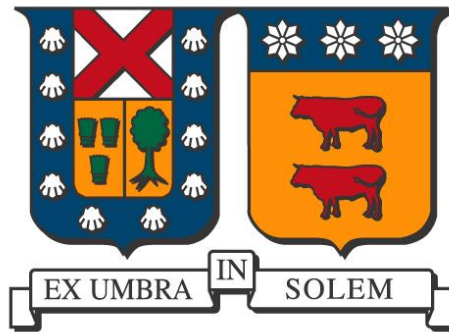


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA
ESTRATEGIA DE DIGITALIZACIÓN Y FABRICACIÓN
DE HORMAS DE ZAPATOS Y SU INTEGRACIÓN AL
PROCESO PRODUCTIVO USANDO TECNOLOGÍAS
CAD-CAM**

CARLOS ENRIQUE CHACÓN LÓPEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: SHEILA LASCANO F.
PROFESOR CORREFERENTE: LEONARDO MADARIAGA

JUNIO 2022

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar e implementar una estrategia de digitalización y fabricación de hormas de zapato utilizando tecnologías CAD/CAM en la empresa e industria chilena Calzados IVO.

Se estudia el proceso de desarrollo de hormas manual y el método de fabricación utilizado por empresa, y se identifican los problemas existentes asociados a la fabricación tradicional de hormas.

Se hace una investigación de las tecnologías y técnicas actuales de desarrollo y fabricación de hormas, obteniendo de esta manera los métodos y tecnologías más utilizados en este tipo de industria, y de esta manera separar el proceso de fabricación de hormas en 3 subprocesos: obtención de la horma en formato digital mediante un escáner digital, edición de la horma con programas especializados y no especializados en calzados, y fabricación del prototipo mediante los métodos de prototipado rápido.

Se utiliza la metodología de diseño en ingeniería, que permite definir el problema, mediante la categorización y jerarquización de requerimientos del problema con el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). Se hace una recolección de información y data relacionada a las soluciones que ofrece el mercado para cada subproceso de esta estrategia. Se genera un concepto o solución con el método de carta morfológica, y, por último, se identifica la solución que satisface de mejor manera las necesidades de la empresa, mediante la Matriz de Pesos Ponderados, que permite asignar un nivel de importancia a los criterios de evaluación y ver de qué manera las soluciones cumple estos criterios. En base a esto, se identifica el Einscan SE de Shining 3D como el escáner digital, IcadFOR de Inescop como el programa de edición de la horma y Ultimaker S5 como la impresora 3D encargada de generar el prototipo.

Posteriormente, se procede a la digitalización de una horma proporcionada por la empresa, con un escáner digital de triangulación láser. Luego, se utilizan diversos programas, en primera instancia se utiliza el software Autodesk MeshMixer para disminuir irregularidades y preparar la pieza para la edición; luego, se utiliza el software Rhinoceros para la modificación y edición de la horma. Posterior a la edición, se fabrica el prototipo mediante la impresora 3D Ultimaker 2+ y se utiliza el material ABS, y así, finalmente, se lleva a la fábrica para evaluar el modelo en términos de calidad y fabricabilidad. Después de ser sometido al proceso de fabricación

de calzado, se identifican los aspectos a mejorar y se concluye en base a los resultados obtenidos, dejando una base para posteriores estudios.

Abstract

The objective of this research work is to develop and implement a digitalization and manufacturing strategy for shoe lasts using CAD / CAM technologies in the Chilean company and industry Calzados IVO.

The manual last development process and the manufacturing method used by the company are studied, and existing problems associated with the traditional manufacture of lasts, which is manual in nature.

An investigation is made of the current technologies and techniques of last manufacturing, obtaining in this way the most used methods and technologies in this type of industry, and in this way separating the last manufacturing process into 3 sub-processes: obtaining the last in digital format using a digital scanner, editing the last with specialized and non-specialized footwear programs, and manufacturing the prototype using rapid prototyping methods.

The engineering design methodology is used, which allows defining the problem, by categorizing and hierarchizing the requirements of the problem with the Hierarchical Analysis Process (AHP). A collection of information and data related to the solutions offered by the market is made for each sub-process of this strategy. A concept or solution is generated with the Morphological Chart method. And, finally, the solution that best meets the needs of the company is identified, through the Weighted Weight Matrix, which allows assigning a level of importance to the evaluation criteria and seeing how the solutions meet these criteria. Based on this, Shining 3D's Einscan SE is identified as the digital scanner, Inescop's IcadFOR as the last editing program and Ultimaker S5 as the 3D printer in charge of generating the prototype.

Subsequently, a last provided by the company is digitized with a digital laser triangulation scanner. Then, various programs are used, in the first instance the Autodesk MeshMixer software is used to reduce irregularities and prepare the piece for editing; then the Rhinoceros software is used to modify and edit the last. After editing, the prototype is manufactured using the Ultimaker 2+ 3D printer and ABS material is used, and thus, finally, it is taken to the factory to evaluate the model in terms of quality and manufacturability. After being subjected to the footwear manufacturing process, the aspects to be improved are identified and it is concluded based on the results obtained, leaving a basis for further studies.

Índice General

1	Introducción	IX
2	Antecedentes y Problemática.....	XI
3	Objetivos	XIV
3.1	Objetivo general	XIV
3.2	Objetivos específicos.....	XIV
4	Marco Teórico	1
4.1	Metodología	1
4.1.1	Definición del problema	1
4.1.2	Recolección de información y data	2
4.1.3	Generación de concepto o solución	3
4.1.4	Evaluación y selección de concepto.....	4
4.2	La Horma	5
4.3	Diseño y producción de la horma	6
4.3.1	Diseño CAD en 3 dimensiones	7
4.3.2	Edición del diseño CAD de la horma.....	10
4.3.3	Fabricación del prototipo	13
5	Estado del arte	18
5.1	Escáneres 3D	18
5.2	Softwares de edición 3D.....	21
5.3	Máquinas de prototipado rápido	25
6	Desarrollo y Análisis	28
6.1	Análisis y metodología	28
6.1.1	Definición del problema	28
6.1.2	Recolección de información	32
6.1.3	Generación de concepto.....	32
6.1.4	Evaluación y selección de concepto.....	33

6.2	Obtención del prototipo	36
6.3	Evaluación del modelo y resultados	51
7	Conclusiones	57
7.1	Conclusiones generales	57
7.2	Reflexión final	60
8	Bibliografía	62

Índice de figuras

Figura 1: Tecnologías CAD-CAM en la industria del calzado (izquierda) y horma (derecha). .	IX
Figura 2: Proceso de fabricación de hormas tradicional (similar al de Calzados IVO).	X
Figura 3: Diagrama de flujo proceso de fabricación de hormas Calzados IVO.	XII
Figura 4: Metodología de ingeniería de diseño.	1
Figura 5: Ejemplo carta morfológica.	4
Figura 6: Medidas principales de la horma (vista de perfil).	5
Figura 7: Medidas principales de la horma (vista de planta).	5
Figura 8: Programa especializado en calzado con base de datos de hormas integrada.	7
Figura 9: Escáneres digitales.	8
Figura 10: Esquema triangulación láser.	9
Figura 11: Esquema tecnología luz estructurada.	9
Figura 12: Esquema tecnología tiempo de vuelo	10
Figura 13: Edición de horma en base a las medidas deseadas.	12
Figura 14: Edición de horma en base a pie digitalizado.	12
Figura 15: Esquema del proceso de estereolitografía.	14
Figura 16: Esquema del proceso de Sinterizado Láser Selectivo.	15
Figura 17: Esquema del proceso de Manufactura de Objetos Laminados.	16
Figura 18: Esquema del proceso modelado por deposición de fundido.	17
Figura 19: Fabricación CNC.	17
Figura 20: Escáner Einscan SE de la empresa Shining 3D.	18
Figura 21: Escáner portátil Eva Lite de la marca Artec.	19
Figura 22: Escáner Einscan H de Shining 3D.	20
Figura 23: Software Custom Tailor Made de Atom Shoemaster.	21
Figura 24: Software RCS 3D Last de Romans CAD.	22
Figura 25: Software Shoe Last Desing (Footwear Design) de Vorum.	23
Figura 26: Software IcadFor de Inescop.	24
Figura 27: Impresora 3D Ultimaker S5 de Ultimaker.	25
Figura 28: Impresora 3D Form 3L de Formlabs.	26
Figura 29: Fresadora CNC Modela MDX-50	27
Figura 30: Escáner Roland Picza LPX-250.	37
Figura 31: Posición de la horma para escanear: sin soporte (izquierda) y con soporte (derecha).	37

Figura 32: Archivo digital de la horma sin postprocesar.	38
Figura 33: Archivo digital de la horma con postprocesado en Autodesk MeshMixer.	39
Figura 34: Mallado por defecto de la horma después de digitalizar.....	40
Figura 35: Definir mallado con comando Quad Remesh en software Rhinoceros.....	40
Figura 36: Resultado de la nueva malla.....	41
Figura 37: Edición del modelo sin aplicar modelado por subdivisión de superficies.....	42
Figura 38: Edición del modelo con modelado por subdivisión de superficies.	42
Figura 39: Horma en formato de malla tras aplicar comando To NURBS.	43
Figura 40: Plano de separación de la horma.	44
Figura 41: Separación de la horma para prototipo.....	44
Figura 42: Vástago horma original.....	45
Figura 43: Diseño del vástago en Rhinoceros.	45
Figura 44: Orificio horma original	46
Figura 45: Diseño agujero superior de la horma en Rhinoceros.	46
Figura 46: Archivos digitales de pieza base (izquierda) y pieza del empeine o cuño (derecha).	47
Figura 47: Vista interior de la pieza en software Ultimaker Cura (relleno y grosor de pared)....	48
Figura 48: Disposición de pieza en la máquina y parámetros de impresión.	48
Figura 49: Impresión del prototipo de la pieza base de la horma.....	49
Figura 50: Impresión del cuño (pieza empeine) de la horma.	49
Figura 51: Hormas en proceso de remoción de soporte.....	50
Figura 52: Prototipos de hormas terminadas.	50
Figura 53: Horma con suela y con relleno de punta faltante (vista lateral).....	52
Figura 54: Horma con suela y con relleno de punta faltante (vista inferior).	52
Figura 55: Máquina de sujeción para adherir la parte superior del calzado.	53
Figura 56: Máquina armadora de talón.....	54
Figura 57: Quiebre zona del orificio de sujeción de la horma.	54
Figura 58: Interior calzado terminado.	55
Figura 59: Calzado terminado.	55

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades mecánicas que debe tener la horma.	6
Tabla 2: Características escáner Einscan SE.	19
Tabla 3: Características de escáner Eva Lite de Artec 3D.	20
Tabla 4: Características escáner Einscan H.	21
Tabla 5: Tabla comparativa de programas de edición de hormas.	24
Tabla 6: Especificaciones técnicas Ultimakes S5.	26
Tabla 7: Especificaciones técnicas Formlabs Form 3L.....	26
Tabla 8: Especificaciones técnicas Modela MDX-50.....	27
Tabla 9: Lista de necesidades del cliente en términos de atributos.	28
Tabla 10: Categorización de listas de atributos en objetivos, funciones y restricciones.	29
Tabla 11: Categorización de objetivos en rendimiento, costos y apariencia.	30
Tabla 12: Jerarquización de objetivos por importancia y cuantificación de esta mediante método AHP.	31
Tabla 13: Carta morfológica alternativas de selección.	33
Tabla 14: Matriz de pesos ponderados 1 ^{er} subproceso: escáner de la horma.	34
Tabla 15: Matriz de pesos ponderados 2 ^{do} subproceso: edición de la horma.	35
Tabla 16: Matriz de pesos ponderados 3 ^{er} subproceso: fabricación del prototipo.	36

1 Introducción

La constante evolución de la tecnología ha provocado que las industrias manufactureras utilicen sistemas y procesos cada vez más avanzados para competir a nivel global. La innovación y el desarrollo tecnológico son elementos claves para mantener la competitividad en este tipo de industrias. Esto no deja exenta la industria del calzado. La evolución en los materiales y diseños de calzado ha sido fundamental en su proceso de manufactura. Así mismo muchas de las manufactureras de calzado buscan avanzar en el tema tecnológico para así obtener productos nuevos de mejor calidad.

La presente investigación se refiere al desarrollo tecnológico de calzado en la industria nacional chilena, específicamente a la utilización de tecnologías CAD-CAM y su integración al proceso productivo de una de las partes más importante en la producción del calzado: la producción y fabricación de la horma. La horma es un modelo tridimensional del pie humano, que sirve para montar y diseñar el calzado.



Figura 1: Tecnologías CAD-CAM en la industria del calzado (izquierda) y horma (derecha).
Fuente: Inescop (izquierda) y elaboración propia (derecha).

Este trabajo tiene relación con la problemática existente en la línea productiva de calzado de la empresa chilena Calzados IVO. Esta fábrica que lleva haciendo calzado por más de 40 años, se vio en la necesidad de buscar una nueva forma de fabricar las hormas para sus zapatos, debido al cierre de operaciones de su proveedor oficial en Chile, Hormas Hormital. Esto afectó negativamente la productividad de la fábrica, escogiéndose como alternativa a artesanos de hormas, más conocidos como hormeros, para la producción de su horma de muestra y posteriormente enviar a fabricar el resto de las tallas al extranjero (ver Figura 3: Diagrama de flujo de proceso de

fabricación de hormas de Calzados IVO). Este proceso que antes tomaba algunos días ahora puede durar hasta varias semanas, lo que llevó a la empresa a buscar alternativas para fabricar sus hormas de manera que puedan disminuir tiempos y tener el control de sus procesos.



Figura 2: Proceso de fabricación de hormas tradicional (similar al de Calzados IVO).
Fuente: sitio web oficial Hormas Beneit.

Es por esto por lo que el objetivo de este trabajo es desarrollar una estrategia que le permita a la empresa Calzados IVO diseñar y fabricar sus propias hormas, utilizando tecnologías usadas por las grandes empresas del calzado mundial, que es el diseño y prototipado asistido por computadora, o por sus siglas en inglés, tecnologías CAD-CAM.

Algunos de los temas que se abarcan en este trabajo son el estudio del proceso de desarrollo de hormas manual, técnicas actuales de digitalización y manufactura de hormas, la metodología de diseño de ingeniería, generación de un prototipo para implementación en el proceso productivo, entre otros.

2 Antecedentes y Problemática

Calzados Ivo es una fábrica nacional que se dedica principalmente al diseño y fabricación de calzado de alta calidad. Empezó cerca del año 1980 con sus fundadores Manuel Muñoz y Gladys Muhlenbrock, que después de haber sido comerciantes de calzado por varios años decidieron dedicarse a la fabricación de estos. En un principio se dedicaron solo al comercio nacional, pero unos años más tarde vieron la oportunidad de expandirse y empezar a comercializar sus productos alrededor del mundo, convirtiéndose en uno de los principales exportadores de calzado chileno en el extranjero, especialmente en los mercados europeos y norteamericanos. Hoy en día, además de ser una importadora de calzado de renombre, siguen fabricando y diseñando calzado innovador y de alta calidad, siempre en busca de nuevas tendencias de la moda para poder producir los mejores modelos y diseño [1,2].

El proceso de fabricación en esta fábrica de calzado tiene varias etapas. Una de las etapas más importantes es la fabricación de la horma, que es donde se diseñará y montará el calzado. Este modelo depende del tipo de zapato, diseño y tamaño principalmente. Cabe mencionar que la producción de calzado de la empresa es en base a demanda; una vez que se hace el pedido de producción se comienza la etapa de fabricación.

El proveedor de hormas de la empresa era Hormital, una empresa líder en el mercado nacional en cuanto a la producción y diseño de hormas se refiere; pero desde el año 2019, esta empresa, que abastecía a más del 80% del mercado de calzado nacional [3], cerró sus operaciones en Chile, debido a la crisis del sector por el calzado importado.

Es por lo anterior, que Calzados IVO opta por acudir a un técnico/artesano de hormas para producir su horma base, horma talla 36, para luego fabricar el resto de las tallas mediante un servicio de torno copiado en Perú. La producción y capacidad del artesano es absolutamente menor que su antiguo proveedor, por lo que este cambio generó problemas importantes en la producción de calzado de la empresa, considerando también que el servicio de torno copiado fuera del país tiene asociados tiempos elevados de importación, que dificultan y retrasan aún más la fabricación del calzado.

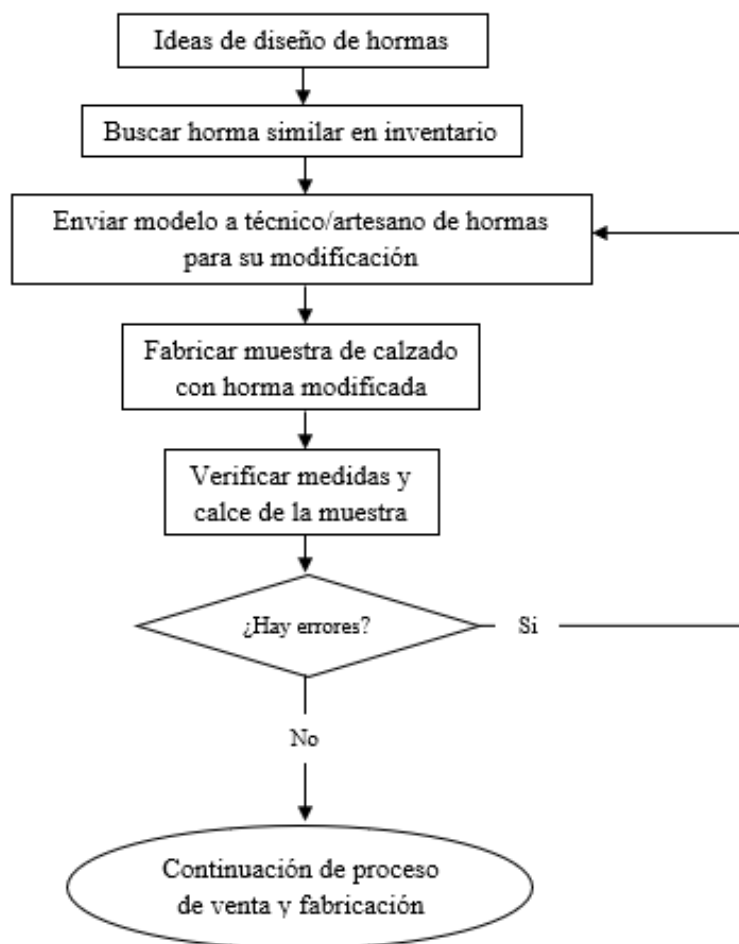


Figura 3: Diagrama de flujo proceso de fabricación de hormas Calzados IVO.

Fuente: Elaboración propia

El proceso de fabricación de hormas en Calzados IVO se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 1. Primero se obtienen distintas ideas de diseño, principalmente de imágenes de calzados europeos o de otras partes del mundo. Luego, cuando se elige el diseño, se revisa en inventario si se tiene una horma que se pueda usar para este modelo; en ocasiones se utiliza el mismo modelo, y en otras se utiliza como modelo base para ser modificada. A continuación, se envía el modelo base a un técnico/artesano de hormas que realice los cambios necesarios. Cuando la horma llega de vuelta a la fábrica, se producen las primeras muestras (talla 36), y se verifican medidas y calce de la muestra, esto para comprobar si la horma está correcta. En caso de que necesite modificaciones, se envía nuevamente al técnico/artesano de hormas, para luego repetir el proceso de fabricación de las muestras y de verificación de medidas. Si la horma está correcta, se utilizan las muestras para buscar potenciales compradores, y cuando se haga un pedido de producción, se empieza el proceso de desarrollo y producción del resto de números/tallas de hormas (solo se producen los modelos que se venden).

La horma tiene muchas variables involucradas, en donde se debe ser muy preciso para obtener el calce correcto. En consecuencia, obtener una horma correcta lleva un tiempo considerable, lo que afecta el flujo de trabajo en la fabricación, y más cuando se deban hacer ajustes de errores. Es una parte del proceso que no está bajo control, debido a su carácter manual o artesanal, por lo que genera un “cuello de botella”, es decir, disminuye la capacidad de fabricación y/o ralentiza el proceso. Adicionalmente, existen costos asociados a los materiales utilizados para las muestras fallidas, al igual que las horas hombre y el tiempo de uso de maquinaria en los procesos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar e implementar con y en la industria nacional una estrategia de digitalización y fabricación de hormas usando tecnologías CAD-CAM.

3.2 Objetivos específicos

- Estudiar el proceso de desarrollo de hormas manual.
- Evaluar las técnicas actuales de digitalización y manufactura de hormas.
- Generar un modelo digital de una horma de zapato ya existente y parametrizarlos.
- Implementar el modelo en el proceso productivo asociándolo a la fabricación de un prototipo.
- Evaluar el modelo en términos de calidad y fabricabilidad

4 Marco Teórico

4.1 Metodología

Para resolver el presente problema, se realiza un análisis de diseño en ingeniería, que permite definir el problema, recuperar información relevante, definir un concepto o solución y, en base a las herramientas evaluación y selección de alternativas, obtener una solución al problema.

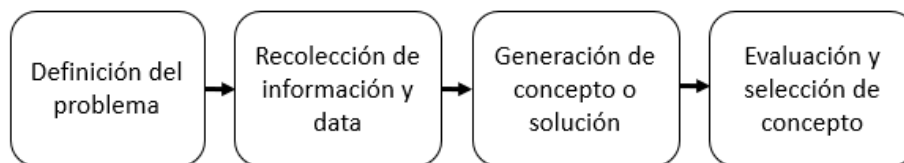


Figura 4: Metodología de ingeniería de diseño.
Fuente: Elaboración propia

Esta metodología consta de diferentes herramientas de que permiten obtener qué es lo que necesita el cliente y poder elegir la o las alternativas que satisfagan sus necesidades. Para esto es necesario contrastar los requerimientos del cliente con las características del producto o servicio requerido para diseñar una estrategia acorde a lo que se necesite.

Posterior a esto, considerando la información recolectada y los resultados del análisis, se procede a obtener un prototipo del modelo para su evaluación en cuanto a calidad y fabricabilidad en la manufactura del calzado.

4.1.1 Definición del problema

En esta etapa como bien dice su nombre, se define el problema con todas sus variables. El problema luego se traduce en términos de atributos, identificando así las necesidades o requerimientos del cliente. La información del problema y de lo que se necesita se obtiene directamente del cliente. En la mayoría de los casos, el cliente solo entrega la información general

y no necesariamente en los términos que se necesitan, por lo que es necesario traducir esta información en características y requerimientos técnicos del producto, para su posterior categorización [4], [5].

4.1.1.1 Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

El Proceso de Análisis Jerárquico es una metodología de resolución de problemas para aquellos que tienen múltiples criterios. Su objetivo es jerarquizar de manera cuantitativa los requerimientos u objetivos globales del problema, mediante una asignación subjetiva de la importancia relativa entre estos, para luego compararlos con todos los conceptos o alternativas posibles. En palabras simples, el AHP permite ordenar los objetivos por nivel de importancia, y así, determinar que requerimientos del cliente tiene mayor prioridad al momento de tomar una decisión.

Los pasos por seguir para aplicar el método AHP se pueden resumir en los siguientes:

1. Definir el problema como una jerarquización que contenga los criterios de evaluación.
2. Evaluar los diferentes criterios en función de su importancia en cada nivel. Esto se hace mediante la comparación entre 2 criterios para obtener la importancia relativa entre ellos. De esta forma se concentra en solo 2 criterios a la vez, que resulta más sencillo que una comparación global del problema. Se debe hacer la comparación
3. Se repite este proceso para todos los criterios de un mismo nivel, y así mismo, para niveles inferiores como subcriterios, respetando los niveles respectivos; es decir, no se puede realizar una comparación entre un criterio y un subcriterio porque no pertenecen al mismo nivel.

4.1.2 Recolección de información y data

En esta etapa, se realiza una investigación y recolección de información sobre el problema. Adicionalmente, se hace una investigación de mercado de los métodos, tecnologías y conceptos que tengan relación con el producto. Esta información se obtiene de diversas fuentes, como de artículos técnicos, internet, patentes y expertos en el tema.

4.1.3 Generación de concepto o solución

En esta etapa, se genera un concepto o solución del problema. Para esto, se utilizan herramientas de resolución de problemas y métodos de generación de ideas. Con la información obtenida en el punto anterior, se procede a descomponer el problema y obtener distintas soluciones o conceptos que satisfagan las necesidades del cliente [5].

4.1.3.1 Carta Morfológica

La Carta Morfológica es un método para relacionar y comparar las variables de un problema. Su objetivo es descomponer un problema complejo en problemas más pequeños y ver las distintas combinaciones y soluciones posibles para dicho problema.

Para realizar un correcto análisis morfológico se deben seguir los siguientes pasos:

1. Dividir el problema en subproblemas más simples.
2. Generar soluciones a dichos subproblemas.
3. Combinar sistemáticamente todas las soluciones de los subproblemas en soluciones completas del problema general y evaluar todas las combinaciones.

Una vez se tiene la descomposición correcta en las soluciones a los subproblemas, cualquier combinación entre estas genera una solución al problema general. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 3. La primera columna (columna izquierda) muestra los subproblemas que conforman el problema global, mientras que las filas muestran las soluciones asociadas a los subproblemas identificados.

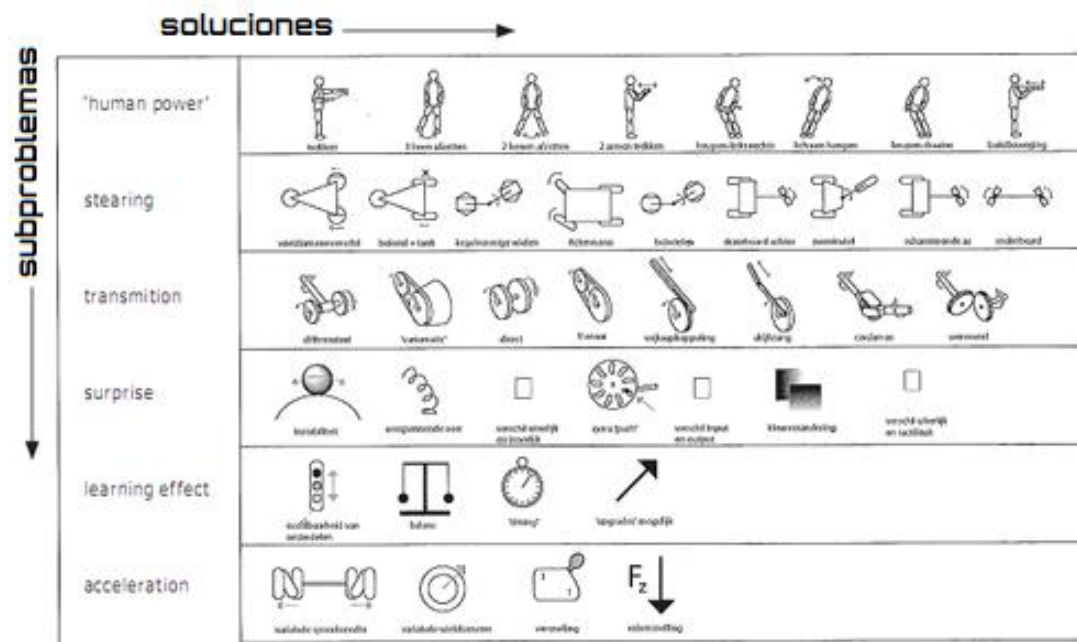


Figura 5: Ejemplo carta morfológica.
Fuente: Elaboración propia basado en Du Bois, 2013.

4.1.4 Evaluación y selección de concepto

En esta etapa es donde termina el proceso de diseño conceptual en ingeniería. Aquí se utilizan herramientas de evaluación y comparación entre las distintas alternativas o conceptos para definir cuál es la que satisface de mejor manera las necesidades del cliente o problema. Para esto se utilizan herramientas de comparación entre los conceptos.

4.1.4.1 Matriz de pesos ponderados

La matriz de pesos ponderados es un método para evaluar los conceptos en competencia clasificando los criterios de diseño con pesos ponderados y definir una puntuación en donde cada concepto cumpla con el criterio de diseño. Para esto, es necesario definir previamente valores cuantificables de los criterios de diseño. Se define una escala del 1 al 5 para puntuar los conceptos, con el 1 como "no cumple" y 5 como "cumple". Valores intermedios es que cumplen los criterios de forma incompleta o indirecta.

4.2 La Horma

La horma es la parte más importante en la elaboración y fabricación del calzado. Es un objeto tridimensional que tiene la forma de un pie humano, y se utiliza para diseñar y montar el calzado. De este objeto depende el resultado obtenido en cuanto a forma, tamaño, estilo y comodidad [6].

Existen medidas importantes de la horma que hay que tener en cuenta. Estas medidas varían en base al tamaño y estilo de la horma. Las medidas principales son: (1) longitud de la horma, (2) recio, (3) cintura, (4) alto empeine, (5) perímetro de entrada, (6) altura de talón, (7) altura de dedos y (8) punta [6], [7].

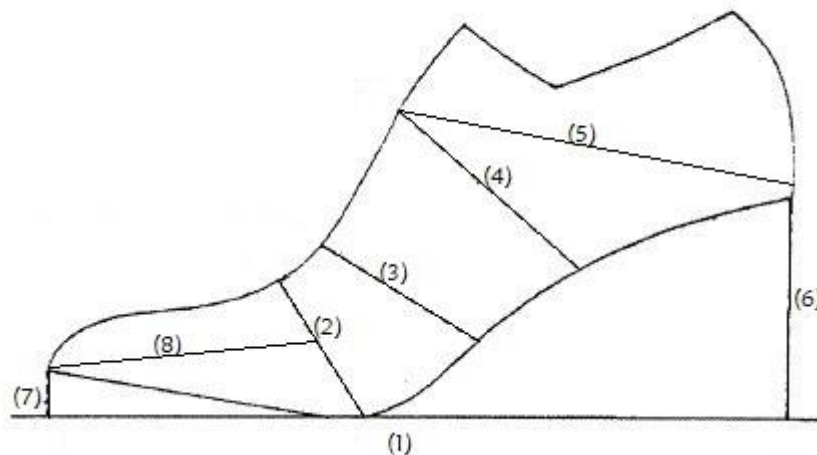


Figura 6: Medidas principales de la horma (vista de perfil).
Fuente: Elaboración propia basado en Cheng y Perng (1999)

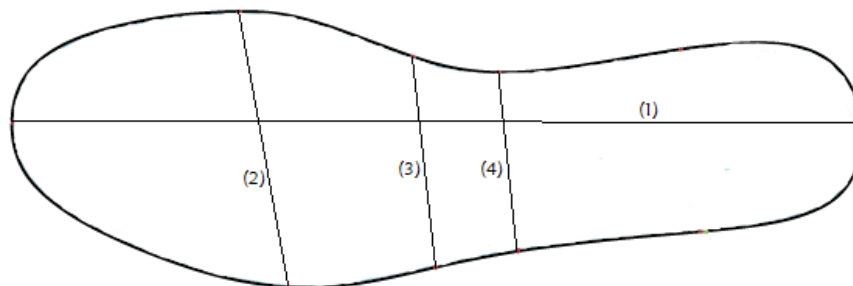


Figura 7: Medidas principales de la horma (vista de planta).
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para que una horma pueda ser utilizada debe tener ciertas propiedades mecánicas que permitan que el modelo resista los procesos mecánicos involucrados en la fabricación. Las hormas de madera no resultan apropiadas para la fabricación moderna del calzado, debido a que son susceptibles a la humedad y temperatura, provocando una deformación de la pieza. En el desarrollo tecnológico de calzado las hormas de madera han sido reemplazadas por hormas de plástico, resina y hasta metal en algunos casos. Sin embargo, no cualquiera de estos materiales es adecuado. El Instituto de Análisis e Investigación para la Fabricación de Calzado de Pirmasens (PFI) establece los valores de calidad, que debe tener una horma, para que sea apropiada para su fabricación [6]:

Tabla 1: Propiedades mecánicas que debe tener la horma.

Resistencia al dobléz [$\frac{N}{cm^2}$]	1,500
Resistencia a la compresión [$\frac{N}{cm^2}$]	<15
Resistencia al impacto [$\frac{kg}{cm^2}$]	30
Dureza: shore	62+2

Fuente: Ciatec (2008)

El modelo también debe tener una resistencia térmica acorde a los procesos y maquinarias utilizadas. En el proceso de fabricación de calzado, la horma está sometida a temperaturas cercanas a 100 °C, por lo que es necesario que el material seleccionado pueda soportar dichas temperaturas sin sufrir deformaciones.

4.3 Diseño y producción de la horma

Para entender el proceso de manufactura de calzado usando tecnologías CAD-CAM, es necesario comprender el proceso en general, específicamente en lo que a la fabricación de hormas se refiere. En los siguientes ítems se abordarán los 3 subprocesos involucrados en la fabricación de hormas con este tipo de tecnologías: obtención del diseño CAD en tres dimensiones; edición del diseño mediante softwares computarizados; y la fabricación del prototipo mediante impresión o maquinado [6].

Para aplicar esta nueva estrategia de fabricación, es necesario realizar una recopilación de información de los distintos procesos y herramientas disponibles hoy en día para llevar a cabo cada una de las etapas de esta estrategia.

4.3.1 Diseño CAD en 3 dimensiones

Como se mencionó anteriormente, una de las etapas en el proceso de fabricación de la horma en el desarrollo tecnológico de calzado es el diseño CAD en tres dimensiones, que hace referencia a la obtención del diseño de la horma en formato digital. Existen diferentes métodos para realizar esta tarea, que han ido evolucionando con el tiempo debido a la posibilidad de acceder más fácilmente a nuevas tecnologías que permitan obtener un modelo computarizado de manera más sencilla, eficiente y versátil.

Actualmente, una horma digital se puede obtener muy fácilmente, gracias al avance de los programas de edición especializados en calzado. Estos programas, vienen con hormas digitales incluidas que pueden utilizarse al alcance de un botón, y que se pueden editar para obtener las medidas deseadas, sin embargo, no todos poseen estas funcionalidades, solo los programas especializados en la fabricación de la horma o aquellos que sean dedicados a toda la fabricación del calzado, desde edición de la horma hasta obtener un modelo del calzado digital terminado.

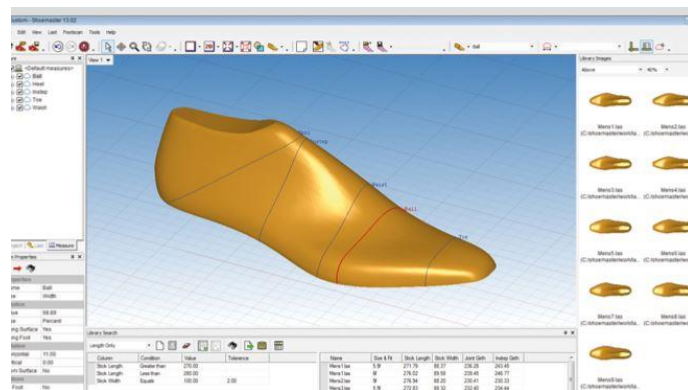


Figura 8: Programa especializado en calzado con base de datos de hormas integrada.

Fuente: Atom Shoemaster

Dichos programas, suelen venir con base de datos de hormas integradas, de diferentes estilos y tamaños, y si no lo incluyen, al menos viene con un tamaño estándar de horma para poder editar y modificar fácilmente sus medidas. Este tipo de funcionalidad permite también la posibilidad de complementar la base de datos con hormas propias y personalizadas, si se posee el archivo CAD de estas. En caso de que solo se tenga una horma física, es necesario digitalizar el modelo primero. Esto se puede hacer con los denominados escáneres digitales.

- Los escáneres digitales son máquinas, que como bien dice su nombre, son capaces de escanear un objeto físico para llevarlo al mundo digital. Y luego, importar este modelo a un

programa especializado para su posterior edición. Esto facilita en gran medida el trabajo si es que se posee una horma física que se pueda utilizar. Este método es muy útil cuando se decide dar el salto del diseño de bocetos a mano, a edición tridimensional con programas computarizados. Cualquier empresa o fabrica que se dedique a la fabricación de hormas y calzado y que tenga varios años en servicio, posee una cantidad considerable de hormas física almacenadas que servirán como primer paso para empezar su propia base de datos digital con sus propios diseños únicos, utilizando el escáner digital.

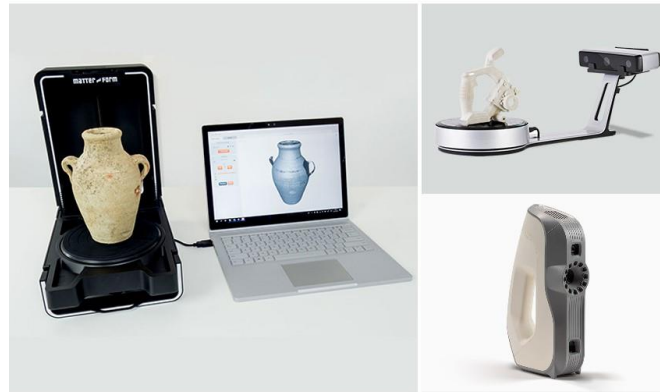


Figura 9: Escáneres digitales.

Fuente: 3D Natives

Con respecto al funcionamiento de estos escáneres, existen 2 tipos diferentes: con contacto y sin contacto.

- a) Con contacto: este escáner se caracteriza por poseer un palpador que se desplaza por la pieza y le permite dibujar en formato digital el contorno de la pieza deseada.
- b) Dentro de las maquinarias que no utilizan el contacto para reproducir la pieza, se dividen en 4 tecnologías diferentes:
 - 1) Triangulación láser: se proyecta un láser sobre el objeto y se registra la posición en que el láser entró en contacto con el objeto a través de una cámara integrada. Se varía el ángulo y/o posición del objeto o el escáner, para obtener distintas vistas, posiciones y distancias del objeto, y así obtener una representación en 3 dimensiones de este.

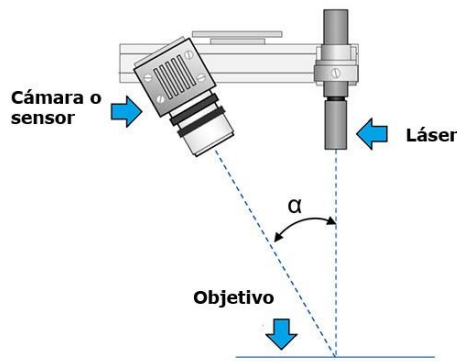


Figura 10: Esquema triangulación láser.
Fuente: Elaboración propia en base a imagen de 3D Natives

- 2) Luz estructurada: se proyecta una luz sobre el objeto y una cámara o sensor capta los patrones de distorsión de la luz sobre el objeto, para determinar posición, distancia y forma del objeto. Se deben cambiar los puntos de observación para tener una representación completa del objeto.

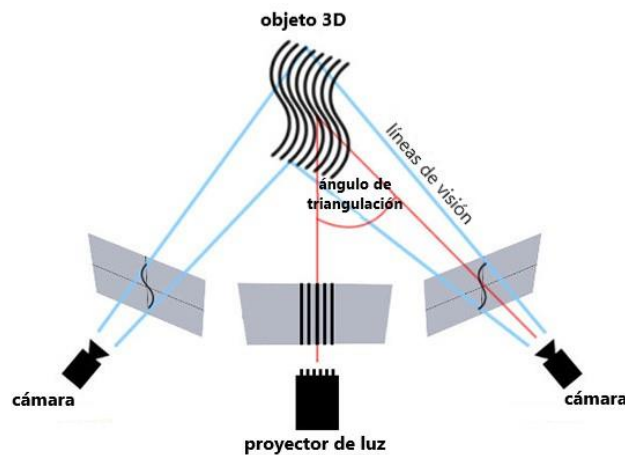


Figura 11: Esquema tecnología luz estructurada.
Fuente: Elaboración propia en base a imagen de 3D Natives

- 3) Fotogrametría: consiste en sacar fotografías del objeto en diferentes ángulos y distancias, y así obtener la representación del objeto.
- 4) Tiempo de vuelo: este método es parecido a la triangulación láser, pero este determina la distancia entre el escáner y el objeto midiendo el tiempo que el láser emitido tarda en reflejarse.

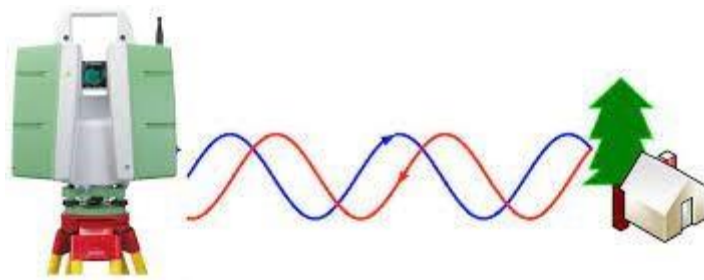


Figura 12: Esquema tecnología tiempo de vuelo
Fuente: Cuellar y Romero, Ciatec (2015)

Por otro lado, esto abre la posibilidad a la personalización del calzado, debido a que la tecnología actual de los escáneres digitales no solo permite digitalizar objetos como hormas, sino también partes del cuerpo humano, como el pie. Con esto es posible obtener un modelo tridimensional del pie de una persona que se importará posteriormente a un programa de edición y se diseñará la horma en base a las medidas de este, obteniendo así calzados personalizados y especializados para cada persona.

Cabe mencionar que las piezas digitalizadas por los métodos anteriormente mostrados resultan en modelos 3D de mallas en vez de un sólido. Un modelo digital se puede representar como una malla de vértices, aristas y caras que utilizan una representación poligonal para definir una forma 3D. En la edición de modelos y piezas esto facilita mucho el trabajo debido a que se puede editar en base a la modificación de estos polígonos. La diferencia que tiene este con un objeto sólido, es que no posee masa.

4.3.2 Edición del diseño CAD de la horma

Antes de la implementación del desarrollo tecnológico de calzado, la edición y fabricación de hormas era completamente manual. Aunque se sigue utilizando hoy en día, es un proceso que lleva mucho tiempo, tiene costos elevados y tiene cierta dificultad debido a la complejidad de la geometría de la horma, ya que la fabricación es mediante ensayo y error [8].

Como se mencionó anteriormente, en el desarrollo tecnológico de calzado existen programas especializados y no especializados en calzado, que permiten una edición completamente digital de la horma. Estos programas entregan un modelo estándar de horma, o

permiten importar diseños propios, donde uno puede hacer modificaciones posteriores en medidas específicas de la horma para obtener el modelo deseado.

4.3.2.1 Softwares especializados en calzado

En el mercado existen diferentes programas enfocados específicamente a lo que es la edición y obtención de la horma, pero lo usual es que estos programas no solo sirvan a este propósito, sino que permiten una edición tanto de la horma como del posterior diseño del calzado, materiales a ocupar, colores y estilos diferentes de calzado, hasta tener una visualización completa del calzado terminado en formato digital.

Los softwares de edición suponen una ventaja competitiva importante en la producción del calzado, ya que con estos se reduce el tiempo de diseño y fabricación, se reducen y detectan errores en la manufactura y en etapas tempranas de la producción, unifican la etapa del diseño del calzado, permiten simular el producto final que se obtendría y así tener una idea general del resultado final, aceptan modificaciones tanto a nivel de horma como a nivel de elección de estilos, materiales y colores del calzado, aumentan la productividad, mejora la calidad de diseño, permite una estandarización de los procesos y permiten una mejor comunicación en el equipo de trabajo. En el proceso tradicional el hormero fabrica la horma siguiendo los detalles del modelista y su experiencia fabricando estas piezas, y no se utilizan herramientas especializadas para medir y controlar cada detalle, lo que conlleva a muchos errores y tiene como consecuencia numerosas modificaciones a la horma. En los softwares de edición esto no ocurre debido a que permiten una edición completamente computarizada, estandarizando el proceso y disminuyendo errores al momento de modificar el diseño.

La edición y modificación de hormas, trabajan mediante modelos paramétricos, lo que permite modificar el tamaño, estilo y forma con solo ingresar el valor de las medidas importantes de la horma, lo que modifica la horma en su totalidad. También permiten la edición visual de las hormas, mediante la modificación manual de la forma de la horma y sus medidas. Esto es particularmente útil para la edición de la horma en base a un pie digitalizado, ya que se pueden visualizar las zonas donde el pie entra en contacto con la horma estandarizada, como se ve en la Figura 12, y así poder adaptar la forma de esta al pie y obtener una horma personalizada y a la medida para el cliente.

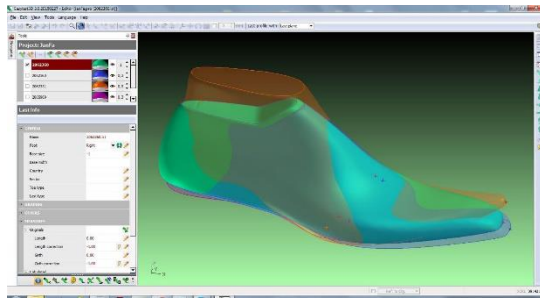


Figura 13: Edición de horma en base a las medidas deseadas.
Fuente: New Last Group

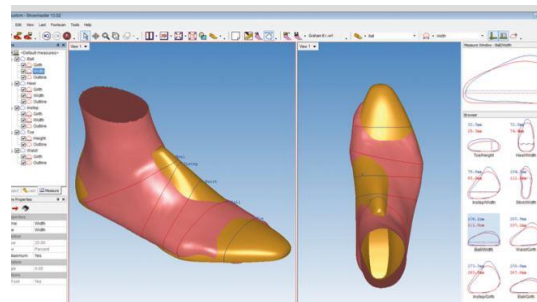


Figura 14: Edición de horma en base a pie digitalizado.
Fuente: Atom Shoemaster

Para la edición de la horma es necesario tener conocimiento en el diseño y producción de hormas, puesto que es necesario conocer las medidas principales, las mostradas en la Figura 3, y saber qué es necesario modificar para obtener el modelo deseado.

4.3.2.2 Softwares no especializados en calzado

Por otro lado, también existen softwares no especializados en calzado que pueden realizar la misma tarea de edición que los softwares dedicados únicamente al calzado y edición de la horma, pero esto requiere un conocimiento avanzado de las herramientas y, aunque se tenga manejo y conocimiento completo del software utilizado, nunca tendrá las mismas funcionalidades que ofrece un programa dedicado a la materia. De todas maneras, se puede considerar una buena alternativa dependiendo de lo que se necesita realizar, ya que estos programas suelen ser muchos más económicos al ser genéricos.

Se mencionó anteriormente que el archivo digital de la pieza se importa en el software en formato de malla de polígonos. Esto toma especial relevancia en este tipo de softwares, no especializados en calzado, debido a que uno trabaja y edita directamente la pieza mediante los polígonos, curvas y aristas del modelo.

4.3.3 Fabricación del prototipo

En la fabricación de prototipos para la manufactura existen diferentes procesos asociados a la creación de la pieza. Estos procesos son denominados métodos de prototipado rápido. Es un grupo de técnicas que permiten la manufactura de un prototipo a partir de un modelo CAD 3D. Estas técnicas se implementaron por diferentes razones: reducir el tiempo de fabricación, minimizar costos por errores o defectos, reducir los cambios en la pieza y mejorar la comunicación en el entorno de trabajo.

La elección del proceso a utilizar contempla diferentes variables tales como costos, especificaciones del modelo, acceso a las tecnologías específicas, complejidad de la pieza, funcionalidad del prototipo, entre otras. Estos métodos se pueden separar en 2 grandes tipos: los aditivos y los sustractivos. Los primeros tienen relación con las tecnologías de impresión tridimensional por capas, mientras que los otros tienen relación con la remoción de material, más específicamente con las tecnologías de Control Numérico Computarizado (CNC) de maquinado de alta velocidad.

Si se deciden utilizar las tecnologías de impresión tridimensional, el modelo debe tener una superficie completamente cerrada para que pueda ser leído correctamente por el equipo de impresión, y que no tenga errores posteriores. A partir de este archivo, este equipo genera planos transversales donde corta la figura y genera distintos perfiles del modelo desde abajo hacia arriba, y el conjunto de todas estas secciones formarán el modelo sólido.

Para la fabricación por métodos de remoción de material, se deben tener las mismas consideraciones que para el archivo para impresión, sin embargo, si se decide utilizar el maquinado directo en máquinas CNC es necesario preparar el archivo en estándares DXF o IGES para enviarlo al programa computarizado de maquinado [6]. En este se debe seleccionar el material a utilizar, especificar las revoluciones de la máquina y las velocidades de corte, y las herramientas con las cuales se cortará el prototipo. Luego, se eligen las estrategias de maquinado. Cuando ya se tiene toda esta información, se trazan las trayectorias de las herramientas de corte en un archivo de texto, que luego se ingresa a la máquina CNC donde esta toma esta información como instrucciones de movimiento.

A continuación, se especificarán los procesos de prototipado, tanto de adición de material como de sustracción de este:

- **Estereolitografía:** este proceso consiste atacar un tipo de resina curable con un láser de luz ultravioleta. Los puntos de la resina atacados por el láser se polimerizan (solidifican) creando una capa sólida, con la forma que corresponda a cierta altura. Cuando se termina una capa, se hunde en la resina mediante un sistema mecánico permitiendo así que se cubra completamente por la resina y esté listo para solidificar la siguiente capa. Las distancias entre cada capa suelen ser entre 0,05 a 0,15 milímetros. Algunas ventajas de este proceso son que se pueden crear prototipos translúcidos, es un método relativamente económico, rápido y las piezas obtenidas tienen buena resolución. Algunas desventajas tienen relación con la resina utilizada. Los prototipos fabricados en base a la resina suelen ser susceptibles a condiciones ambientales. Son sensibles a la humedad y temperatura, además de que sus propiedades cambian con el tiempo debido al curado que ocurre con la luz ultravioleta ambiental.

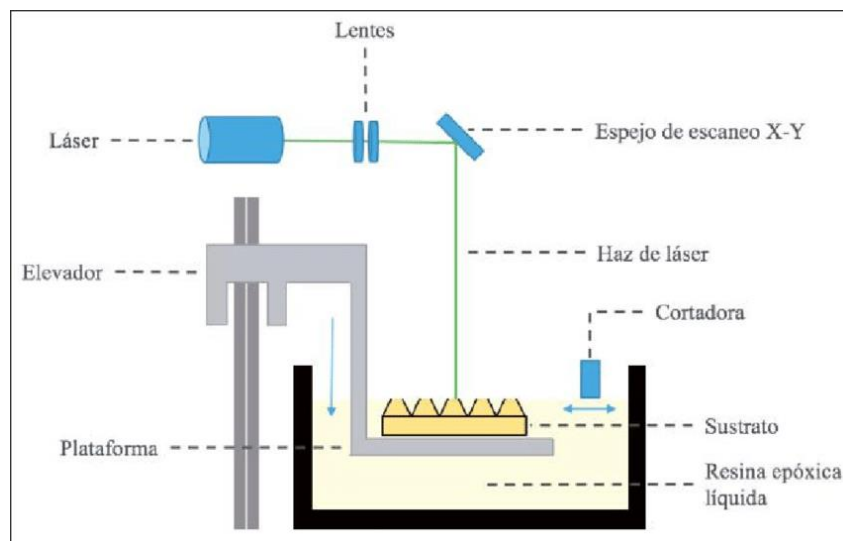


Figura 15: Esquema del proceso de estereolitografía.
Fuente: V. Niño, Endrino, Estupiñan, Pérez y Díaz (2016)

- **Sinterizado Láser Selectivo (SLS):** este proceso consiste en la fundición de polvos de distintos tipos de material (metal o termoplásticos) para así formar el objeto 3D a través de capas solidificadas de material. Se utiliza un láser, usualmente de CO₂, que funde el material creando secciones transversales del modelo a imprimir. Después que se solidifica una capa, la superficie de trabajo baja mediante un sistema mecánico y otra capa de polvo es puesta en la parte superior mediante un rodillo. Este proceso tiene un amplio rango de materiales de trabajo debido a la cantidad de materiales en polvo que hay comercialmente disponible. Además, dependiendo del material la pieza resultante puede ser muy resistente a altas temperaturas y permite ensayos de durabilidad y resistencia. Un

problema con respecto a este método es que la pieza fabricada no tiene un gran acabado y requiere un procesamiento posterior para reducir las porosidades.

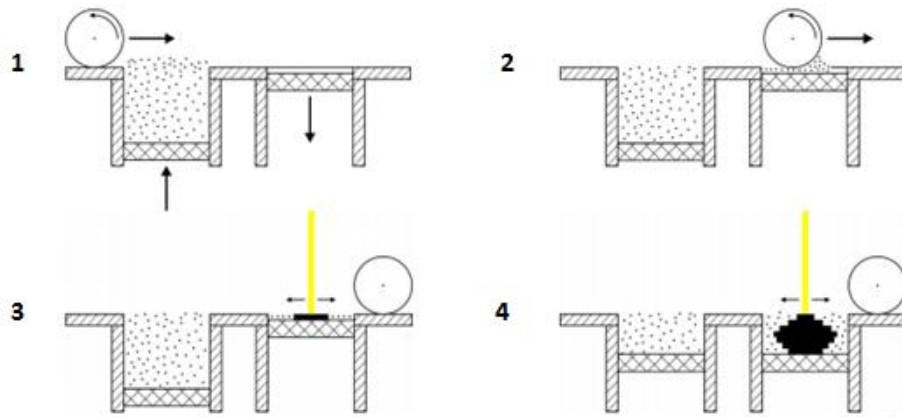


Figura 16: Esquema del proceso de Sinterizado Láser Selectivo.

Fuente: 3D Natives

- **Manufactura de Objetos Laminados (MOL):** este proceso consiste láminas de papel cortadas superpuestas para formar el objeto deseado. Las láminas se cortan con láser, típicamente CO₂. Las propiedades del prototipo están dadas por el tipo de papel, específicamente su espesor, y también por el adhesivo utilizado entre las capas. El láser corta el contorno de la capa deseada a cierta altura, la plataforma que contiene el modelo baja una cierta distancia, se coloca una nueva capa de papel encima y se corta nuevamente. Los rollos utilizados suelen ser de bajo costo, en este proceso la materia prima no sufre transformación por lo que no se ven afectadas sus propiedades mecánicas, pero necesita un procesamiento posterior para afinar el acabado. Una desventaja de este proceso es que se genera mucho desperdicio por las partes del rollo no utilizado.

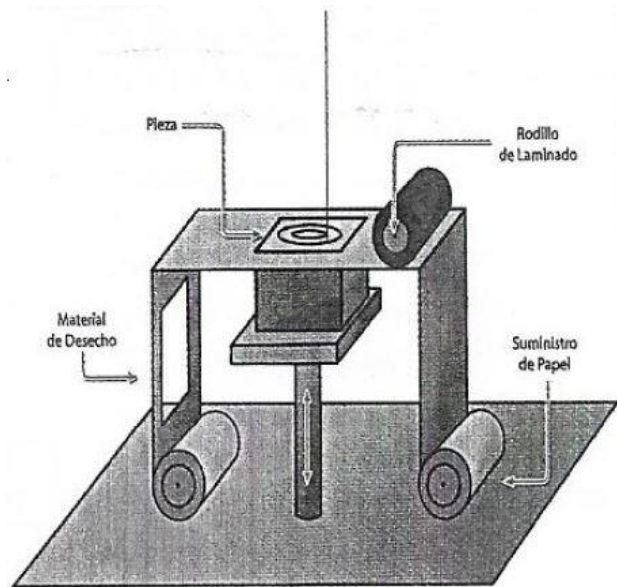


Figura 17: Esquema del proceso de Manufactura de Objetos Laminados.
Fuente: Ciatec (2008)

- **Modelado por Deposición de Fundido (MDF):** en sus siglas en inglés FDM (*Fused Deposition Modeling*), o también conocido con las siglas FFF (*Fused Filament Fabrication*), es el proceso que utilizan la mayoría de las impresoras 3D en el mercado. Consiste en introducir un filamento de termoplástico en un cabezal, el cual alcanza altas temperaturas para fundir el material y depositarlo en una plataforma dándole forma al objeto deseado. Este cabezal se puede mover en múltiples direcciones lo que le permite reproducir cualquier pieza deseada. Los materiales termoplásticos para utilizar son variados. Es el proceso más económico y, por lo mismo, es el que tiene los acabados de menor calidad en comparación a los otros métodos de prototipado. Todos los procesos antes mencionados corresponden al método de prototipado aditivo.

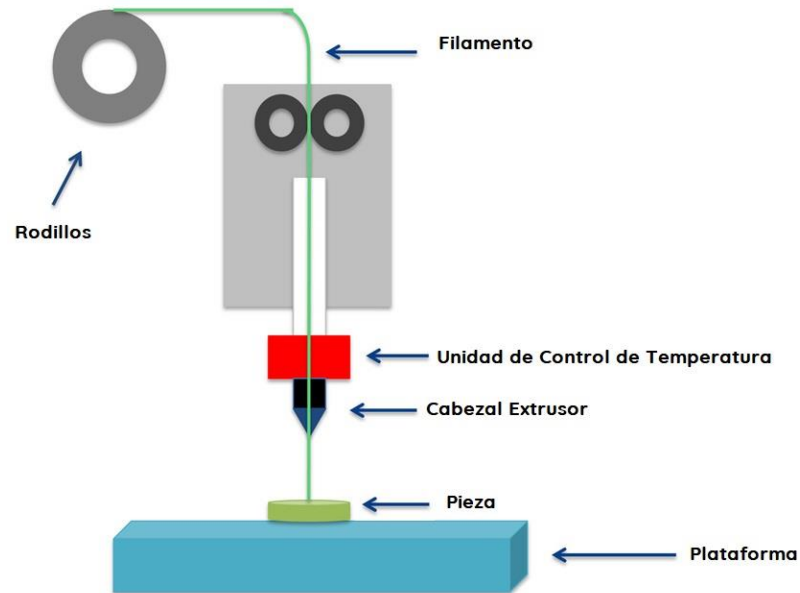


Figura 18: Esquema del proceso modelado por deposición de fundido.

Fuente: Elaboración propia en base a Konta, García y Serrano (2017)

- **Fabricación por CNC:** este proceso consiste en la sustracción de material a través de máquinas con control numérico computacional, de ahí sus siglas. Las hay de 2 tipos: los tornos CNC y las fresadoras CNC. Este tipo de máquinas pueden trabajar prácticamente cualquier tipo de material. Existen máquinas que poseen más de 3 ejes de movimiento que les permite obtener un buen prototipo de diseño. Sin embargo, independiente de la cantidad de ejes que tenga, la pieza siempre tendrá un lado que no se podrá mecanizar, ya que la pieza debe estar sujeta. Son de alta precisión y las piezas terminadas tienen muy buen acabado. Por otro lado, no se pueden mecanizar piezas huecas. Para obtener un prototipo es necesario ingresar comandos específicos que son las instrucciones que la máquina realiza sobre la pieza. En ese sentido, es un proceso más complejo que los métodos de adición de material.

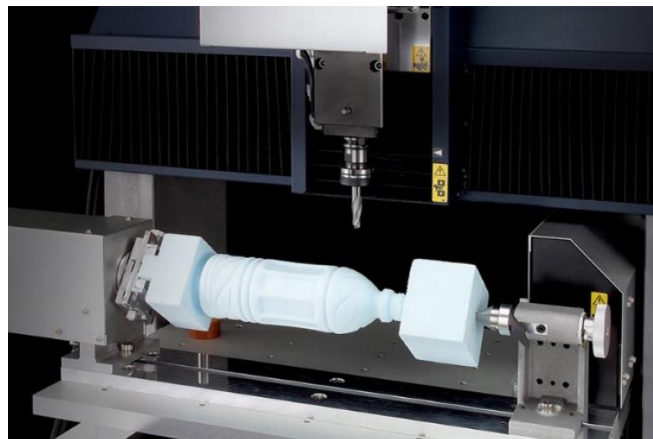


Figura 19: Fabricación CNC.

Fuente: Roland DGA Corporation

5 Estado del arte

Para poder obtener una estrategia de diseño con los estándares de calidad y las funcionalidades adecuadas, es necesario investigar lo que entrega el mercado en este aspecto, y así, ofrecer la mejor solución posible según las necesidades. Para esto se investigan alternativas para cada uno de los subprocesos antes mencionados.

5.1 Escáneres 3D

Primero, se ven las opciones que ofrece el mercado con relación a la obtención del diseño CAD en 3 dimensiones. Se elige la alternativa del escáner 3D siendo la opción más versátil y que cumple con los requerimientos.

a) Shining 3D Einscan SE



Figura 20: Escáner Einscan SE de la empresa Shining 3D.

Fuente: Shining 3D

La empresa Shining 3D es una empresa dedicada a la digitalización 3D y a las tecnologías de impresión 3D por más de 14 años. Dentro de su catálogo de productos se encuentra la Einscan SE. Este producto es una digitalizadora de escritorio y una de las alternativas más económicas que nos ofrece esta empresa. Esta máquina nos ofrece una gran calidad y una facilidad de uso que cualquier persona con un mínimo de conocimiento podría operarla obteniendo grandes resultados. Posee 2 modos de uso, un escaneo

automático y un escaneo manual. Este último es para piezas más grandes que necesitan distintas vistas para ser reproducidas, mientras que el automático es para piezas más pequeñas que pueden ser escaneadas con un click. Trabaja con un formato de archivo que le permite compatibilidad con, prácticamente, todas las impresoras 3D del mercado. Tiene una buena relación precio/calidad, lo que lo hace un muy buen escáner de entrada en el mundo de las tecnologías 3D [9].

Tabla 2: Características escáner Einscan SE.

Tecnología	Luz estructurada
Resolución [mm]	0.2
Tipo de escáner	Escáner de escritorio
Volumen de escaneo [mm]	200 x 200 x 200
Tiempo de escaneo [segundos/escaneo]	8
Precio [US\$]	1199

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Shining 3D.

b) Artec Eva Lite



Figura 21: Escáner portátil Eva Lite de la marca Artec.

Fuente: Artec 3D

El siguiente escáner es el Eva Lite de la marca Artec 3D. Esta empresa proveniente de Luxemburgo es pionera en el desarrollo de tecnologías 3D innovadoras durante más de 10 años. Se especializan en escáneres portátiles de alta calidad entre los cuales se encuentra el Eva Lite. Este escáner es la versión económica de su hermano mayor, Eva. Posee una alta precisión, que cuenta con seguimiento y captura de geometría, pero, a su vez, no posee captura de textura ni color, acorde al fabricante. Esto no presenta un problema porque no es una característica que se deba tener en cuenta al escanear formas de zapato, siendo lo más importante su forma y geometría. Por esto mismo, es un escáner que no necesita un computador con grandes características y es más eficiente en términos energéticos. Cabe mencionar que posee una garantía de 2 años, y si en algún

momento se desea actualizar a escáneres de mejor calidad, se puede adquirir el escáner Eva, dando este por parte de pago y pagando solo la diferencia [10].

Tabla 3: Características de escáner Eva Lite de Artec 3D.

Tecnología	Luz estructurada
Resolución [mm]	0.1
Tipo de escáner	Escáner portátil
Volumen de escaneo [mm]	-
Tiempo de escaneo [fps]	16
Precio [US\$]	9800

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Artec 3D.

c) Shining 3D Einscan H



Figura 22: Escáner Einscan H de Shining 3D.

Fuente: Shining 3D

Otra alternativa que nos ofrece la empresa Shining 3D es su digitalizador portátil Einscan H. Esta máquina es un escáner híbrido que puede escanear con luz estructurada o luz infrarroja; esto es particularmente útil para escanear rostros de personas de manera más cómoda que con luces fuertes. Tiene 3 modos de escáner: objetos, partes del cuerpo y otro para rostros/caras. Esto abre la posibilidad de no solamente escanear hormas para prototipo, sino también aprovechar de escanear pies y así obtener calzado personalizado. Posee una gran resolución y precisión, lo que le permite obtener muy buenos resultados. Tiene un software muy completo y, a la vez, muy intuitivo para el usuario. Sin embargo, al ser un programa muy potente, es necesario utilizar computadores de gama alta para asegurar su correcto funcionamiento [11].

Tabla 4: Características escáner Einscan H.

Tecnología	Luz estructurada
Resolución [mm]	0.2
Tipo de escáner	Escáner portátil
Volumen de escaneo [mm]	-
Tiempo de escaneo [fps]	20
Precio [US\$]	4890

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Shining 3D.

5.2 Softwares de edición 3D

Para el siguiente subproceso, que corresponde a la edición del diseño y generación de archivos para el prototipado, se debe enfocar la investigación hacia softwares (genérico o especializado en calzado) de edición 3D.

a) Atom ShoeMaster Custom y Engineer Pro

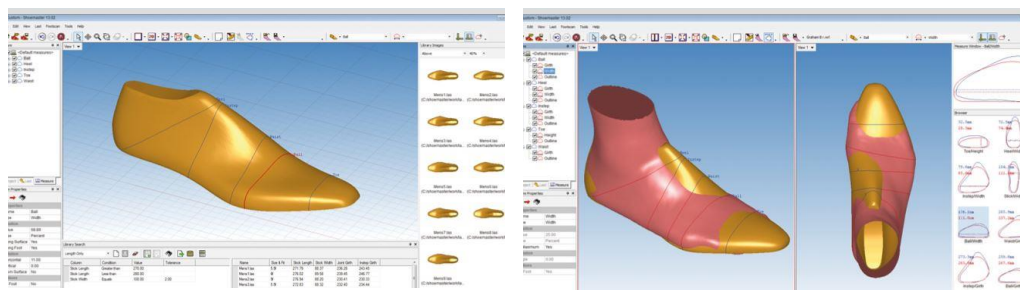


Figura 23: Software Custom Tailor Made de Atom Shoemaster.

Fuente: Atom Shoemaster

Este es un sistema que permite ajustar el diseño de la horma y el zapato en tres dimensiones según los requerimientos de clientes individuales. Posee una biblioteca digital de hormas donde se muestran los modelos tradicionales y pueden ser modificados según la forma del pie de un cliente en específico. Se puede utilizar tanto el diseño escaneado de una horma física, como también el escáner de un pie de una persona. Las hormas estandarizadas en la librería se pueden adaptar a la forma del pie escaneado, y esto también permite que los patrones de diseño asociados a las hormas se adapten automáticamente [12].

Algunas de sus funciones importantes son:

- Base de datos de hormas integrado
- Elaboración de hormas en base a pies digitalizados

- Escalado de hormas
- Edición de medidas y forma en tiempo real
- Patrones de diseño que se adaptan a la horma automáticamente

b) Romans CAD RCS 3D Last

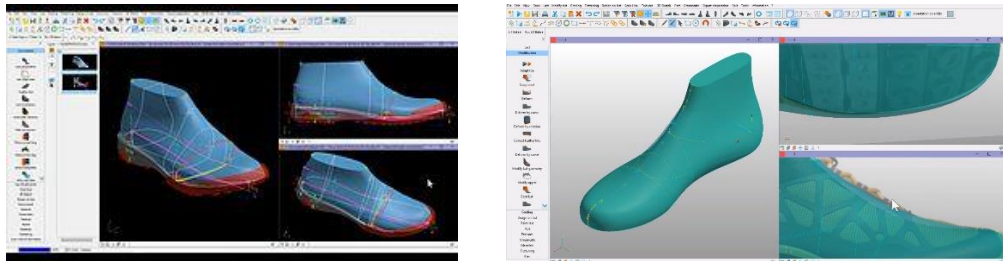


Figura 24: Software RCS 3D Last de Romans CAD.

Fuente: Stratégies

Este software permite modificar hormas en tres dimensiones y tiene una gran cantidad de funciones que le permiten realizar una edición precisa de la horma; dentro de estas funciones está la de graduar las hormas, copiar y pegar puntas, realizar coordinaciones, entre otras. Además, tiene compatibilidad con todos los digitalizadores del mercado y utiliza modelos paramétricos, lo que significa que, si se modifica una dimensión, la geometría se adapta automáticamente. Esto permite la opción de escalado, donde se obtienen hormas para distintos números y modelos [13].

Algunas de sus funciones importantes son:

- Creación y edición de hormas 3D paramétricas
- Compatibilidad escáner 3D del mercado
- Generación de archivos de corte para prototipado
- Graduación 3D de alta eficiencia
- Generación de horma desde dibujo de horma en 2D
- Edición en base a pies digitalizado

c) Vorum Footwear Design

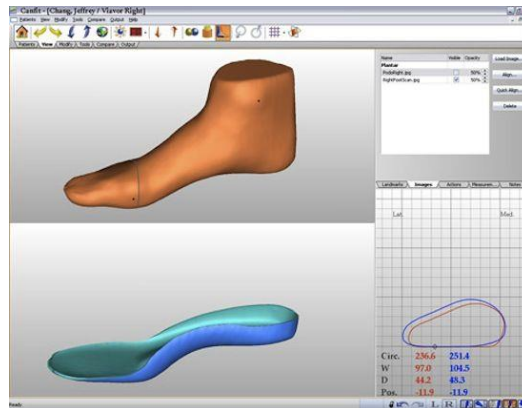


Figura 25: Software Shoe Last Desing (Footwear Design) de Vorum.
Fuente: Vorum

Este software se enfoca en la creación de hormas de manera rápida y sencilla. Utiliza una biblioteca de hormas establecida para personalizar todo tipo de calzado. Tiene la opción de trabajar con el escaneado tridimensional del pie de un paciente, con una horma física escaneada o con uso de datos de medición, sin necesidad de escanear. Esto último hace referencia a que, si los diseños se realizan con mediciones, impresiones y una biblioteca física de hormas, se pueden digitalizar los contornos del pie para producir una horma tridimensional en base a la biblioteca de hormas integrada [14].

Algunas de sus funciones importantes son:

- Base de datos de hormas integrada
- Generación de horma en base a pie digitalizado
- Baja compatibilidad con alternativas del mercado
- Almacenamiento de hormas digitalizadas

d) Inescop IcadFOR

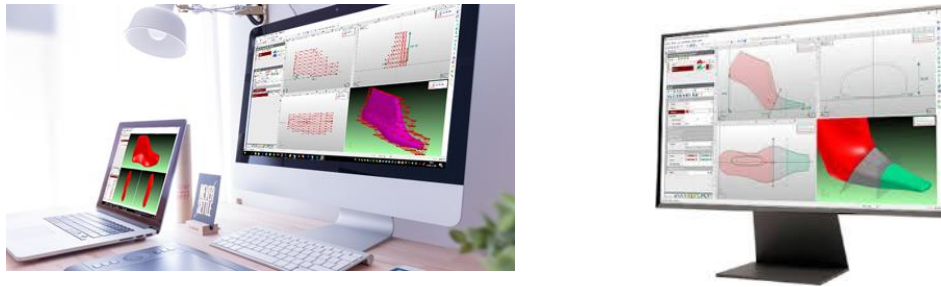


Figura 26: Software IcadFor de Inescop.
Fuente: Inescop

Este sistema permite la edición de hormas previamente digitalizadas, a través de herramientas de edición en dos y tres dimensiones. Posee la opción de combinación de hormas para crear nuevos modelos y también permite la eliminación de soportes utilizados para sostener las hormas en la digitalización. Incluye las funciones de escalado, modificación y medición de hormas. Además, permite trabajar con la digitalización de pies utilizando diferentes herramientas de análisis [15].

Algunas de sus funciones importantes son:

- Unión de hormas
- Eliminación de soportes de fabricación
- Escalado de hormas
- Modificación y rectificación de hormas
- Medición precisa de hormas y pies

Tabla 5: Tabla comparativa de programas de edición de hormas.

	Atom ShoeMaster Custom	Romans CAD RCS 3D Last	Vorum Footwear Design	Inescop IcadFOR
Unión de hormas	✗	✗	✗	✓
Librería de hormas integrada	✓	✗	✓	✓
Edición de hormas en base a pie digitalizado	✓	✓	✓	✓
Generación de hormas en base a dibujo 2D	✗	✓	✗	✗
Escalado de hormas	✓	✓	✗	✓
Compatibilidad de formatos	✓	✓	✗	✓

Fuente: Elaboración propia

5.3 Máquinas de prototipado rápido

Y, por último, pero no menos importante, se debe hacer una búsqueda de alternativas en base al último subproceso de la fabricación del prototipo.

a) Ultimaker S5

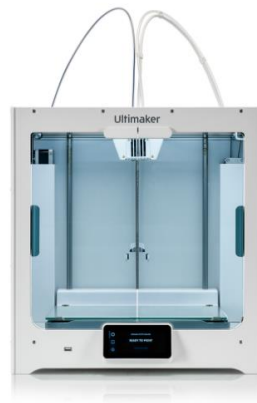


Figura 27: Impresora 3D Ultimaker S5 de Ultimaker.

Fuente: Ultimaker

La impresora cuenta con un gran volumen de impresión, por lo que puede abarcar distintos tipos de objetos. Es compatible con filamentos de fibra de carbono y vidrio de alta resistencia, además de los comúnmente utilizados termoplásticos. Posee una nivelación activa, puertas de vidrio para aislar del exterior y sensores de flujo que se activarán al agotarse el material. Todas estas características la hacen una impresora de mayor fiabilidad. Incluye software gratuito y admite una amplia gama de tipos de archivos, siendo el más común el STL. Tiene un período de garantía de 1 año, ofrece formación en línea y soporte técnico [16].

Tabla 6: Especificaciones técnicas Ultimakes S5.

Volumen de impresión	330 x 240 x 300 mm
Resolución de capa	0.25 mm nozzle: 150 - 60 micron
	0.4 mm nozzle: 200 - 20 micron
	0.6 mm nozzle: 300 - 20 micron
	0.8 mm nozzle: 600 - 20 micron
Velocidad de impresión	< 24 mm ³ /s
Tecnología de impresión	FDM
Material de impresión	Termoplásticos, fibra de carbono y vidrio
Precio	5995

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Ultimaker

b) Formlabs Form 3 L



Figura 28: Impresora 3D Form 3L de Formlabs.

Fuente: Formlabs

Esta impresora trabaja con estereolitografía de “baja fuerza”, por lo que su material de trabajo es la resina. Según el fabricante, esta forma avanzada de estereolitografía reduce las fuerzas de fricción y proporciona una mejor calidad a la impresión. Posee sensores integrados que le permiten mantener las condiciones ideales de la impresión y no se necesita formación especializada para su uso. Los componentes son fácilmente reemplazables por el mismo usuario, al igual que el cambio de material de impresión, que viene en un sistema simple de cartuchos [17].

Tabla 7: Especificaciones técnicas Formlabs Form 3L

Volumen de impresión	300 × 335 × 200 [cm]
Resolución	25 [μm] XY
Grosor de capa	25-300 [μm]
Tecnología de impresión	LFS (Low Force Stereolithography)
Material de impresión	Resina (estándar y especiales)
Precio	11000

Fuente: Elaboración propia en base a datos Formlabs.

c) Roland Modela MDX-50



Figura 29: Fresadora CNC Modela MDX-50
Fuente: Roland DGA Corporation

Esta fresadora CNC de sobremesa es la solución ideal para fabricación en bajo volumen y prototipos. Tiene una amplia gama de materiales para trabajar, entre plásticos, resinas, espumas y maderas. Se pueden obtener acabados suaves gracias a su mecánica motriz y su sistema de transmisión avanzado. El software incluido es tanto para principiantes como más experimentados, permitiendo configurar los parámetros en pasos simples y directos, para una operación sencilla. Adicionalmente, posee un cambiador automático de herramientas, para una producción automatizada de las piezas [18].

Tabla 8: Especificaciones técnicas Modela MDX-50.

Material	Resinas (maderas químicas y cera de modelado) y plásticos (ABS, POM, PVC)
Resolución mecánica	0.01 mm/paso
Tamaño de pieza de trabajo cargable	400 mm X 305 mm Y 100 mm Z
Velocidad de operación	3600 mm/min XY 3000 mm/min Z
Precio	9000

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Roland DGA Corporation.

6 Desarrollo y Análisis

6.1 Análisis y metodología

6.1.1 Definición del problema

Con la información entregada por Calzados IVO, se procede a interpretar esta información para traducirla en términos de atributos. Dado que esta estrategia puede ser dividida en 3 grandes subprocesos (escáner de hormas, edición digital de la horma y fabricación del prototipo), en donde cada uno tiene requerimientos específicos, se confecciona una lista de atributos técnicos y requerimientos para cada subproceso de esta estrategia.

Tabla 9: Lista de necesidades del cliente en términos de atributos.

Escáner de hormas	Edición digital de la horma	Fabricación del prototipo
Bajo costo de adquisición	Bajo costo de licencia	Bajo costo de adquisición
Bajo tiempo de escaneo	Programa de edición en 3 dimensiones	Bajo tiempo de prototipado
Escanear pie humano	Modificación dimensional de hormas	Alta calidad de prototipado
Archivo resultante sea formato común y compatible	Compatibilidad equipos del mercado	Fabricar hormas de zapato
Material equipos resistente	Proceso de edición fácil e intuitivo	Volumen de prototipado mayor a 200x200x200 mm
Alta calidad de escaneo	Visualización/renderizado del producto final	Material de fabricación apto para fabricar hormas
Software integrado fácil de usar	Librería de hormas integrada	Bajo costo de repuestos
Escáner fácil de usar	Modificar horma en base a pie digitalizado	Bajo costo de materia prima
Soporte técnico y garantía	Interfaz intuitiva	Accesibilidad de repuestos
Fácil calibración	Integración de cursos y capacitaciones	Accesibilidad de materia prima
Volumen de escaneo mínimo de 200x200x200 [mm]	Integración con otros softwares de calzado	Equipo y sistemas fácil de usar
Accesibilidad de repuestos	Colaboración proveedor/cliente	Puesta en marcha y calibración fácil y rápido
Bajo costo de repuestos		Integración de cursos y capacitaciones
Escanear hormas		Soporte técnico y garantía
		Material de equipo resistente

Fuente: Elaboración propia

Ya identificada las necesidades del cliente, se revisan para eliminar los atributos redundantes, y se dividen en 3 categorías: objetivos, funciones y restricciones, donde los objetivos tienen relación con los atributos deseados del producto, funciones con las acciones que debe desempeñar un producto exitoso, y restricciones con los límites que el producto debe tener para ser aceptable.

Tabla 10: Categorización de listas de atributos en objetivos, funciones y restricciones.

	Escáner de hormas	Edición digital de la horma	Fabricación del prototipo
Objetivos	Accesibilidad de repuestos	Bajo costo de licencia	Bajo costo de adquisición
	Bajo tiempo de escaneo	Compatibilidad equipos del mercado	Bajo tiempo de prototipado
	Archivo resultante sea formato común y compatible	Proceso de edición fácil e intuitivo	Alta calidad de prototipado
	Material equipo resistente	Visualización/renderizado del producto final	Bajo costo de repuestos
	Alta calidad de escaneo	Librería de hormas integrada	Bajo costo de materia prima
	Software integrado fácil de usar	Modificar horma en base a pie digitalizado	Accesibilidad de repuestos
	Escáner fácil de usar	Interfaz intuitiva	Accesibilidad de materia prima
	Soporte técnico y garantía	Integración de cursos y capacitaciones	Equipo y sistemas fácil de usar
	Fácil calibración	Integración con otros softwares de calzado	Puesta en marcha y calibración fácil y rápido
	Escanear pie humano	Colaboración proveedor/cliente	Integración de cursos y capacitaciones
	Bajo costo de repuestos		Soporte técnico y garantía
	Bajo costo de adquisición		Material de equipo resistente
Funciones	Escanear hormas	Modificación dimensional de hormas	Fabricar hormas de zapato
		Programa de edición en 3 dimensiones	Material de fabricación apto para fabricar hormas
Restricciones	Volumen de escaneo mínimo de 200x200x200 [mm]		Volumen de prototipado mayor a 200x200x200 [mm]

Fuente: Elaboración propia

A su vez, los objetivos se separan en categorías definidas por la similitud entre los atributos. En este caso, las categorías elegidas son rendimiento, que tiene que ver con el desempeño del producto; costos, que se refieren a los atributos relacionados con precios o costos

del producto y sus componentes; y apariencia, que hace referencia a los atributos que tienen que ver con la estética y aspecto del producto.

Tabla 11: Categorización de objetivos en rendimiento, costos y apariencia.

		Escáner de hormas	Edición digital de la horma	Fabricación del prototipo
Objetivos	Rendimiento	Bajo tiempo de escaneo	Proceso de edición fácil e intuitivo	Bajo tiempo de prototipado
		Alta calidad de escaneo	Compatibilidad equipos del mercado	Alta calidad de prototipado
		Archivo resultante formato común y compatible	Librería de hormas integrada	Equipo y sistemas fácil de usar
		Escanear pie humano	Modificar horma en base a pie digitalizado	Puesta en marcha y calibración fácil y rápido
		Escáner fácil de usar	Visualización/renderizado del producto final	Integración de cursos y capacitaciones
		Software integrado fácil de usar	Integración de cursos y capacitaciones	Soporte técnico y garantía
		Soporte técnico y garantía	Colaboración proveedor/cliente	
		Fácil calibración	Integración con otros softwares de calzado	
	Costos	Bajo costo de adquisición	Bajo costo de licencia	Bajo costo de adquisición
		Accesibilidad de repuestos		Bajo costo de materia prima
		Bajo costo de repuestos		Accesibilidad de materia prima
				Bajo costo de repuestos
				Accesibilidad de repuestos
	Apariencia	Material equipos resistente	Interfaz intuitiva	Material de equipo resistente

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se hace una jerarquización de los atributos en cada una de sus categorías por separado, para así identificar qué objetivos son más importantes y menos importantes. Este nivel de importancia se traduce a números mediante el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), explicado anteriormente, donde se define una escala de importancia relativa para evaluar los atributos.

Tabla 12: Jerarquización de objetivos por importancia y cuantificación de esta mediante método AHP.

Rendimiento (0.639)	Escáner de hormas	1.1 Bajo tiempo de escaneo (0.151)
		1.2 Alta calidad de escaneo (0.151)
		1.3 Archivo resultante formato común y compatible (0.122)
		1.4 Escanear pie humano (0.097)
		1.5 Escáner fácil de usar (0.049)
		1.6 Software integrado fácil de usar (0.041)
		1.7 Soporte técnico y garantía (0.017)
		1.8 Fácil calibración (0.01)
	Costo (0.307)	2.1 Bajo costo de adquisición (0.153)
		2.2 Accesibilidad de repuestos (0.077)
		2.3 Bajo costo de repuestos (0.077)
Apariencia (0.054)		3.1 Material equipo resistente (0.054)
Rendimiento (0.774)	Edición digital de la horma	1.1 Proceso de edición fácil e intuitivo (0.187)
		1.2 Compatibilidad equipos del mercado (0.160)
		1.3 Librería de hormas integrada (0.141)
		1.4 Modificar horma en base a pie digitalizado (0.111)
		1.5 Visualización/renderizado del producto final (0.075)
		1.6 Integración de cursos y capacitaciones (0.072)
		1.7 Colaboración proveedor/cliente (0.026)
		1.8 Integración con otros softwares de calzado (0.011)
	Costo (0.168)	2.1 Bajo costo de licencia (0.168)
Apariencia (0.058)		3.1 Interfaz intuitiva (0.058)
Rendimiento (0.613)	Fabricación del prototipo	1.1 Bajo tiempo de prototipado (0.186)
		1.2 Alta calidad de prototipado (0.186)
		1.3 Equipo y sistemas fácil de usar (0.127)
		1.4 Puesta en marcha y calibración fácil y rápido (0.064)
		1.5 Integración de cursos y capacitaciones (0.036)
		1.6 Soporte técnico y garantía (0.015)
	Costo (0.335)	2.1 Bajo costo de adquisición (0.155)
		2.2 Bajo costo de materia prima (0.067)
		2.3 Accesibilidad de materia prima (0.067)
		2.4 Bajo costo de repuestos (0.023)
		2.5 Accesibilidad de repuestos (0.023)
Apariencia (0.051)		3.1 Material de equipo resistente (0.051)

Fuente: Elaboración propia

6.1.2 Recolección de información

Teniendo claro cuáles son las necesidades y requisitos de esta estrategia, se procede a hacer una investigación acerca del desarrollo tecnológico de calzado y las tecnologías actuales de digitalización y fabricación de hormas.

Con el resultado de la investigación realizada se determina lo siguiente:

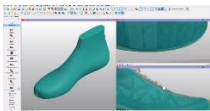
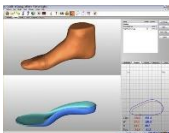
- Para el subproceso de escaneo de hormas, el método utilizado actualmente es la digitalización mediante escáneres 3D.
- Para el subproceso de edición digital de la horma, se utilizan softwares especializados o no especializados en calzado, que permitan edición de medidas, tamaños y escalas de las hormas.
- Para el subproceso de fabricación del prototipo, se utilizan métodos y tecnologías de prototipado rápido tales como estereolitografía, sinterizado láser selectivo (SLS), manufactura de objetos laminados (MOL), modelado por deposición de fundido (MDF) y fabricación CNC.

En base a las tecnologías y métodos estudiados se realiza un benchmarking de las alternativas de mercado disponibles en el rubro del calzado para cada subproceso (ver alternativas en Estado del arte).

6.1.3 Generación de concepto

Se realiza un análisis morfológico del problema, considerando los subprocesos antes mencionados: (1) escaneo de hormas, (2) edición digital de la horma y (3) fabricación del prototipo. Ya separado en problemas más pequeños, y en base al benchmarking realizado anteriormente se aplica la carta morfológica para la organización de alternativas.

Tabla 13: Carta morfológica alternativas de selección.

Escáner	Einscan SE 	Artec Eva Lite 	Einscan H 	
Software	Romans CAD RCS 3D Last 	Vorum Footwear 	Inescop IcadFOR 	Atom Shoemaster 
Prototipado	Ultimaker S5 	Formlabs Form 3L 	Roland Modela MDX-50 	

Fuente: Elaboración propia

De esta carta morfológica se obtienen múltiples soluciones al problema principal, que son todas las combinaciones posibles entre las soluciones a los subproblemas. Probar cada una de estas combinaciones es poco eficiente y una pérdida de tiempo, por lo que se hace una estimación de las soluciones que satisfagan de mejor manera la estrategia a diseñar.

6.1.4 Evaluación y selección de concepto

Una vez generadas las posibles soluciones al problema, se realiza un análisis mediante de una matriz de pesos ponderados. Esta matriz permite evaluar cada una de las soluciones a los subproblemas en base a la lista de necesidades del cliente, previamente jerarquizada y con niveles de importancia definidos. Se asignan números del 1 al 5, dependiendo si la solución (o alternativa) cumple con dicha necesidad, considerando 1 como “no cumple” y 5 como “si cumple”, y los valores intermedios que cumplen en parte, o lo cumplen, pero de forma indirecta.

Tabla 14: Matriz de pesos ponderados 1^{er} subproceso: escáner de la horma.

		Einscan SE Shining 3D	Eva Lite Artec	Einscan H Shining 3D
Rendimiento	64%			
Bajo tiempo de escaneo	15%	3	4	4
Alta calidad de escaneo	15%	4	5	4
Archivo resultante formato común y compatible	12%	5	5	5
Escanear pie humano	10%	2	4	4
Escáner fácil de usar	5%	5	4	4
Software integrado fácil de usar	4%	3	4	4
Soporte técnico y garantía	2%	4	4	4
Fácil calibración	1%	5	5	5
Costo	31%			
Bajo costo de adquisición	15%	5	1	3
Accesibilidad de repuestos	8%	3	3	3
Bajo costo de repuestos	8%	4	2	3
Apariencia	5%			
Material equipo resistente	5%	4	4	4
Total		3,87	3,59	3.83

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de esta primera comparación, el análisis muestra como primera opción para el primer subproceso el escáner Einscan SE de Shining 3D (3,87), seguido de Einscan H de la misma empresa (3,83) y Eva Lite de Artec (3,59).

El escáner Einscan SE es un equipo de gran precisión y calidad. A pesar de que los otros escáneres tengan un menor de tiempo de escaneo, en calidad de escaneo no son muy superiores, lo que no justifica el aumento de precio versus la calidad entregada. Es muy sencillo de utilizar y tienen una amplia compatibilidad de formatos. Al ser un escáner de escritorio, el proceso es prácticamente automático.

Tabla 15: Matriz de pesos ponderados 2^{do} subproceso: edición de la horma.

		Atom ShoeMaster Custom	Romans CAD RCS 3D Last	Vorum Footwear Design	Inescop IcadFOR
Rendimiento	77%				
Proceso de edición fácil e intuitivo	19%	4	5	3	5
Compatibilidad equipos del mercado	16%	4	4	1	4
Librería de hormas integrada	14%	4	5	2	5
Modificar horma en base a pie digitalizado	11%	5	4	4	5
Visualización/renderizado del producto final	8%	5	4	2	5
Integración de cursos y capacitaciones	6%	3	4	3	4
Colaboración proveedor/cliente	3%	3	3	3	4
Integración con otros softwares de calzado	1%	4	4	1	4
Costo	17%				
Bajo costo de licencia	17%				
Apariencia	6%				
Interfaz intuitiva	6%	3	3	3	3
Total		3,37	3,57	2,05	3,78

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de esta segunda comparación la opción elegida es el software IcadFOR (3,78) de Inescop, seguido de Shoemaster Custom (3,37) de Atom, en tercer lugar, RCS 3D Last (3,57) de Romans CAD y, por último, Footwear Design (2,05) de Vorum.

De la anterior tabla de comparación, se puede apreciar que no se poseen los costos de licencias de los softwares, pero se asume que los precios son aproximadamente los mismos para un software especializado en calzado y depende de los módulos del software que se contraten.

De la alternativa elegida, es un software de calzado perteneciente a Inescop, centro de innovación y tecnología en el área del calzado con 50 años de experiencia. Posee compatibilidad con amplia gama de escáneres y máquinas de prototipado del mercado, permite modificación de hormas en base a pies digitalizados, tiene una librería de hormas integrada que permite facilitar el flujo de trabajo y posee módulos adicionales para la edición de calzado en su totalidad.

Tabla 16: Matriz de pesos ponderados 3^{er} subproceso: fabricación del prototipo.

		Formlabs Form 3L	Ultimaker S5	Modela MDX-50
Rendimiento	61%			
Bajo tiempo de prototipado	19%	3	3	4
Alta calidad de prototipado	19%	5	4	4
Equipo y sistemas fácil de usar	13%	4	5	4
Puesta en marcha y calibración fácil y rápido	6%	3	5	3
Integración de cursos y capacitaciones	4%	3	4	3
Soporte técnico y garantía	1%	4	4	4
Costo	34%			
Bajo costo de adquisición	15%	1	3	2
Bajo costo de materia prima	7%	2	4	2
Accesibilidad de materia prima	7%	2	5	2
Bajo costo de repuestos	2%	3	3	2
Accesibilidad de repuestos	2%	2	2	1
Apariencia	5%			
Material de equipo resistente	5%	5	5	5
Total		3,15	3,90	3,26

Fuente: Elaboración propia

El resultado de la comparación de alternativas para este último subproceso de fabricación del prototipo es, en primer lugar, la impresora Ultimaker S5 (3,90), seguido de la CNC de escritorio Modela MDX-50 (3,26) y por último la impresora Form 3L (3,15) de Formlabs.

La alternativa elegida es una impresora FDM, es más sencilla de utilizar que los otros equipos seleccionados y tiene la posibilidad de utilizar diferentes materiales para fabricar los prototipos deseados. Es más económica que las otras alternativas, sin tener una diferencia significativa en calidad de fabricación. Es una máquina fiable, de una rápida fabricación y de fácil de utilizar.

6.2 Obtención del prototipo

Con una horma obtenida de Calzado IVO, se procede a buscar alternativas para crear un archivo CAD de la horma, es decir, un archivo digital. En este primer subproceso en la fabricación de la horma la tecnología predominante en la industria de calzado para digitalizar la horma es el escáner 3D de la geometría.

Para esto se utiliza el escáner Roland Picza LPX-250 3D. Este digitalizador funciona mediante triangulación láser en un compartimiento cerrado y posee un tamaño de escaneo de 400 [mm] de altura por 240 [mm] de diámetro, lo que cumple con las medidas mínimas necesarias de tamaño para escanear correctamente la horma.



Figura 30: Escáner Roland Picza LPX-250.
Fuente: Roland DGA Corporation

Se coloca la horma en 2 posiciones distintas; sin ningún soporte, apoyada completamente en la superficie (izquierda) y con un soporte bajo el talón que permite a la horma adoptar una posición en donde solo apoya la punta de esta (derecha). Esto se hace para definir qué posición sería la óptima para poder obtener un modelo CAD lo más representativo posible evitando errores de escaneo por la forma irregular de la horma y la incidencia del láser sobre esta.



Figura 31: Posición de la horma para escanear: sin soporte (izquierda) y con soporte (derecha).
Fuente: Elaboración propia

Al ser un modelo antiguo de escáner, la digitalización tiene un tiempo de 33 minutos, que es un tiempo bastante mayor en comparación a los equipos de digitalización actuales. Esto también limita la cantidad de tomas que se puede hacer de la muestra; en este caso, la digitalización solo se puede hacer en una sola toma, por lo que no se puede reposicionar la pieza para obtener un modelo digital más preciso. La tecnología que utiliza este escáner es de triangulación láser, esto dificulta más el procedimiento ya que no es el tipo de tecnología más preciso para este tipo de aplicaciones, y al tener un soporte de acrílico genera bastante ruido en el modelo. Independiente de lo mencionado, se obtiene resultados bastante aceptables después de un trabajo de postproceso adecuado.

Se utiliza el modelo con el soporte deacrílico debido a que tiene una mayor representatividad de la pieza. El resultado del escaneo se puede ver en la Figura 30.

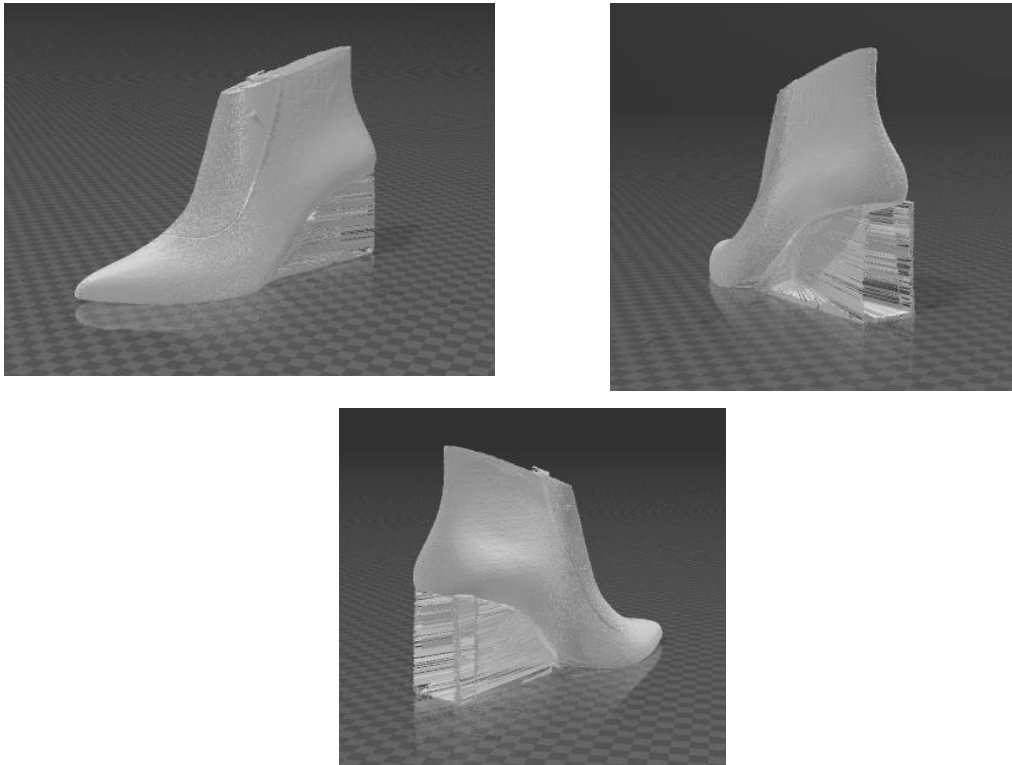


Figura 32: Archivo digital de la horma sin postprocesar.
Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que se obtiene bastante ruido en el área del soporte, debido a que es un soporte deacrílico transparente, pero se debe usar de todas maneras porque esto ayuda a obtener un mayor detalle en la zona plantar de la horma.

Posteriormente, se trabaja con el software gratuito de edición 3D Autodesk MeshMixer para limpiar, en una primera instancia, el “ruido”, las irregularidades y remover el soporte de apoyo. Este programa de la compañía Autodesk, permite crear y manipular archivos 3D de manera sencilla e intuitiva. De esta manera, se obtiene el siguiente modelo:

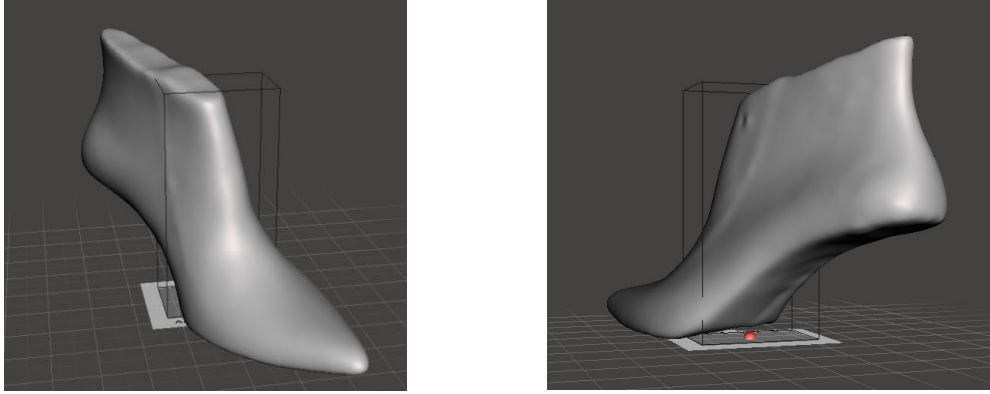


Figura 33: Archivo digital de la horma con postprocesado en Autodesk MeshMixer.
Fuente: Elaboración propia

Es necesario que el modelo CAD sea trabajado en algún software de edición 3D. En estos programas, se debe revisar que la superficie exterior del modelo (su geometría) esté completamente cerrada y no existan superficies sobrepuestas, para evitar errores y/o incompatibilidades al momento de fabricar el prototipo.

Posteriormente, se utiliza el software de modelado 3D Rhinoceros como herramienta de edición para modificar la horma y para verificar el estado del modelo 3D para su posterior fabricación.

Primero se verifica que la superficie del modelo este cerrada, esto se realiza con el comando [Check]. Esto indica si existe algún “agujero” en la superficie o si hay polígonos sobrepuestos, que indican un error en la superficie de la pieza.

Luego, para realizar las modificaciones al modelo es necesario reducir el mallado de este, ya que, al provenir directamente del escáner, el mallado que viene por defecto es muy detallado, lo que dificulta la edición. Para la modificación de la horma es necesario identificar los nodos y superficies correspondientes a las secciones de la pieza que se quiera modificar; mientras mayor sea la cantidad de nodos, es más complejo obtener la horma deseada sin tener cambios abruptos en la geometría de la pieza. Para esto se utiliza el comando [QuadRemesh], que permite definir cuantos polígonos debe tener el mallado y la adaptabilidad de estos en el modelo.

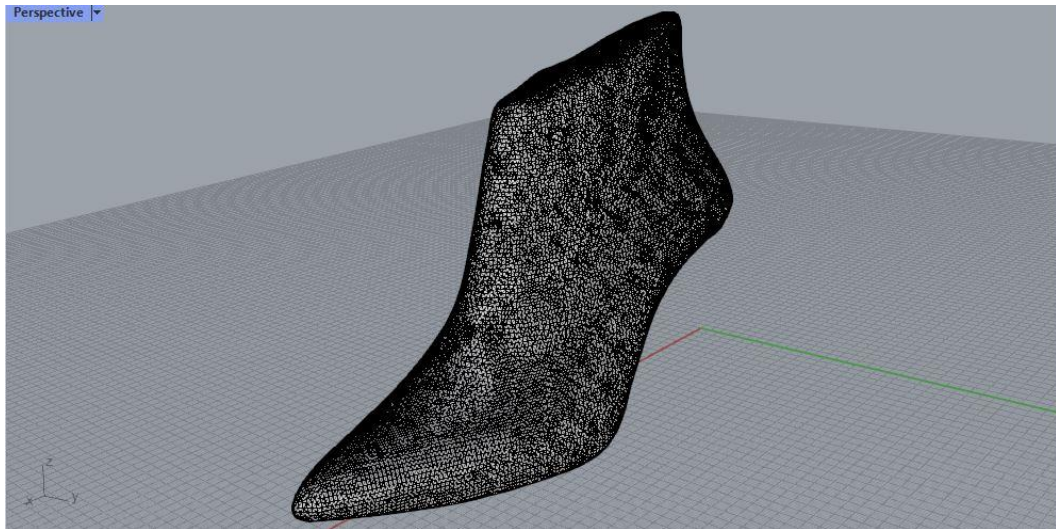


Figura 34: Mallado por defecto de la horma después de digitalizar.
Fuente: Elaboración propia

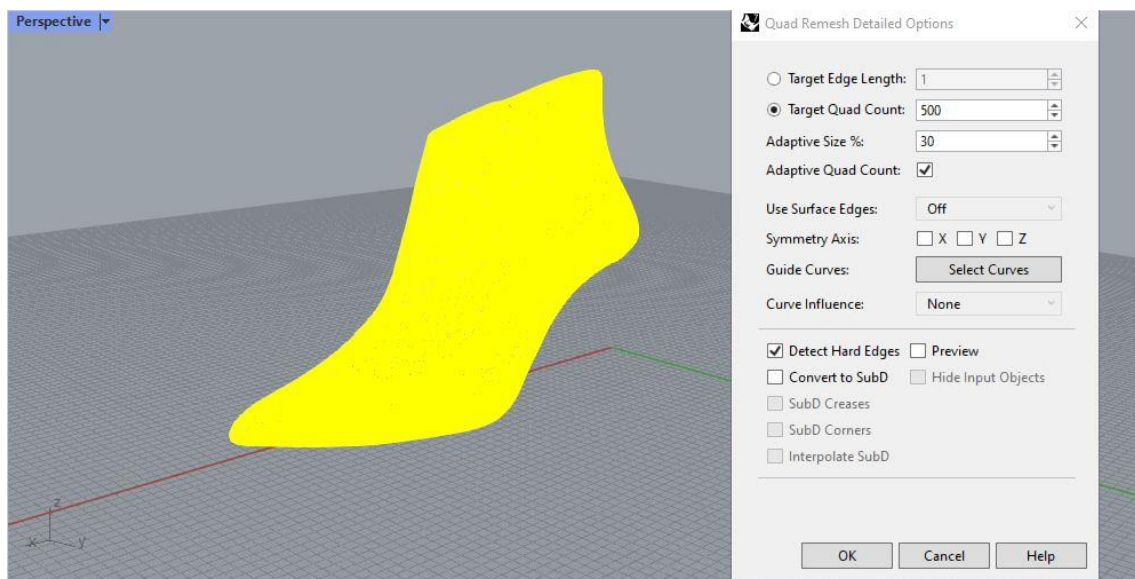


Figura 35: Definir mallado con comando Quad Remesh en software Rhinoceros.
Fuente: Elaboración propia

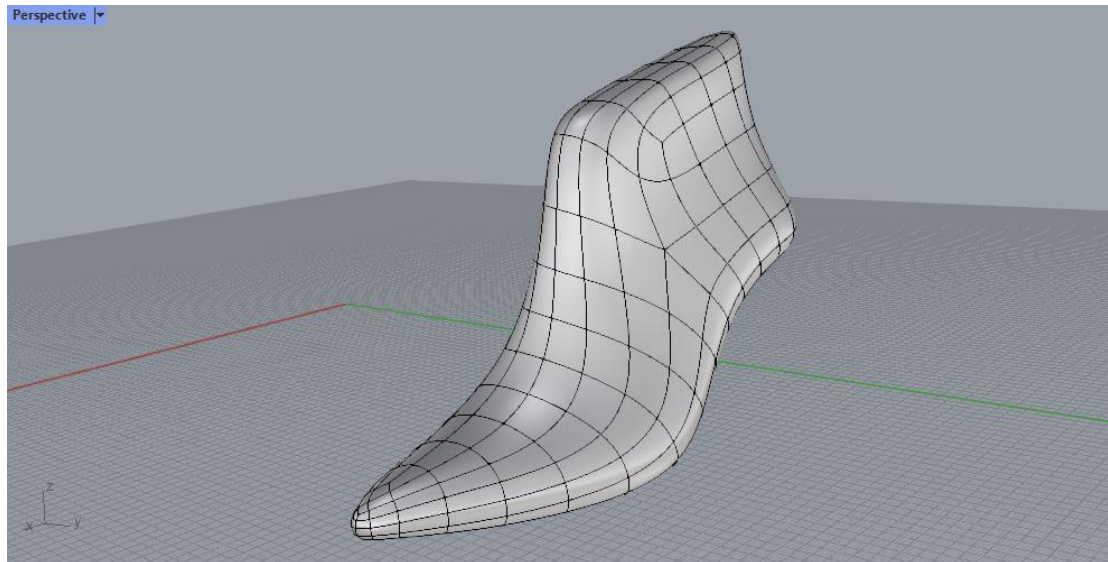


Figura 36: Resultado de la nueva malla.

Fuente: Elaboración propia

Luego, se aplica el comando [ToSubD], lo que permite aplicar el modelado por subdivisión de superficies, que es una forma de trabajar los modelos digitales en 3D para obtener geometrías que puedan ser fácilmente editables y de una gran precisión. Se puede apreciar que al intentar modificar la posición de los nodos en el modelo con mallado simple (después de aplicar [QuadRemesh]), la geometría de la pieza cambia abruptamente y no se obtienen los resultados esperados; aun así, el trabajo con este modelo es más preciso y aceptable que si se trabaja con el mallado por defecto que se tiene de la digitalización. Al aplicar el modelado por subdivisión de superficies, se puede apreciar que el cambio de forma y geometría de la pieza al modificar la posición de los nodos es suave y sigue las líneas de forma de la pieza, sin generar cambios abruptos en la geometría, como se muestra en la Figura 36.

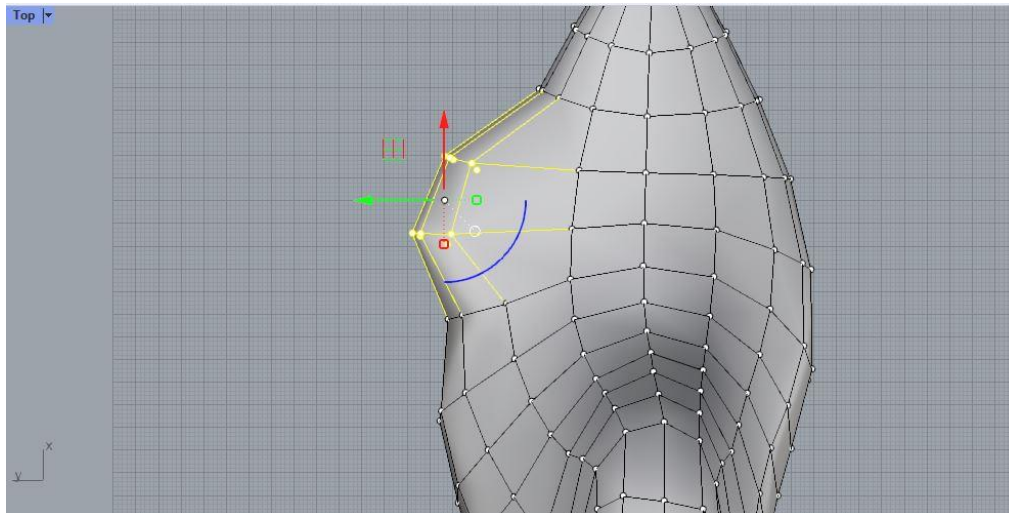


Figura 37: Edición del modelo sin aplicar modelado por subdivisión de superficies.
Fuente: Elaboración propia

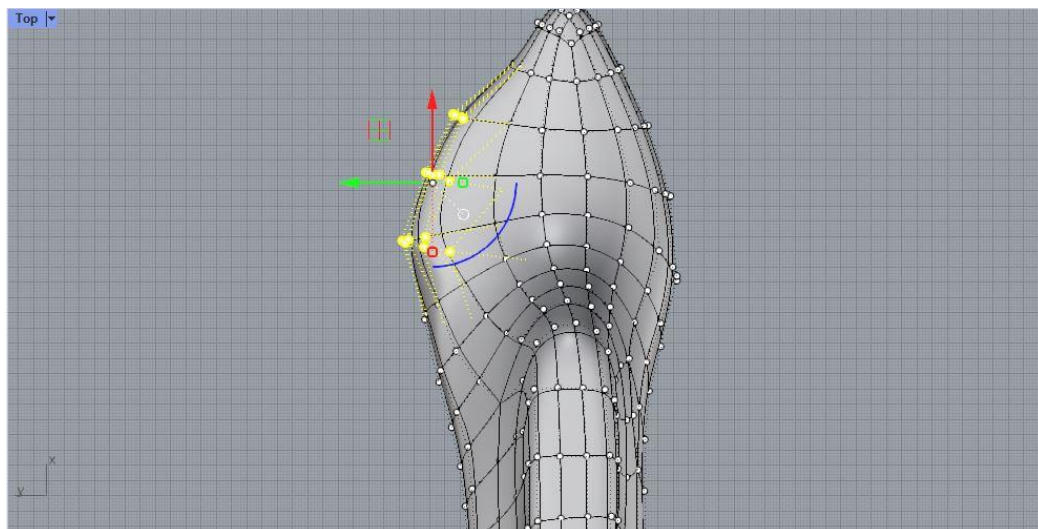


Figura 38: Edición del modelo con modelado por subdivisión de superficies.
Fuente: Elaboración propia

Esto permite modificar secciones de la pieza para ajustar el tamaño a un calzado personalizado o simplemente obtener el diseño y tamaño que se desee.

Posteriormente, para que la horma se pueda subdividir, es necesario transformar el modelo a un sólido de mallas. Este tipo de sólido es el mismo visto anteriormente, cuando se simplifica el mallado el modelo. Esto se hace porque la subdivisión del modelo para su fabricación no se puede realizar con el tipo de sólido de subdivisión de superficies, ya que las piezas resultantes son superficies abiertas y no se consideran sólidos. Para esto se aplica el comando [ToNURBS].

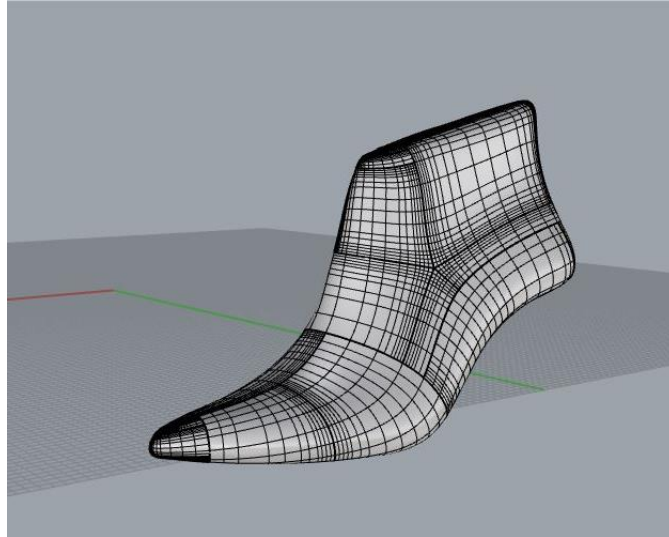


Figura 39: Horma en formato de malla tras aplicar comando To NURBS.
Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que el mallado es diferente al aplicado en un inicio, esto se debe al cambio a modelo por subdivisión de superficies, en donde el programa vuelve a realizar un mallado en base a la forma y geometría de la pieza. Si se desea seguir editando es necesario definir nuevamente un mallado simple con los pasos mencionados anteriormente.

Las hormas de calzado femenino suelen tener una forma más vertical para dar forma al taco del zapato. Esto provoca que, una vez confeccionado el calzado sobre la horma, es difícil de remover debido a su forma. Es por lo que este tipo de hormas suelen tener 2 partes, donde la segunda es un sacado en el área del empeine como se muestra en la Figura 29, para que facilite la extracción de la horma. Cuando se termina de editar el diseño, se realiza este sacado mediante un plano en la vista frontal del modelo, que separa la pieza en el área correspondiente, como se muestra en las Figuras 37 y 38.

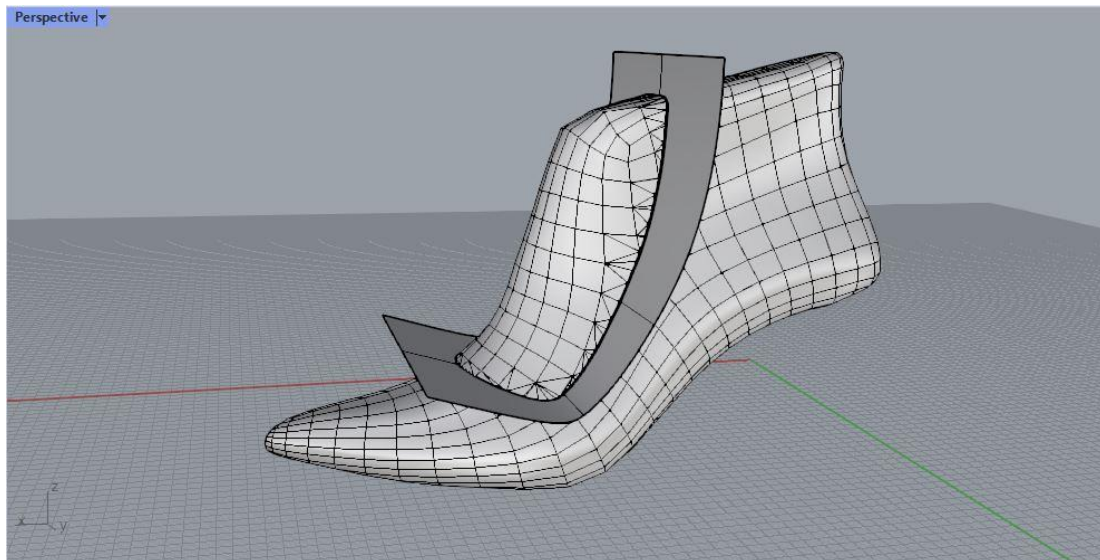


Figura 40: Plano de separación de la horma.
Fuente: Elaboración propia

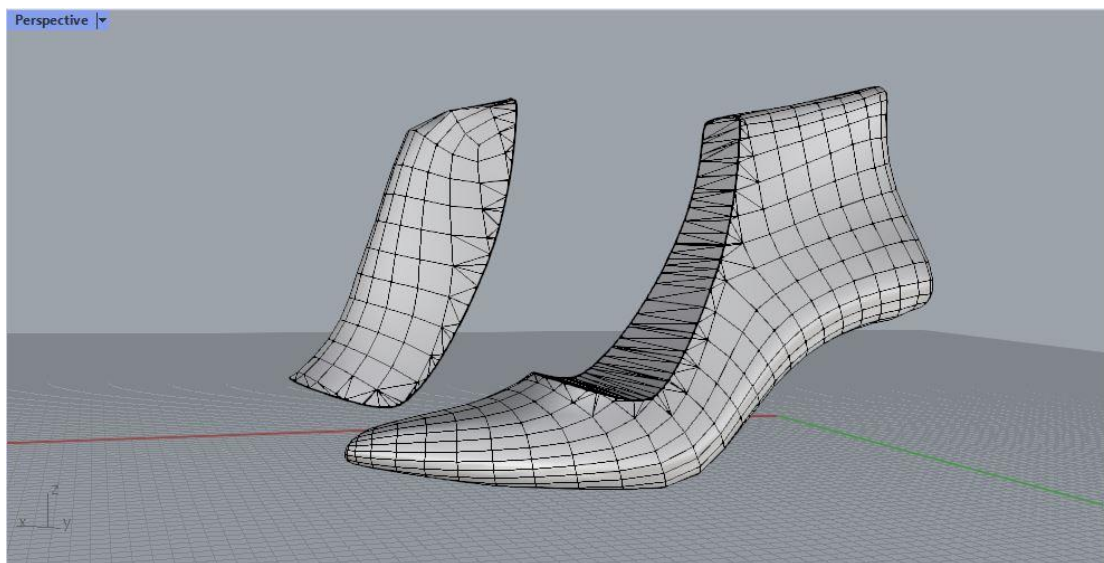


Figura 41: Separación de la horma para prototipo.
Fuente: Elaboración propia

Luego de la separación, se puede apreciar que en la horma original se tiene un vástago en la pieza base, como se ve en la figura 40. Este tope metálico cumple la función de evitar que la pieza del empeine se desplace de la posición original una vez situada en su lugar. En la fabricación actual de la horma, este vástago es añadido después de la fabricación de la pieza en resina. En el caso de la fabricación mediante métodos de prototipado rápido, se tiene un mayor control sobre el diseño de la horma, por lo que se puede aprovechar esta ventaja y se puede agregar en el diseño principal; esto evita el hecho de añadirlo después de fabricada la horma, disminuyendo la

posibilidad de error en esa parte del proceso y teniendo un mayor control de este al ser agregado como parte del diseño en el software de edición.

Para agregar este vástago en el diseño se inserta un sólido cilíndrico en la pieza base, y se realiza el sacado de la misma de la pieza del empeine, como se aprecia en la figura 41.

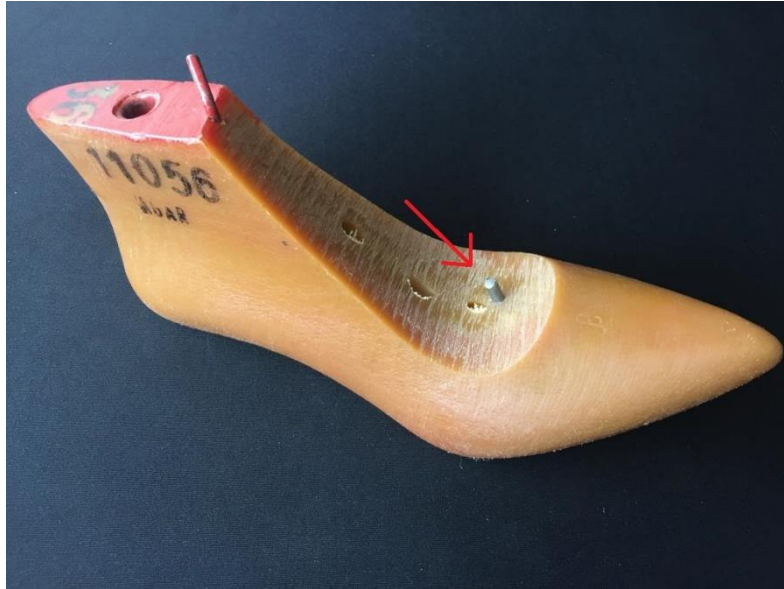


Figura 42: Vástago horma original.
Fuente: Elaboración propia

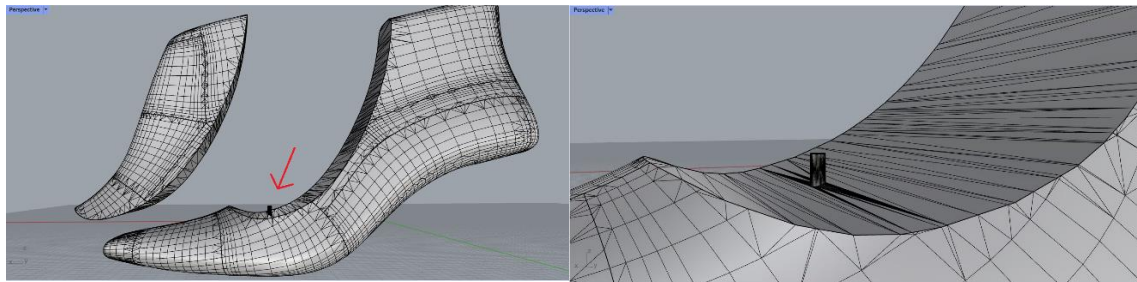


Figura 43: Diseño del vástago en Rhinoceros.
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se debe realizar un orificio en la parte superior de la horma, como se muestra en la figura 42, que ayuda al soporte de la horma en la fabricación del calzado, en donde se sostiene la horma invertida y se puede trabajar en los distintos procesos sobre ella. Para esto, se realiza un sacado en forma de paraboloides en el lugar mostrado en la figura 43.



Figura 44: Orificio horma original
Fuente: Elaboración propia

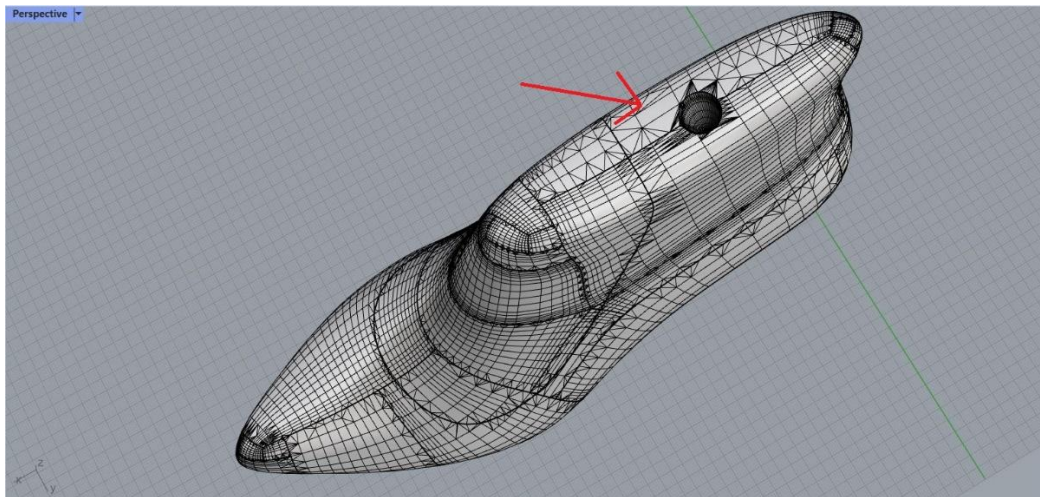


Figura 45: Diseño agujero superior de la horma en Rhinoceros.
Fuente: Elaboración propia

Con este último paso, el diseño de la horma queda finalizado y se procede a guardar en formato STL para su posterior fabricación. Se utiliza este formato debido a que es el formato común y más utilizado equipos de prototipado rápido. Cabe mencionar que las piezas base y del empeine, se deben guardar por separado para que se puedan fabricar de manera independiente.

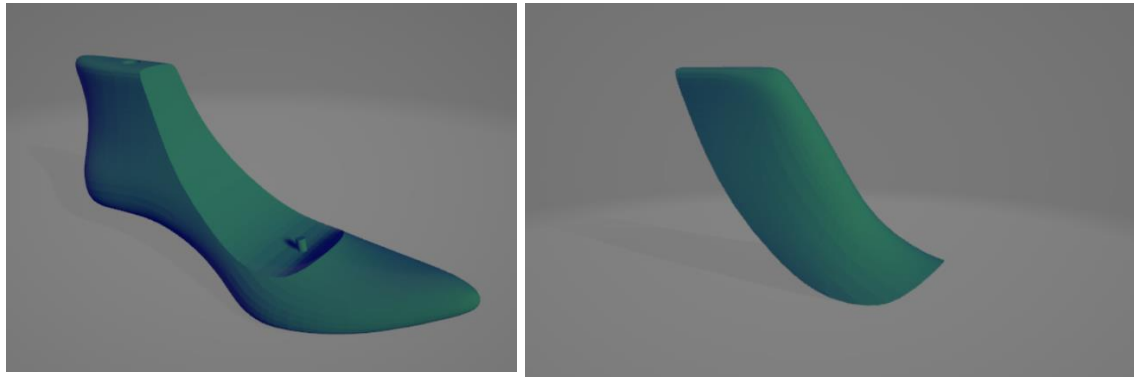


Figura 46: Archivos digitales de pieza base (izquierda) y pieza del empeine o cuño (derecha).
Fuente: Elaboración propia

La tecnología que se utiliza para la fabricación del prototipo es la impresión 3D, debido a sus ventajas en términos de accesibilidad, costos y complejidad de uso. Para esto se utiliza la impresora Ultimaker 2+, que es una impresora de escritorio de la empresa Ultimaker, que puede alcanzar una calidad máxima de 20 micras (0,02 mm) y su velocidad de impresión puede alcanzar los 300 mm/s. Tiene un volumen de impresión de 223 x 223 x 205 mm y tiene una amplia gama de materiales [17 – Ultimaker 2+].

Primero, para poder fabricar las piezas, es necesario definir los parámetros de fabricación de la pieza, disposición de la pieza en el equipo, tipo de material, entre otras configuraciones, y para esto se utiliza el software Ultimaker Cura. Es un programa gratuito de la empresa Ultimaker, y es uno de los más populares del mercado, debido a su funcionalidad y compatibilidad con las múltiples impresoras del mercado, sin ser exclusivo para equipos de Ultimaker.

Los parámetros de impresión se definen en base al uso que se le da al prototipo. En este caso se utiliza un grosor de pared de 8 milímetros, debido al impacto que debe soportar, que es el máximo permitido para esta pieza y con esta máquina. Se realiza la misma operación para el grosor superior e inferior de la pieza. Adicionalmente, se utiliza una densidad de relleno de 15%, que es bajo, pero define en gran medida el tiempo de impresión de la horma. Por esto mismo, se utiliza un patrón de relleno de forma de giroide, como se muestra en la Figura 45, que permite una mejor sujeción de clavos, tornillos y vástagos que se puedan introducir en la pieza. Se activan los soportes y se utiliza un borde adicional para una mayor adhesión de la pieza a la cama de impresión. Por último, los demás parámetros se dejan por defecto y dependen del tipo de boquilla que se utiliza para depositar el material y la máquina utilizada. La disposición de la pieza en la impresora y los parámetros definidos se pueden apreciar en la Figura 46. Se utiliza esta misma configuración para la impresión de la pieza de empeine.

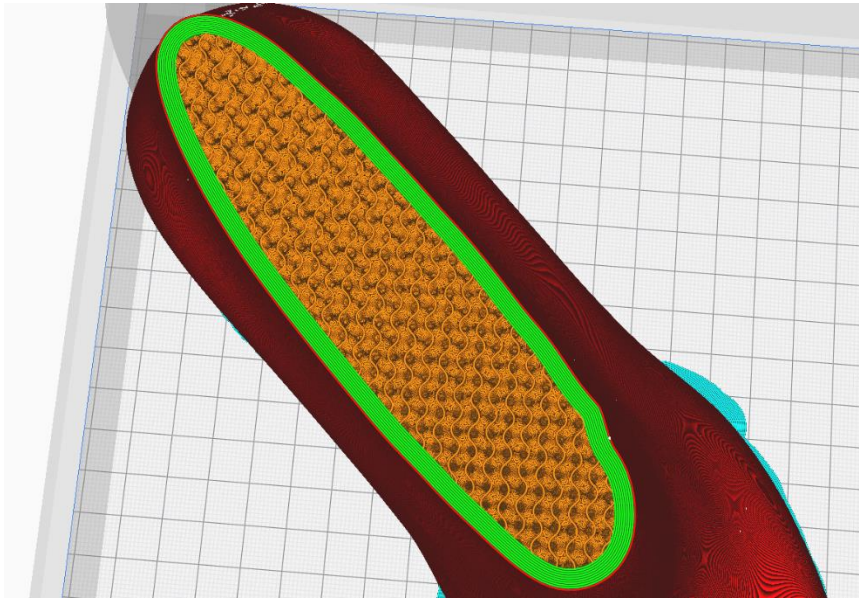


Figura 47: Vista interior de la pieza en software Ultimaker Cura (relleno y grosor de pared).
Fuente: Elaboración propia

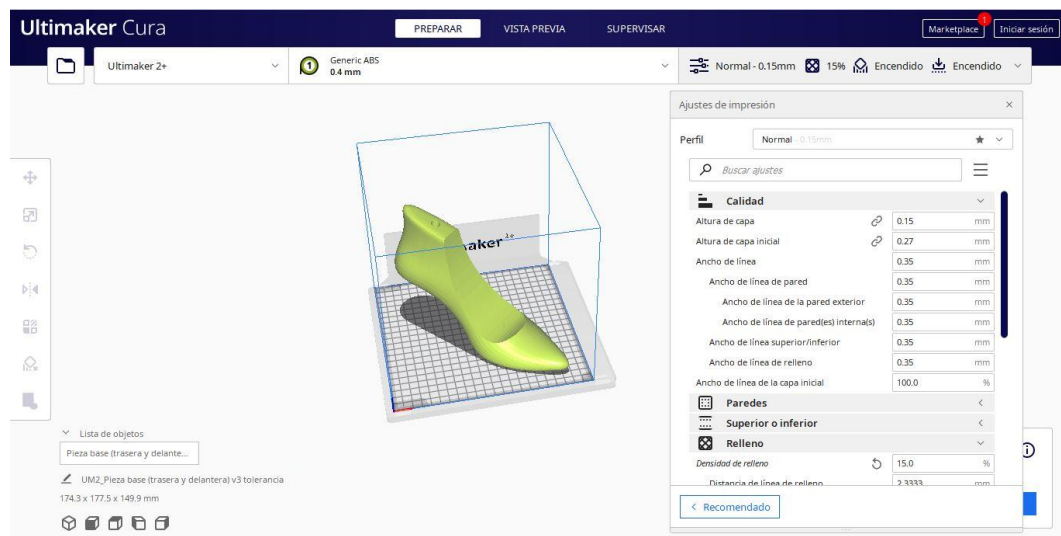


Figura 48: Disposición de pieza en la máquina y parámetros de impresión.
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se procede a la impresión de las piezas. Como se mencionó anteriormente, se imprimen las 2 piezas independientes y así evitar errores en el corte y separación de estas.



Figura 49: Impresión del prototipo de la pieza base de la horma.
Fuente: Elaboración propia

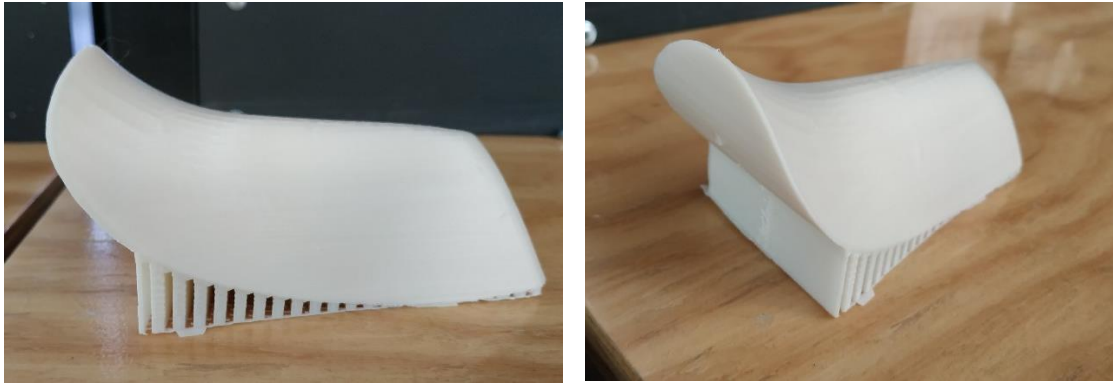


Figura 50: Impresión del cuño (pieza empeine) de la horma.
Fuente: Elaboración propia

Una vez terminada la impresión, se procede a remover los soportes de las piezas. Para esto se utiliza un alicate cortante en primera instancia, y se cortan los soportes desde la raíz, lo más cercano a la pieza posible. Luego, se utiliza una lijadora de banda, con una lija de grano 120, para remover los pedazos restantes de los soportes y obtener el acabado superficial deseado. Por último, se utiliza un dremel para lijar y remover pequeñas imperfecciones que aún queden en la pieza.

Para finalizar con el prototipado, se utilizan pernos escuadra para fijar la pieza del empeine a la pieza base, tal cual se utiliza en las hormas ya utilizadas en Calzados IVO (ver Figura

29). Para esto se taladra la parte superior de la pieza base de la horma, lo suficiente para atravesar el grosor de pared, y luego se introduce el perno que queda fijo gracias al relleno seleccionado para la pieza. Y se aprieta hasta que pueda ejercer la suficiente presión sobre la pieza de empeine, y en conjunto con el vástago antes mostrado (ver Figura 40 y 41), queden unidas ambas piezas.



Figura 51: Hormas en proceso de remoción de soporte.
Fuente: Elaboración propia



Figura 52: Prototipos de hormas terminadas.
Fuente: Elaboración propia

6.3 Evaluación del modelo y resultados

Ya con el prototipo listo se procede a evaluar el modelo en término de calidad y funcionalidad en el proceso de fabricación de calzado de la empresa. Las hormas proporcionadas son sometidas al proceso completo de fabricación.

En primera instancia, se deben realizar perfiles de la horma para posterior corte del material y construcción del calzado sobre la pieza. Para esto se utiliza el tamaño estándar de la horma proporcionada por Calzados IVO en primera instancia (ver Figura 29).

Al momento de la fijación de la suela, se da cuenta que la horma no fue copiada en forma óptima, ya que en la punta faltaron 3.3 mm. De esta forma se obtiene medio número menos que la horma original, resultando en un 35 ½ y no un 36. Esto se soluciona rellenando con plástico en la punta para completar las dimensiones correctas de la pieza. Cabe recordar que un punto francés, que se utiliza como unidad de medida en las tallas de hormas, tiene 6.66 mm entre número y número.

Por otro lado, la unión de la horma base con el cuño (pieza del empeine) no fue precisa ya que no debe existir espacio alguno entre estas dos piezas para poder trabajar la horma correctamente, por lo que se utiliza una pieza pequeña para ajustar el encaje perfecto entre ambas piezas (ver Figura 51).



Figura 53: Horma con suela y con relleno de punta faltante (vista lateral).
Fuente: Departamento de Modelaje, Calzados IVO



Figura 54: Horma con suela y con relleno de punta faltante (vista inferior).
Fuente: Departamento de Modelaje, Calzados IVO

Dentro de los procesos posteriores se adhieren a la horma los distintos perfiles cortados en cuero para darles la forma del calzado. Para esto la horma debe sujetarse en distintas posiciones: sujetado desde la punta como se muestra en la Figura 53, y sujetado desde el talón de forma invertida, como se muestra en la Figura 54. Esto para adherir los perfiles de cuero mediante presión y darle la forma final al calzado mediante un tratamiento de calor, en donde el cuero toma la forma de la horma resultando en el calzado final.

Cuando la horma se fija en la máquina para adherir la parte superior del calzado (zona del empeine), como se muestra en la Figura 56, se da cuenta que el material ABS no logra soportar

las presiones y cede, en primera instancia, el vástago (ver Figura 41), por lo que se debe introducir un vástago metálico para seguir con la fabricación.



Figura 55: Máquina de sujeción para adherir la parte superior del calzado.
Fuente: Departamento de Modelaje, Calzados IVO

Luego, al sujetar la horma en la máquina armadora de talón, como se muestra en la Figura 57, cede la parte del agujero donde se introduce el tubo metálico, que sirve para la sujeción de las hormas en las máquinas, y para posteriormente, retirar la horma del calzado.



Figura 56: Máquina armadora de talón.
Fuente: Elaboración propia



Figura 57: Quiebre zona del orificio de sujeción de la horma.
Fuente: Elaboración propia

A pesar de lo ocurrido, el proceso se sigue hasta terminar el calzado, que resulta en una bota de mujer talla 36. Por lo mencionado anteriormente, la horma no pudo ser retirada del calzado por métodos convencionales.



Figura 58: Interior calzado terminado.
Fuente: Departamento de Modelaje, Calzados IVO



Figura 59: Calzado terminado.
Fuente: Departamento de Modelaje, Calzados IVO

De lo anterior, se obtiene lo siguiente:

- El escáner que se utiliza no es el óptimo por tamaño y tecnología, siendo la tecnología de luz estructurada la deseada para este tipo de trabajos, ya que entrega una mayor precisión y calidad, lo que a su vez disminuye los errores e irregularidades en el modelo digital. El

volumen de digitalización no es lo suficientemente grande para esta pieza, donde lo ideal sería un escáner portátil o uno de un volumen mayor a 200 x 200 x 200 [mm].

- Hay que tener especial cuidado en la impresión 3D porque hay diferentes variables que influyen en este proceso. Para materiales como el ABS se necesita una impresora de cabina cerrada porque es susceptible a los cambios de temperatura, lo que puede provocar un desprendimiento de la pieza de la cama de impresión. De la misma manera, se debe fijar correctamente la temperatura de la cama de impresión para que la pieza quede unida a la cama, teniendo en cuenta que en ciertas ocasiones la pieza está tan adherida que se debe ocupar un recubrimiento sobre la cama de impresión antes de imprimir para poder retirar la pieza una vez finalizada. Por otro lado, existen errores involuntarios con respecto al filamento, donde este puede cortarse o romperse teniendo errores en la impresión, por lo que, aunque la impresión 3D sea un proceso de prototipado prácticamente automático, hay que estar atento a la impresión en el caso de que ocurra algún error.
- El material ABS resulta no tener las propiedades mecánicas adecuadas para soportar la sujeción de las hormas en las máquinas, donde se quiebra el vástago, que sirve para sostener el cuño, y en la zona del orificio de sujeción. Por lo mismo, no se puede retirar la horma con el calzado terminado. A pesar de esto, el material soporta de buena manera las temperaturas de trabajo sin deformaciones.
- En la zona del orificio de sujeción (ver Figura 55) se necesita que el agujero tenga un recubrimiento metálico, como en las horas que ya se están utilizando, porque ayuda a la resistencia del material y evitar que se quiebre en esa zona al colocarla en las máquinas de sujeción. Independiente del material utilizado para las hormas, esto debe ir obligatoriamente, ya que sin esto, incluso las hormas de resina que se utilizan actualmente en la fábrica, no funcionarían.
- La horma no se copia de forma correcta, donde la punta es más pequeña que la de la horma original. Esto se debe a problemas en la digitalización o en la edición del diseño en el programa computarizado.
- La pieza base y el cuño no encajan correctamente, debido a irregularidades entre ambas piezas, por lo que se utiliza una pieza pequeña como cuña entre ambas. Esto resulta de esta manera por la fabricación de las piezas independientes e irregularidades provenientes de los soportes de impresión, no obteniendo el acabado necesario de las piezas.

7 Conclusiones

7.1 Conclusiones generales

Las tecnologías CAD/CAM proporcionan una gran ventaja competitiva en lo que a la industria manufacturera se refiere. Dentro de sus beneficios se encuentra el tener controles totales sobre el proceso, menores tiempos de procesamiento, menor desperdicio de material, mayor flexibilidad en los prototipos, acabados de piezas más precisos, automatización del proceso, entre otros muchos. El avance en este tipo de tecnología ha permitido que todo tipo de industria y de distintos niveles de producción puedan acceder a ella, y poder aprovechar sus beneficios en sus cadenas de producción. Una de ellas es la industria del calzado, donde se utiliza este tipo de tecnología en prácticamente en todo el proceso de fabricación del calzado, desde la fabricación de la horma hasta obtener calzados completos.

En esta investigación se busca desarrollar con y en la industria de calzado una estrategia de fabricación de hormas usando tecnologías CAD/CAM, donde se trabaja de la mano con una empresa nacional chilena de nombre Calzados IVO, que pretende integrar este tipo de tecnologías en su producción.

En primera instancia, se estudia el proceso de desarrollo de hormas manual de Calzados IVO, que, al trabajar de manera tradicional, con un hormero externo a la empresa, se da cuenta de varios problemas existentes en esta etapa. Estos problemas tienen que ver en gran medida con el costo y el tiempo que conlleva realizar el proceso de desarrollo de hormas mediante este método, ya que se cae en muchos errores en la fabricación, no se tiene control del proceso, genera un retraso en las otras etapas de fabricación del calzado y se tiene varias pérdidas en materiales y costos asociados a errores y a tiempos muertos en la producción.

Posteriormente, se hace un estudio y evaluación de las técnicas actuales de digitalización y manufactura de hormas, donde se puede apreciar que el diseño y la producción de hormas hoy en día se puede separar en 3 grandes subprocesos: diseño CAD en 3 dimensiones, que hace referencia a la obtención de la horma en formato digital; edición del diseño, que tiene relación con la edición del modelo en programas computarizados; y fabricación del prototipo, que hace referencia a fabricar la horma para su uso en producción. Para cada uno de estos subprocesos existe una tecnología y/o técnica predominante en la fabricación del calzado. Para la obtención

del diseño CAD, el método predominante es la digitalización de la horma mediante un escáner digital, que puede utilizar tecnologías como triangulación láser o luz estructurada. En la edición del diseño, se utilizan programas especializados y no especializados en edición de calzado y hormas. Y en la fabricación del prototipo se utilizan los métodos de prototipado rápido, en donde se pueden ver métodos de fabricación tales como la impresión 3D y fabricación por CNC (control numérico computacional).

Ya con esta información se procede al desarrollo de una estrategia aplicando la metodología de análisis de diseño en ingeniería, que consta de 4 etapas: definición del problema, recolección de información y data, generación de concepto o solución y evaluación y selección de concepto. En base a esto, se obtiene una propuesta de estrategia final, que consiste en el escáner Einscan SE de Shining 3D para la digitalización, el software IcadFOR de Inescop como programa de edición de la horma en computadora, y la impresora Ultimaker S5 como alternativa para la fabricación del prototipo.

En base a los resultados obtenidos, se procede generar un modelo de horma digital en base a una proporcionada por Calzados IVO. Para esto se utiliza el escáner Roland Picza LPX-250 3D, un escáner de sobremesa que utiliza la tecnología de triangulación láser. Cabe mencionar que la tecnología de luz estructurada es más precisa que la de triangulación láser, por lo que en las recomendaciones es predominante este tipo de tecnología. Se utilizan soportes de acrílicos en la horma debido a que el diámetro de escaneo de la máquina es menor al largo de la horma, de esta forma la pieza puede ser escaneada sin problemas. Por otro lado, estos soportes de acrílico provocan irregularidades en el modelo digital de la horma, que posteriormente deben ser trabajados mediante el software Autodesk MeshMixer, programa gratuito especializado en trabajo de piezas para impresión 3D, obteniendo así un modelo digital de superficie cerrada y sin irregularidades.

Luego, se procede a trabajar la horma en el software Rhinoceros, programa genérico de edición 3D, que sirve para todo tipo de industrias y para distintos niveles de edición. Dentro de las recomendaciones sólo se propuso programas especializados en calzado, porque estos ofrecen funciones y características específicas para la fabricación de la horma y el calzado en general, pero cabe mencionar que aunque los programas como Rhinoceros carezcan de esas funcionalidades específicas, poseen mucha más flexibilidad, funciones para todo el proceso de fabricación del calzado, renderizado para muestra de ventas y a un precio mucho menor que los programas especializados, por lo que es recomendable considerarlo como una alternativa viable, si se está dispuesto a dedicarle más tiempo y aprender cómo utilizar este tipo de programas. En este programa se edita la horma para su posterior fabricación. Esta edición consiste en aplicar en

la horma digital el modelado por subdivisión de superficies, que es un tipo de objeto propio de Rhinoceros, que permite la edición a través de puntos de control y de una manera mucho más fluida. Con esta forma de edición se puede realizar cualquier modificación que se desee a la pieza, con un poco de conocimiento del programa. Lo ideal sería la parametrización de la horma, para que su edición sea prácticamente automática y mucho más simple, pero esta contiene múltiples variables, en donde una diferencia milimétrica significa una pieza completamente distinta, además que se debe tener un conocimiento elevado el programa de edición en el que se está trabajando. Por esto mismo, la parametrización queda fuera de los alcances de esta investigación, debido a la complejidad de la pieza y lo extenso de la tarea. Después de aplicar el modelado por subdivisión de superficies, se decide separar la horma en 2 partes: la pieza base y el cuño. La horma original tiene esta separación que permite separar ambas piezas en la última etapa de la fabricación del calzado para poder retirar la horma del calzado. Esta separación se realiza, originalmente, después de que la horma está fabricada, pero en este caso se decide hacer esta separación en la etapa de diseño y tratarlas como piezas independientes. Adicionalmente, se realiza el diseño del vástago que sostiene el cuño sobre la pieza base y sea agrega un orificio en la parte superior de la horma que permite su sujeción en las máquinas de fabricación de calzado. Una vez terminada esta etapa de diseño, se procede a preparar las piezas para prototipar, y se almacenan en formato STL.

En la siguiente etapa, se fabrica un prototipo de la horma ya editada, para implementarlo en el proceso productivo. Para esto se utiliza la impresora 3D Ultimaker 2+ y como material de impresión se utiliza ABS. En la impresión con ABS se deben tener diferentes consideraciones: este material es muy susceptible a cambios de temperatura, lo que puede provocar un desprendimiento de la pieza de la cama de impresión, por lo que se debe usar una impresora de cabina cerrada, y hay que utilizar un recubrimiento en la cama de impresión para que el material no se quede pegado/adherido a esta, lo que puede imposibilitar el desprendimiento de la pieza de la cama de impresión. Durante la impresión se presentaron errores debido a no tener en cuenta las consideraciones mencionadas, resultando en múltiples intentos para obtener la pieza correcta. Hay que definir los parámetros de impresión en base al uso que se le da a la pieza, donde en este caso se utiliza el máximo grosor de pared para esta configuración (8 mm) y un relleno de baja densidad, pero de tipo giroide, que permite una mayor sujeción de clavos y tornillos en el prototipo. Una vez impresas las piezas se deben remover los soportes de impresión, donde se utiliza un alicate de corte, una lijadora de banda y un dremel para esta tarea. En esta parte se da cuenta que los soportes de impresión afectan en gran medida la calidad superficial de la pieza, por lo que se debe configurar y definir de manera que afecten lo menos posible. Esto también dificulta la unión de la pieza base y el cuño, ya que, al haber pequeñas irregularidades, las piezas no encajan perfectamente, por lo que se recomienda fabricar la horma completa y luego realizar la separación

del cuño. Por último, se utiliza un perno escuadra para que, en conjunto con el vástago, mantener unidas la pieza base y el cuño en los procesos de fabricación del calzado.

Como última etapa, se procede a evaluar el modelo en términos de calidad y fabricabilidad. Para esto se utiliza directamente en el proceso productivo de fabricación de calzado de la empresa. En este proceso se evidencian varios aspectos a mejorar:

- La horma no fue copiada correctamente ya que tenía la punta 3.3 mm más pequeña, debido a problemas en la digitalización del modelo o modificación del diseño de esta, y como solución se utiliza un relleno de plástico que se adhiere sin problemas.
- El material resulta ser muy frágil para el proceso, por lo que se desprende en primera instancia el vástago agregado en la etapa de diseño, que sirve para sostener el cuño, y posteriormente, la zona del agujero de sujeción de la horma. En esta última, un agujero de metal en esa zona es lo óptimo para aguantar las presiones necesarias, como se utilizan en las demás hormas. Al ser solo del material de impresión, este cede al ser colocado en las máquinas, y, por ende, tampoco permite el retiro de la horma una vez finalizado el calzado. Por otro lado, aguanta correctamente las temperaturas del proceso.
- La pieza base y el cuño no encajan correctamente, debido a irregularidades entre ambas piezas, por lo que se utiliza una pieza pequeña como cuña entre ambas. Esto resulta de esta manera por la fabricación de las piezas independientes e irregularidades provenientes de los soportes de impresión, no obteniendo el acabado necesario de las piezas.

A pesar de los aspectos antes mencionados, se logra fabricar una bota de mujer tamaño 36, con el problema que la horma no pudo ser retirada del calzado mediante métodos convencionales, debido a la rotura en la zona de sujeción.

7.2 Reflexión final

Este trabajo le permite al autor familiarizarse y adentrarse en las tecnologías CAD-CAM y su aplicación en las distintas áreas de la ingeniería, y entender como estas pueden significar una ventaja competitiva en distintos tipos de industria y procesos productivos. Se evidencia, dentro de este estudio, la complejidad que existe en una industria como la manufactura de calzado, y la importancia de especialistas en el rubro, donde se tiene que tener consideración en cada variable del proceso productivo, que por muy pequeña que sea, puede significar un gran cambio en el

producto final. Se amplían los conocimientos relacionado a la digitalización, edición e fabricación de figuras complejas, considerando tipos de tecnologías de escáneres 3D según proceso productivo, edición de modelos 3D mediante software de modelado tridimensional y fabricación de prototipos mediante impresión 3D y sus parámetros involucrados. Se resuelve un problema utilizando el análisis de diseño en ingeniería, que involucra identificar atributos del producto/servicio, estudios de mercado y utilización de herramientas de resolución de problemas. Todo lo mencionado anteriormente contribuye al conocimiento del autor, lo que le provee de diversas herramientas de análisis y resolución de problemas, que le ayudará en su desempeño personal y profesional.

8 Bibliografía

- [1] Fedeccal F.G., “Muñoz y Mühlenbrock Ltda.” <https://www.fedeccal.cl/munoz-y-muhlenbrock-ltda/>.
- [2] Calzados Ivo - Muñoz y Muhlenbrock Ltda, “Creaciones IVO.” <https://calzados-ivo.business.site/#testimonials>.
- [3] Fedeccal F.G., “Hormas Hormital S.A.” <https://www.fedeccal.cl/hormas-hormital-s-a/>.
- [4] S. Lascano F., “Engineering Design Methodology: A Global Perspective.” p. 50, 2015.
- [5] G. E. Dieter and L. C. Schmidt, *Engineering Design*, vol. 4. 2009.
- [6] A. Rosas and Ciatec, *Desarrollo Tecnológico de Calzado*. 2008.
- [7] F. Cheng and D. Perng, “A systematic approach for developing a foot size information system,” *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 25, pp. 171–185, 1999.
- [8] N. Rout, A. Khandual, Y. F. Zhang, and A. Luximon, “3D Foot Scan to Custom Shoe Last,” *Int. J. Comput. Commun. Technol.*, pp. 14–18, 2010, doi: 10.47893/ijcct.2010.1030.
- [9] Shining 3D, “EinScan-SE 3D Scanner.” <https://www.einscan.com/desktop-3d-scanners/einscan-se/>.
- [10] Artec 3D, “Eva Lite.” <https://www.artec3d.com/es/portable-3d-scanners/artec-eva-lite-v2>.
- [11] Shining 3D, “EinScan H.” <https://www.einscan.com/handheld-3d-scanner/einscan-h/>.
- [12] Atom Shoemaster, “Custom Tailor Made Production.” <https://atom-shoemaster.com/en/p/custom-production/custom-tailor-made-production/>.
- [13] Strategies, “Romans CAD Software.” <https://www.romans-cad.com//3d-last-1?lang=es>.
- [14] Vorum, “Footwear Design Software.” <https://vorum.com/es/software-de-ultimo-diseno-de-shoe/>.
- [15] Inescop, “IcadFOR.” <https://www.inescop.es/es/software-para-calzado/diseno-hormas-3d>.
- [16] Ultimaker, “Ultimaker S5.” <https://ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-s5>.
- [17] Formlabs, “Form 3L.” <https://formlabs.com/latam/3d-printers/form-3l/>.
- [18] Roland DGA Corporation, “Fresadora Modela MDX-50.” <https://www.rolanddga.com/es-la/productos/3d/mdx-50-benchttop-cnc-mill>.