

Trabajo de grado en modalidad de aplicación

## [191007] Determinación de los parámetros de corte en función de la fatiga en el acero 1045.

Andrea Carolina Hernández Arana<sup>a,c</sup>, Johan David Perdomo Campos<sup>a,c</sup>, Santiago Ruge Barón<sup>a,c</sup>,

Martha Manrique Torres<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup>Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>c</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

---

### Resumen de diseño en Ingeniería

In the metalworking industry, the steel parts manufacturing companies have as their objective the optimal manufacturing of parts by means of a high precision control in their processes, however, to carry out the machining processes in the steel, refrigerants are used that are highly polluting substances, which can affect both the health of the operators and the environment. This work is carried out under refrigeration with compressed air, which allows efficient cooling of the piece and does not represent a negative factor in the machining process. The main objective of this work is to design an application that allows to predict the size of the surface cracks that are generated in 1045 steel, in the machining process cooling by compressed air controlling the cutting speed, feed rate and spindle speed. The application made let an approach to reality before executing the machining which provides an overview regarding the length of surface cracks in order to be admissible, depending on the operation that it is desired that the steel part be fulfilled, from the point of view of fatigue resistance.

The manufacturing process was flat milling at a Concept Mill 450 machining center at the Center for Industrial Automation Technology (CTAI) of the Pontificia Universidad Javeriana, where the Steel 1045 reference was used for the total development of the work, for this reason results and conclusions can only be projected under this reference. In addition, the refrigerant with compressed air was selected which allows to lower the temperature caused by the tool when is cutting the material by means of the pressure exerted by the air jet.

The first objective of the project was to determine the mechanical behavior of the material through tension and compression tests in a MITECH MDW-50 universal test machine to obtain the elastic limit, Young's modulus, Brinell hardness and rupture limit to contrast the results with the technical data sheet to determine the range of the initial parameters. The machining was carried out with a four-cuts HSS + Co flat reamer to make slots through a computerized numerical control (CNC) machining program, then a processing was executed in each of the slots by means of images, measuring the length of cracks, fracture resistance (KIC), average number of cycles (Nf) and apparent roughness.

The second objective was developed with the information obtained in the first objective regarding the group of parameters that had a shorter length of surface cracks, selecting three in order to perform an experiment design of three factors and three levels finding the number of replicas needed for each treatment through the non-central F distribution. All the corresponding slots were made by measuring the crack size in order to find the fracture resistance and the average number of cycles. Due to the large volume of images, images were read using a semi-automatic process backed by MATLAB image processing software. With the data obtained, the lineal regression model equation was performed finding the factors that interfere with the surface finish of the piece.

The third objective was to program the application which was designed in Visual BASIC considering the lineal regression model equation previously found and a regression tree in order to trained data and evaluated the results of the linear model. This application allows, by digitizing the input parameters between spindle speed, feed rate and depth of cut, to predict the

average length of surface cracks by showing fracture resistance, the number of cycles and a representative image of how the piece would look once the machining process is executed. According to the design of experiments carried out, it was obtained that in 85,74% the regression model fits the data thrown in this case by the application created.

The fourth and final objective was to perform the reliability tests of the designed application, for this an additional replica was machined for each treatment, performing the same post processing of the second objective. The results found were compared with the data automatically released by the application, finding the confidence of 84% the responses generated by the application. Additionally, the results were compared with the regression tree, which corresponds to a predictive model based on the behavior of the experimental design data. The results obtained from the regression equation and the regression tree were compared, obtaining a confidence of 83,32%.

Ilustración 1. Diseño aplicativo.



## 1. Justificación y planteamiento del problema

El material más usado en la elaboración de productos en la industria metalmecánica es el **acero**, es por esta razón **que** se ha visto la necesidad de ir perfeccionando técnicas para la óptima fabricación de piezas, pues el objetivo de estas es ser fabricadas con alta precisión, durabilidad y con menor impacto ambiental.

El proceso de mecanizado consiste en la fabricación de piezas por medio del arranque de viruta. Este proceso se puede ejecutar mediante diferentes máquinas como los son la fresadora, taladro de árbol y el torno, entre otras. Para llevar a cabo un proceso de mecanizado se emplean materiales semiprocados, es decir con una forma específica generalmente regular.

El tipo de material a mecanizar determina el comportamiento de la máquina, la selección de la herramienta, las variables del proceso y las características finales del producto elaborado. Esto ocurre debido a la estructura interna del material, respecto a la proximidad de sus granos y la resistencia que se pueda generar al mecanizar.

Por otra parte, las herramientas que se utilizan en el proceso poseen diferentes geometrías según la máquina que se utilice y de las operaciones de corte. La efectividad del corte en la pieza depende del ángulo de incidencia que tenga la herramienta. En general, las herramientas poseen varios ángulos en su geometría, siendo los tres más importantes, el ángulo de incidencia, el ángulo de corte y el ángulo de ataque, cada uno de estos cumple una función específica en el proceso de corte del material bajo rangos de fricción diferentes. De acuerdo con el ángulo que tenga la herramienta sobre la superficie de contacto de la pieza habrá cierta cantidad de desalojo de viruta [1, p. 484]. Los parámetros de corte influyen las características del producto final como, la calidad de la superficie, en cuanto a rugosidad y a **dureza**, y afectan la eficiencia del proceso, medida en el tiempo de ejecución. Los parámetros de corte más relevantes son la velocidad de corte definida como, la magnitud física en la cual la herramienta desbasta **la** pieza, a mayor velocidad se va a generar un mayor desprendimiento de viruta **generando** alteraciones superficiales en el material y desgaste temprano de la herramienta. La velocidad de avance es la encargada de controlar en medida la cantidad de arranque de viruta a profundidad. La velocidad de husillo se usa especialmente en el proceso de fresado y está directamente relacionada con la velocidad de avance de la herramienta, y representa las revoluciones por minuto en las que se está moviendo el husillo.

Adicionalmente, se encuentran otros parámetros como profundidad de corte, el tiempo de proceso, la potencia de corte y la fuerza de corte.

Ya en el proceso puntual de mecanizado se genera un aumento de temperatura debido al rompimiento de la cizalladura del material, viéndose como desprendimiento de viruta, es decir, un material que tiene mayor resistencia a la cizalladura genera más temperatura al contacto. La temperatura varía de acuerdo con las características del material. Esto trae como consecuencias un desgaste progresivo de la herramienta con la que se está trabajando y a su vez la deformación del material que está siendo mecanizado. Con el fin de contrarrestar el fenómeno térmico descrito anteriormente se emplean refrigerantes; los refrigerantes permiten bajar la temperatura de la pieza y de la herramienta debido a sus propiedades fisicoquímicas, además, permite eliminar la viruta producida por el desprendimiento de material y que se acumula en el punto de corte [1, p. 567].

En su gran mayoría los refrigerantes están elaborados a partir de compuestos orgánicos, los cuales por su composición química resultan dañinos para el medio ambiente [2]. Estos se constituyen en residuos de difícil disposición final, ya que pueden ser incinerados teniendo en cuenta que al entrar en contacto con altas temperaturas generan vapores que no deben inhalarse debido a su carácter nocivo para la salud, adicionalmente, no se pueden descomponer física ni químicamente en sus materias primas. Por tanto, según el decreto número 4741 del año 2005 [3] son considerados desechos peligrosos como todas aquellas sustancias que pueden ser perjudiciales para el ser humano. El decreto propone que se lleve a cabo una eficiente eliminación de los desechos peligrosos teniendo en cuenta que en ocasiones su disposición final resulta ser más contaminante que su mismo uso convirtiéndose en metales pesados que son altamente densos y van a la capa de ozono [2].

A continuación, en la Tabla 1 se presentan los cuatro tipos de refrigerantes de mayor uso en la industria.

Tabla 1. Descripción función composición química según el tipo de refrigerante. [1].

| Refrigerante                 | Composición química  | Función   |
|------------------------------|--|---|
| <b>Aceites para corte</b>    | Son aceites derivados del petróleo de origen animal, marino o vegetal, mezclados con aditivos químicos, como el azufre, cloro y fósforo.     | Tiene como objetivo lograr la máxima lubricación, sus aditivos químicos, reaccionan con la superficie del material que se está mecanizando. |
| <b>Aceites emulsificados</b> | Sus componentes principales son agua y aceite, en una relación 30:1 respectivamente. Se les adiciona por lo general azufre, cloro y fósforo. | Tiene un efecto lubricante y refrigerante sobre la pieza, la operación se realiza por presión extrema del líquido.                          |
| <b>Fluidos químicos</b>      | En agentes humectantes como el agua, se mezcla azufre, cloro o fósforo   | Debido a su composición química tienen mayores propiedades de refrigeración, pero menores propiedades lubricación que otros.                |
| <b>Fluidos semiquímicos</b>  | Contienen pequeñas cantidades de aceite emulsificado, combinándolo con químicos como el azufre, cloro o fósforo.                             | Los aceites emulsificantes otorgan propiedades lubricantes al fluido, bajo la presencia de fluidos químicos.                                |

De acuerdo con lo anterior, la investigación en manufactura busca la supresión o reducción del uso de refrigerantes en los procesos de transformación de materiales, conocido como mecanizado en seco, sin embargo, se genera en consecuencia un mayor daño superficial en la pieza mecanizada reflejándose en la fatiga temprana y una menor vida útil. Por tal motivo se propone la siguiente pregunta de investigación.

*¿Es posible encontrar una relación de parámetros que minimice el daño superficial manifesto en la reducción de la resistencia a la fatiga del material para la pieza mecanizada refrigerando con aire comprimido?*

## 2. Antecedentes

Se realizó una revisión de la literatura en bases de datos desde el año 2015 al 2019 respecto a los temas más relevantes para el desarrollo del presente trabajo. Se presentan investigaciones enfocadas en temas como la medición de los parámetros de entrada en el proceso de mecanizado, influencia de los parámetros de corte en la calidad superficial, comportamiento del acero 1045, uso de diferentes tipos de refrigerantes en mecanizado por descarga eléctrica y consecuencias del mecanizado en seco.

### Parámetros de entrada

En el año 2017 se ejecutó un estudio con el fin de determinar una combinación óptima de parámetros que mejore las características de calidad de la fuerza y rugosidad de la pieza mecanizada. Se establecieron los parámetros de mecanizado de velocidad, la alimentación y profundidad de corte.

La metodología utilizada fue el método Taguchi L16 ortogonal que consiste en seleccionar variables de respuesta, variables independientes y sus interacciones. Después se realizó una gran cantidad de experimentos que deben llevarse a cabo cuando el número de parámetros de proceso aumenta. Por lo tanto, los parámetros de proceso que causan variación en la salida se determinan y verifican una matriz ortogonal organizada bajo métodos experimentales en condiciones de laboratorio. La herramienta estadística seleccionada fue el análisis de la prueba de varianza ya que les permitió determinar la importancia de los factores controlables. Se determinaron las correlaciones entre los parámetros de diseño experimental y sus direcciones las cuales fueron calculadas con el coeficiente de correlación de Pearson.

Se encontró que la profundidad de corte, la velocidad de corte y la velocidad de avance son los factores significativos, verificados por la técnica ANOVA. Por otro lado, la rugosidad es más baja a mayor velocidad en el caso de mecanizado de plaquitas PVD y CV. Las condiciones de mecanizado óptimas para ambas inserciones tienen valores bajos de avance y profundidad de corte y la velocidad de corte se encuentra en niveles moderados. Por último, el coeficiente de correlación de Pearson demostró una relación fuerte entre la profundidad de corte, fuerza y rugosidad [4].

### Rugosidad – Daño superficial

Un estudio realizado en Reino Unido buscaba minimizar el daño superficial en la pieza por medio de la creación de una herramienta de corte de huesos para intervenciones quirúrgicas buscando disminuir el daño superficial de las piezas. En este caso se evaluó el daño superficial de la pieza ósea sufrida por el proceso de corte de una máquina de mecanizado en seco con la herramienta propuesta permitiendo establecer como inflúan los parámetros en cuanto a la velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad de corte y temperatura de corte en el proceso de fresado.

La medición del daño superficial de la pieza se observó y midió mediante microscopía electrónica de barrido (JEOL JSM-6490LV SEM) y la rugosidad de la pieza mediante un escáner de superficie (Bruker ContourGT-K), como resultado se encontraron falencias en los procesos de mecanizado en seco ya que afectaban considerablemente la calidad de la pieza. El escáner demostró que la rugosidad de la pieza aumenta un 33% en comparación al 10% de la herramienta propuesta, debido a que el segundo suprime el espesor mínimo de viruta sin cortar (MUCT) del filo de corte principal a un nivel bajo, al tiempo que minimiza las grietas generadas por los filos de corte principales. Además, se comprobó que dicha diferencia en la rugosidad está relacionada con la diferencia de temperatura de corte ya que la herramienta propuesta disipa mejor el calor debido a su forma.

Adicionalmente, se realizaron micrografías electrónicas de barrido (SEM) que muestran una calidad de superficie buena comparable para la herramienta de fresado convencional y la herramienta propuesta con valores pequeños de avance por diente [5].

En un estudio adicional en donde se buscaba minimizar la rugosidad aparente se varió la velocidad de corte en un rango (796 RPM ,2037 RPM), la velocidad de avance (20 mm/min y 264,8 mm/min) por medio de un escariador HSS con recubrimiento de nitruro de titanio (TiN), se realizaron ranuras, encontrando que los parámetros que minimizaron la rugosidad aparente son velocidad de corte 2,037 RPM y velocidad de avance 267,8 mm/min y el óptimo para la variable de cantidad de ranuras fueron velocidad de corte 63,99 m/ min y velocidad de avance 264,8 mm/min [6].

## Acero 1045

En el año 2019 en Marruecos se desarrolló una investigación experimental de la rugosidad de la superficie sobre la resistencia a la fatiga del acero AISI 1045 carbonizado obtenido por el proceso de torneado, con el fin de determinar la dependencia entre el rendimiento de fatiga y el estado de la superficie.

El estudio reveló el efecto adverso del estado de la superficie sobre el comportamiento de fatiga del acero al carbono AISI 1045. La resistencia a la fatiga aumenta con la disminución de la rugosidad superficial. De hecho, la rugosidad es la serie de irregularidades geométricas que generan concentraciones locales de estrés y el inicio de la fisuración depende del tamaño de estas irregularidades. Según las pruebas de fatiga realizadas, se observó que, para una amplitud de tensión de 225 MPa, la vida útil de la pieza aumentó de  $2,1 \times 10^5$  ciclos con una rugosidad superficial de  $R_a = 3,12 \mu\text{m}$ , a  $2,75 \times 10^5$  ciclos con una rugosidad de  $R_a = 2,26 \mu\text{m}$ , a  $6,5 \times 10^5$  ciclos para una rugosidad de  $R_a = 1,25 \mu\text{m}$  y para una superficie rugosa de  $0,5 \mu\text{m}$ , el número de ciclos hasta el fallo alcanza  $1,6 \times 10^6$  ciclos. Por lo tanto, la vida útil de la fatiga aumenta con la disminución de la rugosidad de la superficie.

Como recomendaciones se sugiere mejorar la resistencia a la fatiga de las piezas mecánicas al controlar los parámetros de corte disminuyendo la rugosidad superficial. Para esto se diseñó un modelo matemático que expresa la función de rugosidad de la superficie en función de los parámetros de corte con el fin de obtener una predicción del límite de fatiga considerando el defecto de rugosidad de la superficie [7].

### Mecanizado por descarga eléctrica (EDM)

En el proceso de mecanizado por descarga eléctrica (EDM) se mecanizan piezas rígidas y de alta resistencia, sin embargo, tiene una baja tasa de eliminación de materiales (MRR), alta rugosidad superficial (TWR) y alta tasa de desgaste de la herramienta (TWR), adicionalmente, forma una capa refundida en la superficie de las piezas alterando la estructura generando una mayor rigidez no deseada en esta. En este estudio se emplean diferentes tipos de refrigerantes como se detalla a continuación.

El EDM en seco consiste en emplear un gas como refrigerante a través de la herramienta y por medio de una tubería disipar los sobrantes de material. Se comparó el EDM en seco con un maquinado húmedo tradicional y se concluyó que el EDM seco tiene un tiempo de mecanizado más bajo que el húmedo, un MRR más alto, una rugosidad de la superficie (SR) alta debido a la reinserción de los residuos y un TWR más bajo.

En el EDM casi seco se utiliza una mezcla de gas y líquido como refrigerante el cual es pulverizado por medio de una herramienta giratoria sobre la superficie de la pieza de trabajo. La presencia del líquido cumple la función de refrigerante el cual solidifica y expulsa los residuos, lo cual con lleva a un MRR más alto y un SR más bajo debido a la rápida eliminación de residuos.

El EDM asistido por campo magnético emplea un campo generado por un electrodo, este es aplicado alrededor de la superficie de la pieza de trabajo la aplicación de este en el proceso de EDM conlleva a la rápida eliminación de residuos siendo tres veces más rápido que el maquinado convencional, MRR más alto (3 veces), SR más bajo y un TWR debido a la influencia del campo magnético en las condiciones de la brecha y el canal de plasma.

Por último, el EDM asistido por vibraciones ultrasónicas consiste en hacer vibrar ultrasónicamente la pieza, herramienta o fluido dieléctrico, mejorando la expulsión de escombros causando un fenómeno en la reducción de la capare-solidificada en la superficie de la herramienta con un MRR más alto y una SR más baja [8].

En otros estudios se propuso una metodología eficiente y amigable con el medio ambiente mediante, el EDM en seco a altas velocidades. El proceso consiste en mecanizar materiales de alta dificultad teniendo una alto MRR, adicionalmente se estudiaron las características microscópicas, como la rugosidad superficial, la capa re-solidificada, la micro dureza, el micro raqueo y el micro vacío causados por el maquinado en seco con aire dieléctrico bajo parámetros de entrada variables como la presión del aire dieléctrico 0,7 Mpa máximo, corriente de entrada (100,400,700) a máximo, duración del pulso (1,5,9) ms, intervalo del pulso 2 ms y presión del refrigerante 0,4 Mpa máximo. Se concluyó que al tener una corriente de entrada baja y una duración de pulso corta en aire se genera una rugosidad superficie pequeña y un grosor delgado de la capare-solidificada [9].

### Mecanizado en seco

En el año 2017 se realizó una investigación con el fin de eliminar los fluidos de corte que generan daños ambientales y desechos se propone realizar un mecanizado en seco asumiendo las consecuencias negativas en cuanto a la retención de temperatura provocando deformaciones térmicas tanto en la pieza como en la herramienta de corte, dado que según las observaciones realizadas a través del microscopio óptico, se forman

capas prominentes que **afectan** la integridad de la superficie y a su vez se producen tensiones residuales en las capas superiores que ocasionan un impacto negativo en la resistencia, la fatiga y la corrosión del componente. **Adicionalmente**, las operaciones de mecanizado cerrado tales como perforación de agujeros largos, escariado, fresado de chaveteros, ranuras se han convertido en uno de los desafíos más importantes para el mecanizado en seco debido a la dificultad para lograr una efectiva evacuación de viruta, ya que las virutas producidas en la perforación se atascan entre el flanco de la herramienta y la **base** del orificio causando daños en la superficie de la parte mecanizada y la cara del flanco de la herramienta.

Como propuestas finales del estudio para afrontar **las consecuencias negativas** se resaltan los recubrimientos para la herramienta, los mecanizados híbridos y el uso **de la mínima cantidad de lubricante (MQL)**, el cual minimiza el impacto tanto en la salud del operario como del medio ambiente, aun así, existe dependencia de líquidos de corte en los procesos de mecanizado [10].

De acuerdo a lo encontrado en la literatura los **parámetros de entrada** más convenientes para realizar el presente trabajo son la velocidad de corte, la velocidad avance, la velocidad de husillo y la profundidad de corte. **Adicionalmente**, el mecanizado en seco corresponde a un desafío en la industria ya que **no favorece** la calidad superficial de las piezas mecanizadas, sin embargo, es el que menor impacto negativo tiene en el medio ambiente, por lo cual se utilizará en el presente trabajo.

### 3. Objetivos

#### Objetivo General

*Diseñar un aplicativo que permita predecir el tamaño de las grietas superficiales que se generan en el acero 1045, al mecanizar en seco con aire comprimido controlando la velocidad de corte, la velocidad de avance y la velocidad de husillo.*

#### Objetivos Específicos

- Determinar el comportamiento mecánico del acero 1045 para establecer el rango de parámetros de entrada a utilizar.
- Determinar la relación entre los parámetros de entrada y salida ejecutando el proceso de mecanizado.
- Diseñar un aplicativo bajo los parámetros de entrada que prediga el tamaño de la huella superficial que se generan en el acero 1045 al mecanizar.
- Medir la confiabilidad del aplicativo.

### 4. Metodología - Resultados

**Primer objetivo** - Determinar el comportamiento mecánico del acero 1045 para establecer el rango de parámetros de entrada a utilizar.

#### 1. Caracterización del material – [Anexo 1. Ensayos de tensión y compresión.](#)

Con el fin de identificar las características (propiedades mecánicas) del material se procedió a realizar las mediciones iniciales de las probetas como se evidencia en [Tabla 2](#) y la [Tabla 3](#).

Tabla 2. Datos probeta ensayo de tensión.

| Probeta ensayo de tensión | Valor                          |
|---------------------------|--------------------------------|
| Material                  | 1045                           |
| Geometría                 | Cilíndrica de sección circular |
| Diámetro medio (mm)       | 8                              |
| A0 (mm <sup>2</sup> )     | 50,27                          |
| l0 (mm)                   | 100                            |
| l total (mm)              | 200                            |

Tabla 3. Datos probeta ensayo de compresión.

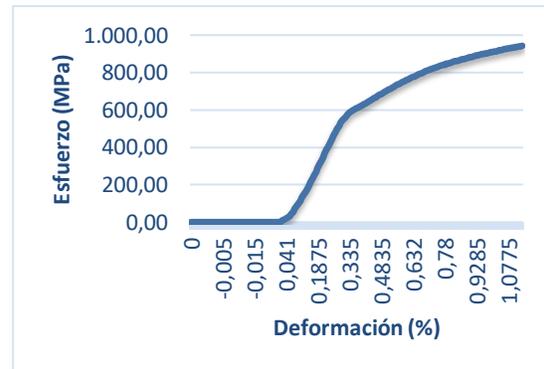
| Probeta ensayo de compresión | Valor                          |
|------------------------------|--------------------------------|
| Material                     | 1045                           |
| Geometría                    | Cilíndrica de sección circular |
| Diámetro medio (mm)          | 7,90                           |
| A0 (mm <sup>2</sup> )        | 50,27                          |
| l0 (mm)                      | 100                            |
| l total (mm)                 | 200                            |

Posteriormente se realizaron ensayos de tensión y compresión en una máquina universal de ensayos MITECH MDW-50 ([Anexo 2. Imágenes máquina universal de ensayos](#)) y siguiendo el protocolo de pruebas [11], se determinó el módulo de Young y límite elástico del material, correspondientes a la zona elástica en donde se presentan cambios reversibles, es decir, si se dejara de hacer esfuerzo el material volvería a su estado inicial. Para el caso del ensayo de tensión se encontró el límite de ruptura hallando el esfuerzo máximo que soporta el material al ser sometido a esfuerzos mayores a los aplicados en el límite elástico. En el ensayo de compresión, se sometió la probeta a una fuerza máxima de 50 KN por limitaciones de la máquina universal de ensayos. Como se evidencia la tendencia de los datos obtenidos en el [Gráfico 1](#) y el [Gráfico 2](#).

Gráfico 1. Curva de esfuerzo deformación ensayo de tensión.



Gráfico 2. Curva esfuerzo deformación ensayo de compresión.



Los resultados obtenidos en el ensayo de tensión son presentados en la [Tabla 4](#). Para el ensayo de compresión debido a que no se presentó ruptura en el material en este ensayo no se halló el límite de ruptura ni la dureza Brinell como se detalla en la [Tabla 5](#).

Tabla 4. Resultados obtenidos ensayo de tensión.

| Resultados caracterización tensión |         |     |
|------------------------------------|---------|-----|
| Límite elástico (Sigma Y)          | 62,10   | Mpa |
| Módulo de Young (E)                | 6029,58 | Mpa |
| Límite de ruptura (Sigma B)        | 676,94  | Mpa |
| Dureza Brinell                     | 195,81  | HB  |

Tabla 5. Resultados obtenidos ensayo de compresión.

| Resultados caracterización compresión |         |     |
|---------------------------------------|---------|-----|
| Límite elástico (Sigma Y)             | 32,07   | Mpa |
| Módulo de Young (E)                   | 5576,84 | Mpa |

### 1.1. Determinación parámetros iniciales – [Anexo 3. Parámetros de entrada prueba piloto.](#)

Una vez hecha la caracterización del acero 1045 se contrastaron los resultados con la ficha técnica del mismo [12] en la [Tabla 6](#) se detallan los parámetros de corte considerando que los datos suministrado son para realizar mecanizados con refrigerante lo cual no aplica en este caso ya que se quiere refrigerar por medio de aire comprimido.

A partir de la dureza estipulada comercialmente y considerando los datos obtenidos en la [Tabla 5](#), se puede observar que la dureza Brinell del acero 1045 se encuentra en un rango de entre 175 a 225 HB.

Tabla 6. Ficha técnica acero 1045. [12]

| Herramienta acero rápido   |               | Herramienta de carburo |                 |               |
|----------------------------|---------------|------------------------|-----------------|---------------|
| Velocidad                  |               |                        |                 |               |
| Corte m/min                | Avance mm/rev | Soldado m/min          | Insertado m/min | Avance mm/rev |
| <b>Dureza 125 a 175 HB</b> |               |                        |                 |               |
| 43                         | 0,18          | 140                    | 180             | 0,18          |
| 35                         | 0,40          | 110                    | 140             | 0,50          |
| 27                         | 0,50          | 85                     | 110             | 0,75          |
| 11                         | 0,75          | 67                     | 85              | 1             |
| <b>Dureza 175 a 225 HB</b> |               |                        |                 |               |
| 40                         | 0,18          | 130                    | 160             | 0,18          |
| 30                         | 0,40          | 100                    | 125             | 0,50          |
| 26                         | 0,50          | 78                     | 100             | 0,75          |
| 20                         | 0,75          | 60                     | 78              | 1             |

Para determinar el rango de cada variable se interpolaron los valores conformando diferentes grupos respecto a la velocidad de corte y la velocidad de avance presentados en la ficha técnica del material. Mediante la [Ecuación 1](#) se determinó la velocidad de husillo con unidades de revoluciones/minuto. La cantidad de grupos conformados se estableció mediante la medición de la longitud de grietas presentadas, es decir, se mecanizó hasta encontrar una longitud de grieta mayor a la encontrada en el grupo anterior, considerando 3 profundidades de corte 1 mm, 1,5 mm y 2 mm. Se establecieron 6 grupos de la letra A a la letra F como se detalla en la [Tabla 7](#).

Ecuación 1. Velocidad de Husillo. [13].

$$n = \frac{Vc * 1000}{\pi * D}$$

En donde:

$n$  = Velocidad de husillo

$Vc$  = Velocidad de corte

$D$  = Diámetro de la herramienta mm (10 mm)

Tabla 7. Parámetros establecidos según la caracterización del material.

| Grupo    | Vc (m/min) | f (mm/rev) | Va (mm/min) | N (rev/min) |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|
| <b>A</b> | 40,00      | 0,18       | 229,18      | 1273,24     |
| <b>B</b> | 36,67      | 0,25       | 295,67      | 1167,14     |
| <b>C</b> | 33,33      | 0,33       | 346,60      | 1061,03     |
| <b>D</b> | 30,00      | 0,40       | 381,97      | 954,93      |
| <b>E</b> | 29,00      | 0,43       | 392,32      | 923,10      |
| <b>F</b> | 28,00      | 0,45       | 401,07      | 891,27      |

## 1.2. Mecanizado parámetros iniciales

El mecanizado se realizó con un escariador plano de cuatro cortes de HSS+Co, construyendo ranuras en el mismo sentido de mecanizado (concordancia) para no generar ruido en las mediciones, se empleó un centro de mecanizado Concept Mill 450 con control Fanuc 2, para lo cual se elaboró un programa de mecanizado en el que se colocaron los parámetros variables para cada ranura realizada como se detalla en la [Tabla 8](#) [14]. Se modificaron los valores para cada grupo mecanizado teniendo en cuenta que S corresponde a la velocidad de husillo, F a la velocidad de avance y Z a la profundidad de corte. En cuanto al valor que toma X, este dependía del largo de la pieza que se estaba mecanizando, empezando en 10 mm y sumándole 1mm por cada ranura mecanizada. Se realizó un post procesamiento de cada

una de las ranuras, midiendo la longitud de las grietas, los valores de resistencia a la fractura, el número de ciclos promedio y la rugosidad aparente como se detalla a continuación.

Tabla 8. Programa de mecanizado CNC.

| Línea | Código       |
|-------|--------------|
| N5    | G54;         |
| N10   | M3 S#;       |
| N15   | G0 X10 Y-10; |
| N20   | Z5;          |
| N25   | G1 Z-# F#    |
| N30   | Y60;         |
| N35   | G0 Z5;       |
| N40   | X21 Y-10;    |
| N45   | M5;          |
| N50   | M30;         |

### 1.3. Post procesamiento parámetros iniciales – [Anexo 4. Valores encontrados prueba piloto](#)

#### 1.3.1. Medición de grietas superficiales parámetros iniciales

La medición de las grietas superficiales se realizó mediante una cámara especializada que permite tener el acercamiento necesario sobre la superficie mecanizada y tomar imágenes ([Anexo 5. Imágenes mecanizado prueba piloto](#)) como se muestra en la [Ilustración 2](#), en donde posteriormente se pasaban a una plantilla que facilita dimensionar el tamaño de cada una de las grietas [14].

Ilustración 2. Superficie mecanizada.



Para disminuir el grado de variabilidad de los resultados obtenidos se tomaron diez imágenes por ranura mecanizada, en donde se determinó la longitud de cada una de las grietas visualizadas por imagen, obteniendo el rango **intercuartílico (RIC)** y el promedio de longitud en **centímetros** por grupo mecanizado como se detalla en la [Tabla 9](#) [14].

Tabla 9. Longitud de grietas por grupo mecanizado.

| Grupo | Profundidad (mm) | Longitud (cm) |      |
|-------|------------------|---------------|------|
|       |                  | Promedio      | RIC  |
| A     | 1                | 0,53          | 0,34 |
|       | 1,5              | 0,83          | 0,77 |
|       | 2                | 0,41          | 0,44 |
| B     | 1                | 0,81          | 0,53 |
|       | 1,5              | 0,76          | 0,55 |
|       | 2                | 0,58          | 0,48 |
| C     | 1                | 0,29          | 0,21 |
|       | 1,5              | 0,24          | 0,13 |
|       | 2                | 0,63          | 0,48 |
| D     | 1                | 0,19          | 0,15 |
|       | 1,5              | 0,20          | 0,12 |
|       | 2                | 0,38          | 0,37 |

|          |     |      |      |
|----------|-----|------|------|
| <b>E</b> | 1   | 0,67 | 0,69 |
|          | 1,5 | 0,64 | 0,78 |
|          | 2   | 0,27 | 0,23 |
| <b>F</b> | 1   | 0,56 | 0,49 |
|          | 1,5 | 0,59 | 0,65 |
|          | 2   | 1,63 | 1,22 |

### 1.3.2. Medición valores de resistencia a la fractura parámetros iniciales

Al tener los valores de la longitud en cada uno de los grupos se logró determinar la resistencia a la fractura  $K_{IC}$  con unidades de  $MPa\sqrt{m}$  como se muestra en la Ecuación 2. Se tomó como referencia la ecuación planteada en el libro Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales [15].

Ecuación 2. Resistencia a la fractura. [15].

$$K_{IC} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

En donde:

$$K_{IC} = \text{Factor de intensidad} - \text{Esfuerzos}$$

$$\sigma = \text{Esfuerzo nominal aplicado, hallado en el ensayo de tensión}$$

$$a = \text{Longitud de la fisura superficial}$$

$$Y = \text{Constante geométrica adimensional (1)}$$

Con base en la información suministrada se calcularon los rangos intercuartílicos de resistencia a la fractura  $K_{IC}$  para cada uno de los grupos y sus respectivos promedios como se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10. Resistencia a la fractura por grupo mecanizado.

| Grupo    | Profundidad (mm) | KIC      |      |
|----------|------------------|----------|------|
|          |                  | Promedio | RIC  |
| <b>A</b> | 1                | 8,77     | 2,84 |
|          | 1,5              | 10,93    | 3,50 |
|          | 2                | 7,57     | 2,50 |
| <b>B</b> | 1                | 10,61    | 3,71 |
|          | 1,5              | 10,42    | 3,99 |
|          | 2                | 9,16     | 3,03 |
| <b>C</b> | 1                | 6,42     | 2,13 |
|          | 1,5              | 5,82     | 1,58 |
|          | 2                | 9,16     | 3,72 |
| <b>D</b> | 1                | 5,22     | 1,69 |
|          | 1,5              | 5,35     | 1,56 |
|          | 2                | 7,29     | 3,33 |
| <b>E</b> | 1                | 9,69     | 3,18 |
|          | 1,5              | 9,37     | 5,51 |
|          | 2                | 5,96     | 2,21 |
| <b>F</b> | 1                | 8,79     | 3,52 |
|          | 1,5              | 9,09     | 3,87 |
|          | 2                | 15,26    | 5,15 |

### 1.3.3. Cálculo del número de ciclos promedio parámetros iniciales

El número de ciclos de resistencia a la fatiga se determinó considerando la resistencia a la fractura y la velocidad de crecimientos de las grietas superficiales con el fin de predecir las condiciones de aplicación

de los productos mecanizados con cada grupo. Se tomó como referencia la [Ecuación 3](#) planteada en el libro Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales [15].

*Ecuación 3. Número de ciclos promedio. [15].*

$$N_f = \frac{a_f^{-\left(\frac{m}{2}\right)+1} - a_0^{-\left(\frac{m}{2}\right)+1}}{A\sigma^m \pi^{m/2} Y^m \left[-\left(\frac{m}{2}\right) + 1\right]} \quad m \neq 2$$

En donde:

- $N_f$  = Número de ciclos promedio
- $a_f$  = Longitud en metros de la grieta superficial encontrada
- $a_0$  = Longitud en metros de la grieta superficial encontrada antes de mecanizar
- $m$  = Ley de París. Ley de crecimiento de la grieta
- $A$  = Ley de París. Coeficiente de ley de propagación
- $\sigma$  = Esfuerzo nominal aplicado, hallado en el ensayo de tensión
- $Y$  = Constante geométrica adimensional (1)

La ley de París es la relación existente entre la velocidad de crecimiento de la grieta y la intensidad tensión aplicada, por lo que depende de las características del material. Para este caso se tomaron como referencia los estudios realizados en el acero 1045 en una tesis doctoral de la Universidad del Norte, en Colombia en donde se determinó [16]:

$$m = 3 \qquad A = 6,89E - 09$$

Los resultados obtenidos en cuanto al rango [intercuartílico](#) por grupo mecanizado y promedio del número de ciclos se detallan en la [Tabla 11](#).

*Tabla 11. Número de ciclos por grupo mecanizado.*

| Grupo | Profundidad (mm) | Nf       |         |
|-------|------------------|----------|---------|
|       |                  | Promedio | RIC     |
| A     | 1                | 8743,04  | 683,70  |
|       | 1,5              | 9186,17  | 578,56  |
|       | 2                | 8281,40  | 902,62  |
| B     | 1                | 9086,94  | 660,06  |
|       | 1,5              | 9068,42  | 721,81  |
|       | 2                | 8842,35  | 596,61  |
| C     | 1                | 7830,64  | 1133,28 |
|       | 1,5              | 7557,61  | 972,54  |
|       | 2                | 8661,74  | 1070,52 |
| D     | 1                | 7085,87  | 1253,74 |
|       | 1,5              | 7212,25  | 1266,48 |
|       | 2                | 8173,05  | 936,17  |
| E     | 1                | 8888,98  | 707,94  |
|       | 1,5              | 8688,18  | 1257,40 |
|       | 2                | 7458,86  | 1366,35 |
| F     | 1                | 8638,07  | 1070,67 |
|       | 1,5              | 8746,05  | 938,33  |
|       | 2                | 9698,40  | 364,88  |

#### 1.3.4. Medición de la rugosidad aparente parámetros iniciales

La medición de rugosidad se realizó con el fin de saber la cantidad de irregularidades presentes en la pieza mecanizada superficialmente y poder hallar su relación con la longitud de las grietas superficiales encontradas. Esta medición se ejecutó mediante un rugosímetro Mitutoyo previamente calibrado [14] ([Anexo 6. Imágenes rugosímetro prueba piloto](#)). Se tomaron 10 medidas por ranura mecanizada obteniendo un valor promedio en micras como se evidencia en la [Tabla 12](#).

Tabla 12. Rugosidad aparente promedio por grupo mecanizado.

| Grupo | Profundidad (mm) | Valor (micras) |
|-------|------------------|----------------|
| A     | 1                | 2,10           |
|       | 1,5              | 1,71           |
|       | 2                | 1,76           |
| B     | 1                | 1,89           |
|       | 1,5              | 2,11           |
|       | 2                | 2,12           |
| C     | 1                | 2,35           |
|       | 1,5              | 2,21           |
|       | 2                | 2,61           |
| D     | 1                | 2,41           |
|       | 1,5              | 2,19           |
|       | 2                | 2,06           |
| E     | 1                | 2,46           |
|       | 1,5              | 2,17           |
|       | 2                | 3,08           |
| F     | 1                | 2,39           |
|       | 1,5              | 2,21           |
|       | 2                | 2,37           |

#### 1.4. Selección mejor rango de parámetros

La selección del mejor rango de parámetros se realizó a partir del análisis de los datos presentados en el apartado [1.3 Post procesamiento de parámetros iniciales](#) dándole un mayor peso al promedio de longitud de las grietas superficiales presentadas en cada uno de los grupos mecanizados, buscando estudiar las tres profundidades presentadas, más adelante en el diseño de experimentos. Se seleccionó los grupos C, D y E, debido a que en las profundidades 1,5 mm, 1 mm y 2 mm respectivamente, se presentaron las longitudes de grietas superficiales con menor longitud.

**Segundo objetivo** - Determinar la relación entre los parámetros de entrada y salida ejecutando el proceso de mecanizado.

#### 2. Determinación del número de ensayos a realizar – [Anexo 7. Réplicas diseño de experimentos](#).

Para llevar a cabo el diseño de experimentos factorial con tres factores (velocidad de husillo, velocidad de avance y profundidad de corte), y tres niveles por factor, se determinó el número de réplicas necesarias por cada tratamiento por medio de la distribución F no central. Esta distribución permite encontrar el número de réplicas necesarias para un solo factor considerando el número de niveles que este tenga, como se muestra en la [Ecuación 4](#).

Ecuación 4. Distribución F no central. [17].

$$r = \frac{2v\sigma^2\phi^2}{\Delta^2}$$

En donde:

$r$  = Número de réplicas a realizar

$v$  = Número de tratamientos de cada factor

$\sigma^2$  = Varianza de los datos obtenidos anteriormente

$\phi$  = Tabla Power of the F – test con un  $\alpha = 0,05$  [17]

$\Delta$  = Diferencia significativa según los niveles de cada factor

Para el cálculo del número de réplicas se siguieron los siguientes pasos planteados en el libro [17].

1. Seleccionar la Tabla 13 detallada a continuación, considerando  $v_1 = 3$  tratamientos y  $\alpha = 0,05$ .
2. El denominador de grados de libertad  $v_2$  en la primera iteración será igual a 1000, y para las demás iteraciones  $v_2 = n - v = v(r - 1)$ .
3. De acuerdo con el cambio que se presente en  $v_2$  se escoge un nuevo  $\phi$ .
4. Se debe calcular  $r$  hasta que no varíen significativamente los valores arrojados al reemplazar en la Ecuación 3, redondeando finalmente al entero más cercano.

Tabla 13. Tabla Power of the F test. [16].

| $v_1 = 3, \alpha = 0.05$ |      | $\phi$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $v_2$                    | 1.00 | 1.33   | 1.67 | 2.00 | 2.33 | 2.67 | 3.00 | 3.33 | 3.67 | 4.00 | 4.33 |
| 5                        | 0.19 | 0.31   | 0.46 | 0.61 | 0.75 | 0.86 | 0.93 | 0.97 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| 6                        | 0.21 | 0.35   | 0.51 | 0.67 | 0.81 | 0.90 | 0.96 | 0.98 | 0.99 | 1.00 | 1.00 |
| 7                        | 0.22 | 0.37   | 0.55 | 0.72 | 0.85 | 0.93 | 0.97 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 8                        | 0.24 | 0.40   | 0.58 | 0.75 | 0.87 | 0.95 | 0.98 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 9                        | 0.25 | 0.41   | 0.60 | 0.77 | 0.89 | 0.96 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 10                       | 0.25 | 0.43   | 0.63 | 0.79 | 0.91 | 0.97 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 12                       | 0.27 | 0.45   | 0.66 | 0.82 | 0.93 | 0.98 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 15                       | 0.28 | 0.48   | 0.69 | 0.85 | 0.94 | 0.98 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 20                       | 0.30 | 0.51   | 0.72 | 0.87 | 0.96 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 30                       | 0.32 | 0.54   | 0.75 | 0.90 | 0.97 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 60                       | 0.34 | 0.57   | 0.78 | 0.92 | 0.98 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1000                     | 0.36 | 0.60   | 0.81 | 0.93 | 0.98 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

Para este caso el número de niveles en todos los factores es igual por lo que se tomó la varianza en la longitud de las grietas superficiales de los tres grupos seleccionados con anterioridad (1,5C, 1D y 2E). En la Tabla 14 se detallan los cálculos aplicados hallando que el número de réplicas que se deben ejecutar con el fin de lograr el objetivo.

Tabla 14. Iteración número de ensayos a realizar.

|                         |             |             |             |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Varianza</b>         | 2,87875E-06 | 2,87875E-06 | 2,87875E-06 |
| <b>Tratamientos (v)</b> | 3           | 3           | 3           |
| <b>V2</b>               | 1000        | 21          | 27          |
| <b>Alpha</b>            | 0,05        | 0,05        | 0,05        |
| <b>Phi</b>              | 2           | 2,33        | 2,33        |
| <b>Delta</b>            | 0,003       | 0,003       | 0,003       |
| <b>Réplicas</b>         | 7,68        | 10,42       | 10,42       |

El número de réplicas a realizar según los valores analizados es de 10 por cada tratamiento. Considerando que son 3 tratamientos por factor y 3 factores se tiene un total de 27 tratamientos, es decir, se realizaron 270 pruebas.

### 2.1. Mecanizado de pruebas

Se hicieron 27 grupos correspondientes a los 27 tratamientos planteados anteriormente. Cada grupo nombrado con una letra del abecedario de la A a la Z como se detalla en la Tabla 15. La profundidad

está representada con la letra Z, la velocidad de husillo y velocidad de avance con las letras S y F respectivamente.

Tabla 15. Matriz resumen de grupos mecanizados.

| Grupo | A    | B    | C    | D   | E   | F   | G   | H   | I   |
|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Z=    | 1    | 1    | 1    | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| S=    | 1061 | 1061 | 1061 | 955 | 955 | 955 | 923 | 923 | 923 |
| F=    | 347  | 382  | 392  | 347 | 382 | 392 | 347 | 382 | 392 |
| Grupo | J    | K    | L    | M   | N   | Ñ   | O   | P   | Q   |
| Z=    | 1,5  | 1,5  | 1,5  | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| S=    | 1061 | 1061 | 1061 | 955 | 955 | 955 | 923 | 923 | 923 |
| F=    | 347  | 382  | 392  | 347 | 382 | 392 | 347 | 382 | 392 |
| Grupo | R    | S    | T    | U   | V   | W   | X   | Y   | Z   |
| Z=    | 2    | 2    | 2    | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   |
| S=    | 1061 | 1061 | 1061 | 955 | 955 | 955 | 923 | 923 | 923 |
| F=    | 347  | 382  | 392  | 347 | 382 | 392 | 347 | 382 | 392 |

En el proceso de mecanizado se utilizó el mismo programa CNC descrito anteriormente en el punto 1.2. **Mecanizado de parámetros iniciales** en la Tabla 8.

## 2.2. Post procesamiento pruebas – Anexo 8. Valores encontrados pruebas.

### 2.2.1. Medición de grietas superficiales pruebas

En primera instancia se tomaron 10 imágenes de igual forma como se llevó a cabo en el punto 1.3.1 **Medición de grietas superficiales** por medio de un microscopio. Para este caso debido al gran volumen de imágenes se decidió utilizar el software Matlab – Procesamiento de imágenes ([Anexo 9. Código programa Matlab](#)) con el fin de programar un algoritmo que facilitara la identificación y cálculo de longitudes. Este consiste en la aplicación de filtros de binarización y realce de grises de modo que se logró disminuir el ruido provocado por la luz obteniendo el contorno de las grietas más relevantes de cada imagen como se detalla en el [Gráfico 3](#). Además, dicho algoritmo tiene la posibilidad de invocar una herramienta de uso manual que le permite al usuario obtener longitudes mediante el trazo de líneas rectas sobre el objeto deseado ([Anexo 10. Imágenes mecanizado de pruebas](#)). Resumen de resultados Tabla 16.

Gráfico 3. Diagrama de flujo proceso de lectura de imágenes.

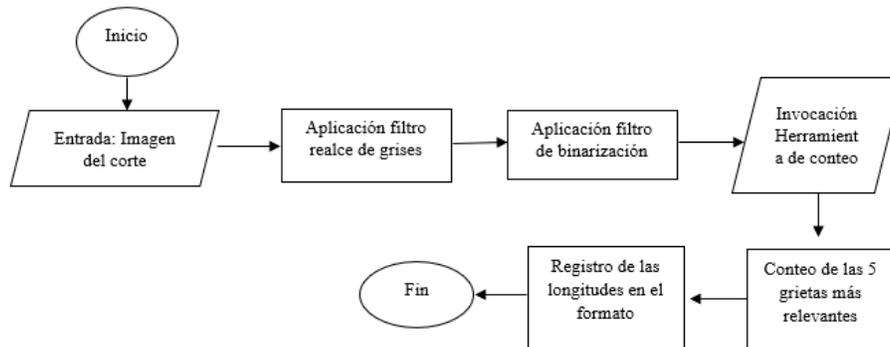


Tabla 16. Longitud de grietas en las pruebas.

| Grupo         |          | A    | B    | C    | D    | E    | F    | G    | H    | I    |
|---------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Longitud (cm) | RIC      | 0,22 | 0,18 | 0,14 | 0,13 | 0,14 | 0,07 | 0,07 | 0,03 | 0,06 |
|               | Promedio | 0,84 | 0,73 | 0,74 | 0,64 | 0,59 | 0,41 | 0,30 | 0,13 | 0,20 |
| Grupo         |          | J    | K    | L    | M    | N    | Ñ    | O    | P    | Q    |
| Longitud (cm) | RIC      | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,14 | 0,15 | 0,08 | 0,04 | 0,05 |
|               | Promedio | 0,91 | 0,84 | 0,79 | 0,73 | 0,67 | 0,58 | 0,33 | 0,15 | 0,23 |
| Grupo         |          | R    | S    | T    | U    | V    | W    | X    | Y    | Z    |
| Longitud (cm) | RIC      | 1,20 | 0,89 | 0,84 | 0,71 | 0,68 | 0,53 | 0,44 | 0,25 | 0,33 |
|               | Promedio | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,19 | 0,21 | 0,11 | 0,10 | 0,05 | 0,09 |

Según los datos obtenidos en la Tabla 16 se puede evidenciar que los grupos en los que presenta una menor longitud de grietas superficiales es en H, I y P. Los valores presentados a continuación en la Tabla 17 y Tabla 18 guardan relación directa con la longitud de las grietas superficiales por lo cual resulta conveniente para el acabado superficial, la resistencia a la fractura y el número de ciclos, mecanizar con bajo los parámetros de estos tres grupos (H, I y P).

### 2.2.2. Medición valores de resistencia a la fractura pruebas

Una vez se obtuvo el promedio de longitud de grietas superficiales por el proceso antes descrito en el punto 1.3.2. Medición de valores de resistencia a la fractura parámetros iniciales se usó la Ecuación 2 obteniendo la información resumida en la Tabla 17.

Tabla 17. Valores de resistencia a la fractura en las pruebas.

| Grupo |          | A     | B     | C     | D     | E     | F    | G    | H    | I    |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| KIC   | RIC      | 1,47  | 1,26  | 1,00  | 1,00  | 1,12  | 0,68 | 0,78 | 0,50 | 0,79 |
|       | Promedio | 11,24 | 10,47 | 10,56 | 9,84  | 9,41  | 7,84 | 6,76 | 4,43 | 5,53 |
| Grupo |          | J     | K     | L     | M     | N     | Ñ    | O    | P    | Q    |
| KIC   | RIC      | 1,22  | 1,21  | 1,19  | 1,22  | 1,05  | 1,22 | 0,86 | 0,64 | 0,64 |
|       | Promedio | 11,72 | 11,23 | 10,87 | 10,48 | 10,02 | 9,29 | 7,05 | 4,72 | 5,92 |
| Grupo |          | R     | S     | T     | U     | V     | W    | X    | Y    | Z    |
| KIC   | RIC      | 1,35  | 1,50  | 1,48  | 1,43  | 1,58  | 0,93 | 0,93 | 0,62 | 0,97 |
|       | Promedio | 13,45 | 11,56 | 11,22 | 10,32 | 10,06 | 8,92 | 8,15 | 6,09 | 6,99 |

### 2.2.3. Cálculo del número de ciclos promedio pruebas

Teniendo como referencia la Ecuación 3 descrita en el punto 1.3.3. Cálculo de ciclos promedio parámetros iniciales, se determinó el rango intercuartílico de los ciclos por grupo mecanizado y sus respectivos promedios como se detalla en la Tabla 18.

Tabla 18. Número de ciclos en las pruebas.

| Grupo |          | A       | B       | C       | D       | E       | F       | G       | H       | I       |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Nf    | RIC      | 222,64  | 223,33  | 173,57  | 198,21  | 244,60  | 214,13  | 328,83  | 478,39  | 507,20  |
|       | Promedio | 1734,83 | 1859,18 | 1839,32 | 1974,85 | 2068,72 | 2476,67 | 2886,30 | 4387,86 | 3534,70 |
| Grupo |          | J       | K       | L       | M       | N       | Ñ       | O       | P       | Q       |
| Nf    | RIC      | 171,52  | 184,81  | 197,04  | 213,51  | 201,72  | 272,89  | 334,26  | 546,38  | 346,89  |
|       | Promedio | 1656,57 | 1728,02 | 1787,89 | 1857,43 | 1938,01 | 2099,71 | 2764,37 | 4124,45 | 3281,25 |
| Grupo |          | R       | S       | T       | U       | V       | W       | X       | Y       | Z       |
| Nf    | RIC      | 144,19  | 215,41  | 226,69  | 258,87  | 301,76  | 222,06  | 271,08  | 325,68  | 385,87  |
|       | Promedio | 1445,59 | 1688,12 | 1739,23 | 1889,97 | 1942,58 | 2177,72 | 2386,81 | 3190,19 | 2799,72 |

#### 2.2.4. Medición de rugosidad aparente pruebas

Para la medición de la rugosidad en cada uno de los grupos establecidos se utilizó nuevamente el rugosímetro Mitutoyo ([Anexo 11. Imágenes rugosímetro pruebas](#)), tomando 10 valores por línea mecanizada, resumiendo los valores promedio en la Tabla 19.

Tabla 19. Rugosidad aparente promedio en las pruebas.

|                        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Grupo</b>           | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> | <b>F</b> | <b>G</b> | <b>H</b> | <b>I</b> |
| <b>Valor en micras</b> | 2,50     | 3,80     | 4,45     | 3,01     | 2,42     | 2,28     | 2,36     | 2,63     | 2,66     |
| <b>Grupo</b>           | <b>J</b> | <b>K</b> | <b>L</b> | <b>M</b> | <b>N</b> | <b>Ñ</b> | <b>O</b> | <b>P</b> | <b>Q</b> |
| <b>Valor en micras</b> | 2,32     | 2,27     | 2,28     | 2,18     | 3,25     | 3,45     | 2,50     | 2,62     | 3,24     |
| <b>Grupo</b>           | <b>R</b> | <b>S</b> | <b>T</b> | <b>U</b> | <b>V</b> | <b>W</b> | <b>X</b> | <b>Y</b> | <b>Z</b> |
| <b>Valor en micras</b> | 2,62     | 1,78     | 1,77     | 2,19     | 2,32     | 2,54     | 3,41     | 2,57     | 2,40     |

Para encontrar un análisis más completo respecto la incidencia de los factores escogidos sobre el acabado superficial se llevó a cabo un diseño de experimentos factorial, en donde se usan la totalidad de los datos registrados a diferencia de los promedios resumidos en la Tabla 16.

### 2.3. Diseño de experimentos

#### 2.3.1. Modelo

Para poder realizar el diseño de experimentos factorial con 3 factores se modeló un programa en R-Studio en donde se leen los datos organizados como se muestra en el [Anexo 12. Lectura de valores R-Studio](#). En el programa elaborado resumido en el [Anexo 13. Diseño de experimentos](#), se leen los datos y se convierten los factores del experimento (profundidad de corte, velocidad de husillo y velocidad de avance) en categorías según sus niveles como se detalla en la Tabla 20. Automáticamente el programa detecta la cantidad de niveles por factor y hace un conteo de cuantas muestras hay por cada categoría mostrándolos en pantalla, adicionalmente se realizó la matriz factorial del diseño de experimentos como se detalla en el [Anexo 14. Matriz factorial](#). En total se tomaron 13500 datos provenientes de las 270 ranuras mecanizadas en donde se capturaron 10 imágenes por ranura y 5 valores por imagen.

Tabla 20. Categorización de los niveles según el factor.

|                             |       |      |
|-----------------------------|-------|------|
| <b>Profundidad de corte</b> | Bajo  | 1    |
|                             | Medio | 1,5  |
|                             | Alto  | 2    |
| <b>Velocidad de husillo</b> | Bajo  | 923  |
|                             | Medio | 955  |
|                             | Alto  | 1061 |
| <b>Velocidad de avance</b>  | Bajo  | 347  |
|                             | Medio | 382  |
|                             | Alto  | 392  |

#### 2.3.2. ANOVA

El modelo evalúa cada una de las hipótesis planteadas como se muestra en la Ilustración 3, en donde con una confianza de 99,9% se rechazan todas las hipótesis del experimento debido a que el P-valor es menor a  $2,2e-16$  para cada una de las interacciones sencillas, dobles y triple, es decir, los tres factores influyen en la variable de respuesta del experimento. El programa realizado en R-Studio muestra en pantalla una aproximación del P-Valor igual para todas las hipótesis debido a que es un número pequeño, sin embargo, no significa que sea el mismo valor en todos los casos. Posteriormente se declara Y como la variable de respuesta correspondiente al daño superficial, es decir, la longitud de las grietas superficiales expresada en centímetros.

Ilustración 3. ANOVA.

```

> anova(lm.Y)
Analysis of Variance Table

Response: Y

```

|  | Df    | Sum Sq | Mean Sq | F value   | Pr(>F)        |
|--|-------|--------|---------|-----------|---------------|
| Profundidad_corte                        | 2     | 44.87  | 22.43   | 1842.130  | < 2.2e-16 *** |
| Vel_Husillo                              | 2     | 829.07 | 414.53  | 34037.954 | < 2.2e-16 *** |
| Vel_Avance                               | 2     | 66.40  | 33.20   | 2726.193  | < 2.2e-16 *** |
| Profundidad_corte:Vel_Husillo            | 4     | 11.41  | 2.85    | 234.240   | < 2.2e-16 *** |
| Profundidad_corte:Vel_Avance             | 4     | 4.68   | 1.17    | 95.969    | < 2.2e-16 *** |
| Vel_Husillo:Vel_Avance                   | 4     | 20.28  | 5.07    | 416.275   | < 2.2e-16 *** |
| Profundidad_corte:Vel_Husillo:Vel_Avance | 8     | 10.04  | 1.26    | 103.066   | < 2.2e-16 *** |
| Residuals                                | 13473 | 164.08 | 0.01    |           |               |

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

### 2.3.3. Regresión lineal

Para realizar el modelo de regresión lineal se utilizó la librería DMwR y la función lm (lineal model). Se planteó la ecuación considerando que, Y es la variable de predicción, en función de todas las variables más las interacciones simples, dobles y triple. Esta ecuación fue construida a partir de variables binarias, es por esta razón que no se presenta el nivel alto en ninguna variable. Como se detalla en la Ecuación 5.

Ecuación 5. Regresión lineal.

$$\begin{aligned}
 Y = & X_1(-0,1223) + X_2(-0,0942) + Y_1(0,5136) + Y_2(0,2031) + Z_1(0,1155) + Z_2(-0,0801) \\
 & + X_1Y_1(0,0226) + X_2Y_1(0,4064) + X_1Y_2(0,0007) + X_2Y_2(0,1408) + X_1Z_1(-0,0150) \\
 & + X_2Z_1(-0,0231) + X_1Z_2(0,0064) + X_2Z_2(-0,0043) + Y_1Z_1(0,2473) + Y_2Z_1(0,0659) \\
 & + Y_1Z_2(0,1310) + Y_2Z_2(0,2275) + X_1Y_1Z_1(-0,2453) + X_2Y_1Z_1(-0,2139) \\
 & + X_1Y_2Z_1(0,0685) + X_2Y_2Z_1(-0,0132) + X_1Y_1Z_2(-0,0660) + X_2Y_1Z_2(0,0167) \\
 & + X_1Y_2Z_2(0,0290) + X_2Y_2Z_2(-0,0493) + 0,3265
 \end{aligned}$$

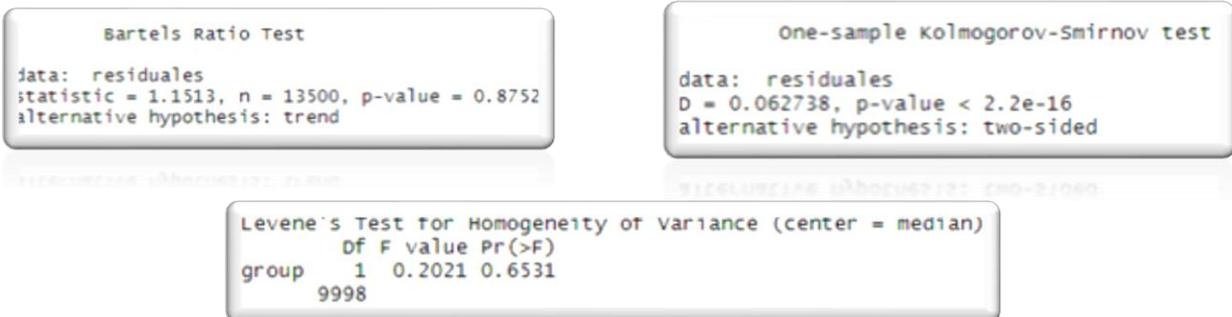
En donde:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \text{Profundidad de corte bajo}, X_2 = \text{Profundidad de corte medio} \\
 Y_1 &= \text{Velocidad de husillo bajo}, Y_2 = \text{Velocidad de husillo medio} \\
 Z_1 &= \text{Velocidad de avance bajo}, Z_2 = \text{Velocidad de avance medio}
 \end{aligned}$$

### 2.3.4. Comprobación de supuestos

Con el fin de comprobar si es una muestra aleatoria de una distribución normal con media cero y varianza constante por medio de los residuales encontrados en el ANOVA se realizaron las pruebas de Bartels Ratio, Kolgomorov Smirnov y Levene respectivamente. De acuerdo a los resultados obtenidos en la Ilustración 4, los supuestos de aleatoriedad de la muestra y varianza constante se cumplen satisfactoriamente, sin embargo, el supuesto de normalidad no se cumple por lo cual se realizó la prueba estadística de Kruskal Wallis.

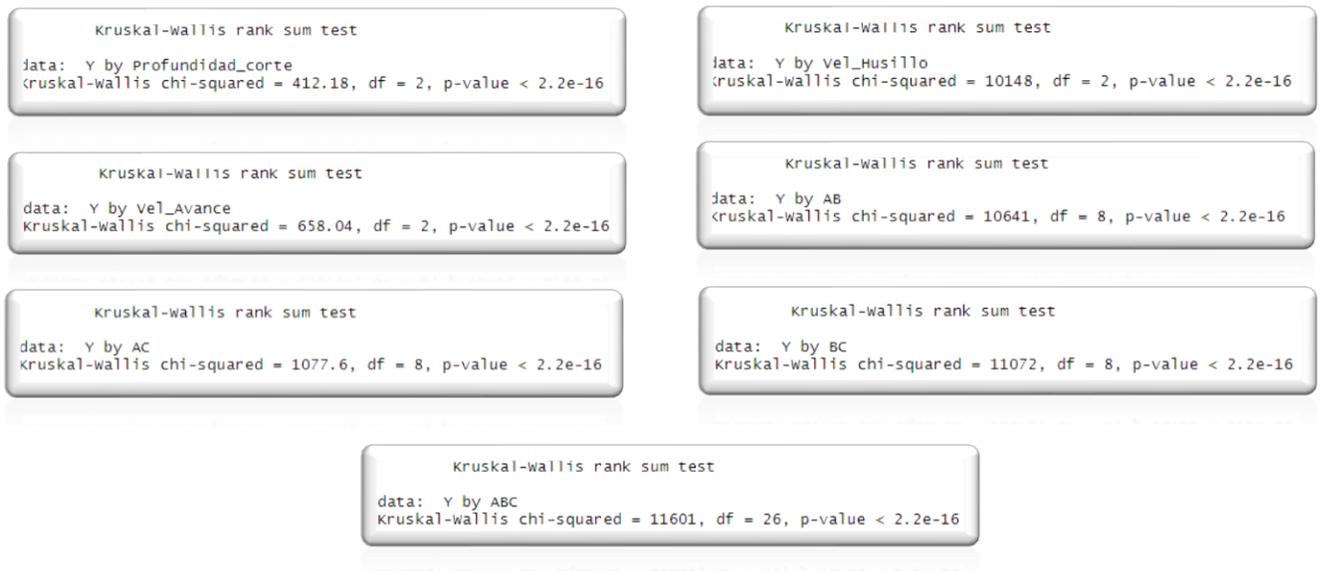
Ilustración 4. Resultados pruebas.



### 2.3.5. Prueba estadística Kruskal Wallis

La prueba estadística de Kruskal Wallis es un método no paramétrico que se usa para probar que un grupo de datos proviene de una misma población [18], debido a que esta prueba no asume normalidad en los datos se usó con el fin de comprobar las hipótesis planteadas en el ANOVA y poder así implementar el modelo de regresión realizado con anterioridad. Esta prueba estadística permite realizar las comprobaciones por medio de un solo factor por lo cual para probar las interacciones dobles y triple se nombró con las letras A, B y C los factores de profundidad de corte, velocidad de husillo y velocidad de avance respectivamente. Se tomó como si fuera un solo factor las combinaciones de AB, AC y BC suponiendo que estas tuvieran 9 niveles y para el caso de la combinación ABC se leyó el factor como si tuviera 27 niveles. Según los resultados obtenidos en la Ilustración 5 todas las hipótesis planteadas se rechazan lo cual indica que los datos vienen de una misma distribución.

Ilustración 5. Resultados Kruskal Wallis.



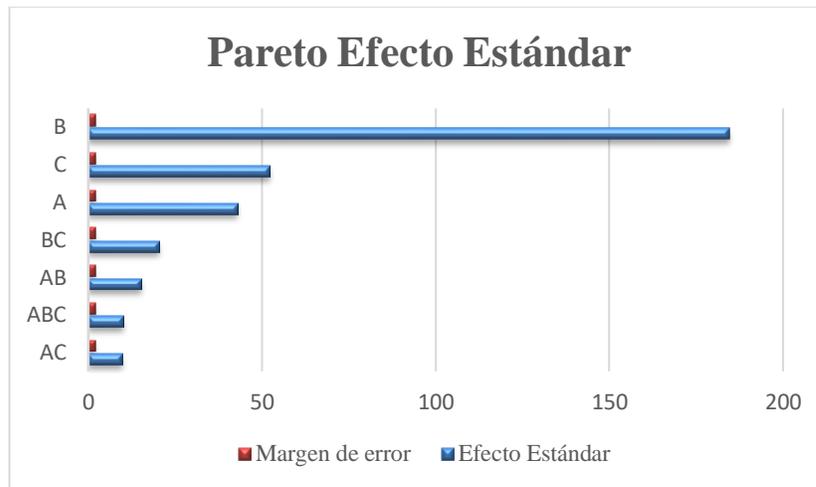
### 2.3.6. Pareto Anexo 15. Pareto efecto estándar

De acuerdo a las convenciones detalladas en la Tabla 21 se graficaron los efectos estándar de cada uno de los factores y sus combinaciones como se detalla en el Gráfico 4, adicionalmente se muestra el margen de error con un valor de 1,96 el cual indica que si algún factor sobrepasa este valor es estadísticamente significativo en el modelo actual [19]. El factor que mayor influencia tiene en la variable de respuesta es la velocidad de husillo con un efecto estándar de 184,50 ocupando aproximadamente el 55% de los efectos obtenidos.

Tabla 21. Convenciones factores

| Nombre  | Convención |
|---|------------|
| Profundidad de corte  | A          |
| Velocidad de husillo  | B          |
| Velocidad de avance   | C          |
| Profundidad de corte, velocidad de husillo                      | AB         |
| Profundidad de corte, velocidad de avance                       | AC         |
| Velocidad de husillo, velocidad de avance                       | BC         |
| Profundidad de corte, velocidad de husillo, velocidad de avance | ABC        |

Gráfico 4. Pareto diseño de experimentos.



### 2.3.7. Interpretación de los factores diagramas Box plot

En el modelo realizado se propusieron gráficas de apoyo con los resultados obtenidos con el fin de observar cómo se comporta el daño superficial en función de cada uno de los factores elegidos en el experimento.

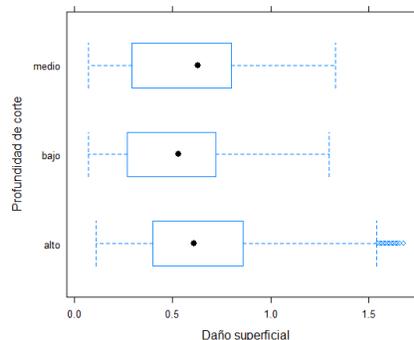
#### Profundidad de corte

Como se detalla en la Ilustración 6 se categorizó la profundidad de corte entre bajo, medio y alto siendo 1, 1.5 y 2 milímetros respectivamente. Como se puede observar en el diagrama se presentan valores atípicos en la profundidad de corte alta.

#### Posibles factores valores atípicos

- Variación de la calidad de los escariadores considerando que se adquirieron de diferentes proveedores.
- Alteración de los valores del eje z en la fresadora CNC en el momento en que se hacía cambio de herramienta por desgaste y error en la toma de las longitudes superficiales registradas entre otros.

Ilustración 6. Diagrama Box Plot Profundidad de corte Vs. Daño superficial.



#### Velocidad de husillo

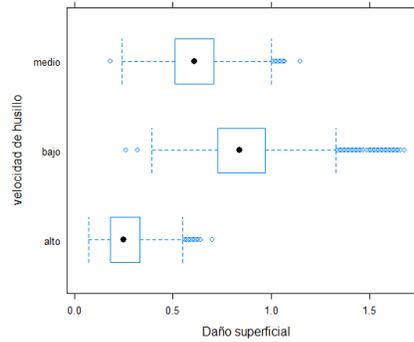
En la Ilustración 7 presentada a continuación, se representaron las velocidades de husillo utilizadas durante el experimento como baja, media y alta siendo 923, 955 y 1061 revoluciones por minuto respectivamente. El diagrama presenta datos atípicos en los tres niveles, sin embargo, en la velocidad de husillo baja hay una mayor cantidad de valores que superan los límites representando un mayor daño superficial en las piezas mecanizadas.

#### Posibles factores valores atípicos

- Resistencia que opone el material al entrar en contacto con la herramienta, generando un desprendimiento del material más lento.
- Desgaste temprano del escariador.

- Vibraciones de la pieza no deseados, afectando la rugosidad.

Ilustración 7. Diagrama Box Plot Velocidad de husillo Vs. Daño superficial.



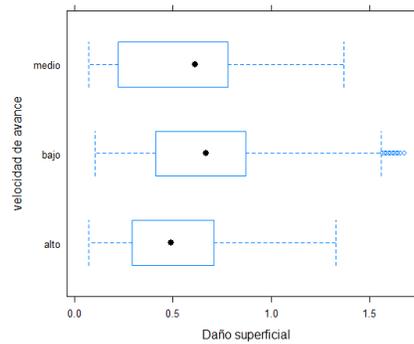
### Velocidad de avance

En la Ilustración 8 se evaluó la incidencia de la velocidad de avance sobre el experimento clasificándose entre bajo, medio y alto siendo 347, 382 y 392 milímetros por minuto respectivamente. En el diagrama se evidencian valores atípicos en la velocidad de avance baja.

#### Posibles factores valores atípicos

- En el proceso de mecanizado la herramienta al recorrer el material a una menor velocidad requiere de un mayor esfuerzo para desbastar el material.
- Error en la toma de longitudes.

Ilustración 8. Diagrama Box Plot Velocidad de avance Vs. Daño superficial.



**Tercer objetivo** - Diseñar un aplicativo bajo los parámetros de entrada que prediga el tamaño de la huella superficial que se generan en el acero 1045 al mecanizar. [Anexo 16. Aplicativo predicción de las grietas superficiales](#) y [Anexo 17. Imágenes aplicativo](#).

### 3.1. Declaración de Diseño:

El diseño principal de este trabajo es crear un aplicativo que prediga el tamaño de la grieta superficial en la pieza, bajo los parámetros de velocidad de corte, velocidad de avance, velocidad de husillo y profundidad de corte. Creando una relación entre el tamaño de la grieta y el ciclo de vida de la pieza.

### 3.2. Proceso de Diseño:

Se definieron los factores de interés de acuerdo a la encontrado en la literatura (velocidad de avance, velocidad de husillo y profundidad de corte) para llevar a cabo el diseño de experimentos factorial con tres factores. Una vez realizadas las réplicas, se realizó un ANOVA y se validaron las hipótesis planteadas mediante la prueba no paramétrica Kruskal Wallis debido a que en la comprobación de los supuestos el modelo no sigue la distribución normal.

Adicionalmente, se obtuvo la ecuación del modelo de regresión con los factores significativos según la comprobación de las hipótesis. Por último, se programó en Visual Basic esta ecuación con el fin de que las

personas interesadas puedan escoger entre una serie de valores categorizados como bajo, medio y alto para cada uno de los factores de interés, la combinación que deseen y obtengan un valor predictivo del daño superficial que se puede generar en la pieza bajo la combinación elegida.

Ilustración 9. Presentación tangible del aplicativo.



### 3.3. Requerimientos de desempeño:

- El aplicativo incluye el modelo de regresión lineal, el cual fue obtenido por medio del análisis del diseño de experimentos planteado y un árbol de regresión con el fin de brindarle al usuario otro modelo de predicción y a su vez comparar los resultados obtenidos en los dos modelos midiendo el error respecto cual modelo ofrece una respuesta más acercada a la realidad.
- Se caracterizaron los valores de cada uno de los factores entre velocidad de avance, velocidad de husillo y profundidad de corte entre bajo, medio y alto con sus respectivas convenciones para facilidades de digitación por parte del usuario.
- El aplicativo permite estimar la resistencia a la fractura y el número de ciclos promedio a partir del tamaño de la huella superficial que se genera en el material a partir de los parámetros introducidos en cada caso.
- Se incluyeron en el diseño imágenes de apoyo que le permiten al usuario tener una perspectiva de cómo se vería superficialmente la pieza antes de llevar a cabo el mecanizado, al introducir los parámetros de entrada en el aplicativo.
- El coeficiente de determinación múltiple  $R^2$  del modelo de regresión es igual a 85,74%, este valor corresponde a una medida descriptiva que evalúa la bondad y ajuste del modelo con los datos. Un  $R^2$  cercano a 1 significa una relación casi perfecta de los datos con el modelo, es decir, entre más se acerque el valor del coeficiente de determinación a 1 mejor podrá describir el modelo [20].

### 3.4. Pruebas de rendimiento:

El aplicativo incluye un árbol de regresión realizado con datos entrenados el cual funciona a partir de decisiones binarias respecto a los requerimientos del usuario, el modelo programado fue construido a partir del error cuadrático medio normalizado (nmse), con una escala de 0 a 1. Cada nodo del árbol contiene el valor de predicción del posible daño superficial bajo una combinación factores considerando que solo se presentan los niveles bajo y medio por su carácter binario. Este árbol de regresión fue elaborado en R-Studio con la librería nombrada K fold cross validation. con el fin de comparar los resultados obtenidos con los valores arrojados en el modelo lineal.

El programa tiene como función sacar un  $K=10$  muestras de datos con tres repeticiones cada una, es decir, la totalidad de los datos hallados se van a repartir de manera aleatoria dentro de 10 conjuntos, en cada uno de los conjuntos creados se encuentra un nuevo error cuadrático medio normalizado (nmse), posteriormente se hace un promedio de los valores encontrados y es este valor el que corresponde al estimador que se compara respecto al valor encontrado mediante el árbol de regresión. Se realizaron solo tres repeticiones de este proceso ya que en los resultados obtenidos no había gran variabilidad de los datos arrojados por el programa.

El error cuadrático medio para el árbol de regresión se realiza de igual forma tres veces para obtener un valor que se acerque más a la realidad el cual corresponde a  $nmse=14,32\%$  y en la validación cruzada  $nmse=14,33\%$  esta pequeña variación muestra que en promedio los dos se desempeñan de igual forma, es decir, aproximadamente en el 85,67% de las veces la regresión se ajusta a los datos.

### **3.5. Restricciones:**

Los resultados del aplicativo serán comparables bajo las siguientes restricciones:

- Se trabajó solamente bajo las condiciones mecánicas del acero 1045.
- El proceso de mecanizado se realizó por medio de la fresadora CNC con escariadores de acero rápido al cobalto.
- El mecanizado fue refrigerado en seco con aire comprimido.

El aplicativo se elaboró bajo las siguientes restricciones:

- La interfaz se elaboró en Excel Useforms, o también nombrado Formularios de VBA.
- Es un aplicativo programado en lenguaje VBA de Excel.

El diseño elaborado en Visual Basic de Excel logra cumplir con todas las restricciones mencionadas anteriormente teniendo en cuenta que en primera instancia se realizó la caracterización del material y en el proceso de mecanizado se verificó en cada una de las ocasiones en que se cambiaban los escariadores por desgaste que estos cumplieran con las especificaciones necesarias, adicionalmente, se conectó una manguera que proporcionaba el aire comprimido el cual se **direccionó con el fin de que se garantizara el enfriamiento de la pieza en el proceso de corte.**

### **3.6. Cumplimiento del estándar:**

Los estándares establecidos fueron:

- ISO 9241-210:2010 Ergonomía de la interacción hombre – sistema. Diseño centrado en el hombre para sistemas interactivos. [21]
- ISO 1302:2002 Calidad superficial. [22]
- ISO 6892-1:2016 Ensayo de tracción en metales a temperatura ambiente. [23]

En el diseño del aplicativo se realizó una interfaz que le permitiera al usuario saber con facilidad su funcionamiento, brindándole la información pertinente respecto a la longitud de las grietas superficiales y variables asociadas como la resistencia a la fractura y el número de ciclos promedio.

Previo a la realización del aplicativo se estudió a profundidad el material y las relaciones encontradas al mecanizar, respecto al acabado superficial y el comportamiento según los parámetros a temperatura ambiente y sin realizar tratamientos térmicos posteriores al mecanizado.

El diseño propuesto logra superar el planteado en proyecto de grado considerando que logra predecir la longitud de las grietas superficiales por medio del modelo de regresión lineal (planteado en el proyecto de grado) y adicionalmente por un árbol de regresión el cual brinda información adicional sobre el posible daño superficial en la pieza al mecanizar.

### **3.7. Manual del usuario – [Anexo 18. Instructivo aplicativo](#)**

Se realizó un instructivo paso a paso con el fin de que el aplicativo elaborado pueda ser manejado con facilidad y lograr un correcto entendimiento entre el usuario y la interfaz elaborada, adicionalmente, en el [Anexo 19. Funcionamiento del aplicativo](#) se muestra en un breve video la funcionalidad del mismo.

**Cuarto objetivo** - Medir la confiabilidad del aplicativo.

#### **4.1. Indicadores de confiabilidad – [Anexo 20. Error - resultados muestra vs aplicativo](#)**

Para determinar la confiabilidad del aplicativo se mecanizó nuevamente cada uno de los grupos mencionados con anterioridad realizando un total de 27 ranuras de prueba ([Anexo 21. Imágenes mecanizado confiabilidad](#)). Después se evaluaron los resultados obtenidos de la muestra frente al modelo lineal y el árbol de regresión programados en el aplicativo para obtener los indicadores de confiabilidad detallados en la [Tabla 22](#) considerando la [Ecuación 6](#). Según los resultados obtenidos el modelo que presenta un menor error y mayor aproximación de los datos a la realidad es el modelo de regresión lineal.

Ecuación 6. Indicadores de confiabilidad. Tomado de [24].

$$MSE = \sum_{i=1}^N \frac{(A_i - B_i)^2}{N}$$

$$NMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(A_i - B_i)^2}{\bar{A} \bar{B}}$$

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_i A_i$$

$$\bar{B} = \frac{1}{N} \sum_i B_i$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|A_i - B_i|}{|A_i|}}{N}$$

$$MAD = \sum_{i=1}^N \frac{|A_i - B_i|}{N}$$

En donde:

$A_i =$  Valor muestra

$B_i =$  Valor estimado

Tabla 22. Indicadores de confiabilidad aplicativo.

| Indicadores de Confiabilidad              |  |                     |                     |
|---|--|---------------------|---------------------|
| Tipo de Error                             | Justificación  | Modelo lineal       | Árbol de regresión  |
| Error cuadrático medio (MSE)              | Permite determinar la diferencia entre el estimador y lo que se estima.  | 0.01cm <sup>2</sup> | 0.01cm <sup>2</sup> |
| Error cuadrático medio normalizado (NMSE) | Es un estimador de las desviaciones en general entre los valores previstos y medidos con base en la distribución normal. | 1%                  | 1.5%.               |
| Error Porcentual absoluto medio (MAPE)    | Mide el tamaño del error absoluto en términos porcentuales.  | 16%                 | 16.68%              |
| Error absoluto medio (MAD)                | Mide la precisión de los resultados técnicos versus lo predicho.   | 0.16 cm             | 0.17cm              |

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### Primer objetivo

En el proceso utilizado para la caracterización del material se logró determinar la dureza de este, siendo 196 HB. Esta dureza le permite al material tener un grado de resistencia y tenacidad media lo cual es conveniente en la creación de herramientas, piezas de máquinas y piezas de armas entre otros, como se establece para el acero 1045 en un rango de 175 a 225 HB [12]. La dureza del material depende del tratamiento que haya tenido previamente en su fabricación, es por esta razón que no se puede determinar cómo constante del material.

Para llevar a cabo la selección del mejor grupo de parámetros se determinó la longitud de las grietas superficiales en cada uno de los mecanizados para posteriormente definir la resistencia a la fractura y el número de ciclos. Se presenta una mayor dispersión de los datos en cuanto a la longitud de las grietas, resistencia a la fractura y número de ciclos en los grupos E y F en una profundidad de corte de 2 milímetros. La rugosidad aparente se encuentra en un rango entre 1,71 y 3,08 micras. Cabe resaltar que la rugosidad no indica si una pieza tiene o no grietas superficiales considerando que los procesos de acabados superficiales le otorgan cierta textura al material generando variación en la rugosidad, sin embargo, la aparición de grietas puede presentarse en cualquier tipo de acabado dependiendo del esfuerzo aplicado sobre la pieza. En la mejor combinación de parámetros fue escogida respecto a la menor longitud de grieta superficial, sin embargo, uno de los tres parámetros escogidos presenta el mayor valor de rugosidad aparente. Este valor pudo ser provocado por vibración de la pieza en el momento en que se realizó el mecanizado o un posible desgaste de la herramienta.

### **Segundo objetivo**

Se realizaron las pruebas correspondientes representadas con las 27 letras del abecedario para efectos prácticos, la combinación que menor daño superficial en el proceso de mecanizado fue el grupo H correspondiente a una profundidad de corte=1 mm, velocidad de husillo=923 rev/min y velocidad de avance=382 mm/min, el tamaño de las grietas superficiales promedio encontrado es de 0,13 centímetros y la rugosidad aparente fue de 2,63 micras. En la realización del experimento se hallaron valores menores de rugosidad respecto a la encontrada en el grupo H, las cuales coinciden con velocidades de husillo y de avance altas.

En la interpretación del diseño de experimentos se analizó cada uno de los factores y su incidencia en la variable de respuesta. El factor que presenta una mayor cantidad de datos atípicos en sus tres niveles es la velocidad de husillo. Cuando se mecaniza con una velocidad de husillo= 1061 rev/min la variabilidad de los datos obtenidos es reducida y el daño superficial promedio es de 2,5 milímetros.

Al evaluar los supuestos del experimento se halló que los valores residuales encontrados en el ANOVA siguen los supuestos de aleatoriedad y homogeneidad de la varianza, sin embargo, no se cumple el supuesto de normalidad por lo cual se realizó la prueba estadística Kruskal Wallis que no asume normalidad en los datos, concluyendo que se rechazan todas las hipótesis planteadas en el ANOVA, es decir, las interacciones sencillas, dobles y triple influyen en el daño superficial de la pieza.

### **Tercer objetivo**

El diseño propuesto se cumplió a cabalidad considerado que se elaboró un aplicativo que les permite a los usuarios tener un mayor acercamiento al simular resultados del acabado superficial en el mecanizado en seco por medio de una fresadora CNC refrigerando con aire comprimido en el acero 1045 sin necesidad de llevar a cabo el proceso de mecanizado.

Se presentan en el aplicativo dos modelos que le permiten al usuario tener una comparación y un mayor acercamiento a la realidad respecto a la huella superficial de la herramienta al mecanizar. Estos modelos fueron sustentados a partir de los valores hallados en el diseño de experimentos factorial. Adicionalmente se muestran imágenes de apoyo que permiten tomar una mejor decisión antes de mecanizar considerando las especificaciones de las funciones que debe cumplir la pieza representadas en la vida útil, por lo cual se muestra en pantalla variables como la resistencia a la fractura y el número de ciclos promedio de cada posible combinación que se puede llegar a escoger.

### **Cuarto objetivo**

Según los indicadores calculados, el modelo que genera resultados con una mayor confiabilidad es el modelo de regresión lineal presentando un menor error en cada uno de los indicadores hallados.

Teniendo en cuenta que el valor arrojado para el error absoluto medio en el árbol de regresión y en el modelo lineal es del 0,17 cm y 0,16 cm respectivamente y analizando la magnitud de las medidas encontradas en la longitud de las grietas superficiales en las ranuras mecanizadas, este valor no representa gran variabilidad en los resultados, adicionalmente, el error cuadrático medio normalizado en el árbol de regresión y en el modelo lineal es 1,5% y 1% respectivamente lo cual representa que los valores arrojados por las pruebas de confiabilidad tienen una diferencia baja con los valores arrojados por los modelos, por lo tanto, los resultados pronosticados por los modelos programados en el aplicativo se aproximan a la realidad proyectada en el experimento realizado.

### **Recomendaciones**

Teniendo en cuenta los factores externos que intervinieron en la realización del experimento en futuros estudios se propone establecer un nivel de operación para cada uno de los factores que minimice la dispersión de los resultados y optimice la media, con el fin de generar un mayor grado de confiabilidad.

Durante el experimento realizado se presentó una gran variabilidad en la rugosidad aparente en las ranuras realizadas en cada uno de los grupos por lo cual se considera importante que se estudie la vibración que genera la herramienta al entrar en contacto con la pieza en el momento en que se está llevando a cabo el mecanizado, con el fin de establecer la relación de esta variable con la calidad superficial.

## 6. Glosario

- **Mecanizado en seco:** Es una operación que utiliza el mínimo refrigerante en un proceso de corte.
- **Ensayos:** Son aquellas simulaciones que se llevan a cabo en un laboratorio con máquinas calibradas con el fin de someter materiales a esfuerzo para hallar sus propiedades.
- **Fatiga en materiales:** Se produce en materiales que se someten a esfuerzos cíclicos o repetitivos, provoca una ruptura temprana del material. [25, p. 17]
- **Fisura:** Ocurre cuando el daño superficial de la pieza se propaga mediante grietas, ocurre la ruptura del material en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. [25, p. 3]
- **Resistencia:** Depende las características internas del material, que le otorgan cierta dureza. Un material es más resistente cuando se le aplica una fuerza externa y logra deformarse en mínimas cantidades.
- **Proceso:** Es el conjunto de pasos que se deben seguir para llegar a un resultado que se espera.
- **Fatiga:** Es una forma de rotura que sucede en estructuras o materiales que son sometidos a tensiones o deformaciones variables. Este, a su vez puede formar grietas importantes que pueden ocasionar fractura en el material.
- **Viruta:** Es el fragmento del material sobrante que se genera como consecuencia del desbaste del material al entrar en contacto con una herramienta de corte, entre las que se encuentran las brocas, las cuchillas de torno y escariadores entre otras. Según el tipo de mecanizado este puede cambiar su apariencia.
- **Cizalladura:** Es la resistencia que opone una pieza cuando es aplicada una fuerza paralela de corte sobre una de sus superficies.
- **EDM (Electrical Discharge Machining):** El mecanizado por descarga eléctrica es un proceso controlado de eliminación o corte de material. Este usa como herramienta de corte un electrodo. [8]
- **MQL (Minimum quantity lubricant):** La mínima cantidad de lubricante se refiere a una alternativa de corte convencional cuyo objetivo es reducir el consumo de fluidos de corte o refrigerante sin generar grandes residuos. [8]
- **MRR (Metal removal rate):** Es la cantidad o tasa de material desalojado o removido.
- **SR (surface roughness):** Corresponde al conjunto de irregularidades que se presentan en una superficie. [8]
- **TWR (Tool wear rate):** Es la tasa de desgaste de la herramienta, es proporcional a la de deformación y/o pérdida progresiva de la superficie de corte de una herramienta. [8]
- **Ciclo:** Conjunto de operaciones que se repiten ordenadamente. Describe el tiempo de durabilidad que presenta la pieza, bajo ciertas condiciones.

## 7. Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla 23. Tabla de anexos.

| No. Anexo | Nombre                                | Desarrollo | Tipo de Archivo | Enlace Corto ( <a href="http://bit.ly/...">http://bit.ly/...</a> ) | Relevancia para el documento (1-5) |
|-----------|---------------------------------------|------------|-----------------|--|------------------------------------|
| 1         | Ensayos de tensión y compresión       | Propio     | Excel           | <a href="http://bit.ly/2S50vKm">http://bit.ly/2S50vKm</a>          | 3                                  |
| 2         | Imágenes máquina universal de ensayos | Propio     | PNG             | <a href="http://bit.ly/2UoyoIX">http://bit.ly/2UoyoIX</a>          | 2                                  |
| 3         | Parámetros de entrada prueba piloto   | Propio     | Excel           | <a href="https://bit.ly/38ZRetB">https://bit.ly/38ZRetB</a>        | 3                                  |
| 4         | Valores encontrados prueba piloto     | Propio     | Excel           | <a href="https://bit.ly/38URQRI">https://bit.ly/38URQRI</a>        | 4                                  |
| 5         | Imágenes mecanizado prueba piloto     | Propio     | JPG             | <a href="https://bit.ly/3aZOK8Q">https://bit.ly/3aZOK8Q</a>        | 4                                  |

|    |   |        |           |   |   |
|----|---|--------|-----------|---|---|
| 6  | Imágenes rugosímetro prueba piloto      | Propio | JPG       | <a href="http://bit.ly/2u6ILWT">http://bit.ly/2u6ILWT</a> | 3 |
| 7  | Réplicas diseño de experimentos         | Propio | Excel     | <a href="http://bit.ly/38PHPFO">http://bit.ly/38PHPFO</a> | 4 |
| 8  | Valores encontrados pruebas             | Propio | Excel     | <a href="http://bit.ly/38Y3NFM">http://bit.ly/38Y3NFM</a> | 5 |
| 9  | Código programa Matlab                  | Propio | PDF       | <a href="http://bit.ly/36KvO2r">http://bit.ly/36KvO2r</a> | 3 |
| 10 | Imágenes mecanizado pruebas             | Propio | JPG / PNG | <a href="http://bit.ly/2Ofy0Ze">http://bit.ly/2Ofy0Ze</a> | 4 |
| 11 | Imágenes rugosímetro pruebas            | Propio | JPG       | <a href="http://bit.ly/38X4krO">http://bit.ly/38X4krO</a> | 3 |
| 12 | Lectura de valores R-Studio             | Propio | Excel     | <a href="http://bit.ly/38WRZ70">http://bit.ly/38WRZ70</a> | 3 |
| 13 | Diseño de experimentos                  | Propio | R-Studio  |   | 5 |
| 14 | Matriz Factorial                        | Propio | Excel     | <a href="http://bit.ly/3b70m1u">http://bit.ly/3b70m1u</a> | 3 |
| 15 | Pareto efecto estándar                  | Propio | Excel     | <a href="http://bit.ly/37YZhqJ">http://bit.ly/37YZhqJ</a> | 4 |
| 16 | Predicción                              | Propio | Excel     | <a href="http://bit.ly/2UdMoVN">http://bit.ly/2UdMoVN</a> | 5 |
| 17 | Imágenes Aplicativo                     | Propio | JPG       |   | 4 |
| 18 | Instructivo aplicativo                  | Propio | PDF       | <a href="http://bit.ly/2S8gUgW">http://bit.ly/2S8gUgW</a> | 3 |
| 19 | Funcionamiento del aplicativo           | Propio | MP4       | <a href="http://bit.ly/31iBCyT">http://bit.ly/31iBCyT</a> | 3 |
| 20 | Error -Resultados muestra vs aplicativo | Propio | Excel     | <a href="http://bit.ly/38X4H5G">http://bit.ly/38X4H5G</a> | 4 |
| 21 | Imágenes mecanizado confiabilidad       | Propio | JPG / PNG | <a href="http://bit.ly/37JLtjz">http://bit.ly/37JLtjz</a> | 4 |

## Referencias

- [1] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [2] L. M. S. Orozco, «Recomendaciones para usuarios finales de refrigerantes halogenados,» Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible , Bogotá D.C., Colombia, 2015.
- [3] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, DECRETO NUMERO 4741, Bogotá, 2005.
- [4] K. V. .. A. Thakura, «A Comparative Study on Machinability Characteristics In Dry Machining Of Nimonic 263 Alloy Using Coated Carbide Inserts,» VIT University, India, 2017.
- [5] Z. Liao, «A novel cutting tool design to avoid surface damage in the machining of bones,» Nottingham University, Reino Unido, 2017.
- [6] B. C. R. L. SANDRA LILIANA GARCÍA RODRÍGUEZ, «Estudio de la eficiencia de herramientas recubiertas con Nitruro de Titanio con respecto a la vida útil de la herramienta y acabado superficial,» PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, Bogotá D.C, 2015.

- [7] A. C. A. S. E. H. M. Khadija Kimakh, «Experimental investigation of surface roughness effect on fatigue performance of AISI 1045 carbon steel and fatigue limit prediction,» Hassan II University, National Superior School of Electricity and Mechanics Casablanca (ENSEM), LCCMMS, Morocco, Marruecos, 2019.
- [8] A. G. & H. B. Mohammad Reza Shabgard, «A review on recent developments in machining methods based on electrical discharge phenomena,» Springer, Londres, 2015.
- [9] Y. L. H. D. K. Z. L. L. X. Z. X. W. C. Z. & R. J. Yang Shen, «Surface integrity of Inconel 718 in high-speed electrical discharge machining milling using air dielectric,» Springer-Verlag, Londres, 2016.
- [10] P. S. Gyanendra Singh Goindi, «Dry machining: A step towards sustainable machining e Challenges and future directions,» Indian Institute of Technology Ropar, India, 2017.
- [11] M. M. y. A. A., Ensayos de Tensión, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2017.
- [12] ICONTEC, «SAE 1045,» Compañía general de aceros S.A., Colombia, 2019.
- [13] M. R. M. T. A. A. C. Daniel Martin Manrique, «Ensayos y Propiedades de los Materiales,» Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2017.
- [14] A. H. S. R. J. P. Martha Manrique, «Determinación de los parámetros de corte en función de la fatiga en el acero 1045,» XVI CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA, Cartagena, Colombia, 2019.
- [15] W. F. S. J. H. Trout, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, México D. F.: McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V., 2006.
- [16] R. J. P. Chica, «MODELOS BASADOS EN MECÁNICA DE LA FRACTURA, PARA ESTIMAR LA EFECTIVIDAD DE DOS MÉTODOS RÁPIDOS PARA EL CONTROL O RETARDO DE LA PROPAGACIÓN DE FISURAS EN ACEROS AISI 1045,» Fundación Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2015.
- [17] D. V. D. D. Angela Dean, Desing and analysis of experiments, Suiza: Springer, Cham , 2010.
- [18] G. W. F. D. I. Corder, «Non-parametrics statistics for Non-statisticians,» John Wiley & Sons , Hoboken , 2009.
- [19] R. d. I. V. S. Humberto Gutiérrez Pulido, Análisis y Diseño de Experimentos, México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A., 2008.
- [20] R. A. R. D. P. C. Luke J. Saunders, «The Coefficient of Determination: What Determines a Useful R2 Statistic,» *Investigative Ophthalmology & Visual Sciencie*, vol. 53, n° 6830-6832, p. 3, 2012.
- [21] I. O. f. Standardization, «Ergonomía de la interacción hombre - sistema.,» ISO, Ginebra, Suiza, 2016.
- [22] I. O. f. Standardization, «Calidad Superficial ISO 1302,» ISO, Ginebra, Suiza, 2002.

- [23] I. O. f. Standardization, «Ensayo de tracción en metales a temperatura ambiente,» ISO, Ginebra, Suiza , 2016.
- [24] L. Torgo, Data Mining with R Learning with Case Studies, Boca Ratón, London, New York: CRC Press, 2011.
- [25] J. H. William F. Smith, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, Mexico D. F.: The McGraw-Hill Companies, 2004.