

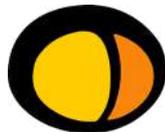
Universidad de la República
Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo
Escuela Universitaria Centro de Diseño



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR



Escuela Universitaria
Centro de Diseño

**Molde variable para el termomodelado de vidrio
a altas temperaturas de fabricación y uso local**

Trabajo Final de Grado
Licenciatura en Diseño Industrial • Perfil producto

Estudiante • Carolina Frabasile Treutler
Tutora • Prof. Adj. Lic. Beatriz Amorín
2021 • Montevideo, Uruguay

Índice

Resumen	5
Introducción	6
Contextualización del proyecto	6
Procesos de trabajo artesanales y semi-artesanales en vidrio	7
Técnicas en frío	9
Procesos mecánicos	9
Procesos químicos	12
Técnicas en caliente	12
Manipulación en caliente	12
Trabajo en hornos- Manipulación en frío	14
Antecedentes	18
Sistema de modelado por configuración de puntos	19
El proyecto	21
Objetivos	21
Metodología de trabajo	21
Delimitación del proyecto	23
El problema	23
Aporte del TFG al proceso de diseño en vidrio	24
Brief de diseño	26
Proyección y desarrollo del molde	27
Definiciones de diseño	27
Parámetros generales	27
Los usuarios	27
Esquema básico del dispositivo a proponer	27
Definición de la forma general del dispositivo	28
Medidas	28
Separación entre placas	28
Definición de la altura de las varillas del dispositivo final	30
Definición de distancia entre los puntos	31
Definiciones tecnológicas	36
Material	36
Mecanismo de bloqueo de varillas	37
Representación de principios básicos de funcionamiento	38
Dispositivo proyectado	40
Explosión y componentes	40
Relevamiento de proveedores	41
Insumos	42
Uso y ensayos de laboratorio	43
Secuencia de uso	43
Testeos	45
Observación y análisis	50
Modificaciones	51
Algunos aspectos a tener en cuenta	55
Ejemplos de utilización del molde proyectado	56
Conclusiones finales y proyecciones	59
Referencias bibliográficas	60
Bibliografía	61
Anexo A: Flujo productivo	62

Resumen

El presente trabajo surge de la observación de la importancia del molde en el proceso de fabricación de piezas de vidrio termomodelado. Se identificó una oportunidad de diseño en la proyección y manufactura de un molde que permitiera, a quienes trabajan con vidrio, prescindir de la necesidad de aprender a desarrollar en otros materiales las formas a las que aspiran, para luego introducirse en el termomodelado el vidrio, además de ofrecer un molde que permita ajustar su forma durante el proceso de Diseño y realizar varios productos de formas diferentes con un único dispositivo.

Constituyó el objeto de este trabajo la proyección de un molde reconfigurable a partir de los antecedentes internacionales identificados, y el análisis de las posibilidades que brinda dicho producto para la fabricación de objetos a partir de vidrio termomodelado. En este sentido, partiendo de las experiencias previas del Laboratorio de Vidrio de la EUCD y los antecedentes, se realizaron horneadas sistemáticas variando los parámetros que influyen en la definición formal del molde, así como también las curvas de temperatura. Se relevaron proveedores de materiales y servicios del mercado local con el fin de generar un dispositivo factible de ser manufacturado en nuestro país. Se relacionaron las curvas de temperatura comúnmente utilizadas en el Laboratorio de Vidrio con sus resultados visuales asociados utilizando el molde fabricado. Se propusieron y testearon modificaciones para disminuir el marcado de los puntos en el vidrio, y para intensificarlos.

Por último se realizaron conclusiones que refieren al potencial del dispositivo en relación al diseño de productos en vidrio termomodelado, a las proyecciones de investigación que de él surgen, al aporte que genera el desarrollo de herramientas para la disciplina del Diseño y para el trabajo con vidrio localmente.

Introducción

Una de las técnicas comúnmente utilizadas en el entorno local para generar volúmenes de vidrio de fabricación artesanal y semi artesanal es el termomodelado. Este, parte del uso de hojas de vidrio plano industrial que al someterlas a altas temperaturas alcanzan un estado termoplástico y se deforman bajo su propio peso por acción de la gravedad acoplándose a un molde (Villegas, 2016).

El molde cumple un rol fundamental en esta técnica de trabajo y la dificultad de su generación en otros materiales durante el proceso de diseño de una pieza en vidrio, impide el desarrollo rápido y rediseño de objetos de vidrio.

Por otro lado, los sistemas o herramientas de conformación por multipunto, son sistemas de fabricación reconfigurables que se basan en generar volúmenes o planos curvados a partir de la definición de la posición de los puntos de un plano. Permiten lograr una amplia cantidad de superficies mediante la determinación de la altura de cada uno de los puntos. La flexibilidad otorgada por la capacidad de cambiar la forma es muy valorada en las etapas de diseño y manufactura de muchos productos.

A modo de introducción, se presenta un relevamiento de técnicas artesanales y semi artesanales de trabajo en vidrio. Este proyecto procuró desarrollar, fabricar y analizar las posibilidades de un molde reconfigurable para el termomodelado de vidrio plano que permita realizar varios productos de formas diferentes con un único dispositivo, a partir del análisis de los antecedentes estudiados y mediante ensayos de laboratorio sistematizados.

Finalmente como resultado de este trabajo y en relación a los objetivos propuestos se relacionaron las curvas de temperatura utilizadas en el laboratorio con los resultados visuales asociados al molde, y se propusieron y testearon modificaciones que permitieron conseguir resultados visuales diferentes.

Contextualización del proyecto

Durante la carrera, me vinculé al vidrio desde diversas unidades curriculares como el Laboratorio de Vidrio I, Laboratorio de Vidrio II, y la Unidad de Proyecto 4, así como también en la ejecución de un proyecto financiado por el Programa de Apoyo a la Investigación Estudiantil (PAIE). Desde el 2019 me desempeño como docente en el Laboratorio de Vidrio (LAV) de la Escuela Universitaria Centro de Diseño (EUCD), donde realizo actividades de enseñanza en los cursos de grado Laboratorio de vidrio I y II y diversos cursos financiados por la comisión de Posgrado y Educación Permanente, así como actividades de investigación y extensión relacionadas al material.

Así, desarrollé mi interés por el termomodelado como proceso productivo para objetos en vidrio, técnica en la cual identifiqué la importancia del molde y cuyas dificultades de fabricación enlentecen y acotan los procesos creativos de estudiantes y emprendedoras. En este sentido, la producción de moldes ralentiza la construcción de conocimiento en torno al vidrio como material productivo convirtiéndolo en un proceso largo e indirecto al que pocos acceden.

Por otro lado, mi afinidad por los materiales y los procesos tecnológicos me llevaron a interesarme por nuevas tecnologías de fabricación relacionadas al vidrio. En este sentido el libro *New technologies in glass* (Cutler, 2012) me impulsó a cuestionarme acerca de las posibilidades de producción local de dispositivos que faciliten y amplíen las posibilidades de trabajo semi-artesanal con vidrio.

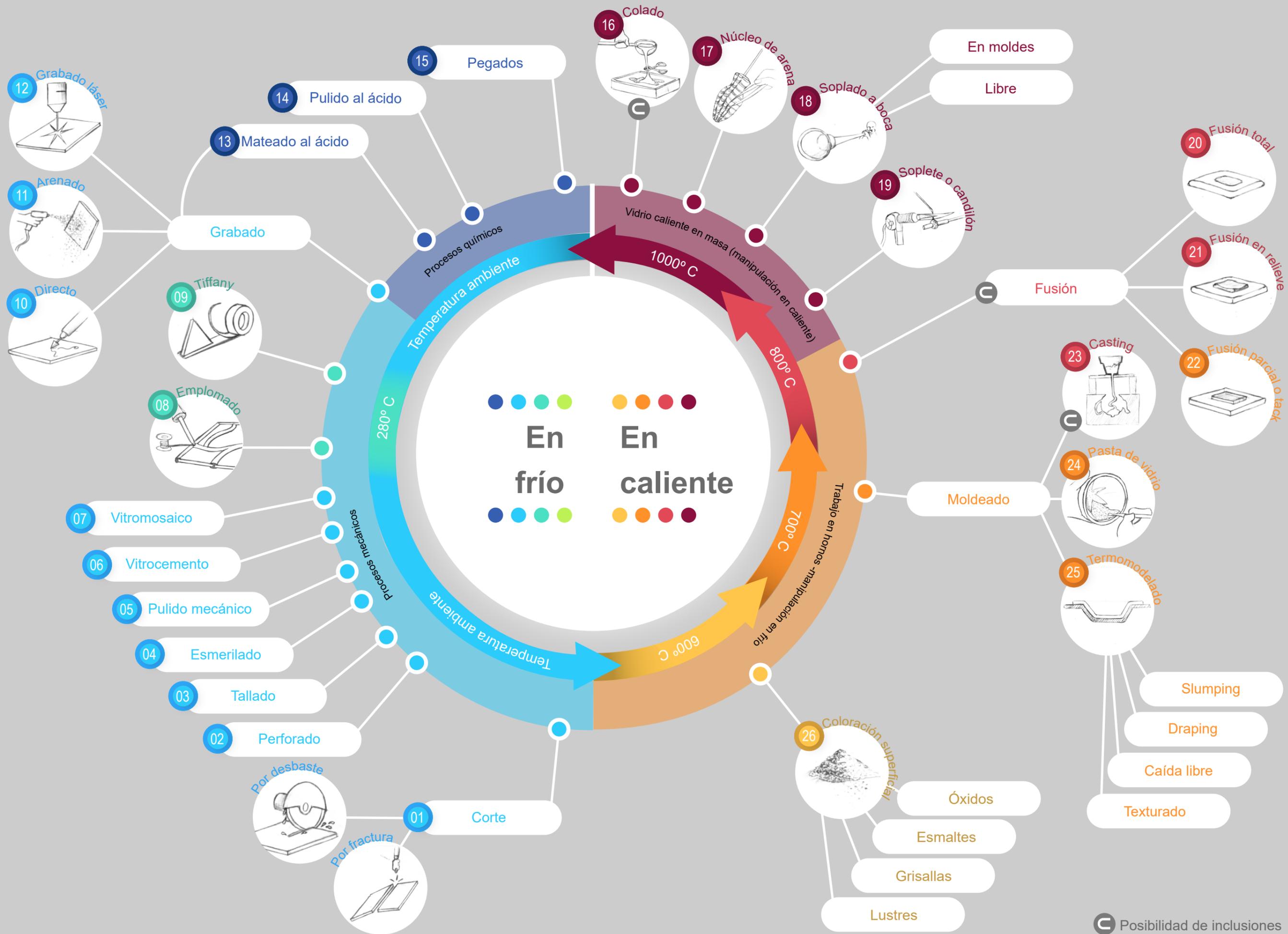
En este marco surge el interés de proponer y analizar las posibilidades de fabricación de un molde para termomodelado de vidrio que permita variar su forma para la realización de diferentes objetos, con el fin de facilitar los procesos de creación y producción, a partir de los antecedentes identificados.

Procesos de trabajo artesanales y semi-artesanales en vidrio

El presente capítulo procura mapear y describir los principales procesos básicos de trabajo con vidrio artesanales y semi-artesanales que se utilizan para la elaboración de objetos como forma de recopilarlas en un mismo texto. No se incluyen técnicas compuestas en este mapeo. Las definiciones, descripciones e ilustraciones aquí presentados son una elaboración propia a partir de los diferentes textos consultados Sanz Lobo, 2005; Waisman, 2009; Romero, 2012; Cutler, 2012; Romay, Hojman, Mussio, Ulfe, 2015; Villegas, 2016; Nallem, 2017; Amorín, Frabasile, ined. 2021, de la propia experiencia de trabajo con vidrio y las exposiciones en eventos y redes sociales de diferentes vidrieros latinoamericanos.

Se entiende por técnicas artesanales o semi-artesanales según Flores (2009) y Nallem (2017) aquellas en las que se transforman las materias primas a través de procesos mayoritariamente manuales o con maquinaria y herramientas simples, en donde predomina el trabajo físico e intelectual.

Mapeo de técnicas básicas de trabajo en vidrio semi-artesanales



Técnicas en frío

Procesos mecánicos

01-Corte

El procesamiento más básico de trabajo con vidrio es mediante cortes. El corte es una acción irreversible que permite dividir un trozo de vidrio en dos partes. Existen dos formas de lograr esto, por fractura, o por desbaste, y dependen de la herramienta que utilizemos para hacerlo.

El corte por fractura es el más popular y para controlarlo se realiza una incisión en el vidrio marcando en una cara la línea por la cual queremos separar las partes con una rulina de tungsteno (rueda que tienen los cortavidrios en el cabezal) de borde a borde y sin repasar. Esto provoca un sonido muy característico que indica si el vidrio se está marcando correctamente. Luego se abre el corte sometiendo la pieza a un esfuerzo de flexión, donde la cara que funciona a tracción es la cara marcada por la rulina y la que funciona a compresión es la cara opuesta. También puede abrirse un corte por choque térmico calentando la zona marcada y enfriándola rápidamente. Al fracturarse los cantos quedan con una apariencia característica en donde se nota un microdentado en la zona donde se pasó el cortante y de allí el vidrio adquiere una superficie cóncava o convexa dependiendo de cuál de los dos nuevos trozos de vidrio observemos (levemente apreciable a simple vista). La superficie puede ser lisa o presentar finas estrías concéntricas. Esto ocurre debido a que los sólidos no cristalinos tienen una fractura concoidea o concoidal*. Éste método de corte tiene algunas limitantes como por ejemplo que el vidrio siempre se abre de lado a lado (no podemos generar un ángulo en el medio de la pieza) y además el trozo más pequeño de vidrio que se puede cortar es de una vez y media el espesor del propio vidrio.

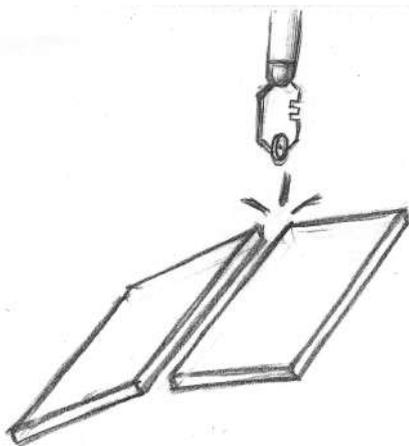


Figura 1. Esquema de corte por fractura. Fuente: Elaboración propia

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. [«fractura concoidea»](#). Vocabulario Científico y Técnico. Acceso 10 de abril de 2021.



El corte por desbaste requiere maquinaria específica, pero no tiene limitantes en cuanto a el tamaño de pieza que se quiere cortar en relación al espesor del vidrio. Existen varios tipos de sierras con los que se puede cortar vidrio y que permiten mayor libertad en cuanto a formas realizables que el método de corte por fractura. Entre ellas encontramos sierras eléctricas con hojas de anillo y sierras sinfín, hojas de sierra caladoras manuales, y sierras eléctricas circulares de mesa; estas últimas, si bien permiten realizar cortes en ángulo en una pieza de vidrio, pueden realizar únicamente cortes rectos y no tienen gran precisión para cortar piezas pequeñas. Todas estas sierras cuentan con hojas diamantadas que desbastan el vidrio en el lugar de contacto por abrasión, es decir, que en este proceso se pierde el material que ocupaba la línea de corte. Además, este tipo de corte hace aumentar la temperatura de la pieza por la fricción que genera la hoja contra el material, por lo que todas las maquinarias eléctricas utilizan agua o algún otro refrigerante para evitar que la pieza se rompa por choque térmico. Cuando el proceso es realizado manualmente también es recomendable refrigerar la pieza con algún líquido, no solo por el riesgo de rotura sino además para evitar que el polvo de vidrio quede suspendido en el aire e ingrese a los pulmones de la persona que lo trabaja. Esta última justificación también se aplica para la refrigeración de las herramientas eléctricas.

Por otro lado, el corte por desbaste puede lograrse también por el impacto de partículas de abrasivo en la superficie del vidrio. Para ello se utiliza el *waterjet*, corte por chorro de agua o hidrocorte, donde las partículas de abrasivo son impulsadas por agua a presión y direccionadas pasando a través de una boquilla. Las máquinas cuentan generalmente con Control Numérico Computarizado (CNC) que permite realizar cortes a partir de vectores digitales controlando la traslación de la boquilla para realizar cualquier tipo de geometría en el corte de la pieza. El agua sirve como medio para las partículas de abrasivo además de como refrigerante para el corte. La terminación de las piezas cortadas dependen de la granulometría y el tipo de abrasivo utilizado, la velocidad con la que se mueve la boquilla, la sujeción de la placa a cortar, la presión de agua utilizada, entre otros

parámetros que se deben dominar para la utilización de esta forma de producción (Cuttler, 2012).

La misma autora destaca como beneficios de este proceso la posibilidad de cortar formas complejas rápida y eficientemente tanto internas como externas, la precisión y calidad de los cortes, la posibilidad de cortar varias piezas de una única placa de vidrio, la relación

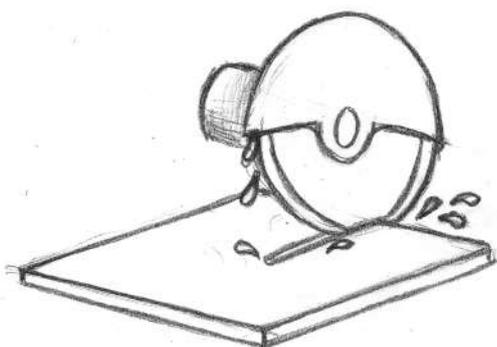


Figura 2. Esquema de corte desbaste. Fuente: Elaboración propia

precio-eficiencia en términos de ahorro de trabajo manual y reducción de desperdicios, la obtención de piezas idénticas entre sí y el grosor de las placas de vidrio que pueden ser cortadas (máximo 300 mm).

02-Perforado

El perforado es la acción de realizar un orificio pasante en un trozo de vidrio. Esto se realiza generalmente con una broca diamantada o mecha de tungsteno colocada en un taladro o mini torno asistido con agua para refrigerar la zona de fricción con el vidrio y evitar la rotura por choque térmico. Es una acción de desbaste de material. También se puede perforar vidrio con otros procedimientos antes descritos como el hidrocorte.

03-Tallado

La talla de vidrio consiste en quitar parte del material mediante acciones abrasivas. Se realiza con herramientas diamantadas generalmente motorizadas. Se diferencia del grabado en la cantidad de material que se remueve de la pieza, y los desbastes suelen brillarse luego de obtener la forma deseada.

04-Esmerilado

El esmerilado consiste en desbastar mediante discos y polvos la superficie de un vidrio para dejarlo con un aspecto opaco translúcido que dispersa la luz. De esta forma evita que se vean figuras nítidas a través de él distinguiendo únicamente planos difusos de color.

05-Pulido mecánico

El pulido es el método para volver a dar brillo al vidrio.

Esto se realiza mediante abrasión que puede ser tanto manualmente por frotado contra una superficie abrasiva u otras herramientas, como con herramientas eléctricas (lapidadoras, amoladoras, o minitornos). Consiste en ir disminuyendo la granulometría del abrasivo que se está utilizando para generar un desbaste cada vez más fino. El tamaño de grano del abrasivo se mide según la cantidad de divisiones por pulgada lineal que tiene el tamiz con el que es obtenido; es así que cuanto más grande sea el número que lo identifica, menor es el tamaño de grano.

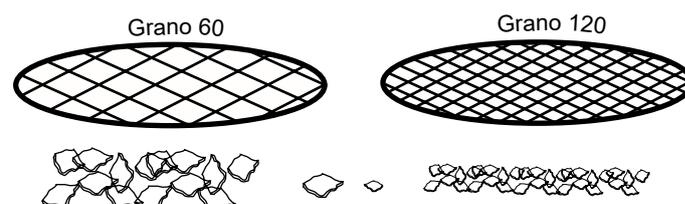


Figura 3. Esquema tamices y tamaño de grano asociado. Fuente: Elaboración propia

Para lograr un brillo comparable con el de los objetos industrializados se debe llegar a un tamaño de grano entre 1500 y 3000. Se pueden utilizar pastas para pulir que contengan ese tamaño de granulometría o menor para seguir intensificando el brillo.

06-Vitrocemento

La técnica del vitrocemento consiste en generar piezas en donde el cemento oficia de marco contenedor del vidrio. Su realización requiere de moldes en donde se coloca el vidrio y luego se cuele el cemento a su alrededor. Se debe pensar en negativo al generar el molde ya que los espacios en donde se quiera que el cemento no entre se deben sellar con otro material.

07-Vitromosaico

Consiste en pegar pequeños trozos de vidrio de colores sobre cualquier material rígido. Se pueden lograr imágenes tanto abstractas como figurativas. Se suelen utilizar vidrios translúcidos y opacos para evitar que se vea el pegamento a través de ellos, pudiendo además combinar fragmentos de otros materiales como el mármol y el nácar.

08-Emplomado

El emplomado es una técnica antigua utilizada desde la edad media, que data del siglo IX o X d.C, para realizar vitrales que consiste en la utilización de perfiles de plomo, generalmente en forma de H con alma de 4 a 5 mm de altura y alas de ancho variables entre 3 y 20 mm (Romay, Hojman, Mussio, Ulfe; 2015) los cuales rodean y sostienen trozos de vidrio de colores. Los perfiles se cortan y sueldan con estaño entre ellos generando grandes planos que son generalmente utilizados para ventanales y techos.

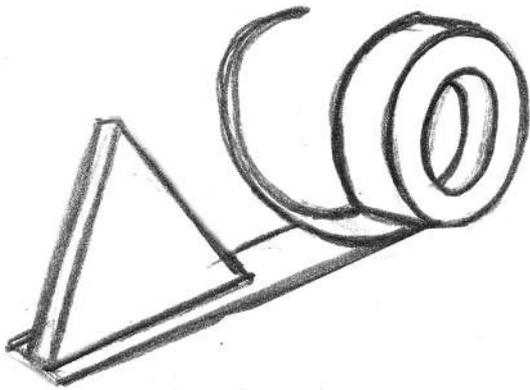


Figura 4. Esquema cinta tiffany y vidrio. Fuente: Elaboración propia

09- Tiffany

La técnica Tiffany o Copper Foil, es una técnica creada en la segunda mitad del siglo XIX para la realización de vitrales, o vidrieras (algunos autores optan por el segundo término ya que definen como vitrales únicamente a aquellos en los que se utiliza el perfil de plomo como método de unión de vidrios) y se basa en la utilización de trozos de vidrios opalescentes e iridiscentes que se unen mediante una cinta de cobre que se suelda con una aleación de estaño en sustitución del perfil de plomo (Romay et al. 2015; Cordero 2011).

Grabado

El grabado es un proceso a través del cual se le quita el brillo del vidrio, generalmente con fines estéticos pudiendo realizar gráficos sobre la superficie. Existen tres formas básicas de abrasión por las cuales se puede conseguir este acabado:

El **grabado directo (10)** consiste en desgastar la superficie del vidrio con una fresa diamantada (que puede estar motorizada o no).

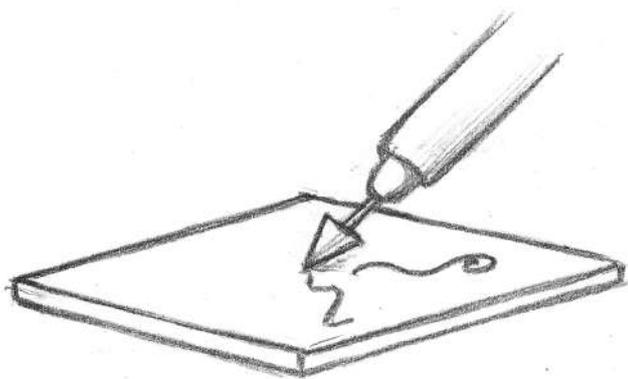


Figura 5. Esquema de grabado directo. Fuente: Elaboración propia

El **arenado (11)** es una forma de grabar el vidrio que consiste en impulsar partículas de arena o de carburo de silicio mediante aire comprimido y, al impactar sobre el

vidrio, lo desgastan superficialmente. Para conseguir figuras con líneas definidas con esta técnica deben utilizarse máscaras que evitan que las partes cubiertas se matifiquen. La granulometría del abrasivo que se utilice en el proceso influye directamente en el resultado de la textura que se adquiera en el vidrio; cuanto más fino sea el tamaño de grano más uniforme quedará la superficie.

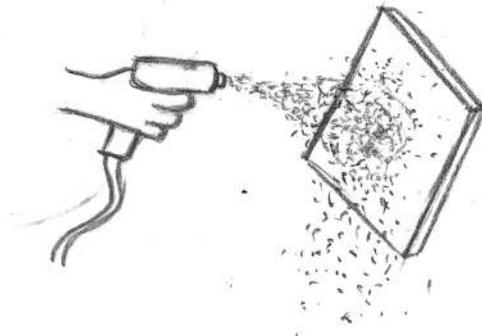


Figura 6. Esquema de arenado. Fuente: Elaboración propia

Existe un método de grabado más, que se hace cada vez más común con el avance de las nuevas tecnologías; se trata del grabado **LÁSER (12)**. Para ello es necesaria la utilización de maquinaria especializada pero que es cada vez más accesible y puede contratarse su servicio sin necesidad de poseer una. El grabado láser en vidrios puede realizarse tanto en superficie como dentro de un bloque de vidrio, sin embargo, la tecnología y los tipos de vidrio requerido para ambas acciones son diferentes. Por ejemplo, para el grabado subsuperficial, el vidrio debe ser de calidad óptica para permitir a la luz viajar a través de él sin alteraciones. En este sentido el material a grabar no debe presentar curvaturas ni planos inclinados para evitar la reflexión del haz de luz. Igualmente, en ambos casos las imágenes que se generan son formadas por pequeños puntos blancos provocados por el ataque del LÁSER que provoca microfracturas en el material. Para disminuir el efecto punteado que genera este método de grabado es posible utilizar el LÁSER levemente desenfocado (Cutler, 2012).

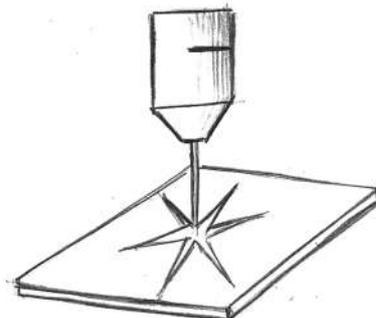


Figura 7. Esquema de grabado LÁSER. Fuente: Elaboración propia

* *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* o luz amplificada por emisión de radiación estimulada

Procesos químicos

13-Mateado al ácido

El mateado al ácido es un proceso de grabado del vidrio que consiste en aplicar una solución de ácido fluorhídrico, o mezcla de ácido fluorhídrico y sulfúrico, bifluoruro de sodio o de amonio, que ataca la superficie del vidrio. Dependiendo de la concentración, (en algunos casos) el tiempo de exposición a los químicos, y el vidrio utilizado, se pueden variar los resultados obtenidos que van desde un aspecto claro y suave con un brillo satinado hasta un efecto blanquecino y mate parecido a la escarcha (Villegas, 2016). Superficialmente la microestructura de los vidrios mateados al ácido se debe a la formación de cristales cuya forma y dimensiones dependen de la solución y el vidrio utilizado. Este proceso permite eliminar residuos de los moldes que pueden haber quedado adheridos a las piezas. Además, se pueden aplicar máscaras para delimitar las zonas en donde se quiere aplicar el ácido y en donde no.

14-Pulido al ácido

El pulido al ácido es un proceso derivado del mateado al ácido. Para ello se utilizan los mismos químicos que para el mateado radicando la diferencia en la terminación alcanzada que debe presentarse suave, con brillo notable y casi transparente. El proceso de pulido químico, al igual que el mateado, permite eliminar residuos de los moldes que pueden haber quedado adheridos a las piezas.

15-Pegados

Los procesos de pegado o adhesión son aquellos en los que se utiliza una sustancia para unir las superficies de dos materiales de forma que resista a la separación. Cuando se trabaja con vidrio los tipos que se utilizan son los adhesivos reactivos, que se caracterizan por cambiar su estructura molecular luego de colocarse entre los sustratos a unir, es decir, una vez colocados en posición, sus moléculas se unen en grandes grupos, ya sea de forma lineal o tridimensional. A este proceso de cambio físico-químico de los adhesivos se le denomina curado (Madrid, 2002).

Esta reacción puede iniciarse de diversas formas dependiendo de la sustancia adhesiva que se emplee. Por un lado, se utilizan en la industria del vidrio adhesivos de curado UV para uniones vidrio-vidrio y vidrio-metal. El adhesivo contiene una sustancia química que reacciona al exponerse a la luz ultravioleta desencadenando la polimerización de las moléculas de la sustancia. Por otro lado, los pegamentos bicomponentes consisten en dos sustancias (una resina y un

catalizador) que al mezclarse (previo a la aplicación en las superficies) inicia su lento proceso de polimerización.

Técnicas en caliente

Manipulación en caliente

Todas las técnicas de manipulación en caliente requieren luego de conformada la pieza, ser colocadas en un arca de recocido donde la disminución de la temperatura es controlada para liberar las tensiones de las piezas y evitar el choque térmico causado por una brusca disminución de la temperatura.

16- Colado

Este método consiste en levantar de un crisol vidrio fundido con un cucharón metálico (específico para esto) y verterlo sobre un molde fabricado previamente. Este procedimiento en inglés se denomina *hot casting*, lo que puede provocar confusiones con la técnica *Casting* presentada más adelante en esta sección (Sanz Lobo, 2005). El procedimiento de esta técnica se parece a las tradicionales fundiciones de metales. Las piezas que se obtienen son de vidrio macizo y suele predominar la transparencia y la translucidez.

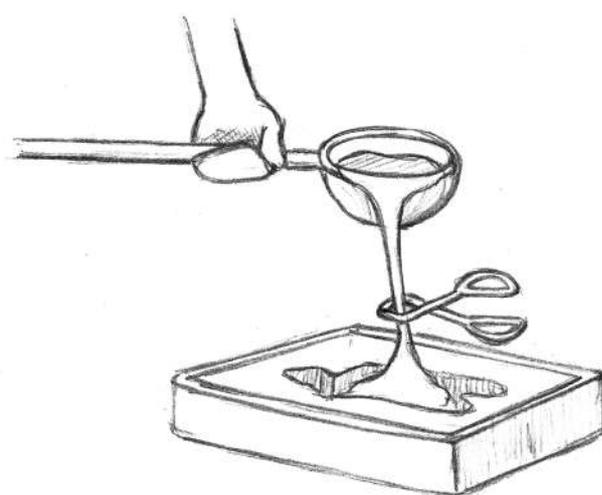


Figura 8. Esquema de colado. Fuente: Elaboración propia

17- Núcleo de arena

El proceso de conformación de piezas por núcleo de arena es la técnica más antigua de fabricación de vidrio hueco, cuyos hallazgos arqueológicos más importantes rondan el año 1500 a.C. Consiste en aglomerar en la punta de una varilla una mezcla de arena, arcilla y material orgánico, conformando lo que será el interior de la pieza. Luego de seca esta mezcla se cubre enrollando hilos de vidrio fundidos de colores que luego se peinan como forma de decorar la pieza. Una vez fría se procede a retirar el núcleo del interior por abrasión, consiguiendo la pieza de vidrio hueca. Si bien esta técnica está casi extinta ya que el método del soplado presenta mejores prestaciones, existen algunos espacios que en la actualidad reconocen el valor de las piezas fabricadas en relación a la escasa tecnología de la época y reproducen la técnica con tecnologías actuales (Amorín y Frabasile, 2021).

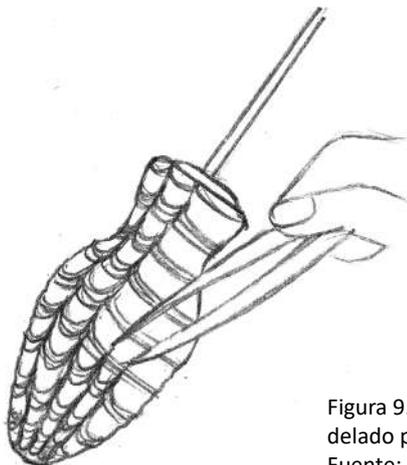


Figura 9. Esquema de modelado por núcleo de arena. Fuente: Elaboración propia

18- Soplado a boca

La técnica del soplado de vidrio surge en el siglo I a.C a partir de la invención de la caña de soplado (tubo hueco en el que se coloca una posta de vidrio en un extremo y se introduce aire por el otro). A partir de los dibujos encontrados en hallazgos arqueológicos se cree que las primeras cañas de soplado eran de arcilla, para después evolucionar a cañas metálicas como las que se utilizan hoy en día. El proceso consiste en recoger vidrio fundido (levantamiento de una posta de vidrio) de un crisol con uno de los extremos de la caña, soplar por el otro extremo a través de ella para conseguir una forma hueca, y darle forma al vidrio caliente mediante balanceos rotaciones, e intervenciones con herramientas de diferentes materiales. Vale aclarar que debido a la alta viscosidad y temperatura del vidrio el proceso requiere en la mayoría de los casos de varios sujetos para llevarlo a cabo. Una vez conformada la pieza se realiza una incisión en el vidrio sujetado al extremo de la caña, y se separa de ésta, quedando así libre de la herramienta que permitió su fabricación.

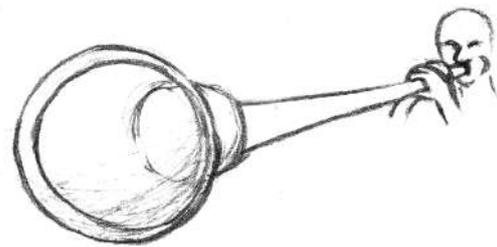


Figura 10. Esquema de soplado a boca. Fuente: Elaboración propia

Esta técnica realizada artesanalmente es una de las más populares de trabajo con vidrio en el campo de las artes, dada su larga historia y el atractivo visual del procedimiento que lleva a realizar piezas llamativas. La técnica admite tanto el conformado de piezas libremente, es decir utilizando únicamente herramientas manuales para deformar la burbuja de vidrio en el extremo de la caña, la utilización de moldes exteriores que permiten prensar el vidrio para conseguir texturas particulares en la pieza final, o moldes en taceles que permiten soplar el vidrio dentro consiguiendo una forma controlada y hasta en algunos casos reproducible, con mayor rapidez y precisión. Esto es el paso anterior a lo que hoy en día conocemos como soplado mecánico utilizado para realizar piezas de vidrio hueco industrializadas.

19- Soplete o candilón

Para esta técnica se utilizan generalmente varillas o tubos de vidrio que se calientan (alrededor de unos 1000°C) sobre un mechero o soplete y, una vez que el vidrio alcanza su temperatura de reblandecimiento, se les da forma con diferentes herramientas metálicas y de grafito. Los mecheros o sopletes ocupan mezclas de gases diferentes según la temperatura que sea necesaria alcanzar para manipular los distintos tipos de vidrio.

La técnica permite realizar fundamentalmente piezas pequeñas ya que es en éstas en las que se puede mantener las altas temperaturas en toda la pieza evitando que se rompa por el choque térmico.

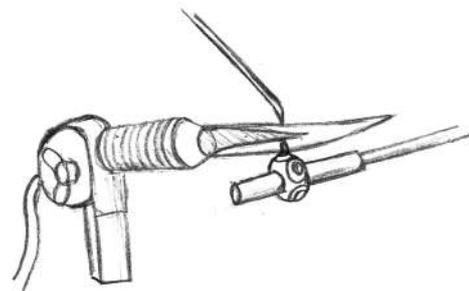


Figura 11. Esquema de soplete o candilón. Fuente: Elaboración propia

Trabajo en hornos- Manipulación en frío

De las técnicas de trabajo de vidrio en caliente, las de manipulación en frío son las de mayor desarrollo en nuestro país. Para su realización es necesario contar con hornos que permitan alcanzar temperaturas elevadas, entre 600°C y 850°C. En el mercado local se reconocen dos tipos que se utilizan para este fin: los hornos para vitrofusión, y los hornos para cerámica. El LAV cuenta con uno de cada tipo; el de vitrofusión (horno chico) de 40 x 40 cm de base y 22 cm de altura y el de cerámica (horno grande) de 40 x 40 cm de base y 70 cm de altura.

Estos tipos de hornos presentan diferencias en la posición de sus resistencias, y la forma de absorber, mantener y liberar el calor, lo que se traduce en disparidad de resultados. A este respecto se eligió un tipo de horno (horno para vitrofusión) para realizar la totalidad de los ensayos de este TFG y eliminar una variable que puede afectar las conclusiones. Escapa el alcance de este trabajo la traslación de los resultados a hornos para cerámica.

Curvas de temperatura

Los hornos utilizados para este tipo de trabajos se programan con curvas que permiten controlar la temperatura en función del tiempo durante el ciclo de horneado. En el trabajo con vidrio, es recomendable trabajar con programadores de segmentos que permiten generar rampas y mesetas. Las rampas cumplen la función de determinar la velocidad a la que asciende o desciende la temperatura dentro del horno, mientras que las mesetas lo estabilizan con diversas finalidades, como por ejemplo permitir la liberación de aire, dar tiempo a que el vidrio se deforme bajo su propio peso (dado que se trata de un líquido de alta viscosidad y un amplio intervalo de temperaturas de deformación), o permitir que se liberen las tensiones generadas en la deformación (recocido), entre otras. Los hornos del LAV permiten programar curvas de temperatura de hasta siete segmentos.

Fusión

La fusión es un proceso irreversible que consiste en unir dos trozos de vidrio mediante el aumento de la temperatura obteniendo al finalizarlo una única pieza de vidrio. Las tres categorías descritas a continuación se diferencian en la temperatura que se alcanza y la visualidad de los resultados. Esta técnica tiene como resultado piezas planas compuestas de varios vidrios, con una cara (la que no funciona de apoyo) brillante y una cara plana que toma la textura de la superficie sobre la que se apoya y tiene un resultado visual más opaco.

20- Fusión total

En los resultados de fusión total, los trozos de vidrio quedan completamente unidos y no se diferencian en la superficie de la pieza, tiene un espesor homogéneo que tiende a los 6 mm. Todas las aristas de la pieza desaparecen dejando los bordes redondeados, y las formas tienden a abombarse.

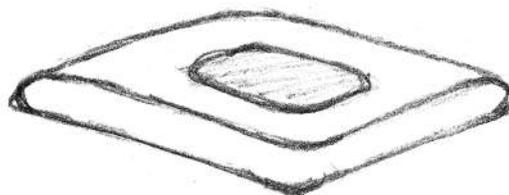


Figura 12. Esquema de fusión total. Fuente: Elaboración propia

21- Fusión en relieve

En la técnica de fusión en relieve las aristas del vidrio se redondean sobre sí mismo tendiendo a llegar a los 6mm de espesor en la suma de las placas, pero conservan su forma general perfectamente, y permite diferenciar claramente los distintos trozos de vidrio que componen la pieza.



Figura 13. Esquema de fusión en relieve. Fuente: Elaboración propia

22- Fusión parcial o tack

Esta técnica emplea la mínima temperatura necesaria para que se reblandezcan las caras más superficiales del vidrio y se unan mediante la presión que se ejerce por el

propio peso de las piezas. En este sentido destacamos las dificultades de realizar un tack fusing cuando no existe una fuerza que tienda a unirlos. Los resultados visuales de esta técnica tienen como características principales la conservación exacta de la forma de los vidrios crudos (los cantos vivos, la marca del cortante en el canto, marcas de la fractura concoidea, entre otras) y la clara diferenciación de las placas de vidrio luego del horneado.

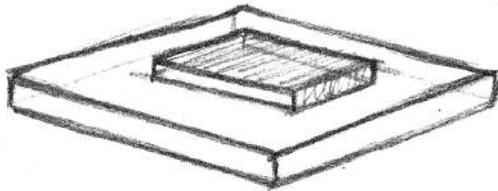


Figura 14. Esquema de fusión parcial. Fuente: Elaboración propia

Moldeado

Incluimos dentro de las técnicas de moldeado aquellas técnicas de trabajo en vidrio que requieren un molde en donde el vidrio toma su forma, generando así figuras en donde prima la tridimensionalidad.

23- Casting

Esta técnica consiste en colocar en frío dentro de o sobre un molde abierto vidrio que luego de pasar por un ciclo de horneado se une y deforma tomando la forma del molde que lo contiene. Las piezas obtenidas son de vidrio macizo y generalmente con superficies poco brillantes debido al contacto con el molde. Permite generar piezas con geometrías complejas. *“Los artistas que trabajan en este ámbito suelen (...) llamar casting a aquellas piezas en las que priman los efectos de transparencia conseguidos”* (Sanz Lobo, 2005: 418).

El casting puede lograrse a partir de fritas (o molienda) de vidrio o de trozos de mayor tamaño puestos dentro o fuera del molde (se coloca sobre el molde un crisol con un orificio en su base a través del cual el material fluirá cuando disminuya su viscosidad). La presentación de vidrio que se utiliza influye directamente en la transparencia de la pieza, dado que, cuanto más pequeños sean los trozos que se utilizan, más aire queda atrapado dentro de la pieza final y disminuye su translucidez. En el mismo sentido, a mayor tamaño, más transparente será la pieza final.

Es conveniente que las formas modeladas para casting tengan superficies planas o curvadas que permitan descubrir mediante el pulido el interior transparente o traslúcido de la pieza. Cuanto más lisas y brillantes estén las superficies del objeto que oficie de molde, más sencillo será después el trabajo de pulido (Sanz Lobo, 2005).

El modelo original se realiza generando un positivo en arcilla, plastilina, cera o incluso puede ser un objeto

natural, al que luego se le realiza un molde (generalmente de yeso) por fuera. Se procede a quitar el positivo de dentro del molde y se llena el volumen de vidrio para ser llevado al ciclo de horneado. Los moldes requieren generalmente un receptáculo donde se coloca más volumen de material del que cabe dentro del molde en frío, ya que al fluir el vidrio, el aire que se encuentra entre los trozos se desplaza fuera del molde y el volumen total disminuye.

En este proceso los moldes son (en general) piezas perdidas. En los castings de molde cerrado, es necesario desarmarlos o romperlos para quitar la pieza de vidrio cuando finaliza la horneada. Para los castings de molde abierto, si bien en principio no sería necesario romperlos para separar la pieza, los materiales que se utilizan para realizarlos suelen quedar frágiles y en parte adheridos al vidrio luego del horneado, lo que imposibilita su uso por segunda vez.

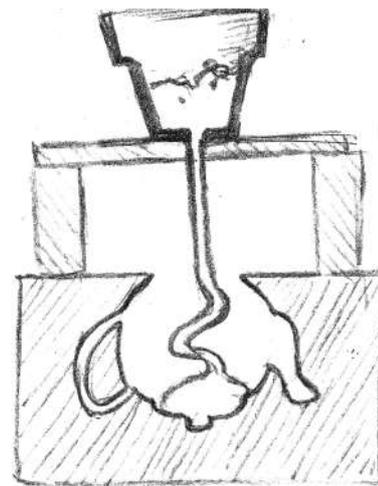


Figura 15. Esquema de casting. Fuente: Elaboración propia

24- Pasta de vidrio

La técnica de pasta de vidrio, o pâte de verre por su origen francés, consiste en aglutinar molienda de vidrio de granulometría muy fina para ser colocada prensándola sobre las paredes de un molde de boca ancha sin necesidad de colocar un contramolde, y sinterizarla mediante un ciclo de horneado. Ésta técnica permite controlar con mucha precisión la ubicación de diferentes colores en la pieza final. Los moldes utilizados suelen ser de yeso para que permita absorber la humedad de la mezcla y fijar así el vidrio contra las paredes.

Las piezas resultantes son huecas y opacas en donde predomina el color del vidrio por sobre la transparencia.

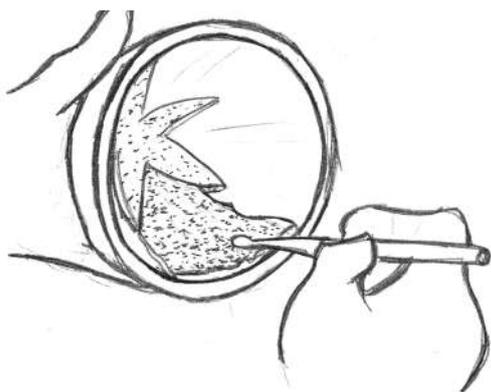


Figura 16. Esquema de pasta de vidrio. Fuente: Elaboración propia

25- Termomodelado

El termomodelado, termomoldeado, o termoformado, (a partir de ahora termomodelado) consiste en dar forma a un trozo de vidrio que, al calentarse y disminuir su viscosidad, se deforma bajo la acción de su propio peso acoplándose al molde que se sitúe debajo de él.

Algunos autores citados por Sanz Lobo (2005), distinguen con nombres diferentes los termomodelado en los que el vidrio se deforma dentro de un molde cóncavo a los que se les llama *slumping* término que en inglés refiere al hundimiento, y los termomodelados que se conforman alrededor de un molde convexo a los que se les llama *draping*, término que en inglés refiere a la acción de cubrir.

Existe una tercera forma de termoformar vidrio denominada caída libre o drop-out. En este caso, el vidrio está totalmente apoyado en un soporte, que tiene un orificio central a través del cual caerá parte de él cuando se reblandezca. La longitud de alargamiento del vidrio depende del tipo, su espesor, de la forma del orificio a través del cual cae y del ciclo de cocción. (Sanz Lobo, 2005).

Las piezas conformadas por *slumping* y *draping* tienen como características una cara brillante y lisa (la cara libre de molde) y una cara un poco más opaca y con posibles rastros de textura que es la que está en contacto con el molde en la producción. La técnica de caída libre, por el contrario, no suele presentar texturas ya que la parte que se termoforma no está en contacto con ningún molde durante el ciclo de horneado. Las tres formas de termomodelado tienen como característica la conservación de la transparencia de la placa de vidrio inicial con la que se trabaja.

Existe una categoría particular del termomodelado que se denomina *texturado*. Se define como un

termomodelado superficial y en ocasiones se considera como una técnica independiente. El texturado tiene como característica particular que el molde presenta bajo o altorrelieves que luego del ciclo de horneado quedan impresos en el vidrio. Si se utiliza esta técnica aisladamente, es decir sin combinarla con las otras formas de termomodelado, la pieza final será una placa de vidrio plano con una cara (la que no está en contacto con el molde) completamente plana, y otra (la que sí está en contacto con el molde) con bajo y altorrelieves (el negativo del molde que le dio su forma). En este sentido se habla de texturado cuando el espesor de la lámina de vidrio es igual o mayor a la profundidad del termomodelado.

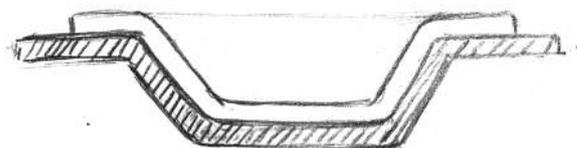


Figura 17. Esquema de termomodelado (*slumping*). Fuente: Elaboración propia

26- Coloración superficial

La coloración superficial consiste en aplicar sustancias sobre el vidrio que luego de un ciclo de horneado se vitrifican y fijan generando una fina capa de vidrio de color sobre el vidrio de base. Existen diferentes tipos de pigmentación que se pueden aplicar, así como diferentes formas de aplicación que permiten un sinnúmero de expresiones distintas.



Figura 18. Esquema de pigmentos para vidrio. Fuente: Elaboración propia

Por un lado, la aplicación de **óxidos metálicos** sobre vidrios es la forma más básica de coloración. Dado que estos óxidos se vitrifican a temperaturas mucho mayores que las utilizadas en las técnicas artesanales y semi-arte-

sanales, es necesario mezclarlos con fundentes para que se vitrifiquen y adhieran a la superficie del vidrio, o bien, colocar los óxidos entre placas de vidrio.

Por otro lado, las **grisallas** son sustancias formadas por fundentes a base de silicato de plomo y pigmentos derivados de óxidos metálicos. Esta forma de coloración es comúnmente utilizada para la realización de vitrales, en donde la mezcla de polvos se combina con un vehículo líquido como vinagre, agua, alcohol o trementina y sustancias ligantes que permitan su adhesión al vidrio, como por ejemplo la goma arábiga. En sus inicios, en la edad media, las grisallas solían tener tonos negros y marrones, aunque en la actualidad existe una gama de colores más extensa (Romay, et al, 2015).

Por su parte, los **lustres** son compuestos metálicos que, depositados en la superficie del vidrio en capas muy delgadas y luego de horneado, producen iridiscencias (Sanz Lobo, 2005; Waisman, 2009). El más antiguo y más conocido es el Amarillo de plata (compuesto metálico: nitrato de plata), también comúnmente utilizado por vitralistas.

Por último y los más actuales en cuanto a su desarrollo son los **esmaltes** para vidrio. Son sustancias compuestas en las que se mezclan fundentes, refractarios, opacificantes y colorantes para conseguir diferentes colores, grados de transparencia y efectos (Waisman, 2009).

Entre las formas de aplicación más comunes encontramos, estarcido o espolvoreado, pintado, pulverizado, esgrafiado, serigrafiado, estampados, a través de crayones o tizas; así como técnicas más actuales como la producción de calcos vitrificables y revelado de fotografías.

Inclusiones

Las inclusiones no pueden considerarse una técnica en sí mismas puesto que precisan de otras técnicas para poder ser realizadas, y se refieren a colocar o dejar atrapado dentro del vidrio otros materiales. Sanz lobo (2005) clasifica las inclusiones según si son orgánicos o inorgánicos. Dentro de los inorgánicos se encuentran los insertos metálicos, elementos cerámicos, otros vidrios o materiales vitrificados, esmaltes, arena, entre otros. Entre los elementos orgánicos pueden encontrarse insertos botánicos, fibras naturales, huesos de animales, etc. Estos últimos suelen quemarse debido a las altas temperaturas y lo que queda atrapado en el vidrio suelen ser cenizas. Es común que en este proceso quede incluido además, aire dentro del vidrio, dependiendo de la forma y posición del objeto a incluir.

Antecedentes

Del estudio preliminar de los textos sobre el tema que plantea este TFG surge que en nuestro país, los sistemas de fabricación flexible precedentes son pocos.

El antecedente local que se identificó es un proyecto aprobado por el PAIE en el llamado 2018 y continuado como tesis de finalización de grado de la carrera de Ingeniería Industrial mecánica en 2019. En estos proyectos se diseñó, y fabricó una herramienta para realizar ensayos mecánicos de conformación multi-punto de chapas metálicas, y se realizaron simulaciones computacionales para validar una variedad de superficies que se pueden generar con el sistema de RPT o *Multi Point forming* (MPF) diseñado.

Por otro lado, varios autores a nivel internacional han realizado experiencias relacionadas a moldes que presenten cierta flexibilidad de configuración mediante la variación de posición de sus elementos para diferentes técnicas de trabajo con vidrio.

Algunos de ellos se centran en la técnica de casting de vidrio como por ejemplo los trabajos de Oikonomopoulou, Bhatia, Damen, Van Der Weijst, & Bristogianni (2020). Estos autores exploran dos métodos tecnológicos de fabricación de moldes para la producción de piezas macizas de vidrio por el método de casting que permitan realizar piezas de diversas formas y tamaños. Por un lado, se aborda la fabricación de moldes de arena mediante tecnologías de impresión 3D y por otro se proyecta y simula un molde variable en metal que permite realizar piezas planas en vidrio de diversas formas y tamaños, que mediante encastres entre ellas, permiten aplicaciones arquitectónicas.

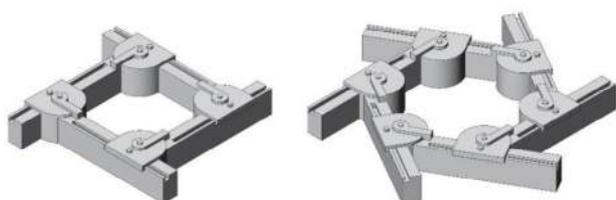


Figura 19. Proyección de molde adaptable para casting de vidrio. Recuperado de: <https://proceedings.challengingglass.com/index.php/cgc/article/view/346/325>

En otro orden, Gielen, Kitslaar y Zimny (2011) trabajan sobre el diseño de un molde que permita el termomodelado de una superficie de doble curvatura en vidrio a partir del tensado de redes de acero y el prensado del vidrio entre ellas. El sistema desarrollado requiere la manipulación del sistema metal-vidrio-metal en caliente.

Weinstein (2015), desarrolló un horno cuyo piso está compuesto por módulos que varían de altura mediante control computarizado para la fusión y termomodelado de tubos de vidrio, utilizando como herramienta un software de modelado 3D paramétrico. Este dispositivo tiene la particularidad de variar durante el ciclo de horneado, lo que le permite a su autor fusionar varios tubos de vidrio sobre una superficie plana para luego variar el molde y conformar las curvas deseadas en la misma horneada. Siendo que trabaja con enormes instalaciones escultóricas, el aspecto de realizar ambos procesos con una única curva de temperatura es destacable ya que reduce el tiempo y el costo de las horneadas. Además, el autor señala que el acopio y manipulación de moldes fijos con estas características sería inviable económicamente, ya que cada uno tendría un tamaño promedio de 1,80 x 4 x 1,60 metros.



Figura 20. Weinstein, N. (2015) Prueba de concepto de lecho dinámico de moldeado pequeño de prueba. Recuperado de: <https://nikolas.net/node/300>

Basados en el anterior, McGee, Newell y Willette (2012) proponen un sistema variable para el termomodelado de planos de vidrio. Como aspecto innovador de este trabajo, se destaca la posición estratégica de los puntos de apoyo en las esquinas del vidrio y no el plano com-

pleto, con lo que se consiguen curvas catenarias que se controlan mediante la máxima temperatura alcanzada y el tiempo de meseta en dicha temperatura. Es así que los resultados de este trabajo se distinguen por la preservación de la claridad y la transparencia del vidrio.

Por su parte, Jorgensen (2015) desarrolló un molde de ajuste manual de reconfiguración de puntos elaborado en acero inoxidable con tecnologías de fabricación

digital. El dispositivo permite la producción de objetos de escala manual a partir de planos de vidrio termo-modelado mediante los cuales el autor busca una forma de expresión. A lo largo de varios años y diversas publicaciones el autor explora y ensaya sistemas de bloqueo para el dispositivo proyectado arribando a resultados aparentemente simples y eficientes que serán tomados especialmente en cuenta para el desarrollo de este TFG.



Figura 21. Jorgensen, T. (2013) Sistema con el bowl formado al revés sobre los pins. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2076-0752/8/1/9/htm>

Sistema de modelado por configuración de puntos

Los sistemas de fabricación reconfigurables son sistemas diseñados desde el comienzo para soportar cambios en su estructura y así ajustar su capacidad productiva y funcionalidad de forma rápida dentro de una familia de piezas como respuesta a los repentinos cambios de mercado (Galán, Racero, Eguía & Guerrero; 2006).

Los sistemas o herramientas de conformación por multipunto (en adelante RPT por su sigla en inglés *Reconfigurable Pin Tooling*), son sistemas de fabricación reconfigurables que se basan en generar volúmenes a partir de la definición de la posición de los puntos de un plano. Aquellos pensados para la conformación de planos curvados permiten lograr una amplia cantidad de superficies mediante la determinación de la altura de cada uno de los formadores o puntos. La flexibilidad otorgada por la capacidad de cambiar la forma es muy valorada en las etapas de diseño y manufactura de muchos productos. En condiciones en las que la cantidad de piezas a producir

es baja y las superficies curvas son suaves. Este tipo de herramientas presentan ventajas sobre las de tipo rígidos, ya que el almacenamiento de muchas herramientas que se utilizarán en pocas oportunidades no es rentable (Cabrera & Pereira, 2019).

La primera patente conocida sobre un sistema de este tipo fue registrada en 1863 por Cochrane, y desde entonces han existido varias patentes a lo largo de los años que denotan un avance y desarrollo de la tecnología tanto a pequeña como a gran escala y que van desde configuraciones manuales a configuraciones automáticas dirigidas por comandos computarizados.

El mayor desarrollo del método de RPT es en el moldeado de planos curvados en metalurgia. Utiliza el mismo principio que el estampado de placas metálicas tradicionales donde dos matrices contrapuestas presionan la placa metálica, que gracias a su alta tenacidad*, toma la forma de la matriz sin romperse. En el RPT las matrices están formadas por barras metálicas que se ajustan en altura mediante programas de fabricación CAM y generan un plano de estampado (Cai & Li, 2002; Paunoiu, et al, 2008; Casteñeda, 2017).

En el mismo sentido, se pueden observar investigaciones dirigidas a otros materiales como plásticos y aerogeles (Alonso, Bedoya, Lauret, & Alonso, 2014) en las que pudiendo aplicar o no presión, se consiguen superficies de doble curvatura (Casteñeda, 2017).

Munro & Walczyk (2007) discuten y describen algunas variables o características que permiten clasificar los RPT en diferentes categorías. Entre ellas encontramos:

- Densidad de puntos. Refiere a la forma de distribución de los puntos en el plano. Pueden ser clasificados en dos grupos, compactos o uniformemente distanciados
- Método de traslación vertical de los puntos. Refiere a la forma en la cual el punto se mueve para adquirir la posición deseada. Los métodos pueden ser, mecánicos, neumáticos, hidráulicos y uso de robots.
- Método de control de posición de puntos. Pueden ser movidos hasta la posición deseada manualmente, automáticamente de forma seriada (un punto a la vez), o automáticamente en paralelo (varios puntos son movidos a la vez).

* Capacidad de un metal para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse

La automatización de la posición de los puntos implica control numérico computarizado

- Método de alisamiento de la superficie. Dado que las formas se componen por puntos el método de alisamiento puede ser necesario en algunos casos. Los diferentes métodos de alisamiento incluyen cubrir la superficie con un material deformable que interpole los puntos y la pieza, o utilizar cabezales deformables en los puntos.
- Grados de libertad. Incluye la configuración 2D que compone un perfil variable, configuración 3D que compone una superficie variable y la configuración 4D que compone una superficie variable en el tiempo.
- Uso de la herramienta. Se puede clasificar según si la herramienta va a ser utilizada directamente para la manufactura y modelado de piezas, o indirectamente si la superficie generada va a ser utilizada como herramienta para otro método de fabricación.

Según Munro & Walczyk (2007) y Jorgensen (2015) los RPT ofrecen flexibilidad en el diseño, manufactura, potencial de ahorro de tiempo y costos en el desarrollo de productos; sin embargo, muy pocos de estos conceptos de herramientas fueron puestos en práctica e incluso menos han sido comercializados, a pesar del considerable volumen de investigación que se ha llevado a cabo a nivel mundial. Los mismos autores destacan que algunos de los moldes propuestos para el conformado de chapas metálicas para la industria automovilística y aeroespacial, transporte, arquitectura e industrias energéticas cuestan más de un millón de dólares, tienen una resolución limitada (25 mm cuadrados) y su altura hace que el sistema pese alrededor de 20 toneladas; por lo que aún no se ha alcanzado un uso exitoso de este sistema de manufactura. Afirman también que a medida que aumenta el volumen de producción los costos serían cada vez más bajos.

El proyecto

Objetivos

Objetivo general:

- Establecer y fabricar un modelo de molde reconfigurable basado en los antecedentes internacionales.
- Analizar las posibilidades del molde fabricado

Objetivos específicos:

- Proponer y validar modificaciones de los moldes propuestos en los antecedentes para conseguir resultados visuales diferentes.
- Definir las posibilidades tecnológicas y costos de fabricar un molde reconfigurable para vidrio en Uruguay.
- Relacionar las curvas de temperatura comúnmente utilizadas en el Laboratorio de Vidrio y sus resultados visuales asociados utilizando el molde desarrollado.

Metodología de trabajo

Se tomó el trabajo de Jorgensen (2015), uno de los antecedentes, como ejemplo para analizar, reproducir y ajustar a la fabricación local. El análisis se realizó mediante maquetas que permitieron el ajuste del sistema de bloqueo de las varillas para luego desarrollarlo en metal.

Partiendo de las experiencias previas realizadas en el Laboratorio de Vidrio de la EUCD y los antecedentes, se realizaron horneadas sistemáticas variando los parámetros que influyen en la definición formal del molde, así como también las curvas de temperatura.

Se relevaron proveedores de materiales y servicios del mercado local con el fin de generar un dispositivo factible de ser realizado en nuestro país. Se mantuvo un contacto sostenido con los proveedores de servicios a fin de ajustar todos los parámetros necesarios para su fabricación. Además se evaluaron los costos de los diferentes métodos de producción según las posibilidades tecnológicas encontradas en plaza.

Por último se testeó el molde fabricado con diferentes curvas de temperatura y espesores de vidrio para definir la relación con los resultados visuales de las piezas que se obtienen. Además se propusieron y testearon modificaciones para disminuir el marcado de los puntos en el vidrio, y para intensificarlos.

Uno de los aspectos fundamentales para realizar una investigación basada en ensayos de laboratorio es el registro detallado de los ensayos controlando todas las variables posibles que intervienen en el proceso.

A partir de experiencias personales previas de ensayos en el Laboratorio de Vidrio, se decidió realizar fichas de registro para cada una de las muestras con parámetros determinados que permiten ordenar el proceso de sistematización, la comparación de resultados y la generación de conclusiones.

Todos los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo con las siguientes cuatro curvas de temperatura del LAV :

PROGRAMA

5

PROCESO

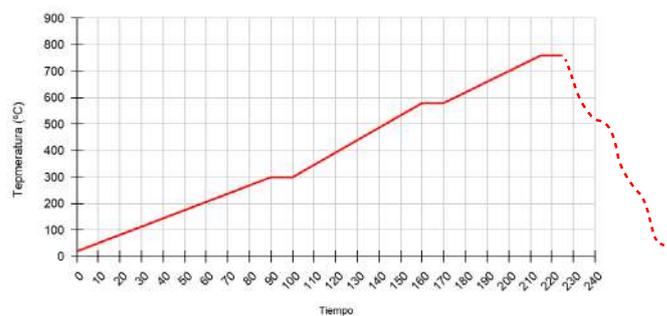
Termomodelado
(la casita)

FECHA

24/06/2016

	PT (min)	PE	PSP (°C)	LP
0	--		20	
1	90	03	00	
2	10	03	00	
3	60	05	80	
4	10	05	80	
5	45	07	60	
6	10	0	760	
7		0		

Gráfica



PROGRAMA

3

PROCESO

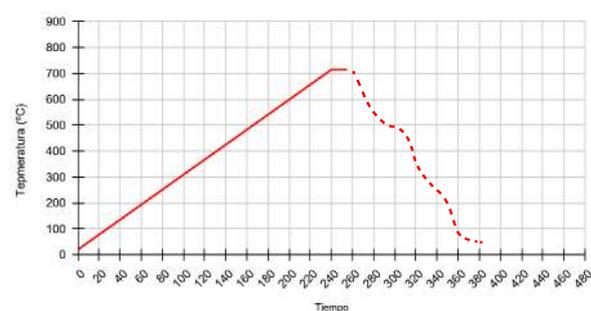
Tack

FECHA

20/10/2018

	PT (min)	PE	PSP (°C)	LP
0	--		20	
1	240	0	715	
2	15	0	715	
3		0		
4		0		
5		0		
6		0		
7		0		

Gráfica



PROGRAMA

2

PROCESO

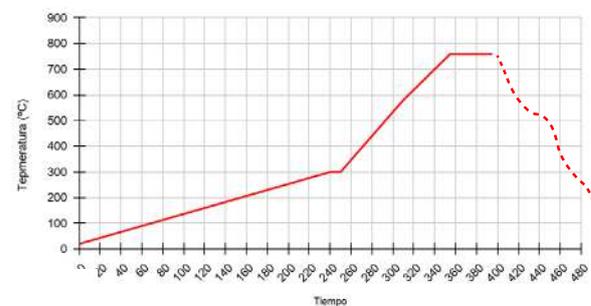
Termomodelado

FECHA

-

	PT (min)	PE	PSP (°C)	LP
0	--		20	
1	240	0	300	
2	10	0	300	
3	60	0	580	
4	45	0	760	
5	40	0	760	
6		0		
7		0		

Gráfica



PROGRAMA

6

PROCESO

Termomodelado
mínimo

FECHA

30/08/2021

	PT (min)	PE	PSP (°C)	LP
0	--		20	
1	90	0	300	
2	10	0	300	
3	60	0	580	
4	30	0	670	
5	40	0	670	
6		0		
7		0		

Gráfica

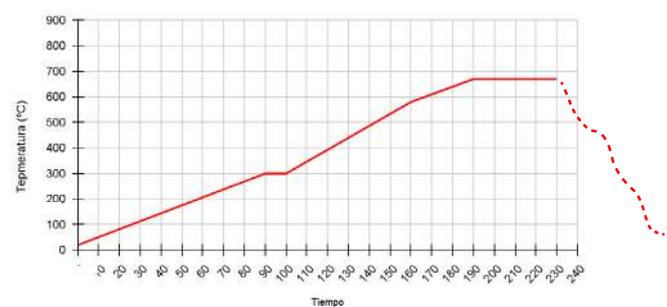


Figura 22. Curvas de temperatura del Laboratorio de Vidrio de la Escuela Universitaria Centro de Diseño. Representación propia.

Las curvas de temperatura anteriormente presentadas se referencian dentro de este TFG por el número de programa y la temperatura y tiempo de su meseta final según indica el siguiente cuadro:

Tabla 1 <i>Referencia de curvas de temperatura dentro de este TFG</i>		
Proceso	Nro de programa en el horno para vidrio del LAV	Meseta final
Termomodelado	2	760º- 40 minutos
Termomodelado (la casita)	5	760º- 10 minutos
Tack	3	715º- 15 minutos
Termomodelado mínimo	6	670º- 40 minutos

Fuente: Elaboración propia.

Delimitación del proyecto

El problema

Una de las técnicas comúnmente utilizadas para generar volúmenes de vidrio de fabricación artesanal y semi artesanal es el termomodelado. El termomodelado, como se presentó anteriormente en el capítulo *Procesos de trabajo artesanales y semi-artesanales en vidrio*, parte del uso de hojas de vidrio plano industrial que al someterlas a altas temperaturas alcanzan un estado termoplástico y se deforman bajo su propio peso por acción de la gravedad acoplándose a un molde (Villegas, 2016).

Es por esto que el molde tiene un rol fundamental en esta técnica, que exige a quienes la trabajan, aprender primero a desarrollar con otros materiales las formas a las que aspiran, para luego poder introducirse en el termomodelado de vidrio. Los moldes utilizados suelen ser de cerámica, acero, yeso o placas de fibras cerámicas, y aprender a trabajar con ellos puede ser un proceso largo y muchas veces indeseado. Vale aclarar también, que algunos de estos materiales generan moldes efímeros que se rompen o incineran luego de realizar una horneada, como lo son los moldes de yeso o materiales orgánicos, lo que implica la realización de un molde nuevo cada vez que se va a realizar un termomodelado.

Por otro lado, incluso con moldes que permiten más de un uso como lo son los de bizcocho cerámico, acero y placas de fibras cerámicas, cualquier ajuste que se quiera realizar al diseño de una pieza requiere la fabricación de un molde nuevo dado que no suelen poderse realizar grandes modificaciones a los ya fabricados.

Por último, en emprendimientos productivos de vidrio la diversidad de moldes adquiridos o fabricados ocupan un espacio significativo en los talleres, requiriendo en algunos materiales, como por ejemplo el bizcocho cerámico o los materiales refractarios, cuidados especiales en cuanto a su fragilidad o toxicidad. En un diagnóstico preliminar en talleres de vidrio se tomaron algunas fotos que muestran el acopio de moldes en estos espacios.



Figura 23. Fotografía del taller cedida por Radamez Theoduloz, Uruguay.

Aporte del TFG al proceso de diseño en vidrio

A lo largo de los años se ha pretendido ordenar el proceso de diseño y desarrollar un método que lo refleje y que aún hoy sigue en construcción. Si bien diversos autores presentan abordajes con diferentes etapas, pasos y procesos, parecen acordar que se trata de un proceso no lineal, en donde la iteración es fundamental para el desarrollo de soluciones.

Se recopilaron a continuación algunos autores cuyos esquemas o diagramas de flujo* visibilizan la necesidad de la iteración en el proceso de diseño. Se destaca que aún cuando los esquemas parecen lineales, se suele adjuntar un párrafo que relativiza la linealidad del modelo, así como reformulaciones de los diagramas que han variado con el correr de los años transformándose de lineales a iterativos.

* El diagrama de flujo o flujograma o diagrama de actividades es la representación gráfica de un algoritmo o proceso.

El diagrama que presenta Munari (1981) es uno de los ejemplos de esquema lineal, pero adjunta la siguiente aclaración:

“El esquema del método proyectual, ilustrado en páginas precedentes no es fijo, no está completo, y no es único ni definitivo. Es lo que la experiencia nos ha dictado hasta ahora. (...) el diseñador está siempre dispuesto a modificar su idea frente a evidencia objetiva, es así como cada uno puede aportar su contribución creativa a la estructura de un método de trabajo que tiende, como es sabido, a obtener el máximo resultado con el mínimo esfuerzo.”
(Munari, 1981 :54)

Bürdek (1994), por su parte, realiza una recopilación de diagramas de diferentes autores, entre los que se destacan Bonsiepe (1974), Don Koberg & Jim Bagnall (1976) y el propio Bürdek (1975) como modelos iterativos, haciendo énfasis en que, el proceso de aproximaciones y retroalimentaciones de las soluciones a problemas, imposibilita la linealidad del desarrollo del diseño.

En el mismo sentido, Ries (2012) con su metodología *Lean Startup* para el desarrollo de negocios y productos, plantea un circuito que pretende segmentar los procesos de ideación y testear los resultados lo antes posible para obtener *feedback**, aprender y poder realizar ajustes justificados a los procesos de ideación en curso.

Desde otra perspectiva, Goldschmidt (2014) al presentar el movimiento y desarrollo de métodos de diseño a partir de 1960, también compila y resume diversos diagramas en cascada con pasos hacia atrás en los que se enmarcan autores como Hubka & Eder (1982, 1996), Pahl & Beitz (1984,1996), Pugh (1991), Roozenberg & Eekels (1995), Ullman (1992), Heath (1984) y por otro lado con diagramas espiralados, Asimov (1962), Watts (1966) y Mesarovic (1964). Todos los anteriormente mencionados constituyen diagramas iterativos.

Incluso entidades como el British Design Council con métodos de diseño famosos como el *Doble Diamante para el diseño de servicios*** , ha actualizado su diagrama en 2019, transformando su modelo lineal en un modelo iterativo.

Podemos afirmar entonces, que la iteración en el proceso de diseño es un factor clave y fundamental que se ha desarrollado a lo largo de los años y es ampliamente aceptado hoy en día por autores y entidades referentes en el ámbito del Diseño. Es en este sentido que cabe destacar la pertinencia de la creación de un molde variable que permite la iteración en el proceso de diseño de una pieza de vidrio termomodelado.

* Devolución/ retroalimentación

** <https://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/double-diamond-15-years>

Brief de diseño

Concepto de producto

Dispositivo que se utiliza para dar forma a un plano de vidrio mediante la técnica de termomodelado semi artesanal, que permita variar su forma y facilite el proceso de diseño con el material.

Explicación ampliada del concepto de producto

Se proyectó un molde para termomodelado de vidrio plano para artesanos y diseñadores que fabrican piezas de vidrio de forma artesanal o semiartesanal.

El objetivo principal del dispositivo es facilitar el proceso de diseño de las piezas en vidrio que producen los usuarios, dando posibilidad de ajustar y variar el molde a las formas proyectadas sin necesidad de realizar uno nuevo.

El dispositivo cuenta con un sistema de puntos variables en altura que permite transformar el plano en el que el vidrio se apoya una vez que se reblandece y deforma durante el ciclo de horneado. Es así que este dispositivo permite realizar variedad de formas de termomodelado, disminuyendo la cantidad de moldes necesarios en un taller en donde se realizan piezas de vidrio.

Como forma de ordenar los requisitos del molde variable a desarrollar se generó la siguiente tabla donde se clasifican entre indispensables, deseables y optativos.

Requisito	I	D	O	Justificación
Plano de apoyo variable (forma)	X			Permite la generación de productos diferentes con un mismo dispositivo
Resistencia a altas temperaturas	X			El termomodelado es un proceso que requiere horneadas que pueden alcanzar los 790º de temperatura
Estabilidad dentro del horno	X			Asegura que el dispositivo se mantendrá en la posición en la que se colocó dentro del horno durante todo el ciclo de horneado
Fácil bloqueo y desbloqueo del sistema para variar el plano de apoyo para el vidrio		X		Facilita la usabilidad del dispositivo. La complejidad de uso no debe ser excesiva respecto a los moldes tradicionales
Resistencia a gran cantidad de horneadas		X		Permite la utilización prolongada del dispositivo y amortigua sus costos
Posibilidad de utilizar un interpolador			X	Para evitar las marcas profundas de los puntos del molde y permitir una visualidad diferente
Posibilidad de utilizar cabezales intercambiables			X	Para evitar las marcas profundas de los puntos del molde

Fuente: Elaboración propia.

Proyección y desarrollo del molde

Definiciones de diseño

A partir de los antecedentes internacionales presentados, y tomando como modelo el trabajo de Jorgensen (2015) dada su complejidad media y la factibilidad de replicarlo en el marco de este trabajo de grado, se realizaron los siguientes análisis y se tomaron las decisiones expuestas en esta sección.

Parámetros generales que se utilizarán para la proyección del molde basados en Munro & Walczyk (2007)

En el molde proyectado se optó por la definición de los siguientes parámetros según su justificación asociada:

- Densidad de puntos: Uniformemente distanciados. Debido a que todos los procesos de trabajo con vidrio en caliente requieren de un recocimiento para volver a ordenar las moléculas del material y liberar las posibles tensiones que se hubieran generado en su proceso de conformación, se opta por reducir al mínimo la masa que compone el molde para minimizar la inercia térmica dentro del horno y acortar el recocimiento. De este modo, se minimiza el tiempo de horneado que lleva una pieza, y en consecuencia también el costo de producción.
- Método de traslación vertical de los puntos: Mecánico. El movimiento vertical de los puntos es permitido o restringido mecánicamente mediante piezas de bloqueo.
- Método de control de posición de puntos: Manual. Debido a la falta de conocimientos en materia de ingeniería, mecánica y programación, se optó por un sistema simple manual abordable en este TFG. Los resultados de esta investigación pueden aplicarse a un sistema automático para mejorar la usabilidad y precisión del dispositivo propuesto.
- Método de alisamiento de la superficie: Si bien en principio el dispositivo está pensado para actuar sin

un interpolador, es posible pensar en colocar manta de fibra cerámica o papel cerámico* para disminuir el marcado de los puntos en la superficie modelada, o colocar cabezales cerámicos en los puntos que varíen la visualidad de los objetos creados con este molde.

- Grados de libertad: El molde proyectado plantea la configuración de una superficie variable (3D).
- Uso de la herramienta. La herramienta está pensada para ser utilizada directamente para la manufactura y modelado de piezas finales o prototipos.

Los usuarios

El dispositivo fue pensado para aquellas personas que realizan o quieren incursionar en la técnica del termo-modelado de vidrio. Entre ellas destacamos, artesanos, artistas y diseñadores quienes pueden encontrar utilidad en el dispositivo proyectado para el desarrollo de nuevos productos o para la propia producción. Se identifica a los usuarios de este molde con un perfil joven, creativo e innovador, que se interesa por la experimentación y las herramientas de trabajo que facilitan o dan oportunidades distintas a las que ofrece el mercado.

Esquema básico del dispositivo a proponer

El esquema básico general del dispositivo para su funcionamiento consiste en dos placas paralelas con perforaciones (C1) y varillas perpendiculares (C2) que las atraviesan y generan en sus puntas, el plano sobre el que se apoya el vidrio.

* La manta de fibra cerámica y el papel cerámico son desmoldantes laminares utilizados en el trabajo con vidrio. Son aislantes, resistentes a altas temperaturas y se fabrican a partir de alúmina y silicato

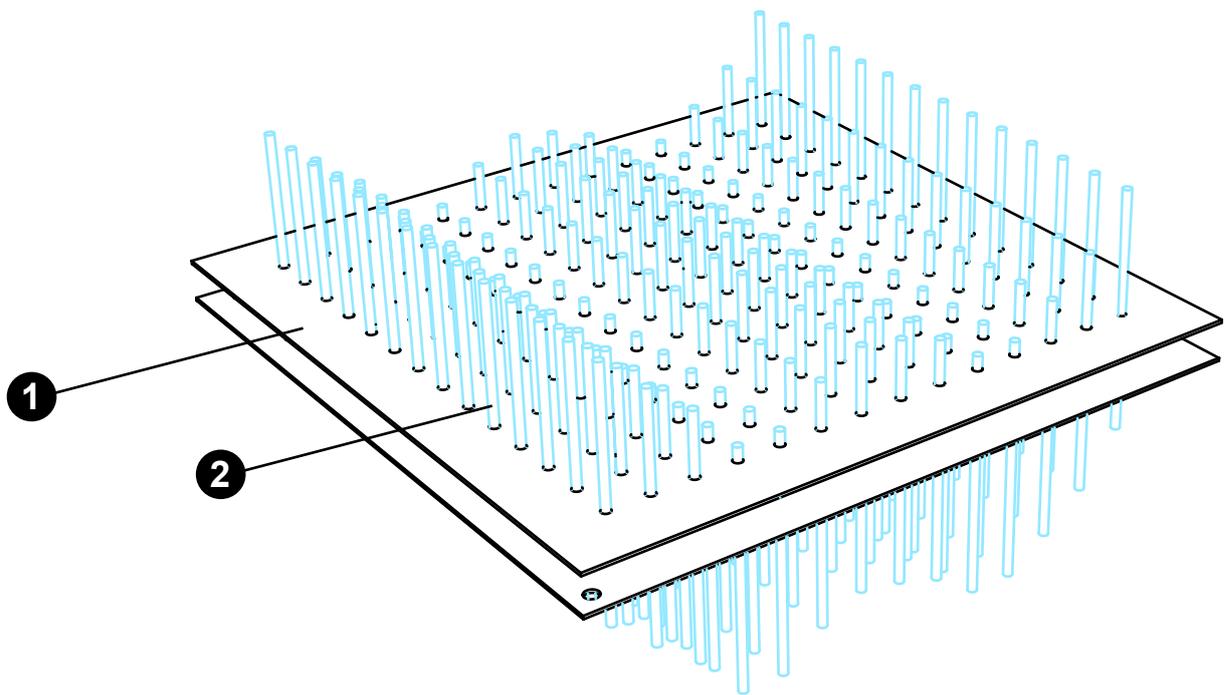


Figura 24. Esquema general del dispositivo. Fuente: Elaboración propia.

Definición de la forma general del dispositivo

Se eligió realizar un dispositivo de base cuadrada ya que se entiende que la tecnología necesaria para realizar cortes circulares en vidrio no es tan accesible como un cortante para realizar cortes rectos. Además, el corte de círculos suele requerir un pulido posterior de los cantos, ya que la temperatura a la que llega el ciclo de horneado no los brillará. Esto implica la necesidad de más herramientas y/o maquinaria para realizar piezas de vidrio de base circular.

De igual manera, la misma investigación para este molde, puede aplicarse a un molde de base circular, u otras geometrías para conseguir el que más se adapte a los requerimientos e intereses de cada persona.

Medidas

Como se mencionó en la sección *Metodología* para realizar la experimentación se utilizaron las instalaciones de los talleres de la EUCD. Se utilizó específicamente el horno de vidrio cuyas dimensiones son de 40 x 40 cm de base, y 20 cm de altura, de abertura vertical.

Dadas las dimensiones del horno, y basándonos en la teoría de que el aire debe poder circular alrededor de la pieza de vidrio uniformizando la temperatura

en todo el interior mediante las corrientes de convección, se generará un molde con medidas máximas de 32 x 32 cm de base, lo que permite centrar el molde en el horno y dejar un margen de 4 cm a su alrededor.

Separación entre placas

Para definir la separación entre placas se utilizó un simulador bidimensional digital.

Se dibujaron los cortes de dos situaciones de separación de placas, de 10 mm y de 20 mm. Visto que las perforaciones de las placas deben tener una tolerancia para permitir que las varillas puedan moverse libremente a través de ellas, y en base a la experiencia de Jorgensen (2015) se realizaron las perforaciones de 4,2 mm de diámetro. Se colocó un corte longitudinal de una varilla de 4 mm de diámetro en la perforación de 4,2 mm y se rotó de forma tal de definir la mayor inclinación que una varilla podría adquirir.

Se determinó que la distancia de 10 mm entre placas permite una variación de 0,51°, lo que, según la altura definida más adelante en este texto de las varillas se traduce en un margen de error de 1 mm radiales. Dicho de otra forma, el lugar en el que se pueden encontrar las puntas de las varillas donde apoyará el vidrio se encuentra en un círculo de 6 mm de diámetro con centro en centro de la perforación de la placa.

Por otra parte, la distancia de 20 mm entre placas permite una variación de $0,23^\circ$, y un margen de error de 0,45 mm. Es decir, que la punta de la varilla puede encontrarse dentro de un círculo de 4.9 mm de diámetro con centro en el centro de la perforación.

Considerando los valores anteriormente mencionados, se considera que la distancia de 20 mm entre placas presenta un margen de error aceptable para el trabajo a realizar.

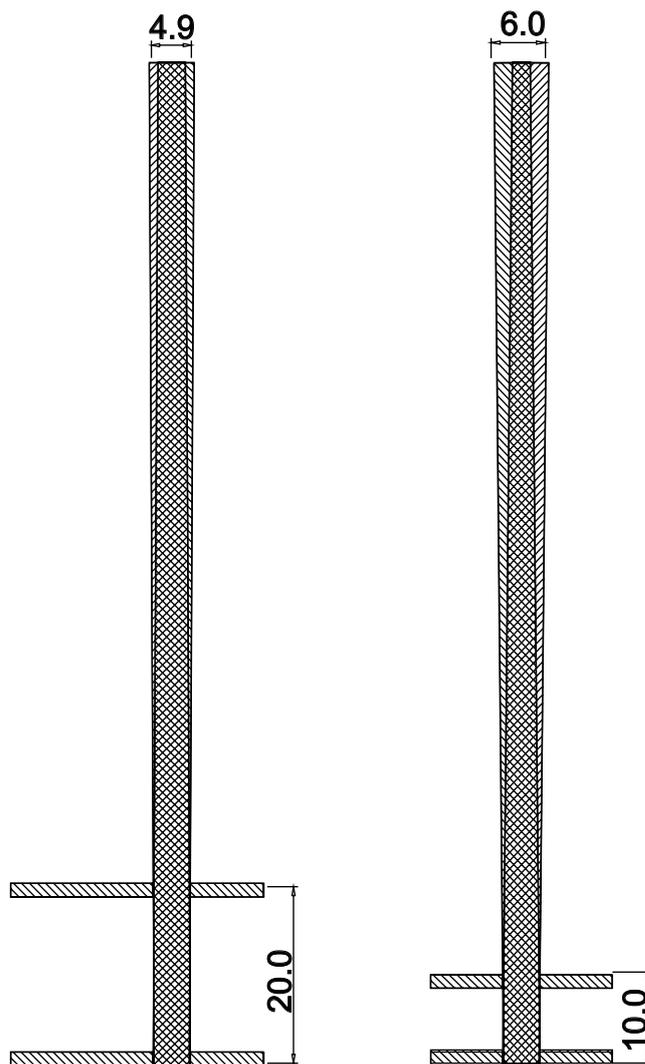


Figura 25. Simulación de separaciones de placas. Fuente: elaboración propia

Definición de la altura de las varillas del dispositivo final

El largo de las varillas está definido por la altura total utilizable del horno en el que se realizaron los ensayos de laboratorio de la siguiente manera:

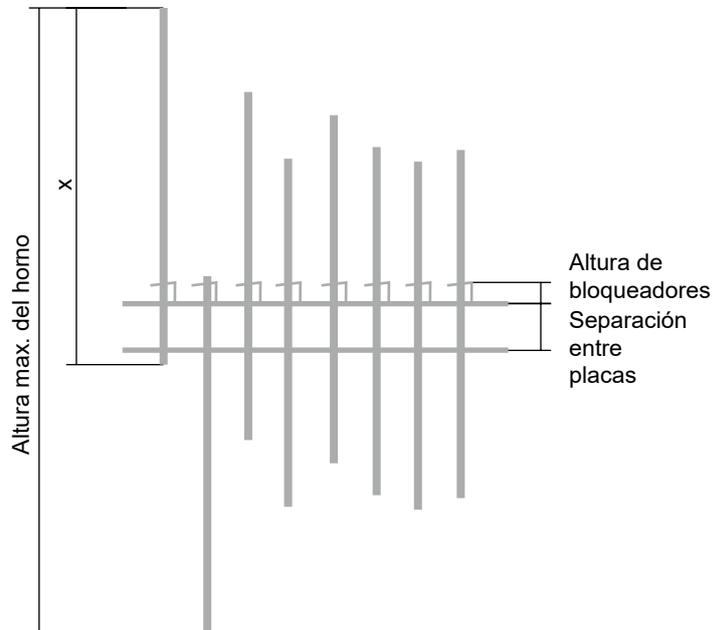


Figura 26. Esquema de definición de altura de varillas. Fuente: elaboración propia

Siendo:

Altura max. del horno = 20 cm
 Separación entre placas = 2 cm
 Altura de bloqueadores = 0.8 cm

$$X = \frac{\text{Altura max. del horno} - \text{separación entre placas} - \text{Altura de bloqueadores}}{2} + \text{Separación entre placas} + \text{Altura de bloqueadores}$$

$$X = \frac{20 - 2 - 0.8}{2} + 20 + 8$$

$$X = 11,4 \text{ cm}$$

El largo de las varillas define además la profundidad máxima de un termomodelado utilizando este molde que queda definida como:

$$H_{\text{max}} = \text{Altura de las varillas} - (\text{Separación entre placas} + \text{altura de bloqueadores})$$

$$H_{\text{max}} = 11,4 - (2 + 0.8)$$

$$H_{\text{max}} = 8.6 \text{ cm}$$

Definición de distancia entre los puntos

La distancia entre los puntos determina la definición de los volúmenes a generar con el molde proyectado, y la densidad de marcas de puntos en las piezas moldeadas. La decisión de distancias entre puntos se basó en dos aspectos claves. Por un lado la manipulación del molde incluido el método de reconfiguración y por otro la

definición o fidelidad de las piezas a generar con este dispositivo. Para testear estos aspectos se generaron una serie de maquetas con los puntos uniformemente distribuidos con tres separaciones diferentes: 12 mm, 20 mm y 30 mm.

Las maquetas se realizaron con materiales que permitieron su testeado a altas temperaturas.

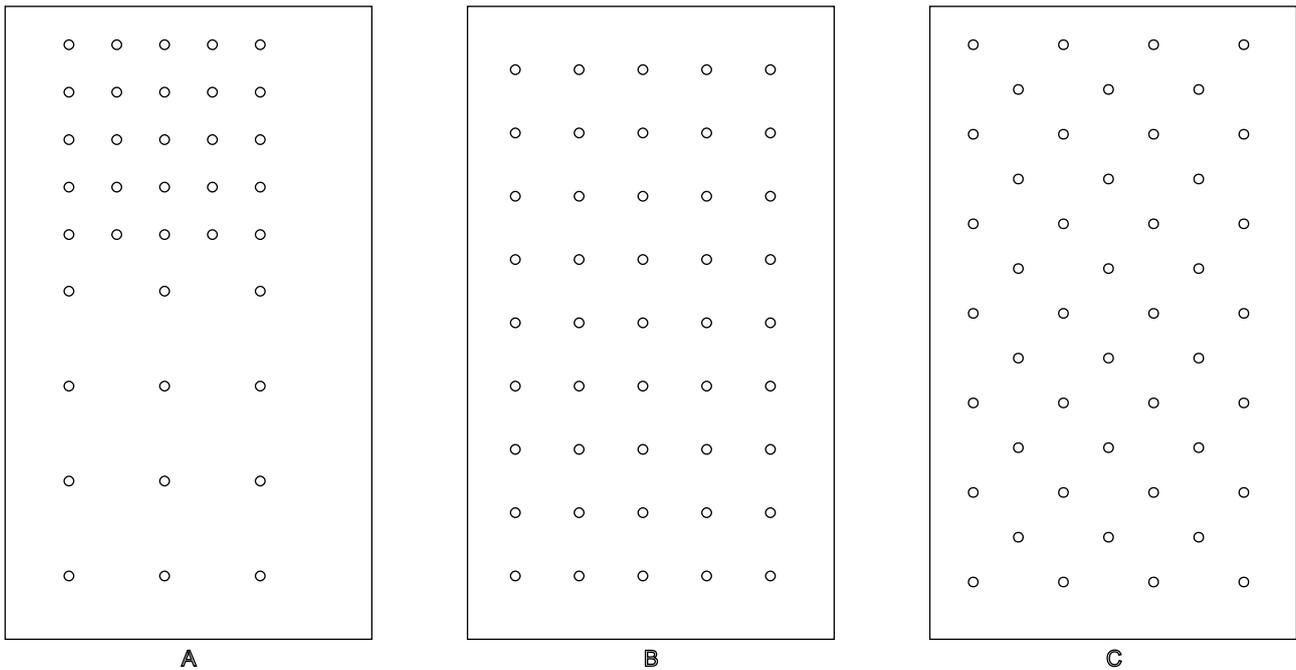


Figura 27. Esquema de posicionamiento de puntos sobre ladrillos. Fuente: Elaboración propia

La posición de los puntos del ladrillo A están determinados por una grilla de 12 y 30 mm de lado. Los puntos de los ladrillos B y C están definidos por una retícula de 20 mm; en donde la del ladrillo C está rotada 45 grados para testear cuál sería la mejor disposición de las varillas para el termomodelado del vidrio.



Figura 28. Serie de maquetas para testear las distancias entre puntos

A partir de las maquetas y una simulación rápida de un posible sistema de bloqueo en PVC se concluye que:

- La distancia de 12 mm entre puntos complejiza la manipulación del bloqueo y desbloqueo de las varillas. El usuario pierde control de la configuración y no puede realizar ajustes manualmente. Ni siquiera se cuenta con el espacio suficiente para manipular las piezas con un elemento auxiliar, sin perjudicar la configuración de los puntos adyacentes.
- La distancia de 20 mm entre puntos permite la manipulación manual del bloqueo y desbloqueo de las varillas, con cierto cuidado. El usuario puede ayudarse de un elemento auxiliar para permitir una manipulación más precisa de los puntos a reconfigurar, evitando alterar los puntos adyacentes.
- La distancia de 30 mm entre puntos permite la manipulación manual cómoda del bloqueo y desbloqueo de las varillas sin alterar los puntos adyacentes. El usuario puede ayudarse de un elemento auxiliar o no para la manipulación.



Figura 29. Manipulación de maqueta en distancia 12 mm



Figura 30. Manipulación de maqueta en distancia 20 mm



Figura 31. Manipulación de maqueta en distancia 30 mm

Por otro lado, se sometió a las maquetas a tres horneadas con las curvas de temperatura programa 3- 715º 15 minutos y programa 5-760º 10 minutos para verificar la definición de termomodelado que se adquiere con cada una de las distancias entre puntos propuestas. Se adjuntan a continuación la ficha tipo y las fichas de registro de las muestras realizadas que permiten visualizar y comparar los resultados obtenidos.

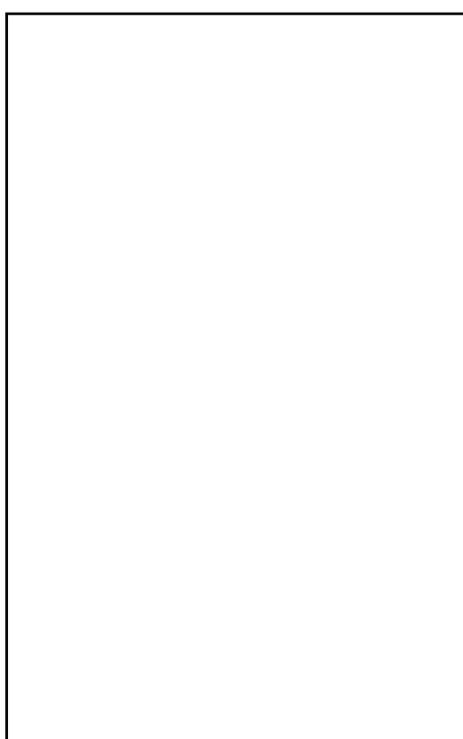
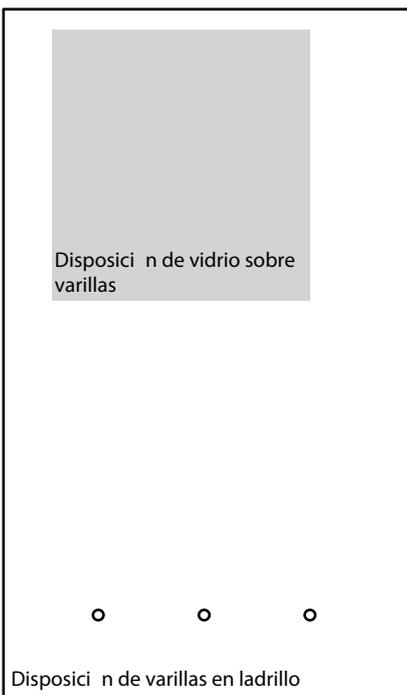
 <p>UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY</p>	 <p>Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo UDELAR</p>	 <p>Escuela Universitaria Centro de Diseño</p>
Fichas de pre testeos		Prueba: # <u> 0 </u>
Horno utilizado: _____		Fecha: <u> DD </u> / <u> MM </u> / <u> AAAA </u>
_____		Fotografía del resultado: 
Curva de temperatura: _____ _____		
Espesor del vidrio: _____ mm		
Código del ladrillo utilizado: _____		
Esquema de disposición molde-vidrio:		
 <p>Disposición de vidrio sobre varillas</p> <p>○ ○ ○</p> <p>Disposición de varillas en ladrillo</p>		Observaciones y conclusiones: _____ _____ _____ _____ _____

Figura 32. Ficha de registro de pre-testeos tipo. Fuente: Elaboración propia

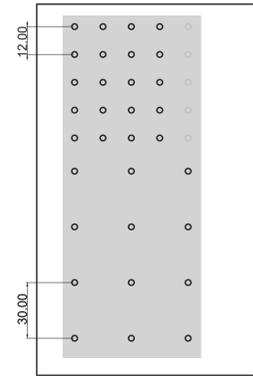
Fichas de pre testeos Prueba: # 1

Horno utilizado: Para vidrio - LAV Fecha: 07 / 03 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
Se destaca el brillo intenso de ambos lados del vidrio. Los puntos de apoyo no son uniformes ya que las alturas de las varillas no eran idénticas.

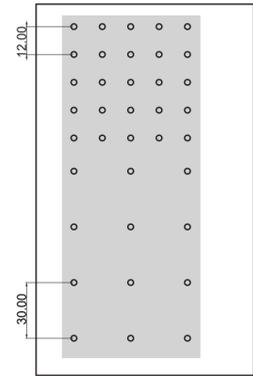
Fichas de pre testeos Prueba: # 2

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 11 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
En la separación de 30 mm se observa una caída exagerada del vidrio entre los puntos de apoyo. La aproximación del vidrio al plano generado en la separación de 15 mm es interesante.

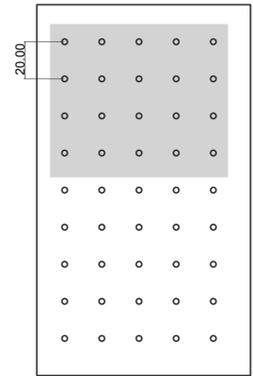
Fichas de pre testeos Prueba: # 3

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 11 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
La caída de vidrio entre varillas no es demasiado exagerada. Se cree que se puede alcanzar una buena aproximación a las formas deseadas ajustando la curva de temperatura y el espesor del vidrio.

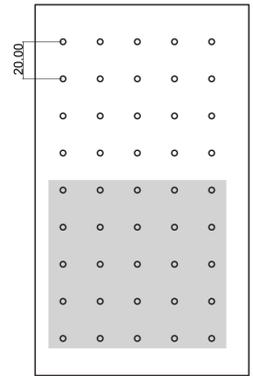
Fichas de pre testeos Prueba: # 4

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 11 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
En este caso el espesor del vidrio aporta a que el vidrio casi no caiga entre las varillas pero si sea modelado por ellas. Esta distancia entre varillas permite versatilidad de visualidades.

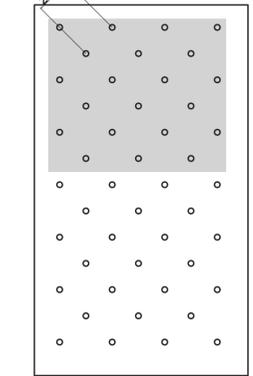
Fichas de pre testeos Prueba: # 5

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 11 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
Los bordes del vidrio presentan mayor caída que el centro dado que la distancia entre varillas paralelas al borde del vidrio es mayor (diagonal de cuadrado 20 x 20 mm).

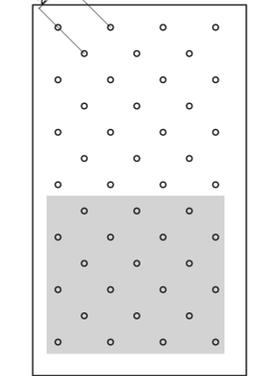
Fichas de pre testeos Prueba: # 6

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 11 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:

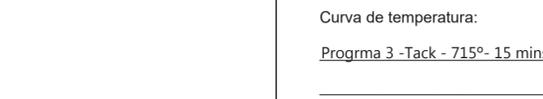


Observaciones y conclusiones:
El vidrio casi no se deforma bajo su propio peso en los espacios sin apoyo exceptuando las puntas del vidrio que presentan mayor caída por la distribución de las varillas.

Fichas de pre testeos Prueba: # 7

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 12 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
La caída del vidrio entre los puntos de apoyo es mínima. En la sección de 15 mm de separación el vidrio no llega a tocar todas las varillas.

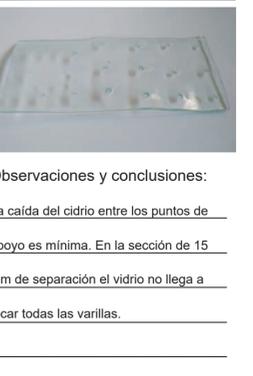
Fichas de pre testeos Prueba: # 8

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 12 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
Esta curva de temperatura genera un menor marcado de las varillas en el vidrio y una menor caída entre varillas. Se debe comprobar la profundidad máxima de termomodelado de una pieza.

Fichas de pre testeos Prueba: # 9

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 12 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
En los bordes en donde el vidrio sobresale un poco más de las varillas de apoyo se genere una caída mayor. Hay que cuidar la posición del vidrio sobre el molde para generar simetría.

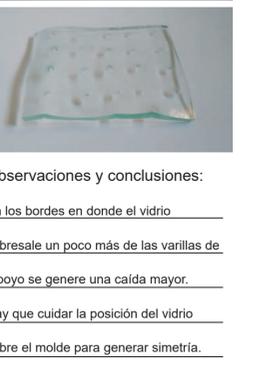
Fichas de pre testeos Prueba: # 10

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 12 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
La doble curvatura del vidrio generada por la disposición de las varillas impide que los bordes "volados" del vidrio caigan exageradamente.

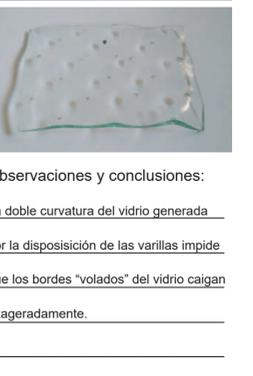
Fichas de pre testeos Prueba: # 11

Horno utilizado: Para vidrio - alquilerado Fecha: 12 / 06 / 2021

Fotografía del resultado:



Esquema de disposición molde-vidrio:



Observaciones y conclusiones:
El plano se mantiene casi intacto exceptuando una esquina que carecía de apoyo. El vidrio apenas alcanza a tocar algunas varillas. Se cree necesario aumentar la temp. o el tiempo de horno

A partir de los testeos realizados y las conclusiones de las piezas en vidrio se define que la distancia entre puntos cuyo balance entre manipulación del sistema y definición de termomodelado se ajusta mejor a los requerimientos proyectados es la de 20 mm con distribución ortogonal paralela a los bordes del dispositivo.

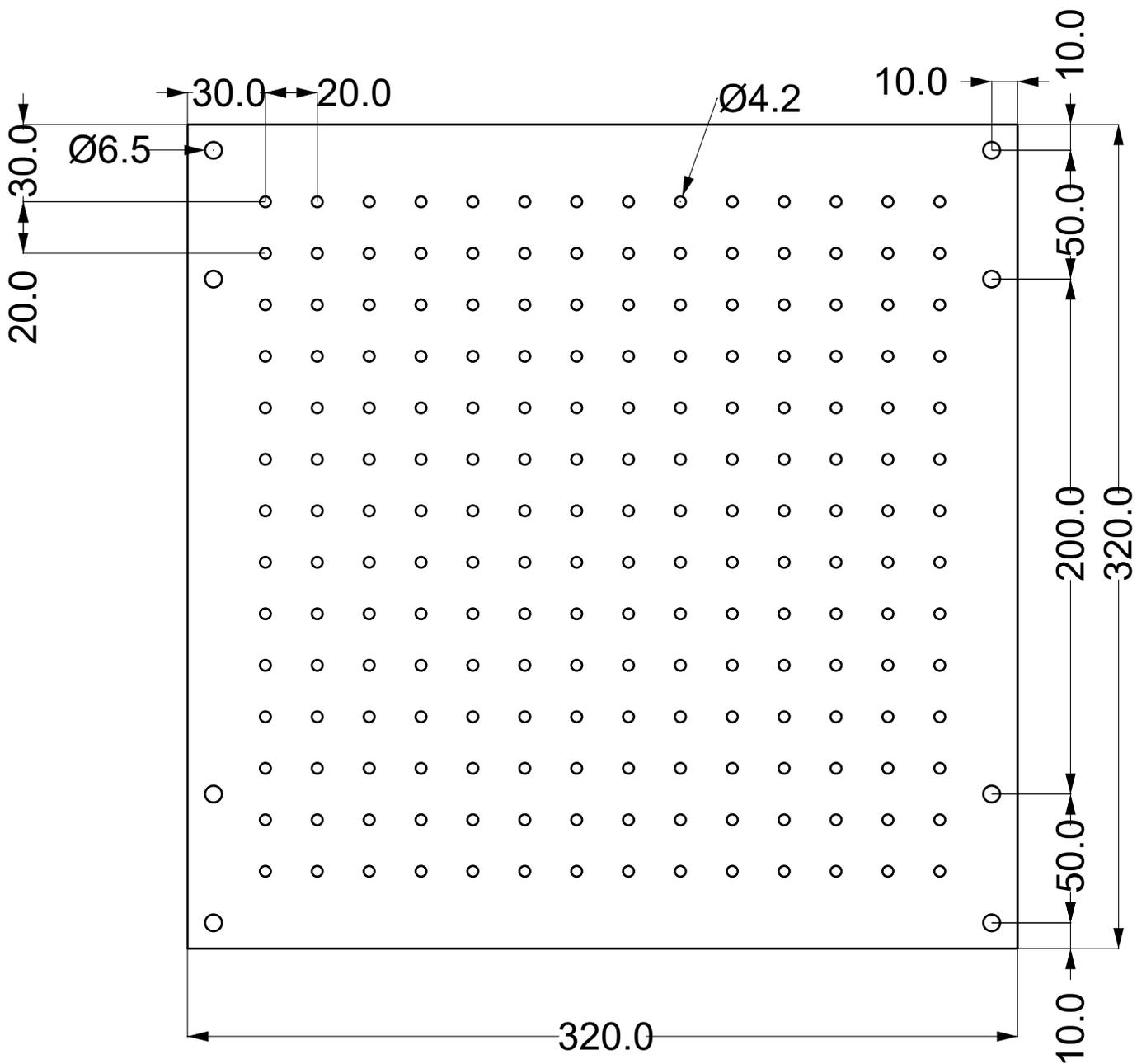


Figura 33. Vista superior acotada del componente C1 que define la distancia entre los puntos. Fuente: elaboración propia

Definiciones tecnológicas

Material

En base a los antecedentes internacionales y las experiencias propias en el LAV se eligió realizar el molde en metal ya que estos materiales componen moldes muy duraderos. Su dilatación y contracción debido a las diferencias de temperatura es muy rápida y similar al vidrio, lo que minimiza las posibles tensiones y roturas de las piezas durante el ciclo de horneado. Además, su inercia térmica es baja permitiendo que el sistema se enfríe más rápidamente y disminuyendo las posibilidades de desvitrificación*. No son materiales tóxicos lo que implica una fácil y segura manipulación por parte de los usuarios.

Debido a que la intención del molde es que pueda ser utilizado múltiples veces, se eligió el acero inoxidable (aleación de hierro (Fe), Cromo (Cr) y Níquel (Ni)) debido a su resistencia a la corrosión y punto de fusión elevado.

Luego de un relevamiento de mercado primario se identificó que los aceros inoxidables que se presentan tanto en placas como en barras en el mercado local son fundamentalmente los austeníticos de la serie 300 (y entre ellos el 304 y el 316). Estos aceros tienen la ventaja de combinar buena maquinabilidad y buenos comportamientos a altas temperaturas.

Se consultó a los vidrieros latinoamericanos de la empresa Romero-Gurman con más de 30 años de experiencia en la industria del vidrio en una conversación personal acerca del grado de acero a utilizar en la que se recomendó el acero 304, ya que si bien se ennegrece, no se corroe al someterlo a múltiples horneadas.

Si bien algunos aceros inoxidables austeníticos con suficiente carbono presentan una sensitización al ser expuestos a las temperaturas de termomodelado de vidrio, alrededor de los 760º, por largos períodos de tiempo, que pueden implicar una corrosión intergranular y en consecuencia la disminución de concentración de cromo homogénea en la aleación (Vázquez Hernández; 1996), que afecta sus propiedades mecánicas, estas modificaciones son imperceptibles al ojo humano (Avner, Haen & Mejía; 1979) y para la apli-

* Cristalización que se produce en el vidrio como consecuencia de un calentamiento prolongado u otros factores que origina una pérdida de transparencia y la visualidad blanquecina tornasolada

cación en moldes para vidrio, la disminución de la resistencia mecánica no afecta el resultado. Esto se probó experimentalmente con un trozo de varilla sometiéndolo a más de 50 horneadas de termomodelado incluso manteniendo la temperatura en 760º C por períodos de tiempo de una hora y media, y aún no existe descascaramiento que pueda afectar el resultado del termomodelado de vidrio. Si bien no mantendrá su brillo y superficie lisa luego del primer ciclo de horneado, este proceso es conveniente para permitir que el desmoldante utilizado se adhiera a la superficie del metal. El desmoldante más común utilizado en el LAV y en este TFG es el caolín*. Se emplea en forma de polvo, se hidrata generando una suspensión del material en un medio acuoso y se aplica con pincel o pulverizador sobre los moldes a utilizar.

Como antecedentes de fabricación de moldes para vidrio en este material se destacan dos instancias en las que participé como estudiante. Por un lado, durante el desarrollo del curso Laboratorio de Vidrio II 2019, realizamos un sistema de molde en acero inoxidable compuesto de dos taceles y un molde interior. Un tacle fue fabricado con acero de 0,9 mm de espesor y el otro tacle del molde se realizó con acero de 1,2 mm. En el tacle de 0,9 se observa una leve deformación de una pared. El tacle de 1,2 mm de espesor no sufrió deformaciones a través de las 6 a 8 horneadas a las que fue sometido. El molde interno de este sistema presentaba un espesor de 1,8 mm que, si bien no se deformó a través de las horneadas a las que fue sometido, sí implicó cierta dificultad al momento de realizarlo para adquirir la forma deseada.

Por otro lado en el proyecto financiado con fondos del Programa de Apoyo a la Investigación Estudiantil (PAIE) de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) denominado *Desarrollo técnico para el reciclaje de vidrio templado de ventanillas de vehículos***, y basado en la experiencia transitada en el Laboratorio de Vidrio II, se fabricó un molde de acero inoxidable con partes de 1,0 y 1,5 mm de espesor, el cual quedó completamente estable durante las más de 15 horneadas a las que se lo sometió.

A partir de la información anteriormente presentada, de las experiencias previas de trabajo con vidrio, y del relevamiento de proveedores presentado más adelante, el acero elegido para la realización del molde es el 304 de espesor 1,5 mm y de 1,0 mm de espesor dependiendo de la parte del dispositivo a realizar.

* Arcilla en la que predomina el mineral caolinita

** http://www.fadu.edu.uy/laboratorio-vidrio/files/2021/10/PAIE-Desarrollo-t%C3%A9cnico-para-el-reciclaje-de-vidrio-templado-de-ventanillas-de-veh%C3%ADculos._compressed.pdf

Los puntos para el conformado del molde serán secciones de varilla de 4mm de diámetro, basado en las dimensiones utilizadas por Jorgensen (2015) y en la manipulación del sistema.

Mecanismo de bloqueo de varillas

Para definir el sistema de bloqueo de las varillas se realizó el siguiente cuadro para analizar las ventajas y desventajas de un sistema de bloqueo general en comparación con un sistema de bloqueo individual. Ambos han sido planteados o proyectados por los antecedentes presentados (Jorgensen, 2015); sin embargo, no todos presentan el mismo grado de eficiencia y durabilidad.

	Ventajas	Desventajas
Sistema de bloqueo general (Todas las varillas a la vez)	<ul style="list-style-type: none"> -Al liberarse la tensión todas las varillas quedan sueltas y pueden moverse a la vez. -Mayor facilidad en el sistema de reconfiguración 	<ul style="list-style-type: none"> -Sistema desarrollado no perdurable, requiere un nuevo desarrollo y testeos -No se pueden mover las varillas individualmente una vez trabadas, lo que puede generar dificultades para modificar un diseño de molde
Sistema de bloqueo individual (Cada varilla con su bloqueador)	<ul style="list-style-type: none"> -Se puede mover una varilla sin alterar el resto ni perder la forma que ya se generó -Mayor control de la forma que toma el molde. 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere mayor cuidado en la manipulación para el desbloqueo de las piezas individuales -Requiere pensar una alternativa para desbloquear más de una varilla a la vez al momento de reconfigurar todo el molde.

Fuente: elaboración propia

Se optó por un sistema de bloqueo individual para cada varilla basado en el concepto de traba mecánica. Como método para la reconfiguración total del dispositivo se agrega una varilla auxiliar de 32 cm de largo que permite desbloquear las varillas por filas.

Para comprender el funcionamiento y evaluar la efectividad del mecanismo de bloqueo propuesto por Jorgensen (2015) se realizaron maquetas a escala 4:1 con PVC, un tarugo de madera, bulones y tuercas.

El primer testeó consistió en evaluar las diferencias en la efectividad de bloqueo de la pieza plegada según el ángulo en el que se pliegue. Se comprobó que los ángulos rectos y agudos generan un mejor bloqueo, ocupan menos espacio en la superficie (vista superior) lo que permite una manipulación más precisa en la reconfiguración de la posición de los puntos. Entre estos dos, el ángulo agudo es el que genera un bloqueo más resistente al deslizamiento de la varilla.



Figura 34. Maquetas escala 1:4 del sistema de bloqueo de varillas individuales con variante de la altura del bloqueador

La segunda serie de maquetas pretendió testear la variación en la funcionalidad en la altura de la pieza plegada. De estas muestras se concluye que a mayor altura del mecanismo de bloqueo más fácil es la manipulación. Sin embargo, cuanto más alta sea esta pieza menos profundidad de termomodelado tiene el molde, por lo que se resuelve realizar una pieza con una altura de 7 mm y proponer un desbloqueo con una varilla auxiliar.

El ángulo agudo, de 80° , permite un desbloqueo voluntario de las varillas más rápido y sencillo mediante el empuje de la arista de apoyo o mediante el levantamiento del otro extremo (ver *Representación de principios básicos de funcionamiento*).

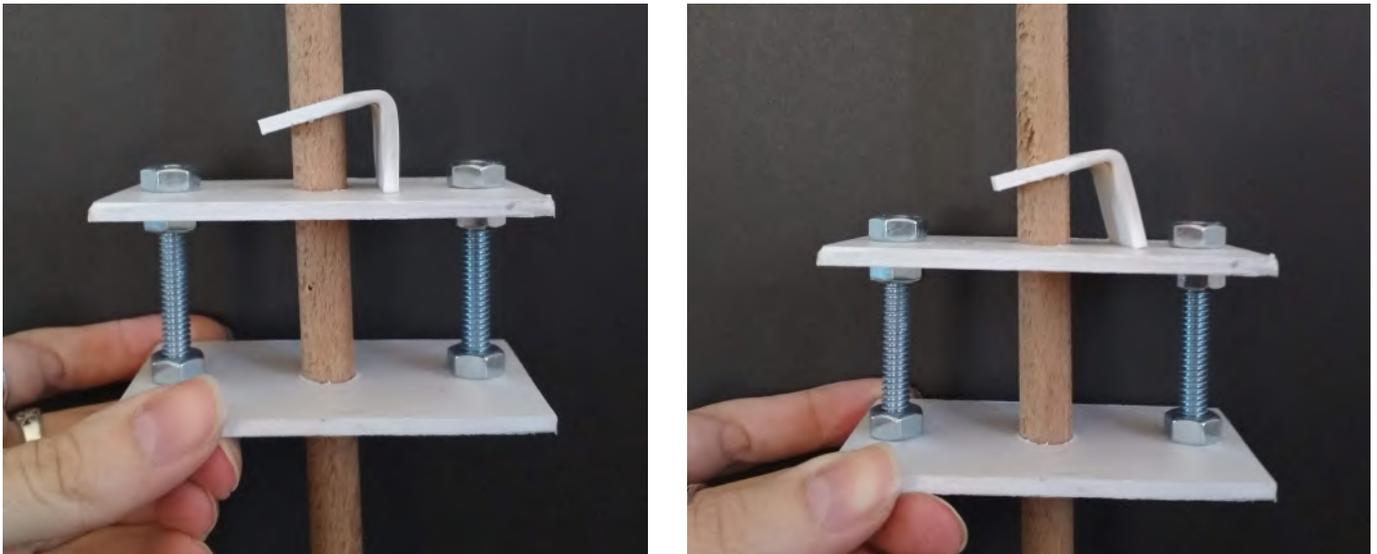


Figura 35. Maquetas escala 1:4 del sistema de bloqueo de varillas individuales con variante del ángulo de pliegue

A partir de estas maquetas se concluye que, siendo el diámetro de la varilla 4 mm, la pieza de bloqueo (C3) debe tener las siguientes medidas.

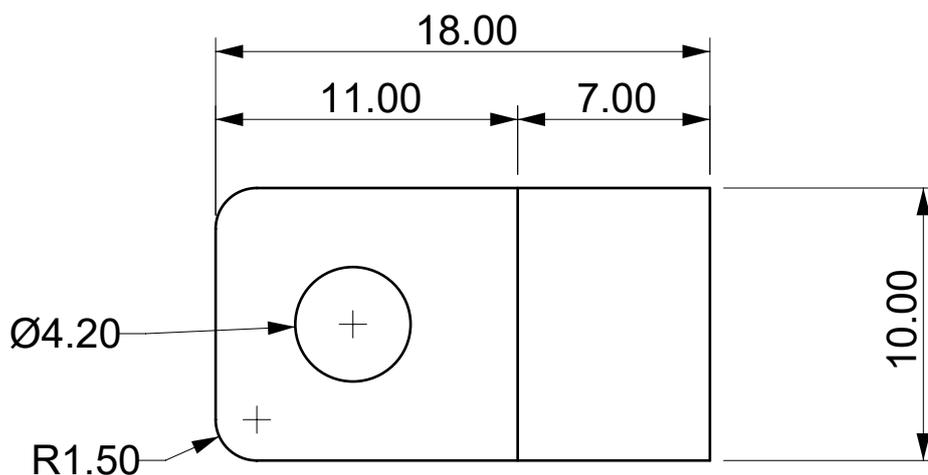


Figura 36. Medidas del sistema de bloqueo. Fuente: elaboración propia

Representación de principios básicos de funcionamiento

Las siguientes imágenes representan el funcionamiento del mecanismo de bloqueo-desbloqueo de las varillas. Cuando el dispositivo está bloqueado la propia fuerza peso de las varillas hace que las piezas C3 se inclinen hacia adelante y la traben por rozamiento mecánico. El desbloqueo se realiza con una varilla auxiliar. Cuando la varilla auxiliar empuja las piezas C3 los orificios de las placas de apoyo y las piezas de bloqueo se alinean paralelamente liberando la varilla del rozamiento mecánico que la trababa y cae por su propio peso.

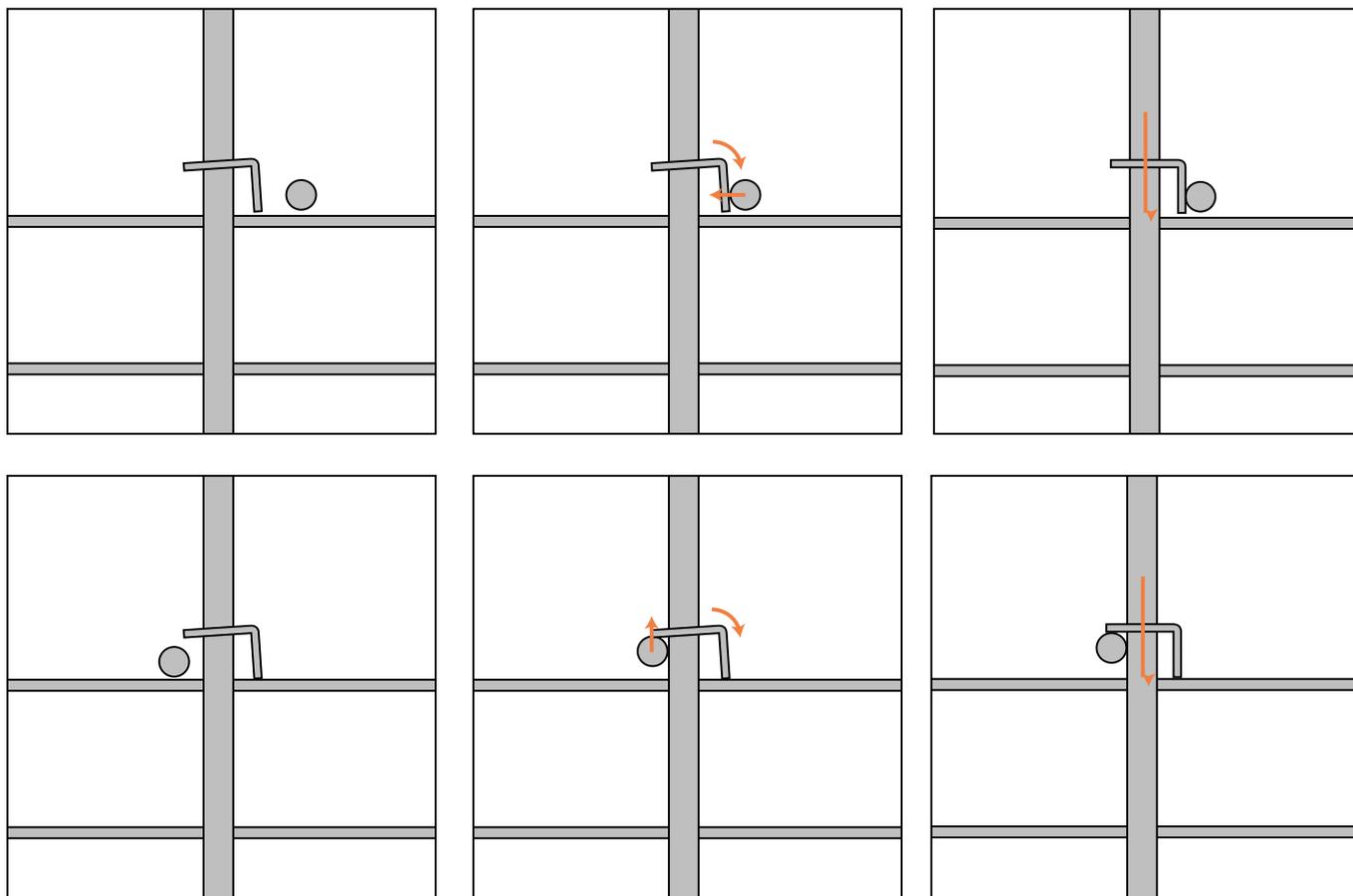


Figura 37. Principios básicos de funcionamiento del sistema de bloqueo. Fuente: elaboración propia

Además, se identificó que, dado que los bloqueos no permiten que las varillas se deslicen hacia abajo pero si es posible moverlas hacia arriba, era necesario agregar un sistema de apoyo para el dispositivo, que permita apoyarlo sobre una superficie sin perder la configuración generada. Para ello se le agregaron orificios a las placas C1 en las esquinas, se le generaron patas con varilla roscada de acero inoxidable que se fija al sistema con tuercas, lo que permite variar la altura del sistema si se quiere alejar o acercar el vidrio a las resistencias del horno. Además, para evitar el deterioro del piso del horno causado por el peso del dispositivo, se agregó un plano de apoyo de acero inoxidable (C4) que permite disminuir la presión de las patas y distribuir el peso del dispositivo en una superficie mayor.

Dispositivo proyectado

Dadas las anteriores definiciones formales el dispositivo proyectado se define de la siguiente manera:

Explosión y componentes

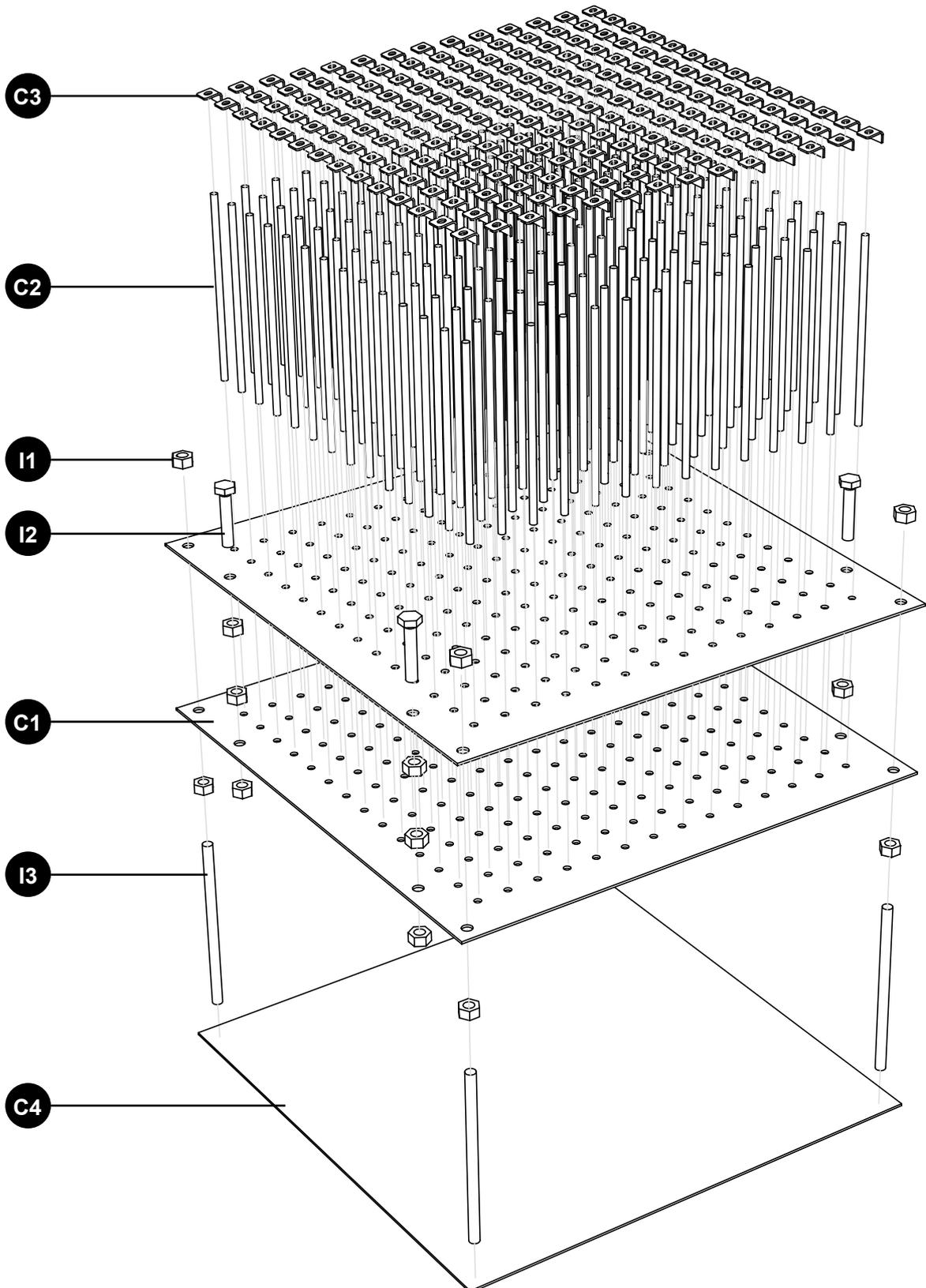


Figura 38. Explosión de componentes del dispositivo proyectado. Fuente: elaboración propia

Tabla 4
Tabla de componentes del dispositivo desarrollado

Nombre	Código	Función	Material	Proceso	Cantidad
Placa perforada	C1	Estructura del dispositivo	Acero inoxidable 304	Corte láser	2
Varillas	C2	Puntos de apoyo para el vidrio	Acero inoxidable 304	Corte	196
Bloqueadores	C3	Bloquear el movimiento vertical de las varillas	Acero inoxidable 304	Corte láser y plegado	196
Base	C4	Proteger el piso del horno distribuyendo el peso del dispositivo en la superficie	Acero inoxidable 304	Corte	1

Fuente: Elaboración propia.

Relevamiento de proveedores

Material:

En cuanto a las varillas de acero inoxidable, se relevaron cuatro proveedores que comercializan varillas de acero inoxidable de 4 mm de diámetro. Se distingue que solo uno de los proveedores cuenta con varillas de acero inoxidable 316 de 4mm de diámetro, por lo que en base a las discusiones sobre el material realizadas anteriormente en este trabajo y la disponibilidad y costo en el mercado, se decidió trabajar con acero inoxidable de grado 304.

El rango de costos de este material varía entre US\$ 2.38 a US\$ 23.68 + IVA la varilla de 4 metros.

Teniendo en cuenta que la fabricación del dispositivo requiere en total 22.4 metros de varilla, el costo unitario del material debe multiplicarse por 6. Esto genera una variabilidad en costo de material de entre US\$ 14.28 a US\$ 142 + IVA dependiendo el proveedor que se elija.

Debido a que todos los proveedores de servicio de corte ofrecen el material y se incluye su costo en el presupuesto, no se relevaron proveedores de chapa de acero inoxidable.

Proveedores de servicios:

Dentro de los siete proveedores locales relevados para realizar el trabajo se destacan las tecnologías CNC para el corte de chapa por LÁSER, hidrocorte y punzonado. No se encontró en el mercado local un proveedor que realice ruteado CNC de chapas de acero inoxidable, proceso que utiliza Jorgensen (2015) en su trabajo.

Diversas empresas presupuestaron el material y el trabajo de corte de los elementos C1 y C3 entre los cuales se distingue el punzonado como el proceso más económico (US\$ 160 + IVA), seguido por el corte LÁSER (entre US\$ 180 y US\$ 300 + IVA dependiendo de la empresa) y por último el hidrocorte (entre US\$ 430 y US\$ 550 dependiendo de la empresa).

Si bien se presupuestó el sistema de plegado CNC para los bloqueadores, dado su alto costo (US\$ 147 + IVA) en relación al costo total del molde, se optó por realizar un sistema alternativo de plegado manual con topes para garantizar la similitud de todas las piezas.

El sistema se generó con una bisagra, un trozo de chapa del mismo espesor de los bloqueadores a plegar, un trozo de planchuela y dos tornillos con tuerca mariposa.

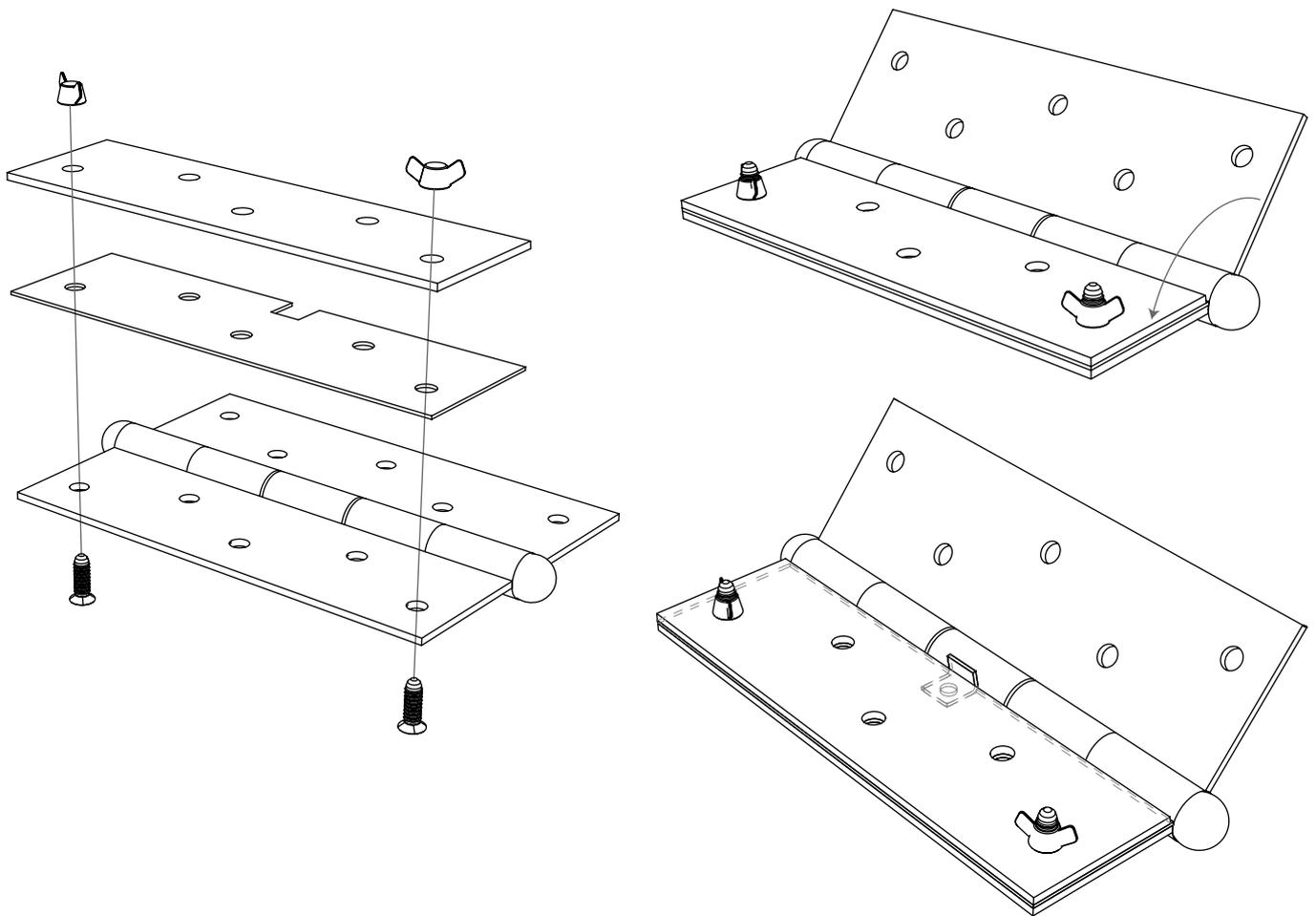


Figura 39. Esquema de sistema alternativo de plegado con bizagra. Fuente: elaboración propia

Insumos

Como proveedor se eligió una empresa que contaba con todos los insumos necesarios para la realización del producto. Se adjunta a continuación la tabla de insumos del dispositivo proyectado.

Tabla 5				
<i>Tabla de insumos del dispositivo desarrollado</i>				
Código	Nombre	Función	Material	Cantidad
I1	Tuerca ¼	Sujeción de placas C1 y patas	Acero inoxidable	20
I2	Bulon ¼ X 1 ½	Sujeción de placas C1	Acero inoxidable	4
I3	Varilla roscada ¼	Patas	Acero inoxidable	1

Fuente: Elaboración propia.

Ver flujo productivo en Anexo A

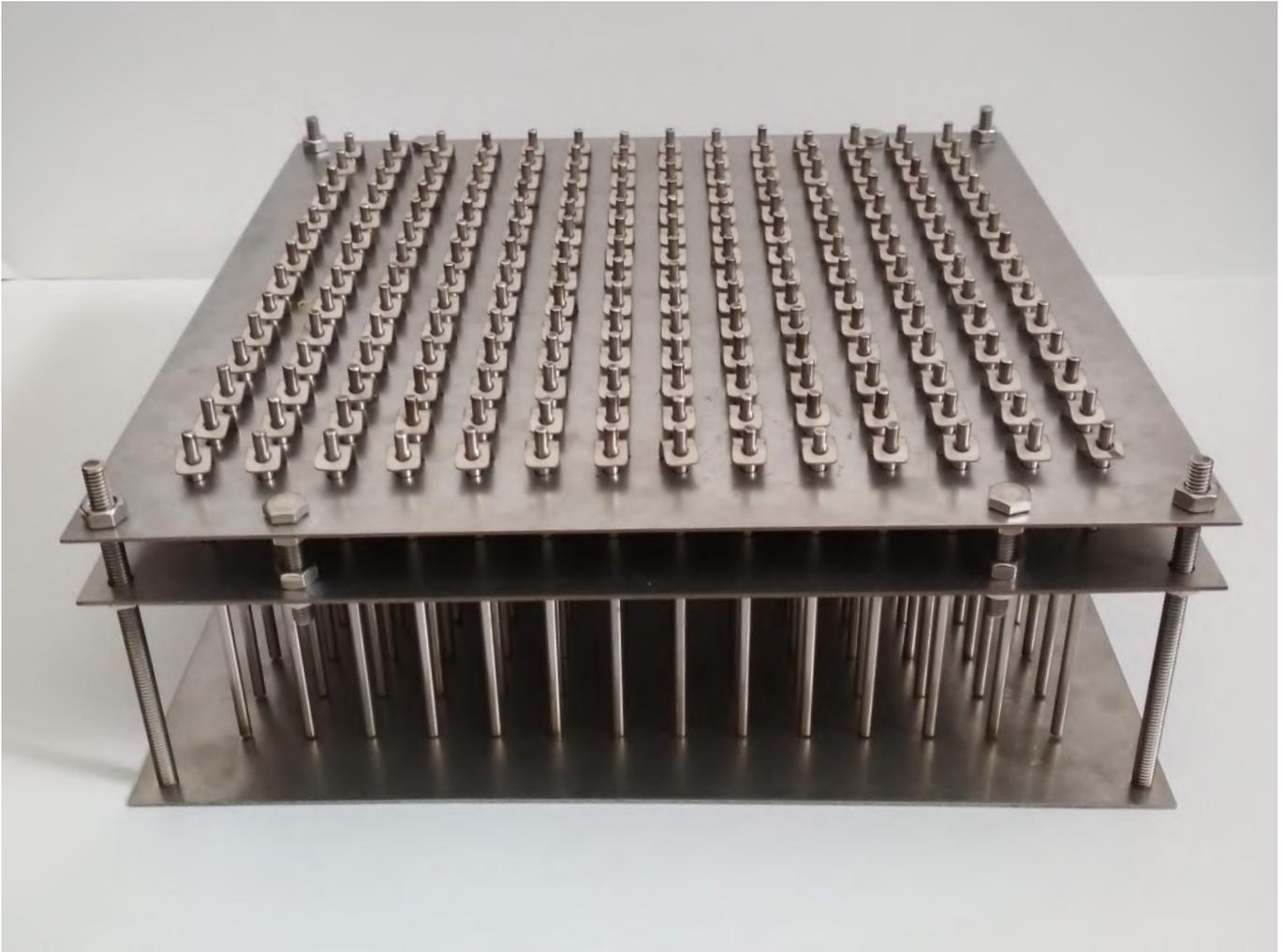


Figura 40. Dispositivo armado terminado.

Una vez fabricado el molde es necesario quemarlo en el horno a 600° C para conseguir una terminación en la que no se resbale la preparación de desmoldante.

Uso y ensayos de laboratorio

Secuencia de uso

Se adjunta a continuación una secuencia de uso del proceso para realizar una pieza termomodelada de vidrio con el molde fabricado.



Lavar y secar el vidrio a utilizar



Cortar el vidrio con la forma base deseada para el termomodelado



Rectificar el corte y matar los filos



Lavar y secar nuevamente



Identificar la cara estañada y colocarla hacia arriba



Rociar el vidrio con una solución de bórax*



Desbloquear las varillas del dispositivo llevándolo a una posición neutral



Configurar el dispositivo con la forma deseada



Colocar el desmoldante o interpolador en los puntos de apoyo



Colocar el molde dentro del horno sobre la base de acero inoxidable



Posicionar el vidrio sobre las varillas



Programar y encender el horno



Al llegar el horno a temperatura ambiente nuevamente, desmoldar la pieza



Lavar la pieza nuevamente



Pieza final

* Profundización sobre este aspecto en la sección *Algunos aspectos a tener en cuenta*

Testeos

El molde se probó con diferentes curvas de temperatura utilizadas en el LAV presentadas en la sección *Metodología* y diferentes espesores de vidrio para determinar los resultados visuales alcanzables. Para este testeo se eligió una configuración de puntos como muestra la figura 41, que genera un plano ondulado con la cresta más alta y el valle más profundo que puede generarse con los parámetros definidos. Esto permite visualizar los resultados más extremos en los que el vidrio se incrusta más en las varillas (las crestas) y en la que el vidrio debe estirarse más (los valles).

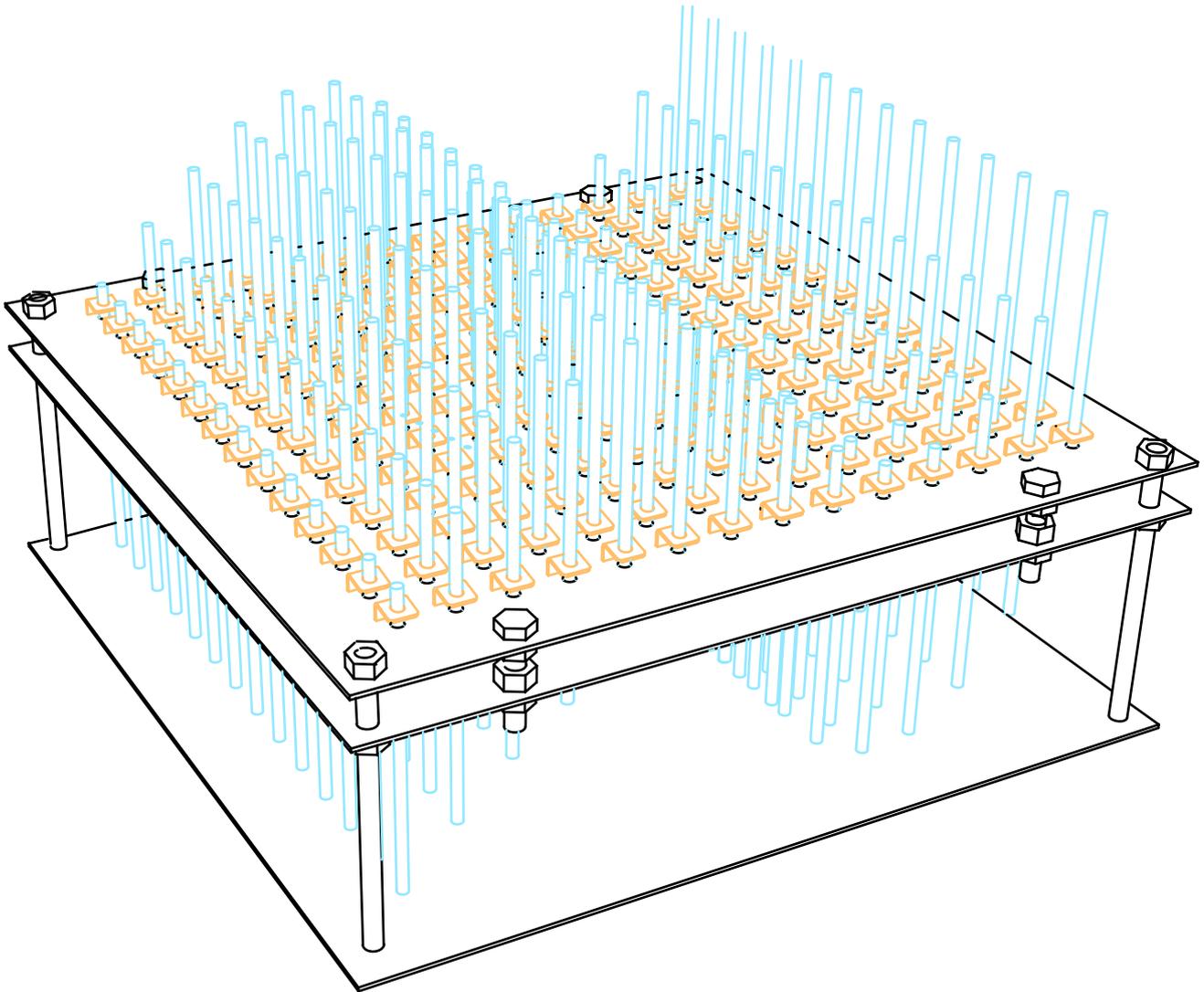


Figura 41. Esquema de configuración de puntos utilizada. Fuente: elaboración propia

Se resumen los resultados de los testeos en las siguientes páginas como forma de compararlos teniendo en cuenta que para todas las muestras se utilizó el mismo horno, la misma configuración de puntos y los mismos tres espesores de vidrio.

Curva de temperatura: Programa 2- Termomodelado 760°- 40 minutos

Fecha: 27 / 08 / 2021

Horno de Vitrofundición- Horno chico LAV

3 mm





Brillo y transparencia: ○ — ● — ○
 Distorsión visual: ○ — ● — ○
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 2,8 mm Crestas: 6,0 mm

6 mm





Brillo y transparencia: ○ — ● — ○
 Distorsión visual: ○ — ○ — ●
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 5,0 mm Crestas: 8,7 mm

10 mm





Brillo y transparencia: ○ — ○ — ●
 Distorsión visual: ○ — ○ — ●
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 5,2 mm Crestas: 9,8 mm

Curva de temperatura: Programa 5- Termomodelado 760º- 10 minutos

Fecha: 20/08/2021

Horno de Vitrofundición- Horno chico LAV

3 mm





Brillo y transparencia: ○ — ● — ○
 Distorsión visual: ○ — ● — ○
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 0,1 mm Crestas: 2,0 mm

6 mm





Brillo y transparencia: ○ — ● — ○
 Distorsión visual: ○ — ● — ○
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 0,3 mm Crestas: 2,1 mm

10 mm





Brillo y transparencia: ○ — ● — ○
 Distorsión visual: ○ — ○ — ●
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 2,1 mm Crestas: 4,0 mm

Curva de temperatura: Programa 3- ack 715º- 15 minutos

Fecha: 23 / 08 / 2021

Horno de Vitrofundición- Horno chico LAV

3 mm





Brillo y transparencia: ○ — ● — ○
 Distorsión visual: ● — ○ — ○
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 0 mm Crestas: 0,9 mm

6 mm





Brillo y transparencia: ○ — ● — ○
 Distorsión visual: ○ — ● — ○
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 0 mm Crestas: 1,0 mm

10 mm





Brillo y transparencia: ○ — ○ — ●
 Distorsión visual: ○ — ● — ○
 Fidelidad al molde: ○ — ○ — ●

Profundidad de marcado de varillas en: Valles: 0 mm Crestas: 1,1 mm

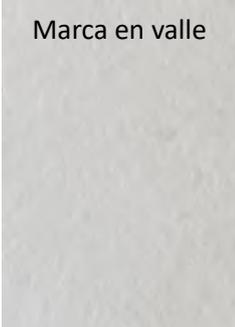
Horno de Vitrofundición- Horno chico LAV

3 mm



Brillo y transparencia: ○ — ○ — ●
Profundidad de marcado de varillas en: _____

Distorsión visual: ● — ○ — ○
Valles: 0 mm

Marca en valle: 

Marca en cresta: 

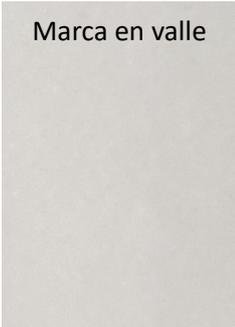
Fidelidad al molde: ○ — ● — ○
Crestas: 0,2 mm

6 mm



Brillo y transparencia: ○ — ○ — ●
Profundidad de marcado de varillas en: _____

Distorsión visual: ● — ○ — ○
Valles: 0 mm

Marca en valle: 

Marca en cresta: 

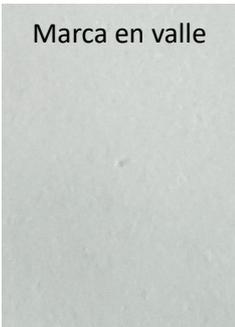
Fidelidad al molde: ○ — ● — ○
Crestas: 0,3 mm

10 mm



Brillo y transparencia: ○ — ○ — ●
Profundidad de marcado de varillas en: _____

Distorsión visual: ● — ○ — ○
Valles: 0 mm

Marca en valle: 

Marca en cresta: 

Fidelidad al molde: ○ — ● — ○
Crestas: 0,9 mm

Observación y análisis

Entre las piezas realizadas se observa una desvitrificación constante (en todas las piezas) que varía su intensidad dependiendo de la curva de temperatura y la limpieza de los vidrios. Para este problema se debió proponer una solución en futuras muestras a fin de conseguir resultados aceptables y constantes con el molde proyectado.

La marca de los puntos tiene una relación directa con el espesor del vidrio por su peso. A mayor espesor, utilizando una misma curva de temperatura, mayor es la profundidad de marcado de las varillas. Si bien es posible realizar esta afirmación a partir de los ensayos efectuados, es necesario realizar una investigación extendida para espesores de vidrio mayores en vista de

que la relación profundidad de marcado-espesor de vidrio podría variar.

Por otro lado se distingue en las curvas de temperatura, curvas que apenas imprimen la marca de los puntos en la superficie del vidrio (programa 6- 670° - 40 minutos) y curvas cuyo marcado caracteriza fuertemente a las piezas generadas en el molde (programa 5-760°-10 minutos y programa 2- 760°- 40 minutos).

Vale aclarar que no todas las curvas servirán para realizar cualquier termomodelado, puesto que, la deformación del vidrio depende no solo del tiempo de meseta y la temperatura alcanzada sino además de la configuración del molde. A mayor distancia de apoyo del vidrio, mayor será la profundidad de termomodelado con una misma curva de temperatura.

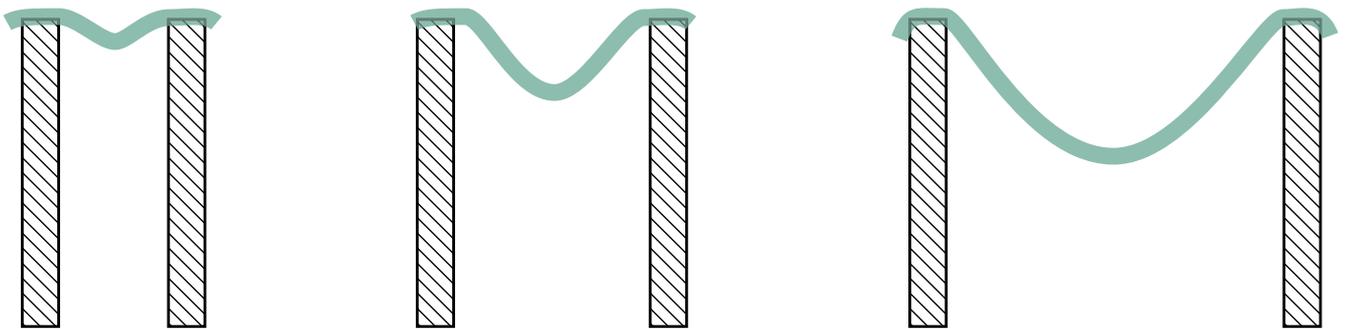


Figura 42. Esquema de termomodelado del vidrio en una misma curva de temperatura y variadas distancias de los puntos de apoyo. Fuente: elaboración propia.

O, en otras palabras, para conseguir un termomodelado con una profundidad determinada será necesario mayor tiempo de meseta a menor distancia de apoyo del vidrio.

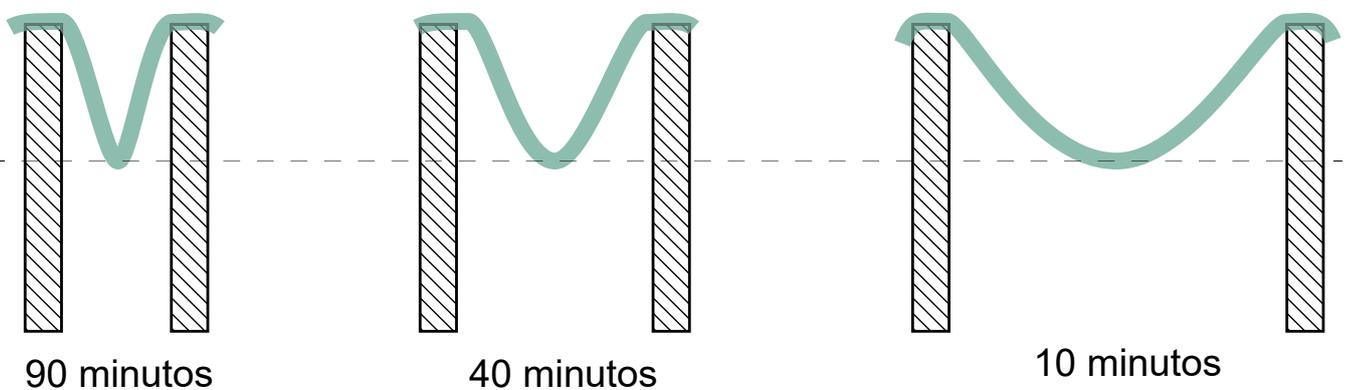


Figura 43. Esquema de la misma longitud de termomodelado del vidrio para variadas distancias de los puntos de apoyo. Fuente: elaboración propia.

Esto además se relaciona con la fidelidad de la pieza termomodelada al molde, dado que si el tiempo no es suficiente para que el vidrio, al deformarse bajo su propio peso, alcance a tocar los puntos más bajos de la configuración del molde, no se obtendrá la forma proyectada en el vidrio. La siguiente figura es un esquema de tres configuraciones de molde con la misma profundidad de termomodelado y una misma curva de temperatura de meseta corta.

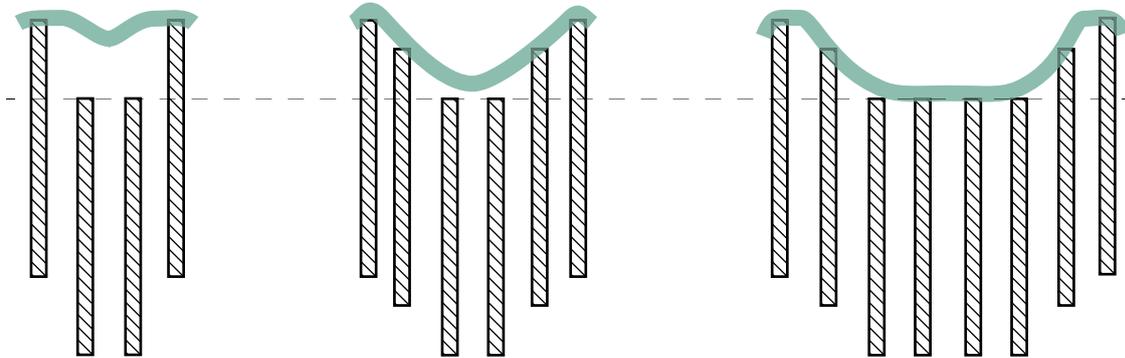


Figura 44. Esquema de termomodelado del vidrio en una misma curva de temperatura y variadas distancias de los puntos de apoyo. Fuente: elaboración propia.

En otras palabras, es posible que no todas las configuraciones de molde admitan utilizar las curvas de temperatura que apenas imprimen la marca de los puntos en la superficie del vidrio.

Entendida la distorsión visual como la percepción de las imágenes que se encuentran del otro lado del vidrio con una forma y/o tamaño alterados, se observa que en los objetos producidos sobre este molde, esta distorsión es apreciable a partir de la profundidad de 1 mm de marcado de las varillas. Además, a mayor profundidad de marcado mayor es la deformación del vidrio y consecuentemente aumenta la distorsión visual causada por la refracción y reflexión de la luz.

Modificaciones

Se presentan a continuación cuatro modificaciones del molde referidas al primer objetivo específico para conseguir resultados visuales diferentes a los presentados en los antecedentes.

Modificación 1

A partir de los resultados obtenidos se propuso una modificación del molde por medio de manta de fibra cerámica, utilizando el concepto de *interpolador**.

Se cortaron círculos de este material de 1,7 cm de diámetro y se pegaron a las puntas de las varillas con silicona líquida.

* Interpolador: Poner una cosa entre otras que forman un orden o conjunto.



Figura 45. Molde con modificación 1

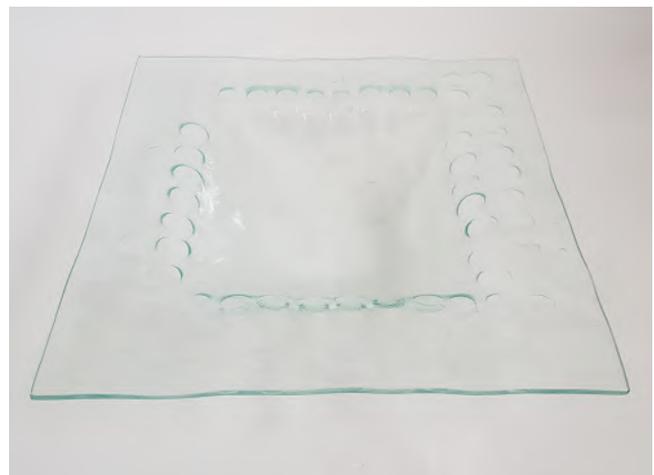


Figura 46. Vidrio termomodelado sobre molde con modificación 1

Análisis y observación

El estudio de la muestra realizada permite analizar los resultados de la modificación propuesta que arroja los siguientes resultados y verificaciones:

- El marcado de los puntos desaparece y el vidrio copia levemente la forma de los círculos de manta de fibra cerámica
- Ésta modificación del molde permite que disminuya la presión en los puntos en los que se genera una mayor profundidad de marcado del vidrio mediante la rotación de los círculos añadidos sobre la punta de la varilla.
- Al quemarse la silicona que sujeta los círculos de manta de fibra cerámica a las varillas, estos elementos se separan y es necesario pegarlos nuevamente para el siguiente ciclo de cocción.
- La manta pierde rigidez luego de cada horneada pudiendo usarse un máximo de dos horneadas.

Modificación 2

Por otro lado, a partir del mismo concepto de interpolador se propuso la utilización del plano de manta de fibra cerámica entero para la disminución del marcado de puntos.



Figura 47. Molde con modificación 2



Figura 48. Vidrio termomodelado sobre molde con modificación 2

Análisis y observación

El estudio de la muestra realizada permite analizar los resultados de la modificación propuesta que arroja los siguientes resultados y verificaciones:

- El plano de manta de fibra cerámica permite evadir por completo la marca de los puntos en la superficie del vidrio. Los planos termomodelados presentan la textura de la manta.
- Este método de interpolación no permite realizar objetos termomodelados de doble curvatura ya que el plano de manta no tiene la capacidad de generar formas con estas características sin plegarse o romperse.

Modificación 3

A partir de la modificación anterior se testeó la interpolación de los puntos mediante un plano de colcha de fibra cerámica entera como forma de disminuir el marcado de puntos. Este material presenta mayor flexibilidad que la manta de fibra cerámica pudiendo amoldarse mejor a las superficies de doble curvatura. Además fue pintado con caolín con la intención de disminuir la textura del propio material.



Figura 49. Molde con modificación 3



Figura 50. Vidrio termomodelado sobre molde con modificación 4

Análisis y observación

El estudio de la muestra realizada permite analizar los resultados de la modificación propuesta que arroja los siguientes resultados y verificaciones:

- El interpolador de colcha de fibra cerámica permite evadir por completo la marca de los puntos en la superficie del vidrio. Los planos termomodelados presentan la textura de la colcha y del caolín aplicado.
- Este método de interpolación a diferencia del anterior permite realizar objetos termomodelados de doble curvatura y de gran profundidad ya que la colcha puede amoldarse o utilizarse en trozos y disimular su unión con facilidad.

Modificación 4

Por último se realizó una modificación disminuyendo la cantidad de puntos de apoyo del molde. Es decir, en lugar de utilizar la matriz de puntos completa se utilizaron únicamente algunos puntos clave para el termomodelado del vidrio, como forma de intensificar su marcado.



Figura 51. Molde con modificación 4



Figura 52. Vidrio termomodelado sobre molde con modificación 4

Análisis y observación

El estudio de la muestra realizada permite analizar los resultados de la modificación propuesta que arroja los siguientes resultados y verificaciones:

- Se intensifica el marcado de los puntos generando formas con curvas catenarias más profundas que unen los puntos de apoyo del vidrio.
- Al generarse mayor profundidad de marcado de las varillas el desmolde es más complejo, requiriendo mayor tiempo y dedicación para no romper la pieza final

Algunos aspectos a tener en cuenta

En base a la utilización del molde y el análisis de los resultados de los ensayos de laboratorio se plantean los siguientes hallazgos que permitirán un uso más adecuado del dispositivo y resultados controlables.

- A los vidrios utilizados para testear estas modificaciones se los roció con una solución de borato de sodio* en agua con una concentración de 8,65 g/L sobre su cara estañada** previo al ciclo de horneado. Se comprobó que esto es efectivo para evitar la desvitrificación superficial del vidrio y mantener el brillo y transparencia del material. Este aspecto requiere una investigación más profunda para conseguir resultados constantes.
- En relación a el uso del dispositivo se puede generar una modificación de su base (componente C4) mediante la adición de toques laterales, como muestra la figura 53, que den seguridad al usuario que el molde se encuentra completamente apoyado sobre ella, y no sobre el fondo del horno.
- En cuanto a su reconfiguración, se identificó cierta dificultad para poder configurar el molde sin un volumen al que, al desbloquear las varillas, se adapte y copie la forma. En este sentido se propone la realización de maquetas volumétricas en algún material de conveniencia que permita reproducir la forma para luego trasladarla al dispositivo para oficiar de molde.

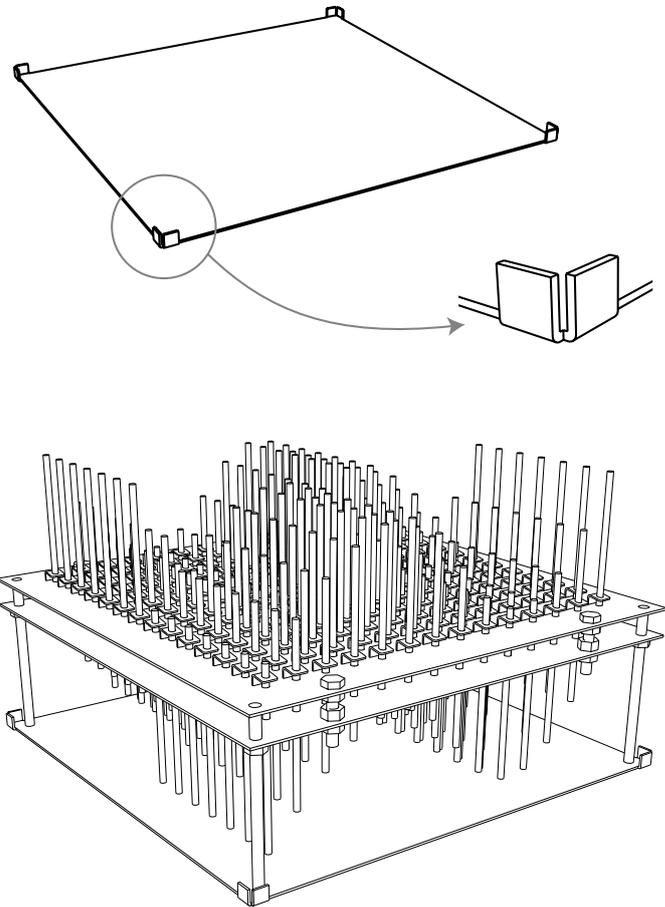
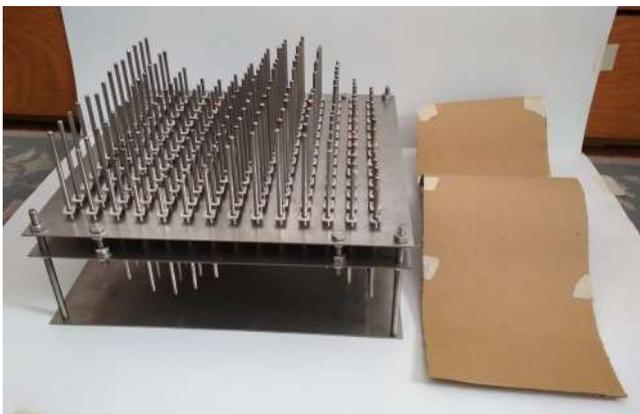


Figura 53. Esquema de modificación de base (componente C4). Fuente: elaboración propia



* Fundente, con el cual se rompe la tensión superficial de las moléculas del vidrio. (Romero, 2012)

** La capa tin o cara estañada es la cara del vidrio que ha estado en contacto con el estaño en su proceso de fabricación por flotado.

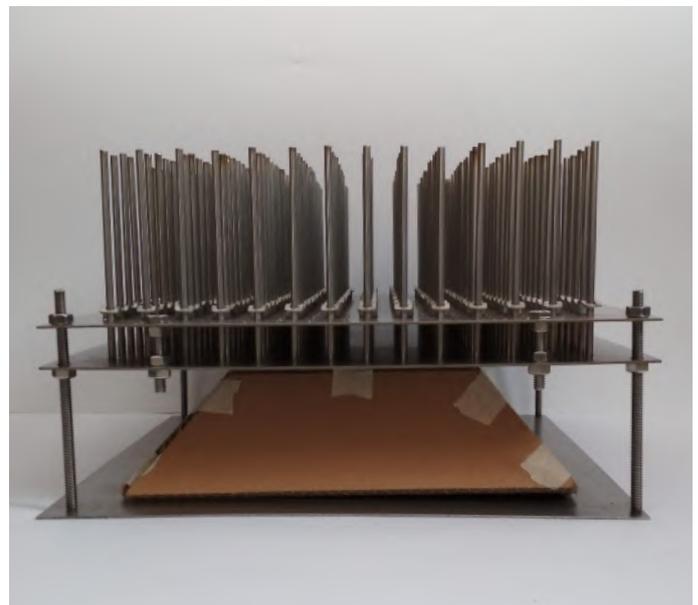


Figura 54. Ejemplo de maquetas volumétricas para permitir trasladar las formas al dispositivo.

Ejemplos de utilización del molde proyectado

Este capítulo procura presentar algunos ejemplos de productos fabricados a partir del molde objeto de este TFG. Los ejemplos cumplen con la tipología de productos *contenedor* y fueron seleccionados abarcando el más amplio espectro de resultados visuales y formales posible para ilustrar las posibilidades que este producto ofrece para la fabricación de objetos de vidrio termomodelado.

 UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY	 Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo UDELAR	 Escuela Universitaria Centro de Diseño
Horno utilizado: <u>Para vidrio - LAV</u>		
Curva de temperatura: <u>Programa 5-Termomodelado (la casita)- 760° - 10 minutos</u>		
Espesor del vidrio: <u>3</u> mm		
Característica de configuración del molde: <u>El molde fue configurado con forma semiesférica convexa. El vidrio fue cortado con forma circular</u>		
Observaciones: <u>Las figuras radiales al caer sobre la matriz del molde ortogonal generan pliegues y formas orgánicas.</u> _____ _____		



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR



Escuela Universitaria
Centro de Diseño

Horno utilizado: Para vidrio - LAV

Curva de temperatura:

Programa 2-Termomodelado-

760° - 40 minutos

Espesor del vidrio: 5 mm

Característica de configuración
del molde:

El molde fue configurado con for-
ma cóncava de base cuadrada. Se
utilizaron los círculos de manta de
fibra cerámica como interpolador.

Observaciones:

Las marcas de los puntos se trans-
forman en una matriz de círculos
de mayores dimensiones que no
permite que el vidrio caiga bajo su
propio peso entre las varillas



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo
UDELAR



Escuela Universitaria
Centro de Diseño

Horno utilizado: Para vidrio - LAV

Curva de temperatura:

Programa 5-Termomodelado (la

casita)- 760° - 10 minutos

Espesor del vidrio: 5 mm

Característica de configuración
del molde:

El molde fue configurado con for-
ma convexa de base ovalada.

Observaciones:

El modelado es bastante fiel al ori-
ginal. La forma final se acerca a un
resultado más orgánico en los
extremos del óvalo (donde los pun-
tos se encuentran más separados
a causa de la matriz ortogonal)





Horno utilizado: Para vidrio - LAV

Curva de temperatura:

Programa 6-Termomodelado

mínimo- 670° - 40 minutos

Espesor del vidrio: 5 mm

Característica de configuración del molde:

El molde fue configurado con una costilla en forma de arco (lado largo) y tres costillas perpendiculares a la primera (lado corto)

Observaciones:

El termomodelado es muy leve y adquiere una forma orgánica debido a la poca cantidad de puntos de apoyo que tenía el vidrio.



Horno utilizado: Para vidrio - LAV

Curva de temperatura:

Programa 5-Termomodelado (la casita)- 760° - 10 minutos

casita)- 760° - 10 minutos

Espesor del vidrio: 5 mm

Característica de configuración del molde:

El molde fue configurado con forma convexa de base ovalada a la que se le quitaron puntos dejando aproximadamente un 20% de ellos

Observaciones:

El resultado muestra formas orgánicas más acentuadas a menor cantidad de puntos y las marcas de las puntas de las varillas más profundas unidas por una sumatoria de curvas catenarias.



Conclusiones finales y proyecciones

Este capítulo procura exponer las conclusiones que se desprenden de este Trabajo Final de Grado a partir del molde proyectado y los ensayos realizados. Se refiere al potencial del dispositivo en relación al diseño de productos en vidrio termomodelado, a las proyecciones de investigación que de él surgen y al aporte que genera el desarrollo de herramientas para la disciplina del Diseño y para el trabajo con vidrio localmente.

El dispositivo proyectado y fabricado en este TFG es una herramienta que permite el termomodelado de diferentes volúmenes a partir de planos de vidrio. Las posibilidades de ajustes en el diseño de las piezas fabricadas con este molde y sus características visuales particulares brindan al usuario beneficios que no son alcanzables con los moldes rígidos de otros materiales. El marcado de los puntos en las piezas finales determina una estética particular que identifica al producto con su método productivo y remite al molde que le dió su forma. Esta estética puede variar su intensidad según la curva de temperatura utilizada. En este sentido, los productos fabricados con este molde sin interpolador tienen un diferencial respecto a otros productos de vidrio termomodelado del mercado.

Las modificaciones presentadas en este trabajo permiten variar la visualidad de los resultados. Existe aún así, un sinnúmero de alternativas de modificaciones a testear, cada una con resultados visuales asociados diferentes. La profundización en este aspecto es una alternativa de investigación a desarrollar que excede este trabajo

Si bien su costo de fabricación no resulta competitivo con los tradicionales moldes utilizados para el termomodelado de vidrio, la propuesta de valor de este molde se centra en la conveniencia del proceso de diseño, en la novedad del dispositivo en el mercado y la posibilidad de personalización.

Como forma de continuar con la validación del molde se proyecta, como otra alternativa de investigación, someterlo a pruebas con objetivos de diseño específicos, realizando más horneadas con la intención de utilizarlo para el diseño y producción de piezas finales. Además, se plantea testear el dispositivo con diferentes usuarios (diseñadores y artesanos) que trabajan en el rubro, en sus hornos y

con sus objetivos particulares, para identificar modificaciones necesarias, adaptaciones y mejoras que se puedan incorporar al dispositivo desarrollado.

La posibilidad de adaptar el molde a otro tipo de hornos, u otras técnicas de trabajo con vidrio, excede el alcance de este trabajo y podría ser abordable en futuras investigaciones.

Cabe destacar que este trabajo ha identificado al Diseño como facilitador de su propia disciplina. Según Martínez (2013) *“Diseño es la actualización de las soluciones a los problemas emergentes de la interacción del ser humano con el hábitat.”*. En este contexto, por ser los diseñadores seres humanos interactuando con su hábitat, es claro que también se enfrentan a este tipo de problemas en su vida profesional cotidiana. En este sentido, el desarrollo de herramientas que aporten a la disciplina también cae dentro del área de conocimiento del Diseño.

Por último, el desarrollo de herramientas y tecnología en relación a técnicas de trabajo con vidrio presenta potencialidades en la región ya que, debido a la baja demanda, no existe aún variedad de insumos o instrumentos en el mercado local. En este sentido, Uruguay se presenta como un ambiente óptimo para innovar y desarrollar herramientas que permitan avanzar en los procesos productivos que transforman el vidrio en objetos de diseño.

Referencias bibliográficas

- Amorín, B. ; Frabasile C. (2021) *El valor patrimonial de los procesos tecnológicos antiguos: el núcleo de arena* (Artículo inédito). Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Universidad de la República. Uruguay
- Avner, S. H., Haen, J. L. E., & Mejía, G. B. (1979). *Introducción a la metalurgia física* (No. TN690. A96 1988.). México;: McGraw-Hill.
- Bürdek, B. E., & López-Manzanares, F. V. (1994). *Diseño: historia, teoría y práctica del diseño industrial*. Gustavo Gili. España
- Cabrera, M. & Pereira, M. (2019) *Diseño de máquina de conformación multi-punto de placas y hojas metálicas*. (Tesis de finalización de grado) Ingeniería Industrial Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Uruguay.
- Casteñeda, E. (2017) *Industrialización de la envolvente opaca arquitectónica de forma libre: Nueva alternativa de paneles de GRC sin molde*. Universidad Politécnica de Madrid. España. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/profile/Estefana-Castaneda/publication/321611678>
- Cordero Salcedo, P. E. (2011). *Proyecto de creación de una empresa productora y comercializadora de vitrales en la técnica Tiffany* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Ecuador. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4896/1/UPS-QT03493.pdf>
- Cutler, V. (2012). *New technologies in glass*. A&C Black. Gran Bretaña
- Flores, C. B. (2009). *La producción artesanal. Visión gerencial*, (1), 37-52. Universidad de los Andes, Venezuela. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4655/465545880009.pdf>
- Galán, R., Racero, J., Eguía, I., & Guerrero, F. (2006, September). *Diseño de Sistemas de Fabricación Reconfigurable mediante la Formación de Familias de Productos*. In X Congreso de Ingeniería de Organización, Valencia, España. Recuperado de: http://www.adingor.es/Documentacion/CIO/cio2006/docs/000134_final.pdf
- Gielen, J. T. J., Bsc, K. K., Kitslaar, K. P. H. M., & Zimny, R. N. R. (2011) *Net structure for an adjustable flexible mould for hot bending glass*. Technische universiteit Eindhoven, Países Bajos. Recuperado de: <https://static1.squarespace.com/static/50647a70e4b0e9530e2eb6b9/t/5065e027c4aa>
- [c831ab272d33/1449751987767/Aanpasbare+mal+voor+het+buigen+van+glas+-+paper.pdf](https://www.researchgate.net/publication/321611678)
- Goldschmidt, G. (2014). *Linkography: unfolding the design process*. Mit Press. Estados Unidos de América
- Jorgensen, T. (2015). *Independent innovation through digital fabrication focusing on explorations in reconfigurable pin tooling* (Tesis Doctoral) University of the Arts London and Falmouth University, Gran Bretaña. Recuperado de: https://ual-researchonline.arts.ac.uk/id/eprint/13349/1/T_Jorgensen_PhD_Thesis_2016-FINAL.pdf
- Madrid, M. (2002). *Tecnología de la adhesión*. Departamento Técnico de Loctite España.
- Martínez, F. (2013) El objeto de diseño no es el objeto. Premio Julio Vilamajó 2013. Uruguay. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/Fernando-MartinezAgustoni/el-objeto-del-diseo-no-es-el-objeto>
- McGee, W., Newell, C., & Willette, A. (2012). *Glass Cast: A Reconfigurable Tooling System for Free-Form Glass Manufacturing*. Universidad de Michigan, Estados Unidos de América. Recuperado de: http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia12_287.content.pdf
- Munro, C., & Walczyk, D. (2007). *Reconfigurable pin-type tooling: A survey of prior art and reduction to practice*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Estados Unidos de América. Recuperado de: <https://es.booksc.org/book/49617558/b3da4f>
- Nallem S. (2017) *Diseño y Fabricación Semi artesanal con vidrio en Uruguay*. Escuela Universitaria Centro de Diseño, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de la República, Uruguay. Recuperado de: https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/17102/1/EUCD-Nallem_Disenio_fabricacion_vidrio.pdf
- Oikonomopoulou, F., Bhatia, I. S., Damen, W., Van Der Weijst, F., & Bristogianni, T. (2020, September). *Rethinking the Cast Glass Mould.: An Exploration on Novel Techniques for generating Complex and Customized Geometries*. In Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 7). Ghent University, Bélgica. Recuperado de: <https://proceedings.challengingglass.com/index.php/cgc/article/view/346/325>

Bibliografía

- Romay, C., Hojman, M., Mussio, G., & Ulfe, V. (2015). *Entre luces: el vitral en el patrimonio arquitectónico nacional*. Ediciones Universitarias, Facultad de Arquitectura, Universidad de la República, Uruguay. Recuperado de: <https://docplayer.es/50737239-Entre-luces-el-vitral-en-el-patrimonio-arquitectonico-nacional-carola-romay-miriam-hojman-gianella-mussio-veronica-ulfe.html>
- Sanz Lobo, E. (2005) *El vidrio como materia escultórica: técnicas de fusión, termoformado, casting y pasta de vidrio*. (Tesis Doctoral) Universidad Complutense de Madrid. España. Recuperado de: <http://webs.ucm.es/BUCM/tesis//bba/ucm-t28905.pdf>
- Ries, E. (2012). *El Método Lean Startup*. Grupo el planeta, Deusto, España. Recuperado de: https://www.academia.edu/8467106/El_M%C3%A9todo_Lean_Startup_Eric_Ries
- Romero Fernández, Patricia Socorro Aline. (2012). *Manual de glass casting : cera perdida y molde de arena*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: <http://132.248.9.195/ptd2013/Presencias/0691614/0691614.pdf>
- van der Weijst, F., Oikonomopoulou, F., & Bilow, M. (2020, September). *An Adjustable Mould for the Casting of Glass Voussoirs for the Construction of Fully Transparent Shell Structures*. In Challenging Glass Conference Proceedings (Vol. 7) Ghent University, Bélgica. Recuperado de: <https://proceedings.challengingglass.com/index.php/cgc/article/view/305/287>
- Vázquez Hernández, J. P. (1996). *Estudio de la precipitación de carburos en el acero inoxidable AISI 304 en enfriamiento continuo* (Tesis doctoral) Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Villegas MA. (2016) *Desarrollo histórico y formal de la escultura en vidrio*. (Tesis Doctoral) Universidad de Granada. España. Recuperado de: <https://hera.ugr.es/tesisugr/26127258.pdf>
- Waisman, M. (2009) *Vitrofundición*. Buenos Aires, Dunken, Argentina.
- Weinstein, N. (2011). *Sick with Lego*. *Nikolas Weinstein Studio Blog*, October 10. Estados Unidos de América. Recuperado de: <http://blog.nikolas.net/?p=253>
- Corallo, M., Kirakidis, M. (2009) *Aspectos de la estructura, estrategias y resultados del mercado del vidrio plano en el Uruguay (período 1990-2008)*. (Tesis de grado) Facultad de Ciencias Económicas y de Administración, Universidad de la República, Uruguay. Recuperado de: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/701/1/M-CD3924.pdf>
- Jorgensen, T. (2019). *Tools for Tooling: Digital Fabrication Technology as the Innovation Enabler*. Arts. 8. 9. 10.3390/arts8010009, Gran Bretaña. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2076-0752/8/1/9/html>
- Koc, B., & Thangaswamy, S. (2011). *Design and analysis of a reconfigurable discrete pin tooling system for molding of three-dimensional free-form objects*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27(2), 335-348. Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University Orhanli, Turquía. Recuperado de: https://research.sabanciuniv.edu/16383/1/Design_and_analysis_of_a_reconfigurable_discrete_pin_tooling_system_for_molding_of_three-dimensional_free-form_objects.pdf
- Moore, P., Wolframm, P., & Zeisel, E. (2013). *Eva Zeisel: Life, Design, and Beauty*. Chronicle Books. Estados Unidos de América
- Pearson, C. (2009). *Manual del vidrio plano*. CAVIPLAN, Argentina.
- Walczyk, D. F., & Hardt, D. E. (1998). *Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming*. Journal of Manufacturing Systems, 17(6), 436-454, World Scientific Publishing, Singapur. Recuperado de: <http://web.mit.edu/~mpcl/www/Papers/27.Walczyk.98.pdf>

Anexo A: Flujo productivo

