# CARACTERÍSTICAS DEL MECANIZADO DEL POLIÉSTER INSATURADO CARGADO CON PARTÍCULAS DE CARBÓN VEGETAL, YESO O TALCO INDUSTRIAL

SANTIAGO CARDONA ARANGO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2013

.

# CARACTERÍSTICAS DEL MECANIZADO DEL POLIÉSTER INSATURADO CARGADO CON PARTÍCULAS DE CARBÓN VEGETAL, YESO O TALCO INDUSTRIAL

SANTIAGO CARDONA ARANGO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

SANTIAGO BETANCOURT PARRA

Ph.D. I.M.

Asesor
CAMILO ANDRÉS PARAMO VELÁSQUEZ.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2013

.

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____
Firma

Presidente del jurado

_____
Firma

Presidente del jurado

_____
Firma

Presidente del jurado

Medellín, Noviembre de 2013

.

**CONTENIDO**

**RESUMEN** ..... **1**

**INTRODUCCIÓN** ..... **3**

**1. MARCO TEÓRICO** ..... **5**

**1.1. POLIÉSTER INSATURADO** ..... **5**

**1.2. POLIÉSTER INSATURADO CARGADO** ..... **8**
1.2.1. CARGAS NO REFORZANTES ..... 9
1.2.2. CARGAS REFORZANTES ..... 10

**1.3. MECANIZADO** ..... **11**
1.3.1. MÉTODOS ABRASIVOS ..... 11
1.3.2. ARRANQUE DE VIRUTA ..... 11

**1.4. MECANIZADO DE PROTOTIPOS** ..... **16**

**1.5. DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE** ..... **20**

**2. MATERIALES Y MÉTODOS** ..... **23**

**2.1. MATERIALES Y PROCESAMIENTO** ..... **23**
2.1.1. RESINA MATRIZ ..... 23
2.1.2. CARGAS ..... 24
2.1.3. EQUIPOS PARA ADECUACIÓN DE CARGAS ..... 27
2.1.4. SÍNTESIS DE MATERIALES COMPUESTOS ..... 29
2.1.5. CARACTERIZACIÓN DE DUREZA DE LAS PROBETAS. ..... 32

**2.2. EVALUACIÓN DE LA POTENCIA DE MECANIZADO.** ..... **35**

**2.3. ANÁLISIS DEL DESGASTE SUPERFICIAL DE LA HERRAMIENTA.** ..... **36**
2.3.1. ESTÉREO MICROSCOPIO ÓPTICO ..... 36
2.3.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) ..... 38

**2.4. MECANIZADO DE LAS PROBETAS.** ..... **40**

**3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.** ..... **43**

**3.1. GRANULOMETRÍA DE LAS CARGAS** ..... **43**

**3.2. DUREZA DE LAS PROBETAS** ..... **45**

.

**3.3. CURVAS DE POTENCIA EN EL MECANIZADO ..... 46**

**3.4. ANÁLISIS DEL DESGASTE EN LA HERRAMIENTA DE CORTE. ..... 56**

**4. CONCLUSIONES ..... 67**

**REFERENCIAS ..... 70**

**ANEXOS ..... 73**

.

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DEL POLIÉSTER INSATURADO ..... 6

TABLA 2. SISTEMAS DE CURADO ..... 7

TABLA 3. PROPIEDADES POLIÉSTER INSATURADO ..... 8

TABLA 4 CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS ..... 10

TABLA 5. VARIABLES Y DESCRIPCIÓN ..... 13

TABLA 6. COMANDOS G. ..... 19

TABLA 7. FALLAS EN LAS HERRAMIENTAS DE CORTE Y SUS CAUSAS ..... 21

TABLA 8. ESPECIFICACIONES DEL CRISTALAN 823 ..... 23

TABLA 9. TIEMPOS DE GEL DEL CRISTALÁN 823 CON 1.5% DE MEK PERÓXIDO (9% OXIGENO ACTIVO) Y OCTOATO DE COBALTO (6% CO). ..... 24

TABLA 10. ESPECIFICACIONES DEL YESO MARAVILLA PARA ESTUCO (CORONA) ..... 25

TABLA 11. ESPECIFICACIONES DEL TALCO INDUSTRIAL 325 ..... 25

TABLA 12. ESPECIFICACIONES DEL CARBÓN VEGETAL CEITAP ..... 26

TABLA 13. PROBETAS FABRICADAS ..... 29

TABLA 14. ESPECIFICACIONES DURÓMETRO BARCOL ..... 33

TABLA 15. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DURÓMETRO DIGITAL. ..... 35

TABLA 16. CONDICIONES DE MECANIZADO ESTUDIADAS ..... 41

TABLA 17. DUREZA ROCKWELL R PROBETAS ..... 46

TABLA 18. POTENCIA PROMEDIO DE LOS MAQUINADOS REALIZADOS ..... 54

TABLA 19. RELACIÓN CONDICIÓN DE CORTE CON POTENCIA DE MECANIZADO. 55

.

## LISTA DE IMÁGENES

IMAGEN 1. GRIETA EN UNA MATRIZ DE POLIÉSTER REFORZADA CON 2% DE ALÚMINA. ..... 9

IMAGEN 2. PIEZAS MECANIZADAS CON UN NC EN EL FATLAP DE LA U.P.B. ..... 17

IMAGEN 3. PIEZA DE POLIÉSTER INSATURADO MAQUINADA EN EL FABLAB DE LA ..... 18

IMAGEN 4. TRITURADORA DE MANDÍBULAS BRAUN CHIPMUNK JAW CRUSHER . 27

IMAGEN 5. MOLINO DE RODILLOS BRAUN PULVERIZER ..... 28

IMAGEN 6. RO-TAP RX-812 ..... 29

IMAGEN 7. MOLDE. ..... 31

IMAGEN 8. PROBETAS FABRICADAS CON 15% Y 30% DE LA CARGA ..... 32

IMAGEN 9. DURÓMETRO ANÁLOGO BARCOL ..... 33

IMAGEN 10. PROBETAS GENERADAS PARA EL ENSAYO DE DUREZA. ..... 34

IMAGEN 11. DURÓMETRO DIGITAL WILSON WOLPERT 930 ..... 34

IMAGEN 12. PINZA AMPERIMÉTRICA ..... 36

IMAGEN 13. MICROSCOPIO ESTERO ÓPTICO XTL – 2800 ..... 37

IMAGEN 14 INFLADOR MANUAL ..... 37

IMAGEN 15. SOPORTE DE FRESAS PARA MICROSCOPIO ÓPTICO. ..... 38

IMAGEN 16. SEM J SM-5910 LV ..... 39

IMAGEN 17. DENTON VACUUN DESK II ..... 39

IMAGEN 18. MAQUINA MAX NC 15 A LA IZQUIERDA Y FRESA DE 4 FILOS HSS DE ¼” A LA DERECHA ..... 40

IMAGEN 19. FRESA 1 CONDICIÓN DE CORTE 400 µM/S, 6000 RPM, 1.5 MM ..... 57

IMAGEN 20. FRESA 2 CONDICIÓN DE CORTE 400 µM/S, 8000 RPM, 1.5 MM ..... 57

.

IMAGEN 21. FRESA 3 CONDICIÓN DE CORTE 800 µM/S, 6000 RPM, 1.5 MM ..... 58
IMAGEN 22. FRESA 4 CONDICIÓN DE CORTE 800 µM/S, 8000 RPM, 1.5 MM ..... 58
IMAGEN 23. FRESA 5 CONDICIÓN DE CORTE 400 µM/S, 6000 RPM, 3 MM. ..... 59
IMAGEN 24. FRESA 6 CONDICIÓN DE CORTE 400 µM/S, 8000 RPM, 3 MM. ..... 59
IMAGEN 25. FRESA 7 CONDICIÓN DE CORTE 800 µM/S, 6000 RPM, 3 MM. ..... 60
IMAGEN 26. FRESA 8 CONDICIÓN DE CORTE 800 µM/S, 8000 RPM, 3 MM. ..... 60
IMAGEN 27. FOTOGRAFÍA DEL FILO 1 DE LA FRESA 3 EN SU CONDICIÓN INICIAL ..... 61
IMAGEN 28. FOTOGRAFÍA DEL FILO 1 DE LA FRESA 3 EN EL ÚLTIMO MECANIZADO REALIZADO A LA PROBETA CARGADA CON TALCO AL 15%..... 62
IMAGEN 29. MICROGRAFÍA SEM PARA LA FRESA 3 A 50 AUMENTOS..... 63
IMAGEN 30. MICROGRAFÍA SEM PARA LA FRESA 3 A 23 AUMENTOS..... 64
IMAGEN 31. MICROGRAFÍA SEM PARA LA FRESA 8 A 950 AUMENTOS..... 65

.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESO DE SECADO ..... 7
FIGURA 2. ESQUEMA DE UNA FRESADORA CON SUS PARTES PRINCIPALES ..... 12
FIGURA 3. FUERZA DE CORTE ESPECIFICA DONDE: P ACERO, M ACERO INOXIDABLE, K FUNDICIÓN, N MATERIALES NO FÉRREOS, S HRSA Y TITANIO, H ACERO TEMPLADO ..... 15
FIGURA 4. ADAPTACIÓN DE LA GRÁFICA DE INTERNATIONAL ..... 16
FIGURA 5 MATERIAL DE LA HERRAMIENTA DE CORTE SEGÚN LA TEMPERATURA DE MAQUINADO ..... 22
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO CON EL PROCEDIMIENTO PARA FABRICAR LAS PROBETAS ..... 30
FIGURA 7 PERSPECTIVA DE LA PIEZA MECANIZADA EN RHINOCEROS 4.0 ..... 42
FIGURA 8. PORCENTAJE MÁSICO DE CARBÓN RETENIDO EN MALLA. ..... 44
FIGURA 9. PORCENTAJE MÁSICO DE YESO RETENIDO EN MALLA. ..... 44
FIGURA 10. PORCENTAJE MÁSICO DE TALCO RETENIDO EN MALLA. ..... 45
FIGURA 11. MECANIZADO CON 1.5 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 400 µM/S Y VELOCIDAD DE LA FRESA DE 6000 RPM ..... 47
FIGURA 12. MECANIZADO CON 1.5 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 400 µM/S Y VELOCIDAD DE LA FRESA DE 8000 RPM ..... 48
FIGURA 13. MECANIZADO CON 1.5 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 800 µM/S Y VELOCIDAD DE LA FRESA DE 6000 RPM ..... 48
FIGURA 14. MECANIZADO CON 1.5 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 800 µM/S Y VELOCIDAD DE LA FRESA DE 8000 RPM ..... 49

.

FIGURA 15. MECANIZADO CON 3 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 400 µM/S Y VELOCIDAD DE LA HERRAMIENTA DE 6000 RPM ..... 50
FIGURA 16. MECANIZADO CON 3 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 400 µM/S Y VELOCIDAD DE LA FRESA DE 8000 RPM ..... 51
FIGURA 17. MECANIZADO CON 3 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 800 µM/S Y VELOCIDAD DE LA HERRAMIENTA DE 6000 RPM ..... 52
FIGURA 18. MECANIZADO CON 3 MM DE PROFUNDIDAD, VELOCIDAD DE AVANCE DE 800 µM/S Y VELOCIDAD DEL HUSILLO DE 8000 RPM ..... 53
FIGURA 19. ESQUEMA DE ARRANQUE DE VIRUTA..... 66

.

## RESUMEN

Polímeros cargados es el nombre otorgado a aquellos materiales compuestos que emplean reforzantes y en los cuales, se busca mejorar prestaciones en detrimento de las propiedades mecánicas. Este tipo de compuestos, son utilizados principalmente con el fin de reducir costos de producción, sin embargo, son materiales que al ser sometidos a procesos de mecanizado, presentan características diferentes a las del polímero sin cargar, generando, cambios en las condiciones de trabajo para la maquina y la herramienta de corte, los cuales pueden evidenciar variaciones en el consumo de potencia eléctrica y en desgate, respectivamente.

Para tal efecto, el presente trabajo busca identificar las características del mecanizado de un polímero cargado. En tal sentido, se ha elegido como polímero de estudio al poliéster insaturado debido a que es una resina con buena capacidad para ser mezclada con cargas de diferentes orígenes (minerales, orgánicas e inorgánicas), alta disponibilidad en el medio local y su elevado uso a nivel industrial.

Este polímero se busca cargar con carbón vegetal, yeso y talco industrial. En tres diferentes concentraciones de carga, 15%, 30% y 45% del peso de la resina.

También, se estudiaran parámetros de corte como velocidad de avance, revoluciones de la herramienta (RPM) y profundidad de mecanizado. Como variables para la determinación de las características se monitorearan los cambios en la potencia eléctrica consumida por el motor que mueve la herramienta de corte y modificaciones superficiales de esta como consecuencia del desgaste de la herramienta de corte.

Se busca mejorar el mecanizado de las probetas, en función de la carga, la concentración de esta y los parámetros de corte. Obteniendo cambios en la potencia

consumida por el motor que mueve la herramienta de corte y cambios en el desgaste de la herramienta de corte (Fresa), traduciendo esto una perdida en el filo.

# INTRODUCCIÓN

El uso de cargas para disminuir los costos de fabricación de una pieza, tienden a ser más comunes, pero esto plantea una pregunta sobre como es el mecanizado.

El mecanizado de materiales compuestos, presenta dificultades a la hora elegir la herramienta de corte, ya que si se tienen diversos materiales en una matriz, no se puede asegurar el comportamiento adecuado de la herramienta en el material, presentando diferentes consumos de energía y desgaste acelerado en la herramienta.

El uso de cargas se denota principalmente para disminuir los costos de fabricación del material, pero si no se tiene en consideración los costos de mecanizado, no se pueden ver reflejados en mayor medida los gastos de la pieza terminada. De esta forma surge una inquietud que da pie al desarrollo de este trabajo de grado.

A continuación se presentan los objetivos propuestos para el desarrollo del mismo,

Objetivo general:

Caracterizar el mecanizado del poliéster insaturado con cargas de carbón vegetal, yeso y talco industrial, en una máquina computarizada de mecanizado sin retroalimentación de datos (NC).

Objetivos específicos:

- Comprender las propiedades y las características involucradas en el mecanizado del poliéster insaturado cargado.

- Fabricar muestras de poliéster insaturado cargado con carbón vegetal, talco industrial y yeso bajo diferentes composiciones.
- Evaluar el efecto del tipo de carga y la concentración de las muestras fabricadas en el mecanizado bajo diferentes parámetros de corte.
- Identificar el mecanismo de desgaste que se presenta en las herramientas de corte y las variaciones por efecto de: el tipo de carga y la concentración de las muestras y las condiciones de mecanizado.

Este trabajo se desarrolla en cuatro capítulos en los cuales se expresa el contenido y desarrollo de los objetivos planteados, a continuación se muestra una descripción de cada uno:

CAPITULO 1. Marco Teórico: Se da al lector una breve introducción sobre los temas más relevantes para la comprensión del trabajo de grado.

CAPITULO 2. Materiales y métodos: Para este capítulo se presentan los materiales utilizados para la fabricación de las probetas, esto incluye la descripción las carga usada y los equipos necesarios para llevar a cabo el desarrollo del trabajo, adicional a esto se explica cómo es la metodología empleada para la fabricación de las probetas y obtener los datos de los ensayos realizados.

CAPITULO 3. Resultados y análisis: Usando una metodología P.D.A. (Presentar, describir y analizar) Se toma cada uno de los ensayos efectuados para extraer información necesaria para el desarrollo de los objetivos planteados.

CAPITULO 4. Conclusiones: Posterior al proceso de análisis se recopilan los datos obtenidos durante todos los ensayos para dar conclusiones sobre el trabajo realizado.

# CAPITULO 1.

# 1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo muestra al lector los aspectos teóricos fundamentales en los cuales está enfocado el trabajo, presentando generalidades en torno a 5 ejes temáticos para la realización del proyecto.

## 1.1. POLIÉSTER INSATURADO

El poliéster insaturado pertenece a una categoría de polímeros que contiene el grupo funcional éster en su cadena principal. El poliéster insaturado (UP) también es llamado resina de poliéster para no ser confundido con el poliéster saturado o PET; está es una resina termoestable que se obtiene de la policondensación de ácidos dicarboxílicos insaturados con glicoles que por lo general son propilén glicol y butilén glicol los cuales dependiendo de la combinación de sus elementos se obtienen diferentes tipos de (UP).

El poliéster insaturado posee varias clasificaciones entre las cuales están: Ortoftálica, isoftálicas, teraftálicas y bisfenolicas (Correa J. C., 2005, pág. 29), estas dependen del tipo de ácido dicarboxilico y el glicol usado. En la tabla 1 se especifican las propiedades y los usos del UP.

Para la solidificación, la resina de poliéster insaturado requiere de dos componentes para comenzar su proceso de curado, catalizador y acelerador. Estos inician la reacción de reticulación dentro del sistema. Este proceso se puede hacer usando diferentes tipos de acelerantes y catalizadores, por lo general se emplea una mezcla de acelerante y catalizador en proporciones estequiométricas que permiten el curado a temperatura ambiente, los más empleados son: MEK (Metil etil cetona) la cual favorece la reticulación del material, y el octoato de cobalto que actúa como acelerador del proceso. La mezcla de

MEK y octoato de cobalto se conoce como el sistema “universal” por su capacidad de curado sin requerimiento de calor externo (horno), ni el uso de presión para llevar a cabo la reticulación en el sistema.

**Tabla 1. Clasificación del poliéster insaturado**

| POLIÉSTER INSATURADO | | |
|---|---|---|
| **CLASIFICACIÓN** | **CARACTERÍSTICAS** | **USO** |
| Ortoftálicas | Uso general | automóviles, laminados, construcción, etc. |
| Isoftálicas | Resistencia al agua y químicos | Industria Náutica, piscinas y tanques |
| Bisfenólicas | Alta resistencia química | Tanques de Combustible, Almacenamiento químicos fuertes, etc. |
| Tereftálicas | Buena resistencia química | Almacenamiento de químicos. |

La cantidad de acelerante influye en la apariencia y propiedades finales de la pieza, las piezas con altas cantidades de acelerante tienden a fracturarse como consecuencia de las altas temperaturas alcanzadas súbitamente, mientras que la adición de poco acelerante prolonga el tiempo de curado por períodos que pueden superar hasta 1 semana. Por su parte las cantidades de catalizador afectan en especial el color, claridad y textura. En la tabla 2. se muestran otras mezclas de acelerante y catalizador usados en la industria.

**Tabla 2. Sistemas de Curado**

| CATALIZADOR+ ACELERANTE | CARACTERÍSTICAS |
|---|---|
| BPO (Peróxido dibenzoílo) + DMA (Dimetilanilina) | • Laminados amarillentos.<br>• Resistencia a los rayos solares |
| BPO + DEA (Dietilanilina) | • Tactosidad en la superficie expuesta.<br>• Poco curado en laminados de poco espesor. |
| MEK-P + Cobalto | • Baja tactosidad superficial.<br>• Empleado en *gel coasts* y laminados de poco espesor.<br>• Considerado como el sistema "universal" para curado en frio |
| MEK-P + Cobalto + DMA | • Igual que el sistema MEK-P + cobalto.<br>• Laminados amarillentos.<br>• Tiempos de *gel* cortos |
| MEK-P + BPO + Cobalto | • Igual que el sistema MEK-P + cobalto.<br>• Tiempos de *gel* largos.<br>• Curado rápido |

(Orrego & Vélez, 1987, pág. 44)

La figura 1. muestra un bosquejo de la forma en la cual una probeta de poliéster insaturado va liberando calor a medida que empieza a bajar su temperatura después de haber alcanzado su pico exotérmico. Las partes verdes representan zonas con menor temperatura y las de color rojo las zonas con elevada temperatura, a medida que la pieza alcanza la temperatura ambiente va quedando un punto caliente en el centro de la pieza.

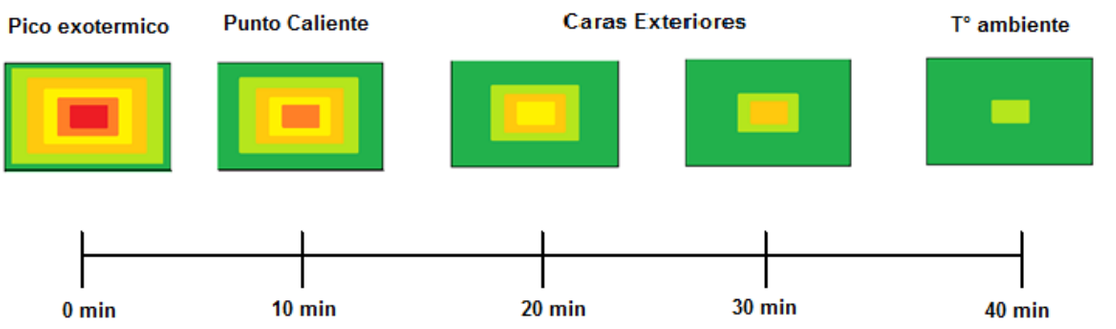



**Figura 1. Proceso de secado**

Las resinas de poliéster insaturados contienen una amplia gama de propiedades y característica, por tanto se muestra en la tabla 3 el rango en el que se pueden encontrar.

**Tabla 3. Propiedades Poliéster insaturado**

| PROPIEDADES | VALORES | UND |
|---|---|---|
| Tiempo de gel | 4-42 | min |
| Tiempo de exotérmica | 12-17 | min |
| Temperatura de exotérmica | 50 -210 | °C |
| Modulo de tensión | 2000 - 4000 | Mpa |
| Dureza barcol | 35 - 45 | |
| Resistencia a la tensión | 40 - 76 | Mpa |
| Modulo de flexibilidad | 1137 - 3850 | Mpa |
| Viscosidad a 25°C | 70 - 4650 | cps |

(Gil, 2012)

## 1.2. POLIÉSTER INSATURADO CARGADO

Polímeros cargados, es el nombre dado a aquellos materiales poliméricos a los cuales se les adiciona un segundo elemento, generalmente particulado, llamado carga. Por lo general esta adición de cargas se usa para reducir costos, pero también pueden actuar como refuerzo aumentando propiedades físicas o químicas del polímero.

Tiende a limitarse el su uso del UP según el tamaño de la pieza a fabricar. Así pues, para piezas de gran tamaño se dificulta la liberación uniforme de temperatura, presentado zonas calientes en su interior, esta diferencia hace que se presenten condiciones favorables para la generación espontánea de grietas internas que alteran la calidad y propiedades de la pieza.

La adición de cargas permite atenuar los esfuerzos generados en el proceso de curado, impidiendo la propagación de grietas a lo largo de la matriz, para que se genere una grieta es requerida una cantidad determinada de energía, la cual es disipada al encontrar una partícula inmersa en la matriz, dado que es necesario mayor energía para atravesar la partícula o bordearla. En la imagen 1 se muestra este proceso en una matriz reforzada con óxido de aluminio ($Al_2 O_3$).

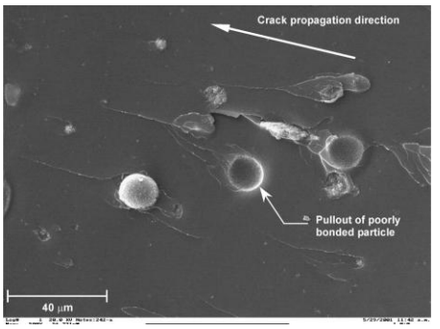



**Imagen 1. Grieta en una matriz de poliéster reforzada con 2% de alúmina.**

**(Zhang, 2004, pág. 410)**

Por otra parte, el poliéster insaturado tiene la capacidad de aceptar una amplia variedad de tipos de cargas dependiendo de la aplicación requerida, las cargas se pueden clasficar en función del efecto sobre las propiedades de la pieza (reforzantes y no reforzantes).

### 1.2.1. CARGAS NO REFORZANTES

Se usan en mayor parte para disminuir los costos de fabricación, por medio de adición de materiales de menor precio comparado con el del polímero y aumentando el volumen del producto final. Las cargas no reforzantes también modifican la apariencia del material dándole un color diferente con el fin de ser más vistoso siendo un aspecto decorativo.

### 1.2.2. CARGAS REFORZANTES

Suelen ser usadas para aumentar las propiedades del material como: dureza, tenacidad, resistencia química, resistencia a rayos UV, absorción de agua, etc. Por lo general la adición de un material para reforzar una propiedad en específica disminuye otras, por tanto es de vital importancia verificar que condiciones son requeridas para la pieza, usando la ley de mezclas se pueden conocer las propiedades obtenidas al reunir dos materiales.

En la tabla 4 se muestran algunas de las cargas utilizadas al igual que la familia a la que pertenecen estas.

**Tabla 4 Clasificación de las cargas**

| ORGÁNICAS | | | | INORGÁNICAS | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Celulosa** | **Desperdicios del campo** | **Sintéticos** | **Carbonaceos** | **Minerales** | **Polvos Metálicos** |
| Viruta de madera<br>Hilos de algodón<br>Alfa celulosa<br>Pulpa de papel<br>Productos macerados | Harina de Cascara de nuez<br>Fibras de sisal<br>Bagazos<br>Fibra de coco<br>Fibra de maíz<br>Vainas de semillas<br>Corcho | Filamentos de nylon<br>Hilos de Orlon<br>Fibras de dacron<br>Fibras de teflón | Fibras de carbón<br>Fibras de grafito<br>Carbón negro<br>Hojuelas de grafito Bitumen | Asbestos<br>Hojuelas o polvo de mica<br>Talco<br>Púmice<br>Fibra de Vidrio<br>Fibra de cuarzo<br>Oxido de aluminio | Cobre<br>Aluminio<br>Hierro<br>Disulfuro de molibdeno<br>Plomo |

(Botero & Vanegas, 2002)

Otro aspecto a tener en cuenta es la forma del refuerzo, ya que influye en las propiedades finales del compuesto. Los materiales reforzantes en forma de partículas aumentan las propiedades de la pieza en función de la interacción entre el material y la matriz, generalmente son usados en piezas que no requieren altas demandas mecánicas siendo usados en masillas, artesanías, juguetes, mármol y granito sintético. En toda carga

adicionada a un polímero se busca que no reaccione con los componentes presentes en el proceso de curado del material y sea de un costo bajo al compararlo con los beneficios.

## 1.3. MECANIZADO

Se conoce como mecanizado al proceso de fabricación por el cual se le da forma a una pieza, removiendo material a voluntad. Entre los métodos utilizados para mecanizar se resaltan dos: abrasión y arranque de viruta.

### 1.3.1. MÉTODOS ABRASIVOS

Este tipo de mecanizado busca remover material usando herramientas (piedras o papeles) con partículas abrasivas más duras que el material de trabajo. Al mecanizar se requiere menos fuerza para remover material, pero la cantidad de material removido es menor, este método generalmente se usa para dar acabado a la pieza.

### 1.3.2. ARRANQUE DE VIRUTA

La remoción de material se da usando una herramienta que tiene un filo de ataque el cual al entrar en contacto con la pieza y remueve material. Este método requiere mayor fuerza para mecanizar que el mecanizado por abrasión, pero se puede remover mayor cantidad de material. En el mecanizado por arranque de viruta se llevan a cabo dos procesos: desbaste, en el cual se extrae una mayor cantidad de material en un menor tiempo y acabado, en el cual se busca ajustar las tolerancias de la pieza removiendo poco material pero llevándolo a las medidas requeridas. Las maquinas comúnmente usadas para este proceso son Torno, Fresadora y taladro.

Las condiciones de corte presentes en la maquina a trabajar (Max NC 15) son similares a las que se tienen en una fresadora, el corte se realiza por arranque de viruta usando una herramienta que gira y se desplaza en el eje z, mientras que la pieza está sujeta al carro central, el cual se desplaza en el plano XY. En la figura 2 se muestra el esquema descrito junto con los ejes coordenados.

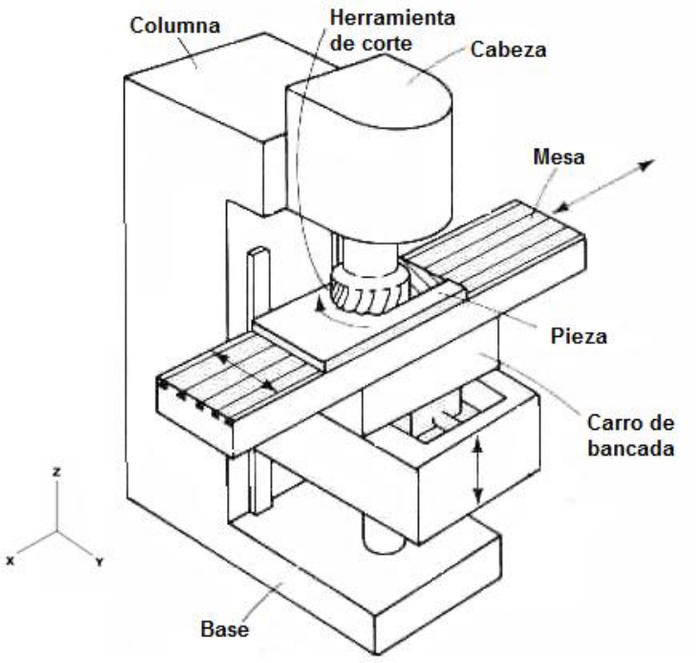



**Figura 2. Esquema de una fresadora con sus partes principales**

(International, 1989, pág. 30)

Para realizar un bueno mecanizado se debe seleccionar correctamente la herramienta de corte en función de la potencia que tenga el motor y la velocidad que pueda alcanzar, dependiendo de la selección de estos parámetros se afecta el desempeño del equipo, la eficiencia del corte, la potencia consumida y la vida útil de la herramienta. Los parámetros de corte que se requieren calcular se muestran en las siguientes ecuaciones, en la tabla 5 da la descripción de las variables utilizadas para el mecanizado al igual que sus unidades.

**Tabla 5. Variables y descripción**

| Nombre | Símbolo | Unidades |
|---|---|---|
| Velocidad de avance | $f$ | $\frac{mm}{min}$ |
| Velocidad por revolución | $f_n$ | $\frac{mm}{rev}$ |
| Revoluciones por minuto | $n$ | $\frac{rev}{min}$ |
| Avance por diente | $f_z$ | $\frac{mm}{diente}$ |
| Número de dientes (Herramienta) | $z$ | $\frac{diente}{rev}$ |
| Tiempo de mecanizado | $T_m$ | $min$ |
| Longitud de la pieza | $L_a$ | $mm$ |
| Longitud de aproximación | $L_p$ | $mm$ |
| Potencia de corte | $P_c$ | $[kW]$ |
| Profundidad de pasada | $p$ | $mm$ |
| Ancho de corte | $A_c$ | $mm$ |
| Fuerza específica de corte | $K_c$ | $\frac{N}{mm^2}$ |

Velocidad de avance ($f$ ): este parámetro afecta la calidad del maquinado y la velocidad el mismo, la velocidad de avance indica cuanto se desplaza en forma lineal la herramienta por cada minuto, se calcula:

$$f = f_n * n = f_z * z * n$$

Donde la velocidad por revolución se representa por ($f_n$), revoluciones por minuto (n), Avance por diente ($f_z$) y ($z$ ) número de dientes de la herramienta

Tiempo de mecanizado ($T_m$): en una línea de producción es necesario conocer cuánto tiempo requiere mecanizar cada pieza, esto se logra con la siguiente formula donde la longitud de la pieza ($L_a$) longitud de aproximación ($L_p$) velocidad de avance($f$)

$$T_m = \frac{L_a + L_p}{f}$$

Potencia de corte ($P_c$): Este parámetro muestra la potencia consumida por la máquina para hacer un mecanizado, a partir de este parámetro se dimensiona el motor con el que se va a trabajar o partiendo del motor se seleccionan los demás parámetros de corte. La profundidad de pasada se denota como($p$), ancho del corte($A_c$), velocidad de avance ($f$) y fuerza especifica de corte ($K_c$).

$$P_c = \frac{A_c * p * f * K_c}{60 * 10^3 * 10^3}$$

.

Fuerza de corte específica ($K_c$): Los materiales tienen diferentes condiciones de corte ya que cada uno presenta componentes diferentes. Debido a esto se tienen diversos valores de ($K_c$) para cada material, en la figura 3 se puede apreciar un rango de valores en el cual se encuentra una familia de materiales específica.

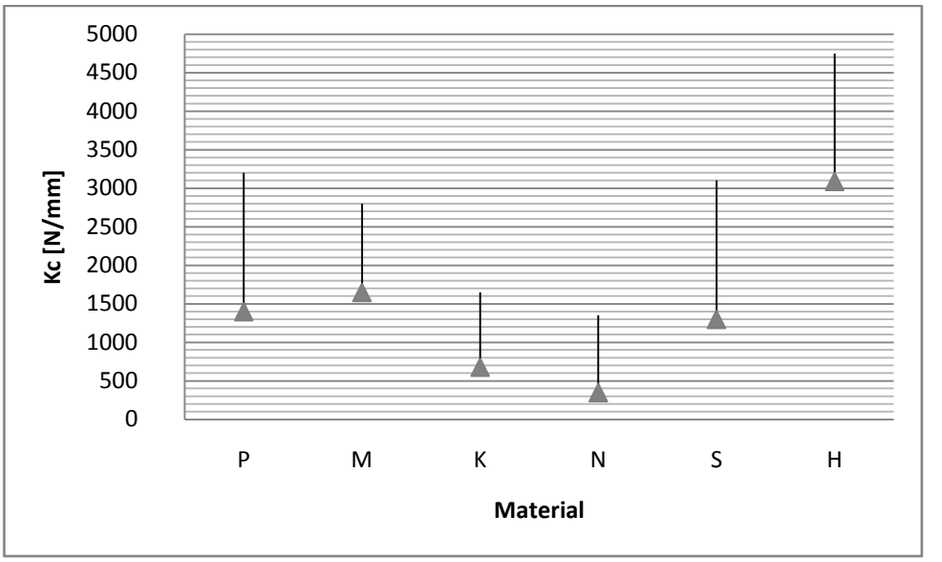



**Figura 3. Fuerza de corte especifica donde: P acero, M acero inoxidable, K fundición, N materiales no férreos, S HRSA y titanio, H acero templado**

(Coromant, 2013)

El proceso de remoción de material se genera por medio de una herramienta que gira perpendicular a la pieza a maquinar, aumentando o disminuyendo la velocidad de la herramienta de corte según sea el material trabajado y el acabado superficial requerido. Este tipo de máquinas se conocen como máquinas de eje vertical debido a que el movimiento de la herramienta se da sobre el eje Z, y la herramienta entra a la pieza para remover el material.

Durante el proceso de mecanizado es necesario tener en cuenta varios aspectos como: material a mecanizar, composición, propiedades y si tiene refuerzos cómo influyen estos en el desempeño del equipo. En función de esto se puede escoger la herramienta de corte, de un material y ángulo de ataque adecuado para ser usado bajo condiciones de corte especificas.

Dependiendo del ángulo de ataque de la herramienta cambia la fuera requerida para mecanizar, para ángulos de ataque pequeños con valores que se encuentran entre 0° y -20° se incrementa la fuerza de corte. Este mismo comportamiento se presenta cuando el

ángulo de ataque aumenta de 30° mostrando un incremento en la fuerza de corte, por tanto es necesario seleccionar una herramienta cuya demanda de fuerza para cortar sea baja con el fin de prolongar la vida útil del equipo y la herramienta de corte.

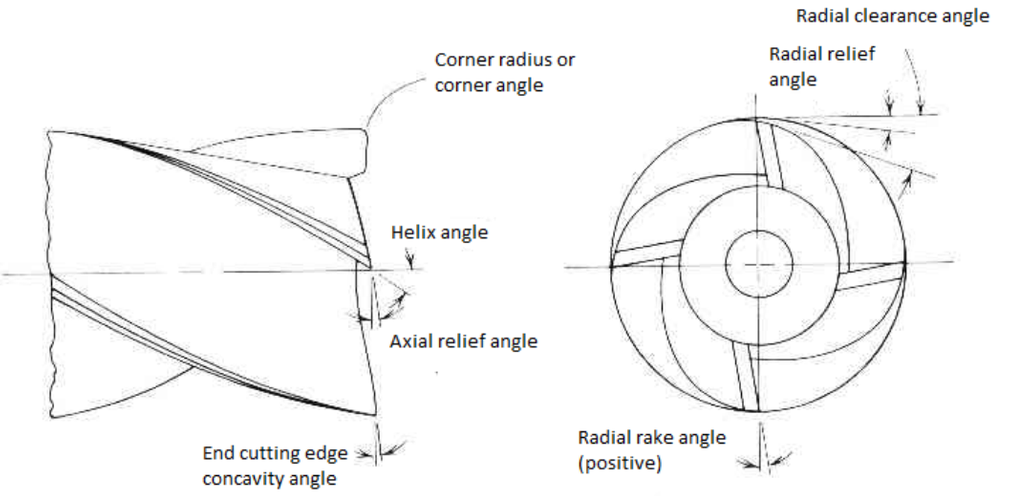



**Figura 4. Adaptación de la gráfica de International**

(International, 1989, pág. 314)

Los materiales compuestos se deben mecanizar de acuerdo al tipo de carga que se utiliza, teniendo en cuenta las propiedades de dicha carga y cómo actúan en el elemento. Por lo general la herramienta que se usa para maquinar una resina no funciona de igual forma al maquinar la misma resina con carga o no es capaz de efectuar el maquinado.

## 1.4. MECANIZADO DE PROTOTIPOS

El mecanizado de prototipos denota al hecho de maquinar piezas (prototipos) de forma eficiente y en tiempos reducidos, esto se hace con el fin de verificar diseños poniéndolos a prueba para evaluar: funciones de la pieza, características, concordancia geométrica, forma, ensambles, aspectos estéticos y ergonómicos. Ver imagen 2.

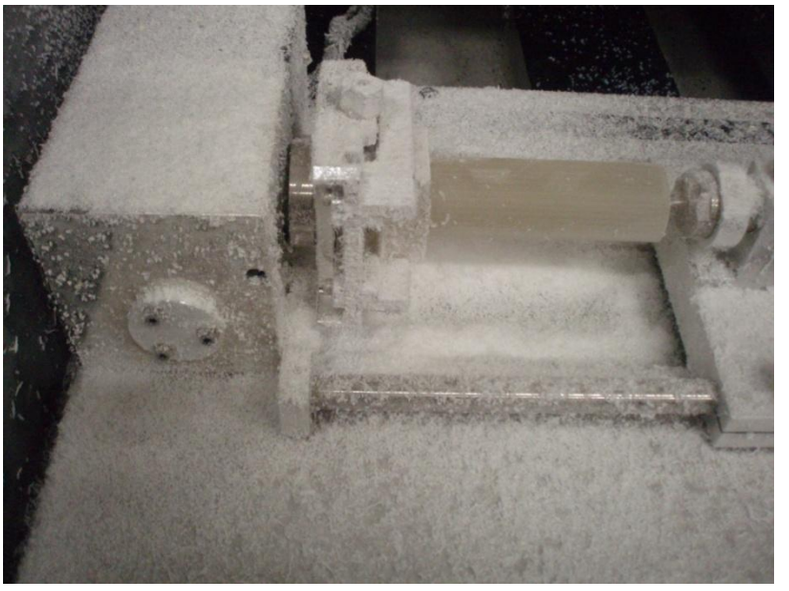


**Imagen 2. Piezas mecanizadas con un NC en el FatLap de la U.P.B.**

Dicho proceso se hace por lo general en máquinas de control numérico las cuales facilitan la fabricación de las piezas reduciendo el tiempo de fabricación del modelo y ajustando las tolerancias de la pieza respecto al diseño realizado. Para el mecanizado de prototipos se requiere el uso de materiales que sean fáciles de maquinar conservando las dimensiones de la pieza entre las tolerancias requeridas por el fabricante y preservar la herramienta de corte, que aunque es más dura que el material a maquinar, tiende a presentar una fatiga importante, la herramienta de corte es un elemento que debe ser cuidado por tanto el material no debe presentar condiciones extremas para la herramienta incurriendo en perdida del filo, adhesión de material o quemado superficial.

Los materiales utilizados para realizar un mecanizado de prototipos son diversos, en los cuales se busca principalmente materiales económicos y fáciles de mecanizar, a continuación se presentan los materiales comúnmente usados:

- Poliéster insaturado.
- ABS.
- Policarbonato.

- Poliamida SLS.
- Cera.
- MDF.
- Aluminio.
- Acero.
- Arena sílice.

En la Imagen 3 se muestra una pieza de poliéster insaturado sin ningún tipo de carga maquinada en una NC a partir de una pieza rectangular usando como herramienta de corte una. fresa de ¼" de acero rápido (HSS).

**Imagen 3. Pieza de poliéster insaturado maquinada en el FABLAB de la Universidad Pontificia Bolivariana (U.P.B.)**

El proceso comienza modelando la pieza en el ordenador para después exportar dicho modelo a una máquina de control numérico (NC). Los códigos se exportan a la NC por medio de un archivo plano con formato TXT. Este archivo esta escrito por medio de códigos (Códigos G).

Los códigos G son una serie de comandos con los cuales se le puede dar instrucciones a la maquina sobre qué hacer y cómo lo hace, estos controlan la velocidad de la herramienta de corte, el sentido de rotación, la profundidad y otros. En la tabla 6 hay una pequeña muestra de códigos G y su uso. El modelado de una figura se hace por medio de líneas que se mueven a lo largo de un plano dando sus coordenadas (X, Y, Z), partiendo de un punto inicial y terminando en un punto final, en cada código hay que especificar si el mecanizado se hace en línea curva de lo contrario la maquina tomara una línea recta para llegar de un punto a otro.

**Tabla 6. Comandos G.**

| N° | Comando | Descripción |
|---|---|---|
| **1** | G00 | Interpolación Lineal Rápida |
| **2** | G01 | Interpolación lineal a la velocidad programada en el registro F |
| **3** | G02 | Movimiento circular en el sentido horario Feedrate |
| **4** | G03 | Movimiento circular en el sentido anti-horario Feedrate |
| **5** | G04 | Es una demora o una pausa con un tiempo específico |
| **6** | G17 | Selección del Plano X-Y |
| **7** | G18 | Selección del Plano X-Z |
| **8** | G19 | Selección del Plano Y-Z |
| **9** | G40 | Compensación anulada, o al centro de la línea de desplazamiento |
| **10** | G41 | Compensación a la izquierda de la línea de desplazamiento |
| **11** | G42 | Compensación a la derecha de la línea de desplazamiento |
| **12** | G70 | Unidad de datos expresados en pulgadas |
| **13** | G71 | Unidad de datos expresados en milímetros |
| **14** | G90 | Desplazamiento en modo absoluto |
| **15** | G91 | Desplazamiento en modo Incremental o relativo |

(Rivera)

## 1.5. DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

Tanto, la pieza como la herramienta de corte sufren cambios como consecuencia del movimiento relativo entre estas, dicha acción genera cambios en la superficie variando la rugosidad superficial y promoviendo el desgaste.

En el caso del desgaste de la pieza trabajada se identifica como una remoción de material intencional ya que se requiere la extracción de este material manteniendo las tolerancias. En la herramienta de corte el desgaste se presenta como un daño progresivo en la superficie traduciéndose en la pérdida del filo del borde de ataque e incrementando la fuerza de corte.

Las herramientas de corte presentan fallas conforme su uso es prolongado, las condiciones de corte son inadecuadas para el material a trabajar o la herramienta no es capaz de maquinar el material que se requiere. Esto se refleja en la herramienta de corte como fallas que modifican su geometría y propiedades. Los daños más comunes son:

- Herramienta quemada.
- Perdida de material de la herramienta.
- Adhesión de material de la pieza a la herramienta.
- Deformación de la herramienta.

Estos daños son causados por el uso inadecuado de la herramienta de corte, la perdida de filo se presenta por un uso prolongado de la herramienta esta es una condición que siempre va a estar presente en cualquier tipo de maquinado. La herramienta se quema cuando la temperatura al momento de maquinar es muy alta produciendo una coloración negra en la superficie de la herramienta. La pérdida de material y la deformación de la herramienta se deben a condiciones de corte inadecuadas y materiales demasiado duros para maquinar con la herramienta utilizada.

La adhesión de material en la herramienta de corte depende de que se mecaniza, cuando se alcanzan temperaturas elevadas en el mecanizado, por causa del contacto entre la pieza y la herramienta, se tiende a incrementar la adhesión de material en la fresa impidiendo la liberación de calor, no siempre la falta de evacuación de viruta es una condición desfavorable. ya que puede presentar una condición lubricante aislando la herramienta del material a maquinar. En la tabla 7 se muestra un listado de los daños en la herramienta de corte y las posibles causas.

**Tabla 7. Fallas en las herramientas de corte y sus causas**

| | | **Causas posibles** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Velocidad de corte | | Velocidad de avance | | Profundidad de corte | | Tipo de fresa | | | |
| **Problemas habituales** | | Alta | Baja | Alta | Baja | Alta | Baja | Poco dura | Poco tenaz | Radio de punta grande | Ángulo de desprendimiento aprox 0 o - |
| Alteración de los filos de corte | Desgaste de la superficie de incidencia | **X** | | | | | | **X** | | | |
| | Entallas en el filo | **X** | | | | | | **X** | | | |
| | Deformación plástica | **X** | | **X** | | | | **X** | | | **X** |
| | viruta soldada en el filo | | **X** | | | | | | | | **X** |
| | Pequeños astillamientos | | **X** | | | | | | **X** | | **X** |
| | Rotura de dientes | | | **X** | | **X** | | | **X** | | |
| Vibraciones | | **X** | | | **X** | **X** | | | | **X** | **X** |

(Sandvik, 2006)

Para prevenir los daños presentes en la herramienta se debe tener en cuenta qué material se va a maquinar para seleccionar la herramienta adecuada. La figura 5 presenta los materiales de la herramienta de corte en función de las temperaturas alcanzadas en el mecanizado.

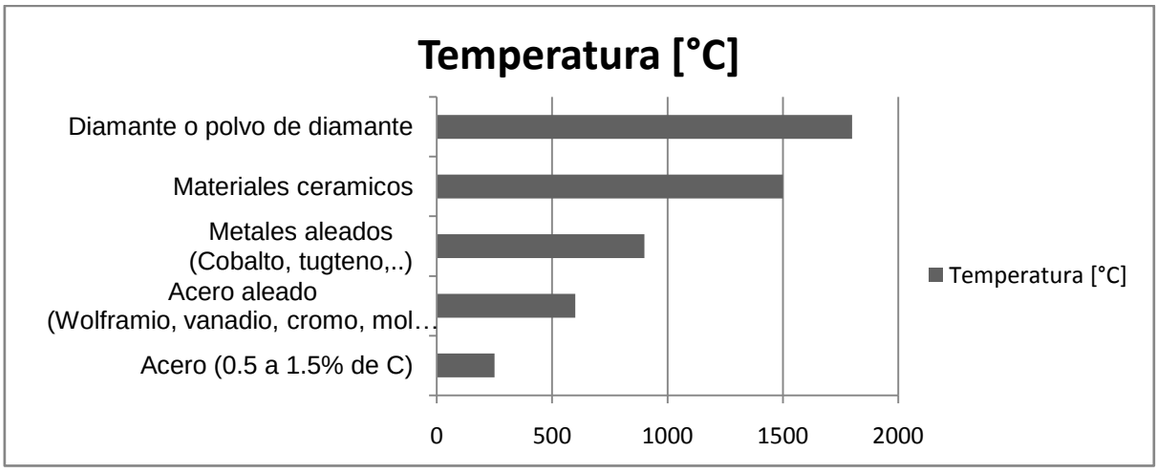



**Figura 5 Material de la herramienta de corte según la temperatura de maquinado**

(Gerling, 1964)

# CAPITULO 2.

# 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo de este trabajo de grado se realizaron actividades experimentales de laboratorio divididas en tres fases: materiales y procesamiento, evaluación de la potencia de mecanizado y ensayos de caracterización. El presente capítulo describe detalladamente cada una de dichas fases. Comienza con los materiales seleccionados, los procedimientos efectuados para la adecuación y procesamiento de los polímeros cargados, las máquinas herramientas y las variables de proceso evaluadas así como los protocolos y los equipos empleados para la caracterización de los materiales.

## 2.1. MATERIALES Y PROCESAMIENTO

### 2.1.1. RESINA MATRIZ

Se empleó como matriz una resina de poliéster insaturado tipo CRISTALÁN 823 suministrada por EXDEQUIN S.A. Ésta es una resina de poliéster ortoftálica, pura, semirrígida. En la tabla 8 se resume las características técnicas de este producto.

**Tabla 8. Especificaciones del CRISTALAN 823**

| DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | UND |
|---|---|---|
| Apariencia | Transparente incolora | N/A |
| Color Apha | 40 máximo | N/A |
| Valor acido | 33 máximo | N/A |
| Sólidos | 68 - 70 | % |
| Tiempo de gel, 25°C | 4-6 | min |
| Temperatura de exotermia | 145 - 165 | °C |
| Tiempo de exotermia | 12-16 | min |
| Molienda | 6 minimo | N/A |

(Ficha técnica del material)

Para el curado de la resina se usaron como catalizador MEK Peróxido (Metil Etil Cetona Peróxido) y como acelerador octoato de cobalto (SECAN 709). Con el uso de estos no se requieren fuentes externas de calor o presión, para llevar a cabo el proceso de curado. En la tabla 9 se presentan los tiempos de gel del CRISTALÁN 823 con 1.5% de MEK peróxido y usando octoato de cobalto en diferentes concentraciones.

**Tabla 9. Tiempos de gel del CRISTALÁN 823 con 1.5% de MEK peróxido (9% oxigeno activo) y octoato de cobalto (6% Co).**

| | Tiempos de Gel (minutos) | | |
|---|---|---|---|
| **Temperatura (°C)** | **0.1% Co** | **0.15% Co** | **0.2% Co** |
| 15 | 28 | 19 | 11 |
| 25 | 13 | 8 | 6 |
| 35 | 6 | 4 | 3 |

(Ficha técnica del material)

### 2.1.2. CARGAS

En función de los requerimientos y la facilidad para conseguir las cargas en el medio, se seleccionaron tres tipos de cargas: talco industrial, yeso y carbón vegetal cuyas principales características se describen a continuación:

#### 2.1.2.1. YESO

Se seleccionó el yeso maravilla para estuco fabricado y distribuido por la empresa CORONA. En la tabla 10 se reportan los datos técnicos del yeso, el cual posee un tamaño de partícula alrededor de 110 µm, este tamaño es apto para ser usado como carga sin tener que hacer un proceso de molido previo. El costo del material es el más bajo de las cargas seleccionas y produce una coloración grisácea semejante al cemento al ser adicionado en la matriz. Este material no reacciona con la resina de poliéster, por tanto puede ser usado como carga (Botero & Vanegas, 2002, pág. 167)

**Tabla 10. Especificaciones del yeso maravilla para estuco (corona)**

| DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | UND |
|---|---|---|
| Relación agua - yeso. | 5 puntos por encima de la consistencia | N/A |
| Fraguado inicial al corte | 5 – 14 | min |
| Fraguado final | 30 – 45 | min |
| Resistencia a la flexión | 35 - 50 | kg/cm |
| Resistencia de superficie en seco | 270 – 360 | kg/cm |
| Densidad | 2310 - 2330 | kg/m3 |

(Ficha técnica del material)

### 2.1.2.2. TALCO INDUSTRIAL

Distribuido por Sumiglas S.A. el cual posee dureza baja y no reacciona con ninguno de los elementos presentes en las probetas, en la tabla 11 se encuentras los datos técnicos relacionados con el talco industrial 325. Es un silicato hidratado de magnesio con formula teórica $Mg_6(Si_8O_{20})(OH)_4$ (Botero & Vanegas, 2002, pág. 149). Posee gran resistencia química, su precio es bajo y tiene un tamaño de partícula con el cual se puede trabajar como carga, no se genera abrasión en las máquinas que van a ser utilizadas para mecanizar y dependiendo si es talco industrial o medicinal proporciona diferentes colores que van desde el blanco perla hasta el verde arrecife.

**Tabla 11. Especificaciones del talco industrial 325**

| DESCRIPCIÓN | CONTENIDO | UND |
|---|---|---|
| Apariencia | Polvo blanco | N/A |
| Absorción de aceite | 36.27 | % |
| Blancura | 90.7 | (Photovolt) |
| Humedad | 0.15 | % |
| Densidad | 2700 | (kg/m3) |

(Ficha técnica del material)

### 2.1.2.3. CARBÓN VEGETAL

Se eligió carbón vegetal para consumo familiar fabricado por CEITAP S.A. en presentación de 5 kg con las especificaciones técnicas que se describen en la tabla 12. Se encuentra en tamaños grandes de partículas, los cuales es necesario molerlos antes de ser utilizado como carga, contiene un alto porcentaje de carbono llegando a un 80%, su producción se da por el calentamiento a altas temperaturas (400°C a 700°C) en ausencia de aire a partir de trozos de manera y otros materiales vegetales.

**Tabla 12. Especificaciones del carbón vegetal CEITAP**

| DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | UND |
|---|---|---|
| Quebracho blanco | 80 | % |
| Algarrobo Negro, Itin, Calden y otras especies no chispeantes | 20 | % |
| Humedad máxima | 4 | % |
| Gama volátil | 15 | % |
| Gama carbonífera fija | 70 | % |
| Cenizas mínimas | 3 | % |
| Densidad | 1500-1800 | kg/m$^3$ |

(Ficha técnica del material)

Dado que el carbón vegetal se encuentra en trozos con tamaños de más de 7 cm de diámetro, fue necesario reducirlo hasta convertirlo en polvo fino y poder ser usado como carga. Para tal efecto, se empleó una trituradora de mandíbulas, para reducir el tamaño del carbón hasta un diámetro aproximado de 1 cm. Posteriormente, se efectuó una segunda etapa de molienda con el molino de rodillos hasta obtener carbón vegetal en polvo. Esta segunda etapa del proceso se llevó a cabo tres veces buscando obtener homogeneidad en el tamaño de las partículas, a continuación se describen los equipos empleados.

### 2.1.3. EQUIPOS PARA ADECUACIÓN DE CARGAS

#### 2.1.3.1. TRITURADORA DE MANDÍBULAS

Se usó la trituradora de mandíbulas Braun Chipmunk Jaw Crusher situado en el laboratorio de cerámicos en el bloque 11 de la Universidad Pontifica Bolivariana (U.P.B.), este equipo se muestra en la imagen 4. Esta máquina reduce piezas menores de 7 cm de diámetro a trozos con un diámetro aproximado de 1 cm. La máquina reduce las piezas al hacer que se cierre una lámina móvil contra otra estática, a medida que va pasando material.

**Imagen 4. Trituradora de mandíbulas Braun Chipmunk Jaw Crusher**

#### 2.1.3.2. MOLINO DE RODILLOS

Con los trozos ya obtenidos de la trituradora de mandíbulas se disminuye el tamaño de las partículas haciendo uso del molino de rodillos Braun Pulverizer, 2HP/3Ph ubicado en el laboratorio de cerámicos del bloque 11 de la U.P.B. Esta máquina funciona con una placa en movimiento que gira enfrentada a otra placa estática de esta forma se puede obtener un polvo fino que puede ser usado como carga. Es necesario hacer este proceso

3 veces para que el producto final sea homogéneo en tamaño. En la imagen 5 se muestra la máquina.

**Imagen 5. Molino de rodillos Braun Pulverizer**

### 2.1.3.3. RO-TAP

Para todas las cargas estudiadas se determinó el tamaño de las partículas por medio de tamices normalizados empleando un equipo Ro-tap RX-812 mostrado en la imagen 6. El equipo funciona por medio de mallas de diferente numeración en las cuales se retienen las partículas mientras que la maquina vibra para facilitar el paso de las partículas de menor tamaño a través de los tamices (mallas) N° 20, 30, 70,100, 140, 200, 270, 325 y 400.

**Imagen 6. Ro-tap RX-812**

### 2.1.4. SÍNTESIS DE MATERIALES COMPUESTOS

Las probetas de material compuesto fueron fabricadas siguiendo el mismo procedimiento, en el cual se varía la carga utilizada y el porcentaje de esta como se muestra en la tabla 13. En esta tabla se indican las probetas fabricadas, el material con el cual fueron cargadas y la cantidad de carga adicionada, la última probeta fabricada fue la muestra de control, esta contiene la misma cantidad de acelerante y catalizador que las demás probetas pero no se le adiciono ninguna carga.

**Tabla 13. Probetas fabricadas**

| Probeta | Material de carga | Porcentaje de carga [v/v%] |
|---|---|---|
| 1 | Carbón vegetal | 15 |
| 2 | Carbón vegetal | 30 |
| 3 | Carbón vegetal | 45 |
| 4 | Yeso maravilla para estuco | 15 |
| 5 | Yeso maravilla para estuco | 30 |
| 6 | Yeso maravilla para estuco | 45 |
| 7 | Talco industrial | 15 |
| 8 | Talco industrial | 30 |

| | | |
|---|---|---|
| 9 | Talco industrial | 45 |
| Muestra de control | ---------- | 0 |

El procedimiento seguido para la fabricación de las probetas se muestra en la figura 5. Para todas las probetas fue el mismo proceso, solo que en el caso de la muestra de control no se agregó ninguna carga, por tanto el paso dos y tres fueron omitidos.

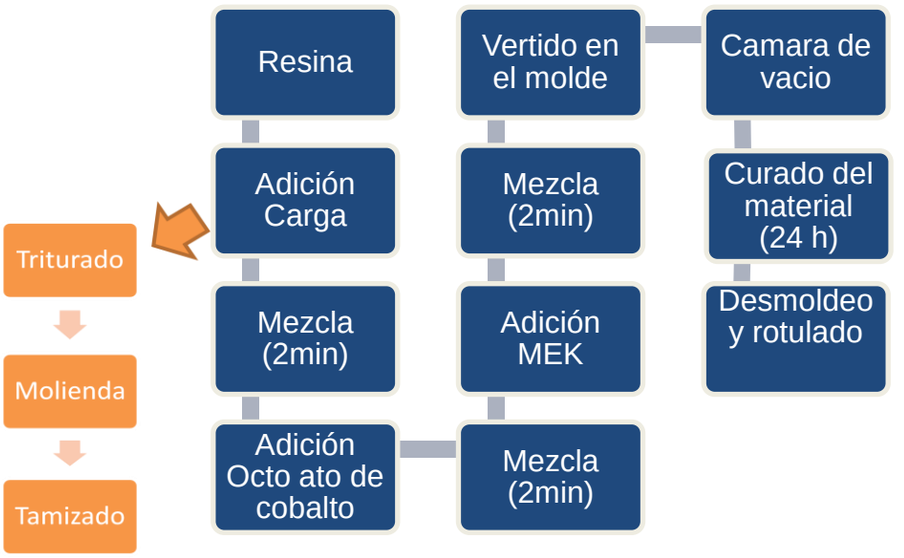



**Figura 6. Diagrama de flujo con el procedimiento para fabricar las probetas**

Pasos para la fabricación de las probetas:

- Se pesan 370 g de resina de poliéster CRISTALÁN 823, posteriormente se vierten en un recipiente, es preferible un recipiente que no tenga esquinas para poder ser mezclado todo el producto.
- Se pesa el porcentaje de carga que se va adicionar según sea la probeta que se esté haciendo y se vierte en el recipiente en que se encuentra la resina.
- Se mezcla hasta obtener una pasta uniforme, el mezclado debe ser continuo y despacio para evitar adicionar burbujas de aire a la muestra, este proceso tarda aproximadamente dos minutos.
- Se adiciona el acelerante, 0.15% de la cantidad de resina agregada.

- Se mezcla hasta obtener una pasta uniforme, el mezclado debe ser continuo y despacio para evitar adicionar burbujas de aire a la muestra, este proceso tarda aproximadamente dos minutos.
- Se adiciona el catalizador, 1.5% de la cantidad de resina agregada.
- Se mezcla hasta obtener una pasta uniforme, el mezclado debe ser continuo y despacio para evitar adicionar burbujas de aire a la muestra, este proceso tarda aproximadamente dos minutos.
- Toda esta mezcla se introduce en un molde cúbico de 10x10x10 cm hecho de madera, en la imagen 7 se muestra el molde.

**Imagen 7. Molde.**

- La mezcla es llevada a la cámara de vacío con el fin de extraer la mayor cantidad de burbujas alojadas en la misma, este proceso tarda cerca de cinco minutos.
- Pasado el proceso de curado se desmolda la pieza y se procede a rotularla con la carga que fue adicionada y la cantidad de este presente en la probeta, en la imagen 8 se muestran algunas de las probetas fabricadas.

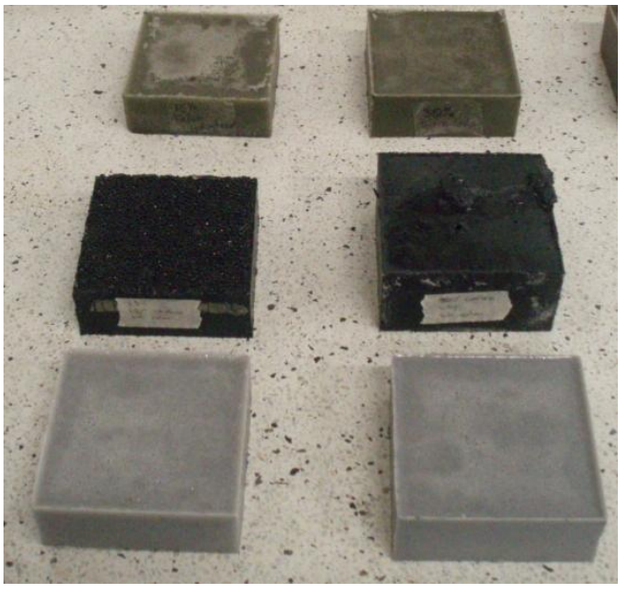


**Imagen 8. Probetas fabricadas con 15% y 30% de la carga**

Antes de realizar todo el proceso es necesario cubrir el molde en el cual se va a verter la resina con un agente desmoldante que facilite retirar la pieza después del proceso de curado, por lo general se usa algún tipo de cera con la cual se recubre todo el recipiente con 3 capas, en este caso se uso cera de carnauba.

### 2.1.5. CARACTERIZACIÓN DE DUREZA DE LAS PROBETAS.

La dureza es la resistencia del material a ser rayado. Los materiales trabajados son blandos comparados con el acero, por tanto se requiere usar equipos que son más sensibles para detectar la dureza. Se uso un durómetro Barcol y un durómetro digital capaz de medir en la escala rockwell R con el fin de tener los resultados de dureza en diferentes formas.

### 2.1.5.1. DURÓMETRO ANÁLOGO BARCOL

Se empleó un durómetro Barcol marca Colman Barber. Referencia: GYZJ 934-1. En la imagen 9 se observa el durómetro, ubicado en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la U.P.B.

**Imagen 9. Durómetro Análogo Barcol**

(Company T. T., 2013)

En la tabla 14 se encuentran las especificaciones del durómetro barcol.

**Tabla 14. Especificaciones durómetro barcol**

| **Especificaciones** | **Rango** |
|---|---|
| Rango de prueba | 0~100HBa (25~150HBW) |
| Resolución | 0.5HBa |
| Error | ≤±1~2HBa |

(Company T. T., 2013)

El ensayo se llevó a cabo en un cilindro de 3 cm de diámetro a partir de la probeta fabricada como se muestran en la imagen 10, cada muestra fue torneada garantizando que las caras superior e inferior fueran paralelas. A la muestra analizada se le realizaron 8 indentaciones en diferentes puntos de la cara analizada con el fin de tener diferentes datos y reportar el promedio.

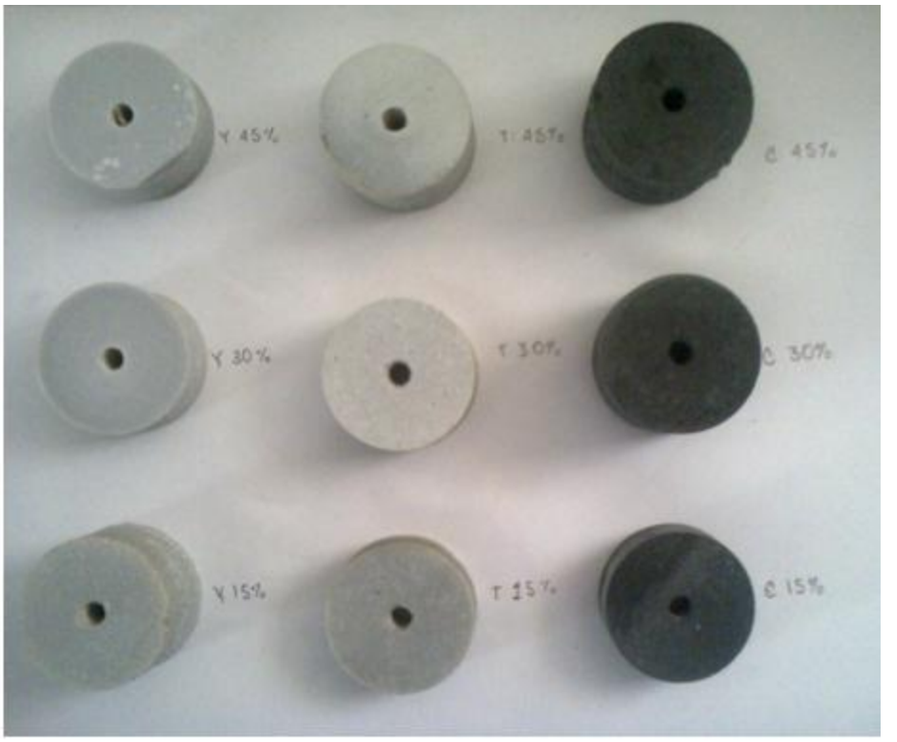



**Imagen 10. Probetas generadas para el ensayo de dureza.**

### 2.1.5.2. DURÓMETRO DIGITAL WILSON WOLPERT 930

Se efectuaron ensayos con un durómetro digital universal, en la imagen 11 se observa el durómetro Wilson Wolpert 930, ubicado en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la U.P.B.

**Imagen 11. Durómetro Digital Wilson Wolpert 930**

**(Company W. H., 2011)**

En la tabla 15 se encuentran las especificaciones técnicas del equipo, con esta se realizó un ensayo de dureza Rockwell R, recomendado para materiales de durezas no muy altas como los son las resinas de poliéster cargada.

**Tabla 15. Especificaciones técnicas del durómetro digital.**

| **Especificaciones técnicas** | **Rangos** |
|---|---|
| Escalas de dureza | Brinell, Vickers, Rockwell |
| Objetivos | Intercambiables 20x, 44x, 70x, 140x, 250x |
| Escala | Incremental, resolución mejor que 1 micro metro |
| Visualizador | Calculador de durezas integrado, determina el valor de dureza en cualquier escala, estadísticas y salida de datos |
| Aplicación de cargas | Mediante célula de carga en bucle cerrado |
| Ensayos Rockwell | A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S, V, Bm, Fm, Ralpha |
| | 15N, 30N, 45N, 15T, 30T, 45T, 15W, 30W, 45W,15X, 30X, 45X, 15Y, 30Y, 45Y, 30 TM, HMR 5/25 |
| Duración de la carga | 0,1 - 255 s |
| Muestra | Altura mínima 300 mm |
| | Profundidad mínima 150 mm |

**(Company W. H., 2011)**

## 2.2. EVALUACIÓN DE LA POTENCIA DE MECANIZADO.

Para la evaluación de la potencia consumida durante el mecanizado de los materiales en función de las variables de corte, se empleó una pinza amperimétrica 400 A con precisión de 0.01 A, en la imagen 12 se aprecia la pinza usada.

**Imagen 12. Pinza amperimétrica**

## 2.3. ANÁLISIS DEL DESGASTE SUPERFICIAL DE LA HERRAMIENTA.

El desgaste de las herramientas de corte se evaluó por medio de análisis visual de las superficies, empleando técnicas de microscopia óptica y electrónica de barrido (SEM) con los equipos que se describen a continuación.

### 2.3.1. ESTÉREO MICROSCOPIO ÓPTICO

El seguimiento del desgaste de las herramientas de corte se hace por medio de un estéreo microscopio óptico XTL – 2800 después de cada maquinado, en la imagen 13 se muestra el equipo.

**Imagen 13. Microscopio estero óptico XTL – 2800**

(Focus Technology Co., 2013)

El procedimiento usado para tomar las fotografías en el microscopio óptico fue el mismo durante todos los ensayos realizados. Terminado el mecanizado de la probeta cada herramienta utilizada, se utilizaron 8 en total, es limpiada usando aire con el uso de un inflador manual (magen 14). Removiendo las partículas superficiales presentes en la herramienta.

**Imagen 14 Inflador manual**

Para poder tomar las fotografías fue necesario hacer una plataforma en madera de 120 mm de diámetro con un agujero concéntrico de 6 mm y 1 cilindro de 40 mm de diámetro

con un agujero concéntrico de 6mm. En la imagen 15 está la plataforma fabricada para fotografiar las fresas.

**Imagen 15. Soporte de fresas para microscopio óptico.**

A cada una de las fresas se les tomaron 6 fotografías así: fotografía de 0.65 aumentos en la cual se evidencian los cuatro filos de la herramienta, fotografías a 2 y 3 aumentos a dos filos representativos de la herramienta y una fotografía lateral con un aumento de 0.65.

### 2.3.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Se empleó un equipo marca JEOL JSM-5910 LV, equipado con un sistema de microanálisis. En la imagen 16 se encuentra una foto de este equipo.

**Imagen 16. SEM J SM-5910 LV**

La conductividad de las muestras debe ser aumentada para que el SEM pueda trabajar mejor, este proceso se hace al revestir la pieza con pequeñas partículas de oro. El revestimiento se aplicó utilizando Denton Vacuum DESK II. El proceso se realiza al aplicar un alto voltaje al tubo donde se encuentran alojadas las muestras, el aropresente en la pulverización catódica ioniza el recubrimiento para alojarse en la pieza. En la imagen 17 se encuentra el equipo.

**Imagen 17. Denton Vacuun DESK II**

## 2.4. MECANIZADO DE LAS PROBETAS.

Para mecanizar las probetas fabricadas se usó una fresa de acero rápido de cuatro filos, con un diámetro de ¼ pulgada. La máquina en la que se lleva a cabo este trabajo es una MAXNC 15 de cuatro ejes con una velocidad máxima en la herramienta de corte de 10000 rpm con 1/5 de caballo de fuerza, esta máquina está ubicada en el laboratorio de fabricación digital (FAB-LAB) de la U.P.B. En la imagen 18 se muestra el equipo y el tipo de fresa.

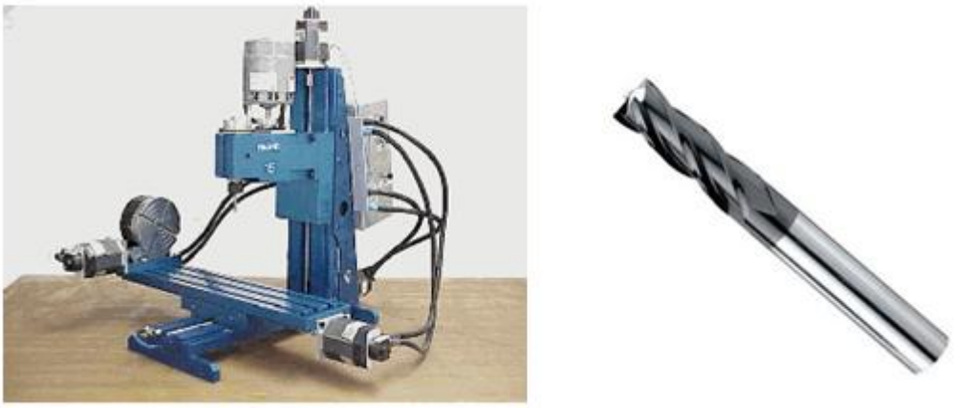


**Imagen 18. Maquina MAX NC 15 a la izquierda y fresa de 4 filos HSS de ¼" a la derecha**

Para obtener los datos se llevaron a cabo tres procesos de corte en los cuales se analizaban el efecto de las variables de corte, para cada una de las probetas con cargas de diferente tipo y en concentraciones variables. Con respecto a las variables de corte (expresadas en la tabla 16), se analizaron dos condiciones (alta y baja) para: la velocidad de avance, la profundidad de corte y la velocidad de la herramienta. Dando un total de 8 mecanizados diferentes para cada uno de los materiales compuesto fabricados, En total se realizaron 72 mecanizados.

**Tabla 16. Condiciones de mecanizado estudiadas**

| Condición de corte | Profundidad (mm) | Velocidad de avance (µm/s) | Velocidad de la fresa (rpm) |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.5 | 400 | 6000 |
| 2 | | | 8000 |
| 3 | | 800 | 6000 |
| 4 | | | 8000 |
| 5 | 3 | 400 | 6000 |
| 6 | | | 8000 |
| 7 | | 800 | 6000 |
| 8 | | | 8000 |

Para todos los ensayos realizados se tomo medida del la variación del amperaje conforme la probeta es mecanizada, también se tomo la medida del voltaje suministrado al motor cuando se trabaja a 6000 y 8000 rpm.

En la figura 7 se muestra el diseño en perspectiva de la probeta usando Rhinoceros 4.0, se diseño un cubo de 10 x 10 x 7 cm que representa las probetas fabricadas, a partir de este diseño se obtienen el código G para el mecanizado de la pieza, se realizo el mecanizado de la probeta con un 50 % de herramienta de corte dando un total de 32 pasadas para mecanizar toda la probeta.

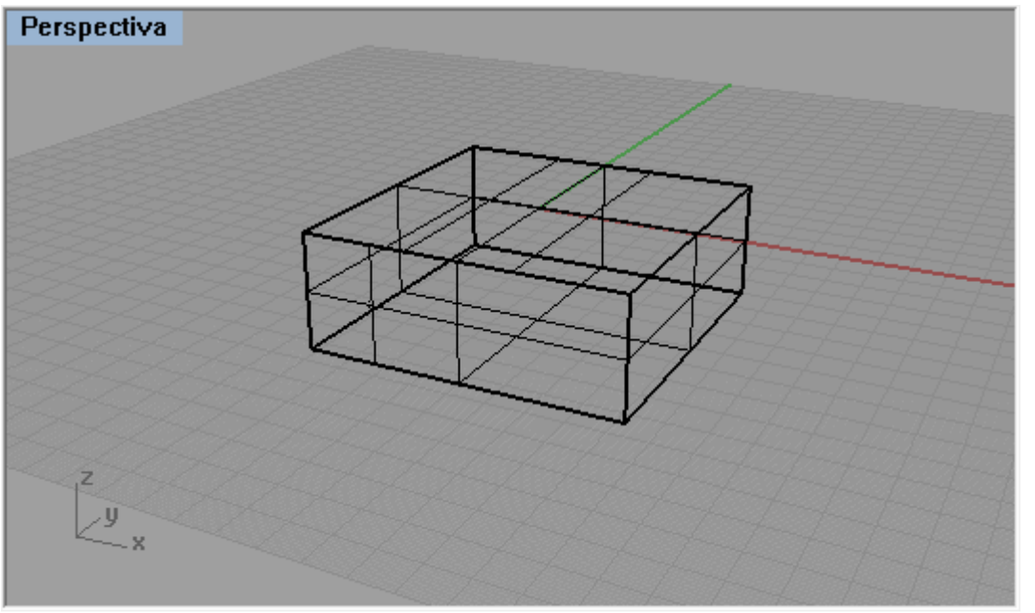



**Figura 7 Perspectiva de la pieza mecanizada en Rhinoceros 4.0**

# CAPITULO 3.

# 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la experimentación realizada. Se emplea una metodología PDA, donde lo que se busca es primero presentar (P) los datos, posteriormente se describen (D) cada uno de los datos recopilados para terminar con el análisis pertinente (A). Se comienza con el estudio de granulometría de las cargas, propiedades de los materiales compuestos elementos y termina con las curvas de potencia y desgaste de la herramienta.

## 3.1. GRANULOMETRÍA DE LAS CARGAS

Todas las cargas utilizadas contienen diferente tamaño de grano, a cada una se les hizo un ensayo de granulometría identificando cuál es el tamaño de grano trabajado para cada probeta, tomando una muestra representativa (270 g). Cada muestra por separado fue llevada al Ro-Tap. Posteriormente se mide la cantidad de material alojado en cada tamiz por medio de una balanza, al tener la deposición de material se obtiene la dispersión de partículas en cada tamaño de grano.

Las figuras 8, 9 y 10. Tienen el mismo esquema, en el eje Y se encuentra el porcentaje de carga retenido en el tamiz, y el eje X indica el número de tamiz que posteriormente se explica a qué tamaño de partícula corresponde.

La figura 8 muestra la dispersión de las partículas del carbón vegetal, posterior al proceso de triturado y molido efectuado. En esta se observa una gran concentración de partículas en el tamiz número 70, con un 58% sobre el total del material agregado en el Ro- Tap, mostrando que la mayoría de las partículas tienen un diámetro menor a 0,212 mm.

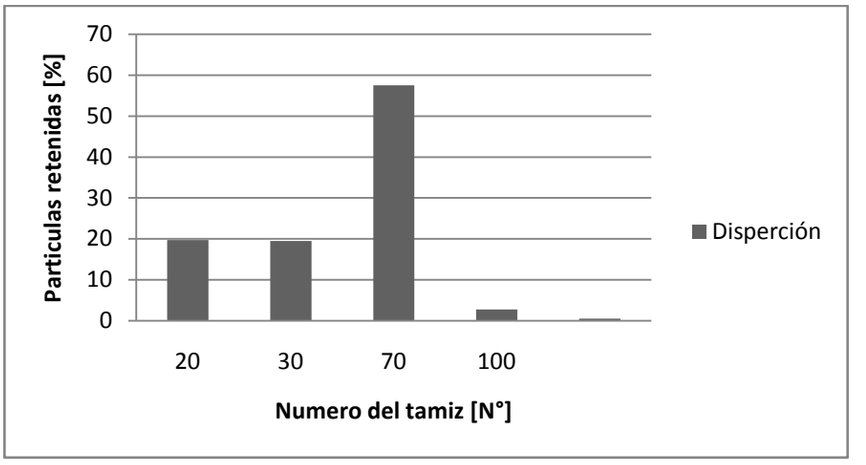



**Figura 8. Porcentaje másico de carbón retenido en malla.**

El yeso tiene un tamaño adecuado para ser utilizado como carga, la presentación utilizada viene en forma de polvo fino, con el ensayo de granulometría se verifica el tamaño, indicando que el 42% y 43% de las partículas de yeso se alojan en el tamiz número 100 y 140 respectivamente (0,150-0,106 mm) como se muestra en la figura 9.

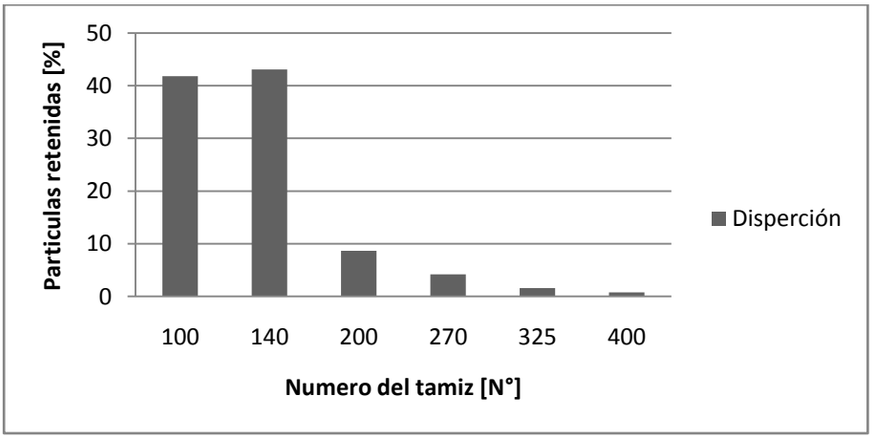



**Figura 9. Porcentaje másico de yeso retenido en malla.**

La figura 10 muestra los resultados del ensayo de granulometría aplicado al talco industrial, en esta se identifica un conglomerado de material en el tamiz número 200 dando un total del 69% del material analizado se encuentra en este tamiz, por tanto el

talco industrial es el material con tamaño de grano más pequeño (0.075mm) entre los materiales seleccionados.

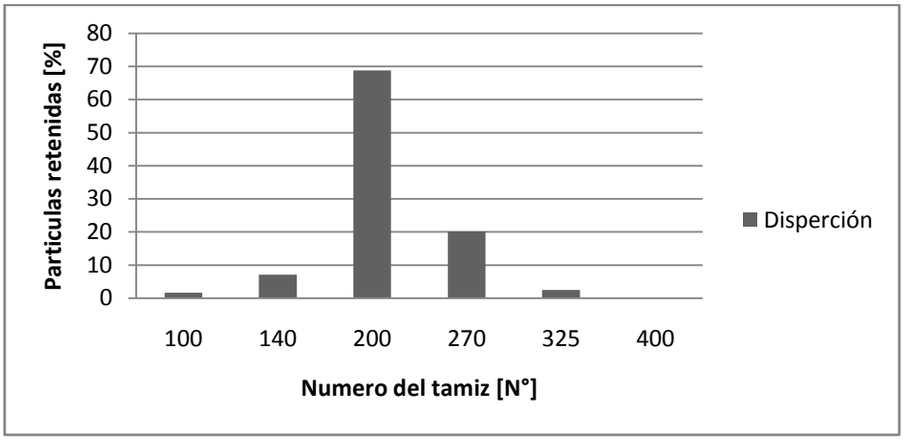



**Figura 10. Porcentaje másico de talco retenido en malla.**

En cuanto al tamaño de grano obtenido de los diferentes ensayos de granulometría realizados se evidencia un menor tamaño de grano en el talco industrial seguido por el yeso y teniendo como la partícula más grande el carbón vegetal, la importancia del tamaño de grano en las piezas cargadas se debe a las condiciones finales de acabado para la pieza

## 3.2. DUREZA DE LAS PROBETAS

La dureza de un material indica la oposición que ofrece para ser rayado, identado o cortado. Por lo general la dureza se compara contra otro material determinando cual de los dos materiales sufre mayor cantidad de desgaste al ser expuestos entre sí, esta se conoce como una escala cualitativa donde se clasifican los materiales entre el diamante (más duro), y el talco (menos duro). Otro tipo de escalas de dureza miden la carga la superficie y la profundidad identada para dar un valor numérico de dureza el cual según el ensayo realizado puede ser Brinell, Rockwell, Vickers…

En la tabla 17 se registran los datos obtenidos al efectuar el ensayo de dureza rockwell R sobre las diferentes probetas fabricadas, en esta se puede identificar que el valor de dureza de las probetas cargadas con carbón vegetal es menor comparado con las demás cargas, y a medida que se incrementa el porcentaje de carbón vegetal añadido a la matriz, la dureza disminuye presentado una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de dureza y la cantidad de carga adicionada.

**Tabla 17. Dureza Rockwell R probetas**

| REFUERZO | CANTIDAD [%] | VALOR ROCKWELL R |
|---|---|---|
| Carbón | 45 | 82.66 |
| | 30 | 88 |
| | 15 | 115.6 |
| Talco | 45 | 106.6 |
| | 30 | 110.6 |
| | 15 | 117.5 |
| Yeso | 45 | 114.25 |
| | 30 | 110.25 |
| | 15 | 115.5 |
| Muestra | - | 116.5 |

De las probetas analizadas, la más dura es la muestra de control sin ninguna carga adicionada, indicando que la adición de las cargas utilizadas disminuye la dureza de la probeta, presentando una significativa disminución de dureza al adicionar carbón vegetal como carga, al adicionar talco industrial y yeso también se presenta disminución de la dureza en menor cantidad comparado con el carbón vegetal.

## 3.3. CURVAS DE POTENCIA EN EL MECANIZADO

Las figuras de la 11 a la 18 contienen en el eje vertical la potencia consumida por el motor al realizar el maquinado y en el eje horizontal la concentración de la carga bien sea carbón vegetal, yeso, talco industrial y la muestra de control, para estas figuras el rango es el mismo, desde 70 W hasta 140 W.

En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una condición de corte con velocidad de la fresa de 6000 rpm, profundidad de corte de 1.5 mm y velocidad de avance de 400 µm/s de las condiciones de corte elegidas, esta es la que presenta menores valores.

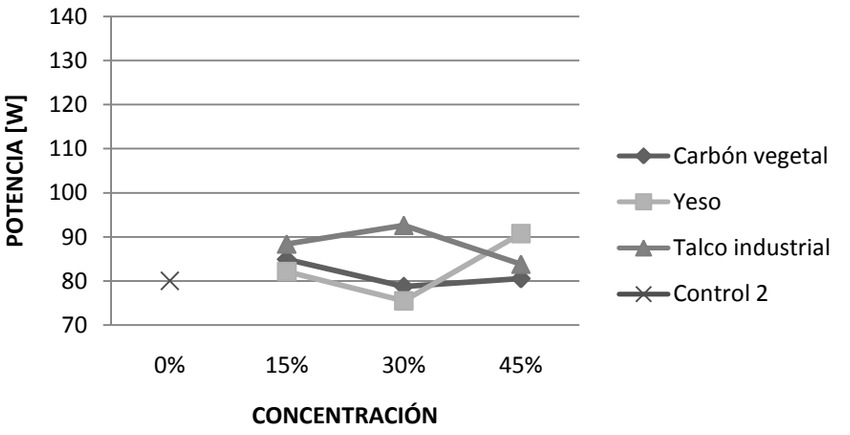



**Figura 11. Mecanizado con 1.5 mm de profundidad, velocidad de avance de 400 µm/s y velocidad de la fresa de 6000 rpm**

Se encuentra una variación en la potencia de mecanizado cercana a 5 W conforme la concentración de carga varía identificando una potencia de mecanizado mayor o igual al mecanizado de la muestra de control con excepción de las probetas mecanizadas con yeso o carbón al 30%. Por otro lado se tiene un consumo de potencia que sobre sale correspondiendo a la probeta cargada con talco al 45% junto con la probeta con carbón 45%.

En la figura 12 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una la condición de corte con una velocidad de la fresa de 8000 rpm, profundidad de corte de 1.5 mm y velocidad de avance de 400 µm/s.

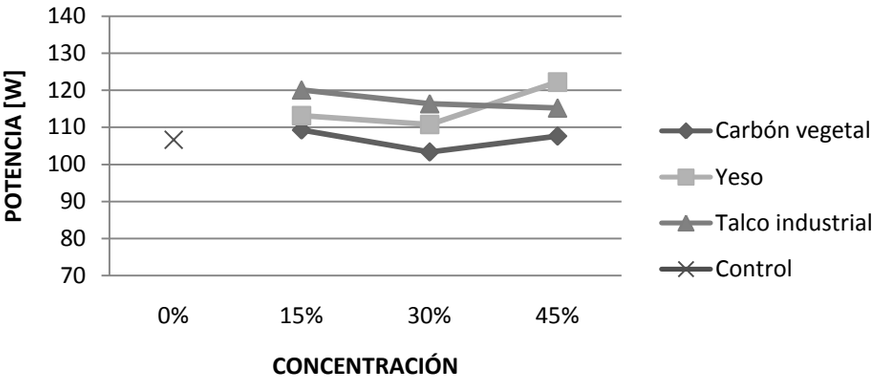



**Figura 12. Mecanizado con 1.5 mm de profundidad, velocidad de avance de 400 µm/s y velocidad de la fresa de 8000 rpm**

En la figura se destaca una disminución en la potencia de mecanizado para las probetas cargadas con carbón vegetal respecto los demás probetas, destacando la probeta cargada con 30% de carbón con el menor valor registrado incluyendo la muestra de control.

En la figura 13 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una condición de corte con una velocidad de la fresa de 6000 rpm, profundidad de corte de 1.5 mm y velocidad de avance de 800 µm/s.

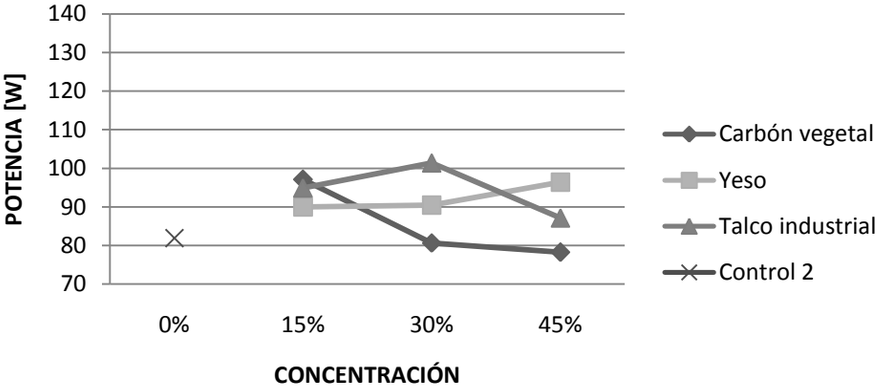



**Figura 13. Mecanizado con 1.5 mm de profundidad, velocidad de avance de 800 µm/s y velocidad de la fresa de 6000 rpm**

Se identifica menor consumo de potencia al maquinar las probetas cargadas con carbón al 45% y 30%.

En la figura 14 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una condición de corte con una velocidad de la fresa de 8000 rpm, profundidad de corte de 1.5 mm y velocidad de avance de 800 µm/s.

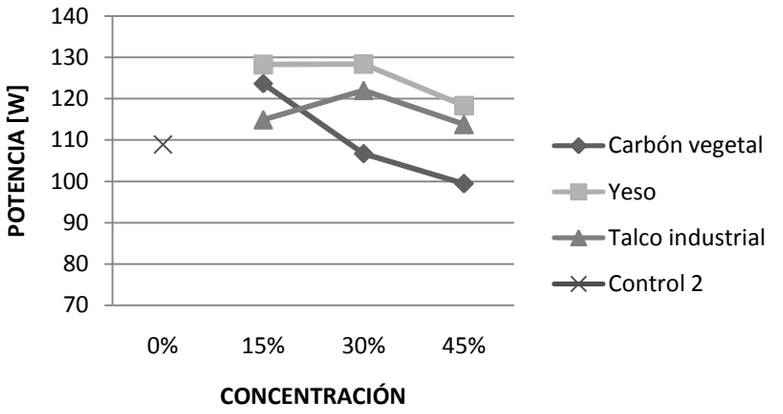



**Figura 14. Mecanizado con 1.5 mm de profundidad, velocidad de avance de 800 µm/s y velocidad de la fresa de 8000 rpm**

El menor consumo de potencia lo posee las probetas cargadas con carbón al 45% y al 30%, adicionalmente se identifica un comportamiento similar entre las curvas de yeso y talco.

En la figura 15 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una condición de corte con una velocidad de la fresa de 6000 rpm, profundidad de corte de 3 mm y velocidad de avance de 400 µm/s.

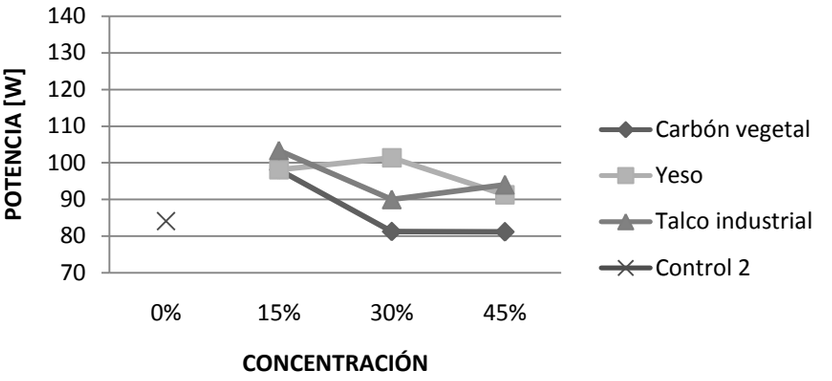



**Figura 15. Mecanizado con 3 mm de profundidad, velocidad de avance de 400 µm/s y velocidad de la herramienta de 6000 rpm**

Los datos obtenidos indicar que se obtiene potencias de mecanizado menores a las de mecanizar las muestra de control cuando se trabaja con las probetas cargadas con carbón al 30 y 45%, para los demás datos registrados se evidencia un consumo mayor que la muestra de control además se puede apreciar que para 15% de carga los tres materiales presentan un valor de potencia similar.

En la figura 16 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una la condición de corte con una velocidad de la fresa de 8000 rpm, profundidad de corte de 3 mm y velocidad de avance de 400 µm/s.

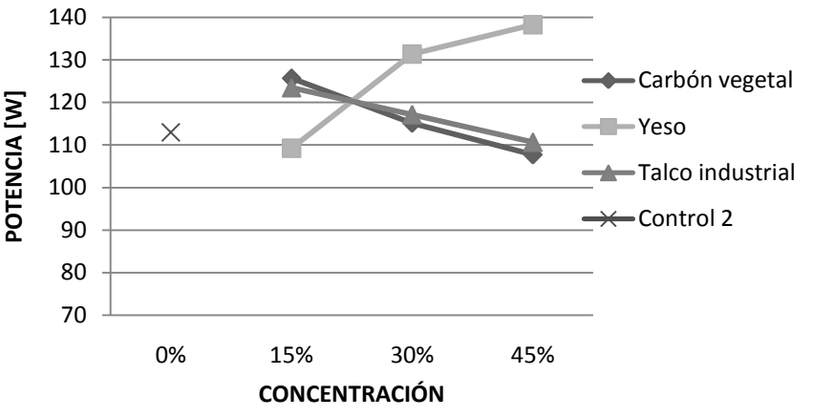



**Figura 16. Mecanizado con 3 mm de profundidad, velocidad de avance de 400 µm/s y velocidad de la fresa de 8000 rpm**

Se evidencia un comportamiento similar en las probetas cargadas con Talco y Carbón presentando una disminución en la potencia consumida conforme se aumenta la cantidad de carga adicionada a la probeta, por otro lado se presenta un comportamiento contrario en las probetas cargadas con Yeso para esta condición de corte.

En la figura 17 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una la condición de corte con una velocidad de la fresa de 6000 rpm, profundidad de corte de 3 mm y velocidad de avance de 800 µm/s.

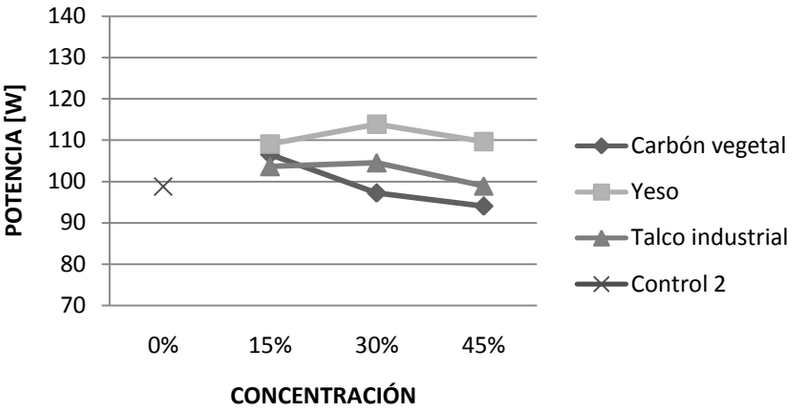



**Figura 17. Mecanizado con 3 mm de profundidad, velocidad de avance de 800 µm/s y velocidad de la herramienta de 6000 rpm**

La potencia consumida para las probetas cagadas con talco y yeso presentan un comportamiento aproximadamente estable a medida que se aumenta la cantidad de carga en la probeta, por otro lado, las probetas cargadas con carbón presentan un disminución de potencia a medida que la carga se incrementa indicando el menor consumo de potencia al mecanizar la probeta cargada con 45% de carbón.

En la figura 18 se muestran los resultados obtenidos de la potencia promedio consumida por el motor que mueve la herramienta de corte, para cada una de las piezas analizadas, bajo una la condición de corte con una velocidad de la fresa de 8000 rpm, profundidad de corte de 3 mm y velocidad de avance de 800 µm/s.

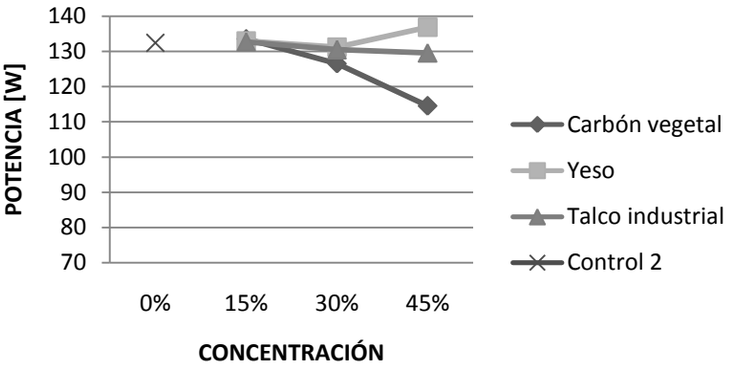



**Figura 18. Mecanizado con 3 mm de profundidad, velocidad de avance de 800 µm/s y velocidad del husillo de 8000 rpm**

Para esta condición de corte, la muestra de control y las probetas cargadas al 15% presentan el mismo valor de potencia consumida indicando un comportamiento diferente para cada carga, las probetas cargada con yeso muestra un incremento en la potencia consumida a medida que se aumenta la carga, las probetas cargadas con talco no presentan incremento a medida que se aumenta la cantidad de carga y las probetas cargadas con carbón presenta un disminución de potencia consumida a medida que se aumenta la carga.

- De todos los maquinados realizados el más agresivo con el motor es el hecho con las siguientes variables de maquinado: 800 µm/s; 3 mm; 8000 rpm. Generando la mayor cantidad de potencia consumida por el motor y el menos agresivo es el hecho con: 400 µm/s; 1.5 mm; 6000 rpm. mostrando la menor potencia consumida por el motor.
- Entre todas las probetas analizadas, la que se permite maquinar con menor cantidad de potencia consumida es la cargada con 45% de carbón vegetal ya que en todos los maquinados con excepción de los maquinados hechos a 400 µm/s; 1.5 mm; 6000 rpm y 400 µm/s; 1.5 mm; 8000r pm, presenta la menor cantidad de potencia demanda por el motor
- La probeta que requiere más cantidad de potencia para maquinar es la cargada con 45% de yeso

En la tabla 18 se muestra la potencia promedio para todos los maquinados realizados contemplando las diferentes condiciones de corte, en la primera columna se encuentra la probeta identificando el material usado como carga y la cantidad utilizada, en la segunda columna está la potencia promedio consumida en todos los mecanizados y en la tercera columna esta un número que identifica de menor a mayor potencia consumida siendo 1 el material que requiere menos potencia para ser maquinado y 10 el que requiere mayor potencia.

**Tabla 18. Potencia promedio de los maquinados realizados**

| CARGA | CANTIDAD [%] | POTENCIA PROM [W] |
|---|---|---|
| Carbón | 45 | 95.39 |
| | 30 | 98.70 |
| | 15 | 109.85 |
| Talco | 45 | 104.12 |
| | 30 | 109.30 |
| | 15 | 110.17 |
| Yeso | 45 | 112.96 |
| | 30 | 110.36 |
| | 15 | 107.85 |
| Muestra | - | 101.09 |

Al usar un 15% de carga en la resina de poliéster se aprecia una potencia de mecanizado similar, la cual disminuye a medida que aumenta la carga utilizada, con excepción del yeso, ya que a diferencia de las otras cargas aumenta la potencia de mecanizado proporcional al incremento de carga. Para las otras dos cargas (talco y carbón) en función del tipo de carga utilizada se disminuye en mayor medida la potencia requerida para el mecanizado.

Las probetas cargadas con talco presentan una disminución en la potencia de mecanizado a medida que se incrementa la cantidad de carga, pero las probetas

cargadas con carbón disminuyen en mayor cantidad, siendo estas las probetas que requieren menor potencia para ser maquinadas.

En la tabla 19 se describen la diferencia entre dos condiciones de corte, variando solo un parámetro, con el fin de identificar la influencia de las variables de mecanizado en la potencia consumida. Se presenta el promedio de potencia consumida entre todas las probetas mecanizadas, en función de las condiciones de corte dada. La columna 3 muestra la diferencia presente entre la potencia de mecanizado consumida para dos condiciones de corte iguales (ver círculos rojos), con excepción de la velocidad de la herramienta de corte (ver circulo verde). Para las columnas 4 y 5 se sigue el mismo procedimiento tomando dos condiciones de corte similares en las cuales varíe la profundidad de corte para la columna 5 y la velocidad de avance para la columna 6.

**Tabla 19. Relación condición de corte con potencia de mecanizado**

| Condición de corte | Potencia consumida [W] | Diferencia velocidad fresa [W] | Diferencia profundidad [W] | Diferencia avance [W] |
|---|---|---|---|---|
| 400 µm/s, 6000 rpm, 1.5 mm | 83.73 | 29.01 | 8.52 | 6.09 |
| 400 µm/s, 8000 rpm, 1.5 mm | 112.74 | - | 6.44 | 3.67 |
| 800 µm/s, 6000 rpm, 1.5 mm | 89.82 | 26.58 | 13.78 | - |
| 800 µm/s, 8000 rpm, 1.5 mm | 116.41 | - | 13.65 | - |
| 400 µm/s, 6000 rpm, 3 mm | 92.26 | 26.92 | - | 11.35 |
| 400 µm/s, 8000 rpm, 3 mm | 119.18 | - | - | 10.88 |
| 800 µm/s, 6000 rpm, 3 mm | 103.61 | 26.45 | - | - |
| 800 µm/s, 8000 rpm, 3 mm | 130.07 | - | - | - |

En la tabla anterior se identifican las diferentes condiciones corte del material y su influencia en el mecanizado, teniendo como apoyo los datos reflejados en las columnas 4, 5 y 6 se puede identificar cuales variables incrementan en mayor medida la potencia de mecanizado al elevarlas, la velocidad de avance es la que menor influye en el aumento de la potencia de mecanizado seguida por la profundidad de corte sin tener una diferencia alta, por otro lado al aumentar la velocidad del husillo se tiene un aumento

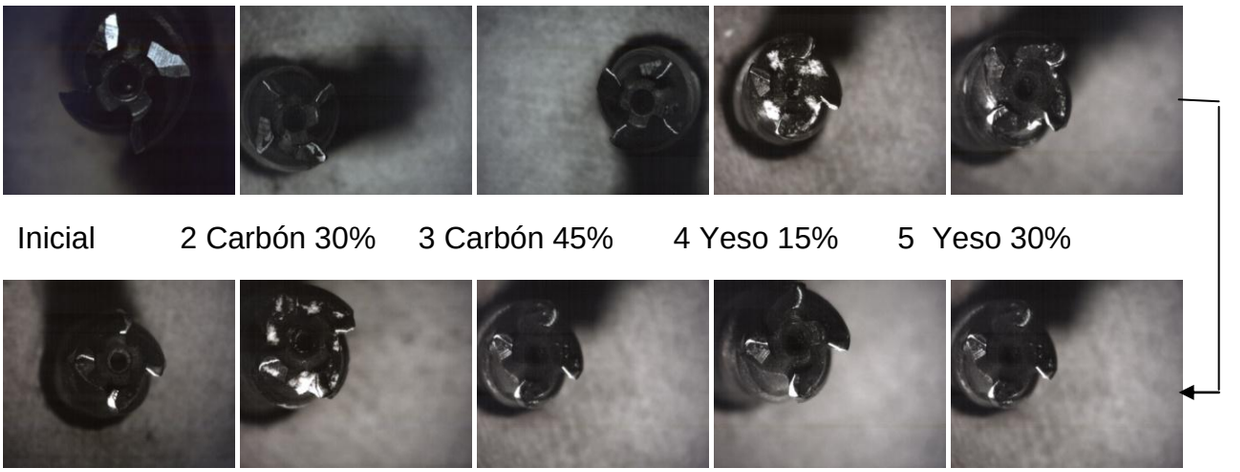
significativo en la potencia consumida, siendo esta la variable de mayor influencia en el consumo de potencia.

## 3.4. ANÁLISIS DEL DESGASTE EN LA HERRAMIENTA DE CORTE.

Las condiciones de corte y el material utilizado influyen en el desgaste de la herramientas de corte, en función de dichos elementos se identifica cuales condiciones de mecanizado y materiales son más agresivos con la herramienta generando una disminución en la vida útil, las condiciones de desgaste se pueden evidenciar por medio del seguimiento a la apariencia de la fresa, en esta sección se comparan las imágenes tomadas de la herramienta de corte antes y después del mecanizado.

A continuación se presenta una secuencia de imágenes identificando el deterioro de la herramienta de corte a medida que es usada para mecanizar las probetas. Cada serie de imágenes costa de 8 fotografías en las cuales se comienza con la condición inicial de la herramienta (sin ser utilizada) y se continúa con las fotos tomadas según el orden del material mecanizado. Por cada condición de corte usada hay una fresa, por tanto hay 8 fresas usadas, para cada una de las cuales se muestran 10 fotografías, una por cada pieza que es mecanizada,

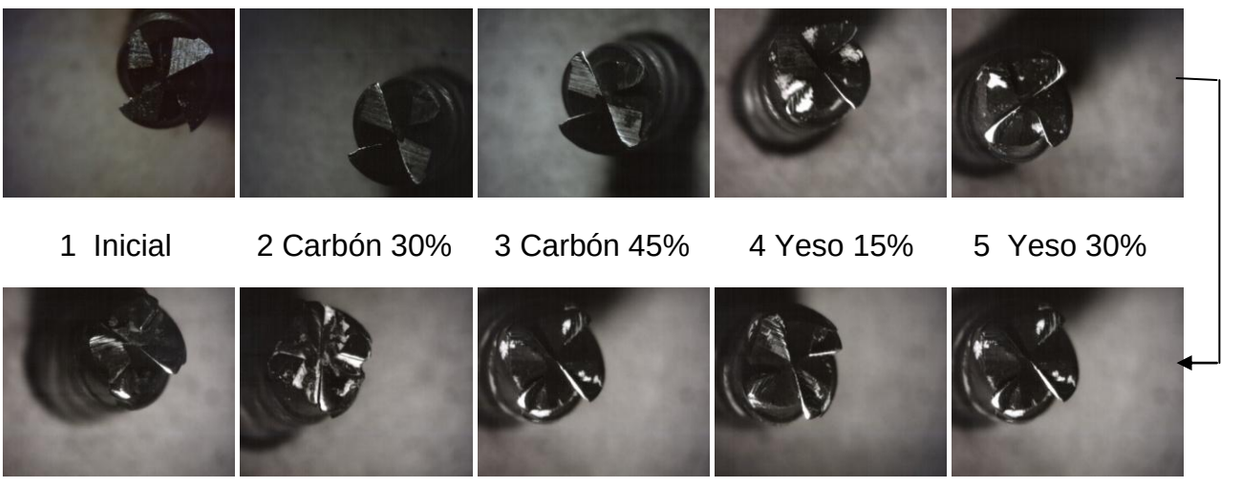
**Imagen 19. Fresa 1 condición de corte 400 µm/s, 6000 rpm, 1.5 mm**



1 Inicial 2 Carbón 30% 3 Carbón 45% 4 Yeso 15% 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% 9 Talco 15% 8 Yeso 45% 7 Talco 45% 6 Talco 30%

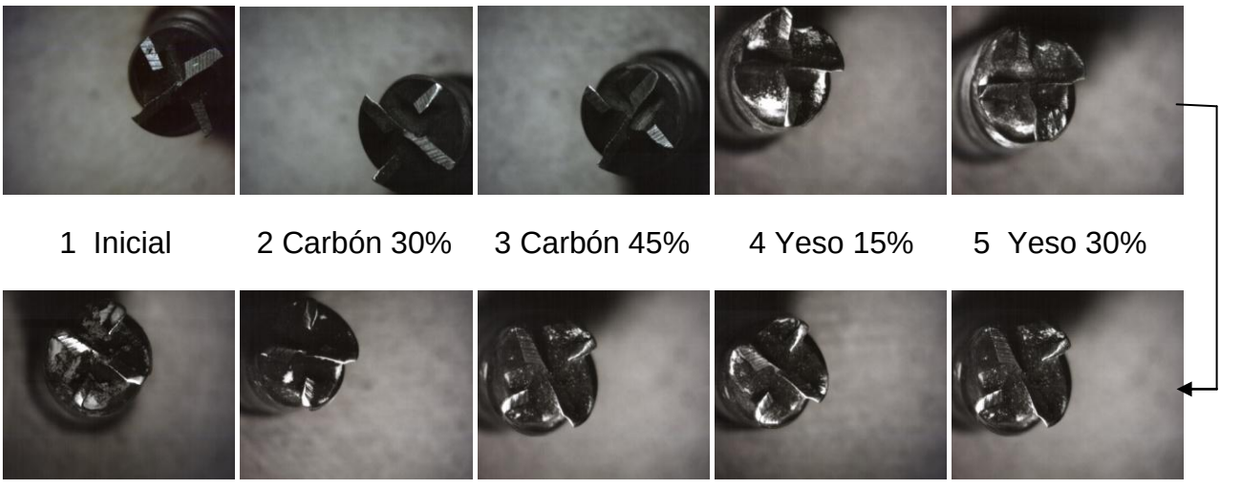
**Imagen 20. Fresa 2 condición de corte 400 µm/s, 8000 rpm, 1.5 mm**



1 Inicial 2 Carbón 30% 3 Carbón 45% 4 Yeso 15% 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% 9 Talco 15% 8 Yeso 45% 7 Talco 45% 6 Talco 30%

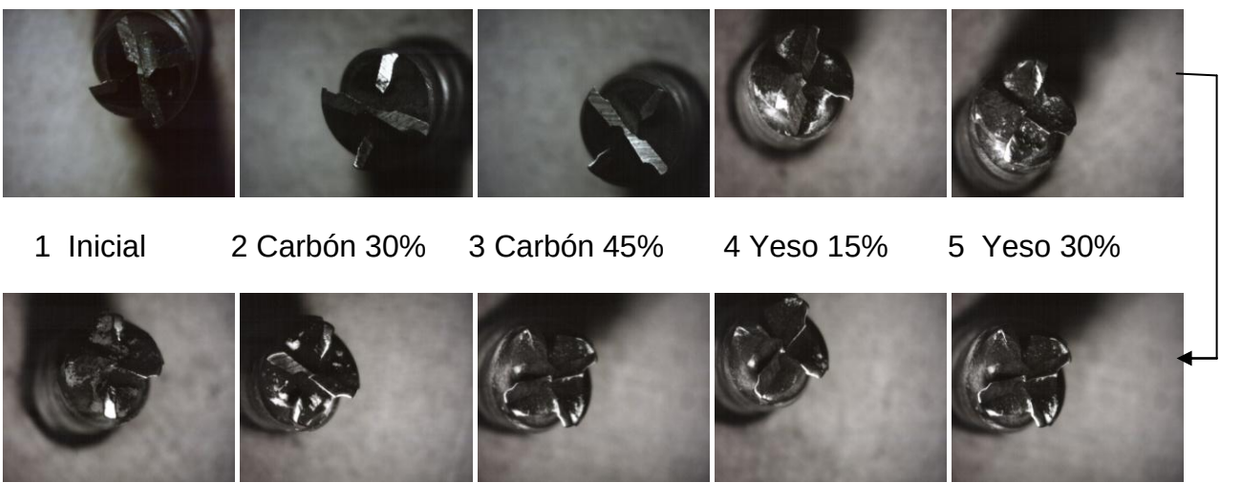
**Imagen 21. Fresa 3 condición de corte 800 µm/s, 6000 rpm, 1.5 mm**



1 Inicial 2 Carbón 30% 3 Carbón 45% 4 Yeso 15% 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% 9 Talco 15% 8 Yeso 45% 7 Talco 45% 6 Talco 30%

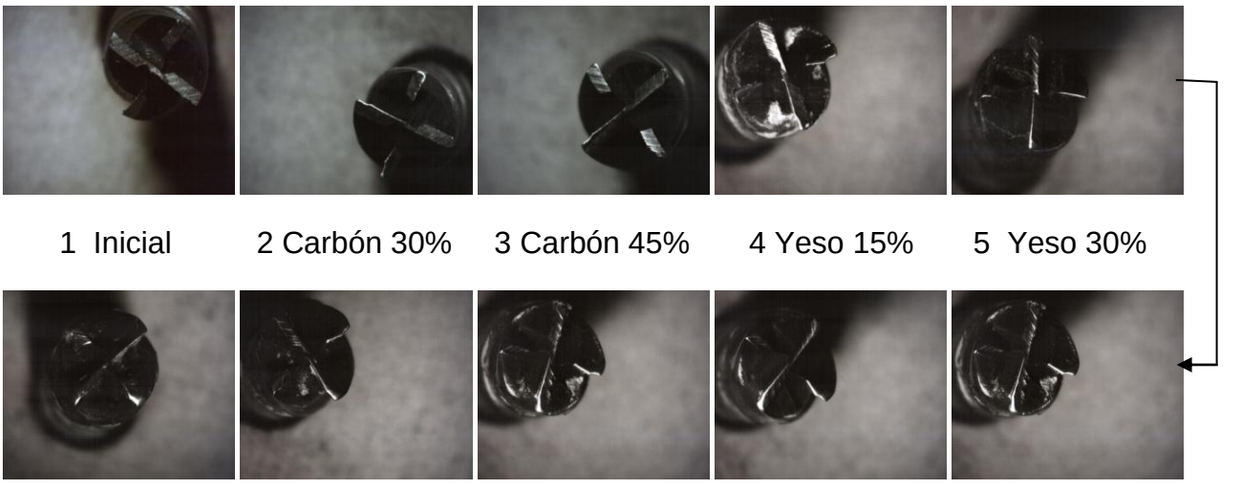
**Imagen 22. Fresa 4 condición de corte 800 µm/s, 8000 rpm, 1.5 mm**



1 Inicial 2 Carbón 30% 3 Carbón 45% 4 Yeso 15% 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% 9 Talco 15% 8 Yeso 45% 7 Talco 45% 6 Talco 30%

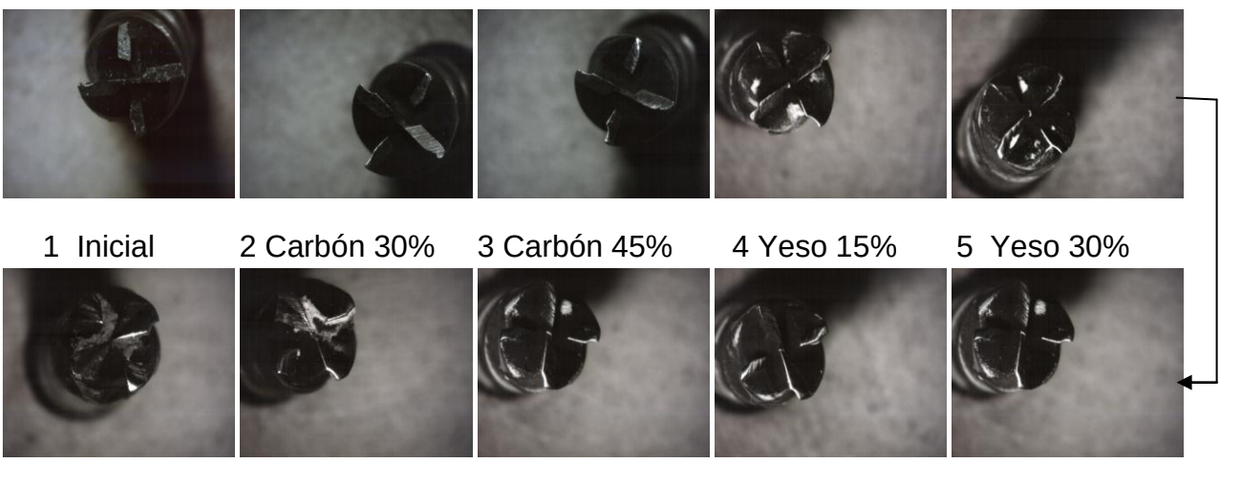
**Imagen 23. Fresa 5 condición de corte 400 µm/s, 6000 rpm, 3 mm.**



1 Inicial | 2 Carbón 30% | 3 Carbón 45% | 4 Yeso 15% | 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% | 9 Talco 15% | 8 Yeso 45% | 7 Talco 45% | 6 Talco 30%

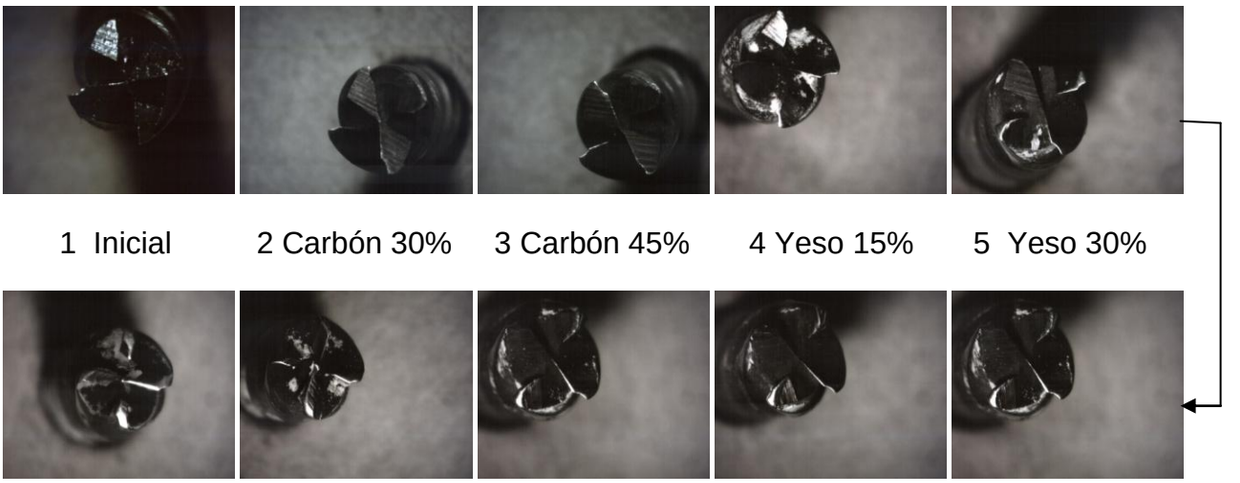
**Imagen 24. Fresa 6 condición de corte 400 µm/s, 8000 rpm, 3 mm.**



1 Inicial | 2 Carbón 30% | 3 Carbón 45% | 4 Yeso 15% | 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% | 9 Talco 15% | 8 Yeso 45% | 7 Talco 45% | 6 Talco 30%

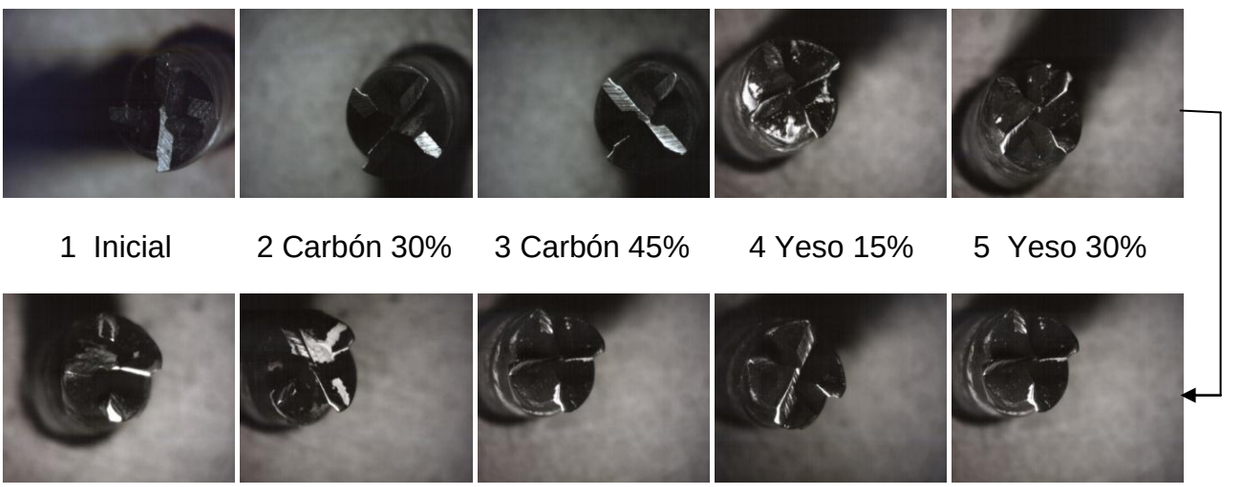
**Imagen 25. Fresa 7 condición de corte 800 μm/s, 6000 rpm, 3 mm.**



1 Inicial 2 Carbón 30% 3 Carbón 45% 4 Yeso 15% 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% 9 Talco 15% 8 Yeso 45% 7 Talco 45% 6 Talco 30%

**Imagen 26. Fresa 8 condición de corte 800 μm/s, 8000 rpm, 3 mm.**



1 Inicial 2 Carbón 30% 3 Carbón 45% 4 Yeso 15% 5 Yeso 30%

10 Carbón 15% 9 Talco 15% 8 Yeso 45% 7 Talco 45% 6 Talco 30%

Comparando las imágenes de la condición inicial de la herramienta de corte y las imágenes del último mecanizado realizado, se pueden identificar condiciones de desgaste propias de las condiciones de mecanizado:

- Para las condiciones de corte representadas por las fresas 1, 2 y 5 Se presenta desgaste notable en la cual se ve una pérdida importante del filo de la herramienta, presentado un redondeo en el borde de ataque y poca adherencia del material mecanizado.
- Para la condición de corte  1.5 mm, 800 µm/s, 6000 rpm (Fresa 3) se presenta desgaste en el borde de ataque junto con un redondeo, pero la geometría de del filo se mantiene, además se presenta mucha adherencia de material en la cara siguiente al borde de ataque.
- Para las condiciones de corte representadas por las fresas 4, 6, 7 y 8. Se presenta una condición de desgaste notable en la cual se ve una pérdida importante del filo de la herramienta, presentado un redondeo en el borde de ataque y adherencia de material en la herramienta de corte.

En las imágenes 27 y 28  se muestra el filo de una herramienta de corte en su condición inicial y final respectivamente.

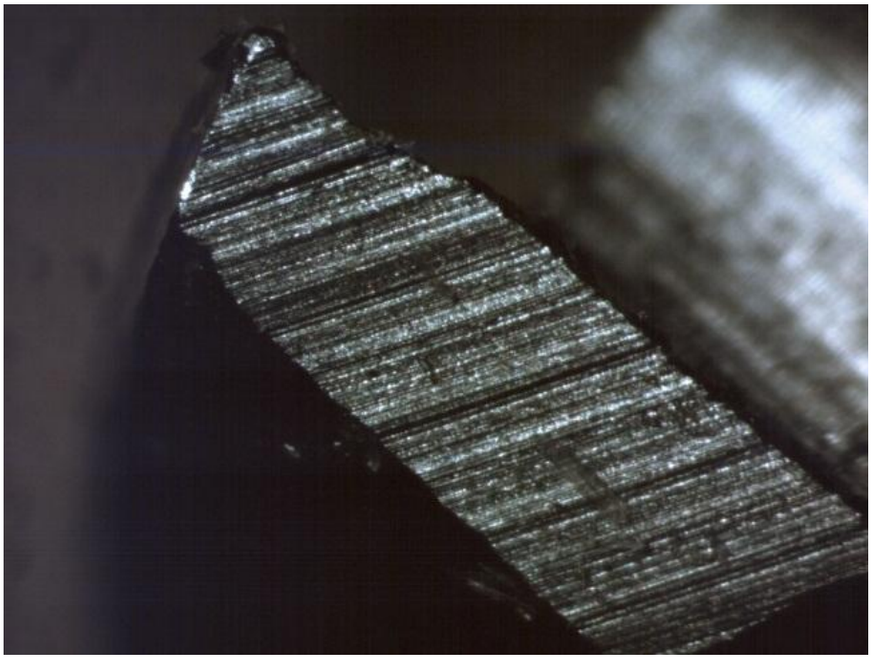


**Imagen 27. Fotografía del filo 1 de la fresa 3 en su  condición inicial**

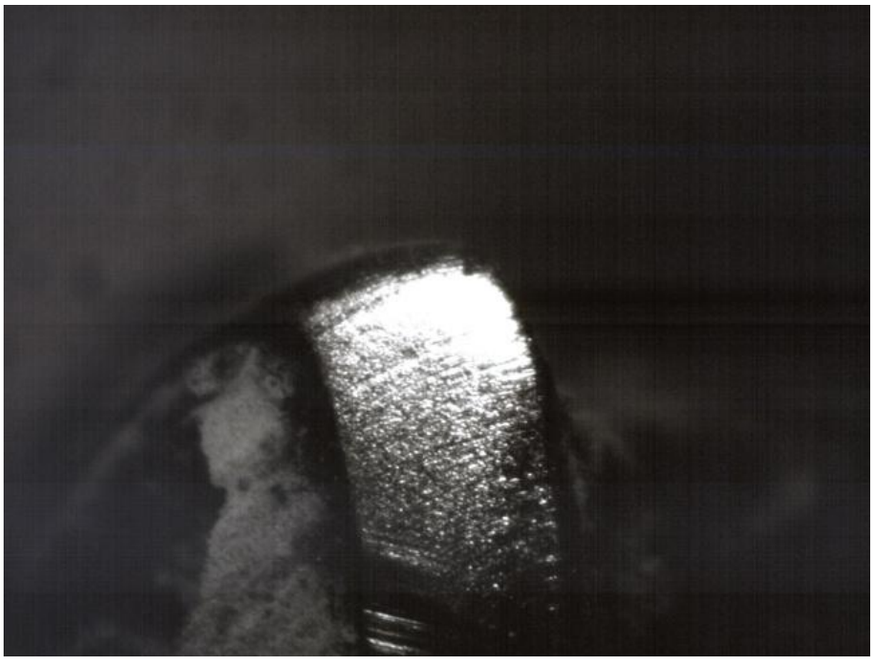


**Imagen 28. Fotografía del filo 1 de la fresa 3 en el último mecanizado realizado a la probeta cargada con talco al 15%**

En función del material de corte se tienen condiciones de desgaste aceleradas, indicando cuales cargas resultan más abrasivas con la herramienta, al comparar las imágenes tomadas se puede apreciar un aumento en el desgate de la herramienta al maquinar las probetas cargadas con yeso presentando redondeos en el borde de ataque más pronunciados que al maquinar probetas cargadas con talco o carbón, por lo tanto el yeso resulta ser el material más abrasivo presentando mayor deformación de la herramienta y mayor cantidad de material adherido.

Para aclarar el mecanismo de contacto que ocurre al mecanizar una pieza fue necesario realizar fotografías por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM), presentando imágenes con mayor aumento de la herramienta de corte al igual que una mayor resolución de los efectos de un mecanizado prolongado sobre diferentes materiales.

En la imagen 29 tomada a la fresa 3 a 50 aumentos, la cual representa las condiciones de corte (Profundidad 1.5 mm, Avance 800 µm/s, velocidad de la fresa 6000 rpm) se puede apreciar la acumulación de material depositado en la herramienta de corte entre

los filos, además una adhesión de material en el filo de la misma presentando una sección cubierta por una capa delgada de material. Para las demás condiciones de corte se presenta el mismo fenómeno, siendo mayor en esta.

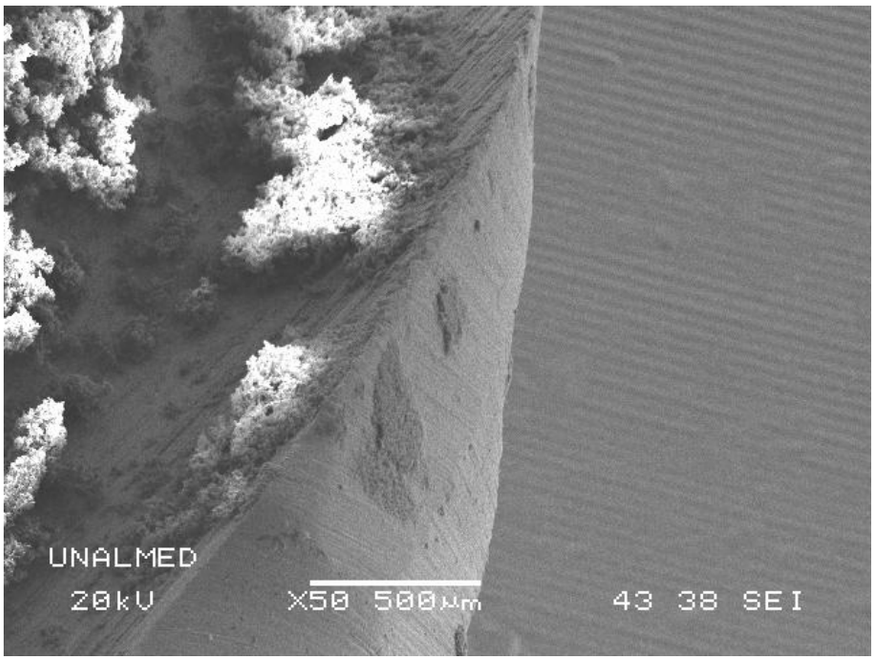



**Imagen 29. Micrografía SEM para la Fresa 3 a 50 aumentos**

Se logra evidenciar un efecto común en la herramienta, presentando fatiga en la fresa. En la imagen 30 se muestra la fresa número 3 después de realizar los mecanizados con una imagen a 23 aumentos, identificando varios mecanismos de desgaste, entre estos la disminución en el filo como se indica en el ovalo rojo.En este se muestra como hay una pérdida de material en el borde de ataque a medida que se aproxima al final de la herramienta de corte,esto indica un disminución en las fuerzas de cortea medida que se aleja del punto de contactocon la pieza, evidenciado por la curvatura presente en el borde de ataque, además se muestra un redondeo formado por el constante uso de la herramienta evidenciando perdida del filo y deformación.

Para las demás fresas se encuentra la misma condición de desgaste, presentando una diferencia en las fresas cuyo maquinado fue hecho a 3mm de profundidad, para estas el desgaste es más pronunciado.

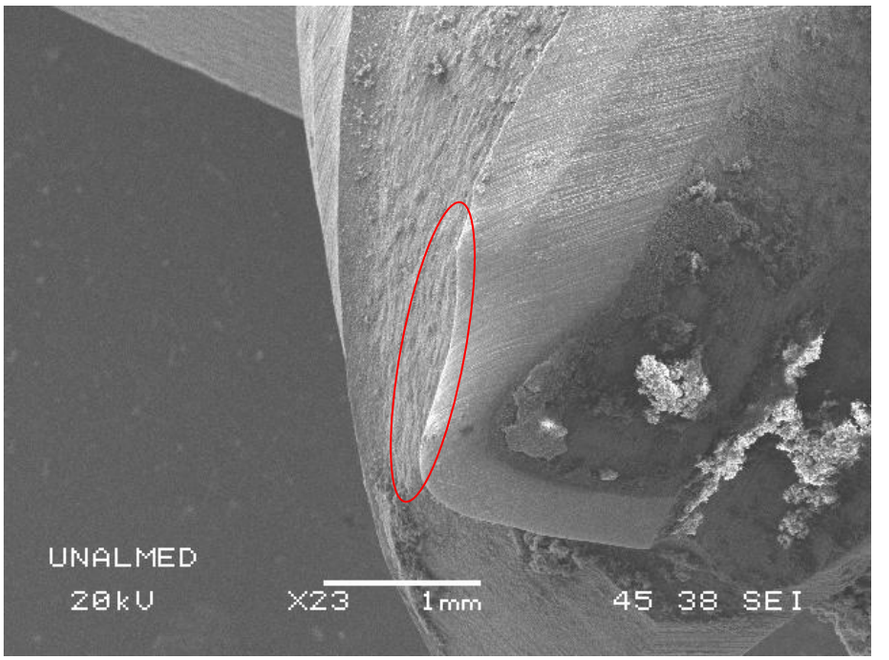



**Imagen 30. Micrografía SEM para la Fresa 3 a 23 aumentos**

En la imagen 31 se puede apreciar cómo se dan pequeñas zonas en las cuales se presenta desprendimiento de material por parte de la herramienta de corte manifestando una forma de desgaste en la misma, estas zonas se evidencian como partes oscuras en la imagen, además se puede apreciar unos brillos los cuales representan partículas de polvo o poca adhesión de oro.

En la imagen se ven líneas paralelas atribuidas a la dirección en la que es evacuada la viruta a la hora de mecanizar, esto indica el desgaste que tiene el material sobre la herramienta manifestando un efecto de arado sobre la superficie de contacto entre los materiales.

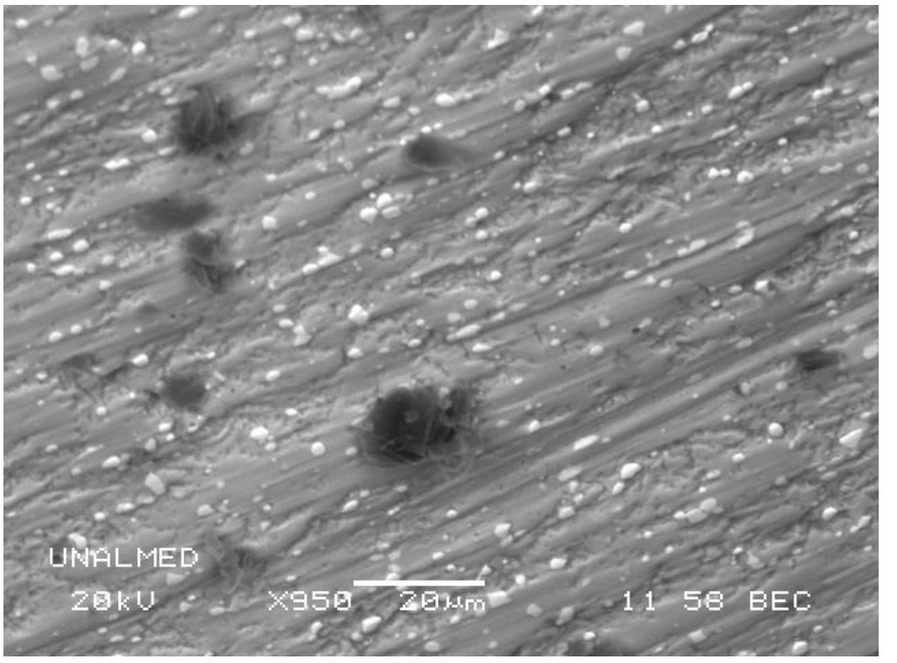



**Imagen 31. Micrografía SEM para la Fresa 8 a 950 aumentos**

Como se muestra en la figura 19, al chocar la herramienta de corte con una partícula suspendida en la matriz tiende a arrancarla dejando un espacio hueco en la superficie que varia la rugosidad y por ende el acabado de la pieza, razón por la cual un tamaño de grano menor indica superficies homogéneas después del mecanizado.

La figura 19 se divide en tres partes las cuales muestran un representación de como se desprende una partícula al momento de mecanizar, esto se da por el contacto de la herramienta de corte con la partícula (carga) a la cual le es más fácil desprenderse que partirse, esto depende de la dureza del material utilizado como carga y la interacción presente entre la carga y la matriz.

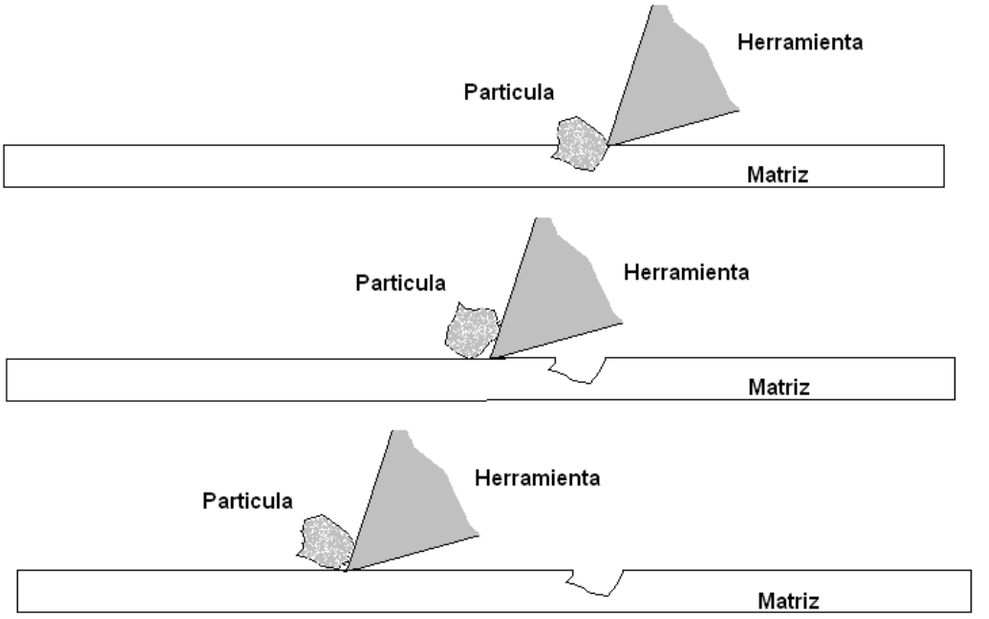



**Figura 19. Esquema de arranque de viruta**

# CAPITULO 4.

## 4. CONCLUSIONES

En el orden en el que se exponen los resultados y análisis de este trabajo, también se presentan las conclusiones sobre cada ensayo realizado:

- Al analizar cual carga disminuye en mayor medida la dureza de la probeta se evidencia que el uso del carbón presentan una disminución importante en la dureza del material a maquinar, dando de esta forma una idea de cuál es la probeta cargada que se deja mecanizar con mayor facilidad.

- Tomando los resultados del análisis de dureza de las probetas y la potencia consumida por el equipo durante el mecanizado, se puede encontrar una relación, identificando en las probetas que tienen disminución en la dureza, menor consumo de potencia.

- Para ver la influencia de las variables de mecanizado sobre la potencia consumida al momento de mecanizar, es necesario tomar por aparte cada una de las tres variables analizadas, al comparar la profundidad de corte, velocidad de avance y velocidad de la herramienta de corte, se evidencia una variable que sobresale sobre las demás al aumentar su valor. La velocidad de avance es la variable que menos influye en el aumento de potencia dando una diferencia de 8 W seguida por la profundidad de corte con una diferencia de 10 W, pero sin duda alguna la variable que más afecta el consumo de potencia es el aumento en la velocidad del husillo generando un incremento de 27 W de las probetas maquinadas a 6000 rpm con las 8000 rpm. En la tabla 20 se muestran las condiciones de corteen orden de menor a mayor respecto a la potencia requerida para mecanizar.

**Tabla 20 Orden en consumo de potencia según condiciones de corte (de menor a mayor consumo)**

| Condición de corte |
|---|
| 400 µm/s, 6000 rpm, 1.5 mm |
| 800 µm/s, 6000 rpm, 1.5 mm |
| 400 µm/s, 6000 rpm, 3 mm |
| 800 µm/s, 6000 rpm, 3 mm |
| 400 µm/s, 8000 rpm, 1.5 mm |
| 800 µm/s, 8000 rpm, 1.5 mm |
| 400 µm/s, 8000 rpm, 3 mm |
| 800 µm/s, 8000 rpm, 3 mm |

- Para las cargas analizadas se encuentra un común denominador el cual evidencia que al aumentar la concentración de carga en la probeta disminuya la cantidad de potencia consumida durante el mecanizado con excepción del yeso.

- Analizando los materiales respecto al consumo de potencian se evidencia una disminución al usar carbón vegetal como carga siendo las probetas cargadas con esta las que se dejan mecanizar con menor consumo de potencia.

- Hablado del material usado como carga y el desgaste de la herramienta al mecanizar, se presenta que las probetas cargadas con yeso muestran una condición de desgaste mayor en la herramienta de corte sugiriendo que este material el más abrasivo de las cargas analizadas seguido por el talco industrial.

- Comparando las imágenes iniciales y finales de las herramientas de corte se alcanza a apreciar un desgaste ligeramente mayor para las condiciones de corte 3 (800 µm/s, 6000 rpm, 1.5 mm), 4 (800 µm/s, 8000 rpm, 1.5 mm), 7(800 µm/s, 6000 rpm, 3mm) y 8 (800 µm/s, 8000 rpm, 3 mm). De estas variables se aprecia un común denominador (velocidad de avance), esto indica que la variable de mecanizado que presenta mayor influencia en el desgaste de la herramienta es el la velocidad de avance.

- Analizado las imágenes obtenidas por la SEM, se pueden identificar dos mecanismos de desgaste en la herramienta de corte, uno por adhesión del material de las probetas mecanizadas en le herramienta de corte y desgaste por abrasión en la herramienta de corte, identificándose en las imágenes como cambio en la geometría del filo de la fresa como bordes redondeados y marcas de arado.

## REFERENCIAS


1. Abrao, A. F. (2007). Drilling of fiber reinforced plastics: A reiew. *186* (1-7).
2. Alauddin, M. C. (1995). Plastics and their machining: a review. *54* (40-46).
3. Botero, M., & Vanegas, J. A. (2002). *Cargas ceramicas en plasticos reforzados.* Medellín: Trabajo de grado Universidad Pontificia Bolivariana.
4. C., M. M. *Tribology on the small scale.* OXFORD.
5. Company, T. T. (30 de 11 de 2013). *Probadores de dureza portátiles en China*. Recuperado el 30 de 11 de 2013, de Probadores de dureza portátiles en China: http://www.hardnesstester.es/
6. Company, W. H. (1 de 1 de 2011). *wilson-hardness*. Recuperado el 6 de 6 de 2013, de wilson-hardness: www.wilson-hardness.com
7. Coromant, S. (15 de Febrero de 2013). *sandvik.coromant*. Recuperado el 15 de Febrero de 2013, de http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece_materials/the_specific_cutting_force/pages/default.aspx
8. Correa, J. C. (2005). *Gestion de calidad del proceso de moldeado por aspersion de poliester insaturado reforzado con fribras de vidrio.* Medellín: Trabajos de Grado Universidad Pontificia Bolivariana.
9. Correa, M. B. (2008). *Caracterizacion de un poliéster insaturado cargado con residuos provenientes de la fabricación de botones.* Medellin.
10. Focus Technology Co., L. (2013). *Shenzhen Jintaier Instrument Co., Ltd.* Recuperado el 2013, de Shenzhen Jintaier Instrument Co., Ltd.: es.made-in-china.com/co_christie-lin/product_Zoom-Stereo-Microscope-XTL-2800-_hruyhiyyg.html

11. Gerling, H. (1964). *Alrededor de las máquinas-herramientas.*
12. Guía de Refencia CNC dek operador. (s.f.).
13. Gutierrez, E. (2004). *Desarrollo del poliéster insaturado un inventario de aplicaciones.* medellin.
14. INSERTOS, R. E. (2000). Mazini, N. E. Blanco, J. M. Iurman, L. Ziegler, D. (475-462).
15. International, A. (1989). ASM Handbook. En A. International, *ASM Handbook* (Vol. 16).
16. *LosAdhesivos.com*. (s.f.). Recuperado el 2 de Abril de 2012, de LosAdhesivos.com: http://losadhesivos.com/termoplastico.html
17. *LosAdhesivos.com*. (2011). (LosAdhesivos.com) Recuperado el 2 de Abril de 2012, de LosAdhesivos.com: http://losadhesivos.com/termoplastico.html
18. Mechanical reinforcement of unsaturated polyester by AL2O3 nanoparticles2004 *58*408-412
19. OIL, C. O. (2010). Sepulveda, Marcos. Montes, Rodrigo. Pelaez, Carolina. Jaramillo, Natalia. Hernandez, Carlos. Diana, Lopez.
20. Orrego, N., & Vélez, R. (1987). *El poliéster insaturado reforzado con fibras de vidrio y no reforzado.* Medellín: Andercol S.A.
21. P.GROOVER, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna.* Prentice Hall.
22. papel, F. y. (2008). *Delgado, David.* Medellin.
23. R, T. (s.f.). Machining of composite materials.
24. Rivera, A. (s.f.). Guía de referencia CNC del operador . *Guía de referencia CNC del operador* . Mexíco, México: Haas Factory Outlet.
25. R-Luis. (s.f.). (San Salvador del Jujuy) Recuperado el 25 de Marzo de 2013, de http://r-luis.xbot.es/cnc/codes03.html

26. Working Whit Polyester. (s.f.).

## ANEXOS

Medellín, 1 de noviembre de 2013

**A QUIEN INTERESE:**

Por medio de la presente se hace constar que **Santiago Cardona, Daniel Peláez y Santiago Betancourt.**, participaron en calidad de expositor de poster en el **VII Congreso Internacional de Materiales**, realizado entre el 29 octubre y el 1 de noviembre de 2013 en Medellín, Colombia.

Ponencia poster: ***Influencia del tipo de carga sobre el mecanizado de materiales compuestos de poliéster insaturado.***.
*ID:**147***

María Esperanza López Gómez
**Universidad de Antioquia**

Néstor Ricardo Rojas Reyes
**Universidad Nacional de Colombia**

Patricia Fernández Morales
**Universidad Pontificia Bolivariana**

Mónica Lucía Álvarez Láinez
**Universidad EAFIT**