

# Integridad superficial en superficies cortadas por distintos métodos de corte

## Surface Integrity Cutted for Several Cutting Method

Milton Fabián Coba-Salcedo <sup>1a</sup>, Francisco Jose Sorzano-Jimenez <sup>1b</sup>,  
Edwin Enrique Peralta-Hernández <sup>1c</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Ingeniería de Materiales y Tecnologías de Fabricación (IMTEF), Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Colombia. Orcid: 0000-0002-2436-5536 <sup>a</sup>. Correo electrónico: [miltoncoba@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:miltoncoba@mail.uniatlantico.edu.co) <sup>a</sup>, [f\\_sorzano@hotmail.com](mailto:f_sorzano@hotmail.com) <sup>b</sup>, [edwinperalta18@hotmail.com](mailto:edwinperalta18@hotmail.com) <sup>c</sup>

Recibido: 15 febrero, 2023. Aceptado: 12 enero, 2024. Versión final: 26 febrero, 2024.

### Resumen

Al momento de seleccionar materiales se deben tomar diferentes decisiones para elegir el material adecuado según la aplicación, las propiedades del material determinan su uso final, en este contexto cuando se selecciona un material se debe considerar los diferentes procesos a los que será sometido antes de llegar a su aplicación final, porque estos procesos pueden provocar transformaciones en las diferentes propiedades. En el caso de los aceros se debe tener en cuenta si el elemento será sometido a algún tratamiento térmico, o el método con el que será cortado, ya que hay evidencia que este influye en las propiedades superficiales y microestructura del material. Este artículo describe el estudio que se realizó para analizar la dureza, la rugosidad y la microestructura del canal de corte en un acero ASTM-A36, en estado de suministro para tomar estos valores como referencia para los procedimientos posteriores. Se plantea cortar el material con métodos de corte usados convencionalmente en la industria metalmeccánica y de la construcción, y también se cortan con otros procesos no convencionales usados en menor proporción en la industria. Se realizan cortes similares para mantener la homogeneidad de la prueba y analizar las caras del corte en cada probeta de manera similar. Se realizan los cortes a las probetas con los métodos de corte convencionales (fresadora, oxicorte y tronzadora) y los no convencionales (hilo por electroerosión y plasma), manteniendo en lo posible parámetros de corte y de trabajo similares. Posteriormente se analiza la superficie cortada –canal de corte- de cada una de las probetas midiendo dureza, rugosidad y tomando imagen microscópica de su microestructura. Estos ensayos permiten cuantificar los cambios que se presentan en el material dependiendo del método de corte usado y definir según cada método que tanto puede afectar la aplicación final del material. Al obtener los resultados se realizan graficas comparativas entre todos los métodos usados y se establecen las diferencias encontradas entre ellos. A partir de estos resultados y comparaciones se generan las conclusiones del estudio.

**Palabras clave:** integridad superficial; canal de corte; dureza; rugosidad superficial; microestructura; metalografía; métodos de corte; comparación de métodos de corte; afectación de la zona cortada, calidad superficial.

### Abstract

When selecting materials, different decisions must be made to choose the appropriate material according to the application, the properties of the material determine its final use, in this context, when selecting a material, the different processes to which it will be subjected before reaching its final application must be considered, because these processes can cause transformations in the different properties. In the case of steels, it must be taken into account whether the

element will be subjected to any heat treatment or the method with which it will be cut, since it influences the surface properties and microstructure of the material. This article describes the study that was carried out to analyze the hardness, roughness and microstructure of the cutting channel in an ASTM-A36 steel, in a state of supply to take these values as a reference for subsequent procedures. It is proposed to cut the material with cutting methods conventionally used in the metalworking and construction industry, and also cut with other non-conventional processes used to a lesser extent in the industry. Similar cuts are made to maintain the homogeneity of the test and to analyze the cut faces in each specimen in a similar way. The specimens are cut with conventional cutting methods (milling, oxyfuel and cutting machine) and non-conventional methods (wire EDM and plasma), maintaining similar cutting and working parameters as far as possible. Subsequently, the cut surface - cutting channel - of each of the specimens is analyzed by measuring hardness, roughness and taking microscopic images of its microstructure. These tests allow quantifying the changes that occur in the material depending on the cutting method used and defining, according to each method, how much it can affect the final application of the material. When the results are obtained, comparative graphs are made between all the methods used and the differences found between them are established. From these results and comparisons, the conclusions of the study are generated.

**Keywords:** Surface integrity; cut channel; hardness; surface roughness; microstructure; cut heat affected zone; Comparison of cutting methods; Metallographic aspect; Cutting, Surface quality.

## 1. Introducción

En la industria manufacturera los procesos de corte juegan un papel fundamental debido a la gran variedad de piezas o mecanismos que se pueden elaborar con estos procesos. Por ejemplo, en la industria automotriz se pueden fabricar piezas tales como ejes, cigüeñales, engranes de transmisión o el bloque de un motor. También tienen amplia aplicación en la industria aeronáutica, en la fabricación de los álabes de las turbinas de un avión y partes del fuselaje, entre otras más. Todas estas piezas mecanizadas deben cumplir estándares de calidad necesarios para su óptimo funcionamiento, haciendo especial énfasis en las propiedades superficiales de estas “*integridad superficial*”, estas pueden variar dependiendo de la aplicación final que tengan [1].

La microestructura, la dureza y la rugosidad son una de las mayores limitantes en los procesos de corte para cumplir a cabalidad con dichos estándares [2]. Estas propiedades superficiales son el resultado del proceso o los procesos que han sido utilizados para la elaboración de una pieza o componente [3]. Bajo ciertas condiciones de corte, las propiedades superficiales pueden verse afectadas con respecto a sus propiedades iniciales.

Cuando se presentan ciertas condiciones de corte las propiedades superficiales como la microestructura, la dureza y la rugosidad se ven afectadas de tal manera que si no se controlan pueden variar, aumentar o disminuir y causar problemas como cambios en la microestructura, aumento o disminución de dureza y con esto el rápido desgaste del material y, piezas mecanizadas defectuosas debido al pobre acabado superficial y a la poca precisión dimensional que al final del proceso se obtiene [4]. Esto sin duda alguna afecta severamente la productividad de

la operación, debido a que han cambiado las propiedades superficiales del material, pieza o mecanismo. Con los desarrollos en las tecnologías de corte, las propiedades de las superficies obtenidas por la pre-manufactura y especialmente por las aplicaciones finales de mecanizado son muy importantes. La calidad del mecanizado en los procesos de corte está generalmente caracterizada por los cambios en las propiedades del material, la deformación en el borde cortado, las propiedades de la superficie cortada y la geometría del canal de corte [5].

El uso común de varios procesos de corte permite plantear interrogantes como, “¿Qué método de corte es el más eficiente para un material determinado?”. En este contexto, el objetivo principal es encontrar el método más rápido, más barato y de mejor calidad que produzca la menor deformación en la zona de corte [3].

El mecanizado tiene como objetivo crear una pieza de una geometría dada, con dimensiones y tolerancias dimensionales específicas. Para permitir la función adecuada de la pieza, también se especifica el acabado superficial. Más allá de estas consideraciones geométricas, es importante que la superficie producida esté libre de defectos como grietas, que no tenga esfuerzos residuales dañinos y que no se someta a cambios metalúrgicos indeseables. Estos son aspectos particularmente importantes cuando la pieza opera en un ambiente hostil, cuando se somete a carga por fatiga o cuando su falla podría tener consecuencias catastróficas. Con el crecimiento de tales aplicaciones críticas, particularmente en la industria aeroespacial, el término acabado superficial ha adquirido un significado complejo [6].

Los procesos de mecanizado convencionales (por ejemplo, el torneado, el taladrado y el fresado) usan una herramienta de corte afilada para formar una viruta de un trabajo mediante deformación por una fuerza cortante. Además de estos métodos convencionales, hay un conjunto de procesos que usa otros mecanismos para arrancar materiales. El término mecanizado no tradicional se refiere a este grupo de procesos, los cuales arrancan el exceso de materiales mediante diversas técnicas que incluyen la energía mecánica, térmica, eléctrica o química (o combinaciones de ellas) [1]. Estos procesos no usan un instrumento afilado de corte en el sentido convencional [1], [2].

La calidad del proceso de corte que se obtiene con cualquier método, se puede determinar mediante la medición de propiedades de la superficie tales como la rugosidad, dureza y microestructura [3]. En la ejecución de los procesos de mecanizado existen parámetros de corte que deben ser tenidos en cuenta en todos los procesos y de los cuales también depende la objetividad de los resultados. Los parámetros más importantes que afectan los procesos de corte metal son la velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad del corte. En un estudio realizado anteriormente acerca de las propiedades de la superficie del acero después de ser sometida a un proceso de corte, se establece que: en el corte de metal, la profundidad de corte, la velocidad de avance y la velocidad de corte son los principales parámetros de control [8]. Hay una estrecha relación entre el material cortado, la herramienta de corte y las fuerzas de corte y calidad de la superficie cortada [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Así mismo, existen muchos estudios sobre esta relación entre los parámetros de corte y la calidad del producto final [14], [15], [16], y en la gran mayoría se llega a la misma conclusión, así como lo afirman Muñoz y Cassier [7], en su estudio realizado en 1998 el cual se centran en la influencia de la velocidad de corte sobre el acabado de la superficie afirman lo siguiente: “las variables tales como la velocidad de avance, el radio de corte y la velocidad de corte pueden proporcionar un control de la calidad y el acabado de la superficie en un proceso de mecanizado determinado”.

También hay un fenómeno físico conocido como "acumulado de borde (BUE)" que se observa en ciertas gamas de velocidad de corte que afecta directamente el acabado superficial en piezas mecanizadas [1]. Este trabajo analiza los efectos de distintos procesos de corte sobre la superficie del acero ASTM A-36 ya que durante la revisión de bibliografías se encuentran estudios sobre otros materiales como el acero inoxidable 304, aluminio puro y la aleación de aluminio 6061.

El acero ASTM A-36 es un acero de bajo carbono, es ampliamente utilizado en la fabricación de estructuras, puentes viales e infraestructura petrolera [10]. El material será sometido a procesos de corte convencionales (fresado, sierra, oxicorte) y algunos procesos no convencionales (rayo láser, rayo de plasma) [11], [12], [13]. Se analizarán las propiedades de la superficie cortada tales como rugosidad, dureza y microestructura, para cuantificar los cambios que se presentan en el material dependiendo del método de corte usado. Para cuantificar los cambios ocurridos en las propiedades del material, se tiene en cuenta los estándares ya conocidos para realizar los diferentes ensayos y mediciones. Por ejemplo, en el ensayo de dureza se mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro. Existen una diversidad de pruebas de dureza, pero las de uso más común son los ensayos Rockwell y Brinell (Figura 1).

## 2. Metodología

A continuación, se presentan la metodología que se siguió para realizar este estudio, aquí se describen los pasos utilizados para la medición de las propiedades en los materiales, además de una descripción detallada de la técnica de medición y los instrumentos utilizados y los pasos detallados llevados a cabo en el estudio.

### 2.1. Clasificación

Para la medición de la dureza se utiliza el ensayo de dureza Rockwell, este es un método rápido y sencillo de realizar la prueba de dureza, pero menos preciso que otros ensayos, otra de sus ventajas es que es un tipo de ensayo ampliamente conocido en la academia y la industria. En este caso la dureza se obtiene en función de la profundidad de la huella y no de la superficie como en los ensayos Brinell y Vickers.

La dureza Rockwell no se expresa directamente en unidades de penetración, sino como la diferencia entre dos números de referencia, como se describe a continuación.

$$HRC = 100 - e \quad (1)$$

$$HRB = 130 - e \quad (2)$$

Para realizar las mediciones de dureza en las probetas se utilizó un durómetro AFFRI 250 DRMC como el mostrado en la Figura 2(a), el cual hace parte de una familia de durómetros semiautomáticos para ensayos de dureza Rockwell, superficial Rockwell, Brinell y Vickers según la norma ASTM, ISO y JIS, los cuales son durómetros con una excelente relación calidad/precio, que garantizan la precisión y fiabilidad.

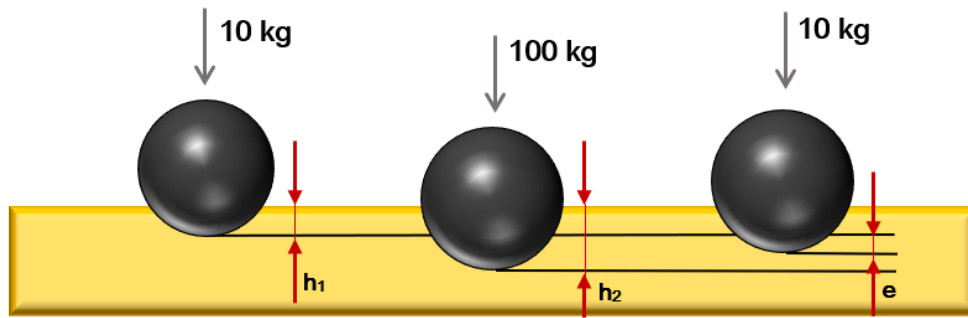


Figura 1. Ensayo Rockwell.

En dicho equipo las fuerzas se aplican por medio de un sistema de células de carga en el mismo eje que el penetrador, y la carga se aplica siempre con la máxima precisión, lo que elimina los problemas asociados con pesos muertos y la garantía de estabilidad en el tiempo.

Estos medidores de dureza no necesitan estar al mismo nivel y no se ve afectado por cualquier fuente externa de vibración, permitiendo realizar ensayos de dureza en todos los metales tales como hierro, acero, acero templado, hierro fundido, latón, aluminio, cobre y aleaciones metálicas.



(a) (b)

Figura 2. Equipos para medición a) Durómetro AFFRI 250 DMRC, b) Bloque patrón de calibración

Para la toma de datos se seleccionó primero la escala de dureza, luego de ello se calibra el durómetro con el bloque patrón de calibración, mostrado en la Figura 2(b), y finalmente se procedió a realizar las mediciones en las probetas, seis en cada una, como lo muestra la Figura 3.

## 2.2. Medición de la rugosidad

Para la medición de la rugosidad el instrumento empleado es un rugosímetro, el cual sirve para determinar con rapidez la rugosidad en superficies o

perforaciones, dicho instrumento muestra la profundidad de la rugosidad media  $R_T$  y el valor de rugosidad medio  $R_a$  en micras ( $\mu\text{m}$ ). La realización de la medición de la rugosidad es muy sencilla. Para el presente estudio se utilizó un rugosímetro análogo de cinta marca *BAKER K130/8* mostrado en la Figura 4(a), este equipo permite medir el perfil de anclaje de la pieza con el uso de las cintas *Testex PRESS-O FILM* mostrada en la Figura 4(b), la cual usa para medir la altura pico/valle de un perfil de superficie moldeado en la cinta de réplica Testex. La cinta de adherencia es frotada sobre la superficie preparada formando así una réplica exacta del perfil de la superficie, esta réplica es medida por un resorte para determinar los picos máximos y alturas. Entre las características del equipo más representativas se encuentra la escala de 0.2", resolución de 0.1 milésimas y la presión del yunque como requieren las normas.



Figura 3. Medición de dureza.

En la prueba de rugosidad se realizó sobre la probeta un procedimiento de medición del perfil de anclaje de la superficie del material utilizando como guía el procedimiento para verificar este perfil en tuberías de

transporte de hidrocarburos, las cuales deben tener un perfil de anclaje específico para poder aplicarles el revestimiento.

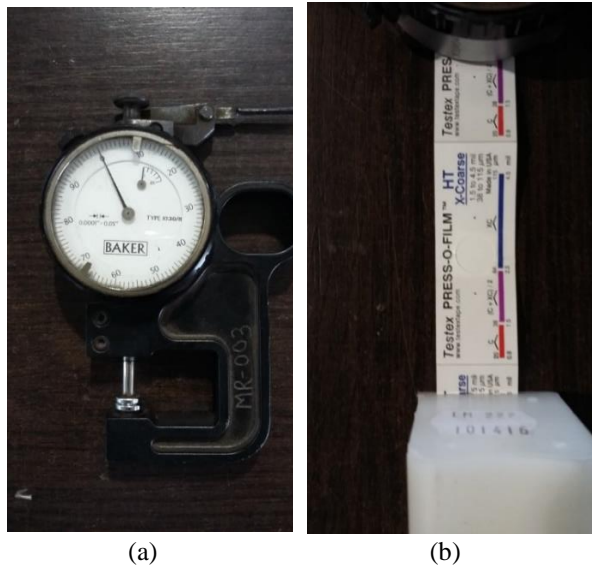


Figura 4. Equipos para la medición de la rugosidad.  
a) Rugosímetro BAKER K130/8. b) Cinta PRESS-O-FILM

Se colocó y presionó el PRESS-O-FILM sobre la superficie del material, de manera que el perfil de la superficie quedó plasmado sobre el mismo, como se aprecia en la Figura 5(a), posteriormente se colocó la cinta sobre el rugosímetro como lo muestra la 5(b) y este indicó el valor de la rugosidad.

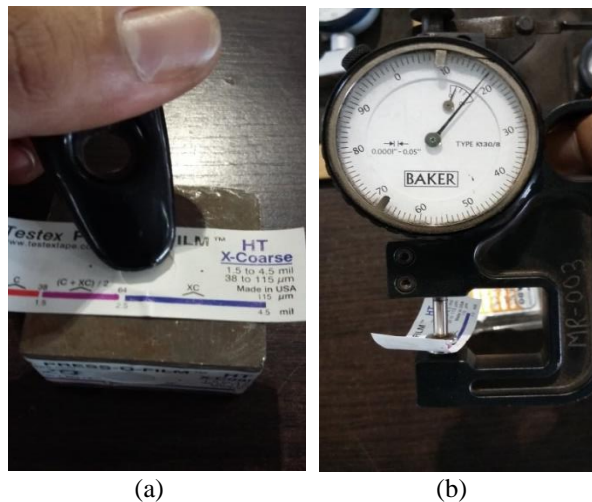


Figura 5. Ensayo de rugosidad.  
a) Aplicación de la cinta PRESS-O-FILM. b) Aplicación del rugosímetro.

### 2.3. Análisis metalográfico

El análisis micrográfico de un metal se hace sobre una probeta pulida del material que se ataca con un reactivo. Cada constituyente metalográfico tiene una determinada velocidad de reacción con el reactivo de ataque. Los constituyentes menos atacables quedarán con más brillo y reflejarán mayor cantidad de luz en el microscopio, apareciendo más claros a la observación. Esta diferencia permite detectar los distintos constituyentes y determinar su proporción, distribución, tamaño, etc. La correcta preparación de la probeta para la observación microscópica es de fundamental importancia. Para ello se tienen en cuenta los resultados de la observación macroscópica y luego se procede (Figura 6):

- i. Selección del lugar y extracción de la muestra.
- ii. Montaje de la probeta.
- iii. Desbaste.
- iv. Pulimiento.
- v. Ataque.
- vi. Observación microscópica.

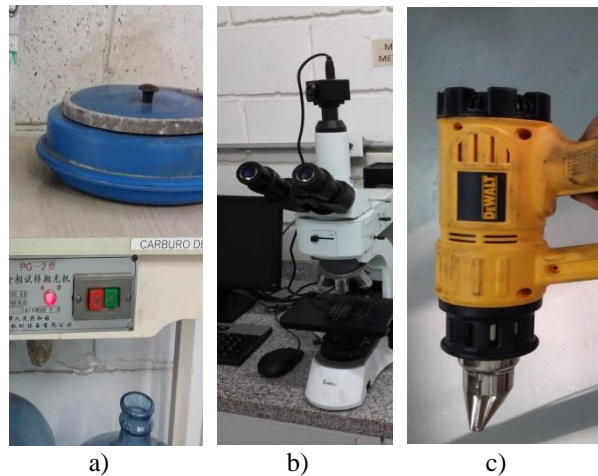


Figura 6. Equipos para el estudio metalográfico.  
a) Pulidora metalográfica, b) Microscopio metalográfico, c) Secador.

Las probetas fueron pulidas con las lijas de grado 80, 120, 240, 400, 600; con una velocidad del disco de lija de 250 rpm y durante un tiempo de 45 segundos. Las probetas fueron pulidas finalmente con polvo de óxido de aluminio, con una velocidad del disco de 120 rpm y durante un tiempo de 180 segundos hasta obtener una superficie tipo espejo. La probeta fue quemada con nital con una concentración de 3%, el tiempo de permanencia fue de 30 segundos, luego la probeta fue lavada con agua y secada para posteriormente ser ubicada en el microscopio y observar la superficie (Figura 7).

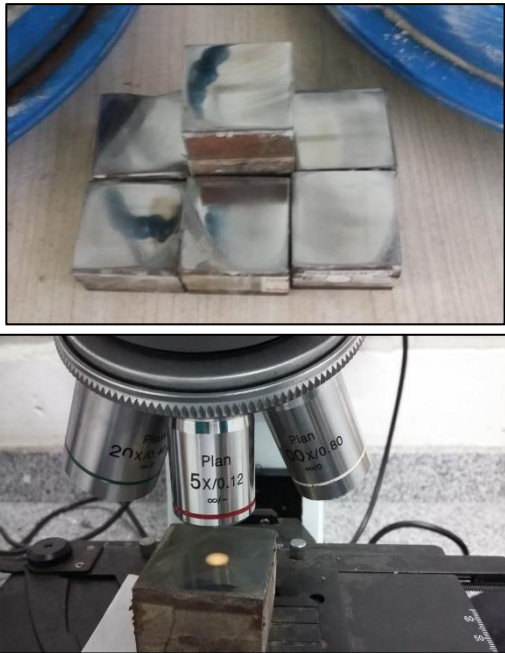


Figura 7. Material: Probetas pulidas y probeta montada en el microscopio.

### 3. Resultados

#### 3.1. Resultados de dureza

Para poder observar de manera clara un comportamiento de la dureza de cada probeta estudiada se calculó un

promedio de dureza individual teniendo en cuenta los valores obtenidos de las seis mediciones de dureza. Este valor indica la dureza de cada probeta. También se calcula un promedio de dureza general para cada método de corte, el cual se calcula en base a los promedios de dureza individual de cada probeta. Este valor indica el valor de la dureza promedio que genera cada proceso de corte sobre la superficie del material como se muestra en la Figura 8, permitiendo un estudio comparativo entre los promedios de dureza individual de las probetas por cada método de corte.

Se puede observar que la dureza obtenida después del corte con plasma esta siempre por encima de la dureza obtenida con los otros cortes y la probeta sin corte con una diferencia notable. En las probetas con cortes de fresadora, tronzadora y oxicorte se aprecia un comportamiento similar y en las probetas del corte con hilo se observa en las dos primeras probetas una disminución de la dureza con respecto al material en estado de suministro y luego un leve aumento con respecto a este.

El aumento en la dureza del acero se debe a que estos se pueden endurecer por dispersión, controlando el tamaño de la perlita, dado que el acero inicialmente se calienta para producir austenita homogénea, paso conocido como austenización, y el recocido permite que el acero se enfríe lentamente en el horno, produciendo perlita gruesa.

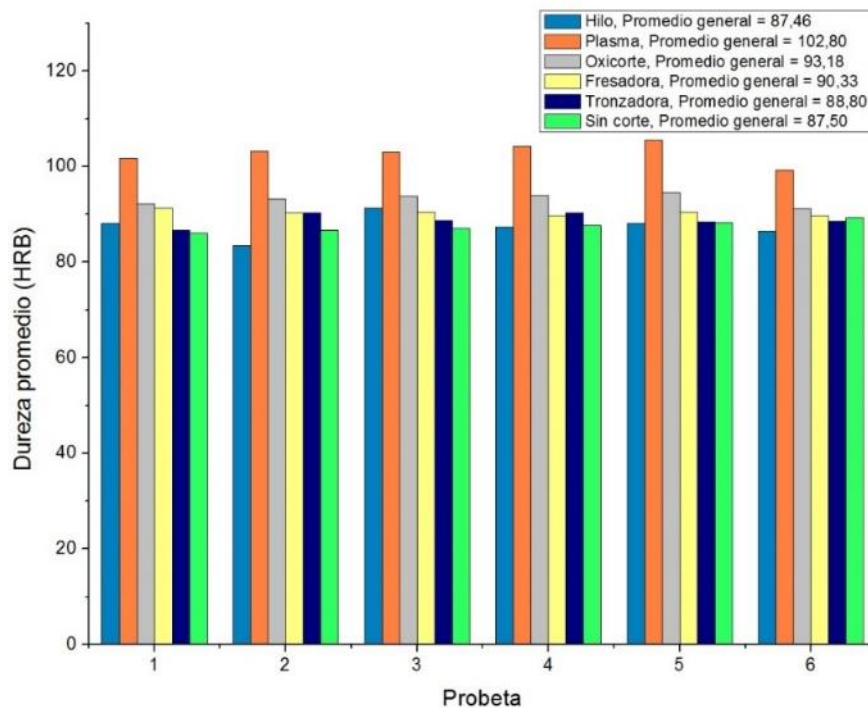


Figura 8. Comparación de durezas individuales.

El normalizado logra que el acero se enfríe más rápidamente, al aire, produciendo perlita fina, la cual tiene una mayor resistencia mecánica, la **Tabla 1** muestra como varía la dureza de las probetas en comparación con una probeta sin corte, cuya dureza promedio se calculó en 87,68%.

Tabla 1. Variación de la dureza con respecto a una probeta sin corte

Tipo de corte	Promedio de dureza general	Variación de la dureza (%)
Oxicorte	93,18	6,27
Fresadora	90,33	3,02
Tronzadora	88,80	1,27
Plasma	102,80	17,25
Hilo	87,46	-0,26

### 3.2. Resultados de rugosidad

Los resultados son obtenidos de la medición sobre la cara cortada en 6 probetas, para cada de método de corte estudiado (**Tabla 2**). Sobre cada superficie cortada se tomaron tres mediciones y se calculó el valor medio para estas, **Figura 9**. El valor promedio calculado para cada corte nos muestra una rugosidad mayor en los cortes de plasma y oxicorte en comparación con la probeta sin corte, en los otros cortes se presenta por el contrario una disminución de los valores de rugosidad siendo notable

la disminución obtenida luego del corte realizado con hilo por electroerosión, el cual debido a sus características genera una superficie de corte limpia y de muy buen acabado superficial.

La Figura muestra la variación de la rugosidad para los distintos cortes realizados con respecto a la rugosidad obtenida en una probeta sin corte, la cual presento un valor de 2.2 milésimas. Como se mencionaba anteriormente se dieron variaciones tanto de aumento como de disminución, siendo los cortes por plasma e hilo por electroerosión polos opuestos en esta medición, mientras el plasma provoca un acabado superficial con mayores irregularidades, el corte por hilo permite obtener una superficie con mejor acabado y menor irregularidad.

Tabla 2. Variación de la rugosidad con respecto a una probeta sin corte

Tipo de corte	Promedio de rugosidad general	Variación de la Rugosidad (%)
Oxicorte	2.467	12.1
Fresadora	2.183	-0.8
Tronzadora	2.033	-7.6
Plasma	2.583	17.4
Hilo	1.850	-15.9

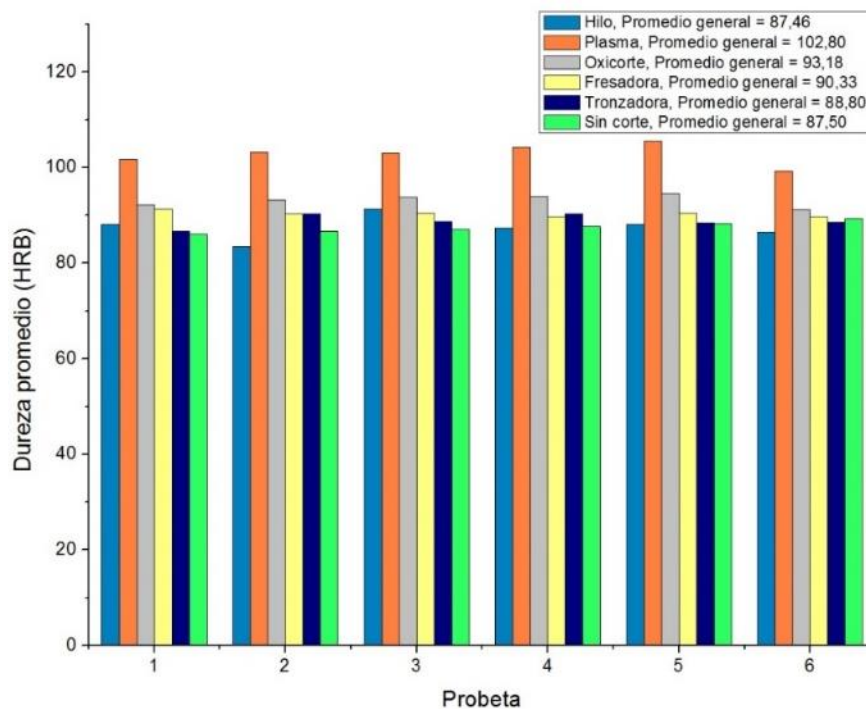


Figura 9. Comparación de rugosidades individuales.

Estas variaciones influyen en la presentación del material, así como en otras propiedades mecánicas como la resistencia a la fatiga, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, transmisión de calor y lubricación. Además, se debe tener en cuenta el aspecto económico, ya que el acabado superficial adecuado debe ser obtenido al menor costo posible, considerando que existe una relación directa entre el grado de acabado y el tiempo necesario para lograrlo.

### 3.3. Resultados de las pruebas metalográficas

Según las gráficas mostradas de las microestructuras obtenidas del ensayo de metalografía y que están plasmadas en la Figura 10(a), la microestructura de la probeta sin corte que toma como base para hacer la comparación muestra una matriz de ferrita y perlita, donde la ferrita es la zona de color más clara y la perlita es la zona de color más oscura.

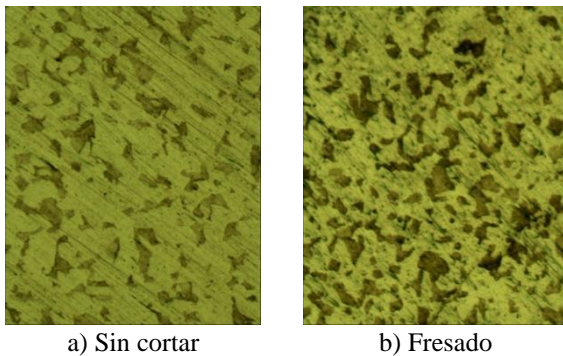


Figure 10. Microestructura de una probeta sin cortar a), y de una cortada por Fresado b).

Al cortar el material con los procesos de corte por fresadora Figura 10(b), corte con tronadora Figura 11(a) y corte con hilo Figura 11(b), se observa que la microestructura del material no se ve afectada por los procesos de corte y se observa la misma matriz de ferrita y perlita, donde la ferrita es la zona de color más clara y la perlita es la zona de color más oscura para obtener las probetas.

Al cortar el material con los procesos de corte con plasma Figura 12(a) y corte con oxicorte 12(b), se observa una variación de la microestructura debido a que el material ha sido calentado a una temperatura superior a 750°C, durante este calentamiento solo queda austenita en la microestructura.

Cuando el material comienza a enfriarse justo por debajo de 750 °C, la ferrita se nuclea y crece, por lo general en los bordes de austenita. La ferrita sigue creciendo hasta que la temperatura cae a 727 °C. La austenita restante

queda rodeada por ferrita a esta temperatura ya ha cambiado su composición. Un enfriamiento subsecuente por debajo de 727 °C hace que toda la austenita sobrante se convierta en perlita fina. La microestructura final contiene islas de perlita fina rodeada por ferrita. La estructura hace que la aleación sea resistente debido a la perlita fina endurecida por dispersión y al mismo tiempo dúctil debido a la ferrita.

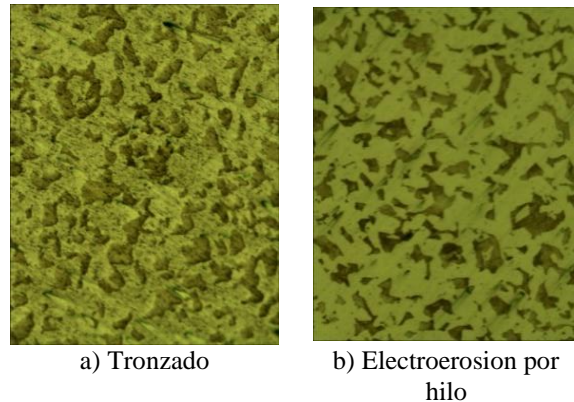


Figure 11. Probeta cortada por tronado a), y una cortada por Electroerosión por hilo b).

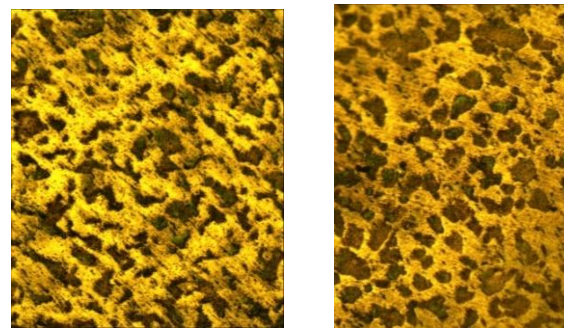


Figure 12. Probeta cortada por plasma a), y una cortada por Oxicorte b).

### 3.4. Análisis económico de los distintos métodos de corte

En la Tabla 3 se muestran los costos comerciales de cada uno de los cortes realizados en pesos colombianos, donde el corte con hilo por electroerosión presenta un costo elevado debido a que el equipo empleado es poco común en el comercio, además, es de un alto costo, por el contrario, los otros cortes son más accesibles y se pueden encontrar por costos moderados. El corte con plasma también requiere un equipo especial pero más común que la máquina de corte con hilo y debido a la configuración



de la máquina permite cortar grandes longitudes de material en un solo procedimiento.

Tabla 3. Costos del proceso de corte

Tipo de Corte	Valor del corte	Observaciones
Oxicorte	\$ 30.000	Valor por 6 probetas cortadas
Fresadora	\$ 70.000	Valor por 6 probetas cortadas
Tronzadora	\$ 30.000	Valor por 6 probetas cortadas
Plasma	\$ 12.000	Valor por 6 probetas cortadas
Hilo por electroerosión	\$ 225.000	Valor por hora \$150.000, tiempo de corte 80 min aprox.

Analizando la variación de la dureza de cada uno de los cortes con respecto a la dureza del material en estado de suministro y el costo del proceso de corte, podemos observar que los procesos de corte con tronzadora y fresadora producen un aumento en los valores de dureza en un 1,27% y 3,02% respectivamente, lo cual se puede considerar como una variación leve y se afecta muy poco el valor de la dureza del material en estado de suministro y ambos procesos son de bajo costo y fácil acceso en la industria. El corte con hilo presentó una disminución en la dureza inicial del material en un 0,26% con respecto a la dureza inicial del material, esta variación es muy leve y mantiene prácticamente la misma dureza que el estado inicial pero el costo del proceso de corte es muy elevado con respecto a todos los otros cortes y el proceso es de difícil acceso en la industria. Los procesos de corte con plasma y oxicorte presentaron un aumento de la dureza de 17,25% y 6,27% respectivamente, generando un aumento considerable en esta propiedad, lo cual puede generar afectaciones en el resultado deseado del material dependiendo de la aplicación final para la cual es requerido. Sin embargo, ambos cortes son de muy bajo costo y de fácil acceso en la industria.

Realizando la comparación de la variación de la rugosidad de cada uno de los cortes con respecto a la rugosidad del material en estado de suministro y el costo del proceso de corte, se puede observar que los procesos de corte con tronzadora y fresadora disminuyen el valor de rugosidad en un 7.6% y 0.8% respectivamente, lo cual se puede considerar como una variación leve del valor de la rugosidad del material con respecto al mismo en estado de suministro, además, ambos procesos son de bajo costo y fácil acceso en la industria. El corte con hilo presentó

una disminución en la rugosidad del material en un 15.9% con respecto a la rugosidad inicial del material, esta variación mayor genera un acabado superficial de mayor calidad en el material, pero el costo del proceso de corte es muy elevado con respecto a todos los demás cortes y el proceso es de difícil acceso en la industria. Los procesos de oxicorte y plasma presentaron un aumento de 12,1% y 17.4% respectivamente, generando un acabado superficial áspero y de menos calidad, lo cual puede afectar la aplicación final del material. Sin embargo, ambos cortes son de muy bajo costo y de fácil acceso en la industria metalmeccánica.

En el caso de la metalografía los cortes con fresadora, tronzadora e hilo afectaron muy levemente la microestructura del material, lo cual se ve reflejado en que la dureza se mantuvo cerca del valor obtenido en las probetas a las que no se les realizó corte. Por el contrario, los cortes con plasma y oxicorte generaron una variación en la microestructura que es notable por el cambio observado en los valores de dureza del material.

Se deben mostrar los principales resultados obtenidos, a la luz del estado del arte. Los resultados deben estar estrechamente relacionados con la introducción y los métodos o metodología, a través de las preguntas, hipótesis o fuentes referenciadas. Estos deben registrarse en un orden secuencial lógico y acompañarse, preferiblemente, de material gráfico como figuras, tablas y cuadros que permitan organizar la información de forma clara y sintética. Este material debe interpretarse para facilitar su comprensión. No se debe registrar la misma información en figuras y tablas, y deben evitarse las iteraciones innecesarias.

La discusión de los resultados puede estar integrada a esta sección o puede escribirse en una sección aparte. El título de los resultados (y de la discusión, si es el caso) se escribe según el formato de un título de sección.

#### 4. Conclusiones

El estudio se centró en caracterizar el efecto de diversos métodos de corte en las propiedades superficiales de un acero ASTM A-36, incluyendo microestructura, dureza y rugosidad. Los resultados permitieron identificar el método más adecuado basado en su impacto en estas propiedades.

Se estableció una metodología para realizar pruebas de metalografía, dureza y rugosidad, siguiendo normativas y referencias bibliográficas. Las micrografías revelaron variaciones en la microestructura, especialmente en probetas sometidas a altas temperaturas durante el corte.

El ensayo de dureza Rockwell B mostró un aumento en la dureza para probetas cortadas a temperaturas más altas, mientras que el corte por electroerosión redujo levemente la dureza. La prueba de rugosidad siguió un procedimiento similar al perfil de anclaje de tuberías de hidrocarburos, mostrando mayor variación en probetas cortadas a temperaturas elevadas y un buen resultado en el corte por hilo.

Tras considerar costos y comparar propiedades, se concluyó que los métodos de corte con tronzadora y fresadora ofrecen la mejor relación costo-variación para dureza, rugosidad y microestructura. Estos métodos son accesibles y económicos en la industria. Para componentes como engranajes y poleas, se recomienda fresadora y tronzadora, preservando propiedades aceptables. Para piezas mecánicas menos exigentes, plasma y oxicorte son opciones viables, con mayor rugosidad y dureza. Para alta precisión y acabado, el corte con hilo es ideal, manteniendo dureza y microestructura, pero su costo debe justificarse.

El estudio es relevante para seleccionar métodos de corte adecuados según la aplicación y el costo. Componentes de alta calidad beneficiarían de cortes precisos como el corte con hilo. Las conclusiones ayudan a la industria a tomar decisiones informadas en la fabricación y construcción, considerando propiedades específicas para aplicaciones particulares.

### Financiación

Este trabajo es financiado por el gobierno de Colombia a través de la Convocatoria 911 de Minciencias y la Corporación para la Investigación de la Corrosión.

### Contribución de los autores

M.F. Coba-Salcedo: Administración del proyecto, Conceptualización, Metodología, Supervisión; Investigación; Redacción; revisión. F.J. Sorzano-Jiménez: Investigación; Investigación, Análisis formal, Conservación de datos, Recursos, Software, Validación, Redacción; borrador original y edición final. E.E. Peralta-Hernández: Investigación; Investigación, Análisis formal, Conservación de datos, Recursos, Software, Validación, Redacción; borrador original y edición final.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

### Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

### Declaración de consentimiento informado

No aplica.

### References

- [1] J.A. Schey, *Procesos de manufactura*. México D.F: McGraw Hill, (2000).
- [2] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas*. México D.F: Prentice Hall, 2007.
- [3] A. Akkurt, "The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy," *Engineering Science and Technology an International Journal*, vol. 18, pp. 303–308, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.07.004>
- [4] A. Akkurt, "Surface properties of the cut face by different cutting methods from AISI 304 stainless steel materials," *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 16, pp. 373-384, 2009.
- [5] S. N. Grigoriev, S. V. Fedorov, & K. Hamdy, "Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools – a review," *Manufacturing review*, vol. 6, 2019, doi: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019016>
- [6] I. Korkut, M. A. Donertas, "The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling," *Materials in Engineering*, vol. 28, pp. 308–312, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.002>
- [7] P. Muñoz-Escalona, Z. Cassier, "Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel," *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, vol. 218, no. 1, pp. 103–109, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(98\)00156-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(98)00156-2)

- [8] R. Ghoreishi, A. H. Roohi, A. Dehghan Ghadikolaei, “Analysis of the influence of cutting parameters on surface roughness and cutting forces in high-speed face milling of Al/SiC MMC,” *Materials research express*, vol. 5, no. 8, 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad164>
- [9] S. Sivam, M. D. J. Bhat, N. Natarajan, “Analysis of residual stresses, thermal stresses, cutting forces and other output responses of face milling operation on ZE41 Magnesium alloy,” *Int. J. Modern Manuf. Tech.*, vol. 10, no. 1, pp.92–100, 2018.
- [10] Acero estructural ASTM A-36. Disponible en: <http://www.cga.com.co/productos-y-servicios/productos/laminas-y-planchas-de-acero>.
- [11] S. M. Alsoufi, D. K. Suker, A. S. Alsabban, S. Azam, “Experimental Study of Surface Roughness and Micro-Hardness Obtained by Cutting Carbon Steel with Abrasive WaterJet and Laser Beam Technologies,” *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 5, no. 173–181, 2016, doi: <https://doi.org/10.12691/ajme-4-5-2>
- [12] J. Aldazabal, A. Martín-Meizoso, A. Klimpel, A. Bannister, S. Cicero, “Mechanical and microstructural features of plasma cut edges in a 15 mm thick S460M steel plate,” *Metals*, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/met8060447>
- [13] I. Peko, P. Ljumović, B. Nedić, M. Dunder, “Analysis of the heat affected zone in plasma jet cutting process of the aluminium alloy EN AW 5083,” *Zastita Materijala*, vol. 60, no. 2, pp. 174–181, 2019, <https://doi.org/10.5937/zasmat1902174p>
- [14] P. Tian, L. He, T. Zhou, F. Du, Z. Zou, X. Zhou, H. Jiang, “Effect of workpiece microstructure on tool wear behavior and surface quality during machining Inconel 718 alloy,” *Tribology International*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107814>
- [15] P. Hoier, A. Malakizadi, S. Friebe, U. Klement, P. Krajnik, “Microstructural variations in 316L austenitic stainless steel and their influence on tool wear in machining,” *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, pp. 315–327. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.024>
- [16] J. Górká, T. Poloczek, “The influence of thermal cutting on the properties and quality of the cut surfaces toughened steel S 960QL,” *IOP conference series: Materials science and engineering*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/400/2/022032>
- [17] A. Suárez, F. Veiga, R. Polvorosa, T. Artaza, J. Holmberg, L. N. de Lacalle, A. Wretland, “Surface integrity and fatigue of non-conventional machined Alloy 718,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 48, pp. 44–50, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.041>