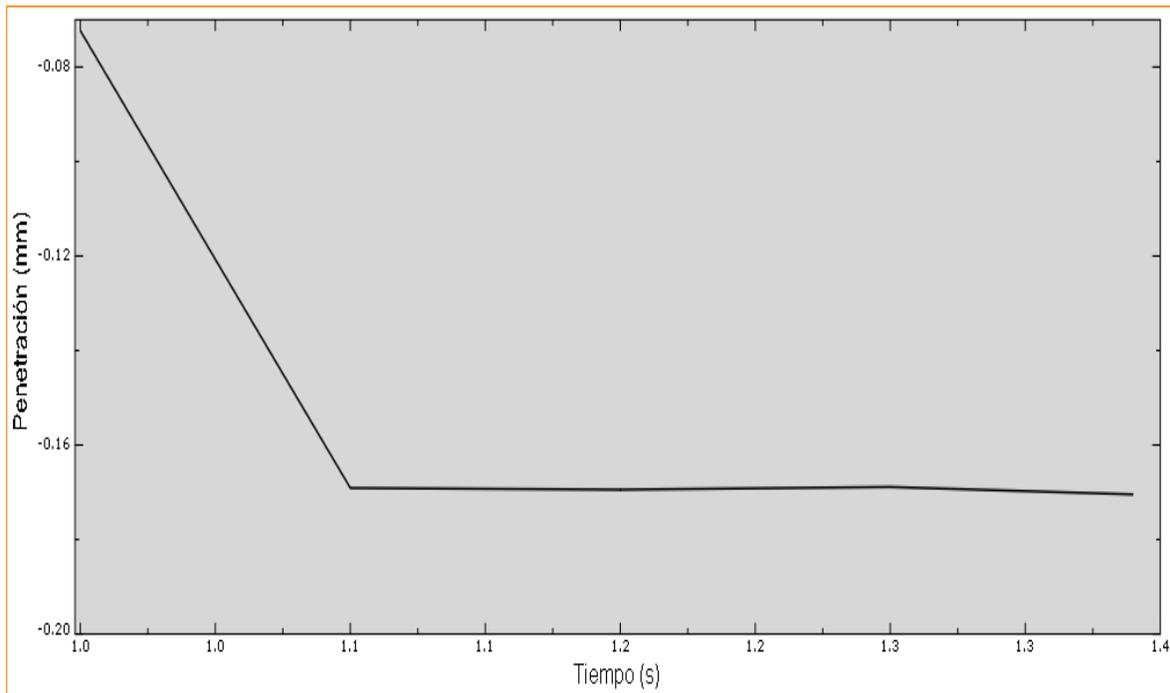


Figura 2.8- Desplazamiento del indentador en el eje Y con respecto al tiempo para una velocidad de 76 mm/s.

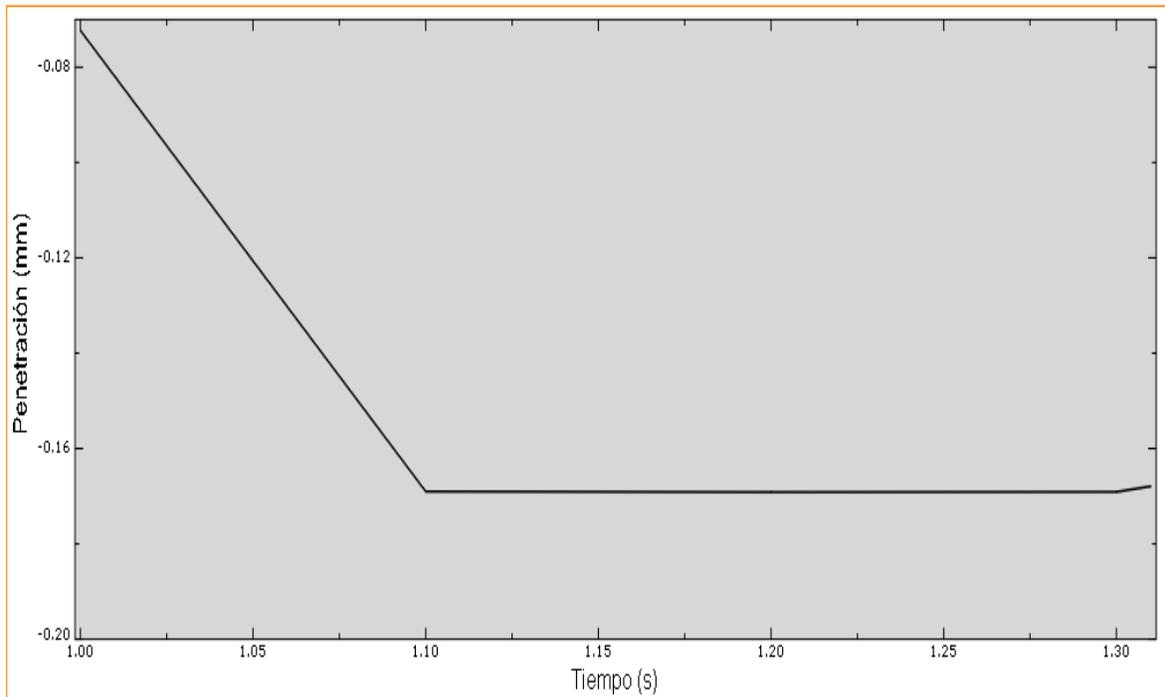


Figura 2.9- Desplazamiento del indentador en el eje Y con respecto al tiempo para una velocidad de 98 mm/s.

El comportamiento de la penetración del indentador con respecto al tiempo para cada una de las velocidades utilizadas es muy parecido pues la variación es muy pequeña y en los tres casos las medias se mantienen en un rango de 0.1688 mm y 0.1695 mm, por lo que se puede concluir que la velocidad no tiene ninguna influencia en la penetración del indentador en el sustrato de aluminio AA1060-H18.

2.7.2 Fuerza de contacto del indentador

Las Figuras 2.10, 2.11 y 2.12 muestran el comportamiento de la fuerza de contacto del indentador en el eje X con respecto al tiempo para las velocidades utilizadas (53, 76 y 98 mm/s). La variación de la fuerza para cada una de las velocidades anteriores es la siguiente: para el primer caso se encuentra entre los 6581 N y los 6598 N, y se mantiene prácticamente constante con una media de 6588 N, para el segundo caso la variación es un poco más amplia que en la primera ya que varía entre 6580 N y 6700 N, manteniéndose con una media de 6616 N y para el último caso la variación se manifiesta entre los valores de 6585 N y 6651 N, mientras que la media

en el orden de los 6603 N. Al igual que en la penetración los resultados para un tiempo menor de 1.1 s no se tomaron en cuenta.

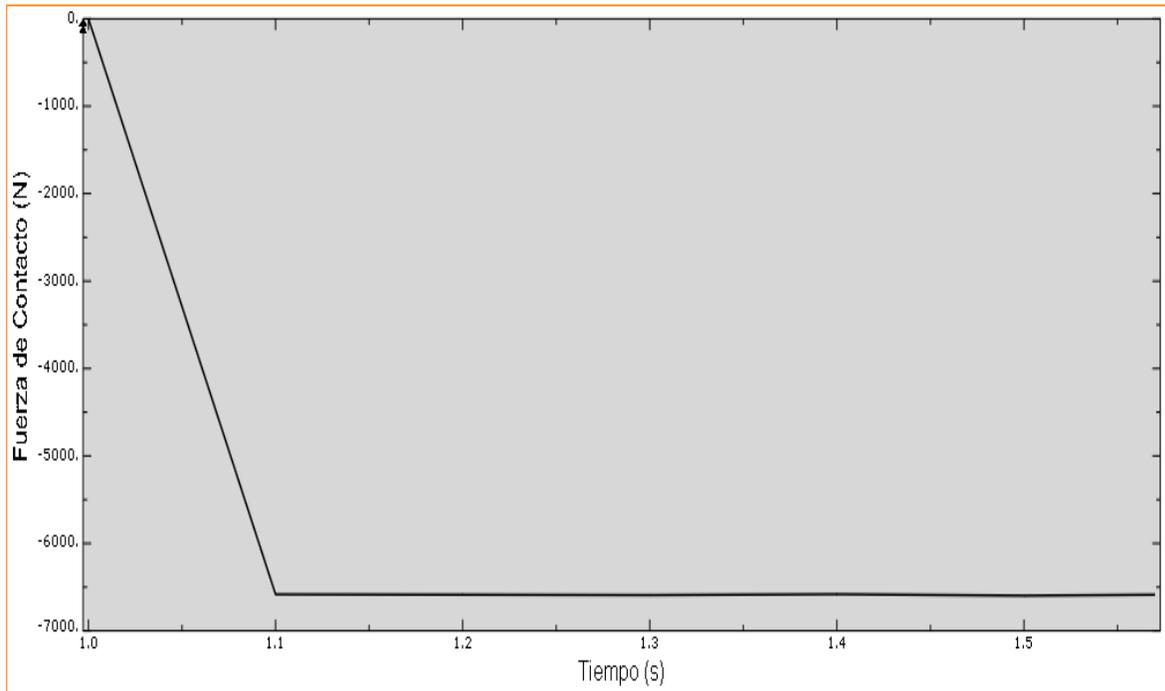


Figura 2.10- Fuerza de contacto del indentador en el eje X con respecto al tiempo para una velocidad de 53 mm/s.

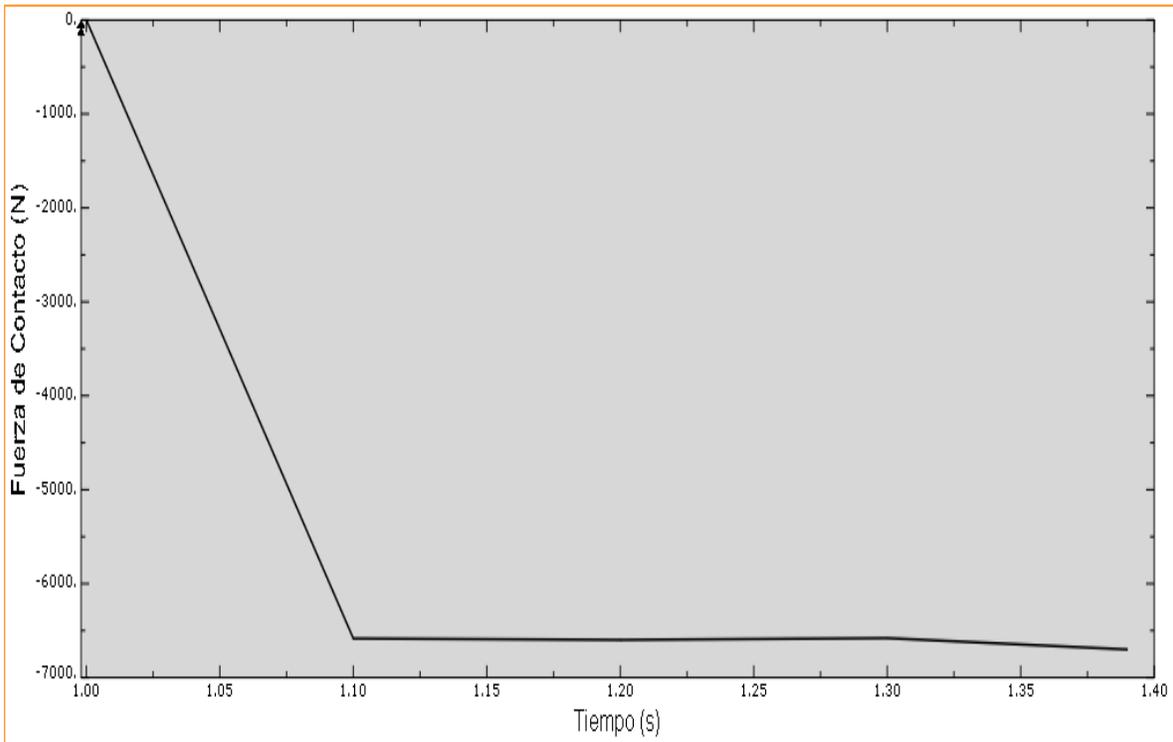


Figura 2.11- Fuerza de contacto del indentador en el eje X con respecto al tiempo para una velocidad de 76 mm/s.

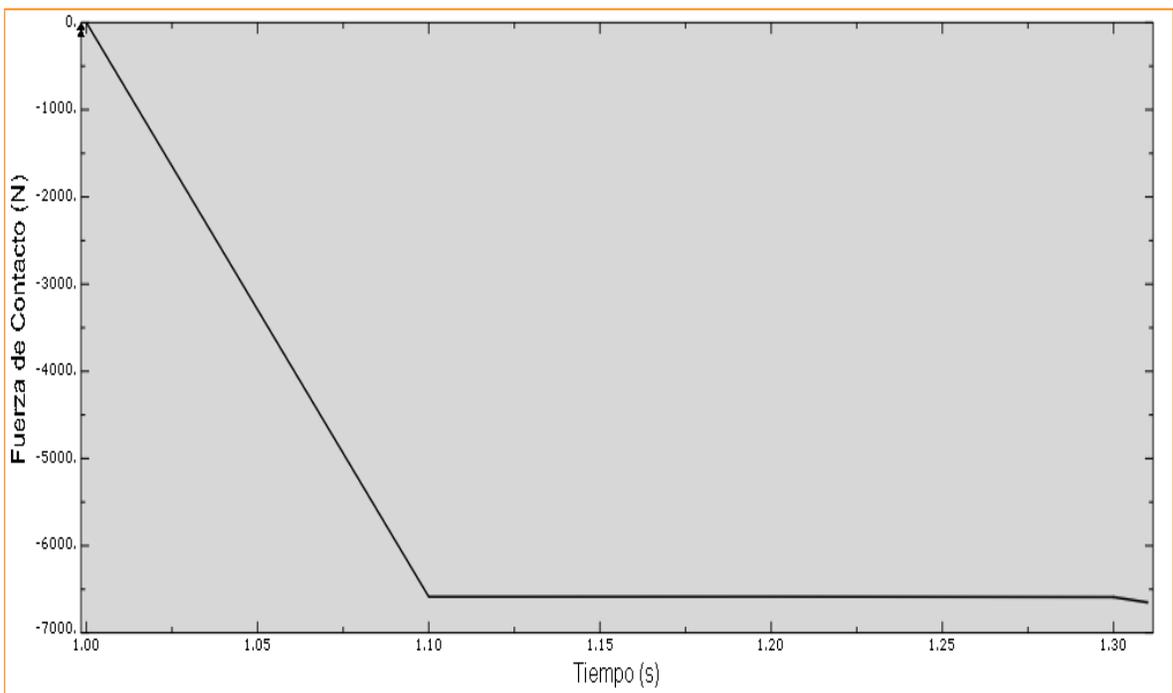


Figura 2.12- Fuerza de contacto del indentador en el eje X con respecto al tiempo para una velocidad de 98 mm/s.

La fuerza de contacto del indentador en el eje X con respecto al tiempo mantiene un comportamiento prácticamente constante. Además, las medias se mantienen cercanas ya que los valores de estas son -6588 N, -6616 N y -6603 N respectivamente.

2.7.3 Energía utilizada en la deformación

En la figura 2.13, 2.14 y 2.15 se muestran el comportamiento del consumo de la energía asociada a la deformación con respecto al tiempo para las velocidades (53, 76 y 98 mm/s). La variación del consumo de energía para cada una de las distintas velocidades varía de la siguiente manera: para la velocidad de 53 mm/s dicha variación está entre los valores de 131 mJ y 337.42 mJ, para la velocidad de 76 mm/s el menor valor es de 154 mJ y el mayor de 367 mJ y para la velocidad de 98 mm/s. Los valores también se tomaron a partir de 1.1 s.

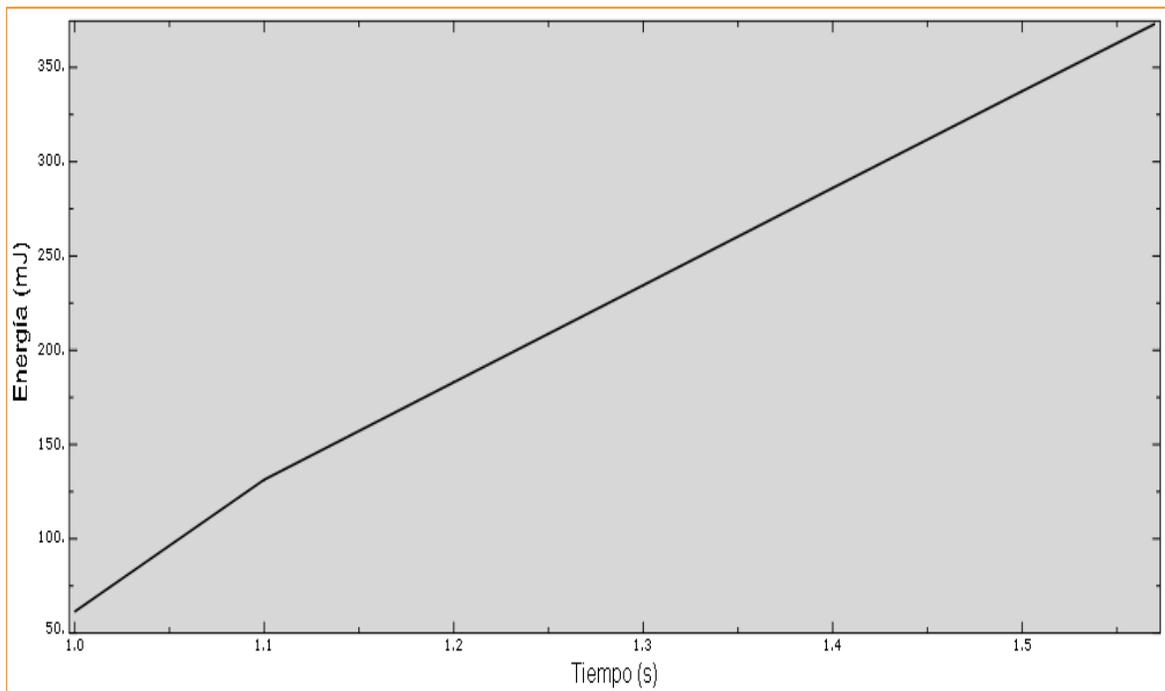


Figura 2.13- Energía utilizada en la deformación para una velocidad de 53 mm/s.

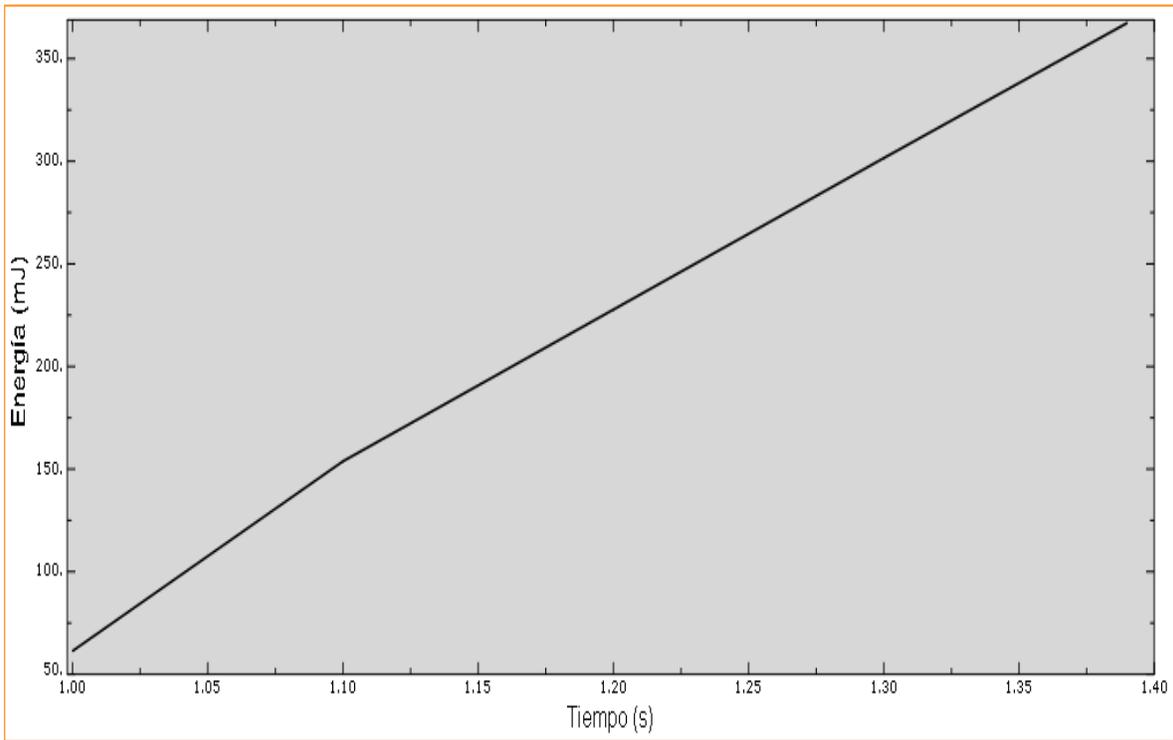


Figura 2.14- Energía utilizada en la deformación para una velocidad de 53 mm/s.

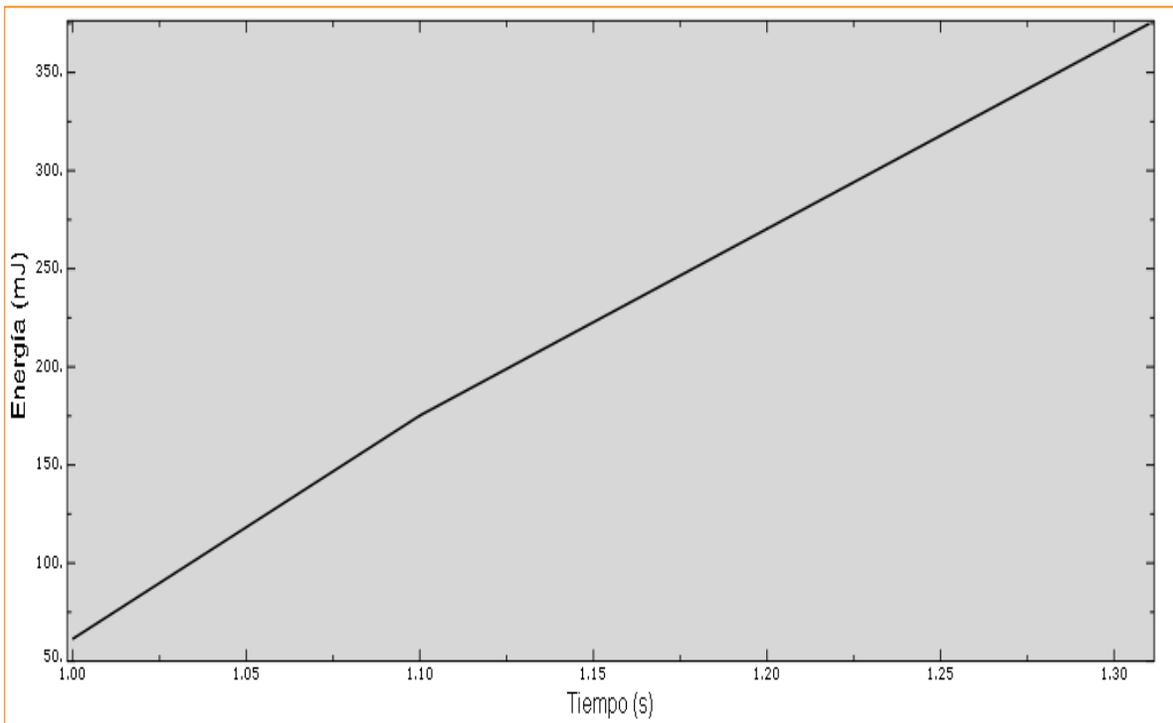


Figura 2.15- Energía utilizada en la deformación para una velocidad de 53 mm/s.

La energía se comporta de forma lineal en cada uno de los casos, aunque como se muestra en la Figura 2.16 la velocidad tiene un papel particular pues al aumentar la velocidad la pendiente de cada una de las curvas (ver Fig. 2.16) se hace cada vez más pronunciada.

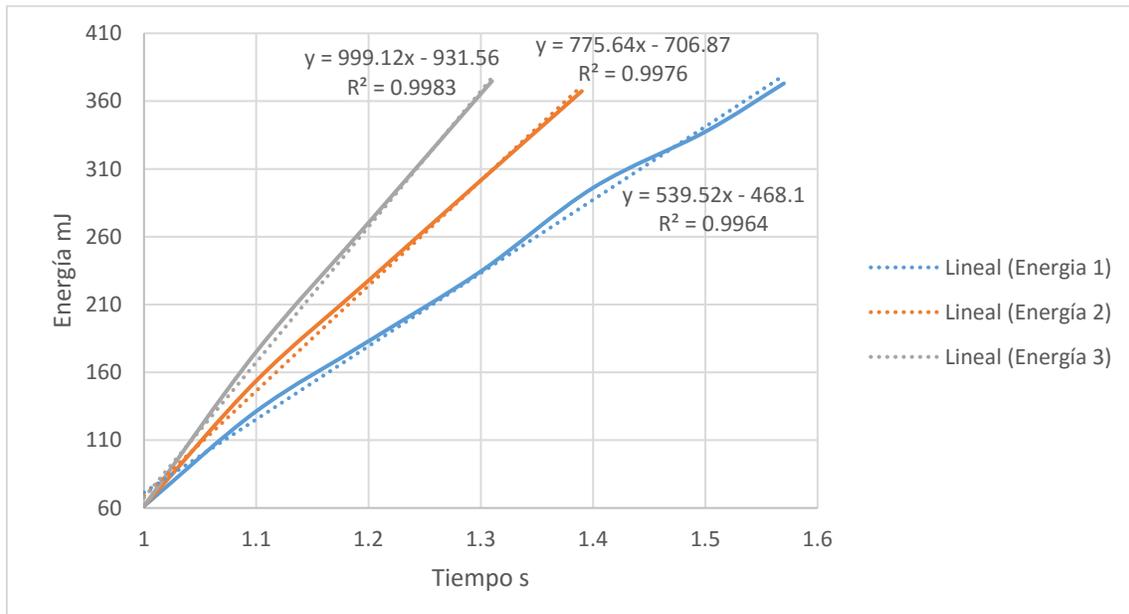


Figura 2.16- Curvas de cada consumo de energía en el tiempo para las distintas velocidades.

2.7.4 Cálculo del ancho de la huella

$\alpha_{deg} = 120^\circ \rightarrow$ ángulo de la punta del indentador

$$\Theta_{deg} = 0.5 \cdot (180^\circ - \alpha_{deg}) \quad \text{Eq. 1}$$

$$\Theta_{deg} = 0.5 \cdot (180^\circ - 120^\circ)$$

$$\Theta_{deg} = 30^\circ$$

$$Z_{gt} = r \cdot (1 - \cos(\Theta_{deg})) \quad \text{Eq. 2}$$

$$Z_{gt} = 0.2 \cdot (1 - \cos(30^\circ))$$

$$Z_{gt} = 0.0269 \text{ mm}$$

$$\tan(60^\circ) = (W/2) - 0.2 / P_d - Z_{gt}$$

Tanto el ancho de la huella como el número de dureza al rayado se calculó una sola vez debido a que el valor de P_d se redondeó a dos lugares después de la coma y el resultado es el mismo para las tres velocidades utilizadas.

$$w = 0.2 + 2 \cdot (P_d - Z_{gt}) \cdot \tan(60^\circ) \quad \text{Eq. 3}$$

$$w = 0.2 + 2 \cdot (0.17 - 0.0269) \cdot \tan(60^\circ)$$

$$w = 0.69 \text{ mm}$$

Donde:

Z_{gt} → Profundidad de transición geométrica, mm.

w → Ancho de la huella, mm

P_d → Penetración del indentador, mm.

2.7.5 Número de dureza al rayado

El cálculo de la dureza al rayado no es más que la división de 8 veces la fuerza aplicada entre el ancho de la huella elevado al cuadrado multiplicado por π .

$$HS_P = 8P / \pi w^2 \quad \text{Eq. 4}$$

$$HS_P = 8 \cdot 30 / \pi \cdot (0.69)^2$$

$$HS_P = 160.54 \text{ Pa}$$

$$HS_P = 0.160 \text{ GPa}$$

Donde:

HS_P → Numero de dureza al rayado, Pa.

P → Fuerza normal, N.

w → Ancho de la huella, mm.

2.7.6 Comparación de los resultados obtenidos en la simulación con los de la práctica

El valor del ancho de la huella obtenido en la simulación es de 0.69 mm mientras que en la práctica es de 0.62 dejando un margen de error de un 11% el cual es aceptable, sin embargo, el porcentaje de error existente referente al número de dureza al rayado es del doble (22%), pues en la simulación se obtuvo 160.54 Pa y en la práctica 205.31 Pa.

Conclusiones

1. Es común que los investigadores realicen simulaciones sobre desgaste, utilizando principalmente el MEF aunque también se utiliza, pero a menor escala, la dinámica molecular ya que esta tiene como factor limitante que se utiliza para materiales simples o con pocos elementos de aleación, pues al existir muchos elementos aleados se hace mucho más complicado llegar a la estructura de dicho material.
2. Durante la simulación los resultados obtenidos fueron los siguientes: en cuanto a la penetración del indentador en el sustrato para cada una de las velocidades se comportó de forma similar ya que después de empezar el contacto entre ambos cuerpos la penetración se mantuvo prácticamente constante en los tres casos con una media que osciló entre 0.1688 mm y 0.1695 mm por lo que la velocidad no tiene ninguna influencia; la fuerza de contacto del indentador en el eje X con respecto al tiempo también se mantuvo casi constante después de pasar 1 s pues sus medias tuvieron una variación muy pequeña (6588, 6616 y 6603 N) respectivamente; por último, la energía asociada mantiene un comportamiento lineal en los tres casos aunque la velocidad varía las pendientes de las curvas en un gráfico, energía contra tiempo, ya que si ésta aumenta la pendiente se hace cada vez más pronunciada.
3. Comparando los resultados de la práctica con los de la simulación podemos determinar que se mantienen en un orden lógico, pues no se esperaba que fueran exactamente iguales, pero sí parecidos y tanto en el ancho de la huella como en el número de dureza al rayado el porcentaje de error se mantiene por el orden de los 11% y 22% respectivamente, los que son aceptables.

Recomendaciones

1. Simular en otro software que utilice el MEF, como ANSYS, para comparar los resultados obtenidos entre las simulaciones y los ensayos reales. Además de determinar cuál de los softwares utiliza menos recursos computacionales.
2. Mejorar el modelo utilizado con el fin de que los resultados sean mucho más semejantes a los obtenidos en los ensayos.
3. Evaluar la posibilidad de utilizar el método de la dinámica molecular para comparar los resultados de este método y el MEF con los de los ensayos.

Bibliografía

1. ASHBY; MICHAEL F. & JONES, et al. Engineering Materials 1: An introduction to their properties & applications. Editado por: Butterworth-Heinemann, O. 2 ed. 1996. ISBN 0-7506-3081-7.
2. BERMÚDEZ, R. R. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MÁQUINA PARA REALIZAR EL ENSAYO DE RALLADO. FACULTAD DE INGENIERÍA. Universidad de Cienfuegos, 2015.
3. COMMITTEE, A. H. ASM Handbook Vol 8: Mechanical Testing and Evaluation. 2000, nº p. 2235. ISSN 0-87170-389-0.
4. ASM HANDBOOK COMITE. ASM Handbook Vol 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology. 1992, nº p. 1879. ISSN 0-87170-380-7.
5. DOMÍNGUEZ, L. H. Simulación del rayado de un substrato de aluminio AA6061-T6 para diferentes velocidades de deslizamiento. Departamento de Ingenieria mecanica. Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2015.
6. EDER, S. J. E. A. Applicability of Macroscopic Wear and Friction Laws on the Atomic Length Scale. *Physical Review Letters*, 2015, nº
7. HERNÁNDEZ, R.; RIERA, M. D., et al. MODELIZACION Y SIMULACION DEL DESGASTE EN ACEROS DE HERRAMIENTAS. 2005, nº
8. Smith, J. SIMILACIÓN DE DESGASTE MEDIANTE LA SUBROUTINA UMESHMOTION. 2006, nº
9. HU, X., SUNDARARAJAN, S. & MARTINI, A. The effects of adhesive strength and load material transfer in nanoscale wear. *Computational Materials Science*, 2014, vol. 95, nº p. 464-469 Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/commsci>.

10. JONES, M. H. S., D. *Industrial Tribology: The Practical Aspects of Friction, Lubrication and Wear*. 1991. Elsevier Science Publisher. ISBN 0-444-42161-0.
11. KOCANDA, A. C., P. *Numerical analysis of abrasive wear of forging dies. Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*. 2001. ISBN 90-2651-822-6.
12. RABINOWICZ, E. *Friction and Wear of Materials*. 2 ed. New York: John Wiley and Sons, 1995. ISBN 978-0-471-83084-9.
13. SMITH, R. E. A. *Stick slip and wear on metal surfaces* Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/wear>.
14. MARTINEZ F. CASTAÑEDA S. Fundamentos teóricos del desgaste abrasivo. *Revista Construcción de Maquinaria*. No. 8, mayo-agosto, 1983. Pag. 161.
15. Tenembuam.M.M. Desgaste de los materiales de construcción y los elementos de máquina. Editorial Maschinoestronie, Moscú, 1966, Pag. 114.
16. Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus. ASTM Standard designation: G171-03.