

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Manufactura de bases de cera de abeja con moldes
impresos en 3D**

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por
Josué Daniel Higueros Barrientos
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Manufactura de bases de cera de abeja con moldes
impresos en 3D**

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por
Josué Daniel Higueros Barrientos
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,
2021

Vo.Bo.:

(f) 吉本治一郎
Dr. Jiichiro Yoshimoto

Tribunal Examinador:

(f) 吉本治一郎
Dr. Jiichiro Yoshimoto

(f) 
Ing. Rony Herrarte

(f) Rodrigo Aragón
Ing. Rodrigo Aragón

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de diciembre de 2021.

Como parte del desarrollo integral del futuro profesional de la Universidad del Valle de Guatemala, se desarrollan trabajos de Graduación. Al momento de elegir tema se visualiza infinidad de opciones, pues Guatemala es un país en vías de desarrollo con múltiples necesidades y con muchísimos espacios en que nuestros conocimientos y formación profesional pueden contribuir.

Uno de esos espacios es la Apicultura, que es una práctica amigable con el ambiente y tiene un gran potencial de desarrollo en Guatemala ya que nuestro país posee una riqueza florística que favorece la actividad apícola. Pero mucho más allá de ello, la apicultura produce beneficios directos al país de diversas maneras.

Guatemala es considerada en el mundo como un productor marginal de miel, con un promedio de 2.600 toneladas métricas anuales de las cuales aproximadamente el 63 % es exportado a Alemania. De esta manera se generan divisas e ingresos para los apicultores. En el país hay alrededor de 5.000 apiarios y más de 3000 apicultores inscritos en el Registro Guatemalteco de Apicultores (Regapi) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).

Por otro lado es importante tomar en cuenta que la economía de Guatemala depende de la agricultura casi en un 50 % y por lo menos 20 de los 22 departamentos del país son agrícolas. Es vital el aporte de la apicultura a la agricultura nacional mediante la polinización. Se afirma que la agricultura depende de la actividad de las abejas en un 75 a 85 %. Además la actividad de las abejas contribuye a conservar el paisaje, recuperar los bosques, aprovechar la flora apibotánica y a contrarrestar la erosión del suelo.

Por las razones anteriores, se decidió elegir este trabajo en el que se busca ofrecer una contribución directa para beneficio de los apicultores del país.

De manera particular quiero agradecer al Doctor José Luis Guillén quién enriqueció mi conocimiento sobre la apicultura, me facilitó los materiales y recursos necesarios para el desarrollo del proyecto y me permitió el acceso a la Finca El Manantial para realizar las pruebas de campo en sus propias colmenas de abejas .

Agradezco al Doctor Jiichiro Yoshimoto por su paciente asesoría durante el proceso de realización del proyecto, y el apoyo para obtener los contactos claves durante cada etapa.

Agradezco al Ingeniero Victor Hugo Ayerdi por toda su enseñanza a lo largo de mi carrera y por motivarme a superar los obstaculos que se presentaron.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros Derek Matheu, Dennis Reyes y Pablo Agustín, por su constante apoyo durante el transcurso de mi carrera.

Prefacio	III
Lista de figuras	VI
Lista de cuadros	VII
Resumen y abstract	VIII
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. Justificación	3
4. Marco teórico	5
4.1. Conceptos de apicultura	5
4.1.1. Colmena de abejas	5
4.1.2. Integrantes de una colmena	6
4.1.3. Apis mellifera	6
4.1.4. Marcos de madera	6
4.1.5. Cera natural de abeja	6
4.1.6. Bases de cera	7
4.1.7. Construcción de panales	7
4.1.8. Contenido de los alvéolos	8
4.1.9. Recursos y alimentación de abejas	8
4.2. Manufactura en la apicultura	8
4.2.1. Fundición de la cera	8
4.2.2. Máquinas para fabricación de bases de cera	9
4.2.3. Dimensiones de alvéolos	9
4.2.4. Materiales alternativos a la cera natural	10
4.3. Alternativas para manufactura	10
4.3.1. Impresión 3D FDM	10
4.3.2. Ácido poliláctico	10
4.3.3. Impresión 3D con cera	11
4.3.4. Silicona de Platino	11

5. Antecedentes	12
6. Hipótesis	14
7. Metodología	15
7.1. Diseño	15
7.2. Manufactura	18
7.2.1. Molde con impresión 3D y termoformado	18
7.2.2. Molde de silicón	19
7.2.3. Fundición de cera	20
7.2.4. Configuración de marco de madera	23
7.3. Pruebas de aceptación	24
8. Evaluación de resultados	27
9. Discusión de resultados	32
10. Conclusiones	35
11. Recomendaciones	36
12. Bibliografía	37
13. Anexos	39
13.1. Figuras adicionales de la etapa de diseño	39
13.2. Figuras adicionales de la etapa de manufactura	41
13.3. Figuras adicionales de la etapa de pruebas de aceptación	43

Lista de figuras

7.1. Dimensiones de alvéolo: Primera iteración	15
7.2. Dimensiones de alvéolo: Segunda iteración	16
7.3. Primer modelo de base de cera	16
7.4. Modelo final de molde secundario	16
7.5. Primer modelo de molde principal	17
7.6. Modelo final de base de cera	17
7.7. Modelo final de molde principal (Vista de sección)	18
7.8. Unión molde principal (marrón), molde secundario (azul) y base de cera (amarillo) .	18
7.9. Ruptura en molde principal y secundario	18
7.10. Prueba de manufactura por termoformado	19
7.11. Molde principal impreso en 3D	19
7.12. Silicón en proceso de curado	20
7.13. Cera procesada en prueba de moldeo	21
7.14. Cera en proceso de solidificación	21
7.15. Base de cera extraída del molde	22
7.16. Marco con bases de cera colocadas	23
7.17. Reverso de marco con bases colocadas	23
7.18. Extracción de marcos normales para colocación de marcos experimentales	24
7.19. Marco experimental siendo colocado en la colmena	25
13.1. Dimensiones finales en diseño de base de cera	39
13.2. Vista de sección de alvéolo en base de cera	39
13.3. Vista de representación de unión entre molde principal (marrón), molde secundario (azul) y base de cera (amarillo)	40
13.4. Ángulo de inclinación en paredes de molde principal	40
13.5. Silicona de platino siendo vertida hacia molde principal	41
13.6. Cera procesada en solidificación	41
13.7. Cera de abeja en proceso de solidificación	42
13.8. Marqueta de cera de abeja utilizada para las pruebas	42
13.9. Comparación entre base de cera vacío y marco de control	43
13.10 Marco extraído de una colmena el 11 de Julio	43
13.11 Acercamiento que muestra aplicación de cera en uniones base-base y base-marco . .	44

Lista de cuadros

8.1. Espesores de pared en bases de cera	28
8.2. Valoración de indicadores	29
8.3. Indicadores 30 de mayo	29
8.4. Indicadores 13 de junio	29
8.5. Indicadores 27 de junio	30
8.6. Indicadores 11 de julio	30
8.7. Indicadores 25 de julio	30
8.8. Indicadores 8 de agosto	30
8.9. Indicadores 22 de agosto	31
8.10. Indicadores 5 de septiembre	31
8.11. Indicadores 19 de septiembre	31
8.12. Indicadores 3 de octubre	31

Resumen

El siguiente proyecto investigó la posibilidad de crear bases de cera de abeja con tecnología de impresión 3D y determinar si dichas bases pueden ser aceptadas por abejas de la especie *Apis mellifera* en la construcción de sus colmenas.

Las bases comerciales de cera se utilizan normalmente como guía y punto de partida para que las abejas construyan un panal, pero no incluyen paredes. Se diseñaron bases constituidas por alvéolos con paredes terminadas, que permiten reducir el tiempo y energía consumidos para la construcción de un panal. Las dimensiones de las bases de cera comercial se utilizaron para diseñar un modelo de base de cera del que se derivó un molde principal fabricado con impresión 3D de PLA. Este molde se utilizó para crear un molde secundario de silicona de platino.

El molde de silicona permitió la fabricación de las bases utilizando cera fundida. El diseño de los moldes se realizó de tal manera que permitió formar alvéolos con paredes completas y extraerlos sin causar deformaciones o daños a su estructura. Las bases fabricadas fueron montadas en marcos de madera, que se colocaron en colmenas de abejas para evaluar su aceptación. La presencia de miel, polen y crías fue indicador de la actividad de las abejas sobre las bases de prueba.

Después de cinco meses de prueba, no se encontró presencia de ninguno de los indicadores de aceptación dentro de los alvéolos. Sin embargo, se encontró actividad normal en los marcos colocados como control en las mismas colmenas. Las bases de cera no fueron aceptadas por las colmenas de abejas. La causa más probable del rechazo es la presencia de residuos de silicona en las bases de cera. No se pudo identificar un error en el diseño, por lo que otros medios de manufactura pueden brindar resultados distintos.

Abstract

The following project investigated the possibility of creating beeswax foundations with 3D printing technology and determining if said foundations can be accepted by bees belonging to the *Apis mellifera* species in their comb construction.

Commercial beeswax foundations are normally used as a starting point and guide for comb formation, however, these do not include cell walls. Foundations with complete cell heights were designed to reduce energy and time consumption during comb construction. A beeswax foundation

model was designed using the dimensions of commercial foundations. A main mold made with PLA 3D printing was created based on the foundation model. This main mold was used to create a secondary mold from platinum silicone.

The silicone mold allowed the creation of foundations using molten beeswax. The design allowed the formation of full height cells and their extraction without causing deformation or damage to the structure. The resulting foundations were placed in wooden frames that were introduced in beehives to evaluate their acceptance. Honey, pollen and brood presence was the indicator of bee activity on the test foundations.

After five months of testing, there was no presence of any indicator of acceptance inside the foundation cells. However, normal activity was found in the control frames placed on the same hives. The test beeswax foundations were not accepted by the hives. The presumable cause for the rejection is the presence of silicone residues in the beeswax. No design error could be detected, meaning that other manufacture methods may yield different results.

CAPÍTULO 1

Introducción

Desde mediados del siglo 19 se han utilizado bases de cera artificiales para facilitar la construcción de panales en apicultura. La reducción en el tiempo de construcción de panales resulta en un incremento en la producción de miel y subproductos de una colmena. Los diseños comerciales de bases de cera no brindan panales completos. Las abejas deben invertir tiempo y recursos en construir las paredes de los espacios hexagonales, conocidos como alvéolos.

El método de manufactura en el que se basan las bases comerciales de cera utiliza rodillos que sólo permiten fabricar formas planas (Dunham, 1881, pág. 1-3). [6] Se han diseñado bases de otros materiales para intentar proporcionar panales que no necesiten extensión. Sin embargo, no se encontró documentación que compruebe la aceptación de estas bases (Kunimune, 2016, pág. 1-9). [10] Se han realizado pruebas de aceptación para otros tipos de modificaciones en las bases de cera comercial, como la adición de parafina a su composición (Semkiw, 2013, pág. 75-83). [17]

El presente proyecto se enfoca en el diseño y manufactura de bases de cera para ser colocadas en colmenas de abejas y evaluar su aceptación. Las bases de cera incorporan alvéolos completos a su diseño. Para fabricar las bases de cera se fabrican moldes utilizando silicona de platino e impresión 3D FDM con material PLA. Las pruebas evalúan la aceptación de las abejas con indicadores de presencia de polen, miel y larvas dentro de los alvéolos de las bases de cera.

2.1. Objetivo general

Determinar la aceptación de parte de una colmena de abejas hacia una base de cera natural fabricada con un molde basado en impresión 3D.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un molde que permita obtener bases de cera que representen las características geométricas de un panal de abeja terminado.
- Fabricar el molde utilizando impresión 3D por extrusión de material y silicona de platino, ajustando el diseño a la precisión del método de manufactura.
- Moldear las bases de cera y realizar las iteraciones necesarias para ajustar cualquier característica que represente un posible impacto en su aceptación.
- Llevar a cabo pruebas con colmenas de abejas y evaluar los indicadores de aceptación de las colmenas hacia las bases propuestas.

El ciclo de vida de una colmena de abejas incluye la construcción constante de panales. En la apicultura moderna, la frecuencia de este proceso es incrementada. Las razones más comunes para la construcción de panales incluyen el aumento de tamaño de las colmenas y el reemplazo de panales que son retirados por el apicultor. Los panales son removidos con regularidad para extraer cera, miel y otros subproductos. Para facilitar el proceso de construcción de panales, el apicultor coloca hojas de cera estampada que sirven de guía y soporte para el panal. Las abejas siguen el patrón resaltado en la cera estampada para construir el resto de las celdas, conocidas como alvéolos. Las abejas son sensibles a cualquier impureza que pueda existir en la cera, por lo que las bases generalmente se fabrican utilizando cera extraída directamente de otras colmenas.

El apicultor debe tener un proveedor que le suministre toda la cera estampada necesaria para cada temporada. Esto implica una inversión adicional que resulta en una reducción de la utilidad obtenida. Adicionalmente, los proveedores son limitados en el área rural de los países centroamericanos. La compra por internet y la importación de los materiales añade costos de transporte e impuestos que hacen aún más difícil que la implementación de cera estampada sea rentable para el apicultor promedio. La alternativa más común a la compra directa, es adquirir el equipo para fabricar las hojas de cera. Sin embargo, estos equipos son escasos y representan una inversión mayor.

Tanto al comprar directamente, como al producir con equipos propios, se obtienen bases planas, que únicamente resaltan las paredes del alvéolo como una guía. Las abejas, por lo tanto, deben invertir una significativa cantidad de tiempo en extender los alvéolos hasta completar el panal. Durante este período, la abeja reina no puede depositar huevos, lo que retrasa el crecimiento de la población. Dado que las obreras trabajan construyendo el panal, la polinización se detiene y la colmena consume recursos. Durante este período tampoco se almacena miel o polen en la colmena porque no existe un espacio donde colocarlo.

El método de manufactura normal requiere pasar la cera a través de dos rodillos que imprimen el patrón sobre el material. Los rodillos impiden que se pueda dar profundidad a los alvéolos porque el movimiento rotacional rompería las paredes al salir de la cavidad.

La fabricación de bases de cera utilizando moldes diseñados en 3D permite cambiar las restricciones de altura en las paredes de la cera estampada. Utilizando tecnología de impresión 3D se puede obtener moldes con alvéolos con paredes de tamaño completo. El uso de un molde permite extraer la cera en dirección paralela a cada alvéolo, lo que evita que se rompan las paredes. Los moldes impresos en 3D también permiten fabricar moldes de otros materiales, como el silicón, que puede

ser reutilizado varias veces sin deteriorarse.

Al utilizar una base de cera con alvéolos terminados, se eliminaría el tiempo muerto en el ciclo de vida de la colmena. Esto implica una reducción en el consumo de alimento y energía durante cada cambio de panal, además de una polinización constante que beneficia a las abejas y a la vegetación. La reina aumentaría constantemente el tamaño de la población al tener más espacio donde colocar huevos, lo que resultaría en formación de más colmenas incluso en temporadas de escasez. El beneficio para el apicultor se vería reflejado en un menor tiempo entre cada recolección de producto. Adicionalmente, una población más grande implicaría una mayor cantidad de producto disponible en cada recolección.

Este método de producción de bases también genera un beneficio desde el punto de vista de disponibilidad de bases, ya que solamente es necesario adquirir el molde y no es necesario tener una impresora propia. De esta manera, el apicultor puede completar el proceso de moldeado de bases de cera por su cuenta. Un modelo 3D de un molde puede ser adquirido desde cualquier ubicación con acceso a internet y no se necesita un proveedor especializado en apicultura para fabricarlo. El costo de imprimir un molde es significativamente menor al de comprar un equipo de rodillos. Luego de obtener el molde, el apicultor puede utilizar su propia cera sin depender de terceros y únicamente tendrá que invertir en nuevos moldes después de repetidos usos, hasta que el molde se deteriore y tenga que ser reemplazado.

4.1. Conceptos de apicultura

4.1.1. Colmena de abejas

Las colmenas de abejas son estructuras artificiales diseñadas para alojar una colonia de abejas. Estas estructuras son diferentes a los panales o nidos de abejas, que son términos que se utilizan para las estructuras que las abejas crean por su cuenta. La mayor parte de estas colmenas se fabrican con madera como material principal en su estructura (Lorenzon, 2004, pág. 574). [12] El poliestireno es otro de los materiales usados en algunas colmenas, pero se ha demostrado que la madera presenta un mejor desempeño (Al Ghamdi, 2005, pág. 2). [1]

El principal objetivo de una colmena de abejas es proporcionar una fuente constante de miel y los otros subproductos de la apicultura. Estos incluyen polen, cera, propóleo, apitoxina y jalea real (Voiku, 2019, pág. 337). [21] Las colmenas modernas permiten alcanzar una mayor producción de miel y cera de abeja en comparación con las colmenas tradicionales, como troncos o jarrones de arcilla (Al Ghamdi, 2005, pág. 1). [21]

Existen varios tipos de colmenas modernas, divididas en dos tipos. El primer tipo comprende colmenas horizontales, que consisten en cajas de madera, alargadas en uno de sus ejes horizontales. Dentro de cada caja se colocan reglas de madera en las que las abejas sostendrán sus panales. Algunas de estas cajas pueden contener tapas horizontales que pueden estar sostenidas con bisagras o ser removidas por completo para permitir el acceso al interior de la colmena. Las colmenas horizontales se diseñan en diferentes tamaños (Magnum, 2013, pág. 2-4). [14] Un mayor tamaño permite alojar poblaciones más grandes de abejas en colonias desarrolladas.

El segundo tipo de diseño comprende colmenas verticales. Las colmenas verticales consisten en una serie de cajas que pueden ser apiladas una encima de otra. Las cajas cumplen diferentes propósitos en la colmena según su ubicación. Por el hecho de estar separada en diferentes cajas, el usuario puede añadir, remover o intercambiar cajas a la colmena según considere apropiado. Cada caja contiene marcos de madera removibles, que a su vez contienen los panales que las abejas construyen. Conforme la colonia crece en número, se pueden añadir gradualmente más cajas con nuevos marcos de madera.

Una de las colmenas de tipo vertical más utilizadas es la colmena Langstroth, que está compuesta

por 10 marcos en cada caja (Lorenzon, 2004, pág. 574). [12] Algunos diseños de colmena Langstroth permiten la implementación de más de 10 marcos. Las dimensiones de las cajas tradicionales para estas colmenas son de 16" de ancho por 19 7/8" de largo y alturas de 9 5/8", 6 5/8." 5 7/8" (Perfectbee, 2019). [16] Las dimensiones de las cajas pueden variar considerablemente en cada colmena debido a que muchas son fabricadas manualmente por los apicultores.

4.1.2. Integrantes de una colmena

Una colmena de abejas contiene diferentes tipos de abejas de la misma especie. Los tipos de abeja se conforman por obreras, zánganos y la abeja reina (Langstroth, 2004, pág. 29 a 69). [11] Las abejas reinas son abejas con diferente forma a todas las demás. Estas son las responsables de poner los huevos fertilizados dentro de los panales. Los zánganos son abejas macho, que están encargadas de la fertilización de los huevos en conjunto con la reina. Las abejas obreras son abejas más pequeñas que los zánganos y la reina. Estas están encargadas de la producción de miel, el almacenamiento de recursos y el cuidado de las crías.

4.1.3. *Apis mellifera*

Apis mellifera es una especie de abeja también conocida como abeja europea o abeja melífera, perteneciente a la familia Apidae. La especie se origina en las regiones de África y Eurasia, pero se ha extendido al resto de continentes a excepción de la Antártida debido a la intervención humana (Meixner, 2013, pág. 3). [15] Esta especie de abejas es productora de miel y cera y cuenta con aguijón.

El cruce entre la subespecie *Apis mellifera scutellata* y diversas especies locales, resultó en la formación de la subespecie conocida como abeja africanizada. Esta variante de abeja se ha adoptado para la apicultura y ha sido seleccionada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala para la producción de miel (Guzmán, 2016, pág. 3). [7]

4.1.4. Marcos de madera

Los marcos utilizados dentro de una colmena vertical son secciones rectangulares comúnmente fabricadas con madera y alambre de metal. Varios de estos marcos se cuelgan verticalmente dentro de las cajas de la colmena (Kunimune, 2016, pág. 7). [10] Su diseño contiene alambres paralelos tensados a lo largo de la longitud del marco.

Las abejas obreras usan los marcos para almacenar polen y miel (Babcock, 1868, pág. 566). [2] Después de que el marco ha sido llenado de miel, el apicultor puede removerlo sin problemas. Esto causa disturbios mínimos al resto de la colmena, porque los marcos no están fijados a la estructura principal. Los marcos facilitan grandemente la extracción de miel y el monitoreo de la producción de larvas y polen. Cada temporada de apicultura se recomienda reemplazar entre el 50 y 100 por ciento de las bases de cera de los marcos (Semkiw, 2013, pág. 75). [17]

4.1.5. Cera natural de abeja

La cera de abeja es una de las diversas ceras obtenidas de origen animal. La cera es una sustancia con estructura cristalina a bajas temperaturas (Khaemdaeng, 2016, pág. 282-283). [9] Su color puede variar entre tonos amarillos, blancos y cafés. Esta es extraída del polen de flores y de secreciones de algunos árboles (Babcock, 1868, pág. 565). [2] Las abejas también deben consumir miel para su producción. El costo estimado por kg de cera es de 6.25 kg de miel (Al Ghamdi, 2005, pág. 1). [1]

La cera es utilizada en aplicaciones industriales en diferentes áreas. El uso principal de la cera dentro de la misma apicultura es para formar las bases de cera estampada que se colocan en los marcos de madera (Chunneja, 2018, pág. 12). [3] Este uso es el que hace indispensable la recolección de cera para continuar con el proceso de apicultura, creando nuevas bases para extender las colmenas o reemplazando partes dañadas de los panales existentes.

La presencia de sustancias contaminantes puede impactar en el uso o rechazo de la cera dentro de una colmena. Las abejas rechazan las bases de cera frecuentemente, lo cuál se atribuye a alteraciones en sus parámetros fisicoquímicos (Semkiw, 2013, pág. 75-76). [17] No existen estándares vigentes para las propiedades de la cera y su contenido de hidrocarburos. Esto ha resultado en incrementos en la cantidad de cera comercial alterada con otras ceras como parafina o estearina. La calidad de las bases de cera no es satisfactoria en el ámbito comercial (Wallner, 1881, pág. 168). [23] En algunos casos, puede agregarse parafina en cantidades de hasta 30 % en la mezcla de la cera sin causar un rechazo o afectar al desarrollo de las crías (Semkiw, 2013, pág. 75). [17]

4.1.6. Bases de cera

Las bases de cera, también conocidas como cera estampada, son capas delgadas de cera creadas para facilitar la construcción de panales en los marcos de madera de una colmena. Su origen se remonta a mediados del siglo 19 (Al Ghamdi, 2005, pág. 1). [1] Las bases contienen un patrón hexagonal resaltado en su superficie (Semkiw, 2013, pág. 75). [17] Este patrón coincide con los patrones encontrados en los panales naturales, y le permite a las abejas construir panales rectos y de fácil manipulación (Al Ghamdi, 2005, pág. 1). [1]

Las bases son creadas de cera natural reprocesada, luego de ser extraída de otras colmenas. Para fijar estas bases a los marcos de madera, se conduce una corriente eléctrica a través de los alambres en su estructura. El calor derrite levemente la cera, permitiendo al cable entrar y fijarse dentro de ella. Cada vez que se implementa un nuevo marco o se recolecta la cera se necesita una nueva base de cera.

Un grupo de abejas recientemente introducido a una colmena tiene menor probabilidad de lograr adaptarse a una caja si sus marcos no contienen bases de cera (Al Ghamdi, 2005, pág. 1-4). [1] Además, la implementación de bases de cera ahorra alrededor de la mitad de la cera y energía necesaria para construir un panal completo.

Otros beneficios para el apicultor incluyen el poder ajustar los tamaños y distribución de alvéolos a su beneficio. Una base de cera permite la construcción de alvéolos uniformes, que facilitan la extracción de cera (Chunneja, 2018, pág. 11). [3]

4.1.7. Construcción de panales

La construcción de panales es una de las funciones básicas de una colmena de abejas (Semkiw, 2013, pág. 75). [17] Las bases de cera colocadas en un marco de madera no contienen panales terminados a pesar de que se ha reducido el tiempo y la energía requeridos. Las abejas deben extender el patrón hexagonal en las bases construyendo paredes. Estas paredes dan forma a los espacios hexagonales en donde las abejas almacenan miel y huevos (Babcock, 1868, pág. 566). [2] El nombre correcto para los espacios de almacenamiento en un panal es alvéolo.

La construcción de las paredes de los alvéolos tarda un aproximado de 3 a 4 meses (Kunimune, 2016, pág. 7). [10] Este tiempo puede variar dependiendo de la cantidad de abejas en una colonia y la facilidad para encontrar recursos en el ambiente alrededor de la ubicación de la colmena. En las colmenas artificiales, las paredes son guiadas por el patrón dibujado en las bases prefabricadas de cera, por lo que todos los túneles son del mismo tamaño. En la naturaleza, las abejas construyen

con tamaños variados.

Durante el tiempo en el que se están construyendo los alvéolos, las abejas no realizan actividades normales. La abeja reina necesita tener alvéolos con suficiente profundidad para poder depositar sus huevos (Kunimune, 2016, pág. 7). [10] Por esta razón si no existen alvéolos, no hay crecimiento de nuevas abejas. Tampoco existe un espacio en donde las abejas obreras puedan almacenar miel y polen.

4.1.8. Contenido de los alvéolos

Las colmenas de abejas generalmente son cultivadas para la producción de miel. A pesar de ello, los túneles también deben ser llenados del polen que utilizan las abejas y de larvas para mantener o aumentar el número de abejas en el futuro (Babcock, 1868, pág. 565). [2] No se puede controlar directamente dónde las abejas deciden colocar cada componente, a excepción de las larvas. Las larvas únicamente serán colocadas en alvéolos a los que la reina tenga acceso para poner huevos.

La producción de los tres componentes generalmente crece proporcionalmente, y puede medirse simplemente viendo la cantidad de túneles que están siendo utilizados. Al apicultor le interesa encontrar túneles llenos de los tres componentes, porque indica salud en la colonia. La mayoría de los alvéolos de un marco son llenados con el paso del tiempo a menos que se origine algún problema ligado a la salud de las abejas o directamente causado por el marco o la calidad de la cera que se le ha colocado.

4.1.9. Recursos y alimentación de abejas

Los recursos naturales disponibles para las abejas pueden alterar su comportamiento y productividad. La alimentación de una colmena con mezcla de agua y azúcar causa que las abejas puedan producir cera por un tiempo más largo (Al Ghamdi, 2005, pág. 1). [1] La cera de abeja también depende de la disponibilidad de flores y algunas especies de árboles en el territorio de las abejas (Babcock, 1868, pág. 565). [2]

El polen es fundamental para el desarrollo de glándulas de secreción de cera en las abejas. Un suministro insuficiente de polen puede causar daños permanentes en la población de abejas y causar un paro en la construcción de panales. De similar manera, las abejas sin acceso a fuentes de proteínas también producen menos cera (Al Ghamdi, 2005, pág. 2). [1]

4.2. Manufactura en la apicultura

4.2.1. Fundición de la cera

La fundición de cera es un proceso utilizado comúnmente en la apicultura para su separación de la miel y otros componentes de un panal. El proceso de fundición de la cera la contamina menos que la extracción química (Khaemdaeng, 2016, pág. 282). [9]

La cera de abeja debe ser fundida para fabricar las bases de cera, tanto para un molde como para métodos convencionales. El punto de fusión de la cera se encuentra entre 30 y 62 °C dependiendo de su composición (Khaemdaeng, 2016, pág. 283). [9] Este rango es amplio y empieza a temperaturas bajas. A pesar de ello, se suele elevar la temperatura a los límites superiores del rango para garantizar una fundición homogénea. Otra fuente ubica el punto de fusión en 149 °F que es igual a 65 °C (Babcock,

1868, pág. 565). [2] La cera usualmente se funde usando calor proveniente de agua, vapor, luz solar o electricidad (Khaemdaeng, 2016, pág. 282). [9]

La baja temperatura de fusión de la cera permite un rango mayor de materiales que pueden entrar en contacto con la cera líquida. Esto quiere decir que no se necesitan materiales altamente resistentes al calor para hacer moldes para cera. Esto también facilita la selección de materiales para impresión 3D. Los materiales más comunes de impresión tienen puntos de fusión más allá de los 100 °C, por lo que no se corre riesgo de deformación del molde si se eligen estos. La cera no debe ser calentada demasiado, ya que una decoloración comienza a ocurrir alrededor de los 85 °C. Un contacto directo de la cera con la fuente de calor también puede causar un oscurecimiento en su coloración (Khaemdaeng, 2016, pág. 282). [9]

4.2.2. Máquinas para fabricación de bases de cera

Las bases de cera son fabricadas con máquinas de rodillos. Los diseños actuales de rodillos son modificaciones al diseño original de Frances Dunham (Dunham, 1881, pág. 2). [6] La operación de la máquina requiere que la cera en forma de plancha se ingrese a dos rodillos que la presan e imprimen el patrón del panal. Los rodillos para la fabricación de bases de cera se pueden operar manualmente o con una fuente de energía eléctrica (Chunneja, 2018, pág. 12). [3] La manufactura por rodillos permite formar cera estampada sin altura, pero los métodos de prensado imposibilitan la creación de bases con paredes extendidas. El movimiento rotacional de un rodillo no permite que la cera pueda avanzar después de ser prensada sin romper sus paredes recién formadas.

4.2.3. Dimensiones de alvéolos

Los alvéolos de un panal cuentan con rangos definidos en sus dimensiones. A pesar de que las abejas varían en tamaño según su especie, los tamaños de los patrones hexagonales en bases de cera han sido estandarizados para adaptarse a las especies comunes en apicultura como *Apis mellifera*. El ancho de un alvéolo se conoce como la distancia más corta entre dos caras opuestas en el hexágono de un alvéolo a la altura de la apertura. El espesor de pared es regularmente uniforme en las distintas paredes de cada alvéolo. La altura de un alvéolo se mide desde su fondo interior hasta la apertura al final de sus paredes.

Existen rangos recomendables en las dimensiones de una base de cera estampada (Kunimune, 2016, pág. 7). [10] Los rangos correspondientes son los siguientes. El ancho de un alvéolo es preferible entre 4.5mm y 6mm. Los alvéolos con anchos menores a 4.5 mm no permiten el trabajo de las abejas obreras porque su cabeza no puede ingresar al espacio. Anchos mayores a 6.0 mm pueden reducir el porcentaje de abejas obreras producidas, debido a que los zánganos ocupan un mayor espacio para desarrollarse (Sparavigna, 2016, pág. 2). [19] Las alturas de pared preferibles se encuentran entre 2 y 15 mm y de preferencia de 7 a 15 mm. La implementación de paredes menores a 2 mm causa que las abejas deben extender las paredes y retrasar el inicio de la producción de miel. Si las paredes de un panal son mayores a 15 mm, éstas evitan que la reina pueda alcanzar el fondo de la celda para colocar sus huevos. Los espesores de pared para bases artificiales pueden comprender valores de 0.1 a 1.0 mm pero se prefiere de 0.15 a 0.4 mm para acercarse más al espesor presente en los panales naturales. Mientras mayor es el espesor de pared en un panal, menor es la cantidad de alvéolos por unidad de área. Bush (2005)[13] proporciona otros ejemplos de medidas utilizadas, indicando que un alvéolo en una base de cera normal tiene un ancho de 5.4 milímetros y los alvéolos naturales se encuentran en anchos de 4.6 a 5.0 mm.

4.2.4. Materiales alternativos a la cera natural

Existen otros métodos que han sido creados para formar bases artificiales sin utilizar cera natural. Estos se basan en el uso de polímeros y derivados del petróleo. El diseño de Noriaki Kunimune, presenta el caso del uso de resina de ácido poliláctico en un molde de inyección (Kunimune, 2016, pág. 7). [10] Esta resina biodegradable permite alcanzar resultados similares a los que se desea desarrollar con un molde para cera natural. El diseño de Kunimune no ha sido validado con pruebas en colmenas de abejas. No se encontraron registros cuantitativos que describen el comportamiento de las abejas sobre bases de otros polímeros. Se conoce que una base de un material diferente a la cera debe ser cubierta con una capa de cera para poder ser implementada en una colmena (Voiku, 2019, pág. 337). [21]

4.3. Alternativas para manufactura

4.3.1. Impresión 3D FDM

La impresión 3D FDM (*fused deposition modelling*), es un método de manufactura aditiva que funciona mediante la extrusión de material fundido a través de una tobera. El material se aplica en forma de filamentos sobre una mesa horizontal. Este tipo de manufactura utiliza materiales como el ABS, PLA, PC y PPSF (Dudek, 2013, pág. 1). [5] Este tipo de impresión permite la fabricación rápida de partes relativamente complicadas utilizando modelos computarizados.

El material se alimenta a la impresora en forma de filamento, el cual es alimentado a través de una sección caliente que eleva su temperatura por encima de su punto de fusión. El material fundido no puede ser colocado en el aire con éste método, lo que limita las geometrías posibles. Sin embargo, existen varios materiales de soporte solubles en agua que pueden ser impresos en conjunto con el material principal para mitigar esta desventaja. El material sin fundir es utilizado como un pistón para forzar al material líquido a salir a través de la tobera (Dudek, 2013, pág. 1). [5]

Los parámetros de la impresión pueden ser modificados dependiendo del diámetro de la tobera, la velocidad de alimentación del filamento y la temperatura del extrusor y la mesa, entre otros. El material recién depositado se funde parcialmente con el material en la mesa para garantizar una pieza sólida. La solidificación ocurre en fracciones de segundo después de la extrusión, por lo que no se necesita un tiempo de enfriamiento. En la mayoría de impresoras 3D por FDM, la boquilla de impresión se mueve en los ejes X y Y, mientras que la mesa controla la altura en el eje Z.

La impresora *Ultimaker 3* es una impresora 3D que utiliza el método FDM. La impresora cuenta con tres toberas de diámetros de 0.25, 0.4 y 0.8 mm (Manual Ultimaker3, 2017, pág 25). [20] Los materiales disponibles para utilizar en esta impresora incluyen PLA, ABS, Nylon, CPE, CPE+, PC, TPU95A, PP, PVA y material de soporte.

4.3.2. Ácido poliláctico

El ácido poliláctico, abreviado como PLA, es un poliéster biodegradable (Kaseem, 2015, pág. 435). [8] El PLA es un material completamente biodegradable y fabricable con derivados del maíz o remolachas (Drumright, 2000, pág. 1). [4] Este material es utilizado comúnmente para la impresión 3D FDM. El PLA es un polímero amorfo o semicristalino con una temperatura de fusión aproximada de 180 °C (Kaseem, 2015, pág. 440). [8]

La biodegradabilidad del PLA lo convierte en una opción posible para la implementación de productos en contacto directo con humanos y animales. El polímero incluso puede ser enterrado

para degradarse cuando ha cumplido su función. En la apicultura, el PLA ha sido utilizado en los diseños de algunas bases de cera para fabricación por soplado de moldes (Kunimune, 2016, pág. 7). [10]

4.3.3. Impresión 3D con cera

Algunos medios de manufactura de impresión 3D permiten la impresión con ceras de varios tipos. El sistema de impresión utiliza materiales en estado líquido que se solidifican al ser depositados por la boquilla. Este método permite dar forma a modelos de cera sin necesidad de utilizar moldes o prensas, lo que reduce las restricciones en un diseño.

Para poder realizar este tipo de impresión en una impresora 3D por extrusión de material, se necesita instalar accesorios especializados y realizar calibraciones a todos sus parámetros. Cada material líquido tiene un punto de fusión, viscosidad y peso diferente, por lo que rara vez las dimensiones y parámetros de los accesorios de un material son adaptables a otro. El costo de los accesorios depende de la marca del fabricante, pero su costo es significativo en comparación del bajo costo de la cera.

4.3.4. Silicona de Platino

La silicona es un polímero inorgánico constituido por subunidades de siloxano (Wacker, 2011, pág. 8). [22] Este polímero es inodoro, incoloro e inerte. Sus propiedades incluyen resistencia al desgarro, baja contracción y resistencia a temperaturas de hasta 232 °C (SmoothOn, 2021). [18]

La silicona de platino es un tipo de silicona que pertenece al grupo de siliconas que se polimerizan por condensación. Este material es utilizado para aplicaciones en contacto con alimentos. Su curado es rápido y puede ser controlado con la temperatura. Una vez curado, el desmolde del material es sencillo y su superficie es seca (Wacker, 2011, pág. 13). [22]

Mold Star™ 30 es una marca de silicona de platino que se almacena en forma de dos componentes separados que se mezclan en proporciones de 1A:1B para iniciar el curado. Según la hoja técnica del fabricante, Smooth On (2021) [18], estas siliconas presentan viscosidades relativamente bajas y no necesitan desgasificación al vacío. La dureza del material es clasificada Shore 30A. Su tiempo de empleo útil es de 45 minutos y su tiempo de endurecimiento o curado completo es de 6 horas.

Algunos contaminantes en el material en el que se vierte la silicona pueden causar inhibición del endurecimiento, lo que puede producir una superficie o impedir el endurecimiento. Estos materiales incluyen el latex, arcillas a base de azufre, algunas superficies de madera y el caucho recién vaciado de poliéster, epoxi o uretano.

La fabricación de bases de cera en su mayoría se enfoca en la producción de bases de cera estampada sin profundidad de alvéolo. Los diseños para los rodillos de estampado se derivan de la patente 246,099 de Estados Unidos, perteneciente a Frances A. Dunham (Dunham, 1881, pág. 1-3). [6] La patente aprobada en agosto de 1881 y titulada “*Machine for manufacturing honeycomb foundations*” abarca la máquina y su funcionamiento completo. En la patente se describe la composición de la máquina, indicando que la construcción de los rodillos generalmente se hace por fundición metálica. Los rodillos de la máquina se colocan sobre rodamientos que pueden moverse verticalmente para ajustar el espesor de la hoja de cera. La cera se ingresa en un lado de la máquina y los rodillos se mueven con una manivela para estampar el material.

En este diseño, los patrones para cada alvéolo aún no tienen una forma hexagonal como la utilizada en la actualidad. Cada alvéolo es creado con un patrón de base cilíndrica y punta triangular. Este tipo de base solamente da un soporte a los alvéolos reales, pero no puede producir ninguna altura de pared. Dentro de la patente se describe que se puede colocar una base de cera de mayor espesor para brindar la cera suficiente a las abejas y que ellas la puedan reubicar para formar las paredes. Esto se descarta por el hecho de que implica un trabajo adicional para las abejas y se prefiere dejar que ellas generen la cera que sea necesaria.

Otros diseños de rodillos son adaptaciones y modificaciones a este sistema. La mayoría de las cuales solamente cambian el tamaño de la máquina o la forma de accionamiento, pero la base de cera es la misma. Los patrones impresos en la cera cambian dependiendo de cada rodillo. Algunos conservan el patrón triangular mientras que otros adoptaron el patrón hexagonal. Los diseños más avanzados de algunos productores comerciales permiten verter la cera fundida directamente a rodillos enfriados con agua, lo que facilita la producción (Chunneja, 2018, pág. 11-12). [3]

Un diseño para construcción de bases con alvéolos completos se encuentra en la patente 9,408,373 de Estados Unidos, aprobada en agosto de 2016 (Semkiw, 2013, pág. 75-83). [10] La patente titulada “*Artificial Honeycomb*”, perteneciente a Noriaki Kunimune, muestra el diseño de la base con una altura de pared de alvéolo de 7 a 15 milímetros. Sin embargo, el diseño de esta base no es para la fabricación con cera natural. El material que utiliza la patente es resina de ácido poliláctico. Se indica que el método preferido para la manufactura es con moldes de inyección. Se debe tomar en cuenta que estas bases por lo tanto, implican la necesidad de suministro de resina. Adicionalmente, las bases son fabricadas directamente con la inyección en moldes, por lo que es imposible producirlas en la misma ubicación de las colmenas.

El diseño de Kunimune describe detalladamente la manera en que las bases pueden colocarse en un marco. Además, permite apreciar dimensiones funcionales para los exteriores de las bases. La patente describe algunas de las dimensiones de alvéolo utilizadas tanto en panales naturales como en las bases de cera estampada. La manufactura por inyección permite que el diseño tenga espesores reducidos, por lo que su modelo no se aleja de estas dimensiones estrictas. Se menciona un espesor de pared de 0.1 a 1.0 mm, el cuál es útil para tomar como referencia en métodos de manufactura que no permitan espesores reducidos.

Kunimune enfatiza la importancia de un espacio suficiente en el interior de cada alvéolo para permitir el crecimiento de las crías y el acceso de las abejas obreras. La patente menciona distancias de ancho de alvéolo de entre 4.5 y 6 mm. El diseño incluye un ángulo de inclinación en los alvéolos de toda la base. Este ángulo de entre 0 y 10 grados permite que los alvéolos se orienten hacia arriba al colocar las bases verticalmente en una colmena. De esta manera, se puede almacenar miel con mayor facilidad y menor riesgo de derrame. Se debe tomar en cuenta que debido a que las bases no están formadas de cera, es más difícil para las abejas modificar cualquier geometría. Por esta razón, es importante tomar consideraciones como ésta inclinación.

La aceptación de bases de cera estampada también ha sido estudiada. Semkiw (2013) estudia la reacción de colmenas de abejas a la presencia de parafina en su artículo: "*Comb construction and brood development on beeswax foundation adulterated with paraffin*" (Semkiw, 2013, pág. 75-83). [17] Semkiw (2013) experimenta con bases de cera de abeja mezclada con parafina, y describe el fenómeno común de rechazo hacia ciertas bases debido a sus factores fisicoquímicos. Semkiw (2013) indica que no existe un estándar vigente para la calidad de la cera de abeja, incluyendo el porcentaje de hidrocarburos. La ausencia de este estándar causa que muchas de las ceras y bases estampadas en venta sean adulteradas con otros componentes como parafina o estearina.

Para probar el comportamiento de las colmenas, bases estampadas con 10%, 20% y 30% de parafina son colocadas en conjunto con bases de cera pura. El método utilizado fue colocar marcos de madera con una mitad formada por bases de cera pura y la otra mitad por bases con parafina. 7 colmenas fueron evaluadas, cada una con tres marcos alterados con los distintos porcentajes mencionados. Semkiw (2013) menciona la evaluación de la aceptación de las bases tomando en cuenta la construcción de panal sobre cada base, la cantidad de crías en desarrollo y el crecimiento de abejas adultas. La forma de contabilizar la actividad de las abejas en una base fue seleccionada por unidad de área.

Los resultados del estudio de Semkiw (2013) indican en primer lugar una diferencia notable en la cantidad y calidad de construcción de panales entre el año 2010 y 2011. Segundo, se observa que el área de construcción de panales en los primeros meses es mayor para la cera sin parafina. Sin embargo, se encuentran niveles normales de construcción y formación de crías en las bases con parafina. El análisis estadístico en el estudio indica una ausencia de diferencias significativas en la cantidad de actividad en ambos tipos de bases. Semkiw (2013) concluye que la construcción de panales y formación de crías aumenta al mismo ritmo sin importar el porcentaje de parafina mezclado. Entre las observaciones del artículo se incluye que la actividad de las colmenas se ve afectada fuertemente por la disponibilidad de néctar natural en la región de la colonia, a pesar de que se alimentó con agua con azúcar a todas las colmenas durante la prueba.

CAPÍTULO 6

Hipótesis

Bases de cera de abeja fabricadas con moldes basados en impresión 3D pueden ser utilizadas por colmenas de abejas para el almacenamiento de miel, crías y polen.

7.1. Diseño

El proceso para crear las bases de cera comenzó con el diseño de los modelos 3D para los moldes utilizando el programa *Autodesk Inventor* versión 2019. Para la creación de las bases se utilizan dos moldes distintos. El molde principal es impreso en 3D con polímero PLA. El molde secundario se crea con silicón marca *Mold Star™ 30*, y es el inverso del molde principal. Debido a que se utilizaron dos moldes diferentes, fue necesario crear los tres siguientes modelos 3D: molde principal, molde secundario y base de cera.

El proceso se inició modelando la base de cera, debido a que esta es la pieza que se desea obtener del proceso de moldeo. Como segundo modelo se creó el molde de silicón, tomando la base de cera como referencia. Por último se creó el molde principal, que fue desarrollado con base en los dos modelos anteriormente mencionados.

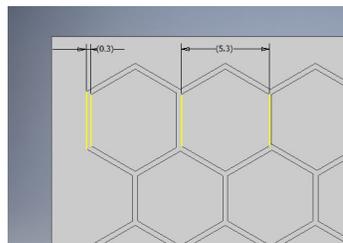


Figura 7.1: Dimensiones de alvéolo: Primera iteración

Se definieron las dimensiones de los componentes de los moldes. Las medidas de los alvéolos construidos por las abejas sin intervención humana se encuentran en el rango de 4.6 a 6 milímetros de ancho entre cada lado interno del hexágono (ancho de alveolo) y una altura de 2 a 15 milímetros. Se midieron bases de cera estampada provistas por apicultores locales, confirmando un ancho de alveolo de 5.0 a 5.4 milímetros. Tomando en cuenta estas dimensiones, se seleccionaron medidas de 5.3 ± 0.125 mm para el ancho de alveolo y 7 ± 0.1 mm para su altura. El espesor de la pared se

fijó a $0.3 \pm 0.125 \text{ mm}$ inicialmente, con la posibilidad de ser modificado en futuras iteraciones para permitir incrementar la resistencia de la estructura. La Figura 7.1 muestra el modelo que incluye estas medidas.

Después del primer diseño de base se determinó que las paredes de alveolo serían demasiado delgadas para una impresión exitosa, además de ser muy frágiles para un proceso de desmoldado seguro. En la segunda iteración se corrigió el espesor de pared, aumentando a $1 \pm 0.125 \text{ mm}$. El espesor de pared es mayor, sin embargo, es importante considerar que esto implica un menor número de alvéolos por base. Se redujo el ancho de alveolo a $5 \pm 0.125 \text{ mm}$ para compensar parcialmente el aumento de espesor de pared. Las nuevas dimensiones se observan en la Figura 7.2. Se definió una cantidad de 270 agujeros por cada base, cada una conformada por 18 filas y 15 columnas. Esta configuración permite alcanzar dimensiones de aproximadamente $100 \times 100 \text{ mm}$. Se midieron los marcos de madera utilizados para las pruebas posteriormente, obteniendo valores de $420 \times 205 \text{ mm}$. Esto permite ajustar cómodamente 8 bases de cera en cada marco, en una configuración de 4×2 bases.

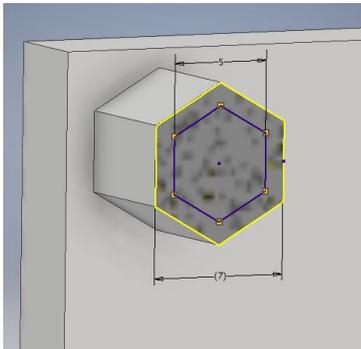


Figura 7.2: Dimensiones de alveolo: Segunda iteración

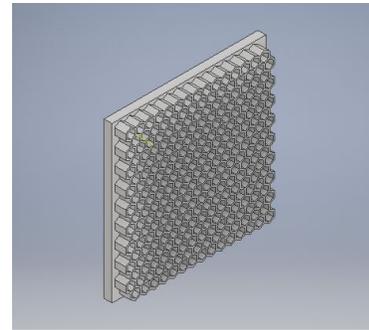


Figura 7.3: Primer modelo de base de cera

Finalmente se agregó una placa rectangular que sostendría los alvéolos y permitiría agrupar varias bases en un solo marco de madera. La base resultante se observa en la Figura 7.3. Con este modelo de base de cera, se prosiguió al modelado del molde secundario de silicón.

Para el molde secundario solamente fue necesario definir dimensiones externas y la altura que tendría la placa de cera que sostiene a los alvéolos. Esto define cuánta cera se debe verter por cada base. Las dimensiones seleccionadas fueron de $105 \times 105 \text{ mm}$ para el área del molde y una altura de placa de $5 \text{ mm} \pm 0.125 \text{ mm}$. La Figura 7.4 muestra el molde secundario después de incorporar los cambios a otros moldes.

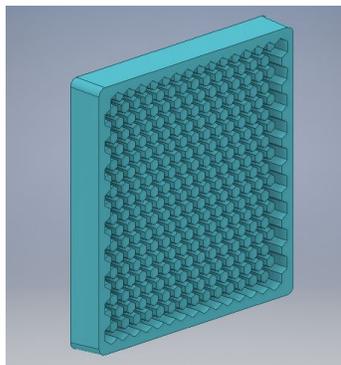


Figura 7.4: Modelo final de molde secundario

El modelo para el molde principal sufrió la mayor cantidad de modificaciones. Para iniciar se seleccionaron dimensiones de 110x110mm para la base del molde. También se seleccionó una altura de $14\text{mm}\pm 0.1\text{mm}$ para el molde de silicón, valor que es definido por la altura de pared del molde principal. La base del molde principal fue ajustada a un espesor de $5\pm 0.1\text{mm}$, resultando en una altura total de molde principal de $19\pm 0.125\text{mm}$. El resto de la geometría del molde principal se obtuvo tomando el negativo del molde secundario como se observa en la Figura 7.5. El molde principal no requiere una tapa, debido a que el fondo de la base de cera es completamente plano.

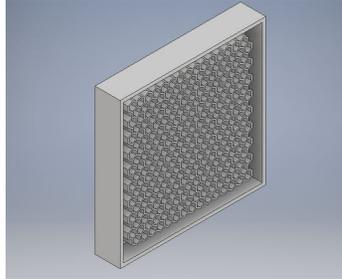


Figura 7.5: Primer modelo de molde principal

A partir de este punto los cambios en el diseño se realizan de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de manufactura. Los cambios al diseño debido a las pruebas de manufactura se describen a continuación, sin embargo, el proceso de manufactura detallado se describe en la siguiente sección.

La primera modificación al molde principal y base de cera fue la remoción de la placa que sostenía los alvéolos. Las pruebas de manufactura demostraron que la rigidez de la cera, con la pared de un milímetro, era suficientemente rígida para sostenerse por si sola. El propósito de este cambio fue permitir que los alvéolos de una placa tocaran directamente la placa adyacente, aumentando el espacio aprovechado en cada marco de madera. También se redujo la cantidad de cera utilizada por base, lo que disminuye los costos para el usuario.

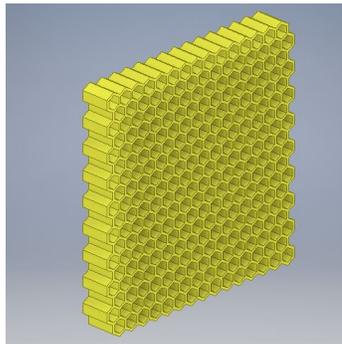


Figura 7.6: Modelo final de base de cera

El siguiente cambio incluido fue un ángulo de inclinación en las paredes de los alvéolos y del molde principal. Este ángulo se incluyó con el propósito de facilitar el desmolde tanto del silicón como de la cera. Los ángulos fueron ajustados a 3 grados en las paredes del molde y a 4 grados en las paredes de cada alveolo. Esto resultó en un ancho de alveolo que inicia en $5\pm 0.125\text{mm}$ en la cara exterior y termina en $4.021\pm 0.125\text{mm}$ al fondo del alveolo. La Figura 7.6 muestra el resultado en el modelo de base de cera.

Finalmente se incluyeron redondeos en algunas de las esquinas del molde principal. Estos redondeos dan refuerzo a las paredes, las cuales se rompieron en las esquinas en algunas de las pruebas de moldeado. Estos redondeos también permiten desmoldar el silicón con mayor facilidad. El silicón tiende a atorarse en las esquinas rectas, y el esfuerzo adicional para sacarlo del molde puede rasgar

el material o causar debilitamiento. Todos los redondeos realizados se configuraron a un diámetro de 3 milímetros. Las Figuras 7.6, 7.7 y 7.8. describen los modelos con todas las mejoras implementadas.

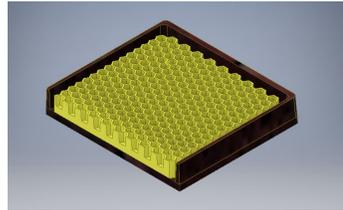


Figura 7.7: Modelo final de molde principal (Vista de sección)

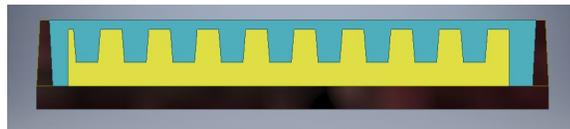


Figura 7.8: Unión molde principal (marrón), molde secundario (azul) y base de cera (amarillo)

7.2. Manufactura

7.2.1. Molde con impresión 3D y termoformado

La manufactura de los moldes inició con la impresión 3D del molde principal en sus diferentes iteraciones. Se utilizó una impresora *Ultimaker 3* configurada con tobera de 0.25 mm y utilizando polímero PLA. La primera prueba de manufactura no mostró problemas de impresión. Las paredes de los alvéolos se midieron para confirmar un espesor alrededor de un milímetro en concordancia con el diseño del molde. Sin embargo, al momento de las pruebas con silicón, una de las paredes del molde cedió al intentar separar las partes de silicón y PLA. La ruptura detectada fue localizada en dos de las esquinas de una pared lateral del molde (Figura 7.9). Se identificó la necesidad de refuerzo en las esquinas de las paredes, lo cual llevó a la implementación de los redondeos descritos en la sección anterior.



Figura 7.9: Ruptura en molde principal y secundario

Como un método experimental adicional a la manufactura con silicón, se realizaron pruebas de adaptación a termoformado. Se agregaron modificaciones al mismo diseño de molde utilizado en la prueba anterior, colocando agujeros al fondo de cada alvéolo para permitir la salida del aire durante el formado. En la Figura 7.10 se observa que el proceso de termoformado no permitió que el material alcanzara el fondo de los alvéolos. Se confirmó que un método de manufactura de este tipo no sería

apropiado por la cantidad de detalles y dimensiones reducidas que requieren las abejas. Se intentó utilizar este mismo molde con agujeros para dar forma al silicón, pero los agujeros causaron que partes del silicón quedaran adheridas al molde y el material terminó por rasgarse al desmoldar.

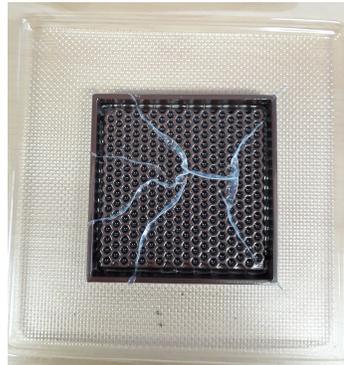


Figura 7.10: Prueba de manufactura por termoformado

Después de todas las modificaciones de diseño, se volvió a imprimir el molde principal. En esta última impresión 3D se pudo observar los beneficios de los redondeos en las esquinas, con paredes más robustas y la ventaja adicional de reducir la cantidad de defectos en los filamentos de PLA. Se encontró una ligera curvatura en la base de la impresión, la cual no llegó a afectar el interior del molde debido al espesor del fondo. Se inspeccionó la pared de cada alvéolo y no se encontraron defectos más allá de las imperfecciones inevitables en la impresión 3D de este grado. El molde terminado se muestra en la Figura 7.11.



Figura 7.11: Molde principal impreso en 3D

7.2.2. Molde de silicón

La segunda parte de la manufactura se dedicó a las pruebas de moldeo con silicón. El silicón se almacena en la forma de dos sustancias (A y B) que deben mezclarse para comenzar el proceso de curado. La mezcla debe ser medida en una proporción 1A:1B de volumen. El volumen estimado de silicón para cada molde fue determinado según el volumen de su modelo 3D. El resultado fue un aproximado de 75 mL. Para la mezcla se utilizaron cantidades de aproximadamente 40 mL de cada sustancia para compensar los residuos que quedan en el recipiente de mezclado.

La prueba inicial permitió identificar los puntos críticos del procedimiento que deben ser observados. El primero de ellos es la homogenización incompleta en la mezcla. Esta falta se atribuye a que la mezcla no fue agitada y mezclada hasta alcanzar la homogeneidad. El efecto que esto generó fue un silicón con baja elasticidad y resistencia a la tensión. Además, se detectó la presencia de burbujas

en la superficie del silicón. El exceso de burbujas debilita el silicón debido a que crea agujeros que facilitan que ocurra una ruptura, además de que reducen la consistencia del material.

La prueba de formado de silicón en el molde con agujeros al fondo de los alvéolos permitió notar más claramente que el silicón debe poder salir del molde sin un esfuerzo elevado. Por esta razón se debe evitar cualquier cavidad en la parte impresa del molde. En la Figura 7.9 se observa como algunos de los alvéolos se desprendieron por completo del cuerpo del molde en las pruebas iniciales al quedar adheridos al molde. Se identificó que la forma más segura de extraer el silicón fue comenzar por cada orilla del molde, primero logrando sacar las cuatro paredes y esquinas seguido por el resto de la estructura. Los alvéolos deben ser extraídos lentamente y de preferencia concentrando la tensión en filas completas.

Para contrarrestar los defectos mencionados, las siguientes pruebas de mezclado y curado fueron modificadas. La proporción de mezcla de silicón fue medida con recipientes graduados y mezclada por un tiempo de 4 a 5 minutos. El silicón fue vertido en un sólo punto en una de las orillas del molde y manteniendo un flujo estable para reducir la formación de burbujas. Se aplicó una vibración constante con un motor eléctrico de 110V directamente en contacto con el molde con silicón líquido para acelerar la salida de las burbujas. Se observó un aumento inmediato en la salida de burbujas debido a la vibración. La figura 7.12 muestra el silicón en el molde durante el proceso de curado.



Figura 7.12: Silicón en proceso de curado

La extracción del silicón no presentó complicaciones después de implementar las correcciones. La adición de redondeos y ángulos de inclinación a las paredes del molde complementaron el proceso de desmoldado. Los moldes formados a partir de este punto permitieron la formación de varias bases de cera sin presentar deterioro.

7.2.3. Fundición de cera

El proceso de moldeado con cera inició con las pruebas de fundición de cera. Las primeras pruebas se realizaron utilizando cera en gránulos. La información proporcionada por el proveedor indicaba que esta cera era 100 % natural, pero al comparar con cera real extraída recientemente de una colmena se comprobó que esa información no era verdadera. Sin embargo, la cera procesada permitió iniciar algunas de las pruebas y determinar el volumen de cera apropiado para cada base. El volumen estimado de cera en cada base es de 70 mL, por lo que se necesita fundir alrededor de 90 mL de cera para poderla manipular fácilmente. Se observó que un volumen alto de cera fundida toma un tiempo considerable en secar, pero al momento de verter la cera, el residuo que queda en el recipiente se seca en segundos. La Figura 7.13 muestra la primera prueba con cera procesada para determinar el volumen necesario. Se observa un distintivo color blanco en la cera en lugar del dorado de la cera natural.

El primer método utilizado para calentar la cera fue el calentamiento con Baño María. Se seleccionó este método para brindar un calor uniforme y controlado a la cera. Posteriormente se recurrió al calentamiento directo en un recipiente metálico colocado sobre una llama de gas. No se encontró



Figura 7.13: Cera procesada en prueba de moldeo

ninguna desventaja al calentar la cera directamente.

Después de determinar que la cera de las primeras pruebas era procesada, se comenzaron de nuevo las pruebas con cera recién extraída. Esta nueva cera fue extraída directamente de las colmenas en las que posteriormente se realizaron las pruebas de bases.

Durante las pruebas de fundición se midió la temperatura regularmente con un termómetro infrarrojo. Se determinó que la cera comienza a suavizarse al alcanzar temperaturas de 35 a 45 °C y comienza a fundirse a temperaturas de 55 a 60 °C. Este dato es aproximado y no se enfatiza en la determinación de temperaturas de fundición. El tiempo aproximado para una fundición completa del volumen de cera depende de la cantidad y la forma en la que se encuentra la cera sólida (marqueta, gránulos, viruta, entre otros). La cera natural utilizada para esta prueba consistía en bloques sólidos, lo que aumenta el tiempo de fundición. El tiempo estimado para fundir un bloque de 100mL es de 4 a 5 minutos. Se encontraron residuos sólidos de coloración negra o marrón. Estos residuos son parte de la cera producida por las abejas, por lo que no presentan ningún riesgo de rechazo. Sin embargo, se deben remover al fundir la cera para evitar que lleguen al molde de silicón. Un residuo grande podría debilitar la pared de cera o sobresalir en el fondo de la base.

Durante el proceso de fundición de cera, esta debe moverse constantemente y no se debe dejar tiempos prolongados en la llama después de fundirse. Si estas condiciones no se cumplen, la cera en contacto directo con el recipiente aumenta demasiado su temperatura y se alteran sus propiedades. En pruebas en que la cera se dejó demasiado tiempo en la llama, se pudo percibir la emisión de vapor visible. Esto es un indicador de que la cera se deterioró. Las bases de cera moldeadas con esta cera mostraron una coloración más oscura, mayor rigidez estructural y una reducción significativa del olor característico de la cera natural. Las temperaturas medidas durante esta prueba fueron de 70 a 80 °C en las orillas internas del recipiente.

La cera correctamente fundida puede ser vertida sin dificultad. La viscosidad baja de la cera recién fundida permite que el molde de silicón se llene vertiendo la cera en un sólo punto. El molde se llena buscando alcanzar el nivel de la pared exterior. Si se supera la capacidad del molde y se excede el límite de tensión superficial, un pequeño derrame tiende a extenderse y vaciar parcialmente el molde por el incremento en la viscosidad de la cera al disminuir su temperatura.



Figura 7.14: Cera en proceso de solidificación

Las etapas de solidificación de la cera fueron probadas para determinar el tiempo que se debe esperar antes de extraer la cera del molde de silicón. La cera fundida es casi completamente transparente y permite ver el fondo del molde, por lo que es fácil identificar las partes líquidas. Después de alrededor de 5 minutos, cuando la cera se enfría lo suficiente y alcanza la fase sólida, se torna de un color amarillo brillante como se muestra en la Figura 7.14. Se puede ver claramente que las orillas de la base se enfrían y solidifican primero. En este punto la consistencia de la cera es similar a la de una masa o arcilla. Cualquier movimiento o contacto en este punto deforma permanentemente la cera, por lo que se debe dejar en un lugar sin movimiento y completamente horizontal. La cera puede deformarse por su propio peso. Durante esta fase la cera se cubrió con recipientes plásticos para evitar que cualquier contaminante en el aire pudiera caer a la cera.

La cera comienza a mostrar un segundo cambio de color y estructura alrededor de 10 minutos después de solidificarse a temperatura ambiente. El nuevo color de la cera es el verdadero color dorado, y su estructura alcanza una mayor rigidez. En este punto la cera solamente se deforma si se aplica directamente una fuerza considerable. La cera en este estado aún no tiene rigidez suficiente para extraerse del molde. Se determinó que el tiempo de endurecimiento después del cambio final de coloración es de 15 minutos, resultando en un total de 30 minutos desde que se vierte la cera hasta que se puede extraer del molde.

La extracción de la cera representa un bajo riesgo de dañar los materiales si la cera se solidificó suficiente tiempo y el silicón se mezcló correctamente. Cada base de cera se extrajo sosteniendo la base y ejerciendo la fuerza sobre el silicón. Se inició extrayendo las esquinas del molde y avanzando hasta llegar al centro. Tanto el silicón como la cera resisten suficiente esfuerzo para no estar en riesgo de romperse durante una extracción cuidadosa.

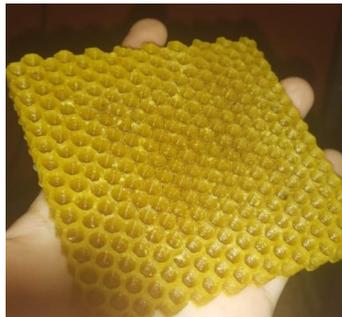


Figura 7.15: Base de cera extraída del molde

Después de verificar la dureza y estabilidad de las primeras bases creadas, se determinó que se podía remover la placa de cera que sostenía a los alvéolos en cada base. Las dimensiones de los alvéolos se verificaron para confirmar los tamaños definidos en el diseño. Los espesores de las paredes fueron medidas con un calibrador Vernier con resolución de 0.02 milímetros. Se encontró que la forma en la que se seca la base de cera de las esquinas hacia el centro, genera una curvatura en su plano horizontal. Esto se debe a que las partes sólidas se contraen ligeramente al secarse, lo cual hace que las esquinas se levanten mientras el centro aún está caliente. La diferencia en la velocidad de enfriamiento en las diferentes áreas puede ser mitigada secando la base en un ambiente refrigerado, acelerando el enfriamiento de todas las áreas. Otra solución encontrada fue voltear el molde al llegar a la fase final de endurecimiento, haciendo que el peso del molde y la cera caiga sobre sus esquinas e impida que estas se levanten. Para este último método se colocaron pesos sobre el molde para ayudar a aumentar la presión sobre la cera. La figura 7.15 muestra la forma final de la base de cera al extraerse del molde.

Se seleccionó la primera base de cera de cada prueba para ser fundida nuevamente por separado. El propósito de esta prueba fue verificar la presencia de cualquier residuo de PLA o silicón en la cera líquida.

7.2.4. Configuración de marco de madera

Con las bases de cera fabricadas, se procedió a configurar los marcos para las pruebas en abejas. Para cada marco se configuró un patrón de 2 x 4 bases. La orilla hexagonal de cada base permitió colocar las bases en contacto entre sí. El patrón diseñado permite que tanto filas como columnas encajen con la base adyacente, ayudando a sostener a cada base en su lugar. Las bases se colocaron centradas horizontalmente en el marco, y topando la orilla superior del mismo. Este tope en la orilla superior es la sección en donde las abejas aplican cera para unir y sostener las bases comerciales. Para las pruebas se buscó replicar esta configuración, permitiendo a las abejas fijar la orilla de estas bases contra la madera. La configuración de las bases de cera y su contacto con el marco de madera se observan en la Figura 7.16.



Figura 7.16: Marco con bases de cera colocadas

El principal soporte de las bases son los alambres de acero galvanizado que corren horizontalmente sobre el marco. Se calentó el alambre con una corriente eléctrica de una batería de 24V para fundir las bases sobre ellos. Los marcos utilizados constaban de tres alambres horizontales. Cada alambre fue calentado independientemente para evitar un calentamiento excesivo. La corriente se mantuvo por intervalos de 5 segundos mientras se presionaba cada base sobre el alambre. El alambre se introdujo alrededor de 2 milímetros en cada una de las bases. Partes del alambre permanecieron expuestos debido a la curvatura en los fondos de las bases. Cada uno de los marcos fue inspeccionado manualmente para verificar la fijación segura del alambre. La unión entre alambres y bases se muestra en la Figura 7.17.



Figura 7.17: Reverso de marco con bases colocadas

7.3. Pruebas de aceptación

Las pruebas realizadas con las abejas consistieron en la colocación de los marcos con la cera estampada en colmenas Langstroth. La prueba buscó comprobar la reacción de las abejas al insertar las bases de cera a su territorio. Las pruebas fueron iniciadas el 23 de mayo en Finca El Manantial, Taxisco, Santa Rosa. El área de apicultura de la finca cuenta con varias colmenas independientes. Los marcos con bases de cera pueden ser colocados en una colmena dependiendo del tamaño de la población presente y la actividad que se detecta en sus panales, según indicó el apicultor. La producción de cera es el indicador principal, y está directamente correlacionado a la disponibilidad de alimento en la temporada presente (Al Ghamdi, 2005, pág. 2). [1] Según la inspección realizada durante el mes de mayo del año 2021, se encontraron cuatro colmenas a las que se les podrían colocar marcos con las bases experimentales. A cada colmena se le colocó un único marco experimental y un marco normal como control, debido a que un cambio de mayor número de marcos forzaría a la colmena a utilizar una mayor cantidad de energía durante el cambio.

Las condiciones climáticas en los meses de abril y mayo del 2021 causaron una reducción de flores y frutos en el área de la finca El Manantial. Debido a esto, las poblaciones de abejas en cada colmena disminuyeron y no se pudo implementar un mayor número de marcos de prueba.

El proceso de colocación de los marcos fue similar al del cambio de marcos normales. Se aplicó un flujo intermitente de humo a las colmenas seleccionadas para disminuir la agresividad de las abejas. La tapa de la caja superior de cada colmena fue retirada para permitir la inspección de los marcos. Los marcos que fueron seleccionados para intercambio se retiraron de la caja para procesar la miel y cera de cada uno. Los nuevos marcos se colocaron en una posición central en cada caja con el marco de control situado a uno de los lados. La ubicación de los marcos experimentales se cuenta como la posición 5 o 6 de los 10 u 11 marcos que llenan el espacio de cada caja. Se colocó una bolsa de agua con azúcar dentro de cada caja después de cada intercambio para proporcionar una fuente de alimento adicional a la colmena. La Figura 7.18 muestra los marcos siendo extraídos de la colmena. En la Figura 7.19 se observa uno de los marcos experimentales siendo colocado en su posición de prueba.



Figura 7.18: Extracción de marcos normales para colocación de marcos experimentales

La presencia de las abejas en los marcos nuevos pueden comenzar a ser visibles desde 15 días hasta varios meses después de la introducción. Esto depende nuevamente de la cantidad de alimento y el clima en el territorio que rodea las colmenas. Se seleccionó un plazo de cinco meses para monitorear el progreso de las cuatro colmenas seleccionadas. La inspección de los marcos se realizó cada 7 o 15 días, durante el mantenimiento general de colmenas en la finca El Manantial.



Figura 7.19: Marco experimental siendo colocado en la colmena

Durante la definición de los criterios de aceptación, se tomó en cuenta que la cantidad de alvéolos utilizados en un marco entero no es representativo de la aceptación de las abejas, pues incluso con las bases comerciales de cera estampada, la cantidad de alvéolos llenos y vacíos es inconsistente. Sin embargo, diferencias de cantidades de alvéolos llenos en diferentes bases del mismo marco pueden evidenciar alguna influencia de la manufactura sobre la aceptación. No puede hacerse una comparación cuantitativa del número de marcos aceptados en una misma caja, porque no fue autorizado colocar más de un marco experimental hasta haber comprobado que no presentan un riesgo a la integridad de las abejas.

La aceptación de las bases, por tanto, puede comprobarse según se detecten modificaciones o utilización de alvéolos en cada base como tal. El primer indicador es la aplicación de cera entre la orilla de la base y la orilla del marco de madera. Las abejas aplican una capa de cera para sostener cada base contra la madera cuando detectan una superficie en la que posiblemente se pueda construir. Esta capa de cera es necesaria para sostener el peso de la miel al momento de tener una base llena. Las abejas entran en contacto con la cera de las bases para crear esta capa, sin embargo, esta no es prueba para demostrar aceptación por sí sola.

Tomando en cuenta que cada marco está separado en 8 bases de cera, se determinó un criterio para calificar los alvéolos llenos. Se debe contar la cantidad de alvéolos con contenido y determinar el porcentaje de alvéolos que quedan vacíos. No es posible determinar un porcentaje mínimo en el que una base se considere aceptada, porque todos los alvéolos tienen las mismas dimensiones y una base rechazada se encontraría vacía por completo. Sin embargo, el porcentaje permite comparar la actividad de una base con otra para investigar si existió alguna diferencia en su manufactura o manipulación.

El grado de aceptación de una base puede comprobarse según el tipo de contenido que se encuentra en cada alvéolo. Si se detecta miel o polen, se confirma que la composición fisicoquímica de la cera es aceptada, que no se tiene contaminantes detectables por las abejas y que las bases son detectadas como parte de su colmena. Sin embargo, para confirmar que una base tiene las dimensiones apropiadas, se debe verificar la presencia de larvas o huevos. La abeja reina deposita huevos fertilizados únicamente en celdas con el tamaño apropiado para el desarrollo de una larva. La presencia de larvas en las bases de cera se establece como la confirmación más efectiva de la funcionalidad completa de una base. No se requiere una cantidad mínima de larvas, pues la cantidad de huevos depositados depende de otros factores como la población y disponibilidad de alimento.

Finalmente, en el caso de que no se detecte una actividad clara de ningún tipo en un marco, se compara con el marco de control. Los mismos criterios mencionados se utilizan para el marco de control. Si se observa que el marco de control tiene actividad normal, puede concluirse que las abejas no aceptaron el marco experimental. Si el marco de control tampoco cuenta con actividad, la prueba no es concluyente, pues se demuestra que la colmena no ha tenido los recursos suficientes para trabajar normalmente durante el periodo de prueba.

La inspección de marcos para evaluación de resultados consistió en el mismo proceso utilizado para remover los marcos normales. Durante cada revisión se documentó la información descrita anteriormente y el marco fue devuelto a la misma posición en la que se colocó originalmente, en

lugar de ser reemplazado. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente capítulo.

Evaluación de resultados

Las mediciones de las bases de cera de abeja fabricadas y su comparación contra el molde principal se muestran en las tablas a continuación. Se midieron los espesores de las 32 bases de cera implementadas en las pruebas. El molde principal solamente se midió en su iteración final resultando en un promedio de 1.08 mm. El porcentaje de reducción representa la cantidad que se redujo el espesor de la cera en comparación al espesor del molde. La Tabla 8.1 muestra los resultados de la medición. La incertidumbre de 0.01 mm no se incluye en la tabla.

Los resultados de las pruebas de aceptación recopilados se presentan según la inspección de los marcos cada 15 días. La Tabla 8.2 indica los valores posibles para calificar cada variable en un marco. Las Tablas 8.3 a 8.12 muestran los resultados para cada fecha, en donde E representa el marco con bases experimentales y C es el control.

El cálculo del porcentaje de alvéolos llenos en cada marco experimental no fue calculado porque ninguno de estos marcos mostró contenido en sus celdas. Las causas de este resultado se discuten en la sección 9.

Tabla 8.1: Espesores de pared en bases de cera

Número de base	Espesor de pared	Diferencia contra molde principal	Porcentaje de Reducción
1	0.98	0.10	9.26
2	0.98	0.10	9.26
3	0.98	0.10	9.26
4	1.00	0.08	7.41
5	0.98	0.10	9.26
6	0.98	0.10	9.26
7	1.00	0.08	7.41
8	1.00	0.08	7.41
9	0.98	0.10	9.26
10	0.98	0.10	9.26
11	0.94	0.14	12.96
12	0.98	0.10	9.26
13	1.02	0.06	5.56
14	0.98	0.10	9.26
15	0.96	0.12	11.11
16	0.98	0.10	9.26
17	0.98	0.10	9.26
18	1.00	0.08	7.41
19	0.98	0.10	9.26
20	0.98	0.10	9.26
21	0.96	0.12	11.11
22	0.96	0.12	11.11
23	0.98	0.10	9.26
24	0.98	0.10	9.26
25	1.00	0.08	7.41
26	0.98	0.10	9.26
27	0.98	0.10	9.26
28	0.98	0.10	9.26
29	0.96	0.12	11.11
30	0.98	0.10	9.26
31	0.98	0.10	9.26
32	0.98	0.10	9.26
Promedio	0.98	0.10	9.2

Tabla 8.2: Valoración de indicadores

Indicador	Valoración posible	Estrategia de valoración
Cera en unión entre base y marco	1-4	El número ingresado indica la cantidad de bases en el marco experimental que fueron unidas a la madera por medio de cera. Para los marcos de control el valor máximo es 1 por ser una única pieza.
Presencia de polen en alvéolos	1-8	El número ingresado indica la cantidad de bases en el marco experimental que contienen presencia de polen en al menos uno de sus alvéolos. Para los marcos de control el valor máximo es 1 por ser una única pieza.
Presencia de miel en alvéolos	1-8	El número ingresado indica la cantidad de bases en el marco experimental que contienen presencia de miel en al menos uno de sus alvéolos. Para los marcos de control el valor máximo es 1 por ser una única pieza.
Presencia de larva en alvéolos	1-8	El número ingresado indica la cantidad de bases en el marco experimental que contienen presencia de larva en al menos uno de sus alvéolos. Para los marcos de control el valor máximo es 1 por ser una única pieza.

Tabla 8.3: Indicadores 30 de mayo

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 8.4: Indicadores 13 de junio

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 8.5: Indicadores 27 de junio

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	0	0	0
2	4	1	0	0	0	0	0	0
3	4	1	0	0	0	0	0	0
4	4	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 8.6: Indicadores 11 de julio

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	0	0	0
2	4	1	0	0	0	0	0	0
3	4	1	0	0	0	0	0	0
4	4	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 8.7: Indicadores 25 de julio

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	1	0	1
2	4	1	0	0	0	1	0	0
3	4	1	0	0	0	1	0	1
4	4	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 8.8: Indicadores 8 de agosto

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	1	0	1
2	4	1	0	0	0	1	0	0
3	4	1	0	0	0	1	0	1
4	4	1	0	0	0	1	0	1

Tabla 8.9: Indicadores 22 de agosto

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	1	0	1
2	4	1	0	0	0	1	0	1
3	4	1	0	0	0	1	0	1
4	4	1	0	0	0	1	0	1

Tabla 8.10: Indicadores 5 de septiembre

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	1	0	1
2	4	1	0	0	0	1	0	1
3	4	1	0	0	0	1	0	1
4	4	1	0	0	0	1	0	1

Tabla 8.11: Indicadores 19 de septiembre

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	1	0	1
2	4	1	0	0	0	1	0	1
3	4	1	0	0	0	1	0	1
4	4	1	0	0	0	1	0	1

Tabla 8.12: Indicadores 3 de octubre

Número de colmena	Cera en unión entre base y marco		Presencia de polen en alvéolos		Presencia de miel en alvéolos		Presencia de larva en alvéolos	
	E	C	E	C	E	C	E	C
1	4	1	0	0	0	1	0	1
2	4	1	0	0	0	1	0	1
3	4	1	0	0	0	1	0	1
4	4	1	0	0	0	1	0	1

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la prueba de aceptación muestran una diferencia clara entre el comportamiento de las abejas respecto a las bases fabricadas y las de control. En la Tabla 8.5 se puede observar que hasta un mes después de implementar los marcos, las abejas aplicaron cera sobre las bases de cera experimental para unirla al marco de madera. La unión de las bases al marco de madera fue uniforme en las cuatro bases de cada marco, y fue realizada en el mismo periodo de 15 días para las cuatro colmenas. Esta unión de las bases al marco fue detectada 15 días después de la misma unión en las bases de control. En la Tabla 8.7 correspondiente al 25 de julio se puede ver el inicio de la producción de miel y cría en los marcos de control para tres de las cuatro colmenas. Para el 22 de agosto, la Tabla 8.9 muestra una presencia de miel y larvas en todos los marcos de control. Sin embargo, ninguno de los marcos experimentales presenta actividad adicional desde el 27 de junio. La Tabla 8.12 no muestra un cambio en los resultados en la última revisión. No se detectó presencia de polen en ninguna de las bases experimentales ni en ninguna de las bases de control.

El patrón observado en las Tablas 8.3 a 8.12 demuestra un rechazo claro al almacenamiento de miel y la formación de larvas en las bases experimentales. Se observa que las colmenas en general tomaron tiempos muy largos para comenzar a modificar los marcos colocados. El bajo nivel de actividad de las abejas puede atribuirse a las condiciones climáticas en la región para las fechas de prueba. El apicultor indicó que, según su experiencia, durante los meses de junio y julio se esperaba mayor cantidad de flores y frutos en los alrededores de la finca. Sin embargo, el clima en la región para estas fechas causó una reducción significativa en las fuentes de néctar disponibles para su alimentación. La escasez de alimento incluso causó la reducción en la población de algunas colmenas. Dos grupos de abejas que no formaban parte de la prueba abandonaron sus colmenas para migrar a otras regiones en busca de alimento. Adicionalmente, la escasez de flores reduce la cantidad de cera disponible, pues esta se obtiene de la misma fuente (Babcock, 1868, pág. 565). [2] Tomando en cuenta estos factores, se puede inferir que el entorno para las colmenas no era favorable para la prueba.

En los meses siguientes inició la temporada de lluvias. Durante este periodo la actividad de las abejas también se ve reducida drásticamente. Se debe considerar que en épocas de baja actividad y bajos recursos, las abejas pueden optar por construir solamente en las bases de cera que conocen. En los primeros meses del año podría observarse una mayor actividad de producción en las abejas, permitiendo una mejor comparación sin factores externos de impacto mayor. A pesar de esto, las

abejas con falta de recursos podrían haber elegido utilizar las bases ya construidas, que habrían significado un ahorro de energía si no fueran rechazadas por un factor adicional. La ausencia de polen en cualquiera de los marcos fue explicada por el apicultor, quién indicó que los marcos colocados al centro de una caja de colmena rara vez contienen polen, pues las abejas prefieren almacenarlo en los marcos de las orillas.

La presencia de cera en las cuatro bases unidas con el marco indican que las abejas sí reconocieron el marco como un soporte potencial para sus panales. Existe la posibilidad de que si la cera moldeada fuera rechazada por completo, las abejas no habrían tenido ningún tipo de contacto con ella. Sin embargo no se detectó ningún intento de morder la cera para modificar la forma de los panales. La ausencia de mordeduras se ha detectado al utilizar ceras que contienen otros componentes, como la parafina (Semkiw, 2013, pág. 81). [10] Esto podría indicar que las abejas detectaron alguna sustancia en la composición de la cera. Durante las pruebas de fundición de bases ya moldeadas, no se encontraron residuos visibles de silicón o PLA entre la cera. Es posible que las partículas de silicón o polímero fueran demasiado pequeñas para detectarse a simple vista. Adicionalmente, la cera fundida es difícil de analizar, pues debe encontrarse en el recipiente caliente para volverse transparente. No se implementaron métodos de filtración de cera para este análisis pues la cera se enfría inmediatamente al entrar en contacto con cualquier malla o superficie porosa. Esto causa solidificación de la cera en los agujeros de filtrado, y la cera caliente no puede continuar fluyendo.

Las especificaciones del fabricante del silicón *Mold Star 30* no indican ningún caso aplicable en el que se generen residuos o se presenten defectos en el curado debido al contacto con el molde principal de PLA (SmoothOn, 2021). [18] Sin embargo, la geometría del molde de PLA contiene pequeñas cavidades entre cada capa del filamento. Estas cavidades podrían dar lugar a la formación de partículas de silicón que podrían desprenderse al extraer el molde. A pesar de que no se detectaron estas partículas durante las pruebas de curado de silicón, sí se observó que los derrames de silicón en las orillas del molde generaban capas delgadas de material que se rasgaban con facilidad por lo que puede existir una posibilidad de que ocurra algo similar a escala microscópica. Adicionalmente, en los alvéolos del molde de silicón se pueden observar irregularidades o rebabas de silicón serían casi invisibles en un fluido al momento de desprenderse. Esto se considera la fuente más probable de materiales extraños presentes en la cera. Incluso sin el desprendimiento de partículas, el contacto directo con el silicón puede potencialmente dejar rastros de olor que las abejas percibirían como un contaminante.

Durante el proceso de manufactura se detectó un olor característico en los moldes impresos en 3D con PLA. Existe la posibilidad de que este olor fuera transmitido al molde de silicón y de este, a su vez, a las bases de cera. No obstante, la patente incluida en los antecedentes del proyecto utiliza un diseño para una base construída en su totalidad con resina de ácido poliláctico, mismo material utilizado en la impresión 3D (Kunimune, 2016, pág. 7). [10] Por esta razón, se considera menos probable que esta sea la causa del rechazo.

Las dimensiones de las bases de cera también deben ser tomadas en cuenta. Según la Tabla 8.1, las bases de cera presentan un espesor de pared reducido en comparación al molde impreso en 3D. Esta reducción promedio de 9.2% en el espesor de pared es de beneficio para la base, pues los panales naturales son incluso más delgados. Sin embargo, la pared sigue siendo más gruesa de lo recomendable con un promedio de 0.98 mm en lugar de la especificación de 0.15 a 0.4 mm (Kunimune, 2016, pág. 7). [10] El espesor de pared no solamente reduce el número de alvéolos en cada base sino que aumenta su peso y rigidez. La observación más importante en este aspecto es que las abejas tampoco construyeron panales en el reverso de cada base. Si el problema fuera únicamente la dimensión de las paredes y alvéolos, las abejas deberían haber construído secciones de panal en el otro lado del marco de igual manera que lo hicieron en los marcos de control. Debe tomarse en cuenta que existen secciones del alambre del marco que sobresalen de la parte trasera de las bases experimentales. Las abejas podrían detectar este alambre expuesto como un impedimento para la construcción. No existe evidencia que indique que el rechazo pueda ser causado por la colocación de 6 bases separadas en cada marco. En algunas secciones de las bases de cera se detectó la aplicación de

cera en las uniones entre bases. Se han realizado pruebas en casos similares, en donde se demuestra que las abejas pueden formar panales en marcos con bases de cera separadas en tiras (Al Ghamdi, 2005, pág. 1-4). [1].

El cambio en las propiedades químicas de la cera es evidenciado por cambios en sus propiedades físicas. A pesar de que no se realizó un análisis químico antes y después del moldeado, se puede considerar que no hubo alteración. Las bases utilizadas en las pruebas no presentaron ninguna pérdida de color, cambio en su rigidez perceptible, o presencia de vapor o humo durante su fundición. Tampoco se puede identificar una fuente de contaminación externa durante la manipulación y transporte de las bases de cera, porque éstas recibieron los mismos cuidados que las bases de control.

Debido a que los resultados sugieren un rechazo causado por presencia de materiales contaminantes, no es posible concluir que el diseño de los moldes sea incompleto o no funcional. El diseño del molde no contribuye a ninguna de las causas de fallo discutidas. Los espesores de pared y tamaños de alvéolo pueden ser modificados para ajustar sus dimensiones con facilidad. Estos fueron aumentados sólo para permitir la impresión con PLA. El método de manufactura, por el contrario, no puede ser validado para su utilización en fabricación de moldes para cera. Otros métodos de impresión 3D más precisos podrían solucionar el problema aparente de las cavidades entre filamentos y permitir una impresión más delgada y ligera. Tampoco se pudo comprobar si los moldes de silicón son una herramienta apropiada, pues la probabilidad de desprendimiento de partículas atribuible a este material es considerable. Tanto la presencia de partículas de silicón en la cera como el contacto directo entre la cera y el silicón son causas probables de generación de contaminación detectable por las abejas.

La hipótesis planteada: *“Bases de cera de abeja fabricadas con moldes basados en impresión 3D pueden ser utilizadas por colmenas de abejas para el almacenamiento de miel, crías y polen.”*, no es comprobada debido al rechazo demostrado en las colmenas. Sin embargo, esto no indica que una futura iteración no pueda ser implementada satisfactoriamente. Se necesita realizar modificaciones en el proceso de diseño y manufactura de las bases de cera para reducir las posibles causas de rechazo y realizar más pruebas de aceptación.

Los marcos experimentales permanecieron en las colmenas posterior al cierre de toma de muestras del 3 de octubre. El 7 de noviembre el apicultor indicó un cambio en las bases experimentales. Se determinó que las abejas almacenaron crías en las bases de cera, además de comenzar la formación de alvéolos en los reversos de las mismas. Estos resultados aún deben ser tabulados, y se requiere inspeccionar las bases de cera detalladamente. La presencia de larvas en las bases podría demostrar su aceptación dependiendo de los avances encontrados en las próximas semanas de desarrollo. Estos hallazgos soportan la posibilidad de que la causa del retraso en el uso de las bases se deba a la temporada del año en la que se iniciaron las pruebas. El inicio de construcción en la parte trasera de las bases también puede llegar a descartar la posibilidad de que el alambre expuesto afecte la aceptación.

- La hipótesis “*Bases de cera de abeja fabricadas con moldes basados en impresión 3D pueden ser utilizadas por colmenas de abejas para el almacenamiento de miel, crías y polen.*” es rechazada porque las colmenas de abejas no utilizaron las bases de cera fabricadas.
- No existen resultados que indiquen que los diseños de los modelos de los moldes son parte de las causas del rechazo.
- La impresión 3D por extrusión de material PLA no es recomendada para fabricar bases de cera debido a las cavidades que se generan entre cada filamento depositado.
- El uso de moldes de silicona de platino no es recomendado para fabricar bases de cera porque su contacto con la cera o sus partículas residuales son una causa probable del rechazo de las bases en las pruebas de aceptación.
- Las bases de cera de abeja pueden ser formadas y extraídas de un molde flexible sin perder su forma y rigidez, incluso si se incorporan alturas de alvéolo de hasta 7 mm y espesores de pared menores a 1 mm.
- La unión entre las bases de cera y los marcos de madera realizada por las abejas no es suficiente evidencia de actividad para comprobar aceptación.
- El rechazo de las bases debido a dimensiones se descarta porque las abejas tampoco utilizaron el lado plano en el reverso de cada base.
- Las abejas comenzaron a depositar larvas más de cinco meses después del ingreso de las bases, por lo que una futura observación de las colmenas puede llegar a demostrar aceptación de las bases previamente catalogadas como rechazadas.

CAPÍTULO 11

Recomendaciones

- Diseñar cada molde con el área más grande posible para reducir el tiempo de espera entre cada fundición de cera.
- Fabricar un molde que se pueda cerrar de ambos lados para evitar la curvatura de la cera por la contracción durante el endurecimiento.
- Modelar un molde que permita formar bases de cera con alvéolos construidos en ambos lados de la base.
- Realizar pruebas para el alisado de las superficies de la impresión 3D con métodos como el vapor de acetona o utilizar otros métodos de impresión 3D como PolyJet para fabricar moldes de superficie lisa.
- Reducir los espesores de pared de cada alvéolo a valores inferiores a 0.4 mm.
- Producir bases con incrementos graduales en las alturas de pared y comprobar las diferencias en la aceptación para cada tamaño.
- Colocar las bases en marcos sin alambres para evaluar si existen cambios en la actividad de las abejas en los reversos de los marcos.
- Ubicar los marcos de control y experimentales en diferentes colmenas, para reducir la cantidad de trabajo que debe hacer una sola población.
- Realizar pruebas de interacción entre abejas y diferentes materiales de grado alimenticio con los que se pueda crear moldes, para comparar sobre qué materiales construyen.
- Realizar pruebas de aceptación en épocas con abundancia de alimento y fuera de la temporada lluviosa para reducir la posibilidad de rechazo por falta de recursos y períodos de hibernación.

-
- [1] Al Ghamdi, Ahmad: *Settlement and performance evaluation of Apis mellifera yemenitica in relation to beeswax foundation use in modern hives*. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2005.
- [2] Babcock, Jas F: *On Beeswax*. The American journal of dental science, 1(11):565, 1868.
- [3] Chhuneja, PK: *Exercise-3 Comb Foundation Making Process*. IGNOU, 2018.
- [4] Drumright, Ray E, Patrick R Gruber y David E Henton: *Polylactic acid technology*. Advanced materials, 12(23):1841–1846, 2000.
- [5] Dudek, PFD: *FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements*. Archives of metallurgy and materials, 58(4):1415–1418, 2013.
- [6] Dunham, Frances A: *Machine for manufacturing honey comb foundations*, U.S. Patent 246 099, Aug. 23, 1881.
- [7] Guzmán, Victor H: *Paisajes productivos resilientes al cambio climático y redes socioeconómicas fortalecidas en Guatemala*, 2016.
- [8] Hamad, K, M Kaseem, HW Yang, F Deri y YG Ko: *Properties and medical applications of polylactic acid: A review*. Express Polymer Letters, 9(5), 2015.
- [9] Khamdaeng, Tipapon, Thanasit Wongsiriamnuay, Numpon Panyoyai, Kanjana Narkprasom y Weeranut Intagun: *Mechanical properties and melting conditions of beeswax for comb foundation forming*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 18(3):282–293, 2016.
- [10] Kunimune, Noriaki: *ARTIFICIAL HONEYCOMB*, U.S. Patent 9 408 373, Aug. 9, 2016.
- [11] Langstroth, Lorenzo Lorraine: *Langstroth's Hive and the Honey-Bee: The Classic Beekeeper's Manual*. Courier Corporation, 2004.
- [12] Lorenzon, Maria Cristina Affonso, Rodolfo Gonçalves Cidreira, Edmundo Henrique Ventura Rodrigues, Milton Sérgio Dornelles y Geraldo Pereira Jr: *Langstroth hive construction with cement-vermiculite*. Scientia Agricola, 61(6):573–578, 2004.
- [13] M, Bush: 2005. *Natural cell size and its implications to beekeeping and Varroa mites*. Bush Farms. <http://www.bushfarms.com/beesnaturalcell.htm>.

- [14] Mangum, Wyatt A: *The Top-Bar Hive: An Old Design Flourishing In Modern Beekeeping*. Bee World, 90(1):2–4, 2013.
- [15] Meixner, Marina D, Maria Alice Pinto, Maria Bouga, Per Kryger, Evgeniya Ivanova y Stefan Fuchs: *Standard methods for characterising subspecies and ecotypes of Apis mellifera*. Journal of Apicultural Research, 52(4):1–28, 2013.
- [16] PerfectBee: *2019. A Detailed Look at the Langstroth Beehive*. <https://www.perfectbee.com/your-beehive/beehives-and-accessories/langstroth-beehive-in-detail>.
- [17] Semkiw, Piotr y Piotr Skubida: *Comb construction and brood development on beeswax foundation adulterated with paraffin*. Journal of Apicultural Science, 57(1):75–83, 2013.
- [18] SmoothOn: *Mold Star TM 30*. <https://www.smooth-on.com/products/mold-star-30/>.
- [19] Sparavigna, Amelia Carolina: *Analysis of a natural honeycomb by means of an image segmentation*. Philica, 2016(897), 2016.
- [20] Ultimaker: *Ultimaker 3: Manual de instalación y uso*, 1.4 edición, 2017.
- [21] Voiku, Ivan: *The Device of the Shallow Frame (Half-Frame) With Quick Fitting of a Beeswax Foundation and Its Advantage*. En *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, volumen 1, páginas 336–338, 2019.
- [22] Wacker Chemie, AG: *Solid and Liquid Silicone Rubber Material and Processing Guidelines*. Wacker Chemie AG, München, Germany, Report, 2011.
- [23] Wallner, K: *The actual beeswax quality in foundations from the market*. Apidologie (France), 1997.

13.1. Figuras adicionales de la etapa de diseño

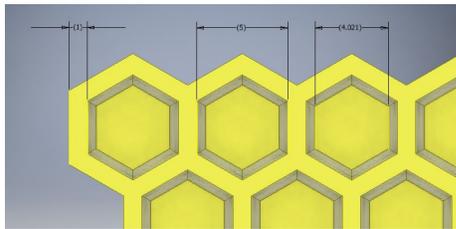


Figura 13.1: Dimensiones finales en diseño de base de cera

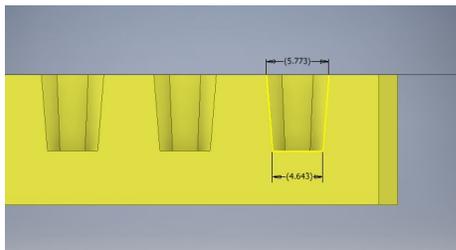


Figura 13.2: Vista de sección de alvéolo en base de cera

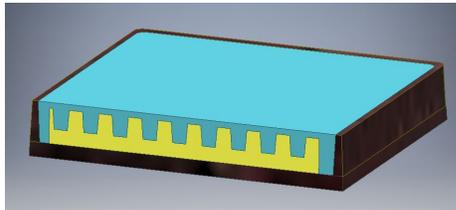


Figura 13.3: Vista de representación de unión entre molde principal (marrón), molde secundario (azul) y base de cera (amarillo)

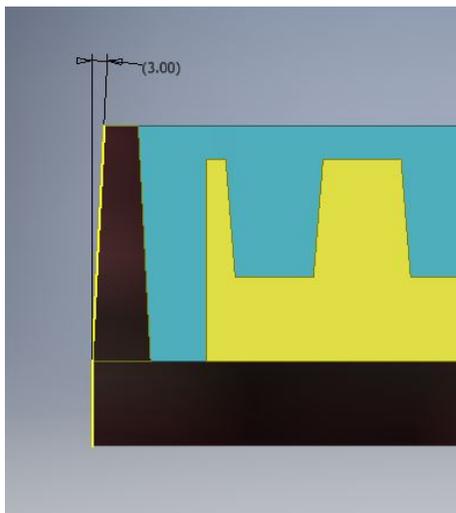


Figura 13.4: Ángulo de inclinación en paredes de molde principal

13.2. Figuras adicionales de la etapa de manufactura



Figura 13.5: Silicona de platino siendo vertida hacia molde principal

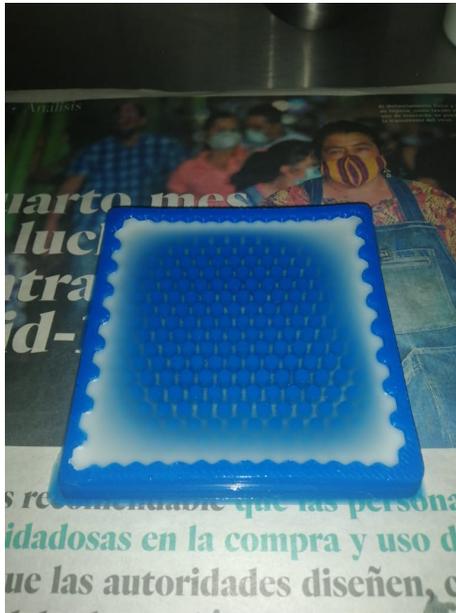


Figura 13.6: Cera procesada en solidificación

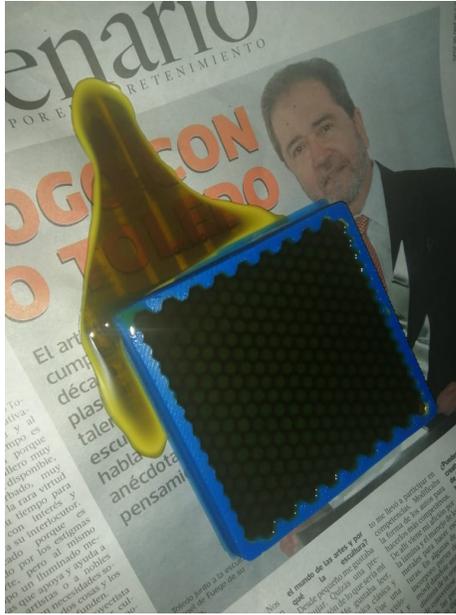


Figura 13.7: Cera de abeja en proceso de solidificación



Figura 13.8: Marqueta de cera de abeja utilizada para las pruebas

13.3. Figuras adicionales de la etapa de pruebas de aceptación



Figura 13.9: Comparación entre base de cera vacío y marco de control



Figura 13.10: Marco extraído de una colmena el 11 de Julio



Figura 13.11: Acercamiento que muestra aplicación de cera en uniones base-base y base-marco