



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSTGRADOS

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS
POR COMPUTADOR, PRIMERA PROMOCIÓN CICLO
2014-2016**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE MAGISTER EN: MANUFACTURA Y
DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR**

**TEMA: FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SUELA DE
CALZADO PARA PERSONAS CON MAL FORMACIÓN DE
PIE MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS CAD-CAM**

AUTOR:

ING. SOLÍS SANTAMARÍA, SANTIAGO ISAAC.

DIRECTOR:

ING. M. Sc. OLMEDO SALAZAR, JOSÉ FERNANDO

SANGOLQUÍ - 2017



DEPARTAMENTO DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR

CERTIFICADO

Ing. M. Sc. Olmedo Salazar José Fernando

CERTIFICA

Que el trabajo titulado “FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SUELA DE CALZADO PARA PERSONAS CON MAL FORMACIÓN DE PIE MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS CAD-CAM” realizado por el ingeniero Santiago Isaac Solís Santamaría, ha sido guiado, revisado periódicamente y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar para que se sustente públicamente.

Sangolquí, Agosto del 2017.

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Sr. Fernando Olmedo, sobre un fondo blanco.

Ing. MsC. Fernando Olmedo

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Ing. Santiago Isaac Solís Santamaría

DECLARO QUE:

El trabajo de titulación “FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SUELA DE CALZADO PARA PERSONAS CON MAL FORMACIÓN DE PIE MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS CAD-CAM”, realizado por el ingeniero Santiago Isaac Solís Santamaría, ha sido guiado, desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de titulación en mención.

Sangolquí, Agosto del 2017.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Santiago Solís'.

Ing. Santiago Isaac Solís Santamaría

AUTOR



DEPARTAMENTO DE POSTGRADO

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

AUTORIZACIÓN

Ing. Santiago Isaac Solís Santamaría

AUTORIZO A:

La Universidad de las Fuerzas Armada – ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SUELA DE CALZADO PARA PERSONAS CON MAL FORMACIÓN DE PIE MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS CAD-CAM”, cuyo contenido ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad

Sangolquí, Agosto del 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Santiago Solís', with a large, stylized flourish above it.

Ing. Santiago Isaac Solís Santamaría

AUTOR

DEDICATORIA

Dedico mi esfuerzo reflejado en esta investigación.

A Dios, a mi Padre que con su esfuerzo me apoyado en toda la trayectoria del programa, a mi Madre quien me inculcó que la perseverancia y lucha constante son el medio para obtener lo deseado, quienes fueron los que me indujeron en un camino de bien y de superación en esta etapa que era un sueño y hoy es una realidad.

Santiago Isaac Solís Santamaría

AGRADECIMIENTO

A Dios, por colmar mi vida de bendiciones.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas, al Centro de Postgrados, a mis docentes, a mi tutor Ing. Fernando Olmedo por su guía y tutoría, a mi familia en especial mi Padre y Madre, quienes estuvieron siempre prestos a brindarme su ayuda.

Santiago Isaac Solís Santamaría

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 CERTIFICADO	ii
2 DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
3 AUTORIZACIÓN	iv
4 DEDICATORIA	v
5 AGRADECIMIENTO	vi
6 ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
7 ÍNDICE DE TABLAS	xv
8 ÍNDICE DE ECUACIONES	xvi
9 RESUMEN	xvii
10 ABSTRACT	xviii
1 CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	1
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.4 MARCO TEÓRICO	2
1.4.1 Diseño de Moldes	2
1.4.2 Selección de Material del Molde	3
1.4.3 Sistema de Alimentación	5
1.4.4 Determinación del Espesor de las Paredes del Molde	5
1.4.5 Simulación del Molde	6
1.5 ESCÁNER 3D	6
1.5.1 Tipos de Escáneres 3D	7
1.5.2 Escáner 3D en la Industria	8
1.5.3 Escaneado 3D de Pies	8

1.6	CARACTERÍSTICAS DE HERRAMIENTAS CAD-CAM.....	9
1.6.1	Modelos de Malla de Polígonos.....	9
1.6.2	Modelos de superficies.....	9
1.6.3	Modelos sólidos CAD	10
2	CAPÍTULO 2	11
2.1	ESCANEO 3D DEL PIE CON MAL FORMACIÓN.	11
2.1.1	El Pie Humano.....	11
2.1.2	Pie con Deformación Caso de Estudio	14
2.1.3	Escaneado de los Pies Caso de Estudio	15
2.2	DISEÑO DE UN MOLDE MEDIANTE CAD.....	21
2.2.1	Obtención de Curvas Base.....	23
2.2.2	Diseño de las Suelas.....	26
2.2.3	Diseño del Molde para la suela del pie con deformidad.	28
2.3	PARAMETRIZACIÓN DE LA MANUFACTURA DE UN MOLDE MEDIANTE CAM.....	36
2.3.1	Bloque de Material o Stock.....	37
2.3.2	Operación de Perfilado.....	38
2.3.3	Operación de Perforado	46
2.3.4	Desbaste Horizontal	48
2.3.5	Terminado Paralelo.....	51
2.3.6	Vaciado 3D.....	53
2.3.7	Mecanizado de Curva.....	55
2.3.8	Generación de una platilla de parametrización.....	57
2.4	SIMULACIÓN DE MECANIZADO	60
3	CAPÍTULO 3	65
3.1	Determinación de herramientas adecuadas para la manufactura.	65

3.2	Seteo y parametrización de la maquina CNC	68
3.2.1	Ubicación de las Herramientas.....	68
3.2.2	Ubicación del Material.	71
3.2.3	Procedimiento para ajustar la altura de la herramienta.	73
3.3	Mecanizado del Molde.	74
3.3.1	Obtención del Código G	74
3.4	Vulcanizado de la suela.	76
3.4.1	Proceso de vulcanizado del NBR	78
3.5	Prototipado de la suela.....	78
3.5.1	Impresión 3D	79
3.6	Impresión del Prototipo de la Suela.....	81
3.6.1	Cura Software.....	81
4	CAPÍTULO 4	89
4.1	Análisis económico para la elaboración de una suela de calzado personalizado.....	89
4.2	Análisis del tiempo que conlleva la fabricación de la suela personalizada.....	91
4.3	Análisis y Pruebas efectuadas en el Prototipo de la suela realizada para personas con deformidad en el pie.....	92
4.3.1	Medición de Dureza Shore	93
4.3.2	Ensayo de Flexión	94
4.3.3	Ensayo de Abrasión	96
4.4	Estimación de las personas que serán favorecidas por el estudio.	98
4.5	Propuesta de proceso de fabricación de suelas personalizadas.....	99
4.6	Conclusiones.....	101
4.7	Recomendaciones.....	102
4.8	Bibliografía	103

1 ANEXO 1.....	106
2 ANEXO 2.....	111
3 ANEXO 3.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de diseño del molde	3
Figura 2. Huesos del Pie.	12
Figura 3. Arcos del Pie.	13
Figura 4. Puntos de Apoyo del Pie.	14
Figura 5. Pie con osteomielitis.....	15
Figura 6. Pie con deformidad calzado, plantilla y zapato usados actualmente por Moisés Arcos.....	16
Figura 7. Escáner 3D.....	17
Figura 8. Ícono de Ajustes para el escaneo.....	18
Figura 9. Trípode Adaptado para el escáner 3D.....	19
Figura 10. Pie Izquierdo.....	20
Figura 11. Pie Izquierdo sin realizar ediciones	20
Figura 12. Pies escaneados y borrado de elementos no deseados. ...	21
Figura 13. Mallado poligonal del pie con deformidad caso de estudio. 22	
Figura 14. Curvas del pie (cantoneo, huella, y cierre)	23
Figura 15. Curva de cierre, planta y huella	24
Figura 16. Diseño de la parte interior y lateral de la suela.....	25
Figura 17. Modelo de Huella para la suela.	25
Figura 18. Diseño de la huella y parte lateral de la suela.	26
Figura 19. Suela izquierda.....	27
Figura 20. Suela derecha.	27
Figura 21. Pie izquierdo calzando la suela.	28
Figura 22. Esfuerzos que actúan sobre las paredes laterales del molde.....	30
Figura 23. Perfil del molde para la cavidad del pie izquierdo.....	31
Figura 24. Molde de la cavidad para el pie izquierdo.....	32
Figura 25. Perfil del molde para la cavidad del pie derecho	32
Figura 26. Molde de la Cavidad del pie derecho	32
Figura 27. Molde rotado 180°	33
Figura 28. Diseño de economizadores en la punta y talón.	34
Figura 29. Perfil para diseñar el economizador.	34

Figura 60. Vaciado 3D con herramienta 3mm de diámetro plana.....	56
Figura 61. Generar una plantilla de un mecanizado.	57
Figura 62. Recorrido de la herramienta para la tapa del molde.	58
Figura 63. Cuadro de diálogo de la Simulación	61
Figura 64. Controles de visibilidad.....	61
Figura 65. Simulación del mecanizado Desbaste Horizontal	62
Figura 66. Ajustes de Preferencia de Simulación.	63
Figura 67. Progreso de la simulación del mecanizado total del molde.....	64
Figura 68. Herramientas formadas por placas.....	65
Figura 69. Herramientas enterizas.....	65
Figura 70. Buriles redondos HSS	65
Figura 71. Obtención de Listado de Parámetros.	69
Figura 72. Información de las operaciones de mecanizado.....	70
Figura 73. Palpador Análogo	71
Figura 74. Centrado del Bloque.....	72
Figura 75. Ajuste de la altura de la herramienta.	74
Figura 76. Icono para el Post Procesado.....	75
Figura 77. Ajuste del Post Procesador.	75
Figura 78. Generar el Código G.....	76
Figura 79. Cargar el modelo 3D.....	82
Figura 80. Modelo Cargado para imprimir.	82
Figura 81. Ajustes Básicos para la impresión.....	83
Figura 82. Ajustes Avanzados de impresión.....	85
Figura 83. Parámetros de costo, tiempo y cantidad de material de impresión	85
Figura 84. Modos de vista del cura.....	86
Figura 85. Generación del G-Code.....	87
Figura 86. Progreso de Impresión 3D.....	87
Figura 87. Prueba de calzado sobre el pie con deformidad.....	92
Figura 88. Medición de dureza Shore en la suela prototipo.....	94
Figura 89. Pruebas de Flexión Realizadas al prototipo de suela.	96

Figura 90. Realización de la prueba abrasiva.....	97
Figura 91. Flujograma de la elaboración de una suela personalizada.	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de los materiales propuestos.....	4
Tabla 2. Datos de la persona caso de estudio.....	16
Tabla 3. Características del escáner 3D.....	17
Tabla 4. Características de 3d System Sense.....	18
Tabla 5. Comparación de tiempos.....	21
Tabla 6. Tiempo empleado en el diseño de las suelas.....	28
Tabla 7. Tiempos empleados en el diseño de los moldes.....	36
Tabla 8. Definición de parámetros de fórmulas.....	43
Tabla 9. Tabla de velocidades Brocas IRWIN.....	47
Tabla 10. Parámetros de velocidades para las herramientas usadas.....	58
Tabla 11. Características de la máquina CNC.....	59
Tabla 12. Tiempos empleados en la parametrización.....	60
Tabla 13. Detalle de herramientas.....	67
Tabla 14. Tiempo de mecanizado para los moldes.....	70
Tabla 15. Comparación de propiedades de cauchos.....	77
Tabla 16. Características del Filamento Flexible-T.....	84
Tabla 17. Características de la impresora 3D.....	88
Tabla 18. Costos de Herramientas.....	89
Tabla 19. Costos de Materiales.....	90
Tabla 20. Costos de Diseño y Desarrollo.....	90
Tabla 21. Análisis de tiempos para cada proceso.....	91
Tabla 22. Mediciones de Dureza Shore.....	93
Tabla 23. Resultado a prueba de Flexión.....	95
Tabla 24. Datos del ensayo de abrasión.....	97
Tabla 25. Cuadro de resumen de los ensayos realizados.....	98

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecu. 1	29
Ecu. 2	29
Ecu. 3	30
Ecu. 4	30
Ecu. 5	30
Ecu. 6	31
Ecu. 7	43
Ecu. 8	44
Ecu. 9	47

RESUMEN

El proyecto trata sobre el desarrollo del proceso de fabricación de un prototipo de suela de calzado para personas con mal formación de pie mediante el uso de herramientas CAD-CAM, este proceso de fabricación servirá para introducirlo dentro de la producción nacional industrializada de calzado. El uso de herramientas como el CAD y el CAM permite reducir tiempos de producción y costos de fabricación. Al tratarse de productos personalizado permite atender a varios sectores que por motivos de la industrialización han quedado desatendidos como es el caso de las personas que sufren de enfermedades en las extremidades inferiores alterando su forma y condiciones normales, saliendo de los procesos estándares, requiriendo del uso de nuevas herramientas como es la digitalización 3D de los objetos, mediante el uso de los escáner 3D se logra obtener de manera rápida y precisa la forma de un pie que tiene alguna malformación, lo que simplifica el diseño y desarrollo de una suela para calzado con requerimientos específicos para cada persona.

Palabras Claves:

- **DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)**
- **MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADOR**
- **MECANIZADO CNC**
- **CÓDIGO G**
- **PARAMETRIZACIÓN DE MECANIZADO.**

ABSTRACT

The project deals with the development of the manufacturing process of a prototype shoe sole for people with poor foot training through the use of CAD-CAM tools, this manufacturing process will be used to introduce it into the national industrialized footwear production. The use of tools such as CAD and CAM can reduce production times and manufacturing costs. Since it is a personalized product, it can serve several sectors that, due to industrialization, have been left unattended, as is the case of people suffering from diseases in the lower extremities, altering their normal form and conditions, leaving the standard processes, requiring the use Of new tools such as the 3D digitalization of the objects, through the use of the 3D scanner is obtained to quickly and accurately obtain the shape of a foot that has some malformation, which simplifies the design and development of a shoe sole with Specific requirements for each person.

Keywords:

- **CAD**
- **CAM**
- **MACHINING CNC**
- **G-CODE**
- **MECHANIZED PARAMETRIZATION.**

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como finalidad crear un proceso de manufactura que permita obtener un producto personalizado, ayudando a las personas que tienen mal formaciones en el pie, ya que el producto se basa en la generación de suelas para calzado personalizado para personas que sufren de alguna mal formación de los pies ya sea congénita o por algún tipo de accidente, esto se podrá lograr con el uso de herramientas CAD-CAM que permitan mejorar tiempos de producción, simulaciones antes del mecanizado minimizando desperdicios de materia prima.

El uso de un escáner 3D permite digitalizar con gran exactitud la forma real del pie objeto de estudio, lo que disminuirá el tiempo de modelado y diseño, logrando desarrollar una suela que satisfaga a cabalidad las necesidades de cada tipo de pie, ya sea no solo para personas con mal formación sino que para persona que únicamente busquen confort a la hora de calzar.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un proceso para la fabricación de suelas de calzado personalizado para personas con mal formación de pie usando herramientas CAD-CAM.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener la forma del pie mediante la técnica de escaneo 3D.
- Diseño de los moldes para suelas de calzado mediante CAD.
- Planificar la manufactura de los moldes mediante CAM.
- Diseñar el molde para la suela del pie caso de estudio.
- Realizar el Prototipo de la suela.
- Proponer el Proceso de fabricación de suelas para personas con mal formación de pie.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Diseño de Moldes.

El diseño y manufactura asistidos por computador trascienden los límites, y ofrecen numerosas opciones para reducir el tiempo requerido en la producción de moldes, así como para planear y ejecutar de forma eficiente su fabricación.

En la actualidad existen herramientas que permiten incluir canales calientes, boquillas y otros elementos estándar dentro del diseño, sistemas para ver cómo se moverá la máquina durante el proceso de maquinado sin haber siquiera cortado el material del molde, software para calcular el proceso completo desde la cotización del molde hasta la entrega y herramientas para introducir cambios en moldes hechos a la medida son algunos de los desarrollos disponibles.

Las ventajas de su uso, son la gran precisión y calidad del acabado superficial de las piezas obtenidas. Además, son muy económicos cuando se producen grandes cantidades de piezas. Existen varios tipos de moldes utilizados para la fabricación de piezas principalmente no ferrosas.

El tipo de molde diseñado es para prensado o inyección. Esta determinación se la hace debido a que este tipo de molde es el más adaptable para ser usado en las fábricas del país y es el adecuado para el tipo de pieza a producir.

A continuación en la figura 1 se presenta el flujo del proceso de diseño del molde metálico:

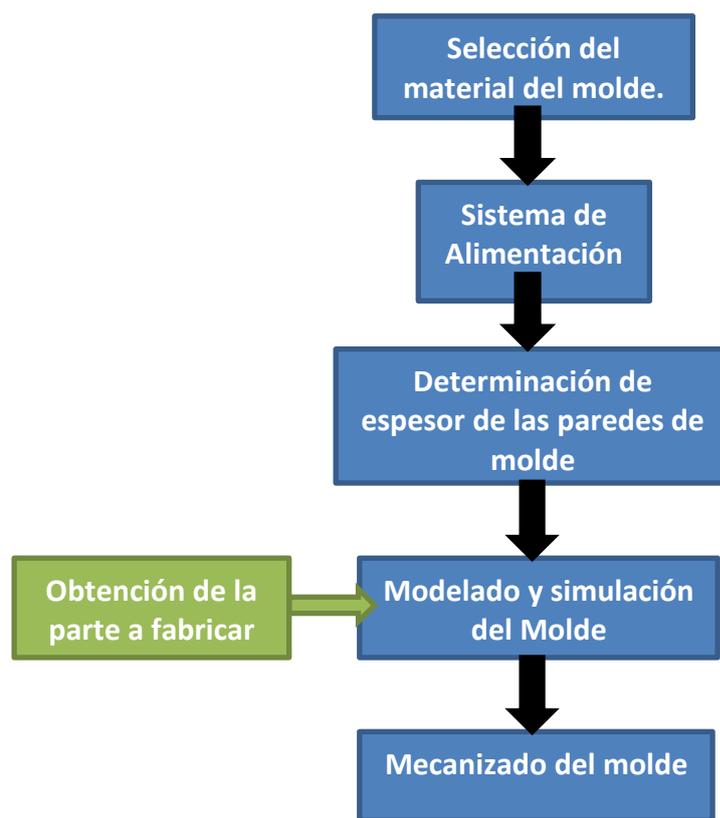


Figura 1. Proceso de diseño del molde

1.4.2 Selección de Material del Molde.

En la fabricación de suelas es muy importante la calidad de los moldes, esta debe ser precisa ya que es la que determina la geometría de la suela, con una durabilidad que mantenga la calidad a lo largo del tiempo. Los moldes para vulcanizado de caucho se fabrican en hierro y aluminio.

El material que se utilizará para la fabricación del molde viene determinado en su mayor parte por el aspecto económico y tiempos de mecanizado, respondiendo a los siguientes aspectos:

- La geometría de la pieza a fabricar
- Material de la pieza a fabricar
- Presiones de cierre del molde
- Número de piezas a fabricar y tiempo de ciclo (Prada Ospina & Acosta Prado, 2011)

Considerando estos puntos, la selección del material que se usará en la fabricación del molde para vulcanizado de caucho, depende de las propiedades mecánicas, debido a que sufrirá esfuerzos durante el proceso de vulcanizado. Las propiedades que se deben tener en cuenta son:

- Resistencia a la compresión.
- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia térmica.
- Tenacidad.
- Buena maquinabilidad
- Fácil de pulir
- Facilidad para electro erosionado o fotograbado
- Resistencia al impacto y deformación
- Buena resiliencia
- Resistencia al desgaste

Dentro de la industria nacional los materiales ampliamente usados para la fabricación de moldes en la elaboración de suelas son las aleaciones de acero como el P20 y las aleaciones de aluminio como el Alumecc 89, por lo que se plantea un cuadro de calificaciones para dichos materiales.

Tabla 1.
Comparación de los materiales propuestos

Material	Módulo de elasticidad (N/mm ²)	Conduct. Térmica (Btu)	Fresado Desbaste (Vc) (m/min)	Fresado Acabado (Vc) (m/min)
P20	250000	202	80-150	70-110
Alumecc 89	71500	1144	600-1000	300-500

Como se puede observar en la tabla 1 para el caso del Alumecc 89 tiene el módulo de elasticidad bajo en relación al acero P20, por lo que

sería una desventaja en caso de moldes que requieran altos esfuerzos mecánicos, dentro del proceso de vulcanizado de caucho. Para el resto de factores se puede notar claramente que el ALUMEC 89 supera ampliamente al acero P20.

Cabe indicar que el aluminio y sus aleaciones frente al acero y sus aleaciones requiere un punto de fundición más bajo, lo que hace más fácil la tarea de reciclar y reutilizar.

Todas las características físicas, mecánicas y químicas del ALUMEC 89 están descritas en el anexo 1.

1.4.3 Sistema de Alimentación.

El proceso para el vulcanizado de caucho que se usará para la fabricación de la suela es netamente manual por lo que el diseño de un sistema de alimentación no es necesario ya que esto es más para procesos de inyectado.

El proceso que se usará es el siguiente:

Moldeo por Compresión

El caucho es calentado y comprimido en un molde mediante una prensa, el material adopta la forma de la cavidad dando como resultado la pieza final. Este proceso es adecuado para bajos y medianos volúmenes de producción donde no se requieran tolerancias muy estrictas, como por ejemplo piezas voluminosas, juntas tóricas, retenes, etc.

1.4.4 Determinación del Espesor de las Paredes del Molde

El espesor de las paredes de un molde es un punto crítico al momento de diseñarlo, ya que si estas son demasiado delgadas se fisurarían, y si son demasiado gruesas representan un excesivo peso y mayores costos.

El espesor de las paredes depende de:

- El material a procesar.

- Presión de la prensa

El material a ser procesado es **caucho sintético**, la prensa alcanzará presiones de hasta **2000PSI**. Se realizará mediante ingeniería concurrente en el país como son las herramientas CAD.

1.4.5 Simulación del Molde.

La simulación del molde es un aspecto muy importante ya que con este se puede determinar si el diseño dará los resultados deseados y de la misma forma se realizarán con herramientas de ingeniería concurrente.

1.5 ESCÁNER 3D

Un escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto o una escena para reunir datos de forma y ocasionalmente color. La información obtenida se puede usar para construir modelos digitales tridimensionales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. Desarrollados inicialmente en aplicaciones industriales (metrología, automóvil), han encontrado un vasto campo de aplicación en actividades como la arqueología, arquitectura, ingeniería, y entretenimiento (Maria, 2011).

El escáner 3D crea puntos a partir de muestras geométricas en la superficie del objeto. Estos puntos son usados para extrapolar la forma del objeto (un proceso llamado reconstrucción).

Los escáneres 3D son distintos a las cámaras. Pero al igual que éstas, tienen un campo de visión en forma de cono, pero mientras una cámara reúne información de color acerca de las superficies dentro de su campo de visión, los escáneres 3D reúnen información acerca de su geometría. El modelo obtenido por un escáner 3D describe la posición en el espacio tridimensional de cada punto analizado.

Si se define un sistema esférico de coordenadas y se considera que el origen es el escáner, cada punto analizado se asocia con una coordenada ϕ y θ y con una distancia, que corresponde al componente r . Estas coordenadas esféricas describen completamente la posición

tridimensional de cada punto en el modelo, en un sistema de coordenadas local relativo al escáner.

Para la mayoría de las situaciones, un solo escaneo no producirá un modelo completo del objeto. Generalmente se requieren múltiples tomas, incluso centenares, desde muchas direcciones diferentes para obtener información de todos los lados del objeto. Estos escaneos tienen que ser integrados en un sistema común de referencia mediante, un proceso que se llama generalmente alineación, y que transforma las coordenadas locales de cada toma en coordenadas generales del modelo. El proceso completo que va de las tomas individuales a un modelo completo unificado define el flujo de captura de modelo 3D (Maria, 2011).

1.5.1 Tipos de Escáneres 3D.

Los escáner 3D no todos son iguales ni utilizan la misma tecnología existe un amplio abanico de posibilidades, según lo que se va a digitalizar. Las tecnologías más desarrolladas de forma general se resumen entre grupos de escáneres 3D diferentes y se dividen a su vez por la capacidad de alcance de captación de geometrías ya sean de corto alcance o largo alcance. Los tres grupos de escáneres 3D son los siguientes:

Escáner 3D de Captación por Haz Láser.

Este tipo de escáner 3D se basa en la triangulación de posición de un objeto. Se utiliza una línea laser dirigida hacia el objeto a digitalizar, mientras un sensor se encarga de recoger la luz del láser que es reflejada desde el objeto y, gracias a los cálculos de triangulación trigonométrica que el escáner realiza internamente, se calcula la distancia del objeto al escáner. De esta forma se consigue una compleja y densa nube de puntos.

Escáner 3D de Captación por luz Estructurada.

Este tipo de escáner también se basa en la triangulación trigonométrica. Sin embargo, su sistema es diferente. No utiliza un haz

laser que rebota en una superficie ya que esta tecnología proyecta una serie de patrones lineales sobre un objeto. De esta manera el escáner examina los bordes de cada línea de los diferentes patrones calculando así la distancia entre el escáner y la superficie digitalizada.

Escáner 3D Time-of-Flight por Pulsación Láser

Estos escáneres se basan en un concepto muy simple ya que se conoce la velocidad a la que se desplaza la luz se puede saber cuánto tiempo tarda en llegar a un objeto y rebotar a un sensor. Así, se puede calcular una distancia. Estos escáneres utilizan un sistema que tiene una precisión de picosegundos que mide los millones de pulsos láser que recibe el sensor en 360°. El escáner y el láser giran para poder escanear este amplio rango de grados. Para hacerlos más precisos, se puede modular la potencia del haz del láser, así comparar la fase del láser que ha sido lanzado hacia la superficie con la que ha regresado al sensor.

1.5.2 Escáner 3D en la Industria.

El escáner 3D ha encontrado una aplicación insustituible en el control dimensional de fabricación de componentes que requieren tolerancias muy estrictas, como álabes de turbina, mecanizados de alta precisión, estampación y matricería, etc.

Las piezas se escanean y la nube de puntos se compara con el modelo teórico, permitiendo un control muy minucioso sobre la producción. También se utiliza para "escalar" diseños a partir de modelos creados a mano (Maria, 2011).

1.5.3 Escaneado 3D de Pies.

El escaneado de pies se basa ampliamente en la tecnología por captación por haz laser, simultáneamente escanea la forma 3D del pie y puede o no determinar puntos anatómicos de referencia marcados sobre este previamente.

Los datos tridimensionales y medidas se utilizan para el análisis morfométrico del pie con diferentes finalidades: investigación, diseño de la horma o selección del calzado que proporciona mejor ajuste a una persona en concreto. (Tipan Guaman & Toapanta Mora, 2017).

1.6 CARACTERÍSTICAS DE HERRAMIENTAS CAD-CAM

Las nubes de puntos producidas por los escáneres 3D pueden ser utilizadas directamente para la medición y la visualización en el mundo de la arquitectura y la construcción. No obstante, la mayoría de las aplicaciones utilizan modelos 3D poligonales, modelos de superficies NURBS, o modelos CAD basados en las características (modelos sólidos) (Alborés, 2013).

1.6.1 Modelos de Malla de Polígonos

En una representación poligonal de una forma, una superficie curva es modelada como muchas pequeñas superficies planas (al igual que una esfera es modelada como una bola de discoteca). El proceso de convertir una nube de puntos en un modelo poligonal 3D se llama reconstrucción. La reconstrucción de modelos poligonales implica encontrar y conectar los puntos adyacentes mediante líneas rectas con el fin de crear una superficie continua.

Los modelos poligonales, también llamados modelos de malla, son útiles para la visualización o para algunas aplicaciones CAM, pero son, en general, "pesados" (archivos de datos muy grandes), y son relativamente difíciles de editar en este formato (Alborés, 2013).

Existen muchas aplicaciones, tanto libres como propietarias, destinadas a este fin: MeshLab, cyclone, kubit PointCloud para AutoCAD, JRC3D Reconstructor, PhotoModeler, ImageModel, PolyWorks, Rapidform, Geomagic, ImageWare, Rhino, etc. (Alborés, 2013).

1.6.2 Modelos de superficies

El siguiente nivel de sofisticación en la modelización implica el uso de un conjunto de pequeñas superficies curvas que unidas entre sí modelan

nuestra forma. Estas superficies pueden ser NURBS, T-Splines u otras representaciones de curvas. Utilizando NURBS, nuestra esfera es una esfera matemática verdadera.

Estas superficies tienen la ventaja de ser más ligeras y más fácilmente manipulables cuando se exportan a CAD. Los modelos de superficie son algo más modificables, pero sólo en un sentido escultórico de empujar y tirar para deformar la superficie. Esta representación se presta bien al modelado de formas orgánicas o artísticas.

Algunas aplicaciones sólo ofrecen un diseño manual de las curvas, pero las más avanzadas ofrecen tanto manual como automático. Aplicaciones usadas para este modelado son: Rapidform, Geomagic, Rhino, Maya, T-Splines, etc (Alborés, 2013).

1.6.3 Modelos sólidos CAD

Desde el punto de vista de la ingeniería y la fabricación, la representación fundamental de una forma digitalizada es el modelo CAD, totalmente editable. El CAD es el "lenguaje común" de la industria para describir, editar y producir la forma de los objetos o modelos. En CAD, un modelo tridimensional está descrito por parámetros que fácilmente son editables mediante el cambio de un valor.

Distintos enfoques se ofrecen para llegar al modelo CAD. Algunos exportan las superficies NURBS tal cual y dejan que sea el diseñador el que complete el modelo en CAD (por ejemplo, Geomagic, ImageWare, Rhino). Otros utilizan el análisis de los datos para crear un modelo editable basado en las características que se importan, produciendo un modelo completo y nativo de CAD, recogiendo tanto la forma como la finalidad del diseño (Geomagic, Rapidform). Mientras que otras aplicaciones de CAD son lo suficientemente robustas como para manipular modelos de un número limitado de puntos o polígonos dentro del entorno CAD (por ejemplo, Catia) (Alborés, 2013).

CAPÍTULO 2

2.1 ESCANEEO 3D DEL PIE CON MAL FORMACIÓN.

2.1.1 El Pie Humano

El pie es la porción terminal de una extremidad que lleva el peso del cuerpo y permite la locomoción, constituye una bisagra con el suelo, siendo crucial, pero como estructura inferior a menudo resulta infravalorado. Anatómicamente, el pie y la mano humana son variaciones de una misma estructura de cinco dígitos que es común a muchos otros vertebrados; es también una de las dos estructuras de huesos más complejas del cuerpo. En un estudio antropométrico en 1997 en el Norte de América, con hombres adultos de raza caucásica y una edad media de 35,5 años, se encontró que la longitud del pie de los hombres era por término medio de 26,3 cm con una desviación estándar de 1,2 cm. (AA, 2008)

El pie humano y el tobillo son una fuerte y compleja estructura mecánica que contiene 26 huesos, 33 articulaciones, y más de 100 músculos, ligamentos y tendones.

El pie se puede subdividir en tres partes: retropié, parte media y ante pie.

- El **retropié** está compuesto por el astrágalo y el calcáneo o talón. Los dos huesos largos que componen la pierna, la tibia y el peroné, se conectan con la parte superior del astrágalo para formar el tobillo. Tiene función estabilizadora.
- La **parte media** del pie está formada por cinco huesos irregulares: cuboides, navicular, y tres huesos cuneiformes, los cuales constituyen los arcos del pie, que sirve como un amortiguador. La parte media del pie está conectada con el ante pie y el retropié mediante músculos y la fascia plantar. Esta parte tiene una función rítmica ya que los huesos que la forman actúan de forma sincrónica.

- El **ante pie** se compone de los cinco metatarsianos que forman el metatarso y las falanges del pie. Al igual que los dedos de la mano, el dedo gordo tiene dos falanges (proximal y distal), mientras que el resto de los dedos tienen tres falanges. Las articulaciones entre las falanges se llaman inter-falángicas, las que existen entre el metatarso y falanges se denominan metatarsos falángicos. Su función es dinámica.

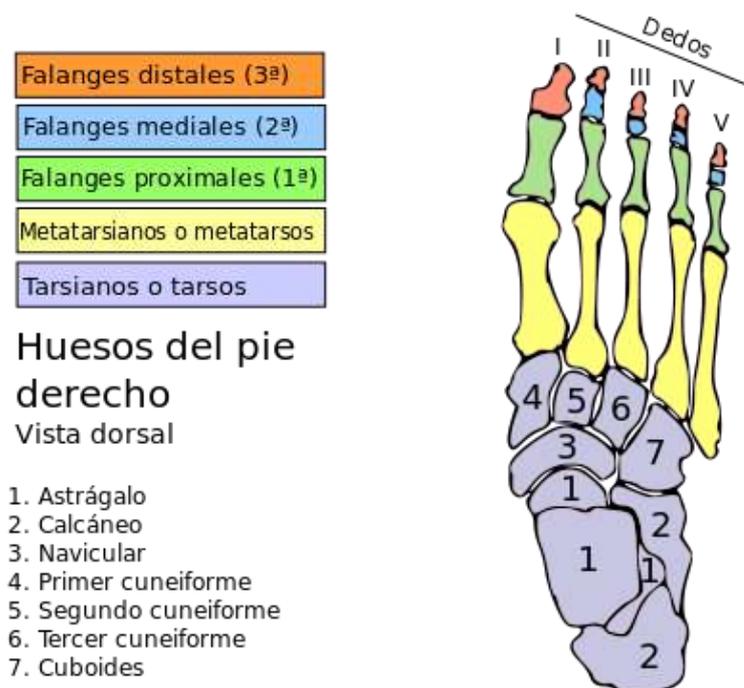


Figura 2. Huesos del Pie.

Fuente: (Kapandji, 04-2010)

La porción ósea del pie puede dividirse en tres partes:

- Tarso, con siete huesos siendo, de atrás a delante el calcáneo, astrágalo, escafoides, cuboides y tres cuñas (primera o medial, segunda o intermedia y tercera o lateral) véase figura 2.
- Metatarso, con cinco huesos largos, que se disponen de dentro afuera con los nombres de primero, segundo, tercero, cuarto y quinto.

- Falanges, con catorce huesos. Se conocen con los nombres de primera o proximal, segunda o media y tercera o distal o ungueal.

La parte superior o dorsal del pie se llama empeine y la inferior planta. El pie se mueve en relación a la pierna con el auxilio de músculos extensores y flexores. Los primeros, que constituyen la pantorrilla, se insertan en la extremidad posterior del calcáneo por medio del tendón de Aquiles. Los segundos están situados delante de la pierna. Existen, además, músculos elevadores que hacen girar el pie hacia fuera o hacia dentro.

El pie humano está formado por tres arcos que constituyen una bóveda, dos arcos longitudinales y un arco transversal que están mantenidos por las formas entrelazadas de los huesos del pie, los ligamentos y los músculos como se muestra en la figura 3. La ligera movilidad de los arcos cuando el peso se aplica y se retira del pie hace que el caminar y el correr sean más económicos en términos de energía (Vega, 2012).

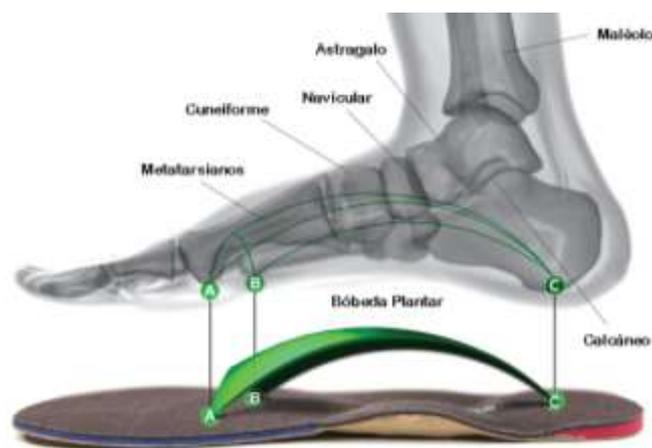


Figura 3. Arcos del Pie.

Fuente: (Ortopedicos Dinky, 2003)

El arco interno es el más largo y alto, mientras que el arco externo tiene una longitud y altura menor a las del arco interno. Por último, el arco anterior cuyos puntos de apoyo son la cabeza del primer y quinto metatarsiano según se muestra en la figura 4. La excesiva tensión en los

tendones y ligamentos de los pies puede dar lugar a arcos caídos o pies planos. El arco externo se compone de posterior a anterior por: calcáneo, cuboides, quinto metatarsiano y la falange del quinto dedo. El interno lo forman astrágalo, escafoides, primera cuña, primer metatarsiano y falange del primer dedo (Kapandji, 04-2010) (Vega, 2012).

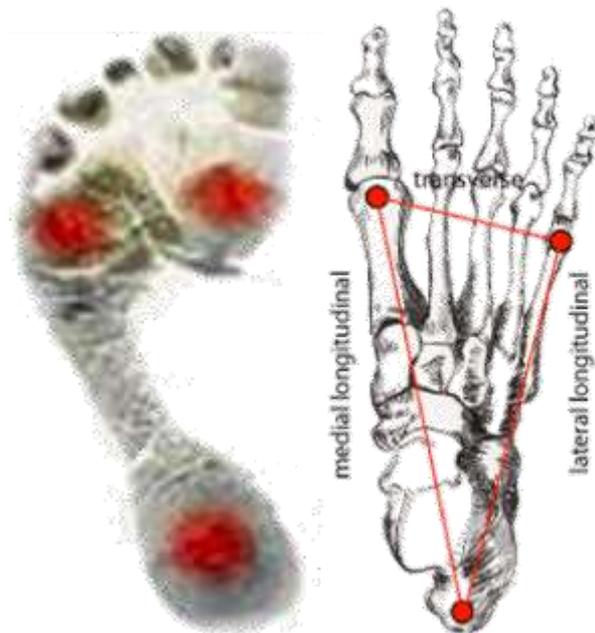


Figura 4. Puntos de Apoyo del Pie.

Fuente: (Ortopedicos Dinky, 2003)

2.1.2 Pie con Deformación Caso de Estudio

El caso de estudio es un pie con deformidad provocado por una infección a los hueso llamada Osteomielitis, esta infección es cortical y medular causada generalmente por bacterias u hongos.

Esta se clasifica principalmente en tres grupos teniendo en cuenta la patogenia y evolución:

- Osteomielitis hematogena: Es la forma más frecuente de presentación en la infancia.
- Osteomielitis secundario a un foco contiguo de infección: se presenta después de un traumatismo abierto, herida penetrante, herida postquirúrgica infectada, tras el implante de una prótesis o secundario a una infección subyacente como celulitis.

- Osteomielitis secundaria a insuficiencia vascular provocando el pie diabético.

La osteomielitis provoca retraso en la regeneración del hueso lo que causa una pérdida de las condiciones normales en las zonas afectadas (España, 2017).

El caso de estudio es Osteomielitis secundaria a insuficiencia vascular lo que afecto directamente a la tibia, peroné del pie izquierdo en la figura 5 se muestra la zona que más efectos sufre.



Figura 5. Pie con osteomielitis.

Fuente: (A. D. A. M. Quality, 2016)

2.1.3 Escaneado de los Pies Caso de Estudio

Para iniciar con el escaneado del pie se procede a realizar una toma de datos de la persona caso de estudio, los mismos se ven reflejados en la tabla 2.

Tabla 2.
Datos de la persona caso de estudio.

Nombre	Moisés
Apellidos	Arcos Freire
Edad	52 años
Pie en el que sufre la deformación	Izquierdo
Tipo de deformación	Pie con osteomielitis
Tiempo de la deformación	13 años
Circunstancias de la infección	Fractura de la tobillo (deporte)

En la figura 6 se puede apreciar el pie calzado del Sr. Moisés Arcos al igual que la plantilla usada al interior del calzado.

Mediante el Proceso de escaneado 3D se puede obtener el modelo de pie con una gran presión lo que permitirá realizar un diseño óptimo de la horma y posteriormente el molde para el calzado.



Figura 6. Pie con deformidad calzado, plantilla y zapato usados actualmente por Moisés Arcos

Para el caso de estudio se usa un escáner 3D, cuyas características se observan en la tabla 3.

Tabla 3.
Características del escáner 3D

Modelo	Sense-RS
Voltaje de entrada	3.0 a 5.0 V DC
Volumen de escaneo	Min. 0.2x0.2x0.2m Max. 2x2x2m
Campo de visión	H:45°, V: 57.5°, D:69°
Resolución espacial x/y a 0.5mm	0.9mm
Resolución de Profundidad a 0.5mm	1mm

En la figura 7 se muestra el escáner empleado para realizar la digitalización de los pies del Sr. Moisés Arcos



Figura 7. Escáner 3D

El escáner trabaja con el software 3D System Sense el cual presenta opciones de escaneo muy amigables e intuitivas para el usuario, en la tabla 4 se muestra algunas características del software.

Tabla 4.
Características de 3d System Sense

Versión	1.1.0.123
Licencia	libre
Sistema operativo	Windows 7/8/10 34 y 64 bit
Tamaño en disco	94.4MB
Requerimiento de RAM	2.0GB mínimo
Tarjeta de video	1.0GB mínimo

La ventana de inicio es básica donde se encuentra íconos que facilitan la interpretación del programa, a continuación se detallan en forma gráfica los íconos que permiten realizar las operaciones y configuraciones del escaneo.

Uno de los íconos fundamentales y que permite realizar los ajustes necesarios para efectuar el escaneo es la figura característica de una rueda dentada, en la que se encontrarán opciones de activación y desactivación.

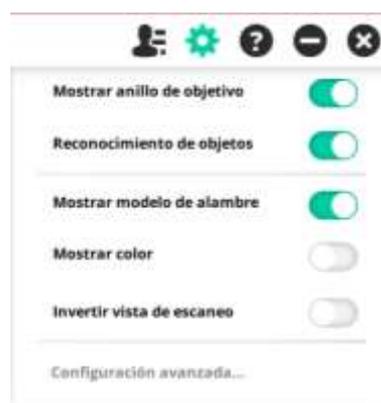


Figura 8. Ícono de Ajustes para el escaneo.

Obviamente se tiene los íconos característicos de cualquier software como son los de ayuda el de minimizar y cierre de la ventana, una vez escaneado el elemento aparecen íconos de edición para el modelo, los que son:

- Recortar: que permite seleccionar en recuadro los elementos que se desea eliminar del modelo.
- Cortar: que se usa para trazar una línea por donde se debe cortar el elemento escaneado eliminando los elementos por debajo de la línea.
- Borrar: que se usa para ir borrando según se arrastra el puntero sobre el modelo.
- Solidifica: que sirve para hacer del elemento escaneado un sólido.
- Color: que permite modificar el brillo y contraste del modelo.

Para comenzar el escaneo se tiene el ícono de Play el que permite inicializar el proceso de toma de datos a través del sensor o escáner 3D, es importante mencionar que para realizar el escaneo se deben hacer movimientos lentos y suaves para que la imagen 3D escaneada tenga mayor definición.

Para poder realizar el escaneo del pie se utilizó un trípode adaptado que permita girar libremente el escáner los 360° alrededor del pie, esto para facilitar la órbita al rededor del pie minimizando tiempos y pérdidas de zonas no escaneadas.



Figura 9. Trípode Adaptado para el escáner 3D

El escaneo por pie toma un tiempo de 2 minutos para obtener la mayor cantidad de datos esenciales para diseñar el molde, se requiere del escaneo de cada pie y el par de pies juntos según se muestran en las figuras 10 a 12,



Figura 10. Pie Izquierdo

Como se aprecia el elemento escaneado está formado por superficie y existen otras partes del cuerpo que no se desean y no son parte del caso de estudio, lo que se puede eliminar, recortar, borrar y solidificar con las herramientas de edición.



Figura 11. Pie Izquierdo sin realizar ediciones

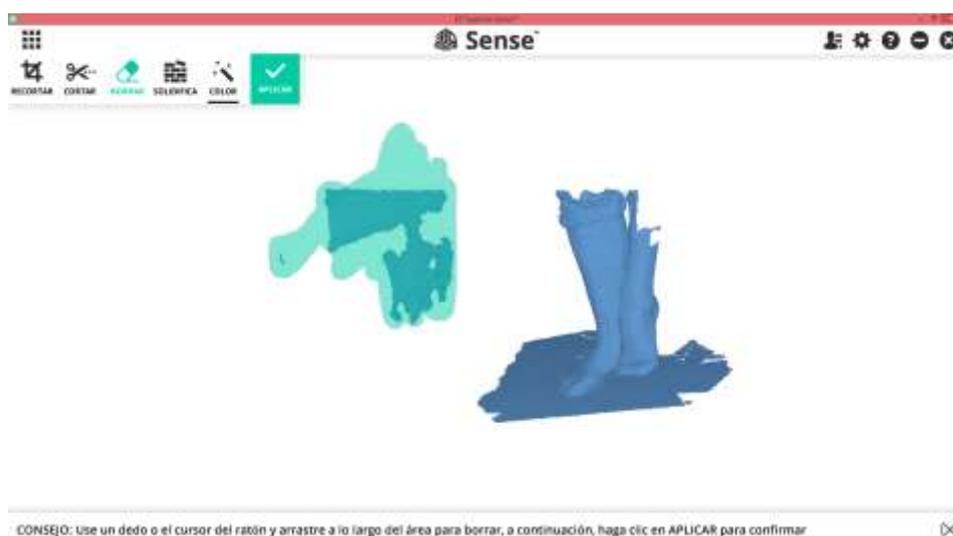


Figura 12. Pies escaneados y borrado de elementos no deseados.

Ya realizado las ediciones necesarias de los pies escaneados se puede guardar o exportar a los software CAD para desarrollar el diseño del molde. El escaneo 3D permite minimizar tiempos, en relación al método convencional de toma de datos, en la tabla 5 se muestra un resumen.

**Tabla 5.
Comparación de tiempos**

Método	Marcado de curvas patrón	Obtención de horma
Convencional	30min	5-6hrs
Escaneado 3D	0	5min

2.2 DISEÑO DE UN MOLDE MEDIANTE CAD

Como se indicó en el apartado 1.6 existen muchos software que permiten realizar diseños a partir de modelos 3D previamente escaneados, permitiendo obtener mejores respuestas frente al modelado tridimensional reduciendo tiempos y costos, para el desarrollo del proyecto se usará el software Rhino Ceros 5 ya que se cuenta con la licencia educativa.

Rhino ceros es una herramienta que permite modelar formas y figuras más complejas en 3D, lo que lo hace muy práctico a la hora de modelar siluetas con son las del pie.

Características de Rhino Ceros.

- Una de las características principales de Rhino es que incorpora la geometría nurbs, lo que permite tener una información más detallada sobre curvas, líneas, superficies, y hasta los más complejos sólidos de formas libres en 3D.
- Gracias a la geometría nurbs que Rhino incorpora permite exportar el modelo a cualquier otro software para realizar renderizado, animaciones e ingeniería de análisis.
- Actualmente Rhino ceros incorpora potentes plug-ins que permiten realizar análisis estructurales, simulaciones e incluso está estrechamente vinculado con la fabricación en procesos de manufactura robótica, impresión 3D y prototipado rápido.

Ya escaneado los pies, se puede determinar el método por el cual se procederá a realizar el modelado de la horma. Previo al modelado se concluye que debido a la gran variación que tiene el pie izquierdo referente al derecho, es procedente y necesario obtener el modelado de la horma para cada pie del cual se procederá al diseño respectivo de la suela. El pie derecho de la persona no guarda concordancia con las formas estandarizadas



Figura 13. Mallado poligonal del pie con deformidad caso de estudio

Ya digitalizado la horma en este caso el pie mismo, se procede a obtener las curvas base con las que se desarrollará el diseño de la suela.

2.2.1 Obtención de Curvas Base

Las curvas base son las que determinan el cantoneo del pie, huella y el cierre del molde mismas que se muestran en la figura 14, que son esenciales a la hora de diseñar el molde.

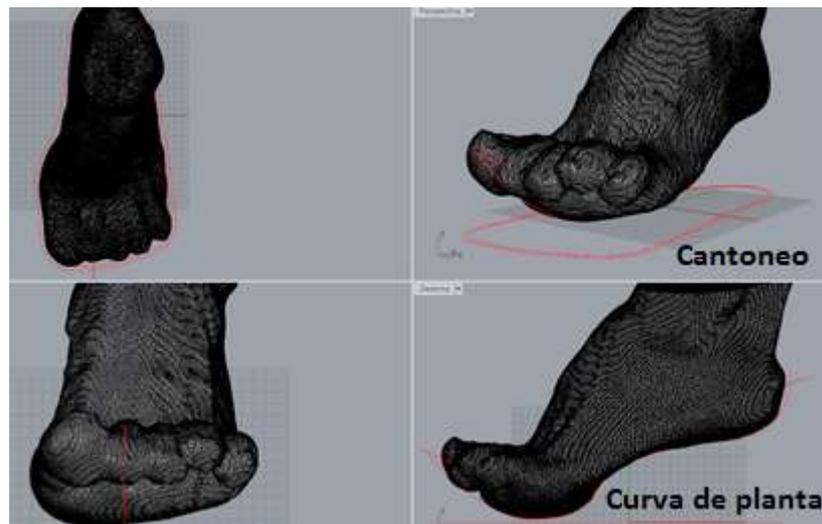


Figura 14. Curvas del pie (cantoneo, huella, y cierre)

Para el diseño de la suela es de gran importancia considerar los parámetros que influyen directamente sobre las dimensiones interiores del calzado, lo que afectaría el confort del usuario, estos parámetros son los espesores del material del corte, sea en cuero natural o sintético, y la contracción del caucho después de vulcanizado.

Considerando todos los parámetros anteriores se procede a diseñar la suela o planta del calzado.

Una parte esencial es la curva de la huella, lo que permite al ser humano dar el paso sin que está sea interferida por el rose de la suela del calzado con el terreno, suelo y/o piso por el cual la persona este caminado. Para ello es importante dotar de una curvatura de paso a la huella de la suela que permita al usuario dar el paso libremente.



Figura 15. Curva de cierre, planta y huella

Como muestra la figura 15 la curva de paso tiene una altura en punta de 10 mm, esto se determinó analizando la forma con la que la persona caso de estudio da un paso, no alejándose mucho de cómo lo haría una persona sin la deformidad, ya que para una persona es normal obtener una altura de entre 6.33 a 11 mm, no es significativa la variación ya que la persona caso de estudio siempre usa el apoyo de un bastón a la hora de caminar.

Para el taco se dejará una altura de 20mm que permite en parte disimular la diferencia que genera la deformidad. Normalmente el taco toma una altura de 15mm a 35mm para calzado masculino, dependiente mucho del tipo de calzado en el que se vaya a usar la suela, puesto que en calzado deportivo es bajo o nulo para calzado formal y calzado de trabajo se pueden usar las alturas antes mencionadas, para el caso de estudio el modelo escogido por el beneficiado es calzado de seguridad o bota de trabajo, y es una muy buena opción ya que por el modelo robusto permitirá disimular la gran cantidad de caucho que esta suela llevará por la diferencia de altura entre el pie izquierdo y derecho.

Una vez ya obtenidas todas las curvas se procede a diseñar la suela, el diseño se empieza desde el interior de la suela, el área que servirá de apoyo a la planta del pie, para realizar los laterales es importante considerar el espesor de los materiales del corte, para este caso el calzado será tipo bota por lo que se asume tendrá materiales de un

espesor aproximado entre 2 a 3 mm, para ello se debe desfasar la curva obtenida del pie 3mm hacia afuera.

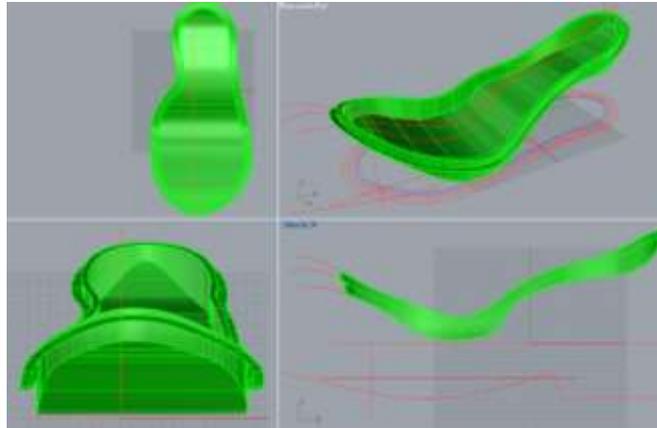


Figura 16. Diseño de la parte interior y lateral de la suela

El diseño debe quedar dividido en dos áreas: la interna más lateral y la huella más lateral, de esta forma el cierre del molde quedará en la parte lateral, el diseño interior más lateral posteriormente quedará confinada al macho o tapa del molde, y la exterior será la hebra o cavidad del molde.

La cavidad se diseña con el modelo de la huella que deberá tener la planta esta será de conformidad al tipo de calzado que se vaya a elaborar. Para este caso se ha escogido un modelo de huella bastante robusto acorde al calzado o bota de seguridad según el pedido del usuario.

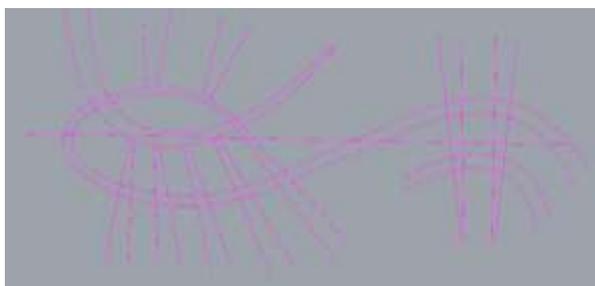


Figura 17. Modelo de Huella para la suela.

Para el caso de estudio es muy importante diseñar la suela de tal forma que se pueda compensar la diferencia de altura de un pie al otro, evitando principalmente que adquieran un excesivo peso impidiendo al

usuario libertad de movimiento, para ello es necesario realizar economizadores de la misma altura que deberá tener la suela.

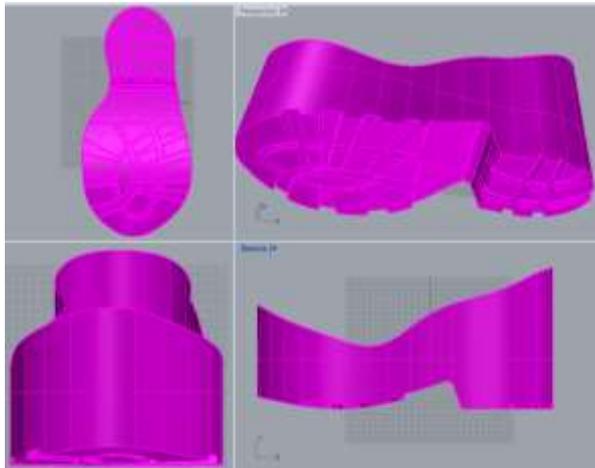


Figura 18. Diseño de la huella y parte lateral de la suela.

En los diseños mostrados en las figuras 10 y 20 se puede observar que tanto la parte interior como exterior de la suela se unen en la parte lateral, en esta unión también se hará el cierre del conjunto del molde tanto la cavidad como la tapa o postizo.

2.2.2 Diseño de las Suelas.

Ya diseñada la partes que componen la suela siendo estas la parte interior donde descansa el pie y la parte exterior que es la que estará en contacto con el piso, procedemos a obtener la suela con la unión de estos dos elementos, la unión de estos dos elementos es necesario dejar marcado, ya que en esta unión se realizará el cierre del molde.

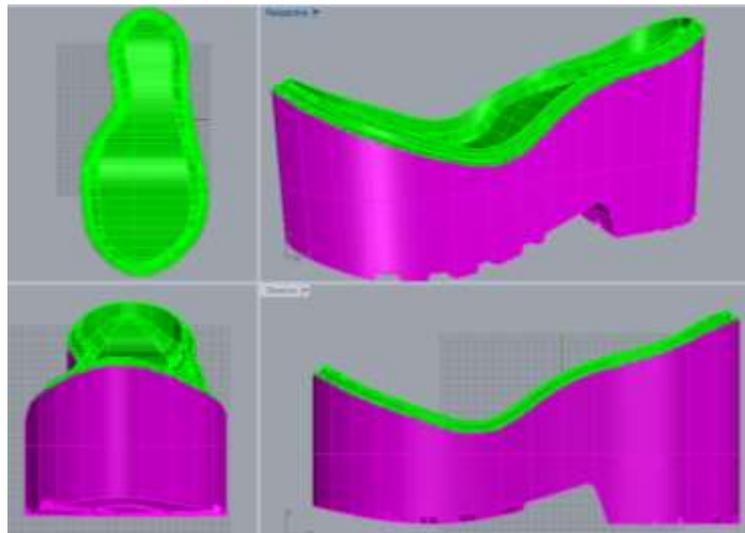


Figura 19. Suela izquierda.

De la misma forma en la que se diseñó la suela para el pie izquierdo se procede a diseñar la suela para el pie derecho.

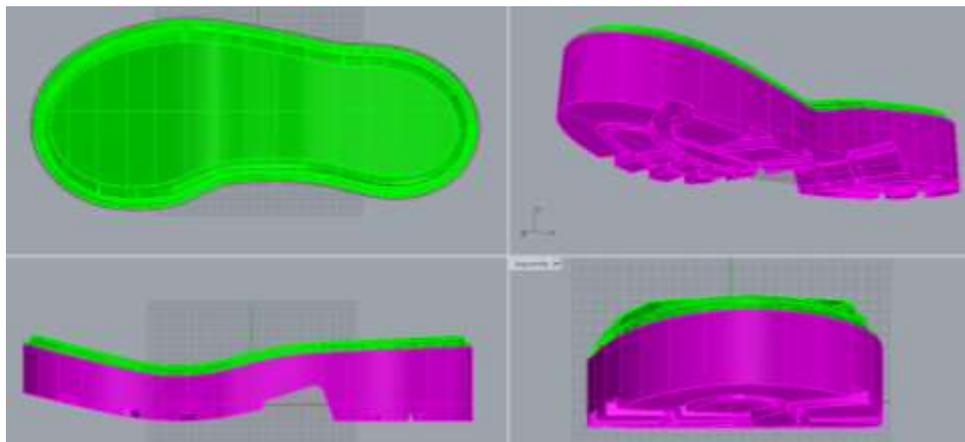


Figura 20. Suela derecha.

La suela derecha no tiene ninguna forma especial como es el caso de la izquierda, ya que en la persona caso de estudio la enfermedad solo afecta al pie izquierdo.

Algo relevante de obtener el diseño de la suela con herramientas CAD es la facilidad con la que estas herramientas permiten obtener la suela, y apreciar en forma visual si la suela está acorde a los requerimientos específicos y personalizados.

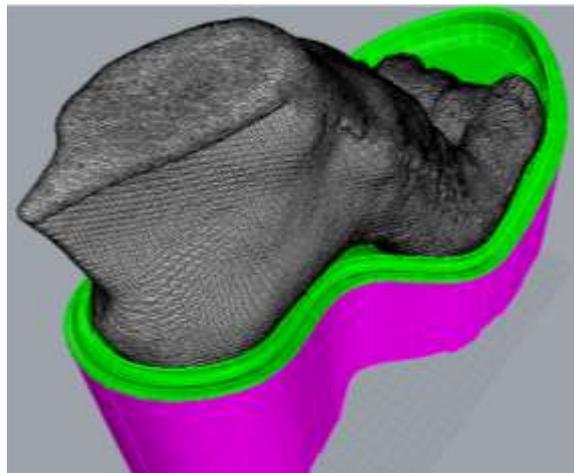


Figura 21. Pie izquierdo calzando la suela.

En la figura 21 se puede apreciar el pie calzando la suela, donde se puede evidencia se alcanza un buen confort adecuado para la forma explícita del pie forma, en la parte frontal se puede observar que el pie no llega a topar la punta de la suela como normalmente debería hacerlo esto debido a que el pie forma un arco en la parte de los metatarsos demasiado grande lo que hace que el pie tenga una menor longitud, en el diseño no se acorto a la suela para que esta guarde concordancia en longitud con respecto a la suela derecha, mejorando la estabilidad en este pie ya que tiene mayor área de contacto con el piso.

A continuación en la tabla 6 se indica los tiempos que tomo realizar el diseño de cada una de las suelas.

**Tabla 6.
Tiempo empleado en el diseño de las suelas**

Suela	Tiempo de diseño
Derecho	1 hora y 45 minutos
izquierdo	2 horas y 32 minutos

2.2.3 Diseño del Molde para la suela del pie con deformidad.

Ya obtenido la suela tanto para el pie izquierdo como para el pie derecho se procederá a realizar el diseño del molde.

Para el diseño del molde es importante considerar la fuerza de cierre del molde.

$$F_C = \frac{P \times (A_P \times N + A_R)}{1000} \quad \text{Ecu. 1}$$

Dónde:

- FC= Fuerza de cierre.
- P= Presión teórica media del polímero.
- A_P= Área proyectada.
- N= Número de cavidades.
- A_R= Área proyectada de los canales.
- 1000= Factor de conversión a [Tn].

Para la presión teórica del caucho crudo Nitrilo NBR se estima 120Kgf/cm² según anexo 3, para el área proyectada se obtiene del diseño CAD de la suela con un valor de 1075,22cm², el número de cavidades en el molde es 1, el área proyectada para canales es 0, y se obtiene un valor para la fuerza de cierre de:

$$F_C = 129,026 \text{ Ton}$$

La presión interna que el caucho crudo en su estado pastoso genera contra las paredes del molde se determina con la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{F_i}{A} \quad \text{Ecu. 2}$$

Conforme el anexo 3 el nitrilo NBR tiene una compresión del 6% por lo que la fuerza interna sobre las paredes del molde se ve reducida a un 94% de la fuerza de cierre.

El área que se debe considerar es únicamente la de las paredes laterales verticales que son las que no cuentan con ningún otro soporte, como en el caso de las partes inferior y superior del molde que son soportadas por los platos de la prensa como soporte y se puede obtener del diseño CAD 459.47cm²

$$P_i = 269,58 \text{ kgf/cm}^2$$

El análisis de esfuerzos producidos por la presión interna permite determinar el espesor de pared, ya que la presión se comporta como un esfuerzo axio-simétrico, y como se indicó anteriormente únicamente se consideran las paredes laterales del molde.

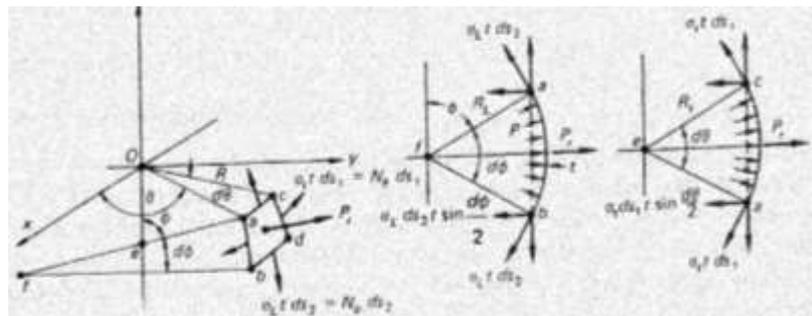


Figura 22. Esfuerzos que actúan sobre las paredes laterales del molde

Debido a la axio-simetría no existen esfuerzos tangenciales cortantes, y los esfuerzos longitudinal y transversal son constantes a través de toda la pared lateral.

$$\frac{P}{t} = \frac{\sigma_t}{R_t} + \frac{\sigma_L}{R_L} \quad \text{Ecu. 3}$$

R_t al ser completamente vertical se considera que este tiende al infinito por lo que la expresión queda definida como sigue

$$\frac{P}{t} = \frac{\sigma_L}{R_L} \quad \text{Ecu. 4}$$

Para definir el espesor de paredes laterales mínimo se puede usar la siguiente expresión que resulta de despejar t de la ecuación 4.

$$t = \frac{P_i \times R_L}{\sigma_L} \quad \text{Ecu. 5}$$

El esfuerzo máximo permisible para el Alumecc 89 está detallado en el anexo 1 en la tabla de esfuerzos, con un valor de 430N/mm^2 . El radio

longitudinal interno se calcular un promedio con la ayuda del CAD dando un valor de 18,35cm, por lo que el espesor mínimo de pared es

$$t = 1.125cm \quad \text{Ecu. 6}$$

El espesor de la pared es calculado para una temperatura ambiente, para vulcanizar el Nitrilo se requiere de 170 a 200 °C por lo que es necesario considerar un factor de seguridad que garantice evitar un desgaste prematuro del molde frente a los esfuerzos mecánicos térmicos por lo que se estima un $fs=2$.

Se considera un espesor de pared de 25mm en el caso del molde para el pie izquierdo y de 22mm para el molde del pie derecho.

En el caso de la cavidad para moldear el caucho a la forma del pie izquierdo se dividirá en dos partes ya que para obtener un buen acabado y una mayor definición de los detalles se debe usar herramientas con un diámetro pequeño, lo que dificulta el mecanizado a profundidades de 120mm para la cavidad, incluso dificulta la obtención de las herramientas puesto que estas convencionalmente alcanzan una longitud de 100mm

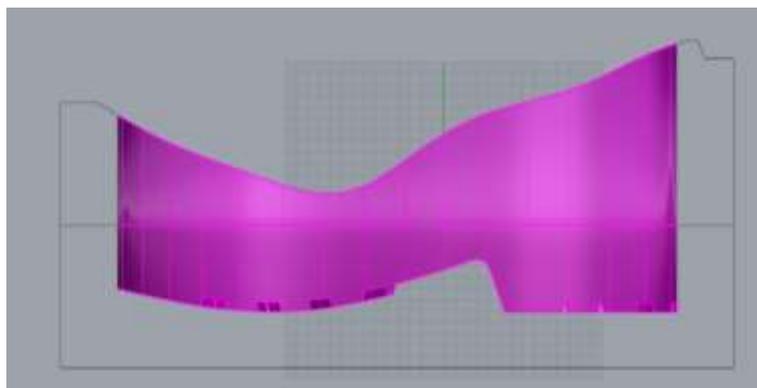


Figura 23. Perfil del molde para la cavidad del pie izquierdo.

Ya obtenido el perfil del molde para la cavidad se procede a desarrollar el molde en tres dimensiones.

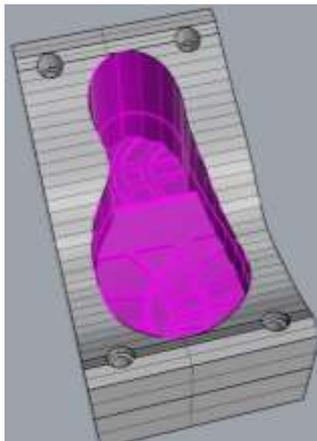


Figura 24. Molde de la cavidad para el pie izquierdo.

De la misma manera procedemos a realizar el molde de la cavidad para el pie derecho considerando que para este caso no se requiere dividir el molde en dos partes ya que la altura de la suela es normal y se lo puede mecanizar en una sola pieza.

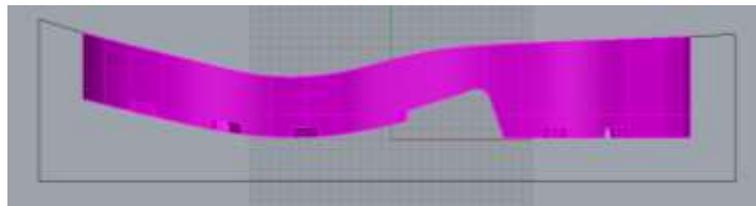


Figura 25. Perfil del molde para la cavidad del pie derecho

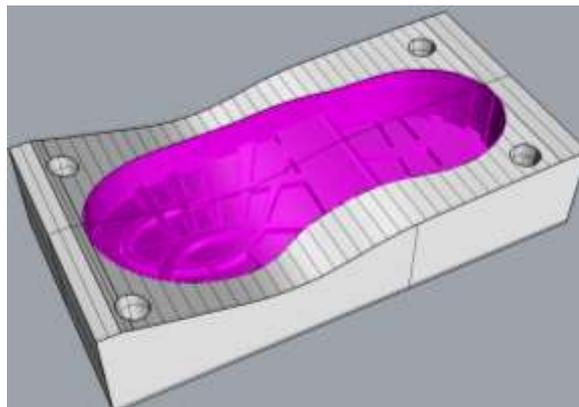


Figura 26. Molde de la Cavidad del pie derecho

Es muy importante considerar guías para estos moldes en especial para el molde del pie izquierdo ya que la tapa se deberá levantar a mayor altura, uno de los problemas de no considerar guías para este molde, es el descarrilamiento.

A la hora de diseñar las tapas de los moldes es importante realizar con la misma curvatura con la que se hizo la cavidad, a esta curva se le conoce como curvatura de cierre, ya que es donde el molde se sella por completo dejando la cavidad en su interior donde se debe formar la suela completamente, evitando fugas del caucho.

Es recomendable realizar un giro de 180 grados al diseño de la suela, de esta manera no se altera la curvatura de cierre y obtener el diseño de la tapa en la posición adecuada para su posterior mecanizado.

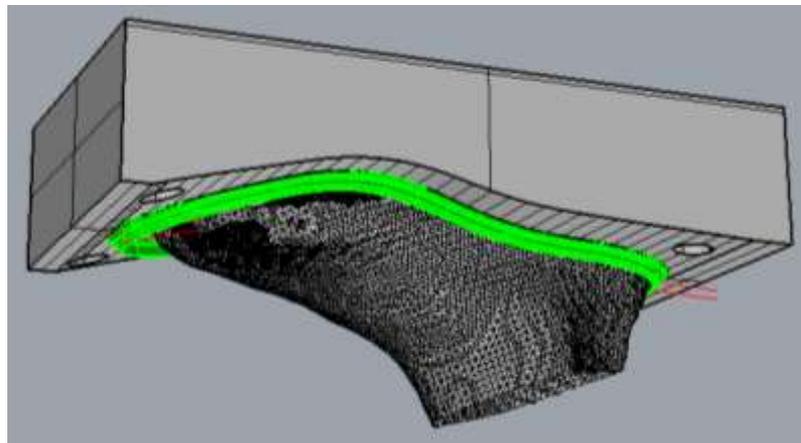


Figura 27. Molde rotado 180°

Ya rotado el modelo se procede a diseñar la tapa del molde, conservando los mismos espesores de pared indicados al inicio de este apartado, la misma curvatura de cierre del molde.

Una de las características que usualmente buscan las personas a la hora de adquirir un zapato es el espesor (grosor) de la suela y el peso del zapato el cual está definido mayormente por la suela, en la figura 29 se muestra el volumen de caucho y al no diseñar un economizador este quedaría de un solo cuerpo incrementando el peso de la suela y disminuyendo la flexibilidad del calzado.

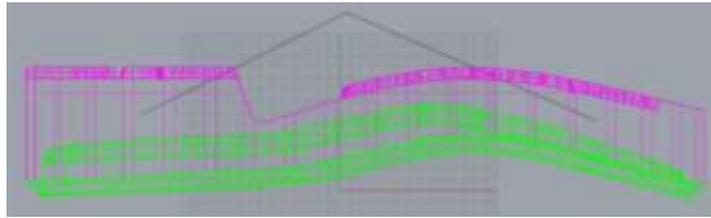


Figura 28. Diseño de economizadores en la punta y talón.

Dentro del diseño del economizador se debe considerar el espesor final que adquirirá la suela posterior al proceso de vulcanizado, para determinar este espesor se deben considerar diferentes factores como son:

- Las características del caucho a ser vulcanizado
- El confort que la suela debe brindar a la hora de dar un paso.
- El peso promedio de una persona
- El peso que deberá tener la suela
- La altura del labrado
- El tipo de calzado para el cual está destinada la suela
- El tiempo de duración de la suela

Teniendo en cuenta todos los puntos antes mencionado y que la mayoría de ellos no son parámetros que se puedan medir o cuantificar, de cierta manera es complicado determinar un espesor idóneo para las paredes y parte inferior de la suela, conforme a la experiencia se podría decir que esta suela es para un calzado de seguridad industrial, posee un labrado bastante alto, requiere de mayor resistencia a la abrasión en la parte inferior, y deberá resistir un tiempo de uso alto ya que al ser un calzado personalizado este debe ser de gran durabilidad, por lo que se puede determinar que el espesor será de entre 4 a 6 mm, a partir de este punto de análisis se procede a diseñar la suela con un espesor de 5mm tanto para paredes como parte inferior.

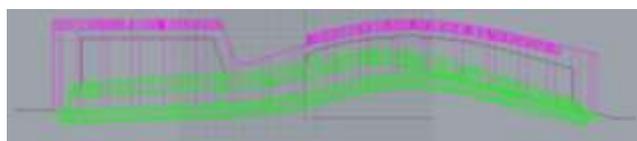


Figura 29. Perfil para diseñar el economizador.

Una vez obtenido el perfil para el economizador procede a diseñar el economizado en 3D, para el rayado sobre el economizado no es necesario el diseño en 3D, ya que el rayado se lo puede hacer únicamente con una operación de perfilado.

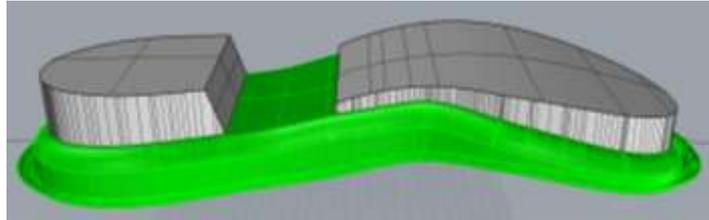


Figura 30. Economizado de la suela.

Completado el diseño del postizo para la cavidad se procede a diseñar la tapa que permitirá obtener el molde completo para su posterior simulación CAM y prototipado del molde.

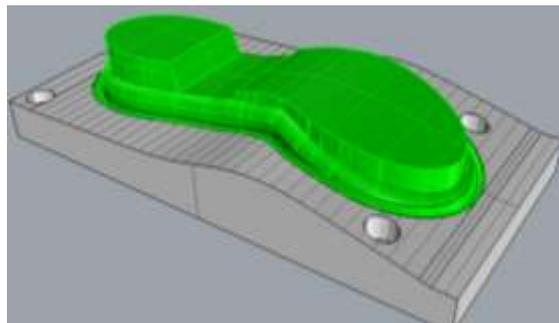


Figura 31. Tapa para el Molde del Pie Derecho

De igual forma se procede a obtener la tapa para el molde del pie izquierdo, considerando que esta tapa el economizador es de mayor altura y se deberá realizar un economizador con la misma curva para la base de la huella como se muestra en la figura 32.

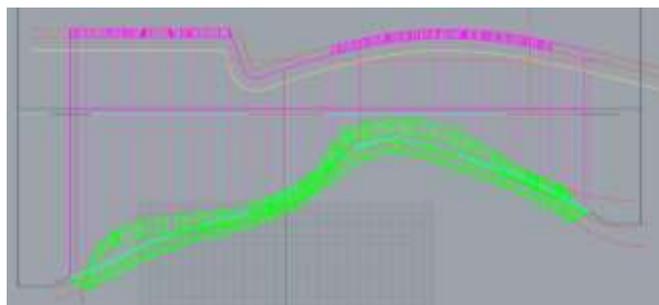


Figura 32. Perfil para diseñar el economizador del pie izquierdo.

El mecanizado del economizador del pie izquierdo no se ve afectado mucho por la gran altura ya que el mecanizado es exterior, lo que permitirá obtener dicha tapa en una sola pieza.

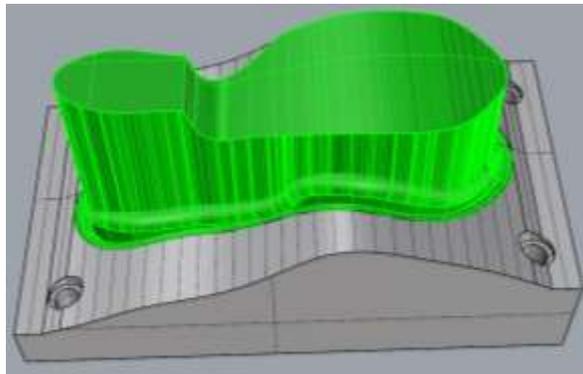


Figura 33. Tapa para el molde Pie Izquierdo.

En la tabla 7 se detalla el tiempo que conllevó realizar los moldes para las suelas

Tabla 7.
Tiempos empleados en el diseño de los moldes

Molde	Tiempo empleado	
Derecho	Cavidad:	26min
	Tapa:	17min
Izquierdo	Cavidad:	30min
	Tapa:	17min

2.3 PARAMETRIZACIÓN DE LA MANUFACTURA DE UN MOLDE MEDIANTE CAM.

La parametrización de la manufactura mediante CAM ha permitido disminuir los tiempos de fabricación de piezas y a su vez la fabricación de piezas mucho más complejas, con buenos acabados, para el caso de estudio se usa RhinoCAM 2015, mismo que se cuenta con licencia educativa

Con el diseño del molde completo se procede a configurar los métodos de mecanizado que se deben realizar para la obtención de la pieza, es muy importante seleccionar los métodos precisos para disminuir

las horas de mecanizado, evitar la ruptura de herramientas, el choque del husillo con la bancada, los métodos y herramientas siempre deben tener una secuencia que garantice que el corte del material no exceda la capacidad máxima de corte para la herramienta y para la carga del husillo.

2.3.1 Bloque de Material o Stock.

El bloque del material sobre el que se va a realizar el mecanizado en la mayoría de softwares CAM es llamado como Stock que se refiere a la existencia en las dimensiones reales en las que se dispone el material.

Cada software tiene distintas formas de dimensionar la existencia del material las más usadas son Box Stock, Cylinder Stock y Part Offset Stock, estas formas son las más básicas de obtener un stock, para el caso de estudio se empleará una opción extra que permite obtener de una forma mucho más exacta del stock llamada Extruded Stock,

Extruded Stock permite obtener desde un perfil 2D la forma en 3D del material y en este caso es necesario utilizar este comando puesto que al tener ya ubicadas las piezas a ser mecanizadas, se debe crear el material en la misma posición que deberá estar en la máquina.

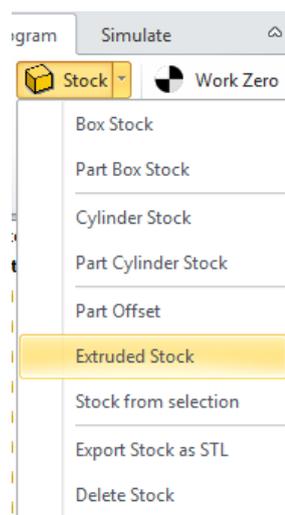


Figura 34. Pasos para encontrar el extruded.

Seleccionar la opción de extruded stock y aparece la ventana que permite crear el material sobre el que se va a realizar el mecanizado, se deben seleccionar el perfil, dar una altura y una profundidad en Z, para este caso no se requiere de profundidad por tanto se deja en cero y la altura es de 86mm del bloque.

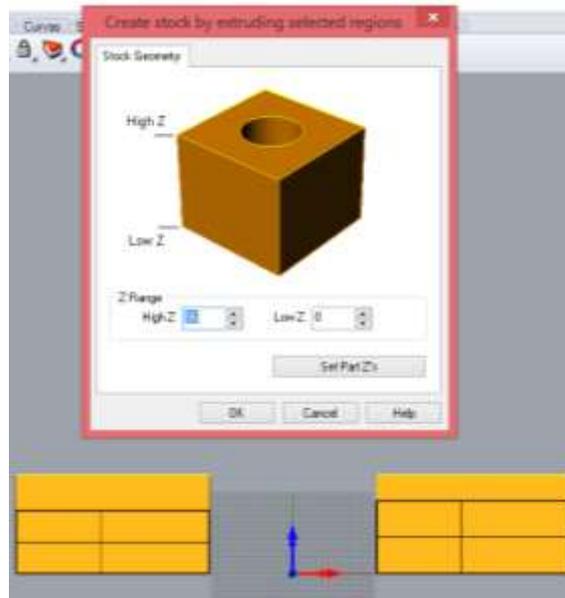


Figura 35. Ventana de creación del stock de material.

Ya con el stock creado se puede crear los procesos de mecanizado.

2.3.2 Operación de Perfilado.

El perfilado permite realizar un cantoneo del molde para obtener las dos piezas de igual medida para cuando se arme no tenga diferencias de medidas entre las dos, para ello procedemos a realizar dicha operación como se indica en la figura 36.

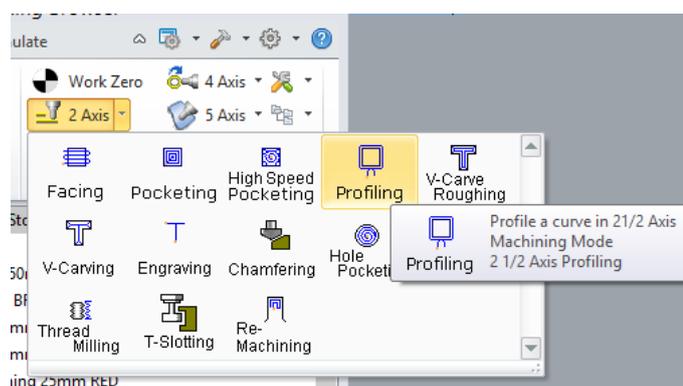


Figura 36. Operación de perfilado.

Se despliega la ventana en la que se debe asignar parámetros para dicho mecanizado, para ellos se debe definir el control de geometría, se refiere al perfil que este debe seguir, se selecciona los mismos perfiles con los que se crearon los bloques de material.

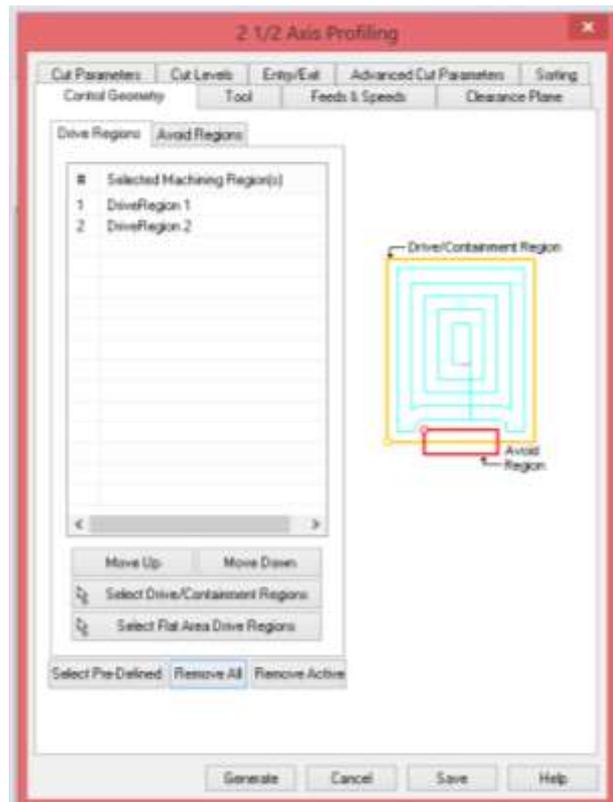


Figura 37. Ventana de creación del Perfilado o cantoneo.

Otra de las pestañas que en las que se debe proporcionar los parámetros es Niveles de Corte, donde se introduce la altura de la placa dejando una altura prudencial sin realizar el mecanizado ya que se corre el riesgo de llegar a tocar la bancada, y el avance o penetración que va a realizar después de cada pasada, este parámetro depende mucho de las características de la herramienta cada uno de los fabricantes de herramientas especifican la carga máxima a la que la herramienta puede cortar, también depende de la potencia de la máquina y torque que pueda generar. La mayoría de fabricantes de herramientas o plaquitas indican

las revoluciones, velocidades de avance y algunos parámetros adicionales. Para esta herramienta se dejará 3mm.

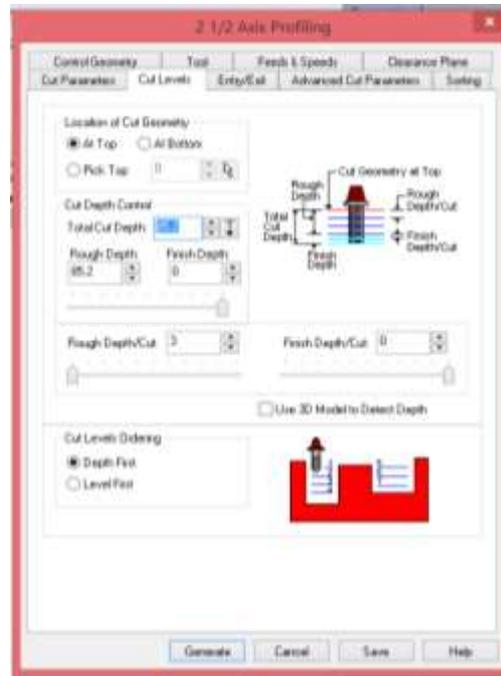


Figura 38. Niveles de corte.

Un parámetro que se debe considerar es el tipo de Entrada/Salida que debe realizar la máquina en cada pasada eso permite eliminar el efecto visual que dejará una entrada directa.

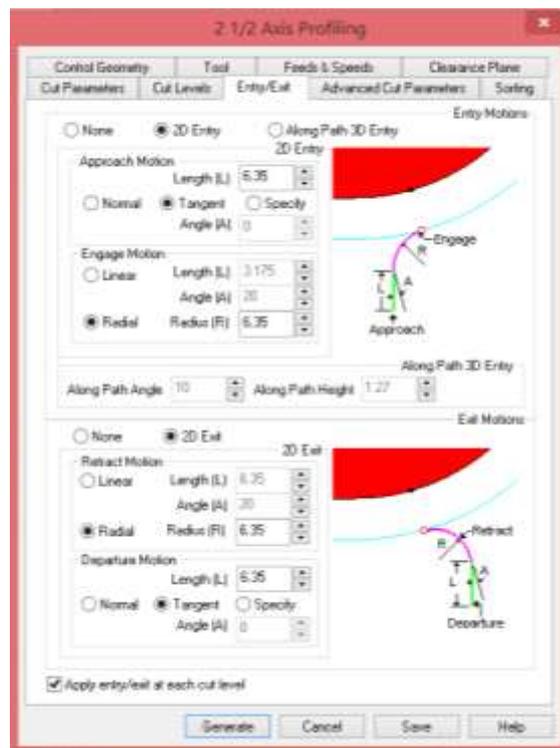


Figura 39. Configuración de entrada y salida

En la pestaña de Herramienta se debe crear la herramienta de corte con la que se va a realizar esta operación de mecanizado, desde el botón Edit/Create/Select Tool

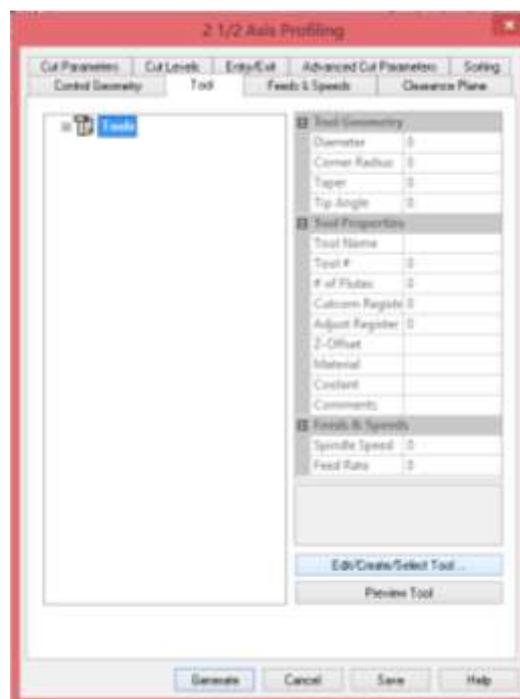


Figura 40. Crear una herramienta.

Se despliega una ventana la que permite crear herramientas de corte conforme las reales que se dispongan, para esta operación se usa una fresa plana de 50mm de diámetro con plaquitas cuadradas.

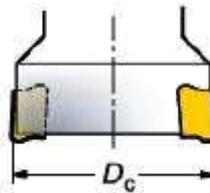


Figura 41. Fresa a usar de 50mm plana con placas cuadradas.

Fuente:(Sandvik AB, 2000)

En el cuadro de diálogo se deberá escoger el tipo de herramienta y especificar las dimensiones como el diámetro de la herramienta, diámetro del cuello, diámetro del porta herramientas, tipo de cono (BT40), longitud de la flauta o filo de corte, longitud de la herramienta, longitud del porta herramientas.

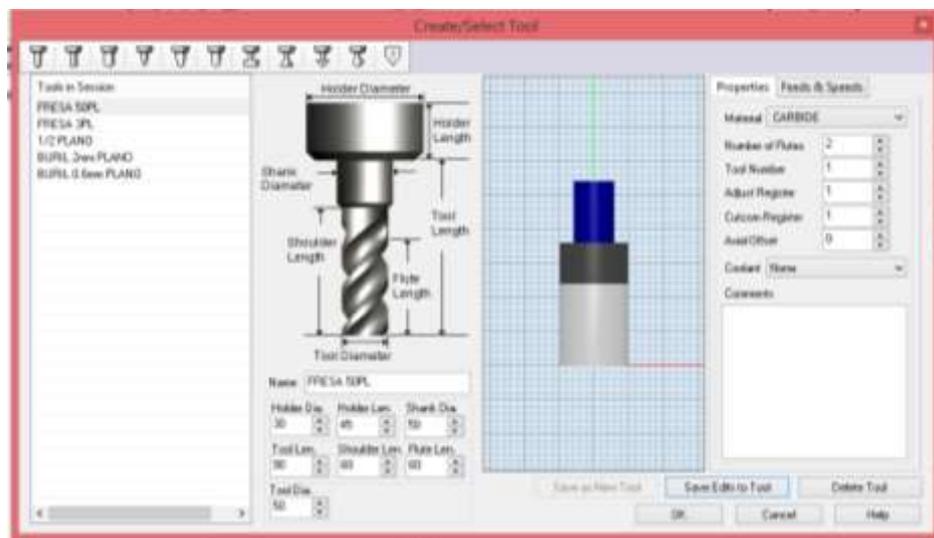


Figura 42. Cuadro de diálogo para configurar la herramienta

En el cuadro de configuración de las herramientas también se debe configurar las velocidades, para esta herramienta se supondrá que el fabricante no otorga ningún parámetro por lo que se podrá realizar los cálculos correspondientes para determinar las velocidades necesarias que requieren ser configuradas. Y con las mismas fórmulas se podrá

determinar para el resto de herramientas, en la tabla 8 se describe el significado de cada uno de los términos empleados en las fórmulas que se usan para determinar las diferentes velocidades.

Tabla 8.
Definición de parámetros de fórmulas.

Parámetro	Significado	Unidad métrica
D_{real}	Diámetro a profundidad de corte real, a_p	mm
f_z	Avance/diente	mm
Z_n	Número total de dientes de la fresa	piezas
Z_c	Número eficaz de dientes	piezas
v_f	Avance de mesa	mm/min
f_r	Avance/rev	mm
a_p	Profundidad de corte	mm
V_c	Velocidad de corte	m/min
γ_e	Ángulo de desprendimiento de viruta	
a_e	Empuje	mm
n	Velocidad del husillo	rpm
P_n	Potencia neta	W
M_t	Par de apriete	Nm
\dot{Q}	Velocidad de arranque de viruta	cm ³ /min
r_{vm}	Espesor medio de la viruta	mm
r_{vm}	Espesor máximo de la viruta	mm
κ_c	Ángulo de posición	grados
D_{cap}	Diámetro mecanizado (diámetro de la pieza)	mm
D_w	Diámetro no mecanizado (diámetro de la pieza)	mm
v_{fm}	Avance de mesa de la herramienta a D_{cap} (diámetro mecanizado)	mm/min

Fuente: (Sandvik AB, 2000)

Velocidad de Avance: para poder calcular este parámetro es necesario seleccionar el tipo de placa que debe ser usada para trabajar en aluminio, existen una alta gama de fabricantes de pastillas, uno de los más grandes y reconocidos fabricantes es SANDVIK Coromant.

Una de las formas mas rápida para determinar el tipo de plaquita que se usará es haciendo referencia a la clasificación ISO de metal duro, conforme a la placa seleccionada se podrá obtener los parámetros de la placa, en el anexo 2 se detallan las características de las placas seleccionadas tipo N, utilizada para trabajos en aluminio.

$$V_c = \frac{D_{cap} \times \pi \times n}{1000} \quad \text{Ecu. 7}$$

Para una fresa plana el D_{cap} es igual a D_c a cualquier profundidad de corte, por lo que las rpm se pueden hallar con la ecuación 7.

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_{cap}} = \frac{800 \times 1000}{\pi \times 50} = 5092.95 \approx 5100rpm$$

La velocidad de corte obtenemos de un promedio de las indicadas según las características del material mostradas en el anexo 1.

Determinadas las revoluciones del husillo procedemos a determinar la velocidad de avance.

$$V_f = f_z \times n \times Z_c \quad \text{Ecu. 8}$$

El avance por diente está definido según las características de las placas en el anexo 2 y también se define según las propiedades del material en el anexo 1

$$V_f = 0.2 \times 5100 \times 4 = 4080mm/min$$

Este parámetro debe ser fijado en la configuración de la herramienta y conforme la velocidad de avance se parametriza las otras velocidades de caída que puede ser ligeramente mayor que la de avance debido a que esta no realiza corte del material, la velocidad de aproximación puede ser igual a la de corte o avance es recomendable que sea ligeramente menor para poder diferenciar entre velocidades y prevenir cualquier circunstancia no deseada, la velocidad de entrada o partición debe ser un 50% menor a la de avance para reducir el efecto de choque de las plaquitas con el material. Las velocidades de retracción y retiro serán mayores que la de avance pudiendo alcanzar velocidades del doble que la de caída dependiendo mucho de la máquina en uso.

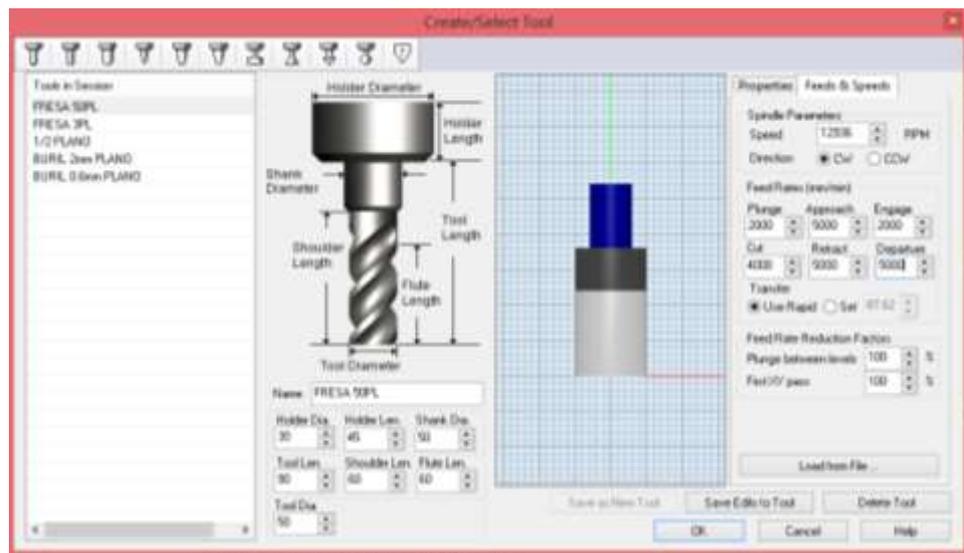


Figura 43. Configuración de velocidades de la herramienta

La velocidad de avance es una de la más importante ya que de esta depende mucho la vida útil de la placa, el corte del material, reducción de vibraciones de la máquina y desgaste de rieles guía.

Ya configurada la herramienta en la pestaña Avances/Velocidades es importante cargar las velocidades desde la herramienta con ayuda del botón asignado para el efecto.

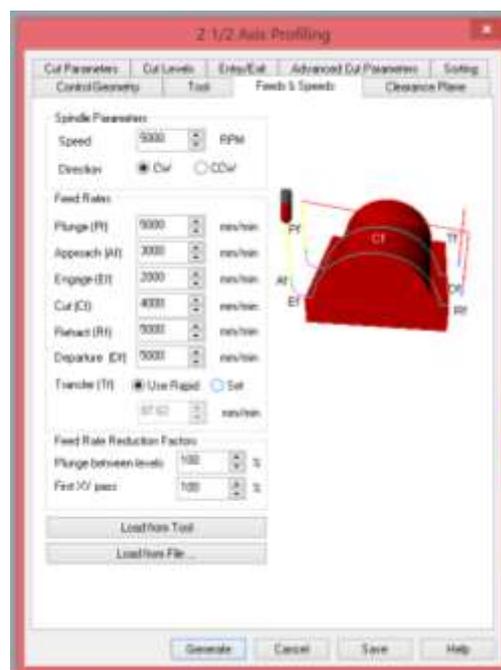


Figura 44. Velocidades cargadas desde la herramienta.

Una vez configurado los parámetros se debe generar el recorrido que hará la herramienta conforme el perfil que se ha seleccionado, en el cual el recorrido aparecerá en el modelo de un color característico (cian).

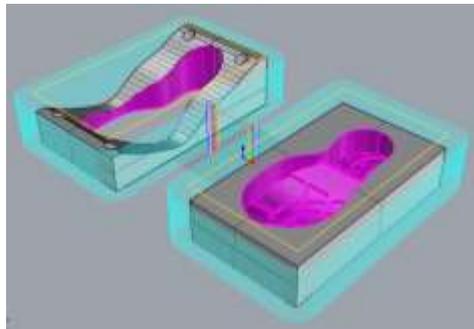


Figura 45. Recorrido que realizará la herramienta para el perfilado.

2.3.3 Operación de Perforado

Esta operación permite realizar taladros que en ocasiones estos mecanizados en realidad no son usados con la finalidad de pasar un eje o perno, más bien permite realizar un vaciado de material para luego realizar un perfilado con una fresa ajustando el agujero a una medida específica con el ajuste necesario para albergar un bocín o guía.

Los fabricantes de brocas determinan las velocidades para una broca según el material a taladrar, es el caso para brocas Irwin según se detalla en la tabla 9.

Tabla 9.
Tabla de velocidades Brocas IRWIN

Velocidades para brocas de acero de corte rápido (HSS)	SFM*
Aluminio y sus aleaciones	200 - 300
Bronce y aleación de cobre y estaño (ordinario)	150 - 300
Bronce (tensión axial alta)	70 - 150
Fundido de matrices (base de zinc)	300 - 400
Fundido en hierro (blando)	100 - 150
Fundido (medio duro)	70 - 100
Duro refrigerado por aire	30 - 40
Maleable	80 - 90
Magnesio y sus aleaciones	250 - 400
Aleación de níquel y cobre o acero alto en níquel	30 - 50
Plásticos y materiales semejantes (Bakelita)	100 - 300
Acero - Suave (de .2 carbono a .3 carbono)	80 - 110
Acero (de .4 carbono a .5 carbono)	70 - 80
Herramienta (1.2 carbono)	50 - 80
Forjadas	40 - 50
Aleaciones- 300 a 400 dureza Brinell	20 - 30
Tensión axial alta (Termodratada)	
35 a 40 Rockwell C	30 - 40
40 a 45 Rockwell C	25 - 35
45 a 50 Rockwell C	15 - 25
50 a 55 Rockwell C	7 - 15
Acero inoxidable	
Grados de maquinado libre	30 - 80
Grados de acritud	15 - 50
Madera	300 - 400

Fuente: (Stanley Black & Decker, Inc.'s affiliates, 2017)

Para determinar las rpm del husillo se procede a realizar con el cálculo haciendo uso de la ecuación 8.

$$RPM = \frac{SFM \times 3.82}{Dc} \quad \text{Ecu. 9}$$

El valor Dc es el diámetro de la broca para este caso se usará una de ½" diámetro, las rpm obtenidas es 1528 con este valor se procede a crear una broca.

Para ello se crea la operación de drill o perforado según muestra la figura 46.

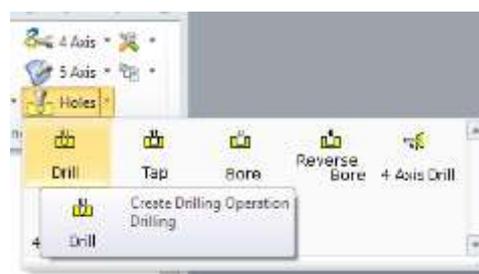


Figura 46. Creación de la operación de perforado

Al desplegarse la ventana de configuración se debe seleccionar los perfiles de los agujeros a realizar, crear la herramienta y demás configuraciones similares al perfilado.

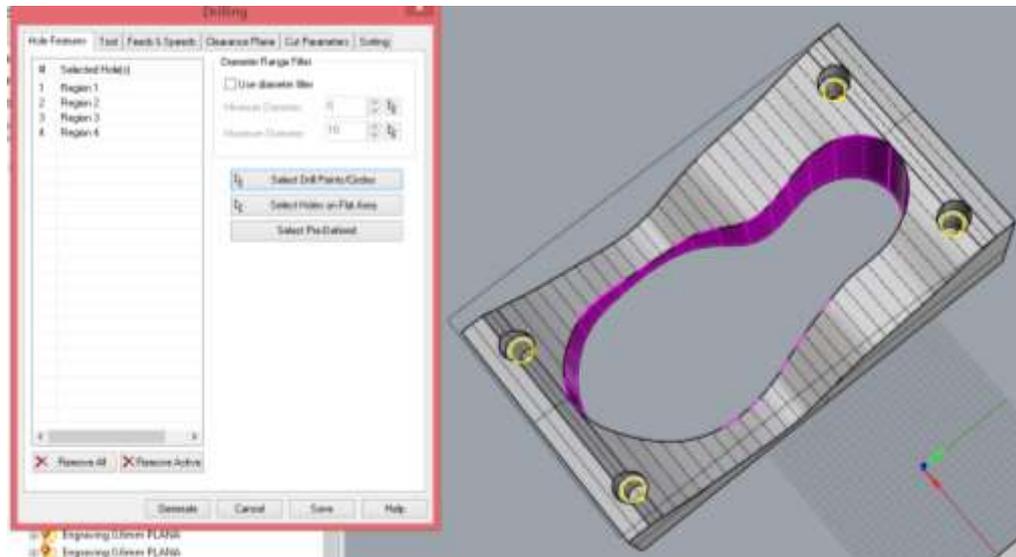


Figura 47. Perforaciones en el molde.

Todas las operaciones que se describen a continuación siguen el mismo tipo de configuración por lo tanto se describirá brevemente las operaciones que se usarán y se indicará dentro del software donde está el comando respectivo para cada una.

Es muy importante considerar que las operaciones descritas y las que se describirán a continuación guardan una estrecha relación con el orden de ejecución es decir están en el mismo orden el que se debería ejecutar en el mecanizado real.

2.3.4 Desbaste Horizontal

Esta operación permite realizar el corte del material aproximándose a la forma del molde, se debe hacer con una herramienta de un diámetro medio para evitar muchas pasadas y disminuir el tiempo de mecanizado.

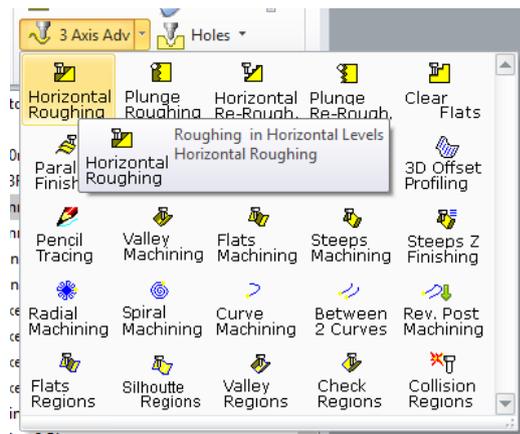


Figura 48. Desbaste Horizontal

Para esta operación se usará una herramienta de plaquitas redondas de 50mm de diámetro cada plaquita tiene 12mm de diámetro, cada pasada cortará 2mm de material, la plaquita puede realizar un corte de hasta 5mm pero esta se ve limitada por la pendiente de las curvas del molde y por la potencia de la máquina, la figura 49 muestra la forma de la herramienta de desbaste.

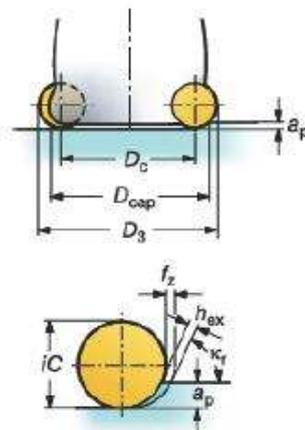


Figura 49. Herramienta para realizar el desbaste.

Fuente: (Sandvik AB, 2000)

La configuración como se mencionó anteriormente es similar al del perfilado. En la figura 50 se muestra el recorrido de la herramienta sobre la superficie, es importante considerar que el paso de la herramienta solamente haga un desbaste del 50% del diámetro de la herramienta para evitar un excesivo torque de la máquina.

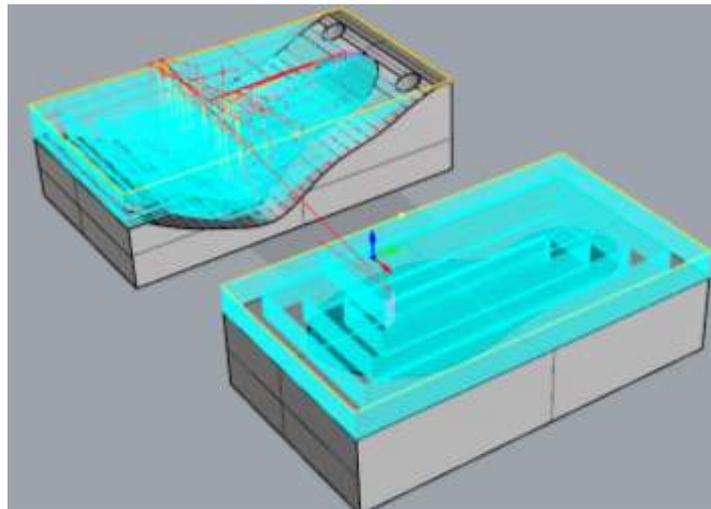


Figura 50. Operación de desbaste con herramienta de 50mm.

Como se puede apreciar en la figura 50 el desbaste está hecho únicamente dando la forma de la curvatura de cierre, pero no se ha realizado la forma de las cavidades en las que se alojará el caucho, pues bien esto se hace con el propósito de hacer un desbaste con una herramienta de menor diámetro con el fin de tener una mayor aproximación a la superficie final.

Por lo que se realiza otro desbaste horizontal con una herramienta de 25mm de diámetro de igual forma se debe seleccionar las curvas desde las que se requiere mecanizar, en la figura 51 se muestra el recorrido de la herramienta únicamente sobre el área que se desea mecanizar.

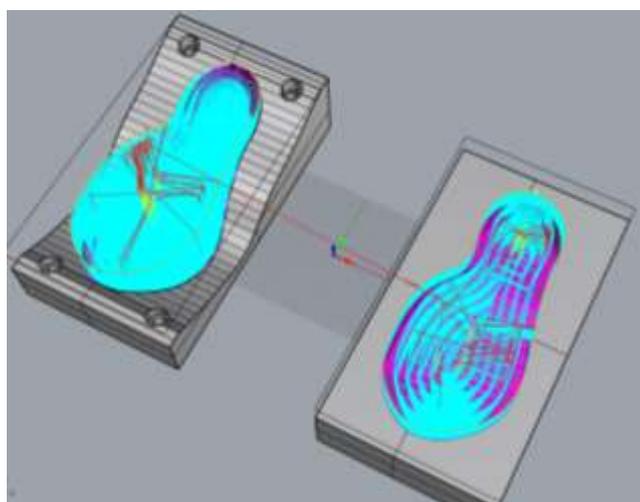


Figura 51. Desbaste de las cavidades para alojar el caucho.

La diferencia de realizar un desbaste con una herramienta de menor diámetro dentro de las cavidades que alojarán la suela es que se tiene una mejor aproximación a la superficie final.

2.3.5 Terminado Paralelo.

Sirve para aproximar de mejor manera a la superficie final, es recomendable realizar esta operación con una herramienta intermedia entre las herramientas inicial y final para retirar excesos de material que podrían ocasionar la ruptura de la herramienta final, para el caso en cuestión primero se pasó con una herramienta de 50mm de diámetro, la herramienta es de 25mm, el acabado o terminado paralelo se lo puede encontrar según indica la figura 52.

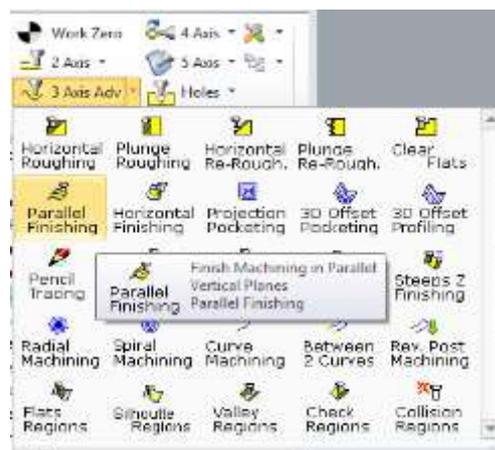


Figura 52. Terminado Paralelo.

De la misma forma que el perfilado se procede a configurar el Terminado paralelo.

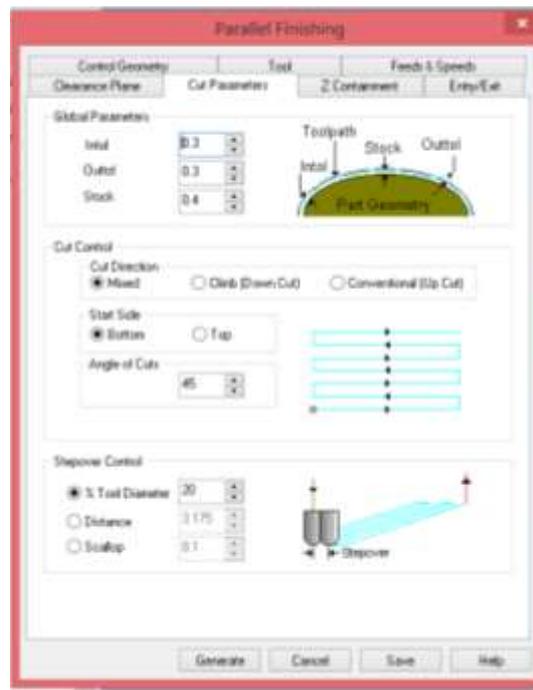


Figura 53. Cuadro de Dialogo de la operación Acabado Paralelo

En la pestaña Parámetros de corte se puede configurar la distancia entre paso a paso misma que se puede configurar en porcentaje en relación al diámetro o distancia.

La figura 54 muestra el recorrido de la herramienta sobre la superficie de molde en el que se puede observar que esta vez la herramienta ya ingresa a la cavidad en la que el caucho tomará la forma del molde obteniendo como resultado final la suela.

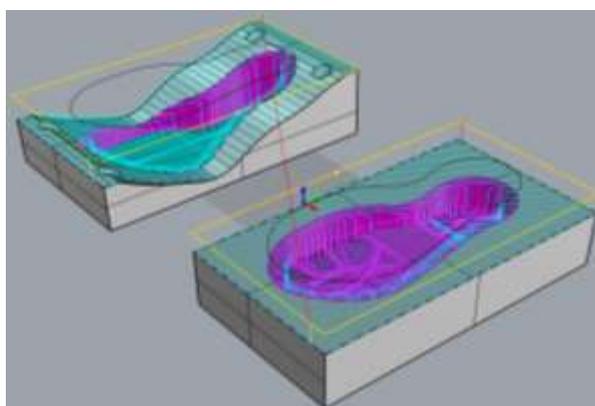


Figura 54. Acabado Paralelo.

La superficie de cierre ya se puede hacer un terminado definitivo con una herramienta redonda de un diámetro igual a la curvatura de menor diámetro que se tenga en la zona donde se va a mecanizar, como las superficies de cierre no poseen mayores detalles y la curva de menor diámetro que existe en esta superficie es de 63mm, darle un terminado con una herramienta de 6mm de diámetro es aceptable para este tipo de molde ya que el acabado superficial no es un punto crucial.

En la figura 55 se puede apreciar el proceso de Acabado Paralelo que en este caso se ha seleccionado el área correspondiente al cierre del molde, y no la cavidad del molde ya que en la cavidad aún existen zonas que la herramienta de 25mm de diámetro no alcanzó a retirar.

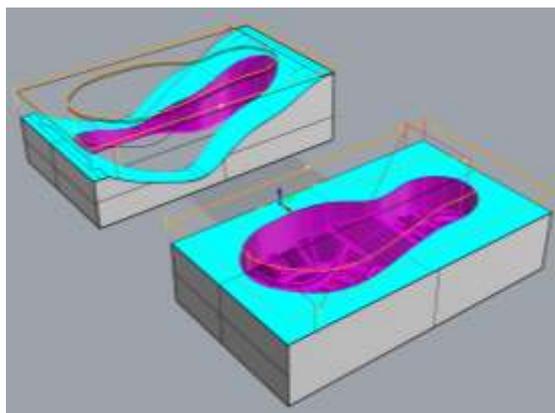


Figura 55. Acabado Paralelo de las superficies de cierre del molde

2.3.6 Vaciado 3D.

El vaciado 3D permite retirar los excesos de material en las tres dimensiones, de tal forma que logra llegar en todas las direcciones sobre las superficies, según permita el diámetro de la herramienta, es recomendable realizar esta operación con una herramienta de la mitad de diámetro que la anterior, en este caso se usó una 25mm, la que se usará para esta operación será de 12mm de diámetro y la forma de la herramienta será redonda, con esta operación únicamente se mecanizará la parte del molde que tiene la huella, ya que la otra parte no requiere de un acabado en el fondo debido a que es vaciado completamente.

La configuración obedece a las anteriores ya realizadas ya que se debe configurar los mismos parámetros ya revisados en las operaciones anteriores.

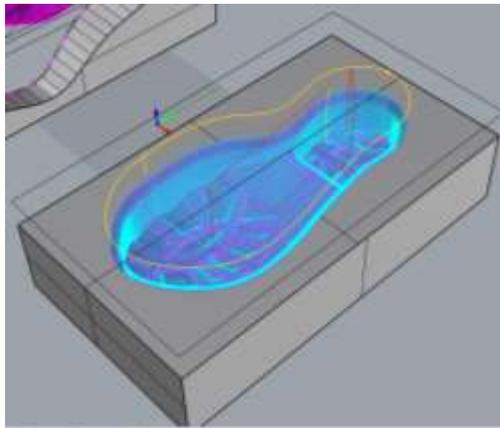


Figura 56. Vaciado 3D con una herramienta de 12mm de diámetro

Se debe considerar que con esta herramienta no se alcanzó a mecanizar las esquinas interiores que forman la huella por lo que se realizará nuevamente la misma operación pero esta vez con una herramienta de menor diámetro, como se dijo antes se recomienda realizar con una de diámetro igual a la mitad de la herramienta anterior por lo que se usará una herramienta de 6mm de diámetro.



Figura 57. Vaciado 3D con una herramienta de 6mm de diámetro.

En la figura 57 se puede visualizar que la herramienta de 6mm ha logrado retirar la gran mayoría de material, pero se puede evidenciar que en los ángulos internos al ser esto con un filo recto obviamente la herramienta al ser redonda no iba alcanzar a eliminar este material por lo

que es necesario realizar un mecanizado que permita eliminar ese material sobrante o en exceso.

2.3.7 Mecanizado de Curva

Esta operación permite generar un mecanizado siguiendo una trayectoria plana que se proyecta sobre la superficie a mecanizar, esta operación usaremos para retirar el material en todo el filo de la suela, para este caso se usará una herramienta de 3mm ya que la anterior fue de 6mm plana, para lograr alcanzar las esquinas que tiene ángulos rectos; esta operación la podemos encontrar de la forma que indica la figura 59

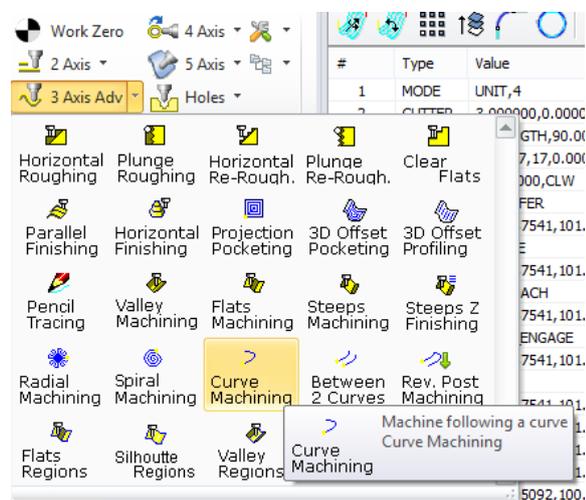


Figura 58. Operación de Mecanizado de Curva

La configuración sigue el mismo procedimiento que las operaciones anteriores selección de la región, configuración de herramienta, velocidades y parámetros de corte.

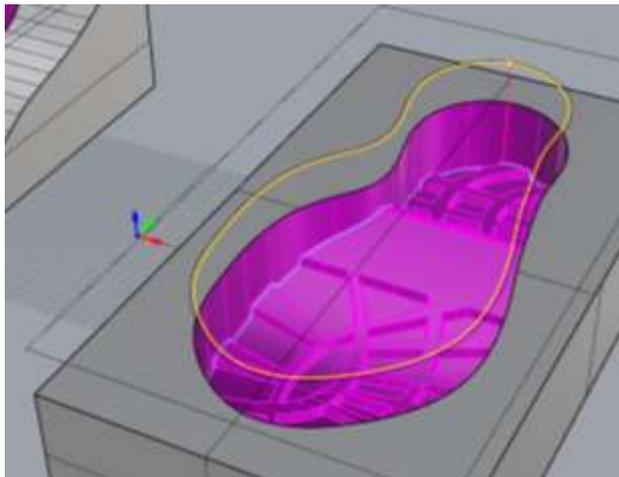


Figura 59. Mecanizado de Curva con herramienta plana de 3mm

Ya que esta operación retiró el material en exceso alrededor de la suela, es necesario realizar una operación que haga lo mismo pero en las huellas.

Para ello se puede usar la misma operación de Vaciado 3D pero en esta ocasión con la herramienta de 3mm de diámetro plana, y seleccionando únicamente las partes en las que se requiere mecanizar como muestra la figura 60.

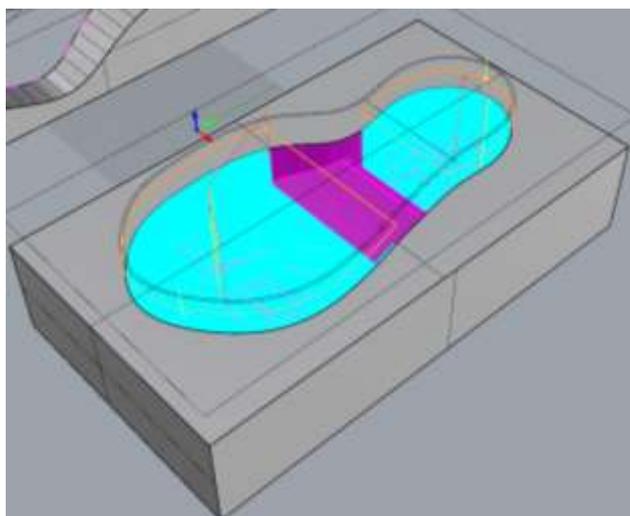


Figura 60. Vaciado 3D con herramienta 3mm de diámetro plana.

Las cavidades que alojarán a las guías se perfilarán con la misma operación descrita en el numeral 2.3.2.

La misma parametrización se usará para el mecanizado de la tapa para el molde, por lo que se guardará a la parametrización como plantilla y esta misma se podrá usarse para el molde de la suela del pie derecho.

2.3.8 Generación de una platilla de parametrización.

Generar una plantilla a partir de una parametrización existente facilita la generación de mecanizado ya que al cargar una plantilla no se requiere nuevamente ir insertando todos los valores únicamente seleccionar las áreas a mecanizar, para esto RhinoCam proporciona la facilidad de guardar directamente la plantilla.

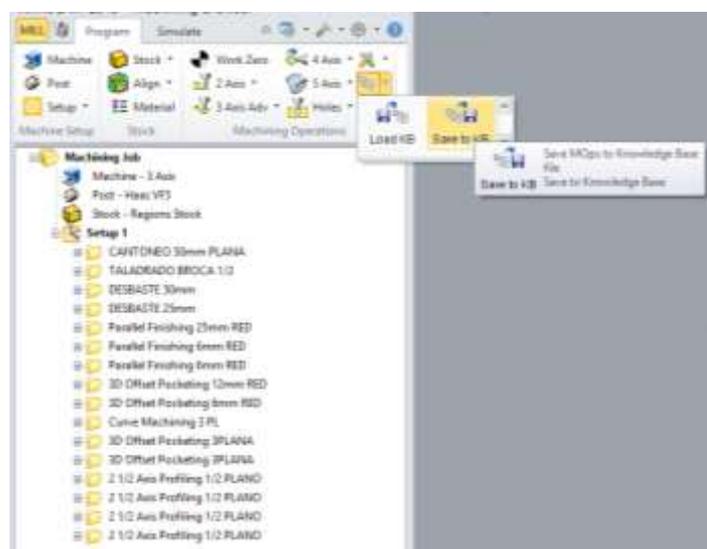


Figura 61. Generar una plantilla de un mecanizado.

Para abrir la plantilla en otros archivos a mecanizar se procede de igual forma que como se guardó haciendo clic en el icono de Load que se muestra en la figura 61, cuando ya se cargue la plantilla aparecerá todas las carpetas correspondiente a cada mecanizado.

En la figura 62 se muestra el recorrido completo de las herramientas que darán forma a la tapa del molde de la suela para el pie izquierdo. De esta misma forma se debe realizar la configuración de las operaciones de mecanizado para el molde de la suela para el pie derecho.

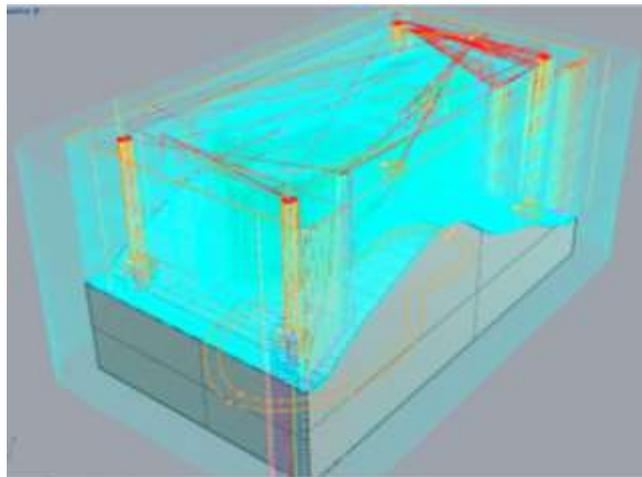


Figura 62. Recorrido de la herramienta para la tapa del molde.

En la tabla 10 se presenta un resumen de los parámetros que se configuraron en cada uno de los procesos y cada una de las herramientas usadas

**Tabla 10.
Parámetros de velocidades para las herramientas usadas**

Proceso	Herramienta	Vc	RPM	Vf
Perfilado	D=50mm #placas=4 plana	800m/min	5100	4080mm/min
	D=12mm #filos=2	800m/min	21220	8488mm/min
Perforado	Broca de 1/2"	200ft/min	1528	60960mm/min
Desbaste	D=50mm #placas=5 Dp=12mm	800m/min	5425	5425mm/min
	D=25mm #placas=3 Dp=10mm	800m/min	11072	6643mm/min
	D=25mm #placas=3 Dp=10mm	1000m/min	16450	9870mm/min
Terminado Paralelo	#placas=3 Dp=10mm			

Vaciado 3D	D=12mm #filos=2	1000m/min	48229	19291mm/min
	D=6mm #filos=2	1000m/min	96166	38466mm/min
	D=3 #filos=1	1000m/min	143912	28782mm/min

Cabe indicar que es necesario realizar los ajustes necesarios de los parámetros dependiendo de las características de la máquina CNC en la que se vaya a mecanizar el molde.

Las características de la máquina que se deberá usar para la fabricación del molde se indican en la tabla 11.

Tabla 11.
Características de la máquina CNC

Marca		HAAS
Modelo		VF-2SS
Recorridos en ejes		X=762mm, Y=406mm, Z=508
Dimensiones de mesa		914x356mm
Peso máximo en mesa		680Kg
Husillo	Potencia máxima	22.4KW
	Velocidad máxima	12000rpm
	Par máximo	122Nm a 2000rpm
	Cono	BT40
Refrigeración		Por líquido refrigerante
Avances	Eje X	35.6m/min
	Eje Y	35.6m/min
	Eje Z	35.6m/min
Corte máximo		21.2m/min
Empuje de los ejes		X,Y=8874N, Z=13723N
Cambiado	Tipo	STMC 

de herramientas	Capacidad	24+1
	Peso máximo de herramienta	5Kg

El tiempo empleado en la parametrización de todos los procesos de mecanizado para cada suela se describe en la tabla 12

Tabla 12.
Tiempos empleados en la parametrización.

Proceso	Tiempo
Perfilado	6min
Taladrado	5min
Desbaste horizontal	7min
Acabado Paralelo	7min
Vaciado 3D	7min

2.4 SIMULACIÓN DE MECANIZADO

La simulación del mecanizado permite verificar que las operaciones den el resultado esperado, ya que existen muchas posibilidades de que estas realicen alguna acción inesperada que puedan alterar el mecanizado.

Los parámetros que pueden alterar el mecanizado son varios, por ejemplo la selección de líneas, regiones o superficies que por razones de brevedad fueron seleccionadas, esto provoca que el recorrido de la herramienta cambie de dirección y altere el diseño final o que la herramienta choque con el molde o con la bancada.

RhinoCam permite realizar de distintas formas la simulación del mecanizado operación por operación para una mejor apreciación del mecanizado, una simulación completa del mecanizado es decir todas las operaciones en conjunto y las operaciones que selecciones para el mecanizado.

En el cuadro de diálogo de RhinoCam existe la pestaña de simulación en la que aparecen los controles para realizarla como se indica en la figura 63.

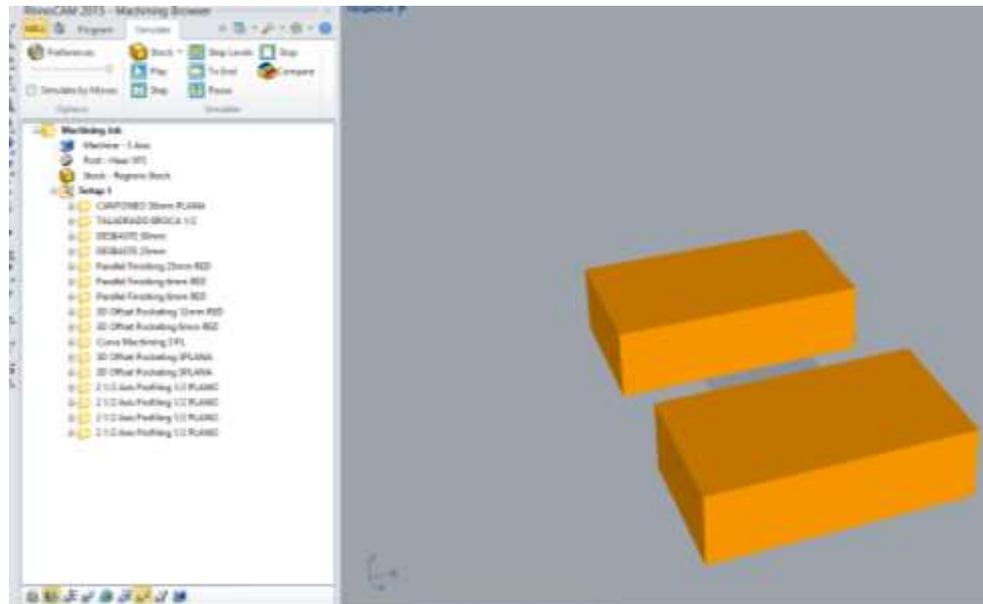


Figura 63. Cuadro de diálogo de la Simulación

Como se puede apreciar en la figura 63 al dar clic sobre la pestaña Simulación inmediatamente desaparece el modelo CAD y aparece el bloque del material que se generó para efectos del mecanizado, esto si se tiene activado la visibilidad de los mismos, los controles de visibilidad se encuentran ubicados en la parte inferior del cuadro de dialogo de RhinoCam los mismos se muestran en la figura 64



Figura 64. Controles de visibilidad.

Los controles permiten activar y desactivar la visibilidad del modelo CAD, del bloque de material, la textura del material, el recorrido de la herramienta, los ejes de coordenadas globales, los ejes de coordenadas de la máquina, la herramienta, el sujetador de la herramienta y la máquina respectivamente.

En la figura 65 se muestran los avances para diferentes tiempos de la simulación del Desbaste Horizontal con la herramienta de 50mm con pastillas redondas.

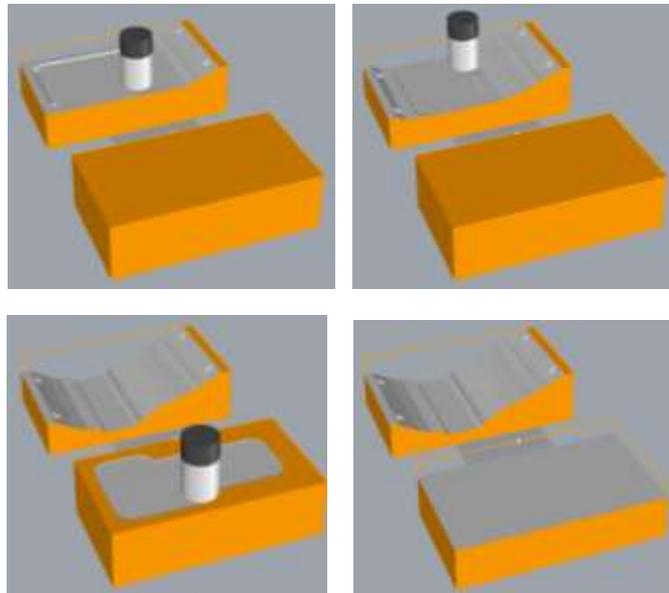


Figura 65. Simulación del mecanizado Desbaste Horizontal

Para generar la simulación completa del mecanizado del molde es necesario seleccionar todas las operaciones de mecanizado, existe una configuración de las preferencias de simulación que se deben ajustar antes de generar la simulación total.

Estos parámetros de simulación permiten definir la calidad, la velocidad, la exactitud y la transparencia del modelo, para una simulación de operación por operación se puede ejecutar todos los parámetros al máximo ya que el tiempo de simulación no se incrementa, pero en caso de ejecutar todas las operaciones es recomendable disminuir los parámetros de ajuste ya que dependiendo mucho de la capacidad de la computadora se ve incrementado el tiempo de simulación en especial cuando existen un gran número de operaciones de mecanizado.



Figura 66. Ajustes de Preferencia de Simulación.

En la figura 67 se puede apreciar algunos avances de la simulación total de mecanizado.

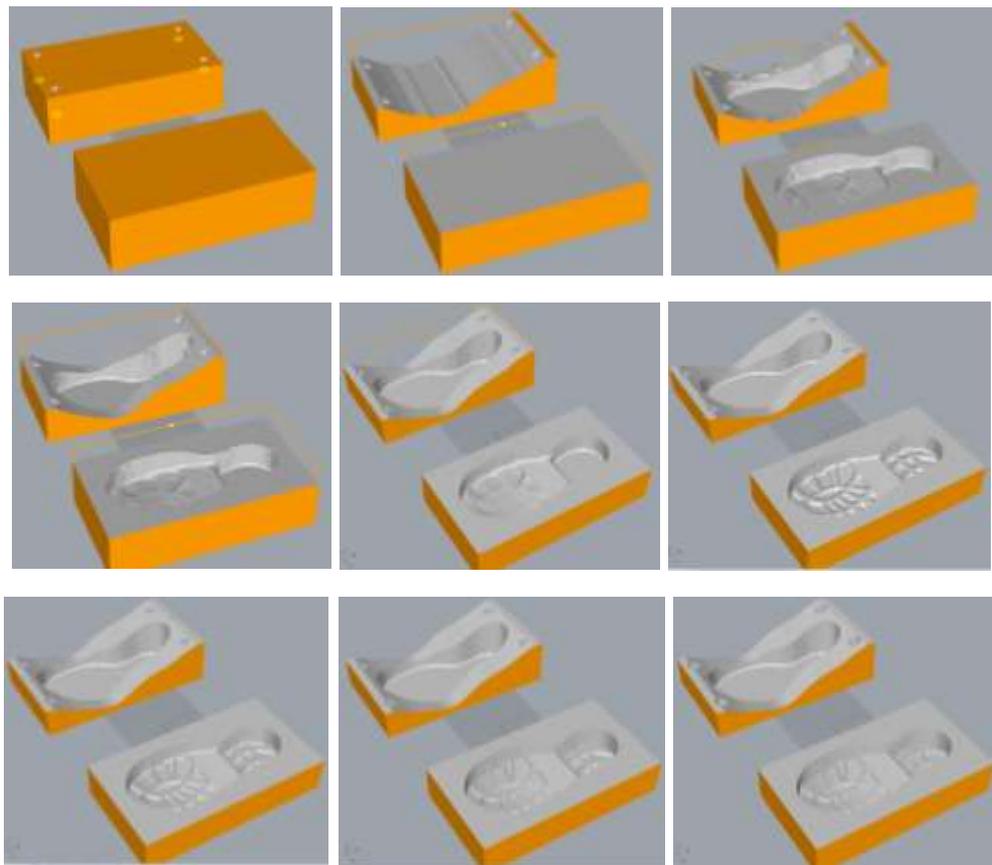


Figura 67. Progreso de la simulación del mecanizado total del molde.

CAPÍTULO 3

3.1 Determinación de herramientas adecuadas para la manufactura.

La determinación de la herramienta no sigue un estándar el cual indique el usar una herramienta compuesta por pastillas o una herramienta entera como las que se muestran en las figuras desde la 68 hasta la 70



Figura 68. Herramientas formadas por placas.

Fuente: (Sandvik AB, 2000)



Figura 69. Herramientas enterizas.

Fuente: (Sandvik AB, 2000)



Figura 70. Buriles redondos HSS

Fuente: (Distribuidora Ferretera MIMS, 2017)

Por lo general la elección de una u otra herramienta está dada por la durabilidad de la misma, ya que en los dos tipos comercialmente existen clasificaciones según el tipo de material al que están destinadas a ser

usadas, otro parámetro que define la elección de las herramientas es el costo.

Todo esto conlleva a realizar una elección basada en la experiencia puesto que en el sector del calzado y en especial de calzados personalizados, no existen una estandarización del diseño de molde, y dichos moldes deben ser realizados en materiales que permitan ser reciclados y reusados, tal cual el aluminio presentan buenas prestaciones para este proceso, cada diseño de suela requiere diferentes métodos de mecanizado, por lo que es necesario disponer de una alta gama de herramientas de diferentes dimensiones, formas y durabilidad.

Para determinar la herramientas es necesario estandarizar las operaciones de mecanizado, es decir en el caso de estudio se pudo observar que las operaciones comunes para diferentes moldes son el perfilado con la herramienta de 50mm plana, el desbaste con las herramientas de 50mm y de 25mm redondas, por lo que se puede considerar que estas herramientas al tener un gran usos dentro de la fabricación de moldes deben ser herramientas formadas por placas de metal duro.

Las herramientas que son usadas para las operaciones de Vaciado 3D son medianamente comunes usadas en algunos tipos de moldes que en su diseño no contemple ranuras y/o labrados en la huella con áreas pequeñas, al igual que la operación de perfilado para las cavidades de las guías del molde, por lo que es recomendable estandarizar estas herramientas del tipo enterizas.

En este caso de estudio no se vio un diseño de un molde con ranuras y/o labrados de huellas muy laboradas pero existen diversos diseños de suelas en los que existen huellas con figuras muy pequeñas que requieren de herramientas muy delgadas para realizar el mecanizado, herramientas con diámetro de 1mm no existen dentro del tipo de las formadas por placas, para el caso de herramientas enterizas existen

hasta 1mm de diámetro pero no poseen la longitud adecuada para realizar mecanizado ya que el cuello o vástago de la misma es de un diámetro superior lo que sí el labrado de la huella es hasta las paredes laterales, por lo general es así, chocarían con las paredes laterales del molde lo que imposibilita el uso de estas herramientas, en estos caso para mecanizados específicos de cada suela se recomienda usar buriles del tipo HSS, estas permiten ser afiladas y darles formas según se requiera en el mecanizado.

En la tabla 13 se presenta un resumen de las herramientas determinadas para el mecanizado del molde para la fabricación de suela.

Tabla 13.
Detalle de herramientas.

Tipo	Descripción	Imagen	Especificaciones
Placas	Fresa CoroMill R290-A16-50 Placa R290-12T308M-KL 1030 Anexo 2		Cono BT40 Anclaje al eje Placas de metal duro Código N 12x12x5mm
	Fresa CoroMill R200-A22-50 Placa RCKT 12 04 M0-PM 1030 Anexo 2		Cono BT40 Anclaje al eje Placas de metal duro Código N D=12mm e=5mm
	Fresa CoroMill R200-CIL-25 Placa RCKT 10 T3 M0-		Cono BT40 Anclaje al eje Placas de metal duro Código N D=10mm e=4mm 

	PH1030 Anexo 2		
Enterizas	Redonda de 12mm dos canales o filos Anexo 2		Cono BT=40 Boquilla 12-13mm Fresa enteriza Carburo Punta esférica
	Plana de 12mm dos canales o filos Anexo 2		Cono BT=40 Boquilla 12-13mm Fresa enteriza Carburo Punta plana
	Redonda de 6mm dos canales o filos Anexo 2		Cono BT=40 Boquilla 5-6mm Fresa enteriza Carburo Punta esférica
Buriles	Buril HSS D=3mm L=100mm		Cono BT=40 Boquilla 3-4mm Buril HSS Afilado punta eferica Un filo

3.2 Seteo y parametrización de la maquina CNC

Los parámetros más importantes que se deben ajustar en la máquina son la ubicación de las herramientas y la del bloque a mecanizar.

3.2.1 Ubicación de las Herramientas.

La ubicación de las herramientas es un parámetro sumamente importante a la hora de ejecutar el mecanizado. Para ello cada máquina tiene diferentes capacidades y disposiciones de portaherramientas,

existen portaherramientas horizontales y verticales, en estas existen numeraciones de los espacios que albergan las herramientas.

En cada uno de los espacios que alojarán las herramientas se debe ir ubicando la herramienta según correspondan en el CAM, esto se puede verificar en los parámetros de ajustes de las herramientas como se indica en la figura 42 el parámetro Número de Herramienta, por defecto el software va asignando de manera ascendente automática un número de herramienta cada que se cree una nueva herramienta.

El Software permite obtener un listado de herramientas que se usarán en el mecanizado, lo que facilita el seteo de las herramientas en las posiciones correctas según el código G, evitando choques o daños.

Para obtener el listado de las herramientas se debe hacer clic derecho en el setup y luego en información según se muestra en la figura 71.

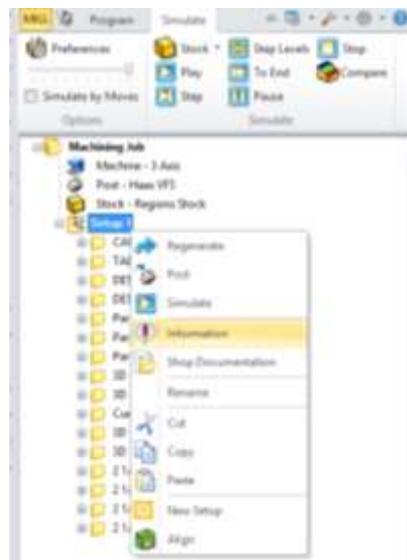


Figura 71. Obtención de Listado de Parámetros.

Después de lo cual aparecerá un cuadro en el que se muestra cada una de las operaciones de mecanizado que se han generado, el tipo de herramienta, el número de herramienta las velocidades de avance, etc.

El número de herramienta mostrado en la figura 72 se debe hacer coincidir con el número del portaherramientas en la máquina, para ellos se puede imprimir el listado para evitar errores.

Name	Status	Tool	Tool #	Cut Feed	# of GOTOs	Machine Time
Setup 1						
CANTONEO 50mm PLANA	Clean	FRESA 50PL	1	4000.00 mm/min	6665	15.93 min
TALADRADO BROCA 1/2	Clean	BROCA 1/2	5	200.00 mm/min	9	3.56 min
DESBASTE 50mm	Clean	FRESA 50...	2	5000.00 mm/min	2544	21.41 min
DESBASTE 25mm	Clean	FRESA 25...	3	5000.00 mm/min	30970	39.66 min
Parallel Finishing 25mm RED	Clean	FRESA 25...	3	3500.00 mm/min	3165	7.53 min
Parallel Finishing 6mm RED	Clean	6mm ESCA	6	4000.00 mm/min	4447	14.65 min
Parallel Finishing 6mm RED	Clean	6mm ESCA	6	4000.00 mm/min	4800	14.66 min
3D Offset Pocketing 12mm ...	Clean	12mm ESCA	12	2000.00 mm/min	52289	20.12 min
3D Offset Pocketing 6mm R...	Clean	6mm ESCA	6	2000.00 mm/min	79437	31.01 min
Curve Machining 3 PL	Clean	FRESA 3PL	17	1000.00 mm/min	353	0.84 min
3D Offset Pocketing 3PLANA	Clean	FRESA 3PL	17	1400.00 mm/min	153503	1 hr 0 min
3D Offset Pocketing 3PLANA	Clean	FRESA 3PL	17	1400.00 mm/min	74726	31.68 min
2 1/2 Axis Profiling 1/2 PLA...	Clean	1/2 PLANO	7	1500.00 mm/min	149	0.59 min
2 1/2 Axis Profiling 1/2 PLA...	Clean	1/2 PLANO	7	1500.00 mm/min	149	0.51 min
2 1/2 Axis Profiling 1/2 PLA...	Clean	1/2 PLANO	7	1500.00 mm/min	257	0.31 min
2 1/2 Axis Profiling 1/2 PLA...	Clean	1/2 PLANO	7	1500.00 mm/min	257	0.39 min
					Sub-total	4 hr 23 min

Figura 72. Información de las operaciones de mecanizado

En la tabla 14 se muestra en resumen del tiempo que se tarda en mecanizar el molde, estos datos son obtenidos de la misma manera que los tiempos de mecanizado mostrados en la figura 72.

**Tabla 14.
Tiempo de mecanizado para los moldes**

Molde	Método empleado	Artesanal
Derecho	Cavidad: 4hrs y 23min	Es tiempo es de 7 a 10 días.
	Tapa: 4hrs y 7min	
Izquierdo	Cavidad: 5hrs y 58min	(Maquetado)
	Tapa: 5hrs y 12min	

3.2.2 Ubicación del Material.

Ajustar la posición del material a mecanizar es un parámetro muy importante ya que con este ajuste se establece el inicio del mecanizado, es decir desde donde iniciarán las herramientas a mecanizar.

Al ajustar la ubicación del material se debe hacer coincidir el cero de la pieza con el cero del diseño en CAD, es recomendable dejar un excedente en las dimensiones del material para evitar el extensivo trabajo que esto conlleva, ya que no es solo localizar el punto inicial, si no también cuadrar las caras del material con los ejes de la máquina esto requiere de tiempo y precisión, para lo cual se usan palpadores.



Figura 73. Palpador Análogo

Al dejar un excedente en el material aproximadamente de 5 a 10 mm en longitud y ancho evita el arduo tiempo de centra el stock, basta con marcar el centro del bloque tomando como referencia las diagonales, este centro se hace coincidir con una herramienta preferiblemente de diámetro pequeño. Como se muestra en la figura 74.

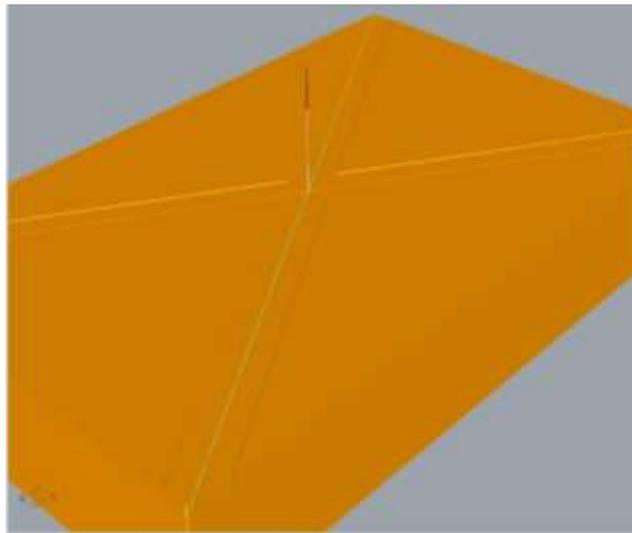


Figura 74. Centrado del Bloque.

Una vez realizada esta acción esa ubicación se debe ajustar en la máquina con la ayuda del comando Part Zero Set que la mayoría de controladores como Fanuc, Siemens, Acu-rite, Haas, etc., los incorporan.

Es importante ajustar únicamente los parámetros en los ejes X e Y, puesto que esto conlleva más facilidad en la configuración de la altura de la herramienta, debido a que algunos sistemas como HAAS integran un modo automático de compensación de altura de la herramienta, el ajuste de esta compensación de la altura de herramienta en forma automática requiere parámetros específicos de la composición tanto de la herramienta como del material a mecanizar, mismos que no son homogéneos en especial en el material lo que genera compensaciones algo fuera de lo esperado, provocado mecanizados con variaciones en las medidas.

La altura de cada herramienta se la va ajustando una por una de conformidad sobre el material a mecanizar con la ayuda de una galga. De manera práctica se obvia mucho las galgas presto a que tienen un valor considerable y en caso de exceder el movimiento en el eje Z de la máquina se daña la galga y el filo de corte de la herramienta, por lo que generalmente se usa una cinta plástica de envoltura, misma que tiene una décima de milímetro.

3.2.3 Procedimiento para ajustar la altura de la herramienta.

El procedimiento a seguir para el ajuste de la altura de la herramienta es como se describe a continuación

- Ubicar la herramienta en el número correspondiente del portaherramientas de la máquina según se muestra el listado en la figura 72, para ejemplo tomaremos la herramienta para el perfilado que esta como uno que debe ser ubicado en el portaherramientas 1.
- Ya montada la herramienta se procede a ubicarla sobre el material con el movimiento de los ejes X e Y únicamente.
- Seguidamente se procede a colocar una cinta plástica de envoltura entre la herramienta y el stock.
- Con un movimiento lento en el eje Z, teniendo cuidado de no estrellar las herramienta con el stock, se procede a aplastar la cinta plástica hasta notar que la herramienta genera una ligera compresión sobre la cinta, con la ayuda del comando Set Tool que al igual que el Part Zero Set, está incorporado en los controladores, permite memorizar la posición actual en la herramienta que se está configurando.
- Esto se debe hacer con cada una de las herramientas tratando en lo posible dejar la misma compresión sobre la cinta para todas las herramientas.



Figura 75. Ajuste de la altura de la herramienta.

3.3 Mecanizado del Molde.

Para mecanizar el molde primeramente se debe generar el Post Procesado de las operaciones de mecanizado, generando los códigos G y M, los cuales son indicaciones que entiende toda máquina de Control Numérico.

Los códigos G y M son comunes para la mayoría de máquinas pero existen algunas diferencias de una máquina a otra esto es esencialmente para los códigos de configuración y lectura.

3.3.1 Obtención del Código G

La obtención del código G mediante un software es muy simple y fácil, para ellos se deberá seguir los siguientes pasos que se describen a continuación para el caso de RhinoCam:

- Seleccionar el tipo de controlador que dispone la máquina en la que se va a mecanizar, para ello hacemos clic en el ícono de Post según se muestra en la imagen 76.

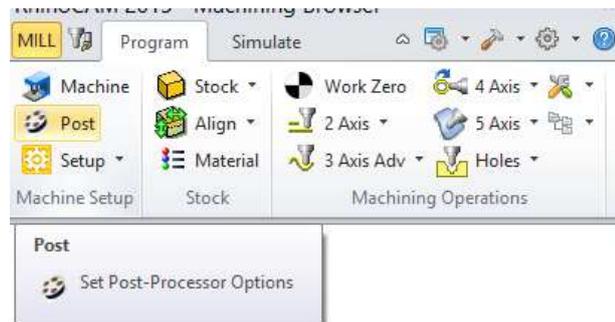


Figura 76. Icono para el Post Procesado.

- Aparece el cuadro de diálogo de Ajustes y Opciones del Post Procesado, en este cuadro de dialogo es en el que se debe seleccionar el Procesador que corresponde a la máquina que se usará, y la extensión del archivo de procesado que igual depende de la máquina en este caso se escoge Haas y la extensión .nc

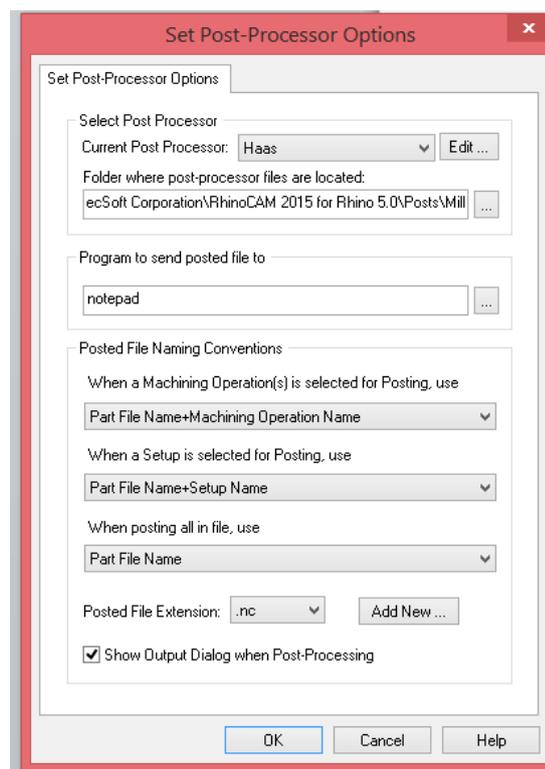


Figura 77. Ajuste del Post Procesador.

- Seleccionar el Setup 1 que es donde están todas las operaciones que se ha generado para el mecanizado del

molde, con un clic derecho aparecen varias opciones en la que se selecciona Post.

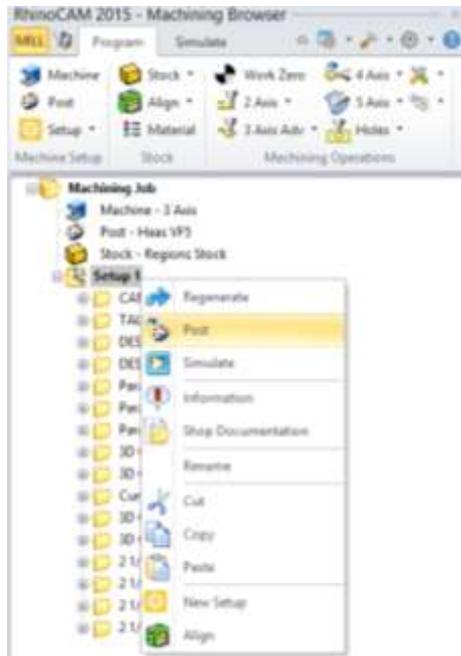


Figura 78. Generar el Código G

- Aparece un cuadro de diálogo en el que se debe ingresar la dirección donde guardar el código.

Una vez generado el código G este se lo puede cargar a una memoria de almacenamiento que admita la máquina, por lo general las máquinas actuales admiten memorias USB o SD.

En el anexo digital Códigos G se puede verificar el código G que se generó para la construcción del molde para el pie derecho.

El tiempo de mecanizado para este molde se puede verificar en la figura 72 en la última columna, la que muestra los tiempos de mecanizado por cada una de las operaciones que conlleva el mecanizado total.

3.4 Vulcanizado de la suela.

El proceso de vulcanizado sirve para la unir las cadenas moleculares entre si formando un retículo y de esta manera conseguir una elasticidad elevada. Retículo que se forma debe ser poco denso, de manera que

únicamente un átomo de cada 100 a 200 forme un enlace con otro átomo de una cadena adyacente, esto permite conservar la gran capacidad de deformación, y es suficiente para impedir el desplazamiento de una cadena con respecto a las otras.

A los cauchos se puede dividir en dos grandes grupos en cauchos naturales o cauchos sintéticos estos a su vez se subdividen dependiendo de las formulaciones que se realicen en base a su composición química.

En la tabla 15 se realiza una comparación entre el caucho natural y el sintético NBR, evaluando las características que son importantes dentro de la fabricación de suelas para calzado.

Tabla 15.
Comparación de propiedades de cauchos

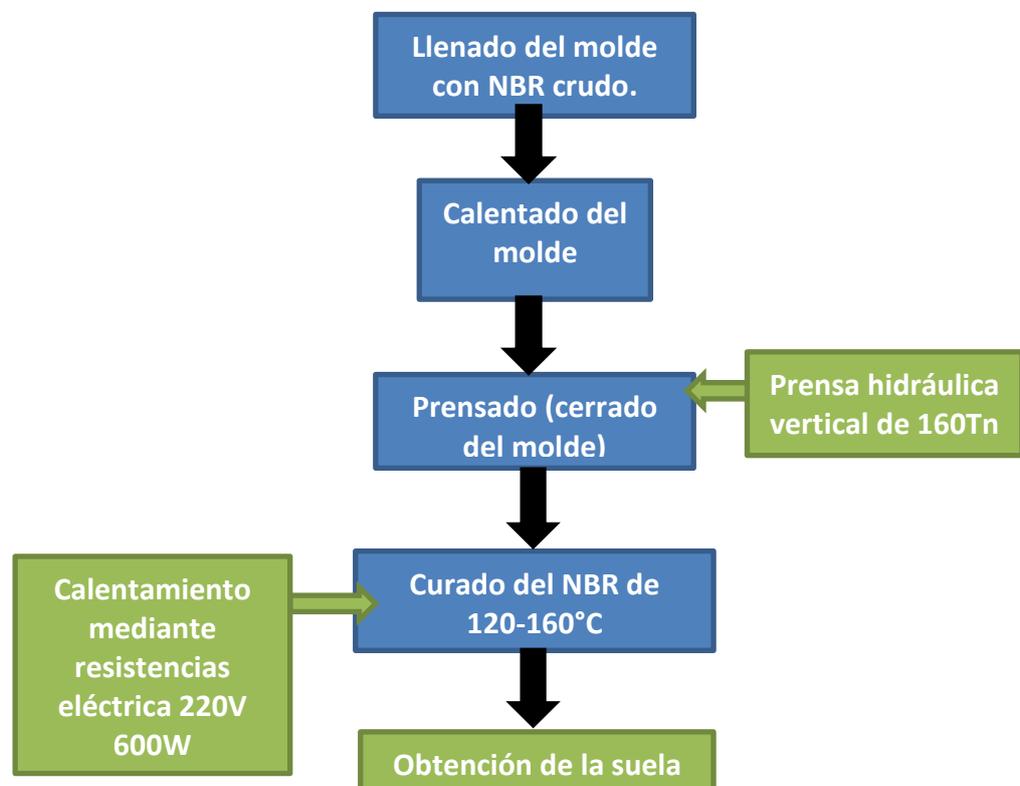
Propiedades	Caucho Natural	Sintético NBR
Rango de Dureza	20-90	40-90
Resistencia a la tracción (Kg/cm²)	300	250
Alargamiento a la rotura (%)	650	650
Resistencia abrasiva	Buena	Buena
Resistencia a compresión	Buena	Excelente
Permeabilidad a gases	Regular	Regular
Vulcanización	Mayor Azufre Menor acelerador 108-180°C	Menor Azufre Menor acelerador 120-160°

Una de las características no menos importantes que no se refleja en el cuadro es la ideología de conservar el medio ambiente, reduciendo en gran parte el uso del caucho natural.

De esta forma se determina que el mejor caucho a usar es el sintético NBR cuyas características se detallan en el anexo 3

3.4.1 Proceso de vulcanizado del NBR

El proceso para vulcanizar el caucho sintético NBR sigue el flujograma.



3.5 Prototipado de la suela.

El prototipado permite modelar el diseño final y efectuar un test sobre los parámetros físicos y estéticos del mismo sin necesidad de que incurra en la ejecución definitiva. Se trata, simplemente, de testar haciendo uso de un modelo.

Antes de ejecutar un prototipo hay ciertas consideraciones que se deben tomar en cuenta:

- La profundidad de funcionalidad que debe tener el prototipo.
- Elección de la herramienta del prototipado considerando sus limitaciones.
- El nivel de fidelidad requerido en el equipo.
- Propósito del prototipo.

Para este caso se requiere que el prototipo brinde la misma funcionalidad que el producto final, en especial en las características físicas y estéticas con las que el usuario pueda dar su criterio de confort y satisfacción.

Por lo que se requiere que el prototipo este a escala real, construido de un material similar al del producto final, de manera que este se asemeje en mucho al producto definitivo.

En la actualidad el avance tecnológico brinda una herramienta muy poderosa que permite obtener prototipos con funcionalidades, fidelidades y propósitos que se asemejan en gran proporción al producto final, y es la impresión 3D.

3.5.1 Impresión 3D

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Las impresoras 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, aunque como cualquier proceso industrial, estarán sometidas a un compromiso entre su precio de adquisición y la tolerancia en las medidas de los objetos producidos. Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores del producto la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de ensamble. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos de producto (Alborés, 2013).

Desde 2003 habido un gran crecimiento en la venta de impresoras 3D. De manera inversa, el coste de las mismas se ha reducido.

Las impresoras 3D no pueden utilizar cualquier material, hay una gran variedad para su impresión, como: transparentes, de colores, opacos, flexibles, rígidos, de alta temperatura y resistencia. Este tipo de materiales satisfacen necesidades de manera visual y táctil, además, son muy resistentes y con la fuerza necesaria que los prototipos requieren. El diseño de nuestro producto nos dará paso a escoger el material que debemos utilizar.

El prototipo en cuestión es una suela para calzado por lo que se requiere de un material flexible que permita simular el caucho. (Sherman, 2004)

Filamento Flexible: es un compuesto plástico al que se le añade un agente químico (plastificante), para aumentar su flexibilidad y reducir la temperatura de fundido y la viscosidad que permite que las impresoras 3d puedan fundirlo y darle la forma deseada, quedando el producto final como una pieza consistente que presenta como propiedad principal a destacar su flexibilidad. Cualidad de la que carecen otros compuestos como puede ser el PLA o el plástico de las bobinas ABS si están en estado puro (Quecartucho, 2013).

Definición de las normas ASTM (ASTM-D-883), un plastificante es un material que se incorpora a un plástico para facilitar su procesado y mejorar su flexibilidad o “distensibilidad”. La adición de un plastificante puede hacer que disminuya la viscosidad en estado fundido, el módulo de elasticidad, y la temperatura de transición vítrea (Tg) de un plástico.

Se incorporan, pues para facilitar la transformación del material y aumentar la resistencia al impacto, ya que adicionados en pequeñas cantidades aumentan la flexibilidad. La ductilidad y la tenacidad de los polímeros también pueden mejorarse con la ayuda de los plastificantes. (Quecartucho, 2013)

3.6 Impresión del Prototipo de la Suela.

A partir del diseño de la suela esta se debe exportar en archivo con extensión .stl, misma que es reconocida por la mayoría de software que permiten generar capas para del diseño y a partir de estas capas generar g-code para que sea leído por la impresora.

Existen una amplia gama de softwares libres y propietarios que permite realizar las operaciones de capeado de un diseño 3D entre los cuales podemos encontrar Cura, Repetier Host, Craftware, Slic3r, Rinho 3D printer, etc, siendo el último de estos software propietario, y al no disponer de una licencia para dicho software se optara por uno de licencia libre.

3.6.1 Cura Software

El Software Cura prepara y administra los archivos de formato .stl o .obj de manera rápida y concisa, al mismo tiempo que evalúa de forma inteligente las áreas que necesitan atención. Posee potentes pre visualizaciones virtuales en 3D, que le permiten orbitar alrededor de su diseño, asegurando que todo está como desea que sea. (Prusa, 2017)

El software cura es bastante sencillo e intuitivo lo que hace su manejo muy rápido, para cargar el modelo previamente guardando en formato stl se debe seguir los pasos mostrados en la figura 79



Figura 79. Cargar el modelo 3D.

Al cargar el modelo el software lo ubica automáticamente en el centro del área de impresión como se muestra en la figura 80

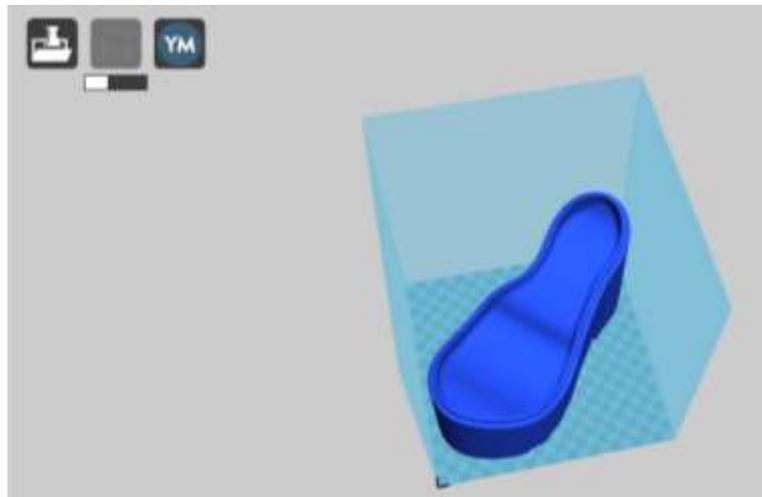


Figura 80. Modelo Cargado para imprimir.

En la figura 80 se aprecia una barra en la esquina superior bajo el ícono de un disquete esta barra muestra el estado de generación del capeado del modelo, con las configuraciones que por default están establecidas en el software, estos ajustes por default que presenta el

software Cura son modificables de conformidad con las características de la impresora, calidad de impresión y tipo de filamento a ser usados.

En la figura 81 se muestra los parámetros o ajustes básicos que se requiera modificar para lograr una impresión más precisa y de conformidad a los requerimientos del prototipo, los parámetros de ajuste básico modifica la calidad de impresión, cantidad de relleno del objeto a ser imprimido, velocidad de impresión, generación de apoyos de impresión, características del filamento, características de la impresora.

Archivo Herramientas Maquina Experto Ayuda	
Basico Avanzado Complementos Start/End-GCode	
Calidad	
Esesor de la capa (mm)	0,3
Esesor de la pared (mm)	2
Habilitar retracción	<input checked="" type="checkbox"/>
Relleno	
Esesor superior e inferior	2,1
Densidad Relleno (%)	12
Velocidad	
Velocidad impresion (mm/s)	45
Temperatura impresion (C)	220
Temperatura de la cama (C)	60
Soportes	
Tipo de soporte	Tocando la cama caliente
Tipo de adhesión en la cama	Nada
Filamento	
Diámetro (mm)	1,75
Flujo (%)	100
Maquina	
Tamaño boquilla (mm)	0,4

Figura 81. Ajustes Básicos para la impresión.

Los ajustes mostrados en la figura 81 son los ajustes ya establecidos para la impresión del filamento flexible tipo T, algunos ajustes como temperatura de impresión y temperatura de cama son dados por cada uno de los fabricantes de filamento, la velocidad de impresión, diámetro de filamento y tamaño de la boquilla son a partir de las características de la impresora, el diámetro de filamento debe ser adquirido de conformidad con el diámetro admisible por la impresora, espesor de capa influye directamente sobre el acabado superficial de la impresión pero influye directamente sobre el tiempo de impresión.

Tabla 16.
Características del Filamento Flexible-T

Properties	Test Condition	Test Method	Unit	Typical Value
Specific Gravity		ASTM D792		1,22
Molding Shrinkage		ASTM D955	%	0,2-0,5
Melt Flow Rate	220 °C/10 Kg	ASTM D1238	g/10 min.	21
Tensile Strength	@3,2mm Yield 50mm/dak.	ASTM D638	kg/cm ²	407
Tensile Elongation	@3,2mm Break 50mm/min.	ASTM D638	%	50
Tensile Modulus	@3,2 mm 1mm/min.	ASTM D638	kg/cm ²	41,000
Flexural Strength	@3,2mm 15mm/min.	ASTM D790	kg/cm ²	770
Flexural Modulus	@3,2mm 15mm/min.	ASTM D790	kg/cm ²	35,000
Izod Impact Strength 6,4mm Notched	23°C	ASTM D256	kg-cm/cm	25
Izod Impact Strength 3,2mm Notched	23°C	ASTM D256	kg-cm/cm	25
Rockwell Hardness	R-Scale	ASTM D785		75
Vicat Softening Temperature	5kg, 50°C/h	ASTM D1525	°C	85

Fuente: (ABG Filament STH TDS)

En la tabla 16 se muestran algunas características físicas y mecánicas emitidas por el fabricante del filamento flexible usado para realizar el prototipo

Basico	Avanzado	Complementos	Start/End-GCode
Retracción			
Velocidad (mm/s)	30		
Distancia (mm)	2		
Calidad			
Espesor capa inicial (mm)	0.3		
Ancho de línea de la capa (mm)	100		
Cortar fondo del objeto (mm)	0.0		
Superposición de la extrusión dual	0.15		
Velocidad			
Velocidad desplazamientos (mm/s)	50		
Velocidad capa inferior (mm/s)	25		
Velocidad relleno (mm/s)	0		
Velocidad capa superior e inferior (mm/s)	0.0		
Velocidad del borde externa (mm/s)	0.0		
Velocidad relleno interno (mm/s)	0.0		
Ventilación			
Minimo tiempo por capa (seg)	5		
Habilitar ventilación	<input checked="" type="checkbox"/>		..

Figura 82. Ajustes Avanzados de impresión.

Los ajustes avanzado de impresión son la retracción, la calidad, velocidad ventilación, los que se pueden apreciar en la figura 82 son ajustes dados para la impresión del modelo.

Con los ajustes necesarios introducidos, el software automáticamente calcula el tiempo de impresión, la cantidad de filamento en peso y distancia, y por último el costo de impresión como se aprecia en la esquina superior izquierda de la imagen 83.

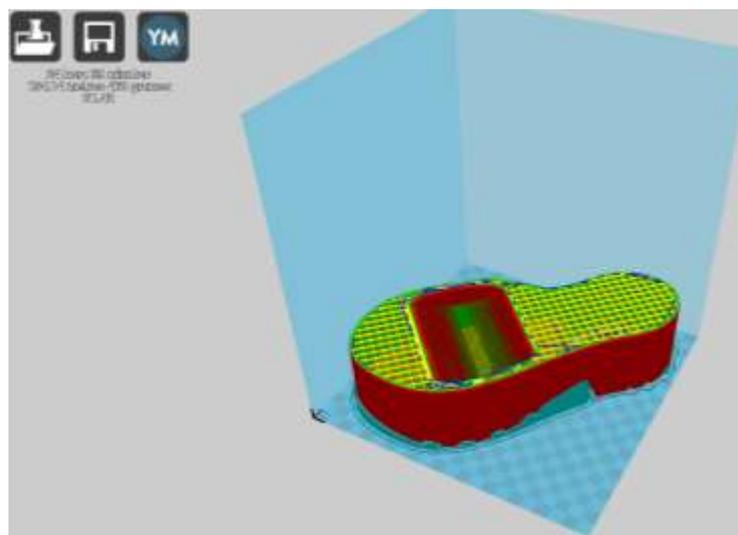


Figura 83. Parámetros de costo, tiempo y cantidad de material de impresión

En la figura 84 se puede apreciar una vista del modelo capeado, en el que se aprecia el relleno de color amarillo, la capa de terminado en color rojo y en color verde el grosor de pared, incluso se puede visualizar el recorrido de la boquilla en color azul.

El software Cura ofrece algunos modos de vista que permiten de cierta modo comprobar cómo se va a imprimir el modelo, en la figura 88 se representa los modos de vista que permiten visualizar de mejor manera el modelo.

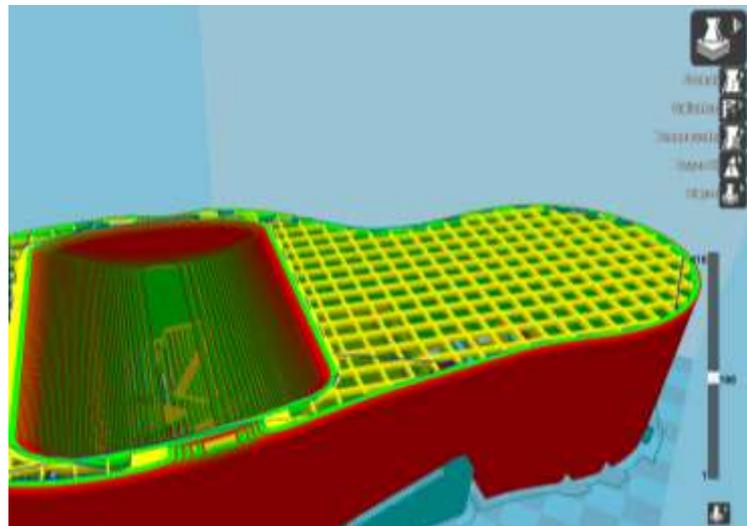


Figura 84. Modos de vista del cura.

Concluidos los ajustes se debe generar los códigos G para que la impresora los interprete y genere el modelo con la deposición de material. Para ello el Cura tiene un motor basad en RepRap que generar de manera rápida y libre de licencias los códigos G, que pueden ser leídos he interpretados por una gran variedad de impresora con la misma ideología de OpenCode como son las de diferentes marcas Anet, Prusa, BQ, Robotprint, Ultimaker, ect., es suficiente dar clic en el ícono de generar y guardar trayectorias como se muestra en la figura 86

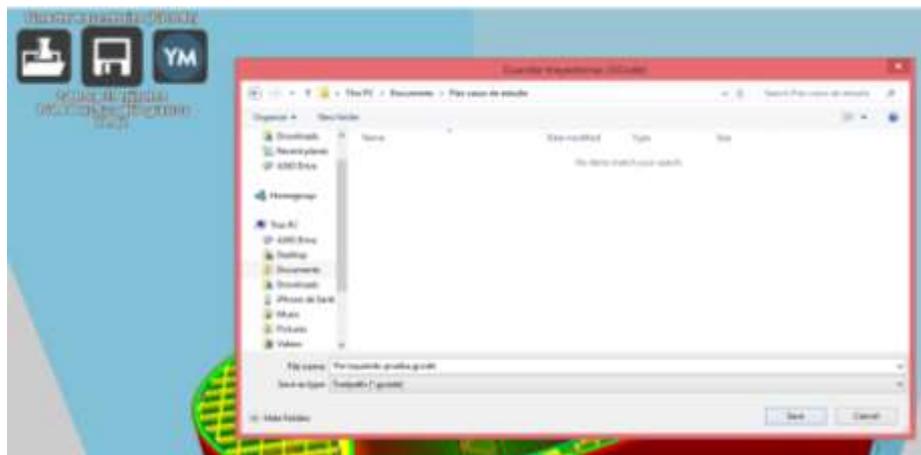


Figura 85. Generación del G-Code

En la figura 86 se puede apreciar el proceso de impresión 3D del prototipo con filamento flexible color negro de 1.75mm de diámetro.



Figura 86. Progreso de Impresión 3D.

Las características de la impresora 3D usada para realizar el prototipo de la suela se detallan en la tabla 17

Tabla 17.
Características de la impresora 3D.

Marca	Anet
Modelo	A8
Dimensiones	51x34.5x21.5cm
Peso	8.5kg
Volumen de impresión	220x270x240mm
Cama	0-120°C
Extrusor	Db=0.4mm T=0-270°C
Grosor de la capa	0.1-0.4mm
Filamento	D=1.75mm
Material del filamento	ABS, PLA, Luminiscente, Flexible, PVA, PP, Nylon, Wood
Precisión posicionamiento del eje xy	de 0.012mm
Precisión posicionamiento del eje z	de 0.004mm

CAPÍTULO 4

4.1 Análisis económico para la elaboración de una suela de calzado personalizado.

El presente análisis se expondrá los materiales con sus respectivos costos para la elaboración de una suela para calzado personalizado para personas con deformidad en los pies. Según como se detalla a continuación.

Tabla 18.
Costos de Herramientas.

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio (USD)	Sub Total (USD)
1	Placas de metal duro cuadradas de 10x10x4mm tipo N	5	7.65	38.25
2	Placas de metal duro redondas de 12mm de diámetro por 5 mm de espesor	5	8.30	41.50
3	Placas de metal duro redondas de 10mm de diámetro por 4 mm de espesor	3	6.95	20.85
4	Fresa enteriza punta plana de 12mm de diámetro de carburo, dos filos	1	18.60	18.60
5	Fresa enteriza punta redonda de 12mm de diámetro de carburo, dos filos	1	19.20	19.20
6	Fresa enteriza punta redonda de 6mm de diámetro de carburo, dos filos	1	12.50	12.50
7	Broca HSS de 12.7mm	1	2.10	2.10
8	Buril HSS de 3mm de diámetro por 100mm de longitud	4	3.20	12.80
Total H				165.80

**Tabla 19.
Costos de Materiales**

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio (USD)	Sub Total (USD)
1	Bloque de aluminio de 300x170x90	2	160.00	320.00
2	Bloque de aluminio de 300x170x150	1	310.00	310.00
3	Bloque de aluminio de 300x180x80	1	145.00	145.00
4	Bloque de aluminio de 300x180x71	1	140.00	140.00
5	Galón Taladrina blanca sintética	1	36.50	36.50
6	Kilogramo de pasta de caucho sintético	1	0.60	0.60
Total M				952.10

**Tabla 20.
Costos de Diseño y Desarrollo.**

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio (USD)	Sub Total (USD)
1	Escaneado de pie	2	15.00	30.00
2	Diseño de suela	2	90.00	180.00
3	Diseño de molde	2.5	90.00	225.00
4	Costo por hora de Mecanizado CNC.	19.40	30.00	582.00
5	Acabado y Armado.	2.5	40.00	100.00
6	Vulcanizado de la Suela	2	0.25	0.50
Total D				1,117.50

Total H + Total M + Total D 2235.40

Las tablas desde la 18 a 20 muestran en resumen los costos que involucran la fabricación de la suela dando un total de 2,235.30 dólares.

Para tener una idea generalizada del costo real de la suela se procede a realizar una amortización del molde por lo que se estima una utilidad de 2 años, esto debido a que la enfermedad es progresiva y se considera que en ese tiempo ya habrán variaciones en el pie, y se estima un valor residual de 500 dólares por el reciclaje de aluminio

$$C = \frac{2235.30 - 500}{2} = 867.65$$

Donde C es el costo de amortización anual del molde, se estima que el usuario deberá requerir un par de suelas cada seis meses de forma que el costo por el par de suelas alcanzaría un valor de 433.82 dólares

4.2 Análisis del tiempo que conlleva la fabricación de la suela personalizada.

El presente análisis tiene la finalidad de definir el proceso y el tiempo total que conlleva cada uno de los procesos o actividades realizadas durante el desarrollo del prototipo de suela para personas con mal formación en el pie de conformidad como se detalla en la tabla 21.

Tabla 21.
Análisis de tiempos para cada proceso.

Proceso y/o Actividad	Tiempo.
Digitalización de los pies	5min
Diseño de la suela	4hrs y 17min
Diseño del molde	1hr y 30min
Parametrización del mecanizado.	32min
Mecanizado del molde	19hrs y 40min
Acabado y Armado del Molde	1hr y 30min
Vulcanizado del Caucho	8min
Total	27hrs 42min

4.3 Análisis y Pruebas efectuadas en el Prototipo de la suela realizada para personas con deformidad en el pie.

Ya obtenido el prototipo de la suela es importante realizar las pruebas no destructivas, para este caso la prueba que se realizó fue calzar la suela en el pie objeto de estudio, donde se puede evidenciar que el prototipo presenta las dimensiones adecuadas, el confort al usuario, el soporte adecuado y la estabilidad a la hora de apoyar el pie sobre la suela y esta al piso, en la figura 87 se muestran imágenes donde se evidencia al usuario calzando la suela prototipo.



Figura 87. Prueba de calzado sobre el pie con deformidad.

4.3.1 Medición de Dureza Shore

Una de la pruebas no destructivas en la que se puede medir es la dureza shore misma que alcanzó un valor de 95 en la figura 88 se puede apreciar el valor obtenido, según norma NTE-INEN-2953 la dureza shore que debe alcanzar el material para realizar una suela de calzado debe estar entre el rango de 70 a 85

Tabla 22.
Mediciones de Dureza Shore.

Probeta	Dureza Shore			
	Punta	Talón	L. Der.	L. Izq.
1	95	95	95	95
2	72	80	62	61



Figura 88. Medición de dureza Shore en la suela prototipo

Para continuar con el análisis del prototipo se realizaron pruebas destructivas conforme normativa INEN.

4.3.2 Ensayo de Flexión

Una de las pruebas que se exige dentro del país para aprobar una suela para calzado es la de Flexión, misma que se realizó en el laboratorio de la empresa RUBBERSHOES de la ciudad de Ambato ubicada en el Parque Industrial Ambato, Primera Etapa, calle 2 bodega 8C

La prueba fue realizada con respecto a la norma adoptada NTE-INEN-17707, los resultado obtenido se muestran en la tabla 23.

Tabla 23.
Resultado a prueba de Flexión

Número de incisión	Medida Inicial en mm	Medida a número de Flexiones en mm			Medida esperada Max.
		10000	20000	30000	
1	2	1.8	1.5	1.2	
2	2	1.8	1.5	1.1	4 mm
3	2	1.7	1.6	1.0	

Según normativa la suela **Si** cumple los estándares requeridos debido a que la longitud de la incisión no llega a superar a la especificada en norma.

Es importante resaltar que al contrario de una suela hecha con caucho natural o sintético, la suela tuvo un comportamiento contrario, debido a que la longitud de la incisión se redujo y no aumento según lo esperado. Otra característica importante fuera de los esperados es que la suela sufrió una deformación en la línea de flexión.

Una explicación posible a los resultados inesperados es que el material al realizar la flexión incremento su temperatura por lo que se dieron estos hechos contrarios a los esperados, ya que los filamentos aumenta su adherencia en relación a la temperatura. En la figura 89 se muestran imágenes de la pruebas de flexión realizadas.



Figura 89. Pruebas de Flexión Realizadas al prototipo de suela.

4.3.3 Ensayo de Abrasión

Otra de las pruebas que exige la normativa ecuatoriana para la producción de suelas para calzado es la de abrasión misma que se realizó en conformidad con la norma ecuatoriana adoptada NTE-INEN-1924.

Para realizar la prueba de abrasión se obtuvieron dos probetas según norma, estas se hacen pasar sobre una superficie abrasiva la norma indica el uso de una lija número 80, y se debe aplicarse una fuerza de 22N de (2256Kg).



Figura 90. Realización de la prueba abrasiva.

En la figura 90 se muestra el peso de la probeta tomado antes y después de realizar el ensayo donde se comprueba que la masa perdida por la abrasión fue de 0.02g, en la tabla 24 se muestra los datos obtenidos de los dos ensayos de abrasión que se realizaron.

**Tabla 24.
Datos del ensayo de abrasión.**

Probeta.	D. (mm)	H (mm)	W (N)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia. (g)
1	16.5	5		92.277	92.257	0.02
2	16.5	5	22	92.277	92.255	0.022

Con lo que se puede determinar la densidad del material con la que está hecho el filamento.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{92.277}{1069.123} = 0.0863 \text{ g/mm}^3$$

Por lo que se determina que el filamento flexible tiene una excelente resistencia a la abrasión, puesto que según norma el peso final de la probeta no debe ser superior al 50% de su peso inicial.

En la tabla 25 se resumen los resultados de los ensayos bajo normativa que se realizaron al prototipo de suela.

Tabla 25.
Cuadro de resumen de los ensayos realizados

Ensayos	Norma Usada	Cumple
Flexión	NTE-INEN-17707	SI
Abrasión	NTE-INEN-1924	SI
Dureza Shore A	NTE-INEN-2953	NO

4.4 Estimación de las personas que serán favorecidas por el estudio.

Para determinar el tamaño de la población que será beneficiada por el estudio realizado es importante determinar el porcentaje de personas que sufren malformación del pie. Para ello se cita el estudio realizado por Bárbara Natalia Guzmán Peñaloza, dentro de la ciudad de Ambato en Enero del 2016, mismo que estima el porcentaje de la población que durante la niñez puede sufrir un problema de malformación de los pies por el uso inadecuado he incorrecto o equivocado de zapatos, en el que concluye lo siguiente:

“En consecuencia apenas el 7% de los niños y niñas tienen problemas de malformaciones, las mismas que son congénitas, como pie plano, pie zambo, pie talo y mala pisada, por lo que el calzado que ellos usan son ortopédicos u otros plantillas para corregir sus deficiencias”.
(Guzman Peñaloza, 2016)

Otra muestra poblacional que será beneficiada por el estudio son las personas que sufren de una infección por osteomielitis en las extremidades inferiores, para ellos se hace referencia al estudio realizado por Mercy Norma Sinche Tuquina, dentro dela ciudad de Riobamba en el periodo Febrero-Agosto del 2010, en el que se estima el porcentaje de la población que sufre de osteomielitis crónica:

“La investigación se llevó a cabo con 25 (8%) pacientes de 302 fracturas en el periodo Febrero Agosto 2010 y se concluye que:

La localización predominante de la lesión en el cuerpo del paciente fue en los miembros inferiores 72%, como esta en relación con la edad de los pacientes los huesos principalmente tienden a sufrir degeneraciones por la pérdida de muchos componentes” (Sinche Tuquinga, 2010).

Con este muestreo se procede a estimar el porcentaje de la población beneficiada.

$$n\% = 7\% + \frac{(25 * 0.72) * 8}{25} [\%] = 12.76\%$$

Tungurahua según el censo del 2010 realizado por el INEC tiene una población de 504,583 persona y Chimborazo tiene 458,581 personas, por lo que la población favorecida dentro de las dos provincias será deÑ

$$N = (504583 * 0.07) + (458581 \times 0.0576) = 61735 \text{ personas}$$

4.5 Propuesta de proceso de fabricación de suelas personalizadas.

La propuesta para la fabricación de suelas personalizadas sigue el proceso que se ha descrito en el desarrollo del presente trabajo, de manera que se puede establecer un flujograma, mismo que se muestra en la figura 91 el cual establece el orden de fabricación. El presente trabajo adicionalmente incluye la descripción de una prototipado rápido mediante impresión 3D, este proceso no se ha considerado dentro del proceso de fabricación debido a que es un método alternativo al expuesto en el trabajo.

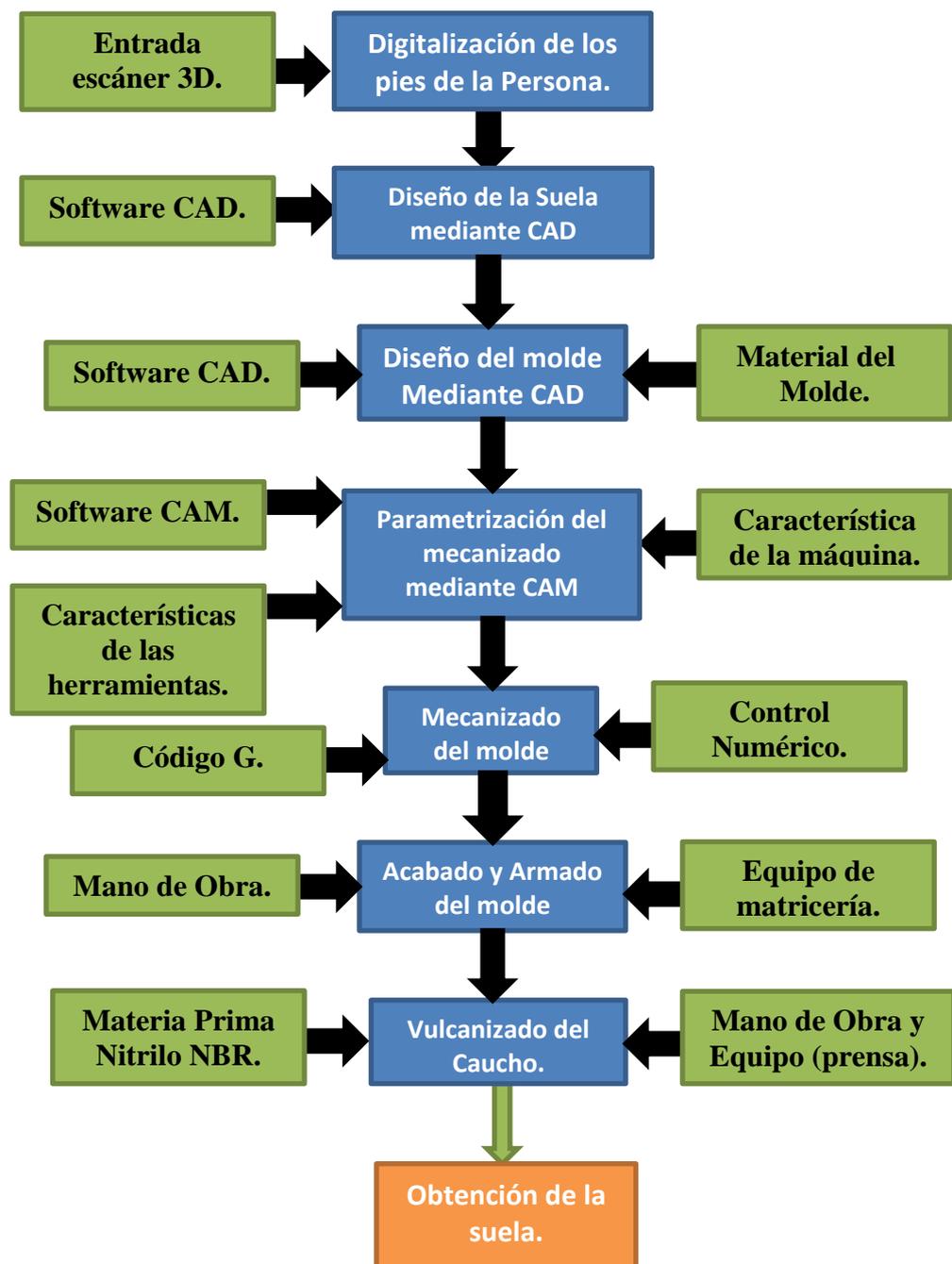


Figura 91. Flujograma de la elaboración de una suela personalizada.

4.6 Conclusiones.

- Mediante el uso de las herramientas CAD-CAM en el proceso de fabricación de suelas de calzado para personas con deformidad en el pie se disminuye el tiempo de fabricación, y permite atender a un sector del 12.76% (61,375 habitantes) de la población que a través del tiempo se le ha excluido dentro de la industrialización del calzado.
- Obtener la forma del pie con deformidad mediante un escáner 3D permite digitalizarlo con mayor exactitud logrando apreciar las formas y siluetas, reduciendo el tiempo de obtención de la horma de 5 horas a tan solo 5 minutos.
- El uso de herramientas CAD en el diseño de la suela y posteriormente del molde para personas con malformación del pie permite reducir al 10% el tiempo, de aproximadamente 60 horas a 5 horas 52 minutos frente al método tradicional actual que para este tipo de suelas se lo realiza de forma artesanal, lo que permite la elaboración e inclusión de este tipo de servicios dentro de la industrialización del calzado.
- La manufactura asistida por computador facilita la fabricación del molde para la elaboración de suelas para calzados especializados y/o personalizados, reduciendo el tiempo en un 86% frente a los procesos de fabricación artesanales usados para este tipo de suelas actualmente dentro del país, es decir de 150 horas aproximadamente a 21 horas 42 minutos
- Partiendo de la digitalización del pie mediante el uso del escáner 3D se procede a generar un modelo CAD de la suela que posteriormente permitirá el desarrollo del molde, donde se podrá verificar la funcionalidad y el cumplimiento con los requerimientos físicos, estéticos y de confort.
- La obtención de un prototipo de la suela para el pie con deformidad permite corroborar mediante pruebas y análisis que el diseño es correcto y va a dar los resultados esperados con

anterioridad a la producción definitiva evitando así gastos innecesario de producción.

- La proposición del proceso de fabricación de suelas tanto para personas con mal formación del pie o simplemente por realizar una distinción en un modelo de calzado permitirá el desarrollo industrial de calzados con diferentes grados de personalización del producto final.
- Al realizar una probeta con el mismo filamento usando en la elaboración del prototipo con un espesor de pared de 0.8mm se logró obtener una dureza de shore del valor de 62

4.7 Recomendaciones

- Se deberá generar un proceso de reciclado y reutilización del aluminio puesto que al tener una producción personalizada existirán muchos moldes que a través del tiempo irán quedando fuera de uso.
- Se recomienda realizar un análisis comparativo del prototipado mediante impresoras 3D con filamento y software propietario versus las impresoras RepRap de código abierto.
- Se deberá analizar un proceso con otros programas tanto de CAD como CAM.
- El material usado en la elaboración del prototipo no cumplió con la dureza de shore, por lo que se recomienda realizar pruebas con el mismo material a diferentes espesores de las paredes de las suelas hasta cumplir con la dureza establecida en la norma.

4.8 Bibliografía

- A. D. A. M. Quality. (13 de 3 de 2016). *MedlinePlus*. Recuperado el 22 de 02 de 2017, de Osteomielitis: https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/9712.htm
- AA, V. (2008). *Texto y Atlas de Anatomía Prometheus*. Panamericana.
- ABG Filament STH TDS. (s.f.). *ABG Filaments*. Obtenido de <http://www.abgfilament.com>
- Alborés, M. (26 de 02 de 2013). *El Animal Invisible*. Obtenido de <http://mafa-elanimalinvisible.blogspot.com/2013/02/posibilidades-graficas-y-plasticas-en-3d.html>
- Create it Real Aps. (2016). *Create it Real*. Recuperado el 22 de 07 de 2017, de <http://www.createitreal.com/index.php/technology/process>
- Distribuidora Ferretera MIMS. (2017). *MIMS*. Recuperado el 13 de 07 de 2017, de http://www.mims.com.mx/tienda/index.php?cPath=72_79
- España, D. (24 de 02 de 2017). *La Osteomielitis*. Obtenido de <http://laosteomielitis.blogspot.com>
- Fausto Bernardini, H. E. (2002). *The 3D Acquisition Pipeline*. Comput Graph.
- Guzman Peñaloza, B. N. (ENERO de 2016). *Diseño de Calzado Infantil Mediante el Estudio Antropométrico y Biomecánica del Pie de niños y niñas de la ciudad de Ambato*. Ambato, TUNGURAHUA, ECUADOR.
- Kapandji, A. I. (04-2010). *Fisiología Articular Tomo II*. Medica Panamericana S. A.
- Lopez, H. (15 de 07 de 2016). *Hugo Lopez*. Recuperado el 12 de 07 de 2017, de Como Hacer el Prototipo Perfecto: <https://hugolopezc.com/como-hacer-prototipo-perfecto/>

- Maria. (23 de 02 de 2011). *Maria Online*. Obtenido de http://www.maria-online.com/electronics/article.php?lg=es&q=Escáner_3D
- Ortopedicos Dinky. (2003). *Ortopedicos Dinky*. Recuperado el 23 de 01 de 2017, de Ortopedicos Dinky: <http://www.ortopedicosdinky.com.mx/arcos.shtml>
- Prada Ospina, R., & Acosta Prado, J. C. (01 de 05 de 2011). *Dimensión Empresarial*. Obtenido de Rrevista Dimensión Empresarial: http://ojs.uac.edu.co/index.php/dimension-empresarial/article/viewFile/1002/pdf_75
- Prusa, J. (2017). *Impresoras3D.com*. Recuperado el 24 de 07 de 2017, de <http://www.prusai3.es/software-impresion-3d/>
- Quecartucho, E. (2013). *Quecartucho.ES*. Recuperado el 24 de 07 de 2017, de Que es y que se puede hacer con el filamento flexible de impresoras 3D: <https://quecartucho.es/blog/que-es-y-que-se-puede-hacer-con-el-filamento-flexible-de-impresoras-3d/>
- Sandvik AB. (2000). *Sandvik Coromant*. Recuperado el 03 de 04 de 2017, de Milling: http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx
- Sherman, L. M. (01 de 08 de 2004). *3D Printers Lead Growth of Rapid Prototyping*. Recuperado el 23 de 07 de 2017, de Bringing rapid prototyping capabilities in-house is becoming a reality for many plastics manufacturers, thanks to more affordable, faster, and easy-to-use 3D printers.: <http://www.ptonline.com/articles/3d-printers-lead-growth-of-rapid-prototyping>
- Sinche Tuquinga, M. N. (2010). *Factores de riesgo de la osteomilitis crónica en pacientes adultos, Área de traumatología del hospital provincial general docente Riobamba. 2010. RIOBAMBA.*

- Stanley Black & Decker, Inc.'s affiliates. (07 de 07 de 2017). *Irwin Tools*. Recuperado el 12 de 07 de 2017, de http://www.irwin.com/uploads/documents/92_Spanish_FLC_oMetal_eBook.pdf
- Tipan Guaman, A., & Toapanta Mora, D. (2017). *Sistema Escaner de pie con tecnologia 3D que permita analizar la horma del zapato para la adapatación ergonomica del deportista*. LATACUNGA.
- Vega, D. A. (02 de 04 de 2012). *Cirugía Ortopédica y Traumatología*. Recuperado el 18 de 02 de 2017, de *Semiología de la pierna, tobillo y pie*: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/libros/Medicina/cirugia/tomo_ii/semiologia_ptp.htm
- Wikipedia. (12 de 08 de 2016). *Wikipedia*. Recuperado el 13 de 01 de 2017, de https://es.wikipedia.org/wiki/Esc%C3%A1ner_3D