



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de Herramientales para Productos Termoformados

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Christian Alberto Caballero Jiménez

ASESORA DE INFORME

Dra. Magdalena Trujillo Barragán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

**DISEÑO DE HERRAMENTALES
PARA
PRODUCTOS TERMOFORMADOS**

Índice

Introducción.....	1
Objetivo.....	2
La empresa.....	3
Puesto de trabajo.....	4
1 Antecedentes.....	5
1.1 Máquina y proceso de termoformado.....	7
1.2 Materiales termoplásticos y propiedades.....	9
1.3 PET como resina para termoformado.....	14
1.4 Herramientales para termoformado.....	17
1.4.1 Molde para termoformado.....	18
1.4.2 Troquel de corte.....	21
1.4.3 Unidad apiladora.....	22
2 Diseño de herramientales para termoformado en Nutrigo S.A. de C.V.....	24
2.1 Definición del proyecto asignado.....	26
2.2 Metodología de diseño.....	27
2.3 Diseño de molde.....	28
2.3.1 Especificación de molde.....	28
2.3.2 Dimensionamiento de cavidades.....	28
2.3.3 Disposición de cavidades y dimensionamiento de molde.....	30
2.3.4 Prototipos rápidos.....	32
2.3.5 Diseño de cavidad.....	33
2.3.6 Diseño de fondo intercambiable.....	39
2.3.7 Diseño de marco de sujeción (lado cavidades).....	40
2.3.8 Diseño de placa de refrigeración.....	41
2.3.9 Diseño de placa de montaje (lado cavidades).....	42
2.3.10 Diseño de marco de sujeción (lado plugs).....	43
2.3.11 Diseño de sistema de plugs.....	43
2.3.12 Diseño de sistema de acuñado.....	44
2.3.13 Diseño de placa intermedia.....	45
2.3.14 Diseño de placa de montaje (lado de plugs).....	45
2.3.15 Consideraciones adicionales.....	46

2.4	Diseño de troquel de corte.....	50
2.4.1	Diseño de cuchillas.....	51
2.4.2	Diseño de arillo para cuchillas.....	53
2.4.3	Placa de respaldo (sufridera).....	53
2.4.4	Diseño de placa base de cuchillas.....	53
2.4.5	Diseño de placa de montaje superior.....	54
2.4.6	Diseño de placa de corte.....	54
2.4.7	Diseño de marco de respaldo.....	55
2.4.8	Diseño de placa de montaje inferior.....	55
2.4.9	Consideraciones adicionales.....	56
2.5	Diseño de unidad apiladora.....	59
2.5.1	Selección de ventosas.....	60
2.5.2	Diseño de estructura base.....	61
2.5.3	Diseño de eyectores.....	63
2.5.4	Diseño de columnas de eyectores.....	64
2.5.5	Diseño de placa base de eyectores.....	65
2.6	Documentación.....	66
3	Resultados.....	69
4	Conclusiones.....	73
	Referencias.....	76

Introducción

Se conoce por *termoformado* al proceso de remodelado de materiales termoplásticos a altas temperaturas con el fin de crear piezas conformadas [1]. Es práctica común el uso de las palabras *formar* o *formado*, sin embargo en este informe también se utilizan las palabras equivalentes *conformar* o *conformado*. Esto con el motivo de poner énfasis y claridad en la idea de conseguir de manera controlada una nueva geometría.

En el presente informe de actividades profesionales se aborda el proceso de diseño de herramientas con el objeto de obtener un producto termoformado para empaque de alimentos. Se comienza con una descripción de la empresa donde se realizaron las actividades, sector al que pertenece, productos ofrecidos, presencia en el mercado y política ambiental. Se indica el puesto de trabajo, responsabilidades y actividades que desempeñé dentro de la empresa citada.

El primer capítulo corresponde a los antecedentes. Explica el proceso de termoformado y las estaciones de la máquina termoformadora donde se instalan los herramientas de producción. Al ser una tecnología que se clasifica dentro de los procesos transformativos de polímeros (e.g. moldeo por inyección, moldeo por sople, rotomoldeo) se da un breve repaso de los materiales termoplásticos y sus propiedades, con especial atención en la resina del PET. Concluye esta sección con una vista general de los moldes para termoformado y herramientas complementarios para obtener un producto funcional.

En el segundo capítulo se expone de manera general el proceso de lanzamiento de un nuevo producto dentro de la empresa y se define el proyecto realizado sobre diseño de herramientas. Se muestran los procedimientos y métodos usados en el diseño de los herramientas por cada una de las estaciones; estación de termoformado (molde), estación de corte (troquel de corte) y estación de apilado (unidad apiladora). El capítulo cierra con aspectos a destacar para la documentación del proyecto.

Continúa el informe en el tercer capítulo con los resultados obtenidos de acuerdo a las fases sucesivas en el proceso de lanzamiento de un nuevo producto; manufactura, ensamble, prueba de herramientas en la máquina termoformadora, obtención de muestras y liberación del proceso para producción.

Finaliza el cuarto capítulo con las conclusiones y perspectivas entorno al trabajo realizado.

Objetivo

Documentar el proceso de diseño de herramientas para termoformado de un proyecto concluido (i.e. herramienta liberada en planta para producción) y presentar la estrategia a seguir para el desarrollo de una nueva familia de herramientas con características similares.

La empresa

INIX (NUTRIGO S.A. de C.V.) es una empresa mexicana con más de 30 años de experiencia en el diseño y fabricación de empaques plásticos desechables para el sector alimenticio. Entre sus productos se encuentran; charolas y domos para pasteles, paneras, galleteros, contenedores tipo almeja, herméticos, bowls para ensaladas, vasos, porcionadores, cubiertos, empaques para huevo, carne, frutas y hortalizas, contenedores de papel, biodegradables, etc.

Cuenta con una red de distribución en toda la República Mexicana, así como en California EE.UU., Centroamérica y otros países del continente.

Cuenta con clientes como; Bimbo, Walmart y Alsea por mencionar algunos.

INIX, es una empresa comprometida a respetar el medio ambiente, a través de diferentes estrategias para cuidar, optimizar, reducir, el uso de energía, agua, aire y suelo, para evitar la contaminación del medio ambiente durante todo el proceso, minimizando los impactos del cambio climático y los daños al ecosistema.



<https://www.inix.mx/>

Puesto de trabajo

Las actividades y responsabilidades desempeñadas en la empresa antes citada, bajo el puesto de **Diseñador de producto**, fueron entre otras:

- Diseño Industrial de Producto; empaques plásticos y relacionados para industria alimenticia
- Manufactura de prototipos rápidos y obtención de muestras funcionales para cliente
- Diseño de moldes de termoformado y moldes de inyección
- Diseño de troqueles para corte y punzonado
- Diseño de sistemas para fin de brazo robótico (EOAT)
- Ingeniería inversa de herramientas de proveedores externos
- Responsable de operación y mantenimiento de impresora 3D, FDM
- Validación en piso de taller para manufactura y ensamble
- Validación en planta a pie de máquina para liberación de herramientas

1 Antecedentes

Dentro del sector de procesamiento de plásticos, es el termoformado el que representa el campo que promete las tasas de crecimiento más altas. Esto se aplica tanto a las piezas termoformadas destinadas a aplicaciones técnicas, como al empaque [1].

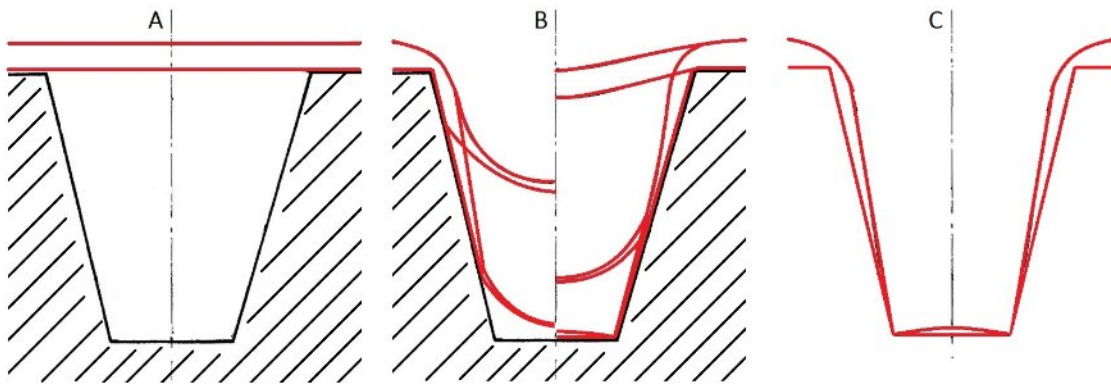
La principal tecnología con la que actualmente se producen empaques desechables para el sector de alimentos, industrial y servicio de comida, es el termoformado de *lámina delgada* (*thin-gage*, *thin-gauge*, *light-gauge*) [2, 3]. Algunos de los productos resultantes son empaques para comida rápida, vasos, tapas, platos, recipientes para ensaladas, charolas para galletas, todo tipo de carnes, bisagras o recipientes tipo almeja para frutas, verduras y empaques para huevo.

Esta tecnología ha sido una opción competitiva por ser un proceso que requiere de relativamente bajas temperaturas y presiones. La geometría del producto a termoformar solo se requiere en un lado del molde, llevando a que el tiempo de desarrollo sea más rápido comparando con otros métodos como el moldeo por inyección y moldeo por sople. El termoformado se considera un proceso secundario ya que requiere de una tecnología de transformación primaria como entrada; extrusión de lámina termoplástica, que dependiendo del espesor puede ser suministrada en bobina (i.e. carretes enrollados) cuando es lámina delgada o en hojas previamente cortadas para el caso de *lámina gruesa* (*heavy-gage*, *heavy-gauge*, *thick-gauge*) [2, 3]. Esto es debido a cuanto mayor espesor de lámina mayor dificultad de enrollarla como una bobina.

Vale aclarar que dicha clasificación no está del todo perfectamente definida, algunos autores marcan para lámina delgada calibres o espesores entre 0.13–2.54 mm [2], otros por debajo de 1.5 mm y para lámina gruesa, calibres por encima de 3 mm [3]. En este último caso, el intervalo entre estos valores (1.5-3 mm) es considerado muy costoso en aplicaciones de empaques para alimentos, pero con poca rigidez estructural en aplicaciones de lámina gruesa.

Existe una gran diversidad de productos que se fabrican con el termoformado de lámina gruesa donde podemos encontrar los clásicos ejemplos de cubiertas de refrigeradores, interiores de automóviles, bateas de camionetas tipo pick up, gabinetes para equipo médico y electrónico, piscinas, tinas de baño, maletas de viaje, tarimas, etc.

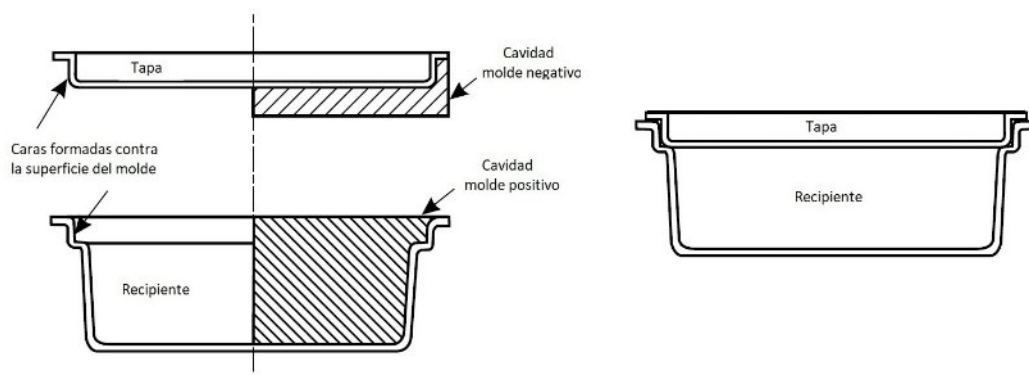
Si bien no es el objetivo de este reporte, muchos de los principios abordados aplican para ambas clasificaciones de termoformado. En términos de producción, típicamente el termoformado de lámina delgada es multicavidades y con velocidades de operación que pueden sobrepasar los veinte ciclos por minuto (i.e. 3 segundos por ciclo). En contraste, el termoformado de lámina gruesa a lo sumo puede tener dos cavidades, siendo una lo más común y con ciclos más lentos que se evalúan en minutos por ciclo [2]. Las diferencias en estas velocidades hacen evidente que la refrigeración sea distinta en ambos procesos. Ambas tecnologías pueden usar aire a presión o *conformado a presión (pressure forming)* y/o vacío o *conformado con vacío (vacuum forming)*. Existen *moldes en positivo* donde la lámina cubre y envuelve la geometría a copiar o *moldes en negativo* donde la lámina se desplaza hacia el fondo de la cavidad. Debido al estiramiento diferenciado de la lámina, el espesor de pared en los productos obtenidos no es uniforme (*Fig. 1.1*). Zonas de la lámina que al principio tocan el molde enfrían, se adhieren a la superficie y tendrán poco o nulo estiramiento, en ocasiones mantienen virtualmente el espesor inicial de la lámina. Las zonas restantes de la lámina seguirán estirando hasta cubrir la totalidad de la superficie del molde. Las zonas de la lámina que tocan el molde al final tendrán el mayor estiramiento y menor espesor de pared. Para contrarrestar el estiramiento diferencial, en ambos procesos es común la *asistencia mecánica de conformado*, realizada por elementos conocidos como *plugs*, con el fin de tener mejor control sobre los espesores de pared en la lámina termoformada. En lámina delgada el corte de las piezas individuales se realiza normalmente con troqueles. Para lámina gruesa se ocupan variedad de métodos como lo son sierras, fresadoras, routers e incluso navajas o cúters.



▲ **Fig. 1.1** Cavidad de molde negativo y su característico perfil de espesores de pared. A. Lámina sobre cavidad con espesor inicial, B. Secuencia de conformado hacia el fondo de la cavidad, C. Producto desmoldado con espesores mínimos en zonas de mayor estiramiento. Adaptado de *Understanding Thermoforming*. Throne, James. (2008)

1.1 Máquina y proceso de termoformado

La gran variedad de requerimientos en los productos termoformados promovió una diversificación en los procesos, tanto para lámina delgada como para lámina gruesa. Por ejemplo un molde negativo puede ser el mejor método para el caso de una tapa, como se muestra en la *figura 1.2*, al requerir las tolerancias más cerradas en el borde externo. El cierre se realiza con el borde interno del recipiente, termoformado en un molde positivo. Nótese que en ambos moldes, un cambio de espesor en la lámina no afecta el ajuste del cierre entre la tapa y el recipiente. Las caras termoformadas contra la superficie del molde replicarán de mejor manera la geometría y por lo tanto las dimensiones. Entre esta variedad de procesos, también existe un tipo de termoformado libre o sin molde para el cual solo se usa aire a presión. Las piezas típicas que se obtienen con este proceso sin molde son formas de burbuja, como podemos verlas en tragaluces de edificios. En contraste un método más complejo puede ser el termoformado de lámina doble, donde se pueden obtener piezas huecas.



▲ Fig. 1.2 Cavidades de molde positivo, molde negativo y su aprovechamiento en las dimensiones críticas.
Adaptado de *Thermoforming: Improving Process Performance*. Rosen, Stanley. (2002)

En el caso de este informe, la tecnología presente en la máquina termoformadora está diseñada para obtener piezas profundas que requieren de una mejor distribución en los espesores de pared, con detalles más finos en la superficies de las piezas termoformadas y con una producción alta. En resumen, usa lámina suministrada en bobina (*roll-fed*), tiene capacidad de proporcionar vacío, aire a presión, cuenta con asistencia mecánica de conformado, una prensa para lograr la separación de los productos termoformados y sistema de apilado para facilitar el embalaje (*Fig. 1.3*). El proceso y sistemas auxiliares son los siguientes.

Desenrollado y calentamiento de lámina

Se inicia desenrollando una bobina de lámina termoplástica, previamente extruida, haciéndola pasar por un sistema de rodillos precalentadores. Después se arrastra hacia un horno que cuenta con elementos emisores de energía radiante en ambos lados de la lámina, con el fin de lograr un calentamiento uniforme. Así se llega a un intervalo de temperatura donde comienza a ser fácilmente conformable.

Conformado y enfriamiento

Inmediatamente alcanzada la temperatura adecuada, la lámina entra a la estación de termoformado que consiste en una prensa con platinas superior e inferior, de movimiento independiente apertura-cierre, donde se encuentra el molde que dará la geometría final del producto. Aquí se cuenta con los sistemas que ayudarán a estirar o conformar la lámina y mantener la nueva geometría; sistemas de aire a presión, vacío y sistema de refrigeración por agua, todos con sus respectivas conexiones para el molde, así como asistencia de un tercer movimiento para conformar mecánicamente. Estas características se tienen en ambas platinas de la estación, permitiendo configuraciones de moldes más flexibles. Una vez que la lámina calentada ha llegado a su geometría final, al contactar toda la superficie de las cavidades del molde, la refrigeración interna que estas llevan, regresará el producto conformado a una temperatura donde su estructura sea lo suficientemente rígida para ser expulsado del molde o desmoldado y ser arrastrado a la siguiente estación.

Corte del producto

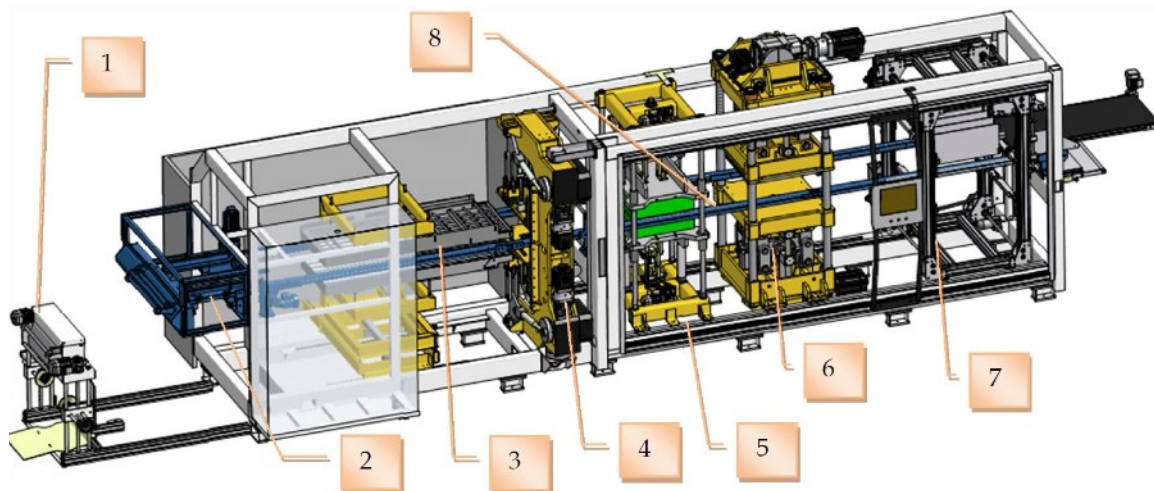
En la siguiente estación, se encuentra de manera análoga una prensa con platinas inferior y superior de movimiento alternativo apertura-cierre. Es aquí donde por medio de un troquel, cada uno de los productos ya termoformados en la lámina se cortan en su borde perimetral, salvo en algunas pequeñas zonas. Dichas zonas conocidas como *muescas*, son las encargadas de mantener los productos sujetos al resto de la lámina mientras siguen avanzando a la estación final. Adicionalmente se puede tener otra prensa donde se realizan orificios o ranuras en los productos mediante un troquel de punzonado y posteriormente el corte perimetral. Esto con la finalidad de tener ventilación en los empaques que requieran flujo de aire para mantener fresco su contenido como en el caso de algunas frutas y hortalizas o para evitar empañamiento en contenedores de alimentos calientes.

Recolección y apilado de producto

En la última estación se tiene un sistema apilador compuesto de eyectores o expulsos que terminan desprendiendo por completo los productos de la lámina, mientras que un fin de brazo robótico los recibe y captura para apilarlos en una plataforma. Al cabo de un número conveniente de ciclos, las pilas de productos se desplazan a una banda transportadora donde se toman por un operador para su embalaje manual. El remanente de lámina no termoformada se le conoce como *esqueleto (web, skeleton, edge trim)*. Simultáneamente el esqueleto se vuelve a pasar por una bobinadora que lo enrolla sobre un mandril. La nueva bobina de material descartado se retira periódicamente para su posterior reciclaje.

Transporte o arrastre de lámina

El arrastre de la lámina a través de cada una de las estaciones mencionadas se realiza por medio de un sistema de transporte que utiliza dos guías o rieles donde en cada uno se tienen cadenas indexables (i.e. con control de avance). Básicamente estas perforan la lámina con ganchos o picos a lo largo de sus costados para sujetarla, mientras por intervalos de tiempo recorre una distancia igual a la longitud del molde, conocido como *avance (index)*. Este avance debe ser lo suficientemente preciso para garantizar un correcto posicionamiento en la prensa de corte logrando con ello que dicho corte sea lo más exacto a la especificación del diseño. Si bien en la estación de apilado existe mayor tolerancia para el posicionamiento del producto, aquí también se cumple un indexado preciso.



▲ Fig. 1.3 Máquina termoformadora OMG PVE. (Imagen cortesía de O.M.G. srl. www.omgitaly.com)

1. Desbobinador, 2. Pinzas de precalentamiento, 3. Paneles calefactores, 4. Prensa de termoformado,
5. Prensa de punzonado, 6. Prensa de corte, 7. Estación de apilado, 8. Guías de lámina (cadenas)

Control del proceso

Toda la supervisión del proceso de termoformado, el control y ajuste de parámetros es llevado a través de una interfaz de pantalla táctil a color. Mediante este sistema es posible guardar las 'recetas' o parámetros óptimos, específicos para cada herramental-producto requerido. Esto ayuda a lograr un proceso de cambio rápido de herramientas, con tiempos muertos de producción reducidos.

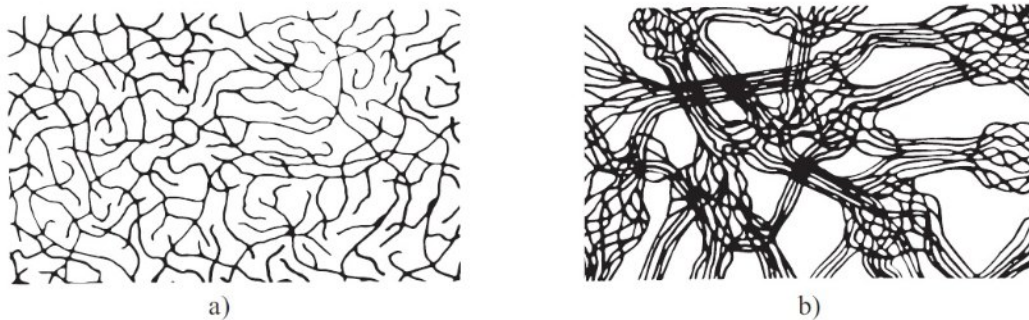
1.2 Materiales termoplásticos y propiedades

Los *termoplásticos* son una subcategoría de los polímeros cuya principal característica es volverse blandos y deformables en múltiples ocasiones mientras se calientan, esto sin sufrir cambios substanciales en sus características físicas. A temperaturas muy elevadas los termoplásticos se vuelven un fluido no viscoso. Esta propiedad les permite ser transportados a través de dados de extrusión y conformar láminas o rollos de material plástico. Frecuentemente son usados indistintamente los términos plástico y polímero. Plástico hace referencia a la propiedad del material a ser moldeado (i.e. conformado). También es común el término de plástico para los polímeros que han sido mezclados con aditivos, con el fin de modificar sus propiedades.

Una vista a su estructura muestra que son largas cadenas basadas en múltiples bloques de hidrocarburos. Cada uno de esos bloques o unidades son moléculas idénticas llamadas *monómeros*, por lo cual reciben el nombre de *polímeros* (cabe aclarar que muchos polímeros no son plásticos). Un parámetro importante en la caracterización y en el procesamiento de los polímeros, es la *viscosidad intrínseca (IV)*. Directamente asociada al *peso molecular*, es decir, a la longitud de las cadenas poliméricas. Cuanto mayor sea la viscosidad intrínseca, mayor peso molecular y mayor resistencia al flujo. Propiedades mecánicas del polímero como la *tenacidad* o la *resistencia al impacto* se ven incrementadas por un mayor peso molecular.

Si solo se usa un tipo de polímero en una fórmula determinada, el polímero se denomina *homopolímero*. Cuando un polímero se hace reaccionar con otro distinto, el resultante se denomina *copolímero*. Típicamente un homopolímero permite mejor acomodo en las cadenas, una de varias formas que conduce a adquirir algún grado de cristalinidad.

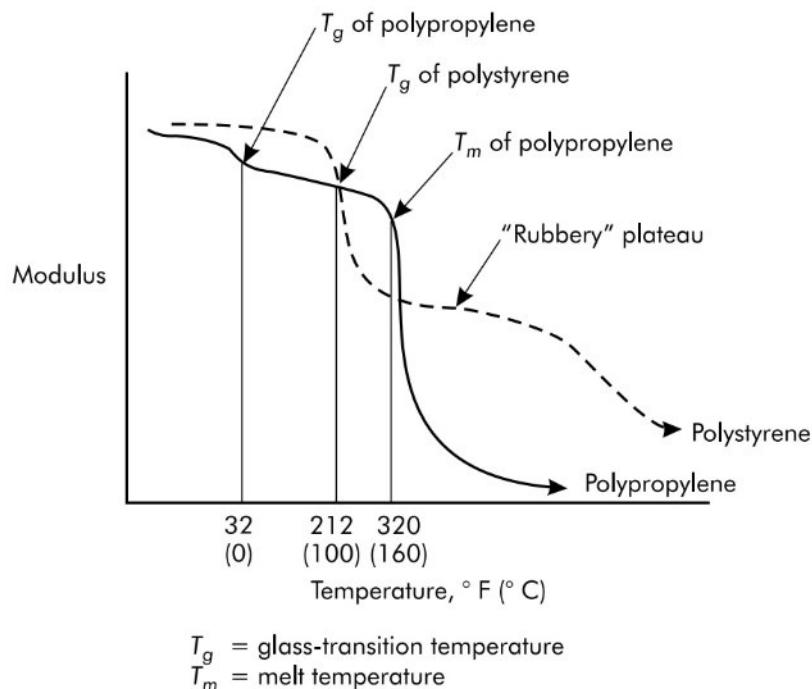
En la naturaleza los materiales sólidos se presentan de dos formas, materiales cristalinos y materiales amorfos. En los polímeros se observa una situación similar (Fig. 1.4). Por su parte, los polímeros que tienden a un estado cristalino o *polímeros semicristalinos*, tienen sus cadenas dispuestas en patrones altamente ordenados. En el otro lado, los polímeros donde existen cadenas sin un ordenamiento uniforme y se encuentran en extremo revueltas, se les conoce como *polímeros amorfos*.



▲ Fig. 1.4 Estructura de los materiales termoplásticos. a) amorfo, b) semicristalino. Tomado de *Thermoforming: A Practical Guide*. Schwarzmann, Peter e ILLIG. (2019)

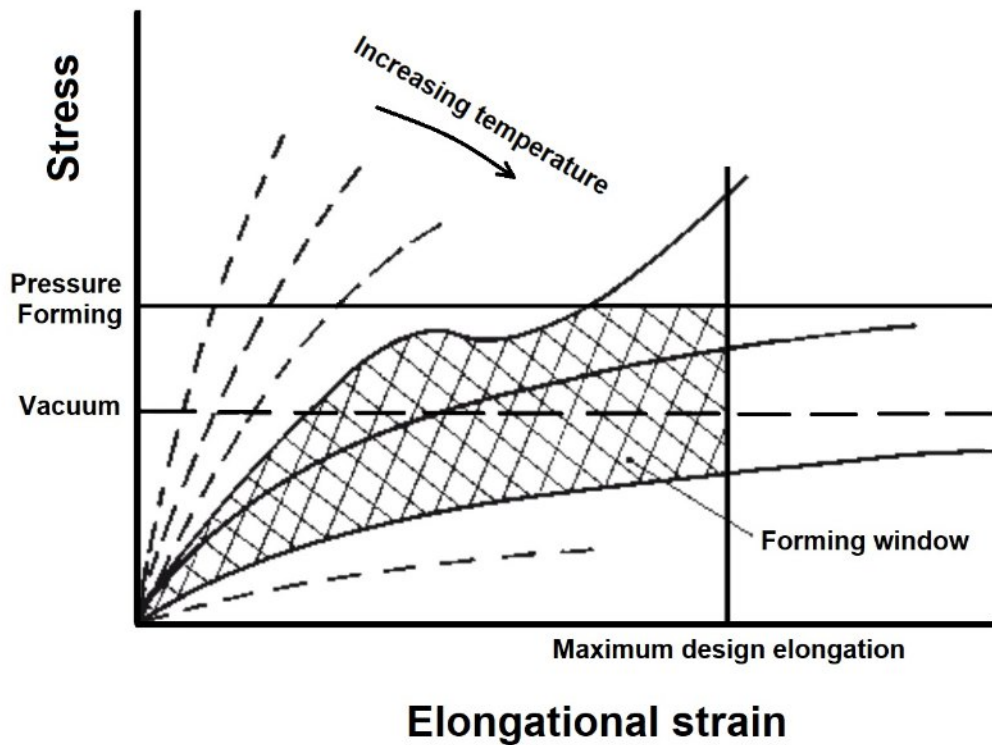
Una consecuencia de las estructuras en los polímeros amorfos en su estado natural (i.e. sin colorantes o aditivos), es su transparencia a la luz visible. En los polímeros semicristalinos por sus estructuras más cerradas se tiene refracción de la luz, lo que produce materiales translúcidos a opacos.

Cuando un polímero semicristalino se calienta desde una temperatura muy baja (donde es duro y frágil), experimenta una primera transición física de sus zonas en *estado vítreo* o amorfo, a un estado maleable, donde se vuelve posible un desplazamiento de moléculas a gran escala y se produce un ablandamiento significativo. Aunque esta transición ocurre en un intervalo de temperatura de varios grados, para cada polímero generalmente solo se reporta una temperatura conocida como la *temperatura de transición vítreo* (T_g). Cuando los polímeros semicristalinos se siguen calentando por arriba de su T_g , en un intervalo de algunos grados las zonas cristalinas presentarán una segunda transición física, de un estado sólido y bien ordenado a un estado líquido o fundido. A la temperatura reportada se le denomina como *temperatura de fusión* (T_m). Cuando el polímero se enfría adopta un porcentaje de cristalinidad correspondiente al tipo de procesamiento dado. De acuerdo a la tasa de enfriamiento, a mayor rapidez de enfriamiento menor grado de cristalización y viceversa. En el caso de los polímeros amorfos solo presentan la primera transición, de estado vítreo a un estado maleable cuando son sujetos a calentamiento.



▲ Fig. 1.5 Cambio del módulo de elasticidad con respecto a la temperatura (PP semicristalino y PS amorfo). Tomado de *Thermoforming: Improving Process Performance*. Rosen, Stanley. (2002)

El *módulo de elasticidad* de acuerdo a lo mencionado se puede prever que depende de la temperatura, a mayor temperatura menor módulo de elasticidad. En un polímero amorfo el módulo de elasticidad está asociado a la fuerza de enlace en sus cadenas principales. Un módulo de elasticidad pequeño es típico de polímeros más flexibles, polímeros más rígidos tendrán un módulo de elasticidad más grande. Polímeros que presentan algún grado de cristalinidad, tienen un módulo de elasticidad más alto en estas zonas ordenadas que en las zonas amorfas, sobre todo a temperaturas por encima de la temperatura de transición vítrea. En la *figura 1.5* se puede observar este comportamiento. El polipropileno (PP), un material con alto grado de cristalinidad, presenta un cambio en el módulo de elasticidad relativamente menor llegando a la temperatura de transición vítrea, lo que corresponde a la respuesta de sus zonas amorfas. Alcanzando la temperatura de fusión el decremento del módulo de elasticidad es mucho mayor, correspondiente al cambio físico de las zonas cristalinas. En contraparte el poliestireno (PS), típicamente amorfo, presenta el máximo decremento en su módulo de elasticidad una vez alcanzada la temperatura de transición vítrea. Posteriormente al seguir incrementando la temperatura en el polímero amorfo, se mantiene una zona donde el módulo de elasticidad disminuye lentamente, a esta región se le conoce como una *meseta*. La longitud de la meseta depende del peso molecular del polímero. Una meseta más amplia corresponde a un peso molecular más alto. Esto implica que los polímeros amorfos generalmente presentan intervalos de temperatura más amplios de procesamiento para el termoformado, así como menor suministro de energía térmica. Polímeros de alta cristalinidad, presentan intervalos de temperatura reducidos, mayor requerimiento de energía térmica y mayor resistencia al estiramiento.



▲ Fig. 1.6 Curvas de esfuerzo-deformación dependientes de la temperatura para un termoplástico. Ventana de termoformado para vacío, presión y máximo estiramiento requerido. Tomado de *Understanding Thermoforming*. Throne, James. (2008)

Cualitativamente, el límite inferior de temperatura de conformado para cualquier termoplástico es aquella donde este puede adquirir una definición adecuada de las geometrías del molde. El límite superior, es la temperatura máxima a la que puede calentarse el termoplástico sin sufrir degradación alguna. En el conformado de lámina delgada esta temperatura suele ser menor, debido a la necesidad de mantener cierta resistencia a la fuerza de gravedad y evitar la creación de una comba excesiva cuando las láminas son sujetas en sus extremos al sistema de transporte. La *ventana de termoformado* dependiente de la temperatura se define como la región superpuesta en la gráfica de esfuerzo-deformación donde el termoplástico se puede estirar o conformar en la geometría deseada. Esta es una propiedad exclusiva del material. En la *figura 1.6* se muestra la ventana de termoformado acotada en una parte por diferentes curvas de esfuerzo-deformación dependientes de la temperatura. A temperaturas bajas (i.e. por debajo de la temperatura de transición vítrea) se puede notar la ruptura anticipada a lo requerido, mostrando aún el comportamiento frágil. A temperaturas demasiado elevadas la baja viscosidad del termoplástico no puede mantener el esfuerzo de su propio peso o por motivo de alguna degradación las propiedades mecánicas se ven disminuidas. Los siguientes límites serán las líneas horizontales equivalentes al máximo valor de esfuerzo que se puede aplicar a la lámina, ya sea vacío (i.e. un diferencial de presión de aproximadamente 1 bar) o un diferencial de presión mucho mayor. Finalmente el último límite será la línea vertical correspondiente a la extensión máxima del estiramiento requerido para conformar la geometría deseada. La ventana de termoformado para cierto material termoplástico y molde específico es la región sombreada.

Al ser necesario el enfriamiento de un termoplástico para regresar a su estado sólido, por ejemplo una vez que se le haya dado la geometría deseada en un molde, se requerirá de remover mayor cantidad de energía en el material semicristalino que en un material amorfo. La *capacidad calorífica* o *calor específico*, es la propiedad del material que dicta la energía requerida para aumentar la temperatura de una cantidad unitaria de material. La *entalpía* es la medida con la cual se determina este cambio de energía acorde al cambio de temperatura.

Los cambios en la estructura de los termoplásticos frente al calentamiento y por consiguiente, la elevación de su temperatura vienen acompañados de incrementos en su volumen. En consecuencia la disminución en su densidad. Es de esperarse entonces que se presente incremento en la densidad durante el proceso de enfriamiento del polímero, debido a la disminución en el volumen. A esto se le conoce como *contracción térmica*. De principal importancia para poder dimensionar las cavidades de los moldes en cualquier proceso que use termoplásticos, a través del uso de un factor de contracción específico para cada resina.

La *orientación molecular* de las cadenas en los polímeros tiene un impacto importante en la rigidez de la pieza final. Las moléculas se alinean en la misma dirección de los esfuerzos aplicados al conformar la lámina. Si la pieza es enfriada en el molde a una velocidad alta, esta orientación queda fijada o retenida y en esa dirección tendrá una mayor resistencia. En la dirección transversal la resistencia será menor. Tasas lentas de enfriamiento permiten que las moléculas se *relajen* y tiendan a regresar a su estado no orientado.

Vale la pena mencionar que para brindar la mayor rigidez posible en los productos termoformados, es de gran importancia mantener un espesor de pared uniforme. Una manera de visualizar analíticamente este efecto es estudiando la relación que determina la deflexión máxima en una viga rectangular con una carga al centro y apoyada en sus extremos [2]. El espesor de la viga influye en gran medida por aparecer como un término elevado al cubo:

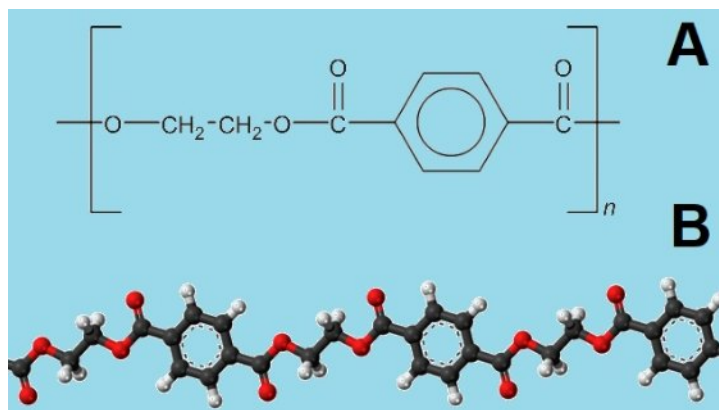
$$y_{max} = PL^3/(4Ebd^3)$$

Siendo y_{max} , P , L , E , b y d , la deflexión máxima, la fuerza aplicada, longitud de la viga, módulo de elasticidad, ancho de la viga y espesor de la viga respectivamente. Solo disminuyendo en un 10% el espesor de la viga, aproximadamente se necesita 30% menos de la fuerza original para obtener la misma deflexión máxima.

Para aplicaciones específicas es práctica común agregar aditivos a las fórmulas de polímeros. Entre ellos se encuentran estabilizadores térmicos, tintes correctores de color, coadyuvantes de procesamiento internos y externos (e.g. agentes antibloqueo que permiten desenrollar fácilmente de la bobina una lámina extruida), agentes antivaho para evitar acumulación de condensación dentro de un empaque, inhibidores de estática para empaques de componentes electrónicos, material de relleno y refuerzos (e.g. minerales inorgánicos de bajo costo como el carbonato de calcio y el talco), aceleradores o inhibidores de cristalización, inhibidores de envejecimiento y estabilizadores a la luz, entre otros.

1.3 PET como resina para termoformado

El *tereftalato de polietileno* o PET, es un polímero que pertenece a la familia de los poliésteres, ampliamente conocido por su uso en botellas para bebidas y fibras para telas. Un método de producción se realiza mediante el principio de polimerización por condensación, llamado así por el hecho de obtener agua como subproducto. Se hace reaccionar dos compuestos, etilenglicol y ácido tereftálico, pero solo se produce un tipo de unidad repetitiva o mero, el tereftalato de etileno. Debido a esto, el PET se considera un homopolímero. En la *figura 1.7* se muestra la representación química de la fórmula estructural o unidad repetitiva y un modelo tridimensional del segmento de una cadena.



▲ **Fig. 1.7** Tereftalato de polietileno (PET). A. Fórmula estructural (i.e. unidad repetitiva), B. Segmento tridimensional de una cadena. Adaptado de <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15949374>

Una característica de los poliésteres es su sensibilidad a la humedad. A altas temperaturas, el agua ataca la estructura del polímero y la degrada. Como resultado, la reducción en su peso molecular y viscosidad intrínseca, por lo tanto una pérdida en las propiedades mecánicas (e.g. tenacidad, resistencia al impacto) [4]. Específicamente en el proceso de termoformado, esto se puede notar cuando se presenta una comba excesiva en la lámina durante el calentamiento en el horno.

De acuerdo a su aplicación, la viscosidad intrínseca (IV) es modificada en las formulaciones del PET. Por ejemplo, en la fabricación de fibras el valor de la IV es cercano a 0.7, en la producción de lámina para termoformado alrededor de 0.8, mientras que en producción de botellas para bebidas es cercano a 0.9 [3].

El PET es un material muy inerte, lo cual indica que es resistente al ataque de microorganismos y también cuenta con propiedades de barrera al oxígeno. A mayor cristalización mejoran las propiedades de barrera. Ambos factores lo convierten en un material adecuado para envases de productos médicos y de alimentos.

Uno de los requerimientos principales en los empaques termoformados para alimentos es tener una alta transparencia para mostrar claramente su contenido. Cuando se procesa el PET, si la temperatura del molde es lo suficientemente baja, es posible mantener el estado amorfo (i.e. nivel mínimo de zonas que cristalizan) durante todo el proceso de termoformado dando lugar a una pieza final de PET-A o APET, *tereftalato de polietileno amorfo*. Con ello se asegura la transparencia requerida. Por el contrario si el molde usado

presenta una temperatura elevada y hay suficiente tiempo de residencia en el mismo, la lámina comenzará a cristalizar resultando una pieza de apariencia opaca de PET-C o CPET, *tereftalato de polietileno cristalino*. Esta propiedad es aprovechada en piezas que requieran de buena estabilidad en su uso a altas temperaturas, como el caso de charolas para hornear y uso en microondas.

En la práctica, las láminas de CPET para termoformar son PET amorfo con una cantidad determinada de agentes nucleantes. Estos agentes promueven la cristalización, principalmente después de haber conformado la lámina en la geometría deseada. Con ello se evita la dificultad de termoformar en un inicio PET con alto porcentaje de cristalinidad [1].

Una variedad más de PET es el conocido como PET-G, PETG o GPET cuya diferencia radica en glicol como agregado a la fórmula, precisamente con la única finalidad de inhibir la cristalización, independientemente de la temperatura y el tiempo en que se procese. Esto lo hace un material más costoso versus el APET.

Se menciona que el desarrollo del PET fue originalmente como un material fibroso, lo que implica una mayor resistencia al desgarre y por lo tanto, también una mayor resistencia al corte. En términos comparativos ofrece la mayor resistencia a la perforación de entre todos los termoplásticos, siendo aproximadamente el doble de lo requerido para un poliestireno de alto impacto o HIPS [1]. Típicamente el APET presenta las bisagras más duraderas en empaques tipo almeja o con tapa [4].

En la *tabla 1.1* se muestran algunos datos promedio de resinas comúnmente utilizadas en el proceso de termoformado. Es importante notar que ciertos parámetros dependen en gran medida del procesamiento para la obtención de la lámina, formulación del polímero, esfuerzos residuales, humedad, entre otros. Por tanto, los datos reales para la aplicación en el termoformado se determinan de forma experimental y con base en la experiencia.

Se tienen parámetros tanto para el diseño de los herramientas como para el procesamiento. Entre los datos que se pueden esperar de manera directa para el caso del PET, podemos confirmar que la mayor densidad se presenta en el estado semicristalino con nula transparencia óptica y alta temperatura de uso.

En las ventanas de termoformado se puede apreciar como es posible procesar la lámina desde una temperatura menor con el uso de aire a presión. Cuando solo es posible usar vacío, la temperatura de la lámina debe ser incrementada para compensar la ausencia de una fuerza mayor que replique fielmente los detalles de la cavidad, como el caso del PETG que puede llegar hasta 190°C. Nótese que elevar la temperatura no es aplicable en el caso del APET pues como se ha mencionado comenzaría a cristalizar.

Los factores para determinar el tiempo de calentamiento y enfriamiento están basados en los tiempos establecidos para el poliestireno de alto impacto (HIPS) por considerarse un material de referencia.

Comparativamente, datos reportados del PET en otras fuentes mencionan una temperatura de transición vítrea T_g , que va desde los 67°C para el APET, 81°C en el CPET, hasta los 82°C en el PETG [3, 5]. En el caso de la temperatura de fusión T_m , el intervalo va desde los 240°C hasta 265°C [5, 6]. Cuando se enfría a una velocidad baja se encuentra que recristaliza alrededor de los 250°C en un 40-45% de su peso [6]. Aunque por otro lado de 170°C a 180°C se considera el intervalo de temperatura con mayor formación de zonas

cristalinas [3, 5]. En cuanto al intervalo de temperatura para el termoformado en APET, se encuentra que va de los 121°C a los 166°C, siendo 149°C la temperatura típica [3].

Thermoplastics	Acronym	Density	Tensile strength	Elasticity modulus	Optical transparency	Linear heat expansion	Specific heat	Continuous-use temperature	
								Min.	Max.
	-	g/cm ³	N/mm ²	N/mm ²	+ Yes - No	10 ⁻⁶ °C	kJ/ kg·K	°C	°C
Polystyrene, orientated	OPS	1.05	57	3200	+	70	1.3	-60	79
Polypropylene	PP	0.91	30	1200	- (+)	150	2.0	0 (-30)	110
Polyethylene terephthalate, amorphous	PET-G	1.27	49	1720	+	51	1.1	-40	63
Polyethylene terephthalate, amorphous	A-PET	1.34	30	2200	+	80	1.05	-40	70
Crystalline polyethylene terephthalate	C-PET	1.37	47	2600	-	70	1.1	-20	220

▲ **Tabla 1.1** Tabla para el termoformador. Adaptado de *Thermoforming: A Practical Guide*. Schwarzmann, Peter e ILLIG. (2019)

Acronym	Pliability temperature	Crystallite melting range	Predrying of 1.5-2 h/mm panels	Thermoforming temperature		Material factor for heating time	Material factor for cooling time	Venting				Molding shrinkage
				Pressure forming	Vacuum forming			Vacuum forming		Pressure forming		
								Bore hole	Slot	Bore hole	Slot	
-	°C	°C	°C	°C	°C	-	-	mm	mm	mm	mm	%
OPS	99	-	-	115	115	1	0.7	0.8	0.6	0.6	0.4	0.5
PP	140	158+10	-	150-165	160-200	2.1	2.1	0.6	0.3	0.3	0.2	1.5-1.9
PET-G	82	-	-	100-120	110-190	1.25	0.88	0.8	0.4	0.6	0.3	0.4-0.5
A-PET	86	-	65	100-120	110-120	1.25	0.88	0.8	0.4	0.6	0.3	0.4-0.5
C-PET	86	255+3	-	130-145	/	/	/	/	/	0.6	0.4	0.5-2.0

▲ **Tabla 1.1** (Continuación)

Actualmente el reciclaje y reusabilidad es un tema importante a nivel global y se puede observar una fuerte tendencia hacia un mayor contenido de material reciclado posconsumo. Uno de los materiales que mayor auge tienen en este momento es el conocido como rPET o R-PET, debido a la gran cantidad de botellas de PET que circulan en el mercado. Las piezas termoformadas posconsumo generalmente no se incluyen en el flujo de reciclaje de PET, por lo que se ocupan legislaciones y tecnologías mejoradas para solucionar este problema. Con rutas de reprocesamiento más desarrolladas, se puede esperar que las piezas termoformadas de PET se recolecten y reciclen a un ritmo similar al de los envases de plástico en general.

A tener en consideración que estos materiales reciclados tienen diferentes propiedades versus las de materiales vírgenes. Con cada ciclo de reprocesamiento las propiedades (e.g. viscosidad intrínseca) se pueden ver mermadas de no ser tratados apropiadamente, disminuyendo la calidad final del producto.

En el caso donde los empaques, charolas o vasos cuya función es resguardar y/o contener alimentos y bebidas, tener material reciclado en contacto directo puede ser situación no deseada, se tiene el método de coextrusión. En el se extruyen láminas multicapa, con capas externas de material virgen que fungen como barrera a la capa central de material reciclado, siendo esta última la de mayor contenido en peso.

Sumado a los beneficios económicos de evitar desperdicio, el uso de material reciclado tiene un impacto más amigable con el medio ambiente. Al requerirse menores cantidades de aceites minerales, se emite menos CO₂ que al procesarlo por primera vez. Es decir, ahorros en energía para transformar los precursores, como el etileno y el benceno, en polímero virgen.

1.4 Herramientales para termoformado

Se entiende por herramental a un equipo o dispositivo para un propósito determinado, en este caso para el procesamiento de plásticos. Los herramentales básicos presentes en la producción de alto volumen de un producto termoformado específico son:

I. Molde. Su función primordial es definir en la lámina la geometría del producto deseado. En termoformado de lámina delgada típicamente se encuentran moldes negativos multicavidades, esto es, en cada ciclo o *golpe (shot)* de las prensas, se crean múltiples productos idénticos. Comúnmente se le conoce con el nombre de cavidad al elemento del molde que lleva la geometría a replicar.

II. Troquel de corte. Su función es separar al producto del esqueleto. Existen tanto herramentales donde se tiene al molde y al sistema de corte en distintos ensambles (i.e. montados en diferente estación de la máquina termoformadora), así como en el mismo ensamble, estos últimos conocidos como *corte en sitio*.

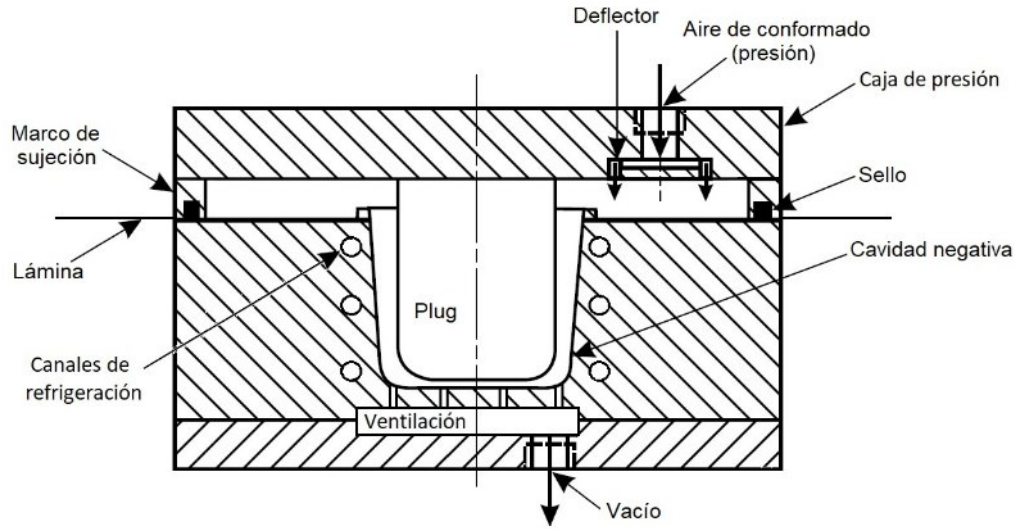
III. Unidad apiladora. En sistemas productivos de alto volumen son imprescindibles los equipos para manipulación de las piezas fabricadas. En este sentido, la tarea específica de esta herramienta es recolectar y apilar ordenadamente los productos termoformados para su posterior embalaje.

1.4.1 Molde para termoformado

Un *molde para termoformado* tiene como primer objetivo, definir la geometría y mantener con precisión una pieza que cumpla con todas las especificaciones requeridas. Para ello debe proporcionar una superficie dimensionalmente estable contra la cual se presiona la lámina de plástico por medio de aire a presión y/o vacío y fungir como un intercambiador de calor que extrae el calor de la lámina de manera eficiente. Al ser un elemento sujeto a presión y vacío, debe permitir que el aire presente entre la lámina y las cavidades se ventile o desplace uniformemente a través de una serie de barrenos, ranuras y canales interconectados. Por lo tanto, debe ser lo suficientemente robusto para resistir dichas fuerzas y transferencia de calor de manera cíclica. Los procesos repetitivos de contacto con la lámina, provocan erosión y desgaste en la superficie que da la geometría al producto, sumado al desgaste propio de cualquier elemento de máquina con movimiento dentro de la misma. Desde luego que debe perdurar a diversas condiciones ambientales durante el manejo, transporte y almacenamiento cuando no se encuentra en producción (*Fig. 1.8*).

En la industria del termoformado de lámina delgada el material estándar en moldes y cavidades son placas de aluminio normalmente maquinadas en centros de control numérico (CNC). En comparativa el aluminio puede ser un 60% más ligero que el acero y agregado a su alta conductividad térmica lo hacen una opción ideal. Los dos principales materiales son el Al6061-T6 para aplicaciones de temperaturas y presiones bajas. Para aplicaciones de alta temperatura se usa Al7075-T651, característico por su alta resistencia, típicamente mayor que muchos aceros dulces o de bajo contenido en carbono y altamente utilizado en la industria aeroespacial. Su punto de cedencia y resistencia última a la tracción es alrededor a los 500MPa y 570Mpa respectivamente. Módulo de elasticidad 72GPa. Presenta buena maquinabilidad lo que promueve excelentes acabados superficiales. Tiene moderada resistencia a la corrosión aunque el contacto directo con otro tipo de metales puede causar corrosión galvánica. Tiene buena respuesta a tratamientos de anodizado para mayor dureza superficial. La terminación -T651 hace referencia a un material templado mediante tratamiento térmico, enfriado en agua después de extruir y envejecido artificialmente. Comercialmente disponible en placas con espesor desde 0.25 in. hasta 4 in. Cabe mencionar que para espesores mayores, las propiedades mecánicas comienzan a verse reducidas.

Mantener una temperatura uniforme en la superficie del molde es uno de los puntos clave para obtener piezas de alta calidad. Al generar un enfriamiento parejo se reducen posibles esfuerzos residuales que induzcan flexiones en las piezas conformadas una vez que han enfriado completamente. Generalmente el tiempo de residencia de la lámina conformada sobre el molde, marca el tiempo total de ciclo. En otras palabras, una refrigeración óptima reducirá el tiempo requerido para que el material termoplástico vuelva a una temperatura donde la nueva geometría sea lo suficientemente rígida. Una referencia de esta temperatura puede consultarse en la *tabla 1.1* bajo la columna etiquetada como *temperatura máxima de uso continuo (Continuous-use temperature)*. La técnica más eficiente para regular la temperatura dentro de los moldes se logra con canales barrenados y ranuras maquinadas, conectados entre sí, por los cuales circula líquido refrigerante, típicamente agua, aunque raramente pueden encontrarse moldes que utilizan aceite como medio para el control de la temperatura.



▲ Fig. 1.8 Molde de termoformado con cavidad negativa y línea de vacío en el lado inferior de la prensa, contramolde con aire a presión y plug para asistencia mecánica de conformado en el lado superior de la prensa. Adaptado de *Thermoforming: Improving Process Performance*. Rosen, Stanley. (2002)

Otra característica que influye en el tiempo de ciclo es la ventilación. Esta determinará cuán rápido la lámina hará contacto en su totalidad con la superficie de la cavidad. Agregado a esta función, la ventilación juega un papel importante en la correcta definición de la geometría requerida, tanto en las zonas más alejadas de la parte superior del molde como en los vértices y radios de la cavidad. Para el caso de superficies planas se incluyen patrones de barrenos equidistantes a lo largo y ancho de la superficie para evitar aire atrapado. La determinación de la cantidad de barrenos y ranuras de ventilación es dependiente de la cantidad de aire a desplazar. La dimensión de estos a su vez depende del calibre y material de la lámina usada.

Es importante recordar que el lado de la lámina en contacto con el molde es la que tendrá mejor definición de la geometría deseada y por lo tanto de las dimensiones finales requeridas (Fig. 1.2). Los detalles más finos en la geometría solo será posible replicarlos en moldes que actúan no solo con vacío sino también con presión. El acabado superficial de la cavidad determina en gran medida la apariencia de los productos termoformados (i.e. acabado mate, con buen brillo, rugoso). También contribuye a la rapidez de la ventilación del aire entre lámina y cavidad. Cuanto más rugosa sea la textura de la superficie del molde, más rápidamente se puede expulsar el aire atrapado hacia los canales de ventilación. Las colinas y valles microscópicos inherentes a la textura rugosa permiten que el aire pueda fluir. Los moldes muy pulidos pueden requerir más orificios y/o ranuras de ventilación porque el aire atrapado no puede viajar muy lejos a lo largo de una superficie lisa. En el extremo, un acabado superficial muy fino puede ser un inhibidor del desmoldeo.

Un elemento más para producciones de alta demanda son los sistemas de desmoldeo. Estos facilitan la expulsión mecánica de los productos termoformados fuera del molde y por lo tanto también ayudan a reducir el tiempo de ciclo. Especialmente necesarios cuando el producto requerido contiene en su geometría zonas con ángulos negativos (*undercuts*). Pueden ser accionados tanto por equipo neumático como por

resortes. Estos sistemas pueden aplicar la fuerza de desmoldeo en zonas de la lámina que se encuentren fuera del área a conformar o pueden aplicar la fuerza directamente sobre superficies de la pieza ya termoformada bajo el riesgo de producir marcas visibles no deseadas en el producto.

La asistencia mecánica de conformado por medio de plugs es otro elemento importante en la calidad de un producto termoformado. Consiste en una pieza rígida colocada en sentido opuesto a la cavidad (i.e. ensamblada en el contramolde), al avanzar en dirección normal a la lámina calentada hace contacto con la misma, estirándola hasta unos milímetros antes que la lámina toque la superficie de la cavidad. Su principal objetivo es controlar los espesores de pared a lo largo de toda la geometría o llevar más material a zonas específicas, como puede ser el caso de recipientes con diversos compartimentos a diferentes profundidades. Los lugares donde el plug entra en contacto por primera vez con la lámina transportarán la mayor parte del material. Sumado a la temperatura de la lámina los factores que influyen en llevar a cabo el objetivo establecido son; el material del plug, geometría y acabado superficial. Este último determina un parámetro importante como lo es el coeficiente de fricción entre plug y lámina. En el caso del material, el estándar es la espuma sintáctica, un tipo de material compuesto que tiene como base constituyente esferas huecas preformadas hechas de vidrio, cerámica, polímero o incluso metal. El aglutinante es generalmente un polímero. Como resultado se tiene un material de alto rendimiento, ligero, buen acabado superficial y baja transferencia térmica. Esto último contribuye a minimizar el calor que absorbe de la lámina caliente [7]. Vale la pena mencionar que todas las características expuestas lo hacen también un material funcional para ser usado en moldes prototipo [3]. Otro material sugerido para los plugs en el termoformado del PET es el *polioximetileno* (POM), también conocido como *poliacetal* o *acetal* [1].

Como se ha mencionado, el conformado de la lámina se lleva a cabo también mediante un sistema de aire a presión. Este sistema se encuentra del mismo lado que los plugs en el contramolde, en el lado opuesto a las cavidades. Esta presión de mucho mayor magnitud a la presión atmosférica, desplaza de manera más eficiente y veloz el aire atrapado entre lámina y cavidades. Debido a esta fuerza mayor, se logra un mejor contacto entre ambos para replicar fielmente la geometría del producto deseado y de manera benéfica se promueve una óptima transferencia de calor por conducción. Al elemento que ayuda con esta función en el molde, se le conoce típicamente con el nombre de *caja de presión* y su desempeño es complementado con los marcos de sujeción.

Para lograr una aplicación controlada y uniformemente distribuida de las fuerzas de conformado, se requiere de sujetar la lámina por ambos lados. Esta restricción de movimiento se focaliza en las zonas proyectadas de la lámina que no serán parte del producto final, es decir, el espacio que existe entre cavidades contiguas y el espacio en la periferia del molde. Esta restricción de movimiento no obstante cumple una función más, controla la cantidad de material disponible a ser estirado entre una y otra cavidad. Los *marcos de sujeción* son los elementos que llevan a cabo estas tareas. Normalmente a través de sellos de silicona o neopreno extruido que se instalan en ranuras maquinadas se controla tanto el movimiento de la lámina como la fuga de aire a presión o vacío. También es práctica común incluir en los marcos, ranuras y salientes emparejadas, para lograr compresión en la lámina y restringir movimiento de la misma. Con estas ranuras y salientes se termoforman costillas o nervios que sumarán rigidez estructural a la lámina cuando es arrastrada hacia las siguientes estaciones.

En todas las estaciones es de suma importancia incluir elementos que permitan a los operadores el cambio rápido entre un set de herramientas y otro, es decir, deben facilitar tanto su instalación como su retiro de la máquina. Estos elementos varían dependiendo de la máquina donde se instalan los herramientas. Básicamente consisten, entre otros, ayudas para cargar o hacer maniobra, ayudas para guiar o alinear los herramientas dentro de la estación correspondiente y por último elementos de sujeción o fijación a la máquina.

1.4.2 Troquel de corte

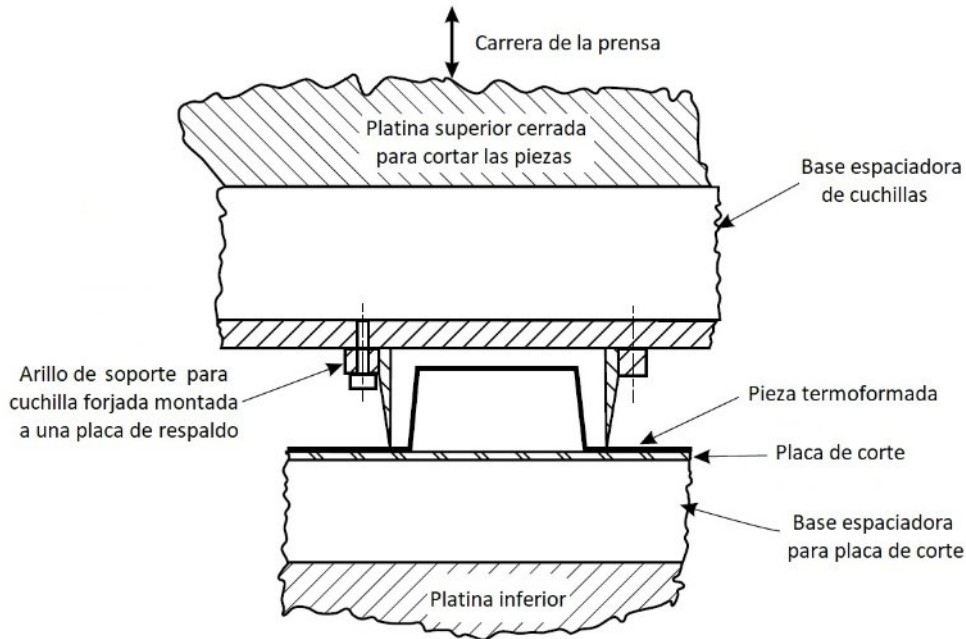
El *troquel de corte* es el herramienta que tiene como función separar el producto termoformado del resto de la lámina. Existen diferentes maneras de lograrlo, donde se pueden distinguir principalmente tres tipos.

Cuchillas forjadas de acero para herramienta, típicamente en espesores de 0.25 in. (6.35 mm) ó 0.375 in. (9.5 mm) y alturas desde 1.5 in. (38 mm) hasta 6.5 in. (165 mm) [8]. Estas cuchillas son fabricadas manualmente con una aproximación al contorno requerido, soldadas y posteriormente afiladas. Para producción, el mismo procedimiento inicial se aplica salvo con un ajuste a la medida final mediante maquinado por control numérico CNC, logrando tolerancias más cerradas pero en consecuencia con un incremento en el costo. Este tipo de cuchillas se ven comúnmente en moldes de corte en sitio. Rodean la cavidad y logran en un primer paso el sello o sujeción de la lámina contra una placa de corte presente en el lado opuesto a la lámina. Mediante conducción la lámina es calentada por la placa de corte y unos instantes después se aplica aire a presión a través de un patrón de pequeños orificios conformando así el producto. Posteriormente la máquina aplica una fuerza de cierre mayor, presionando por completo las cuchillas contra la placa de corte y separando casi por completo el producto de la lámina. Este tipo de cuchillas también existen en troqueles separados de la estación de termoformado como se muestra en la *figura 1.9*.

Un segundo método usado tanto para prototipos rápidos como moldes de producción son troqueles de corte con cuchillas prefabricadas de acero endurecido y previamente afilado, conocido como *pleca* o *suaje*. El espesor típico usado en termoformado de lámina delgada es de 0.041 in. (1.05 mm) aunque se encuentran desde 0.021 in. (0.53 mm) hasta .084 in. (2.13 mm) con alturas que van de 0.9375 in. (23.8 mm) a 4 in. (100 mm) para diversas aplicaciones [2, 3, 9]. Estos suajes prefabricados dispuestos en rollos sobre un carrete, son económicos en relación a los otros métodos y moldeables mediante máquinas dobladoras. A diferencia de las cuchillas forjadas y los punzones de un troquel tradicional que se pueden reafilarse, estos elementos son periódicamente reemplazados cuando pierden capacidad de corte. Son fijados sobre el contorno de arillos maquinados con el perfil del perímetro a cortar y aprisionados mediante tornillos laterales o fijados entre dos arillos a presión. Para aplicaciones con requerimientos de menor precisión o de producciones cortas, se pueden usar bloques de madera laminada con ranuras hechas por corte láser para posicionar y aprisionar las cuchillas al insertarlas a presión. Al igual que las cuchillas forjadas, los suajes están acompañados en su contraparte de una placa de corte sobre la cual se ejerce la presión del filo para lograr la separación entre producto y lámina.

Para estos dos métodos de cuchillas forjadas y de suaje, el corte del producto se lleva a cabo en toda la periferia del mismo, salvo en algunas zonas diminutas conocidas como muescas, típicamente cuatro puntos. Estos son rebajes que pueden fabricarse ya sea en el filo de las cuchillas o como pequeñas ranuras en las

placas de corte, con el fin de mantener el producto sujeto a la lámina para ser transportado a la estación final de apilado. La disposición de las muescas debe ser simétrica y siempre en sentido paralelo al avance de la lámina. Esto evita problemas de un desprendimiento no uniforme en el apilado provocando inestabilidad en la posición del producto al momento de ser recogido por el fin de brazo robótico.



▲ Fig. 1.9 Troquel de corte con cuchillas forjadas, arillo de soporte y placa de respaldo. Adaptado de *Thermoforming: Improving Process Performance*. Rosen, Stanley. (2002)

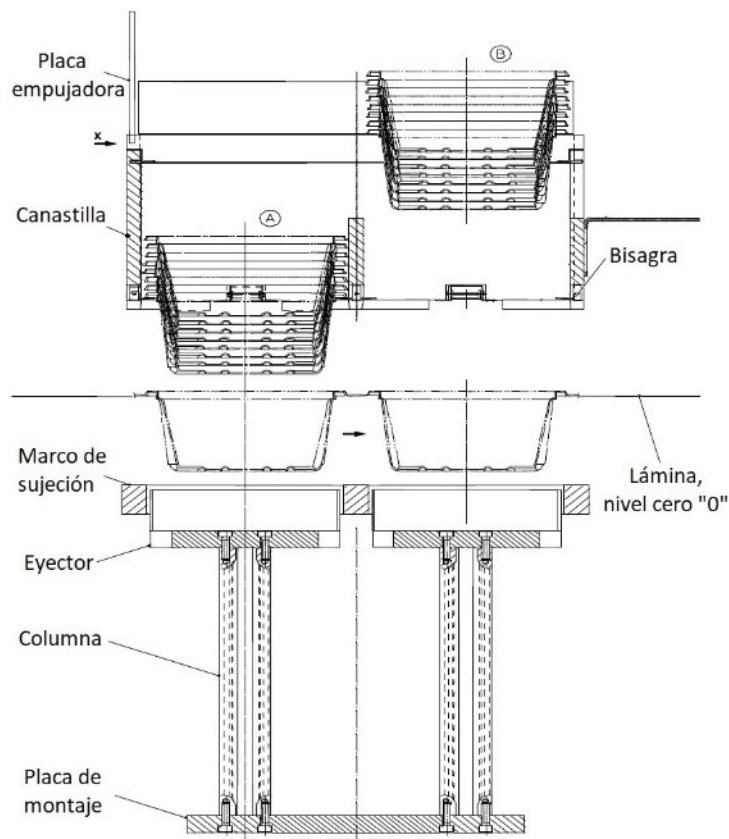
El tercer método usado para separar los productos termoformados de la lámina es el análogo a un troquel típico de la industria de chapa metálica. Con el mayor costo y tiempo de fabricación. Son recomendados para producciones largas, cuentan con la capacidad de ser reafilados y endurecidos para mayor durabilidad. Los punzones y matrices pueden ser fabricados en aceros como el P20 o D2 por medio de maquinado CNC o electroerosión por hilo. Este tipo de corte es más común verlo en prensas independientes a la máquina termoformadora, pero alineados a la misma. Llevan un ritmo diferente al tiempo del ciclo de termoformado, típicamente más rápido al cortar solo una fila de productos en cada golpe. Disponen de sus propios medios para el transporte de lámina y apilado final.

1.4.3 Unidad apiladora

En cuanto a sistemas de manipulación de los productos termoformados, una vez que han sido cortados en las prensas salvo en las zonas con muescas, es reconocible un dispositivo en común; el sistema de *eyectores, empujadores o expulsores*. Estos van dispuestos sobre columnas fijadas sobre una placa sujeta a la platina móvil de la estación. Con la carrera de dicha platina terminan desprendiendo por completo los productos de la lámina. Estas piezas comúnmente presentan una geometría similar al producto final para actuar como guías, haciendo contacto con la mayor superficie posible sin dañarlo. Los eyectores normalmente pueden

desprender el producto en cualquiera de las dos direcciones de movimiento, ya sea hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la configuración de la máquina.

Para la recolección y apilado de las piezas existen diferentes métodos, destacando un par; el primero, un sistema de canastillas que pueden ser de uno o dos niveles, con aletas de retención y/o bisagras de un solo sentido donde reposan las pilas de productos termoformados [9]. En la *figura 1.10* se muestra un sistema apilador de dos niveles. El funcionamiento comienza cuando los productos termoformados son desprendidos por completo de la lámina; mediante la fuerza aplicada por el viaje de los eyectores, estos colocan en cada ciclo los productos en el primer nivel sobre las bisagras, disponiéndolos en pilas hasta una cantidad determinada de ciclos. En el siguiente ciclo los eyectores viajarán una distancia mayor llevando las pilas hasta el segundo nivel sobre las aletas. Finalmente una placa empuja las pilas del segundo nivel deslizándolas fuera de la canastilla hacia una plataforma contigua.

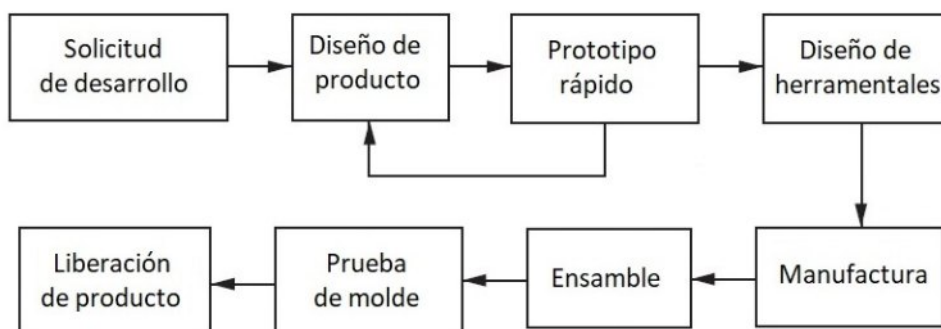


▲ **Fig. 1.10** Apilador de canastilla de dos niveles. A) productos apilados en primer nivel, B) momento para expulsión fuera de la canastilla. Adaptado de *Mould Construction Manual RD 53c*. ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG. (2012)

El segundo método para el apilado de los productos termoformados consiste en un sistema robótico que recoge y coloca (*pick and place*) los productos mediante un *fin de brazo* (*EOAT, robot-end-of-arm tool*). Este sistema usa técnica de vacío para sujetar con ventosas las piezas y enseguida apilarlas ordenadamente en una plataforma contigua para su posterior embalaje.

2 Diseño de herramientas para termoformado en Nutrigo S.A. de C.V.

En un proyecto de lanzamiento de un nuevo producto existen etapas bien definidas desarrolladas por las diferentes áreas dentro de la organización. Todo proyecto parte de una necesidad a cubrir, a partir de la cual, cada una de las etapas requiere de *entradas* (e.g. información impresa, archivos electrónicos, materiales) para poder realizar sus procesos específicos. Al final de cada etapa se tienen *salidas o entregables* (e.g. información impresa, archivos electrónicos, materiales con valor agregado), los que serán a su vez, entradas para la siguiente etapa del desarrollo hasta obtener un nuevo producto conforme a la necesidad inicial. La *figura 2.1* muestra de manera general la secuencia del desarrollo de un nuevo producto.



▲ Fig. 2.1 Secuencia del desarrollo de un nuevo producto

Solicitud de desarrollo

El cliente que puede ser interno (i.e. ventas) o externo hace una solicitud para iniciar el desarrollo de un producto nuevo. La solicitud contará con requerimientos específicos como dimensiones, resina de la lámina, producto a contener, producción requerida, ajuste con elementos como una tapa o recipiente, entre muchos otros.

Diseño de producto

Se realiza(n) la(s) propuesta(s) de diseño de producto donde se evalúan los requerimientos solicitados como geometrías deseadas, material, función y se consolidan con la factibilidad para el proceso de termoformado. Se tiene como entregables un *archivo de modelo sólido* hecho en un programa de diseño asistido por computadora (e.g. SolidWorks, NX, Fusion360). El segundo entregable es un plano de producto propuesto con las vistas necesarias, dimensiones, tolerancias, resina y calibre de la lámina, requerimientos especiales establecidos por el cliente, etc.

Prototipo rápido

Consiste en obtener, como entregable, muestras funcionales con un molde prototipo a partir del archivo de modelo sólido. De este proceso se obtiene retroalimentación tanto para el diseño de producto como del cliente para su aprobación. Al final de este proceso se da la aprobación del diseño de producto.

Diseño de herramientas

En esta etapa sumado a los entregables de las fases anteriores se toma en cuenta información que delimita el proyecto como lo es la maquinaria disponible para producción en planta, entre otros factores. El primer entregable es un documento aprobatorio entre planta-diseño sobre las generalidades del molde, una especie de acta de nacimiento del herramental. Una vez aprobado se procede con el diseño de los herramientas requeridos. El segundo entregable consiste en archivos de modelo sólido de los ensambles de cada herramental para su revisión en conjunto con las áreas de manufactura y ensamble, en ocasiones incluido personal de planta. Se obtiene retroalimentación para en caso de ser necesario, corregir o hacer mejoras a los diseños. El tercer entregable es la documentación para guiar la fabricación, ensamblaje e inspección (e.g. planos detallados de cada pieza y ensamble) y si fuese el caso, documentos para la instalación o funcionamiento específico de los herramientas. El cuarto entregable son las listas de materiales (LDM) para cada herramental, requeridas para el proceso paralelo de la compra o suministro de materia prima, elementos estándar y consumibles.

Manufactura

En esta fase comienza con la planeación de producción de los herramientas y selecciona las piezas requeridas de acuerdo a criterios específicos como el proceso de manufactura más económico, tiempo de producción, capacidad de maquinaria instalada, tolerancias requeridas para cada pieza, necesidad de usar máquinas de control numérico (CNC) o máquinas convencionales, etc. Los entregables son las piezas físicas cumpliendo dentro de las especificaciones de cada plano como pueden ser el acabado superficial, tratamientos térmicos y tolerancias dimensionales.

Ensamble

Se lleva a cabo el armado de cada subensamble y ensamble principal de cada herramental. También se realizan pruebas de funcionalidad para verificar la correcta refrigeración y ventilación de las cavidades. Las

principales entradas son los planos de ensamble, piezas fabricadas, piezas estándar y consumibles. El entregable es el molde, troquel de corte y sistema de apilado listos para montaje en máquina.

Prueba de molde

Este proceso ocurre en planta y las entradas son los herramentales junto con toda su documentación como plano de producto a fabricar, plano de especificaciones de molde y planos de ensamble. En esta etapa se procede al montaje de los herramentales en la máquina termoformadora dentro de su respectiva estación, configuración inicial de la máquina, pruebas iniciales para obtener piezas termoformadas, ajuste de parámetros y optimización de los mismos. Los entregables son las piezas termoformadas o productos y una bitácora con los parámetros de proceso específicos del producto y herramental.

Liberación de producto

En este punto se evalúan los productos obtenidos con las normas de calidad según los estándares de la empresa o pruebas requeridas por el cliente. Tanto pruebas dimensionales, conformes al plano de producto, pruebas físicas y químicas. Se considera al herramental listo para producción al superar las pruebas de calidad, con lo que se llega al fin del proyecto para dar paso a las etapas de producción, embalaje y distribución.

2.1 Definición del proyecto asignado

Mi rol dentro del proceso de lanzamiento de un nuevo producto ocurrió principalmente en la etapa de diseño de herramentales, con la total responsabilidad de los entregables correspondientes. Esta responsabilidad no era restrictiva de llevar a cabo tanto validación en piso de taller (i.e. manufactura y ensamble) como en planta (i.e. prueba de molde), entendiendo a esta, como verificar de manera general que los parámetros e intención de diseño de las piezas y herramentales sean correctos, en el caso contrario, facilitar la retroalimentación en ambas direcciones.

El proyecto asignado fue el diseño de herramentales para dos productos con las siguientes características:

- Molde con cavidades intercambiables para familia de charolas (relativo a la forma)
- PET como resina de lámina en dos calibres (relativo al material)
- Labio de charola apto para sellado con película (relativo a la función)

En cuanto a la delimitación de maquinaria disponible y producción proyectada:

- Herramental multicavidad para máquina termoformadora OMG PVE-64
- Uso de plugs para asistencia mecánica de conformado
- Sistema de apilado mediante fin de brazo robótico
- Mínimo 20 ciclos por minuto (i.e. 3 s/ciclo)

Muchos de los factores restantes en la definición del producto requerido fueron resueltos en la etapa previa de diseño de producto.

2.2 Metodología de diseño

En el proceso de diseño seguí el flujo de trabajo que se muestra en la *figura 2.2*. A partir de esta metodología abordé la problemática definida. Como se podrá observar, bajo los criterios de rendimiento, manufacturabilidad, ensamble y costo, determiné las mejores opciones para el desarrollo de los entregables. Esto implicó entender las capacidades de manufactura de la empresa para diseñar piezas que se puedan hacer *en casa* y discernir los componentes a comprar que no sean la esencia de los herramientas y/o comunes en diversidad de aplicaciones, típicamente elementos estándar (e.g. tornillería, resortes, cilindros neumáticos, juntas tóricas, bujes, postes guía, racores, mangueras, perfiles, ventosas). También, aspectos como facilidad para desensamble en elementos que requieran mantenimiento, facilidad de instalación en la máquina y cambio rápido de cavidades, fueron tomadas en cuenta.

Específicamente el proceso de diseño del molde de termoformado comienza determinando la dimensión mínima de las cavidades. Usando el programa de diseño asistido por computadora encontré el óptimo arreglo (i.e. cantidad total y disposición de cavidades) para las condiciones solicitadas de la máquina termoformadora. Con este arreglo obtuve el límite máximo en las dimensiones exteriores definidas por el marco de sujeción. El siguiente límite es el intervalo de la altura mínima a máxima del molde. A partir de las restricciones determinadas y antes de cualquier detalle, establecí las características básicas de los elementos principales como cavidades, marcos, placas de refrigeración, placas de montaje, etc. Algunos de estos conceptos preliminares visualizados mediante el uso de bocetos a mano, fueron de gran ayuda. Posteriormente cálculos y detalle de las geometrías con tolerancias de cada pieza que compone el herramental. Simultáneamente la verificación del ensamble para encontrar posibles interferencias y simulación de movimientos.



▲ Fig. 2.2 Proceso de diseño usado para los herramientas

La metodología de diseño que usé para el troquel de corte comparte etapas análogas al diseño del molde de termoformado. Primero determiné el tipo de cuchillas y placa de corte a usar. Con la cantidad total y disposición de cuchillas restringidas por la distancia entre centros de las cavidades en el molde, obtuve el límite mínimo y máximo en las dimensiones críticas de acuerdo a la prensa de corte. Bocetos a mano, detalle de las geometrías con tolerancias de cada pieza, verificación de ensamble, interferencias, simulación de la carrera en platinas, así como validar factibilidad de la fuerza de corte requerida fueron los pasos realizados.

En el caso del sistema de apilado la selección del tipo de ventosas desencadenó la selección guiada de los elementos estándar restantes para el fin de brazo. La cantidad total y disposición de ventosas es definida tanto por la geometría del producto termoformado, como por la distancia entre centros de cavidades en el molde. El detalle de las geometrías con tolerancias de cada pieza, verificación del ensamble, posibles interferencias y simulación de la carrera en la platina inferior para los eyectores fueron los pasos siguientes.

El orden en que fueron desarrollados los entregables se muestra a continuación:

- Plano de especificación de molde
- Diseño de molde
- Diseño de troquel de corte
- Diseño de unidad apiladora.
- Listas de materiales y documentación

2.3 Diseño de molde

2.3.1 Especificación de molde

Como se mencionó anteriormente, la *especificación de molde* es un documento con las generalidades del herramental. Consiste en un plano con el nombre de la máquina termoformadora a usar, producto a fabricar, clave de producto, tiempos de ciclo requeridos, producción proyectada, resina de lámina, calibre, disposición de cavidades, porcentaje de material no termoformado, largo de molde o avance, ancho de molde, ancho de la lámina y dirección de avance de la lámina.

2.3.2 Dimensionamiento de cavidades

Existen varios factores que afectan el coeficiente de contracción en un producto termoformado, desde un ligero cambio en la formulación de la lámina, temperatura no uniforme en la lámina y en el molde, hasta producciones con tiempo de ciclo muy corto donde el producto aun ya fuera de la estación de termoformado sigue enfriándose. Productos fabricados con resinas como polipropileno requieren de varias horas para llegar a su dimensión final. Una buena aproximación en el cálculo del coeficiente de contracción es obteniéndolo de muestras termoformadas a partir del molde prototipo y usando la misma lámina que producción en planta. Para aplicaciones que requieren de dimensiones más precisas, el coeficiente de contracción debe conocerse en las tres direcciones: longitudinal, transversal y vertical. Como referencia, la norma alemana DIN 16901, dicta la toma de dimensiones después de un período de almacenamiento de 16 horas a una temperatura de 23°C. Expuesto lo anterior, se requieren dos pasos para definir las dimensiones de la cavidad. El primero, referido al incremento de las dimensiones en la geometría del producto para

compensar la contracción térmica durante el enfriamiento y el segundo, referido al material extra para el bloque de aluminio donde se maquina la cavidad.

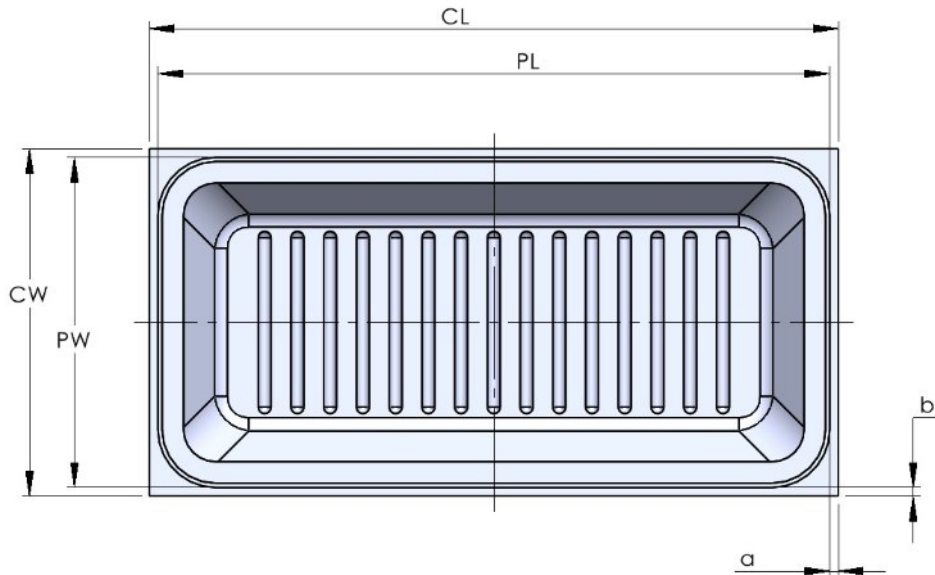
Como ejemplo, para la obtención de un producto en APET con una longitud de 200 mm, la longitud en la cavidad X_c , será igual a la longitud en el producto X_p , más la contracción asociada a esa misma longitud X_s :

$$X_c = X_p + X_s \quad \rightarrow \quad X_s = S X_p$$

donde S , corresponde al coeficiente de contracción específico para la resina (*Tabla 1.1, molding shrinkage*). Por consiguiente, con $S_{APET} = 0.5\%$

$$X_c = 200 \text{ mm} + (200 \text{ mm})(0.5\%/100) \quad \rightarrow \quad X_c = 201 \text{ mm}$$

Esto significa que, para reproducir en APET una longitud de 200 mm en el producto termoformado, se requiere tener en el molde una longitud de 201 mm. En la práctica esto es equivalente a aplicar un factor de escala al archivo de modelo sólido del producto, igual a $(1+S)$, con lo que resolví este punto.



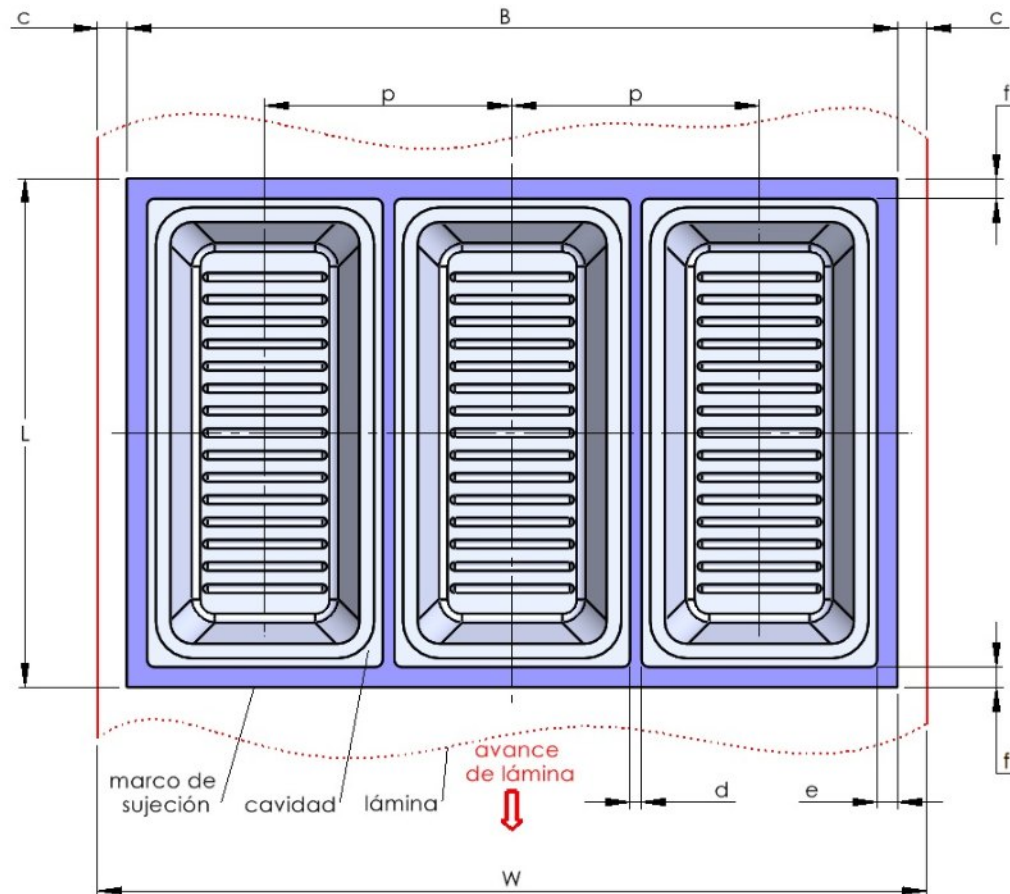
▲ Fig. 2.3 Dimensionamiento de cavidad

La determinación del bloque de material, está definido por las dimensiones externas del producto una vez aplicado el factor de contracción (i.e. P_L y P_W), más una longitud extra destinada a la tolerancia en el área de corte (*cf. Secc. 2.4.1*). La longitud extra (i.e. a , b) también contribuye con mayor espacio para elementos como la refrigeración. Por tanto, de acuerdo a la *figura 2.3*, se tiene como las dimensiones del bloque de material para la cavidad:

$$C_L = P_L + 2a \quad y \quad C_W = P_W + 2b$$

2.3.3 Disposición de cavidades y dimensionamiento de molde

En el diseño de la disposición de cavidades tomé en cuenta los factores como relación de largo y ancho del producto con respecto al avance, menor porcentaje de lámina no termoformada, dimensiones máximas permitidas del molde en la estación de termoformado y ancho máximo de la lámina. En la práctica, los operadores de las máquinas de termoformado suelen contrarrestar la comba de la lámina calentada ajustando las guías de las cadenas de manera que diverjan, es decir, la separación entre cadenas al inicio de la máquina es menor que a la salida de la misma. Esto lo tomé en consideración de acuerdo al límite máximo de apertura de cadenas. Las dimensiones máximas del molde serán las que tenga el marco de sujeción, el cual tiene un alojamiento por cada cavidad. En esta etapa también consideré el espacio entre las cuchillas necesario para el montaje (cf. Secc. 2.4.1), así como la capacidad de corte; a mayor número de cavidades, mayor perímetro de corte por lo tanto mayor fuerza requerida de la prensa (cf. Secc. 2.4.9).



▲ Fig. 2.4 Disposición de cavidades, dimensionamiento de molde y lámina

De acuerdo a la configuración elegida de tres cavidades (Fig. 2.4), la longitud del molde B , es igual al ancho de las cavidades C_w más los espesores de pared nominales d y e :

$$B = 3C_w + 2(d+e)$$

La distancia de indexado en cada ciclo equivale a la longitud del molde en el sentido del avance L . Es igual al largo de las cavidades C_L más los espesores de pared nominales f del marco de sujeción:

$$L = C_L + 2f$$

Los espesores de pared del marco de sujeción (i.e. d, e, f) son definidos a partir de un estándar interno que toma en cuenta el espacio para canales de refrigeración, la resistencia necesaria para soportar las fuerzas de conformado y el ancho mínimo de la tira de lámina no termoformada entre cavidades. En el diseño de detalle se indica una holgura entre cavidades-marco de sujeción para evitar roce. Con este ajuste quedan definidos los espesores de pared reales del marco. La determinación de estas dimensiones en consecuencia define la distancia entre centros de cavidades p , requerida para cálculos posteriores:

$$p = C_w + d$$

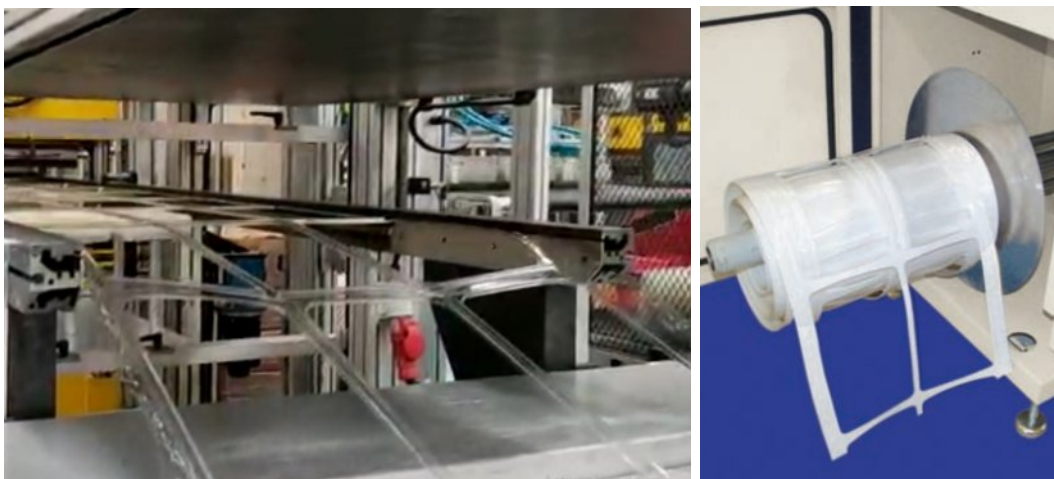
Finalmente el ancho de lámina W , es igual a la longitud B del marco de sujeción más una longitud extra $2c$ que incluye el área para la sujeción de la lámina mediante las cadenas y una holgura entre cadenas-marco de sujeción para evitar roce.

$$W = B + 2c$$

Cálculo de lámina no termoformada (esqueleto)

El porcentaje de lámina no termoformada $\%Sc$, con respecto al total de la lámina usada en cada ciclo de la máquina (Fig. 2.5), es un parámetro importante al decidir la disposición de las cavidades. Se obtiene de la relación entre el área total de la lámina A_S y el área total de lámina termoformada A_F . El área total de lámina termoformada se obtiene con el número de cavidades N , multiplicado por el área proyectada del producto A_p equivalente al área encerrada por el contorno de la cuchilla (cf. Secc. 2.4.1). Un parámetro de referencia como buena práctica, es recomendable mantener un porcentaje de lámina no termoformada menor a 30%.

$$\%Sc = (A_S - A_F) \cdot 100/A_S \quad \rightarrow \quad A_S = L \cdot W \quad \rightarrow \quad A_F = N \cdot A_p$$

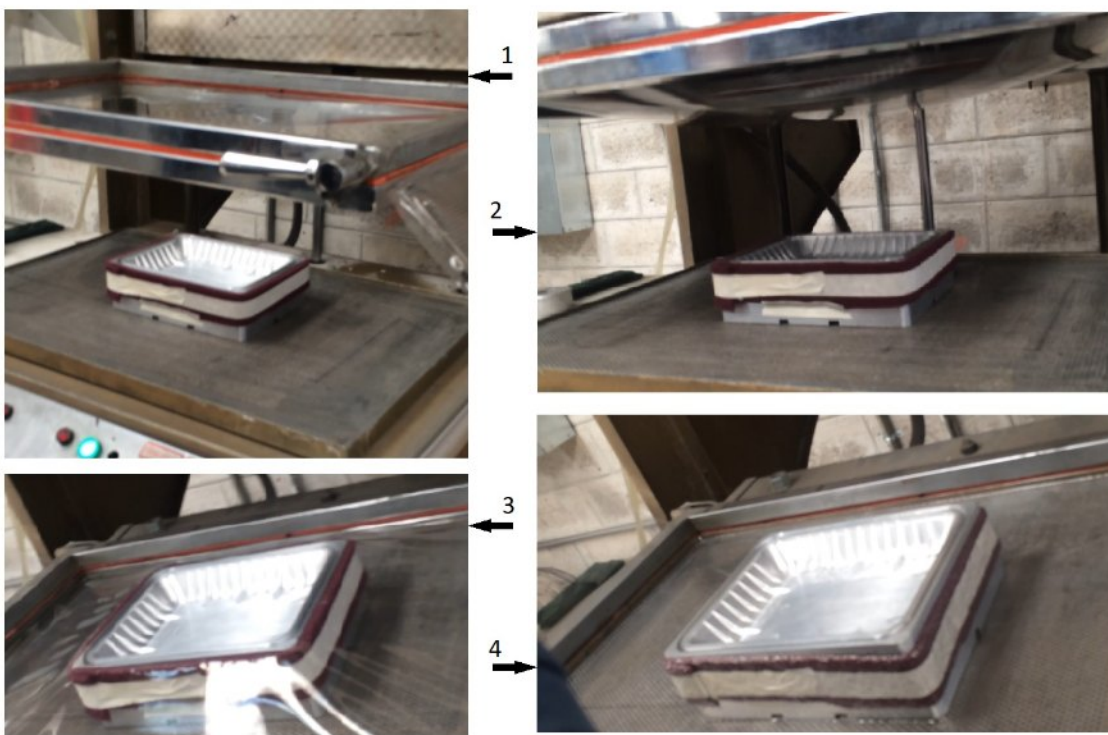


▲ Fig. 2.5 Esqueleto a la salida de la máquina termoformadora y esqueleto enrollado sobre mandril

2.3.4 Prototipos rápidos

Aunque en la práctica se pueden obtener cavidades prototipo en centros de maquinado por control numérico CNC, a partir de resinas, incluidas las mismas espumas sintácticas, el tiempo y labor que implica crear la programación de las rutas de maquinado, selección de herramientas, configuración de la máquina, preparación de material y sujeción, son procesos que retardan y encarecen el proceso del desarrollo de producto.

En la actualidad, los avances en manufactura aditiva (*AM, Additive Manufacturing*) comúnmente llamada impresión 3D, tanto en materiales como en resolución de capas, han hecho posible pasar del diseño del producto a una cavidad prototipo en mucho menos pasos que su contraparte tradicional. Un prototipo de la cavidad impresa típicamente requiere un par de post-procesos, eliminar material de soporte que interfiera y realizar barrenos de ventilación por medio de un taladro manual. Con una cavidad fabricada de esta manera, es posible obtener en una máquina de pruebas algunas muestras termoformadas funcionales. Típicamente, dichas máquinas funcionan con vacío y presión atmosférica (≈ 1 bar), por lo que detalles más finos como grabados, serán difíciles de conseguir comparado con máquinas de producción y aire a presión.



▲ Fig. 2.6 Producción de una muestra funcional por medio de una máquina de prototipos

En la *figura 2.6* se pueden apreciar las etapas del proceso de termoformado para la obtención de un prototipo funcional. La primer imagen muestra la lámina sujeta a un marco con elementos de sellado para evitar fugas de aire. En la segunda imagen se puede observar la comba de la lámina, por el efecto del calentamiento y la fuerza de gravedad. La tercer imagen muestra el contacto entre lámina y el contorno

superior de la cavidad. Finalmente en la cuarta imagen, aplicado el vacío, la fuerza de la presión atmosférica conforma la lámina en la geometría de la cavidad. El enfriamiento de la pieza se da por convección natural o forzada, mediante un ventilador no visible en la imagen. Posteriormente se recorta la pieza con una navaja.

De primera mano se puede visualizar de manera inmediata y más clara la distribución de material sobre la cavidad y evaluar así las zonas con menor espesor de pared. A partir de estas observaciones me guíé para el diseño del plug. Esto representa una opción práctica, rápida y relativamente menos demandante que una simulación del proceso mediante algún software. Agregado a ello se obtienen muestras físicas de mayor valor para el cliente. También, validé la posición de los barrenos de ventilación con un análisis cualitativo de las geometrías bien replicadas, en caso contrario, prevé la necesidad de corregir o incluir mayor ventilación.

2.3.5 Diseño de cavidad

Al diseñar la cavidad es necesario como primer paso, hacer un análisis del producto requerido. Para esto, evalué las características principales del producto y verifiqué fueran acordes a las posibilidades y limitaciones del proceso de termoformado, con la finalidad de identificar y evitar posibles problemas tanto en manufactura como en producción (*DFM*).

Dimensiones de producto

Dimensiones máximas externas e internas, con tolerancias indicadas; largo y ancho (o diámetro en caso de piezas circulares).

Profundidad de estirado (depth of draw)

Equivalente a la altura máxima del producto. Típicamente se tiene una especificación para el límite máximo de la máquina termoformadora. De no contar con el dato, la carrera o apertura de platinas de las prensas de termoformado, corte y/o apilado, son en última instancia quienes restringen dicha capacidad, por lo que resulta un buen indicador para hacer el cálculo y determinar la altura máxima del producto.

Relación de estirado (forming depth ratio, draw ratio)

Una medida subjetiva del estiramiento total a la que estará sujeta la lámina al llegar a la geometría final del producto, sin indicar la variación de los espesores de pared. Existen varias definiciones, la más común, profundidad máxima de estirado dividida por el ancho en la parte superior. El equivalente en un vaso sería su altura dividida por el diámetro de la boca. Si bien es una relación dependiente solo de la geometría, pues no toma en cuenta la resina o su temperatura de conformado, por experiencia se recomienda tener productos máximo con un porcentaje de 60% en tecnologías sin el uso de plugs. A mayores relaciones de estirado el uso de plugs es un elemento crítico, tanto para la completa definición de las geometrías más profundas de la cavidad, así como para la obtención de espesores de pared más uniformes.

Geometrías funcionales

Zonas con requerimiento de mayor rigidez; borde superior, fondo, paredes, esquinas. Relacionado con áreas de mayor espesor de material. Elementos estructurales de refuerzo como cambios de plano, escalones y

costillas (*ribs*). En este proyecto se especificó una superficie del labio del producto apta para sellado con película. Esto implica cumplir con una superficie dentro de tolerancias de planicidad y acabado superficial establecidas. Preví el diseño de un sistema de acuñado (*coining*) para tal efecto (*cf. Secc. 2.3.12*).

Geometrías en común

En este punto analicé el requerimiento de cavidades intercambiables, comparando las diferencias entre los productos diseñados. Identifiqué solo cambios en el fondo del producto (i.e. la parte inferior donde reposa), por lo que preví la inclusión de insertos solo con la geometría del fondo y ensamblarlos a las cavidades, evitando así fabricar cavidades completas. Con esto se habilita termoformar dos productos similares, pertenecientes a una misma familia, al cambiar solo dichos insertos de un mismo molde.

Ángulos de salida (draft)

Contribuyen principalmente a tener mayor facilidad en el desmoldeo de la pieza, es decir, expulsar el producto conformado de la cavidad, traduciéndose en un mejor tiempo de ciclo. También mejoran en cierto grado la distribución de la lámina, sumando al objetivo de obtener espesores de pared uniformes.

Ángulos negativos (undercuts)

Normalmente se presentan por dos requerimientos; como geometrías para lograr interferencia entre dos piezas (i.e. botones o cierres entre un recipiente y su tapa) y como tacones o separadores para lograr un apilado de productos sin que estos se atasquen entre sí. Estas zonas ejercerán la mayor fuerza que se opone al desmoldeo. De aquí preví la necesidad del mecanismo de expulsión en las cavidades o molde.

Redondeos o radios

Redondeos necesarios en vértices de la geometría, así como radios mínimos de acuerdo a las posibilidades de las herramientas disponibles (e.g. cortadores de bola, cortadores rectos) y el centro de maquinado.

Leyendas y logotipos

Grabados del logotipo del cliente si aplica, número de cavidad, número de parte, código de reciclaje (i.e. RIC, *código de identificación de resina*, por sus siglas en inglés). Preví la necesidad de ventilación suficiente para replicar de la mejor manera posible y validé el sentido en que se maquinan estos elementos. Notar que en una pieza termoformada de aspecto transparente se pueden leer por ambos lados.

Perfil y nivel de corte

Perfil a cortar con las cuchillas en la periferia del producto. El nivel de corte tiene como referencia el nivel de la lámina o “nivel cero” (i.e. plano horizontal que define la lámina al ser arrastrada por la cadena). Puede ser coplanar a este nivel, o tener zonas fuera del mismo. Análogamente, el producto puede tener zonas termoformadas solo hacia un lado o en ambos lados del nivel cero. De este análisis definí de que lado se montan las cavidades en la estación de termoformado (i.e. platina inferior o superior) y el diseño de la placa de corte (*cf. Secc. 2.4.6*). En este proyecto la opción más viable fue un molde con las cavidades por debajo del nivel de la lámina y el contramolde con los plugs montados en la platina superior.

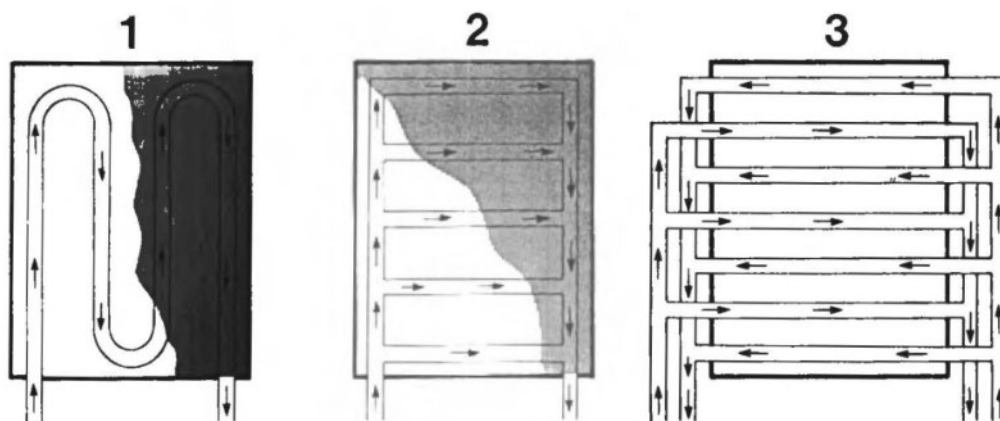
Material y calibre de lámina (gage, gauge)

En esta familia de herramientas la resina requerida fue PET, en dos calibres de lámina. En el apartado de dimensionamiento de cavidades (cf. Secc. 2.3.2) se mostró cómo abordar el efecto de la contracción en los productos termoformados. Un sistema importante que impacta la resina solicitada es la refrigeración necesaria para cavidad y molde. Otro elemento que define la resina, es la dimensión de los orificios y ranuras de ventilación en la cavidad.

Hasta ahora, en el dimensionamiento de las cavidades solo se mencionó el largo y ancho. La altura está determinada por la profundidad misma del producto sumada al espacio necesario para elementos de refrigeración, ventilación, altura de fondos intercambiables, elementos de posicionamiento y sujeción. La altura resultante se aproxima en lo posible, al espesor de material disponible comercialmente, optimizando con ello la cantidad de desperdicio en materia prima. Este criterio fue aplicado en todas las piezas fabricadas que componen cada herramental, sin embargo se vuelve a mencionar a lo largo del informe.

Diseño de circuitos de refrigeración

Uno de los elementos con mayor importancia en moldes de alta producción es la refrigeración que en ellos se dispone. Como se ha mencionado, el ciclo podrá ser tan breve cuanto más rápido sea el enfriamiento de la pieza conformada, al punto que se pueda expulsar sin sufrir alguna deformación. El método óptimo para refrigerar cavidades negativas, es a través de canales barrenados cercanos a las superficies que definen la geometría del producto. Consideré un diámetro estándar de la herramienta para barrenado. Atado a ello se debe contar con el espacio para sellar los barrenos, de ser posible con tapones autosellantes estándar y espesores de pared mínimos para soportar la concentración de esfuerzos asociados. Adicionalmente para el correcto funcionamiento de los circuitos, diseñé el alojamiento de las juntas tóricas (*o-rings*, *o-cords*) que realizan el sello entre cavidad-fondo intercambiable y entre cavidad-placa de refrigeración. Las dimensiones para el maquinado de estas ranuras son estándar y están disponibles tanto en manuales como en catálogos de proveedores especializados.



▲ Fig. 2.7 Circuitos de refrigeración típicos. 1. Circuito en serie, 2. Circuito en paralelo, 3. Circuito con flujos alternados y múltiples entradas/salidas para uso de distribuidores externos. Tomado de *Practical Thermoforming: Principles and Applications*. Florian, John. (1996)

El líquido refrigerante incrementa su temperatura a través del paso por los canales de refrigeración. En la *figura 2.7* se muestran los patrones en el incremento de temperatura típicos en los circuitos en serie y en paralelo. Resulta evidente que la tasa de enfriamiento es menor en los últimos tramos del recorrido. Es deseable entonces mantener el diferencial de temperatura entre la entrada y salida del circuito en un mínimo.

El valor recomendado de referencia para el termoformado de lámina delgada es un diferencial no mayor a $\Delta T_M < 3^\circ\text{C}$ [3]. Análogamente el diferencial recomendado de temperatura entre líquido refrigerante y superficie de la cavidad está en el intervalo de $12^\circ\text{C} < \Delta T_{MF} < 25^\circ\text{C}$ [2]. Por último, es recomendado un diferencial de temperatura en la superficie de la cavidad no mayor a $\Delta T_{Tool} < 3^\circ\text{C}$, siendo $\Delta T_{Tool} = 1^\circ\text{C}$ el óptimo [3]. Con esto se reduce al mínimo la posibilidad de generar deformaciones en las piezas termoformadas debido a efectos de contracciones diferenciales.

En la máquina termoformadora el proceso de enfriamiento ocurre a una tasa de flujo volumétrico constante. Para determinar este parámetro junto con la potencia de refrigeración, superficie de contacto y longitud de los canales requeridos, realicé el procedimiento que se muestra en el siguiente ejemplo [1]. Por cuestiones prácticas, en este herramental se supone despreciable la cantidad de energía disipada mediante convección hacia el aire.

i) \dot{M} = Cantidad de material a refrigerar (lámina plástica procesada) en kilogramos por hora:

$$\dot{M} = B \cdot L \cdot s \cdot \rho \cdot T_c^{-1} \text{ [kg/h]}$$

En este cálculo solo se toma en consideración el área de lámina que toca la superficie del molde (i.e. sin las áreas destinadas a la sujeción de las cadenas indexadoras). De acuerdo a la *figura 2.4*, considerando un ancho de molde $B = 715$ mm y longitud en avance $L = 425$ mm, se define el área de lámina a refrigerar. El calibre máximo (entre los dos requeridos) de lámina $s = 0.7$ mm, la densidad $\rho_{PETG} = 1.27$ g / cm³ (*Tabla 1.1*) y el tiempo de ciclo T_c asociado al requerimiento mínimo de 20 ciclos por minuto:

$$\dot{M}_{PETG} = 0.715 \text{ m} \cdot 0.425 \text{ m} \cdot 0.0007 \text{ m} \cdot 1270 \text{ kg/m}^3 \cdot (20/1 \text{ min}) \cdot (60 \text{ min}/1 \text{ h})$$

$$\dot{M}_{PETG} = 324.17 \text{ kg/h}$$

ii) q = Potencia de refrigeración requerida en watts:

$$q = \dot{M} \cdot \Delta H \text{ [W]}$$

La cantidad de energía térmica a disipar por unidad de masa es determinada a través de tablas (*Tabla 2.1*) o gráficas de entalpía. Se contempla la diferencia de entalpías ΔH , entre la temperatura de termoformado (*Tabla 1.1, termoforming temperature*) y la temperatura de desmoldeo.

Considerando el conformado de lámina con aire a presión, de la *tabla 2.1*, $\Delta H_{PETG} = 128$ kJ/kg:

$$q = 324.17 \text{ kg/h} \cdot 128 \text{ kJ/kg} \quad \rightarrow \quad q = 41,494 \text{ kJ/h} \approx 11.5 \text{ kW}$$

Semi-finished product	HIPS	ABS	PVC	PEHD	PP	PMMA	PC	PETG	PA 12
Density (g/cm ³)	1.05	1.05	1.39	0.95	0.92	1.18	1.2	1.27	1.02
ΔH (kJ/kg), vacuum forming	198	215	202	484	356	195	195	170	165
ΔH (kJ/kg), pressure forming	148	161	151	363	267	146	146	128	124

▲ **Tabla 2.1** Diferencias en entalpía para termoplásticos comunes. Valores promedio entre temperatura de termoformado y temperatura de desmoldeo. Tomado de *Thermoforming: A Practical Guide*. Schwarzmann, Peter e ILLIG (2019)

iii) V_M = Flujo volumétrico de líquido refrigerante en metros cúbicos por segundo. De acuerdo a la ley de conservación de la energía en el sistema, la energía disipada por la lámina hacia el molde, es la causante del aumento en la temperatura del líquido refrigerante ΔT_M :

$$q_M = \dot{m}_M \cdot c_M \cdot \Delta T_M \text{ [W]} \quad \rightarrow \quad V_M = q / (\rho_M \cdot c_M \cdot \Delta T_M) \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Considerando agua como medio de refrigeración, ρ_M y c_M , densidad y calor específico respectivamente:

$$V_M = 11.5 \text{ kW} / (1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot 3^\circ\text{C}) \quad \rightarrow \quad V_M = 9.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3\text{/s} \approx 55 \text{ L/min}$$

Con el cálculo de la tasa de flujo volumétrico y la potencia de refrigeración, es posible evaluar la viabilidad del herramental comparando los valores con la capacidad de la unidad de refrigeración instalada en la máquina termoformadora. Es importante contar con una reserva en dichas capacidades para compensar pérdidas por caídas de presión o en caso de perseguir una disminución en el tiempo de ciclo.

iv) A_T = Área de contacto requerida en los canales de refrigeración en metros cuadrados. De acuerdo al enfriamiento por convección mediante el líquido refrigerante se tiene:

$$q = h \cdot A_T \cdot \Delta T_{MF} \text{ [W]}$$

Para este tipo de aplicaciones el flujo de agua en los canales presenta un coeficiente de transferencia de calor dentro del intervalo $2.3 < h < 3.5 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$, utilizando el valor mínimo y suponiendo el diferencial de temperatura recomendado entre líquido refrigerante - superficie de la cavidad $\Delta T_{MF} = 12^\circ\text{C}$:

$$A_T = 11.5 \text{ kW} / (2.3 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 12^\circ\text{C}) \quad \rightarrow \quad A_T = 0.416 \text{ m}^2$$

v) l_C = Longitud de los canales de refrigeración (con diámetro nominal D), ambos en metros:

$$A_T = \pi \cdot D \cdot l_C \text{ [m}^2\text{]}$$

$$l_C = 0.416 \text{ m}^2 / (\pi \cdot 0.008 \text{ m}) \quad \rightarrow \quad l_C = 16.55 \text{ m}$$

vi) w = Velocidad del líquido refrigerante en los canales, en metros por segundo.

$$V_M = A_C \cdot w \cdot i \text{ [m}^3\text{/s]}$$

El área de la sección transversal correspondiente al canal $A_C = \pi \cdot (0.008 \text{ m})^2/4$, y la cantidad de circuitos independientes $i = 8$ (leer más abajo), se suponen de la misma longitud.

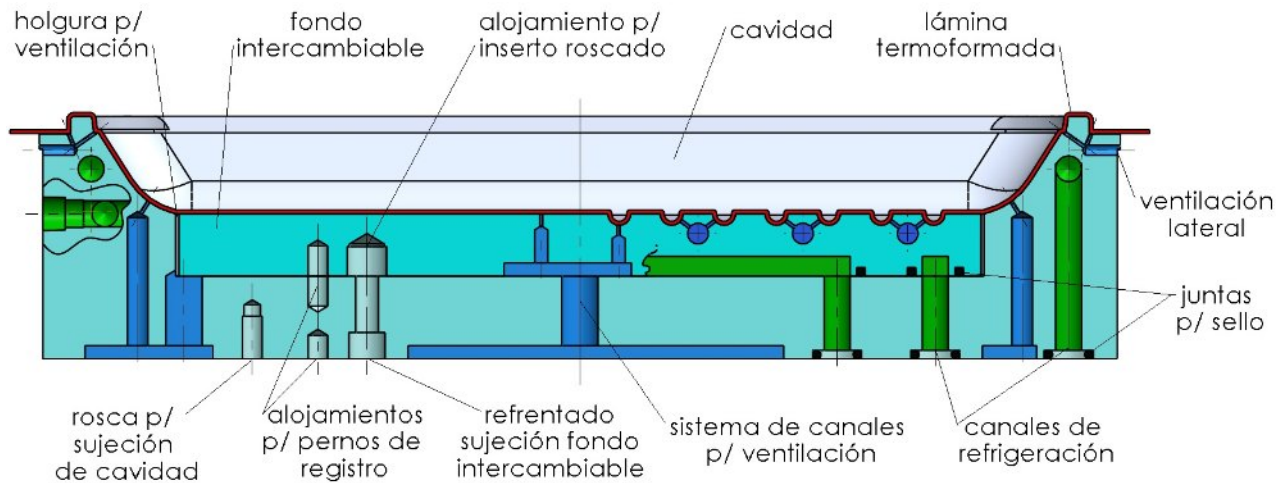
$$w = (9.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3\text{/s}) / (5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot 8) \quad \rightarrow \quad w = 2.29 \text{ m/s}$$

Se puede comprobar para estas condiciones de velocidad de flujo, diámetro de canal y agua como medio de transporte, un valor del número de Reynolds mayor a diez mil, es decir un flujo turbulento. De esta manera se asegura una adecuada transferencia de calor del molde hacia el líquido refrigerante. La velocidad en los canales de refrigeración, especialmente en moldes de aluminio, debería mantenerse por debajo de $w < 2.5$ m/s. La razón es debido a que velocidades excesivas de flujo tienden a erosionar los canales de refrigeración así como a producir cavitación.

En la *figura 2.7* se muestra una alternativa para diseñar el sistema de refrigeración; con flujos alternados, múltiples entradas y salidas que serán conectadas a distribuidores externos respectivos (i.e. múltiples circuitos). Esta alternativa fue la elegida para el proyecto en cuestión. El diseño resultante fue de un circuito independiente por cavidad, un circuito independiente por cada fondo intercambiable y dos circuitos más en el marco de sujeción ($i = 8$). En la medida de lo posible mantuve una longitud de recorrido similar en cada uno de los circuitos diseñados (con ello la resistencia al flujo es similar en cada circuito), desde un distribuidor de entradas, hasta el correspondiente distribuidor de salidas. Para estos últimos, en concordancia al diámetro de los canales de refrigeración, seleccioné los racores y mangueras aptos para mantener uniforme el área de la sección transversal a través de todo el herramental. También verifiqué la disponibilidad de conexiones en la unidad de refrigeración instalada. Esta información es importante para incluir en los distribuidores los respectivos conectores, adecuados en tamaño y tipo, que facilitan la instalación del herramental en la prensa.

Ventilación de cavidad

Lograr un producto que replique la geometría deseada con alto grado de definición, requerirá de contar con la suficiente ventilación en las zonas críticas de la cavidad para evacuar el aire desplazado de manera rápida y eficiente. Definí orificios o barrenos dispuestos en esquinas, vértices, redondeos, zonas con ángulos negativos y grandes áreas planas (como el fondo de uno de los productos de este proyecto). Para la optimización en la posición de estos pequeños orificios, simulé la herramienta para fabricarlos (i.e. taladro manual) de acuerdo a los ángulos de ataque para llegar a zonas de difícil acceso. La dimensión de estos orificios que depende del calibre y resina de la lámina procesada fue especificada de acuerdo a las prácticas estándar (*Tabla 1.1*, $\varnothing 0.6$ mm para PET) con el fin de disminuir al mínimo las marcas visibles. Típicamente estos pequeños orificios pueden ser taladrados de dos a cinco veces su diámetro. A menor longitud del barreno la rapidez de evacuación será mayor, por lo que diseñé al reverso y a los costados de la cavidad barrenos de mayor diámetro y profundidad para encontrarse con dichos orificios. A su vez, estos últimos los uní mediante canales maquinados en la base de la cavidad, hacia salidas de mayor diámetro, con el fin de dirigir el flujo de aire hacia una cámara de vacío central para todas las cavidades.



▲ Fig. 2.8 Ejemplo de una vista de sección de la cavidad y fondo intercambiable

Sujeción de cavidades y fondo intercambiable

En la distribución de la sujeción mediante tornillos, incluí puntos con cercanía a donde se encuentran las juntas tóricas para el sello, para asegurar un buen asentamiento evitando alguna fuga de refrigerante. En el caso de la cavidad estos elementos no estarán sujetos a cambio recurrente como lo es el caso de los fondos intercambiables, por lo que definí maquinar roscas directas en el aluminio. Por otra parte indiqué cajas para sujetar al fondo intercambiable. De principal importancia, calculé la profundidad de los refrentados en toda sujeción, a manera de tener una profundidad de interacción entre roscas de 1 a 1.5 veces el diámetro nominal del tornillo. En concordancia, la profundidad de las roscas como mínimo fue especificada al doble del diámetro nominal. Finalmente para asistir en el correcto centrado durante el ensamble indiqué alojamientos para pernos de registro con el ajuste correspondiente, un par designado al centrado de la cavidad-fondo intercambiable y el otro par designado al centrado entre cavidad-placa de refrigeración.

En la *figura 2.8* se muestra un ejemplo de la vista de sección del concepto de la cavidad resultante. Se puede contrastar la diferencia entre los dos productos diseñados. A la izquierda, un producto con fondo plano y a la derecha, el producto con costillas en el fondo.

2.3.6 Diseño de fondo intercambiable

Los *fondos intercambiables* de la cavidad, diseñados como insertos deben mantener en el mismo sitio los pernos de registro, roscas de sujeción, y puntos de entrada/salida de líquido refrigerante. En estas piezas la refrigeración fue hecha a partir de ranuras en su base, manteniendo el área de la sección transversal de los barrenos que conectan la entrada y salida. Por lo tanto, diseñé su correspondiente alojamiento para juntas tóricas a lo largo de todo el recorrido.

De acuerdo a las geometrías específicas de cada fondo, los puntos y ranuras o barrenos de ventilación fueron especificados. Para una definición satisfactoria en la geometría a replicar, indiqué barrenos extra en el fondo con costillas, así como en letreros de número de parte, número de cavidad y logotipo de resina.

La holgura en la periferia entre cavidad-fondo intercambiable es determinada de la *tabla 1.1* (0.3 mm para APET, PETG). La dimensión de este claro al igual que en los orificios de la cavidad, disminuye las marcas visibles en el producto, al mismo tiempo que habilita un camino más para dar salida al aire desplazado. Esta ranura se conectó al sistema de canales y barrenos diseñados en la cavidad. Para mantener el fondo intercambiable centrado y por lo tanto, la ranura uniforme a lo largo de todo el contorno, indiqué pernos de registro. Sin los pernos, al apretar los tornillos durante el ensamble, estas fuerzas pueden jalar el fondo hacia un costado, haciendo la separación entre fondo-cavidad dispareja y en consecuencia la ventilación.

Contrario a la cavidad que se mantendrá siempre fija a una placa base (i.e. placa de refrigeración), en estas piezas que se cambiarán cada cierto tiempo de producción, indiqué alojamientos para insertos roscados de acero. Con dimensiones estándar y disponibles comercialmente, estos insertos roscados evitan el desgaste prematuro de los hilos fabricados en aluminio, al aflojar y apretar los tornillos en cada recambio.

2.3.7 Diseño de marco de sujeción (lado cavidades)

El *marco de sujeción* lado cavidades, en este proyecto montado en la platina inferior, recibe su nombre por limitar el movimiento de la lámina en conjunto con el marco del contramolde (presente en la platina superior). En él incluí un sistema de cilindros de aire para activar su movimiento y lograr sujetar anticipadamente la lámina. Cerrada la prensa los cilindros se contraen. El movimiento de apertura de los cilindros ejerce la fuerza de desmoldeo terminando la refrigeración de las piezas conformadas. Recordar que las piezas estarán ligeramente aprisionadas por las zonas con ángulos negativos pertenecientes a los tacones de apilado. La fuerza de desmoldeo se aplica en toda la superficie de contacto entre marco-lámina. El uso del sistema de expulsión asistido por cilindros contribuye al esfuerzo de disminuir el tiempo de ciclo.

Los criterios usados para la selección de los cilindros fueron, fuerza requerida para vencer el peso del marco, más la fuerza requerida para liberar las zonas con ángulos negativos, más una fuerza extra para la sujeción de la película. Los criterios restantes para la selección de los cilindros son una carrera suficiente para liberar la altura de las zonas con ángulos negativos, flexibilidad en la instalación, así como dimensiones compactas para insertarlos en un espacio mínimo.

Los marcos de sujeción del molde y contramolde (i.e. lado cavidades y lado plugs respectivamente), son elementos que mayor tiempo se encuentran en contacto con la lámina caliente, por lo que incluí canales de refrigeración. Por las características de alta conductividad térmica y bajo peso, un aluminio de alta resistencia fue seleccionado. La geometría específica del marco permitió diseñar un par de circuitos, como se mencionó anteriormente, uno que recorre la periferia y otro más sobre las divisiones entre cavidades. Los barrenos indicados con herramienta de diámetro estándar, incluyen roscas tanto para tapones autosellantes, como para racores donde se conectan las mangueras que conducen el líquido refrigerante.

Para asegurar una mejor contención de la lámina en las divisiones entre cavidades, incluí ranuras maquinadas en “V” con su contraparte en positivo en el marco del ensamble superior. Una práctica común para evitar arrastrar y estirar cantidades diferentes de material entre cavidades.

Cerrada la prensa de termoformado, la última función del marco es mantener el sello junto con la placa de refrigeración y actuar como caja de vacío. Análogo al claro existente entre cavidad-fondo intercambiable, definí un ajuste similar entre el marco-cavidades. Esto permite el flujo de cualquier aire atrapado entre estas partes y a su vez elimina la posibilidad de roce durante la carrera del marco de sujeción.

El movimiento vertical de los cilindros puede verse afectado por la fuerza de cierre de la prensa, al llevarlos a movimientos laterales indeseados. Reducir este efecto llevó a utilizar un sistema de bujes con jaulas embaladas estándar, instalados en cuatro extremos del marco y los respectivos postes guía en la placa de refrigeración, con el fin de brindar un movimiento totalmente vertical y suave. Para estos elementos se indica el ajuste pertinente de acuerdo a ficha técnica de las piezas estándar. Sumado a esto, se integraron tornillos limitadores con un tope de nailon para amortiguar cada apertura del marco. La longitud de estos tornillos limitadores fue calculada acorde a la carrera de los cilindros.

2.3.8 Diseño de placa de refrigeración

La placa de refrigeración como su nombre lo indica, será la encargada de llevar los canales que dirijan el líquido refrigerante a cada una de las cavidades y fondos intercambiables de acuerdo a la disposición de las entradas y salidas respectivas. La disposición de estos canales se diseñó de manera iterativa a la par del diseño de la refrigeración en las cavidades. Barrenos hechos en la cara superior donde reposarán las cavidades son conectados con barrenos laterales, incluyendo en estos últimos roscas para racores que se conectarán por medio de manguera al distribuidor. El material seleccionado aluminio 7075.

Al fungir como base donde se fijarán las cavidades, en esta placa incluí las cajas de sujeción y barrenos para pernos de registro. En cuanto al cambio rápido de los fondos intercambiables, agregué barrenos pasados con diámetro suficiente para retirar la tornillería que los sujeta y facilitar esta labor. Es común ver herramientas donde es necesario retirar varias placas, tapas o cubiertas para tener acceso al desmontaje de otro elemento que necesite mantenimiento o recambio. Anticipar esta necesidad y diseñar de tal manera que se requiera el menor esfuerzo y tiempo para realizar dichas tareas es un beneficio importante en pos de un herramental robusto. El ejemplo más básico es la inclusión de cuerdas para cáncamos, especialmente en piezas de peso considerable (como es el caso de esta placa) ya que facilitan el manejo durante el ensamble, maniobras de traslado y consecuentemente en el mantenimiento.

Respecto a la ventilación, en la cara superior de esta placa uní en una primera etapa los canales de las cavidades, con el fin de centralizarlos hacia la parte inferior. Incluí redondeos y chaflanes en los vértices y filos que mejoran el flujo de aire.

Evitar fugas entre el marco de sujeción y esta placa requiere de un sello especial en silicona apto para recibir el impacto en cada ciclo de termoformado. Dos estilos comunes para esta aplicación son los sellos con sección transversal en forma de "A" y en forma de "H" [2]. La ranura para su alojamiento se indicó de acuerdo a la recomendación del fabricante del sello seleccionado.

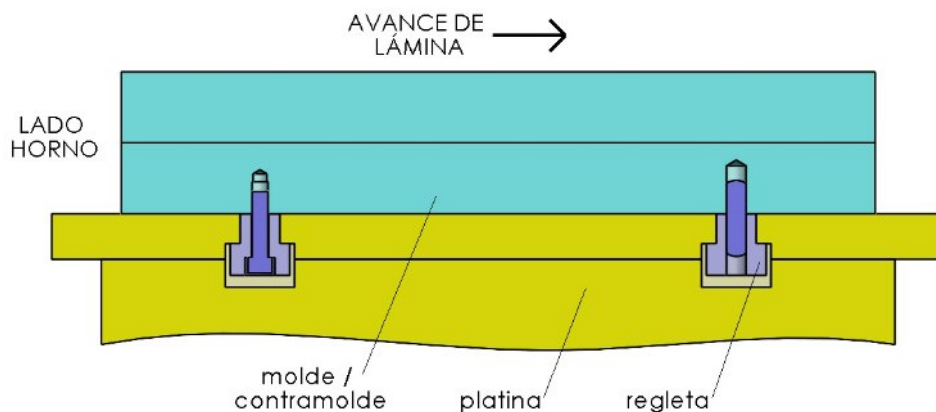
En esta placa indiqué alojamientos para la instalación de los postes guía con el ajuste correspondiente y cajas de los tornillos limitadores para el guiado del marco de sujeción. También incluí el alojamiento y las roscas para sujeción de los cilindros.

Por último se incluyen las roscas para sujeción y barrenos rimados para centrado con pernos de registro contra la placa de montaje.

2.3.9 Diseño de placa de montaje (lado cavidades)

Con la placa de montaje unida a la placa de refrigeración, se crea una cámara de vacío. Juntas tóricas entre ambas placas son necesarias para mantener el sello. Esta cámara de vacío finalmente se comunica con las salidas de aire de la prensa de termoformado. Verifiqué la posición y diámetro de estas salidas que estén en conformidad con la instalación. En la cara inferior no diseñé alojamientos para juntas tóricas pues ya están incluidas en las platinas de la máquina.

La prensa de termoformado cuenta con un sistema de pivote; habilita un giro de 180° completamente fuera de la estructura base de la máquina termoformadora, brindando mejor acceso a la instalación de los herramientas. El montaje-sujeción tanto del molde como del contramolde, es a través de regletas de dimensiones estándar, con forma de "T" y chaflanes o ángulos de entrada en uno de sus extremos. Fijadas en la cara inferior de la placa de montaje, estas permiten deslizar la herramienta sobre ranuras presentes en las platinas. Los puntos que comprobé en este sistema son las distancias entre centros de regletas-ranuras, e indicar la correcta posición en el ensamble tomando en cuenta el giro y chaflanes mencionados. Se incluyeron en la placa las roscas necesarias para sujeción y alojamientos para pernos de registro. Un esquema del sistema de sujeción para los herramientas en la estación de termoformado se puede ver en la *figura 2.9*.



▲ Fig. 2.9 Sistema de sujeción para herramientas en la prensa de termoformado

Debido al espacio libre en la placa de montaje, decidí integrar dentro de la misma los distribuidores de la refrigeración. Típicamente estos distribuidores son fijados en los costados del molde salvo en el lado que se encuentra el horno, por lo que entre los beneficios de esta integración están disminuir la cantidad de piezas

fabricadas, eliminar tornillería, facilitar la conexión de mangueras, eliminar algunos racores y reducir las dimensiones totales del herramental. Para esta labor es esencial tener conocimiento de los diámetros de manguera que hay disponibles en la estación y la ubicación de las mismas, con lo que se puede seleccionar el tamaño correcto de los racores a instalar en el distribuidor, así como definir las entradas a los racores más cercanos y salidas a los más lejanos. El mismo principio aplica para las mangueras de los cilindros que activan el movimiento del marco de sujeción.

Se complementó el diseño de esta pieza incluyendo los elementos de sujeción-centrado con la placa de refrigeración, roscas para cáncamos y aperturas a través de toda la placa para desatornillado/atornillado en el cambio de los fondos intercambiables.

2.3.10 Diseño de marco de sujeción (lado plugs)

El *marco de sujeción* del contramolde, ensamblado en el lado de plugs, es un caso similar al marco lado cavidades, con la salvedad de ser parte elemental de una caja de presión. Por tal motivo, en la periferia sobre la cara que hace contacto con la lámina, incluí el alojamiento para el sello de silicona tipo “H”.

Otra diferencia es el saliente que empareja con la ranura en “V” del marco lado cavidades. Para la holgura entre ambos, con el molde cerrado, tomé en cuenta el mínimo calibre de lámina requerida.

Otra disimilitud, en el contramolde no existe necesidad de desmoldeo de las piezas termoformadas, solo se requiere sujeción anticipada de la lámina. Debido a esto, se especificaron resortes de compresión en lugar de cilindros de aire. La selección de los resortes basado en la fuerza total (en su estado semicomprimido) equivalente a la fuerza de los cilindros, longitud total para una compresión máxima del 30%, diámetro interno para alojar un poste de retención estándar y espacio disponible.

Las dimensiones generales, material, sistema de refrigeración, tornillos limitadores y bujes guía mantienen el mismo concepto. Consideré sólo para la altura un óptimo, con el fin de minimizar el volumen interno, esto reduce la cantidad de aire necesario a desplazar para cada ciclo.

2.3.11 Diseño de sistema de plugs

El sistema de asistencia mecánica de conformado, puede ser accionado por un movimiento independiente a la apertura y cierre de las platinas o bien, puede ser fijo manteniendo la misma posición respecto de la platina en movimiento como es el caso de este proyecto. Una de las razones para tomar esta decisión es debido a la profundidad del producto requerido, siendo esta relativamente baja. Un beneficio extra es la reducción de la complejidad en la construcción del herramental. Para un sistema con movimiento independiente de plugs, se requeriría tener a estos fijados a una placa móvil apoyada sobre postes y bujes guía. A su vez la placa se conecta a una especie de embrague para accionar el movimiento, mientras se asegura mantener el sello en la caja de presión.

Diseño de Plugs

Una manera segura para diseñar un *plug* o *preformador* es comenzar con el diseño más grande posible, paralelo a las paredes de la cavidad del molde, con una separación de 3 - 5 mm de acuerdo al proveedor de materiales sintácticos CMT [10]. Este enfoque permite una posterior modificación maquinando el material según la observación del rendimiento real, sumado a las conclusiones obtenidas de las muestras prototipo termoformadas solo con vacío y presión atmosférica. Evité redondeos pequeños en los vértices que tienden a dejar marcas en la lámina e inhiben el estiramiento uniforme. Consideré también la disponibilidad de este material, solo en placas de espesores estándar, para especificar una altura adecuada al respecto.

Para la sujeción en este tipo de materiales sintácticos, generalmente con baja resistencia a la tracción y al corte, indiqué alojamientos para insertos roscados. Adheridos y roscados al *plug* a ras de la cara inferior, para evitar esfuerzos extra en caso de quedar por encima o debajo de dicho plano. Se incluyen un par de alojamientos para pernos de registro necesarios para el ensamble con una placa base.

Base de plugs

Para darle mayor rigidez al subensamble del *plug*, diseñé una base que sirve como soporte. Sus dimensiones en el plano "xy" de igual contorno al *plug* y altura determinada por el espesor de una placa estándar. Por un lado incluí las cajas con refrentado para tornillos, destinadas a la sujeción del *plug* y un chaflán generoso en el contorno que permite mejor flujo del aire a presión. Por el otro lado en la cara donde reposa el *plug*, cajas con refrentado para sujeción de columnas separadoras así como alojamientos para pernos de registro. El material estándar es aluminio.

Columnas para plugs

Estas columnas sirven para brindar altura al subensamble *plug*-base y dar paso libre al aire para conformar la lámina. Deben ser lo suficientemente resistentes a las fuerzas presentes durante la aplicación del aire a presión. En cuanto al diámetro, se considera un espesor mínimo de pared en sus extremos, donde se fabrican las roscas para sujeción. En otras palabras, para usar un tornillo de 6 mm, seleccionar una columna de diámetro estándar $\varnothing 0.5$ in., resulta en un espesor de pared nominal igual a $(12.7-6)/2 = 3.4$ mm. Este valor es satisfactorio para una aleación de aluminio 7075. La altura definida a partir del espacio disponible visualizado con la simulación en el estado del molde cerrado.

2.3.12 Diseño de sistema de acuñado

Uno de los requerimientos específicos para el producto desarrollado, es contar con una superficie del labio o boca apta para sellado con film. Esto implica tener una superficie dentro de una tolerancia de planicidad específica. La manera de lograrlo es a través de un sistema de *acuñado*, el cual mediante compresión mecánica hace que el plástico fluya bajo presión entre el molde y una placa pisadora impulsada por resortes, montada en la caja de presión. Es por este método que se pueden conseguir en ciertas zonas del producto termoformado, espesores finales con tolerancias cerradas para aplicaciones que lo requieran. Una manera de aprovechamiento en el control del espesor final, es la reducción del mismo en la zona de corte, lo que

contribuye a facilitar la separación del producto de la lámina no termoformada. También visto en herramientas de corte en sitio [1, 3].

Diseño de pisador

El elemento pisador está en contacto durante cada ciclo con la lámina caliente, por lo que es necesario incluir canales de refrigeración para un circuito y sus respectivas roscas para racores de entrada-salida. Debe permitir el libre paso del plug así como del aire a presión. Esto convierte al pisador en una especie de arillo. En las medidas internas incluí una holgura contra la placa base del plug. Análogamente añadí una holgura similar en las dimensiones exteriores contra los alojamientos del marco de sujeción. Para transmitir la fuerza de los resortes, estos se introdujeron sobre tornillos limitadores fijados sobre la cara inferior del pisador y distribuidos a los extremos.

2.3.13 Diseño de placa intermedia

Como es previsible, en la placa intermedia son necesarios alojamientos para tornillos limitadores correspondientes a los pisadores, incluyendo cajas para bujes guía donde el cuerpo de los tornillos deslizan, habilitando un guiado más suave y uniforme. El ajuste de acuerdo a ficha técnica de instalación del buje.

Cajas para alojar los resortes, junto con sus postes de retención, destinados al impulso del marco, también forman parte de las características presentes en esta placa.

La fijación de los ensambles de plugs, mediante sus columnas, sucede contra esta placa, por lo que las respectivas cajas con refrentado para tornillos se incluyeron.

Junto con el marco de sujeción, la placa intermedia completará la caja de presión. Esto hace que mantenga una gran semejanza con varias de las características presentes en la placa de refrigeración. Barrenos pasados para el flujo del aire de conformado. Una ranura en la periferia para el sello de silicona en forma "H". Un sistema de canales con sus respectivas roscas para racores, destinados a las entradas-salidas de líquido refrigerante, en este caso de los pisadores. Alojamientos para instalación de los postes guía y cajas de tornillos limitadores. Roscas y barrenos rimados para sujeción y centrado respectivamente, contra la placa de montaje. También roscas para cáncamos.

2.3.14 Diseño de placa de montaje (lado de plugs)

La placa de montaje del contramolde, mantiene una gran similitud con su equivalente al lado de cavidades. Se comunica en este caso con las entradas de aire de la platina. Unida a la placa intermedia, mediante ranuras y juntas tóricas se crea una primer cámara de presión. De aquí, el aire se distribuye hacia la cara inferior de cada uno de los plugs. Permanecen sin cambio el montaje-sujeción mediante regletas con forma de "T". Finalmente incluí el mismo concepto para los distribuidores de la refrigeración integrados en esta placa, con canales y racores acordes al diámetro óptimo para pisadores y marco de sujeción.

2.3.15 Consideraciones adicionales

Fuerza de cierre

En moldes que se encuentran en el límite máximo de dimensiones, la fuerza ejercida por la presión de conformado (área proyectada de molde x presión de trabajo), debe ser sumada a la fuerza de los cilindros y/o resortes para el movimiento de los marcos, más la fuerza de los resortes para el sistema de acuñado y ser comparada con la fuerza de cierre de la prensa de termoformado para no sobrepasar este valor.

Simetrías/asimetrías en sujeción y centrado

Uno de los principios ocupados para el diseño en estos herramientas fue la simetría y asimetría con el fin de ayudar en el ensamblaje y mantenimiento. Un ejemplo de ello, es el indicar sujeciones o pernos de registro en posiciones asimétricas para elementos que tengan una posición específica, como el caso de las cavidades y fondos intercambiables. Con ello se tiene un ensamble a prueba de errores (*poka yoke*). Caso contrario a los plugs, donde su geometría funcional es simétrica respecto de los planos XZ-YZ, por tanto la sujeción y elementos de centrado también serán simétricos.

Sujeción para centros de maquinado CNC

Una ayuda muchas veces omitida en las piezas fabricadas en centros de maquinado por control numérico, es la inclusión de roscas para sujeción en una placa maestra (típicamente con cajas para tornillos M6, equidistantes 20 mm). En la medida de lo posible diseñe la gran mayoría de piezas con este criterio en mente. Al suprimir esta tarea al área de manufactura, que desconoce a detalle la interacción que pueda tener con otra pieza (e.g. un barreno roscado que se encuentre sobre el área en que asienta una junta tórica, un barreno roscado que se junte con un canal de refrigeración, etc.), se pueden evitar errores, se evita usar un método menos eficiente como la sujeción mediante mordazas y se reduce el tiempo de montaje.

Grabado de piezas

Para todas las piezas fabricadas se indica un grabado con su número de parte. También, se indican en las roscas para racores de refrigeración su función (i.e. "E" - entrada, "S" - Salida), junto con un número consecutivo y su correspondiente emparejamiento (e.g. E1 en distribuidor con E1 en placa de refrigeración).

Dimensiones y peso total

Corroborar las dimensiones externas y el peso total de los herramientas, se encuentren dentro de los límites establecidos de la máquina termoformadora fue un paso verificado.

Simulación y verificación de movimientos

En este paso valide la interacción del molde-contramolde-prensa de termoformado, desde posibles interferencias (e.g. ranura y saliente en "V" para contención de la lámina, espacio para las cadenas indexadoras, espacio para conexiones de mangueras), correcto alineamiento de los elementos (e.g. plug-pisador-cavidad) hasta distancias recorridas en los marcos y pisadores, de acuerdo a la secuencia del programa de termoformado utilizado.

- i) Cierre simultáneo de platinas (ver *figura 2.10*)
- ii) Sujeción de lámina con los marcos (ver *figura 2.10*)
- iii) Contacto de plugs (ver *figura 2.10*)
- iv) Contacto de pisadores (ver *figura 2.11*)
- v) Cierre total de platinas (ver *figura 2.11*)
- vi) Accionamiento de vacío y presión (ver *figura 2.11*)
- vii) Apertura de platinas (ver *figura 2.12*)
- viii) Desmoldeo (ver *figura 2.12*)
- ix) Avance de lámina con productos termoformados (ver *figura 2.12*)

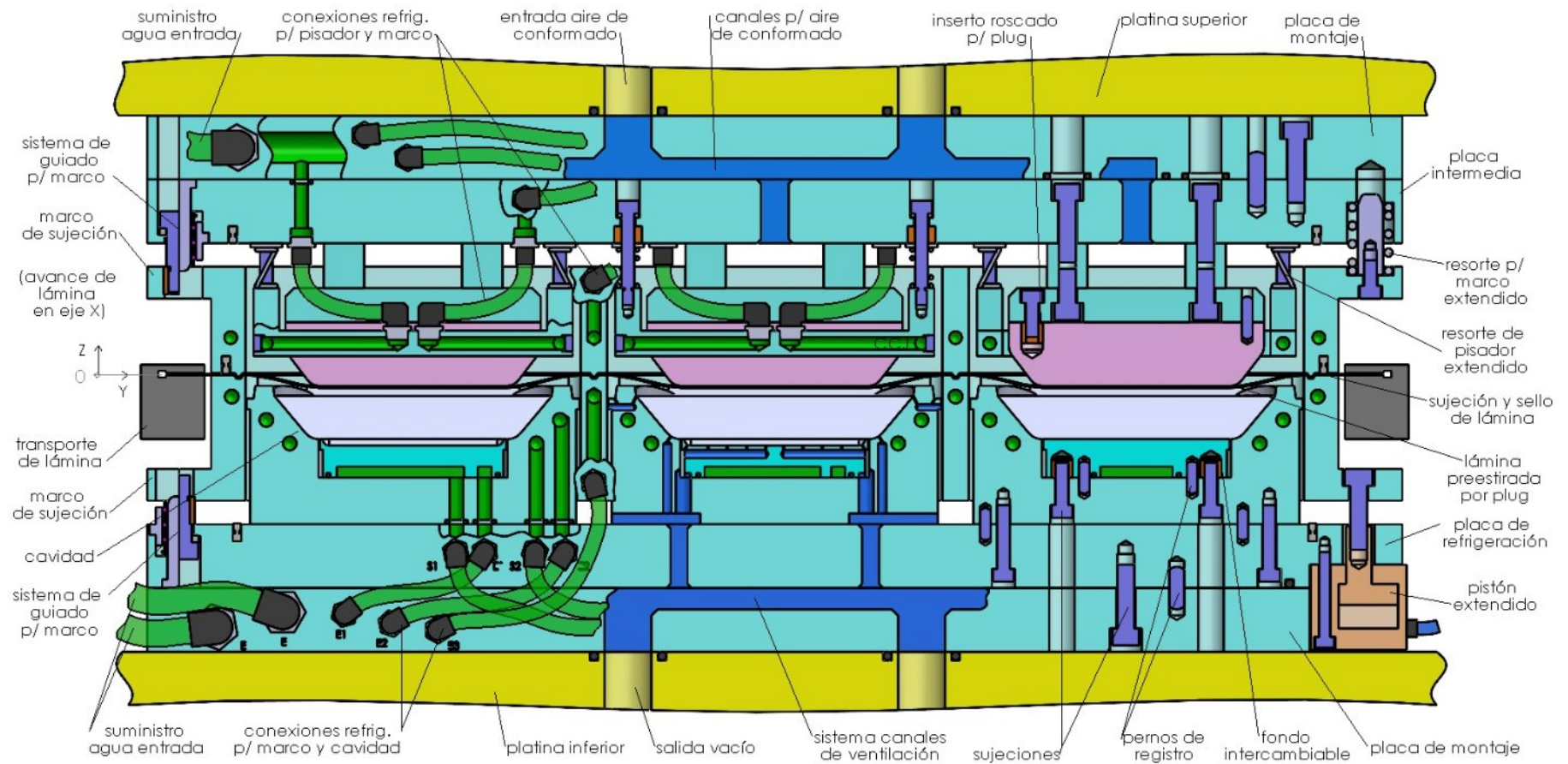
Verificación de ensamble

La experiencia demuestra que un producto o máquina que es fácil de ensamblar suele ser más fácil de desarmar, dar servicio de reparación o mantenimiento y volver a armar. Una tarea más que consideré fue comprobar y validar el orden de montaje de las piezas y subensambles, así como los posibles requisitos de mantenimiento y puntos de acceso (tanto de las herramientas, como las manos del técnico de ensamble) para atornillar, ajustar, conectar mangueras a los racores, etc. En este último, es vital tomar en cuenta los radios mínimos de curvatura de las mangueras indicados por el proveedor. Tanto para evitar estrangular el flujo, como para facilitar la conexión, consideré las combinaciones óptimas de racores disponibles (e.g. rectos, en forma de “L”, “T”, “Y”).

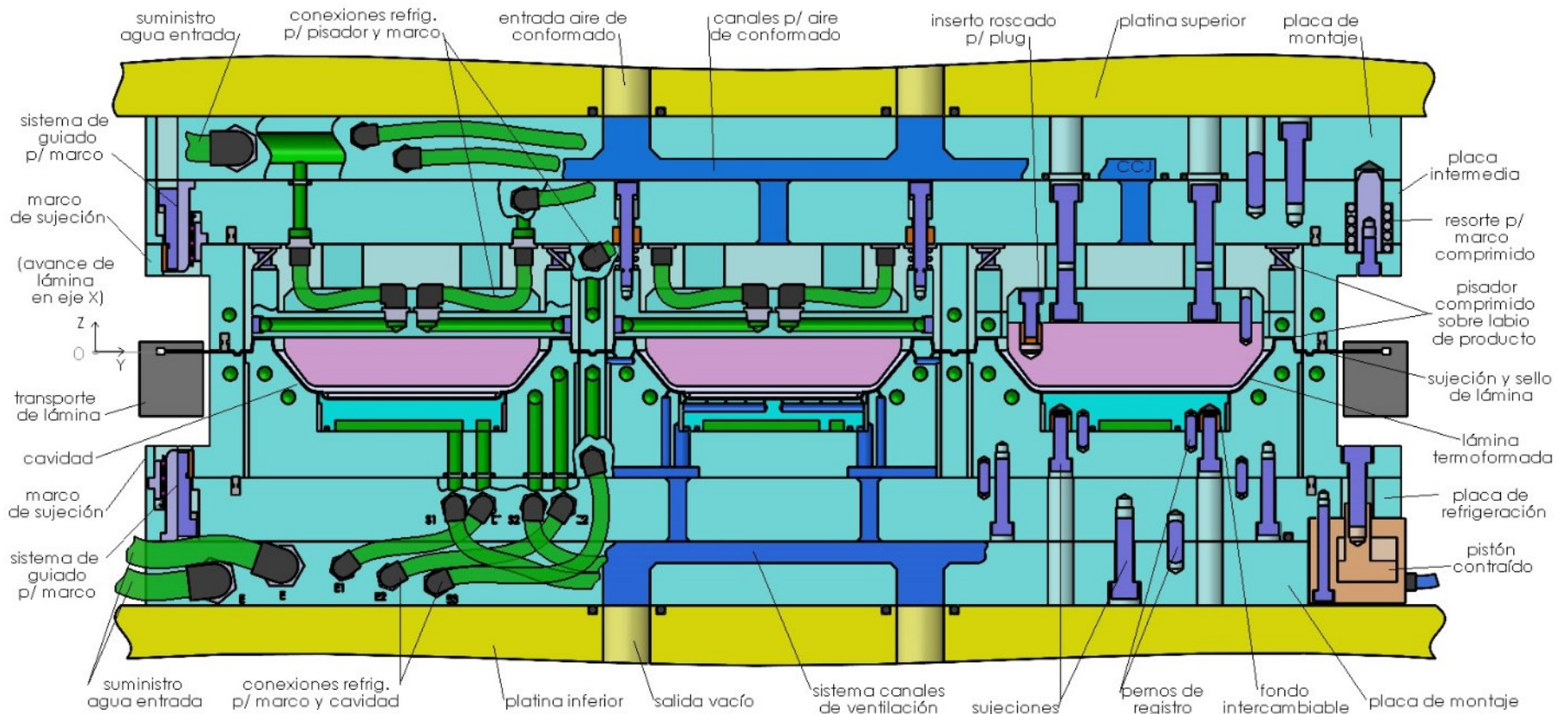
En las *figuras 2.10, 2.11 y 2.12* se muestran ejemplos de la vista de sección del concepto del molde resultante para intervalos de tiempo de mayor interés.

En la *figura 2.10* las platinas de la prensa se han cerrado parcialmente, típicamente es un movimiento simultáneo. Los marcos se encuentran para sujetar la lámina en el medio de ambos. La asistencia mecánica de conformado da lugar con el preestiramiento que ejerce el plug. La presión entre lámina y cavidad comienza a incrementarse. En este punto dos de los parámetros de proceso importantes son el inicio y el nivel de vacío aplicado (recordar y notar que la profundidad del plug no es controlable, tiene una distancia definida desde el diseño de molde para este proyecto). Si el nivel de vacío es nulo o mínimo, la lámina se infla hacia fuera de la cavidad y a los costados del plug estirándola de forma no deseada. Si el nivel de vacío es elevado o activado prematuramente, la lámina se desprende del plug antes que este alcance su carrera final anulando su propósito.

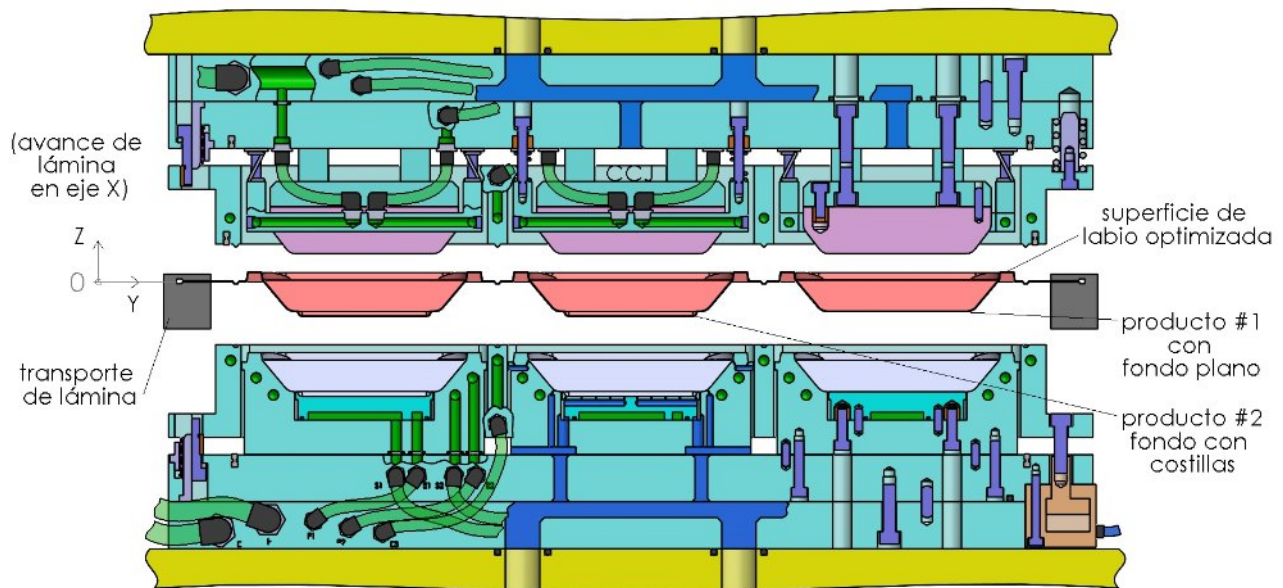
En la *figura 2.11* las platinas han cerrado completamente. Los pisadores del sistema de acuñado presionan sobre el labio de las piezas para definir de manera optimizada la superficie. El plug llegó a su carrera máxima contribuyendo a la uniformidad en los espesores de pared. Inmediatamente el aire de conformado ha sido aplicado y comienza el enfriamiento controlado de la pieza.



▲ Fig. 2.10 Ejemplo de la vista de sección del molde. Cierre parcial de la prensa, sujeción inicial de lámina y preestiramiento con plug



▲ Fig. 2.11 Ejemplo de la vista de sección del molde. Cierre total de la prensa, pisadores sobre el labio de las piezas, carrera máxima de plugs, aire de conformado aplicado y enfriamiento de lámina.



▲ Fig. 2.12 Ejemplo de la vista de sección del molde. Apertura de platinas-desmoldeo y avance de productos termoformados a la siguiente estación

Finalmente en la *figura 2.12* las platinas han abierto completamente. Los marcos han regresado a su posición abierta. En específico el marco inferior ha contribuido al desmoldeo de los tacones para apilado, visibles en las esquinas del borde superior. En este instante es posible el transporte de las piezas termoformadas con las cadenas indexadoras hacia la estación de corte.

2.4 Diseño de troquel de corte

Entre los factores principales para el diseño en el tipo de corte, se deben tomar en cuenta el calibre del material, fuerza de corte necesaria, dimensiones de la pieza, tolerancias, nivel de corte, cantidad de piezas producidas, facilidad de posicionar las cuchillas con respecto a los productos termoformados, costo de manufactura, costo y tiempo de mantenimiento, así como las especificaciones de la estación en la máquina termoformadora, tonelaje, dimensiones mínimas, máximas y carreras de ambas platinas. Esto último es especialmente importante para piezas profundas.

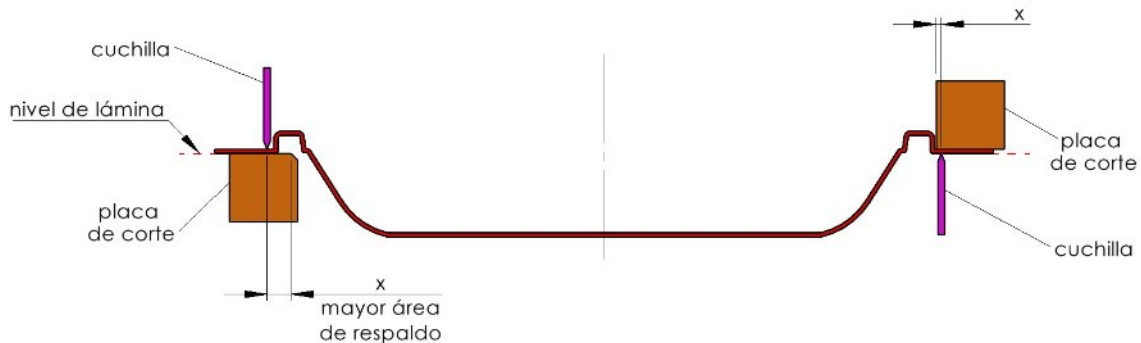
Otro punto a tomar en consideración para el buen funcionamiento del troquel, es la necesidad de mantener la planicidad y paralelismo en cada una de las placas, con el fin de obtener un corte parejo y reducir al mínimo el desgaste prematuro en el filo de las cuchillas. Para tener esto en perspectiva, en el caso de un material frágil como el PS, puede ser factible solo penetrar de un 50% a 75% del espesor de lámina, el restante se termina por la baja resistencia al impacto y la propagación de la fractura. Por ello, en materiales

frágiles dichas tolerancias de planicidad - paralelismo pueden ser ligeramente mayores y el desgaste de cuchillas más longevo. En contraste, en el APET esto es crítico, pues se requiere de cortar por arriba del 90% y hasta el 100% el espesor de lámina. Un problema con el desgaste en las cuchillas, es la aparición de zonas planas en el filo que aplastan la lámina de plástico, dejando rastros de polvo y otras partículas de aspecto más alargado, comúnmente conocidas como *pelo de ángel*. Debido a la electricidad estática generada en la lámina, estas partículas son difíciles de remover, por lo que se les considera un contaminante que lleva a la obtención de productos no conformes.

2.4.1 Diseño de cuchillas

Selección de tipo de cuchillas

De acuerdo al requerimiento de menor coste tanto de manufactura como de mantenimiento, la opción evaluada de mayor factibilidad son los suajes o placas previamente afiladas. El tiempo de manufactura es el menor comparado con las otras opciones existentes (cf. Secc. 1.4.2). Considerando la producción proyectada específica del proyecto, es de mayor beneficio usar cuchillas intercambiables de bajo costo y fácil instalación, comparado con el reafilado de cuchillas forjadas, de mucho mayor costo y tiempo de mantenimiento.



▲ Fig. 2.13 Opciones de ubicación para cuchilla y placa de corte

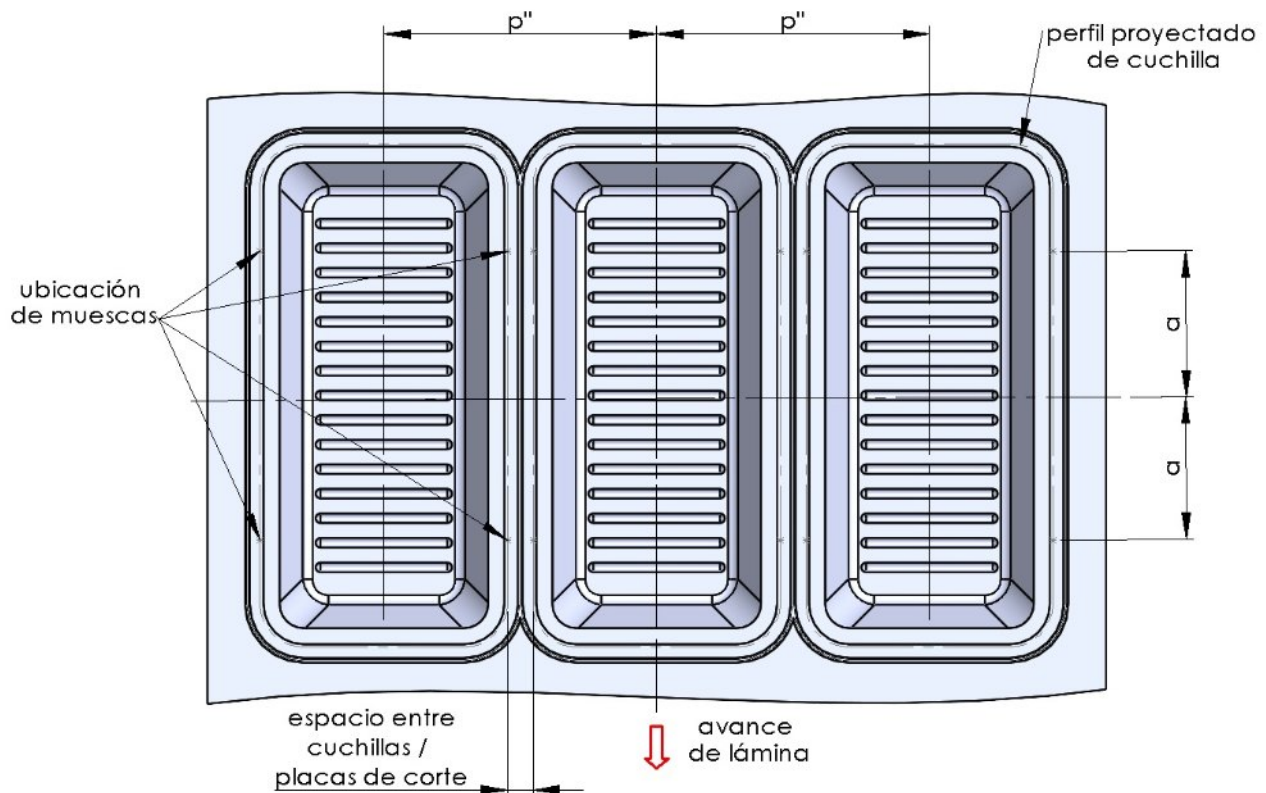
Definición de lado del corte para las cuchillas

Por *lado de corte* se entiende sobre que parte de la estación se tendrán instalados los subensambles de las cuchillas (i.e. platina inferior o platina superior). Para esta decisión se debe analizar el espacio disponible en el producto y en concordancia a una instalación de cavidades en la platina superior o inferior (Cf. Secc. 2.3.5), validar la mejor opción. En este proyecto las cavidades se termoforman en su parte más profunda por debajo del nivel de la lámina. En la *figura 2.13* se muestran las dos posibles configuraciones. A la derecha podemos notar claramente el problema de la placa de corte donde el espacio es mínimo, sumado a la necesidad de ajustar la posición final tanto en la misma placa de corte como en la cuchilla, con una alta probabilidad de lastimar el labio del producto. Por el contrario, la opción con la cuchilla en el ensamble superior presenta una mayor zona de respaldo para la placa de corte y con ello, solo se tendrá necesidad de ajustar la posición final de la cuchilla.

Disposición de cuchillas individuales

Conforme avanza la lámina desde la estación de termoformado a la estación de corte, las distancias entre centros p de las piezas termoformadas (Fig. 2.4) disminuyen debido a la contracción térmica en toda la lámina. Por otra parte, cabe recordar que para un mismo producto, un sistema de corte en sitio (i.e. termoformado y corte en la misma estación) tendrá dimensiones de cuchillas ligeramente mayores comparadas con un sistema de corte independiente (i.e. termoformado y corte en estaciones separadas). En estaciones separadas, el producto sufre parcialmente los efectos de la contracción térmica durante el traslado entre las prensas, típicamente la mitad de la contracción total. Por lo tanto, apliqué el concepto del factor de contracción (cf. Secc. 2.3.2) tanto para el dimensionamiento de las cuchillas como para la disposición de las mismas, es decir su distancia entre centros p'' (Fig. 2.14).

En la figura 2.14 también se indica la posición de las muescas, hechas en el filo de las cuchillas en cuatro puntos, suficientes para seguir transportando el producto a la estación final. Esta no es una posición arbitraria, pues se deben colocar sobre las líneas de corte que sean paralelas a la dirección del avance de la lámina. Incluir muescas sobre las líneas de corte perpendiculares al avance, tienden a ser desprendidas por la fuerza ejercida en el avance mismo de la lámina. Por tal motivo y apoyado en el tipo de cuchilla elegida, la ligera separación en el punto de unión la aproveché para usarla como una muesca. Tomando solo la debida precaución de colocar la sujeción lateral lo más cerca posible a dicha unión, con el fin de reducir en lo mínimo una separación mayor por la fuerza aplicada en cada golpe de la prensa.



▲ Fig. 2.14 Lámina con productos termoformados, disposición del perfil de cuchillas y muescas

Una alternativa vista en otros herramentales, es la unión de la cuchilla por medio de soldadura, con resultados adversos debido a la modificación del temple por las altas temperaturas que alcanza el proceso, llevando a reducir la dureza y el afilado de la cuchilla prematuramente. Un diseño más conveniente es usar una tira de refuerzo y soldarla por puntos debajo del filo de la cuchilla.

2.4.2 Diseño de arillo para cuchillas

Para dar forma de acuerdo al perfil de corte del producto y mantener esta geometría en las cuchillas, existen máquinas dobladoras con un punzonado lateral, el cual hace orificios para paso de tornillo al costado de la cuchilla. A través de estos orificios, se sujeta a un arillo que lleva en sus costados las roscas necesarias y el mismo perfil que la cuchilla. Este contorno en el arillo es el que dará la precisión en las dimensiones finales del corte, así como el soporte para mantener la cuchilla perpendicular a la base, por lo que la correcta tolerancia geométrica se indicó en el plano de manufactura y para rectificar las superficies horizontales de esta pieza, consiguiendo la intención de diseño. Otro punto a destacar en el diseño del arillo es la altura del mismo. Como regla general para este tipo de cuchillas de precisión, se recomienda no exceder un máximo de 0.3 in. (7.6 mm) la extensión de cuchillas por encima del arillo [2]. El material típico para este elemento es aluminio.

2.4.3 Placa de respaldo (sufridera)

La cara trasera de las cuchillas, es decir la superficie opuesta al filo, necesita contar con un respaldo que reciba la carga de la fuerza de corte. Típicamente se ocupan placas de acero inoxidable que van de 0.06 in. – 0.12 in. (1.5 mm – 3.0 mm) de espesor [2]. Este elemento distribuye la fuerza recibida y evita que el cuerpo de la cuchilla se vaya incrustando en la superficie más suave de la placa base. Sobre esta placa también reposa el arillo, por lo que para su diseño incluí barrenos holgados para paso tanto de tornillo como de pernos de registro.

2.4.4 Diseño de placa base de cuchillas

Esta pieza es la base de todo el subensamble entre cuchillas-arillo-sufridera y a la vez sirve como un separador que brindará la altura extra requerida para todo el conjunto. Entre sus características importantes están los barrenos para paso de tornillo con los que se sujetará a la placa de montaje. Estos deben tener holgura extra, pues de ser necesario, es posible el ajuste en la posición final durante las pruebas de molde. En un inicio se ensambla con pernos de registro para marcar la posición inicial calculada. Si el ajuste es necesario, se utilizan pernos de registro en nuevas posiciones. Las roscas para sujeción del arillo y sus respectivos barrenos rimados para pernos de registro son también necesarios. Al igual que el arillo, el material típico de este elemento es aluminio y se indica su rectificado para cumplir con la intención de un corte parejo.

2.4.5 Diseño de placa de montaje superior

Placa de diseño estándar donde se tienen las roscas con que se fijan cada uno de los subensambles de cuchillas. Entre sus características invariables para cualquier herramental están el espesor, largo y rebajes laterales para sujeción por mordazas a la platina de la estación. El ancho va de acuerdo al espacio mínimo para los subensambles de cuchillas. Otros de sus elementos necesarios son los barrenos para pernos de registro, correspondientes a la posición inicial de los subensambles de cuchillas, roscas para cáncamos, así como barrenos guía o en su defecto un alojamiento para buje guía, con la finalidad de recibir pernos piloto dispuestos en el ensamble inferior y centrar todo el troquel. Esta función de centrado es solo utilizada en la instalación sobre la prensa, retirando los pernos piloto durante producción. Por ello seleccioné pernos piloto para trabajo ligero y de diámetro reducido. Obtener un ensamble funcional, como en los arillos y las placas base, depende que esta pieza en aluminio, de igual forma cumpla con el acabado superficial indicado.

2.4.6 Diseño de placa de corte

Comparando las dos placas de corte que se muestran en las *figuras 1.9 y 2.13*, se puede notar una diferencia más allá del espesor. Para un producto con todas sus geometrías termoformadas a un solo lado del nivel de lámina, lo conveniente es una placa de corte sin ningún tipo de remoción de material. En el caso de un producto con geometrías en ambos lados del nivel de lámina, es preciso ocupar una placa de corte con el espacio al centro para dar paso libre a la parte más profunda del producto.

En este proyecto definí el uso de una placa de acero calidad herramienta, con mayor dureza que las cuchillas para cumplir con el propósito de solo realizar recambio en estas últimas. Su espesor unos milímetros por debajo de la medida comercial solo para remover un mínimo de material y su rectificado correspondiente.

El elemento funcional que resta en esta placa son cajas para tornillos, donde se puede aplicar la misma holgura extra para el ajuste final durante la prueba de molde. Es posible diseñar una sola placa de corte para múltiples cavidades, en caso de tener un producto con el suficiente espacio en la zona de corte, se puede desprestigiar la variación entre la contracción real y la calculada. Por el contrario, diseñar una placa de corte por cavidad, habilitará la opción de ajustar individualmente cada pieza, que es el caso de este proyecto.

Cabe mencionar que en la estación de corte de la máquina termoformadora, la platina inferior tiene una carrera fija para cualquier herramental y no tiene compensación alguna en la altura. Esto es independiente del lado en que se monten las cuchillas y la placa de corte. Por este motivo se debe verificar la dimensión especificada y hacer la compensación al espesor de la placa de corte, en los elementos correspondientes del troquel, típicamente en el marco de respaldo.

2.4.7 Diseño de marco de respaldo

Como ya se ha mencionado este elemento deberá ser diseñado para soportar a la placa o placas de corte y dar la altura necesaria. Puede ser una sola pieza o un subensamble de varias placas. De material estándar aluminio. De ser una sola pieza es importante remover el material necesario para dar el espacio al producto termoformado y/o para reducir el peso. En el caso de ser un subensamble, este se diseña con placas de espesores estándar para minimizar el trabajo de maquinado en una primera fase (escuadrar cada placa y realizar cajas para tornillos o roscas según sea el caso). Una vez ensamblado el marco, tal como se haría con un marco de una sola pieza, se procede a rectificar. Posteriormente se realiza por un lado, el maquinado de las roscas para sujetar las placas de corte y por el otro, los alojamientos para pernos de centrado más roscas destinadas al ensamble con la placa de montaje inferior.

Estas dos opciones de diseño con caminos diferentes en la manufactura, muestran un claro ejemplo donde se requirió evaluar y comparar costos de materiales, maquinados, labor de ensamble y tiempo de entrega para tomar una decisión (Tabla 2.2). Un proceso iterativo (DFMA) llevado a cabo en muchas de las piezas que forman parte de cada herramental. La mayor cantidad en el material para el marco de una sola pieza, sumado al material desperdiciado son los factores principales que descartaron este diseño. Notar que para el diseño con múltiples piezas, en el caso de ser una producción en serie el tiempo y labor de ensamble tendría un mayor impacto a considerar. En este proyecto sólo se requiere un ensamble.

Opción 1	Opción 2
una pieza	múltiples piezas + tornillería
mayor cantidad de materia prima (x2.6)	mínima cantidad de materia prima (x1)
un solo <i>set-up</i> CNC	múltiples <i>set-up</i> CNC
material desperdiciado	labor de ensamble

▲ **Tabla. 2.2** Aspectos a valorar en análisis DFMA para marco de respaldo

2.4.8 Diseño de placa de montaje inferior

Al igual que su contraparte en el troquel superior, esta pieza es una placa con varias de sus características estándar para cualquier herramental como es el espesor, largo, rebajes laterales para sujeción por mordazas a la platina inferior y ranura para centrado en la estación. El ancho va de acuerdo al espacio mínimo para las placas de corte. Cuenta con las cajas de tornillo y alojamientos para pernos de registro destinados a fijar el marco de respaldo. Roscas para cáncamos y por último, los alojamientos con ajuste para pernos piloto removibles que ayudarán a centrar todo el troquel durante su instalación en la prensa.

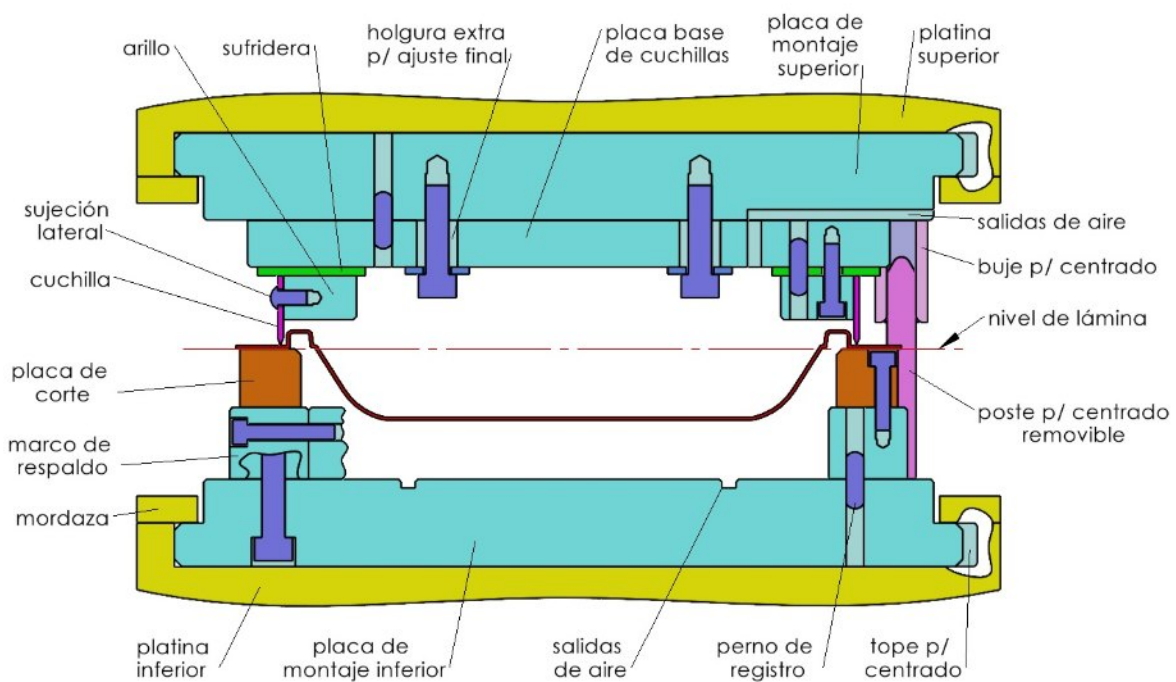
2.4.9 Consideraciones adicionales

Salidas de aire

Un fenómeno común durante el proceso de producción es que la lámina de plástico aun caliente, se quede adherida a la placa de corte en todo el perímetro donde la cuchilla ha hecho contacto. Esto crea un sello y una fuerza de succión en cada una de las cavidades al abrir las platinas, llevando a un posible desgarre de las piezas. Para contrarrestar este efecto diseñe canales mediante barrenos y ranuras por donde fluya aire.

Verificación de interferencias

Simular el movimiento del troquel (apertura-cierre de platinas) y el avance de lámina con los productos termoformados, es un paso necesario para poder finalizar el diseño de dicha estación. Con la verificación de posibles interferencias no deseadas y en dado caso, su corrección en el diseño, se contribuye tanto a garantizar la protección de los productos, herramental, como de la prensa misma durante la prueba inicial y en consecuencia durante producción. En la *figura 2.15* se muestra un ejemplo de la vista de sección del troquel de corte, montado en la prensa y sujeto mediante mordazas.



▲ Fig. 2.15 Ejemplo de la vista de sección del troquel de corte

Corte asistido por calentamiento

Un método comúnmente empleado para mejorar el proceso del corte, es el calentamiento intencional de las cuchillas y placa de corte. Al disminuir la resistencia al corte de la lámina, se reduce la fuerza necesaria en la prensa, por lo que esta técnica puede usarse para aumentar el número de cavidades en caso de estar

cercano al límite del tonelaje requerido. Otro efecto benéfico de esta práctica es reducir las partículas de pelo de ángel.

En el caso de calentar la placa de corte, un punto intuitivo para establecer la temperatura correcta, es mantenerla unos grados por debajo del momento donde la lámina comienza a adherirse. Por el contrario si lo que se pretende calentar son las cuchillas, el cálculo de sus dimensiones debe incluir el factor correspondiente a la expansión térmica del arillo durante el calentamiento, a la temperatura requerida y especificar este valor como un parámetro de proceso.

Fuerza de corte

Esta fuerza depende de factores como el tipo de resina, calibre de lámina, la temperatura de lámina, la temperatura de la cuchilla y desde luego la condición del filo de las cuchillas. Si bien los fabricantes de máquinas termoformadoras especifican la capacidad de corte máxima para sus prensas en términos del material y una distancia equivalente al perímetro del filo de las cuchillas, también temperatura de cuchillas o calibre de lámina (*Fig. 2.16*), se puede hacer un estimado de la fuerza necesaria y compararlo con la especificación de la prensa. Las consideraciones para el diseño con un factor de seguridad amplio son como se muestra a continuación [2].

- i) Tramos rectos de cuchilla requieren un estimado de 18 – 53 N de fuerza por cada milímetro de corte, en condiciones de temperatura ambiente y válido para lámina delgada (*cf. Secc. 1*).
- ii) Tramos de cuchillas con radios menores a 5 mm ofrecen mayor resistencia que radios más grandes. La longitud de estos arcos debe ser considerada de dos a cuatro veces el equivalente a la longitud en un tramo recto.
- iii) De acuerdo a la resina seleccionada el PET presenta la mayor resistencia entre la variedad de opciones, comparativamente el HIPS es uno de los que requieren menor fuerza de corte.
- iv) Las cuchillas que gradualmente pierden filo durante producción pueden llegar a necesitar hasta el doble de fuerza, antes de que vuelvan a ser cambiadas o reafiladas.
- v) El corte asistido por calentamiento puede reducir a la mitad la fuerza necesaria que en condiciones de temperatura ambiente se requiere.

Como ejemplo, tomando los datos siguientes; dimensiones de cuchilla 200 mm x 380 mm, radios en las esquinas igual a 30 mm, 3 cavidades termoformadas en PET como resina y capacidad especificada en la prensa 70 toneladas.

Longitud tramos rectos de cuchilla:

$$L = 3 \cdot [2(380 \text{ mm} - 60 \text{ mm}) + 2(200 \text{ mm} - 60 \text{ mm})] = 2760 \text{ mm}$$

Longitud de tramos en radio de cuchilla, por ser radio mayor a 5 mm, el factor (x2) se aplica:

$$L_R = 3 \cdot [2\pi(30 \text{ mm})] \cdot 2 = 1131 \text{ mm}$$

Longitud total de cuchillas:

$$L_T = 2760 + 1131 = 3891 \text{ mm}$$

Fuerza de corte requerida:

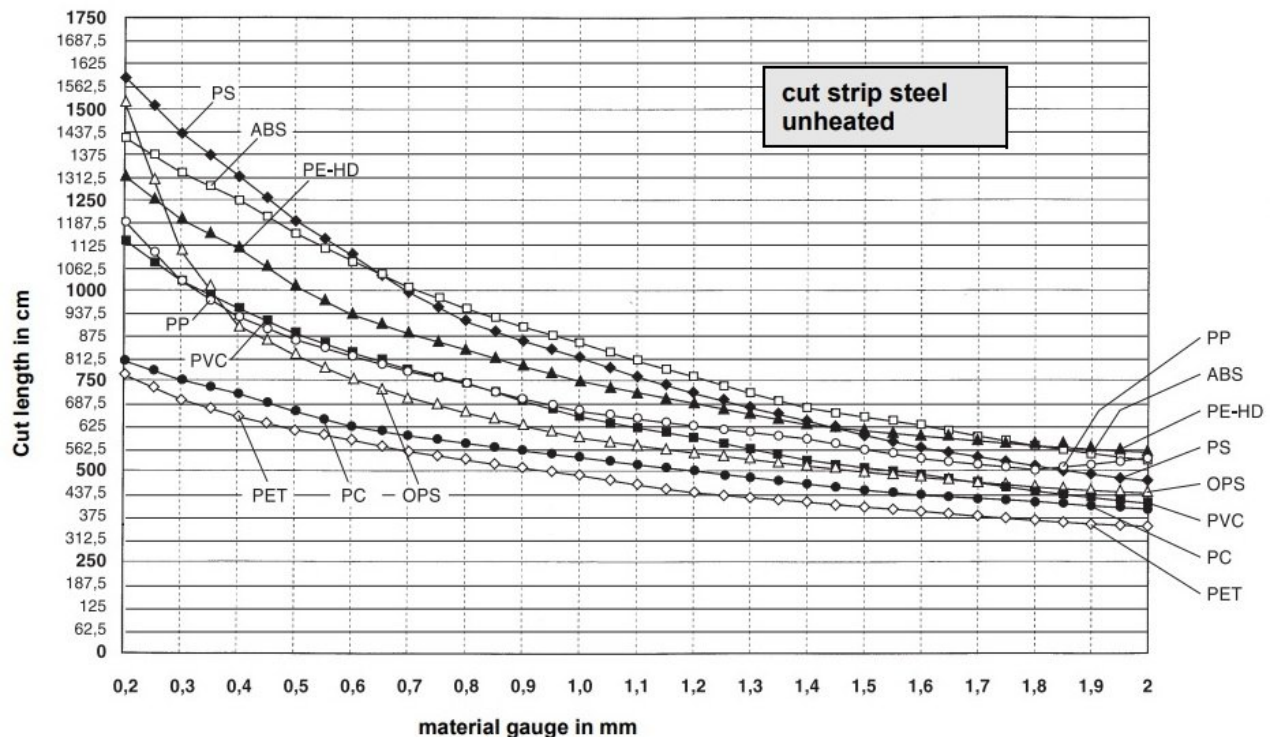
$$F_c = (53 \text{ N/mm})(3891 \text{ mm}) \rightarrow F_c = 206.2 \text{ kN}$$

Capacidad de prensa:

$$70 \text{ ton} (9.8 \text{ kN / ton}) = 686 \text{ kN}$$

Este cálculo muestra que se requiere solo $206.2/686 = 30\%$ de la capacidad de corte disponible en la prensa. Por experiencia un resultado previsible debido a la poca cantidad de cavidades y a la alta relación del área termoformada versus el perímetro del filo de cuchilla para cada producto.

Comparando el resultado anterior con una prensa de capacidad similar de acuerdo a la gráfica de la *figura 2.16*, con un calibre de lámina $s = 0.7 \text{ mm}$, se tiene que la máxima longitud de corte es de 562.5 cm (5625 mm). Tomando en cuenta las dimensiones de cuchillas mencionadas en el ejemplo, se tiene un perímetro total de corte igual a 3325 mm. En la prensa referida a la *figura 2.16* se estaría usando un $3325/5625 = 59\%$ de la capacidad de corte.

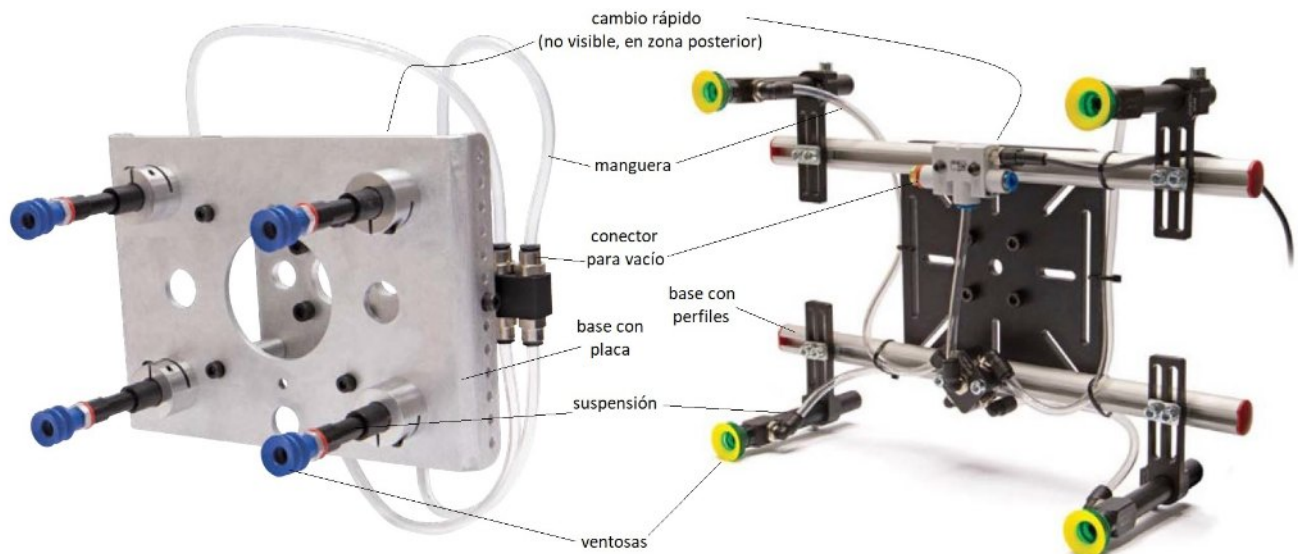


▲ Fig. 2.16 Longitud de corte máxima de troqueles con suaje de acero en una prensa de 75-ton (RDK 80). Tomado de *Operating Manual RDK 80 Forming Machine*. ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG (1999)

2.5 Diseño de unidad apiladora

En este proyecto el sistema elegido para la recolección y apilado de las piezas termoformadas fue mediante los equipos conocidos como *pick and place* y su respectivo *fin de brazo (robot-end-of-arm tool, EOAT)*. Estos dispositivos son utilizados en diversidad de aplicaciones para automatización de procesos, manipulación de materiales y traslado de piezas entre estaciones, tanto para trabajos ligeros como de servicio pesado. Existen empresas de automatización con divisiones dedicadas al desarrollo de estos sistemas (e.g. PIAB, Privarsa, EMI, Destaco). Los catálogos publicados sobre sus soluciones ofrecen una opción efectiva para la selección guiada de los componentes.

La configuración estándar de un fin de brazo para uso de ventosas se compone, de al menos, los siguientes elementos (*Fig. 2.17*):



▲ **Fig. 2.17** Comparación entre fines de brazo con estructura base de placa y de perfil extruido. Adaptado de *Robot End of Arm Tooling Catalog R22.1*. EMI Corp. (2021)

- Un conector rápido que va sujeto a su contraparte previamente instalada en el eje móvil de la máquina (i.e. brazo). Este soporta todo el peso del fin de brazo. En él se tiene la conexión a la fuente principal de vacío y un distribuidor, con sus respectivas conexiones, para las mangueras que transmitirán el vacío hacia la suspensión de cada ventosa.

- Una estructura base que va sujeta al conector rápido. Brinda soporte a la vez que posiciona cada una de las suspensiones de ventosas, por lo cual su diseño es específico de la(s) pieza(s) a sujetar. Típicamente hecha con placas delgadas de aluminio 0.125 in. a 0.25 in. (3.2 mm a 6.35 mm) o placas de acero inoxidable (calibre 12, equivalente a 2.8 mm), cortadas por láser o corte con agua (*waterjet*). Otro sistema de mayor rigidez es el fabricado a partir de ensambles con perfiles extruidos, aunque de mayor costo. La última de las

innovaciones, son las estructuras hechas con manufactura aditiva, las cuales pueden llegar a incluir dentro de sí mismas los canales de vacío, eliminando con ello algunos elementos como mangueras y racores.

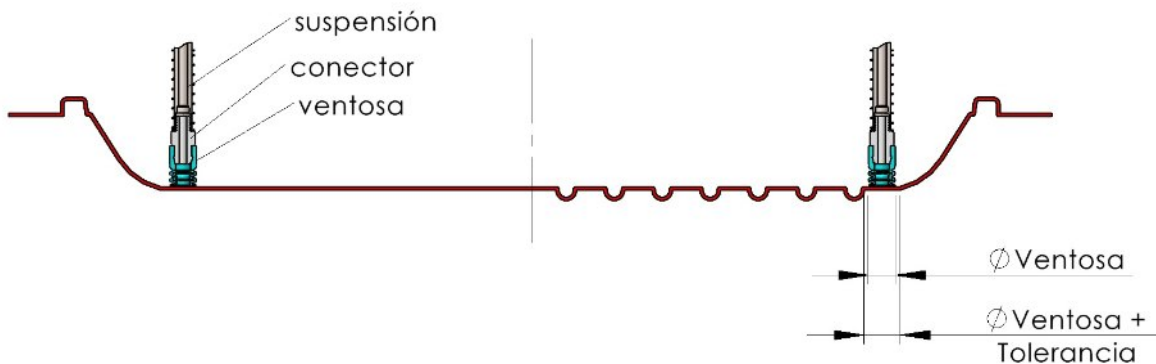
- Suspensión o cuerpo de ventosa. Este elemento tiene dos funciones principales; brindar un movimiento más suave al amortiguar la llegada de la ventosa sobre el producto a recolectar, típicamente con la ayuda de un resorte. La segunda función, proporcionar las conexiones entre la fuente de vacío y la ventosa. La sujeción más común a la estructura base, es a través de orificios por donde atraviesa el cuerpo de la suspensión y fijado a través de contratuercas o abrazaderas.

- Ventosa. El elemento principal que mediante la fuerzas de presión negativa o vacío y presión atmosférica, se adhiere a la superficie del objeto para sujetarlo. Fabricadas en materiales elásticos y flexibles como silicona, nitrilo y poliuretano.

- Conectores y mangueras. Sirven para la distribución del vacío entre los elementos del fin de brazo, desde la fuente principal hasta las ventosas.

2.5.1 Selección de ventosas

Los elementos considerados para la selección de ventosas fueron el tipo de material de la pieza a recolectar (PET), el tipo de material de la ventosa apto para grado alimenticio, el material recomendado para evitar dejar marcas en el producto, la temperatura de trabajo y el espacio disponible en el producto para posicionar las suficientes ventosas brindando tanto estabilidad como fuerza de sujeción, para ambos fondos de la charola con diferente geometría.



▲ Fig. 2.18 Posicionamiento de ventosas para los dos fondos de charola requeridos

Del análisis para el espacio disponible en el producto con menor superficie plana en el fondo, se determinó un diámetro de ventosa para dejar una tolerancia radial, es decir, se tienen superficies planas donde cabe una circunferencia con diámetro igual al diámetro de la ventosa, más un tanto para asegurar el correcto asentamiento de la misma (Fig. 2.18). Se puede observar que para el producto con fondo plano (a la

izquierda de la imagen) el posicionamiento de la ventosa no tiene mayor problema, contrario al producto con el fondo con costillas (a la derecha) donde el espacio para el asentamiento de la ventosa es mínimo. La estabilidad típicamente es lograda con 4 ventosas por producto y la verificación de la fuerza de sujeción es como sigue.

Considerando una ventosa de $\varnothing 9$ mm, esta equivale a un área de sujeción $A_V = 64 \text{ mm}^2$, usando la definición de presión y el valor de la presión atmosférica, la fuerza de sujeción F_V es igual a:

$$F_V = P_{\text{Atm.}} \times A_V = (101 \text{ kPa})(64 \times 10^{-6} \text{ m}^2) \quad \rightarrow \quad F_V = 6.4 \text{ N}$$

Por cada producto se tiene una fuerza total de sujeción igual a $6.4 \times 4 = 25.6 \text{ N}$. Comparando con el peso total del producto W_p :

$$W_p = m_p \times g, \quad m_p = \rho_{\text{PETG}} \times A_p \times s$$

Tomando como valores, $\rho_{\text{PETG}} = 1.27 \text{ g / cm}^3$ (Tabla 1.1), un área de cuchillas $A_p = 750 \text{ cm}^2$ y un calibre de lámina $s = 0.7 \text{ mm}$, tenemos:

$$m_p = (1.27 \text{ g / cm}^3) \times (750 \text{ cm}^2) \times (0.07 \text{ cm}) \quad \rightarrow \quad m_p = 66.7 \text{ g}$$

$$W_p = (0.0667 \text{ kg}) \times (9.78 \text{ m/s}^2) \quad \rightarrow \quad W_p = 0.65 \text{ N}$$

Aún existiendo pérdidas en el sistema de vacío, la fuerza generada por cuatro ventosas de $\varnothing 9$ mm, es más que suficiente para un producto ligero como es el caso de esta aplicación.

2.5.2 Diseño de estructura base

Uno de los puntos con mayor relevancia para definir el tipo de estructura fue la capacidad de ajustar a pie de máquina la posición de cada ventosa, esto debido a posibles variaciones en el proceso durante el indexado de los productos termoformados en la estación de apilado. El principal factor de esa variación, son los efectos asociados a la contracción general de la lámina, lo cual afectaría mayormente a las charolas termoformadas con costillas en el fondo, por su reducido espacio. Basado en dicha consideración, decidí por un sistema con perfiles de aluminio para lograr un montaje fácil. Estos elementos posibilitan en cualquier momento la flexibilidad de ser ajustados en la posición requerida para la ventosa, al aflojar un par de tornillos, colocar en la nueva posición y apretar nuevamente los tornillos.



▲ **Fig. 2.19** Elementos estándar para el ensamble de la estructura base de un fin de brazo . Tomado de *Robot End of Arm Tooling Catalog R22.1*. EMI Corp. (2021)

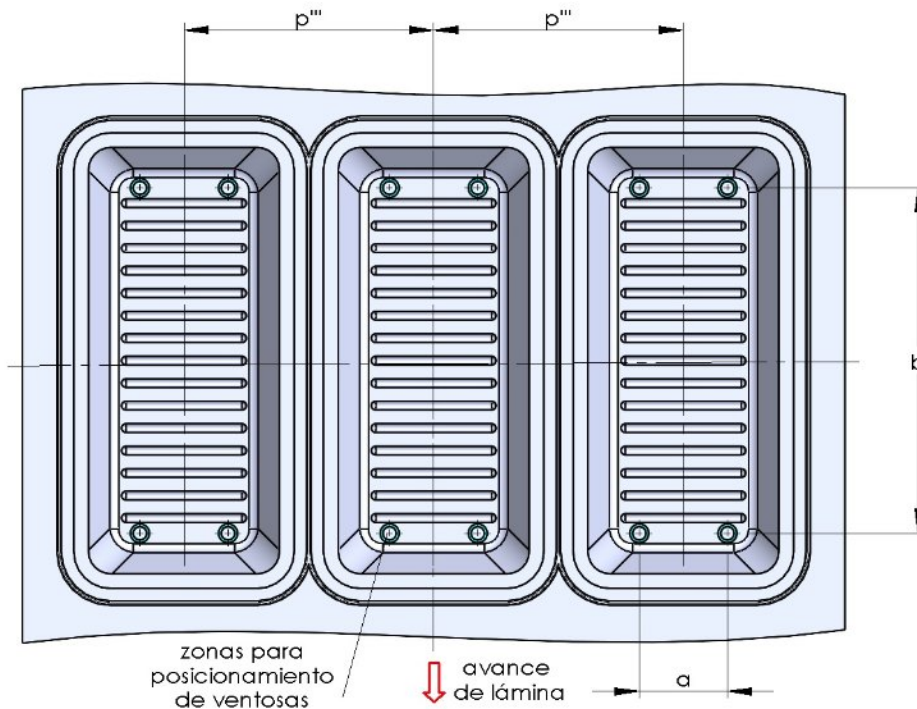
En la *figura 2.19* se muestran las formas típicas de ensamblar los perfiles y demás elementos estándar. Se puede apreciar dos tipos diferentes de perfiles rectangulares, con tuercas especiales insertadas en sus ranuras y sujetos entre sí mediante una placa y sus tornillos. Con el mismo tipo de tuercas, de manera análoga se sujetan a los perfiles, la placa y la abrazadera. Ambos con su respectivo orificio para colocar una suspensión según convenga. Es importante señalar que típicamente este tipo de perfiles se venden en longitudes de uno o dos metros, por lo que en el diseño de la estructura deben de considerarse estas medidas para ajustar la longitud de cada uno de los tramos necesarios.

Considerando el valor de la distancia p entre centros de cavidades (*Fig. 2.4*), la posición de las ventosas en el producto (*Fig. 2.18*) y el factor de contracción para la lámina, es posible obtener la disposición general del fin de brazo para las tres piezas termoformadas (*Fig. 2.20*).

Como puntos finales para el diseño de la estructura base, comprobé el espacio disponible en la estación de apilado, así como el intervalo permitido de la altura mínima - máxima para el fin de brazo y verifiqué el peso total del ensamble. Este parámetro está limitado a un máximo por las especificaciones del conector rápido que sostiene todo el sistema.

Selección de elementos estándar (para EOAT)

La selección de los elementos restantes quedó en gran parte definida por el tipo de ventosa elegida en primera instancia. Si bien existen variedad de opciones e intercambiabilidad, el ideal fue apegarse a mantener conectores roscados, manguera, suspensiones, así como perfiles, placas o abrazaderas en sistema milimétrico. Materiales de dichos elementos, apropiados para la aplicación requerida y desde luego el costo, también fue tomado en cuenta.

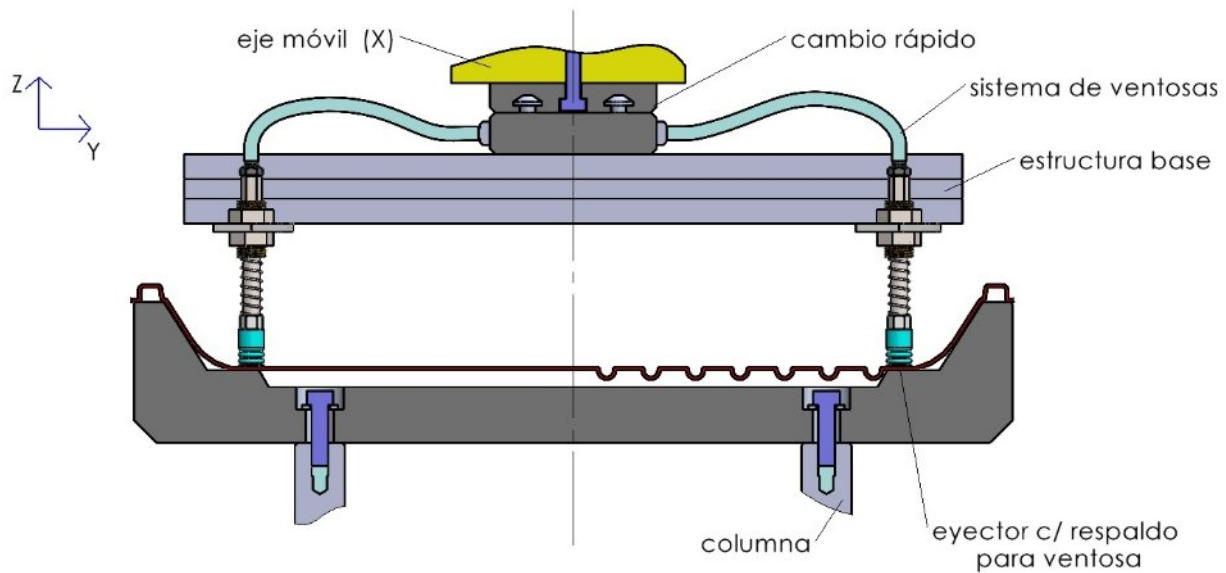


▲ Fig. 2.20 Lámina con productos termoformados y áreas para la sujeción de ventosas

El mismo principio de usar en la medida de lo posible los mismos tamaños de tornillos y tuercas en todo el fin de brazo, ahorra contratiempos en ensamble y mantenimiento del sistema. Más aún, reduce el número de partes en la lista de materiales, con efectos benéficos en la gestión de las compras, inventario y almacén.

2.5.3 Diseño de eyectores

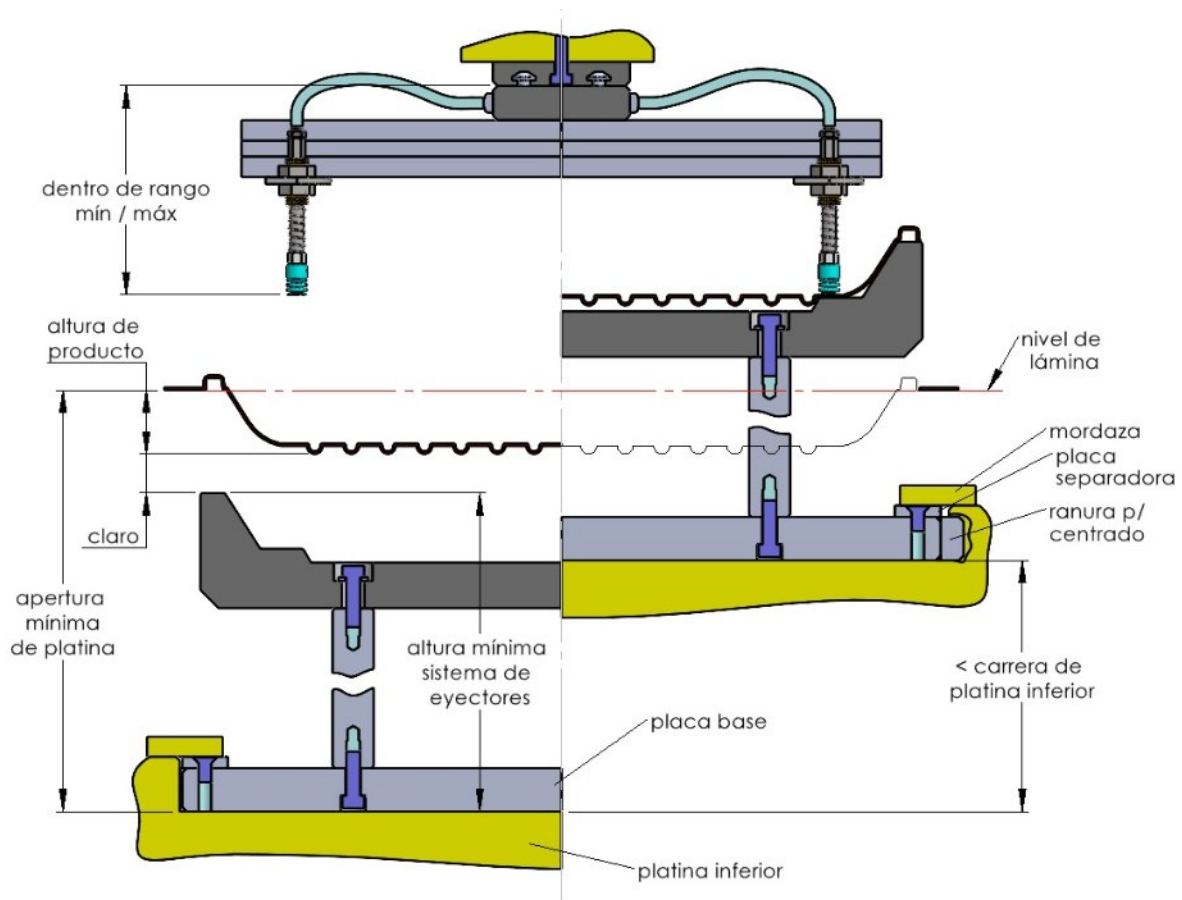
Como se mencionó en la *sección 1.4.3*, el sistema de apilado termina de desprender por completo los productos termoformados de la lámina sin dañarlos. Esto se consigue aplicando una fuerza que empuje a los productos, de ser posible, en la zona de mayor rigidez estructural, así como en las zonas cercanas a las muescas que mantienen unido el producto con la lámina. Para este efecto se diseñan los eyectores que serán los encargados de transmitir la fuerza. Otro punto considerado en su diseño, es el respaldo necesario en la parte posterior del producto donde se posiciona la ventosa. El propósito es evitar que esta le cause una posible deformación al producto por la fuerza con la que impacta a su llegada, mientras se asegura un buen asentamiento de la misma (*Fig. 2.21*). Para la sujeción de los eyectores a las columnas, se debe tener la capacidad de ajustar la posición final, bajo el mismo criterio que el ajuste en la posición de cada ventosa. Debido a este requerimiento incluí cajas y barrenos para paso de tornillo con mayor holgura, que al ser usados en conjunto con arandelas dan solución a esta necesidad. Como mínimo dos columnas por eyector son requeridas para darle la estabilidad necesaria. Es común ver una sola columna para productos de dimensiones menores o de geometría circular.



▲ Fig. 2.21 Recolección de producto desprendido con respaldo de inyector para soporte de ventosa

2.5.4 Diseño de columnas de eyectores

De acuerdo a la *figura 1.10*, las columnas son extensiones que darán la longitud necesaria para hacer llegar los productos hasta el punto de recolección del fin de brazo. Esto es posible con la carrera que presenta la platina inferior en cada ciclo. Aunado a esto, se tiene disponible un ajuste extra para modificar la altura inicial de la platina. El criterio usado para calcular la longitud de las columnas fue tomando el ajuste de la platina en su posición superior (i.e. la posición más cercana al nivel cero). Con ello se logra el herramental de menor altura posible. En caso hipotético de termoformar en el molde una cavidad con un producto de mayor profundidad, se está cubierto con el ajuste de la platina para compensar este cambio. Dicho lo anterior, considerando la carrera, las alturas de los eyectores, profundidad de producto, un claro para el libre paso de la lámina durante el avance y la altura del fin de brazo, se puede dimensionar la longitud de las columnas (*Fig. 2.22*). Respecto al diámetro el enfoque es análogo a las columnas para los subensambles de plugs (*cf. Secc. 2.3.11*).



▲ Fig. 2.22 Ejemplo de la vista de sección de la unidad apiladora en los instantes de apertura de platina-avance de lámina y cierre de platina-desprendimiento-recolección de producto

2.5.5 Diseño de placa base de eyectores

Por último, la placa base y el sistema de sujeción a la platina inferior son piezas con dimensiones estándar para cualquier herramienta. La característica que hace diferente a esta placa, es la posición y cantidad de cajas de tornillo que servirán para sujetar las columnas de los eyectores. Con la distancia entre centros p''' , de la figura 2.20 que incluye el factor de contracción.

Los puntos críticos para verificar su cumplimiento son; altura de placas separadoras en los extremos (para las mordazas), largo de placa base y ranura para centrado de ensamble sobre la platina inferior.

2.6 Documentación

Se han mencionado dos entregables que forman parte integral de la documentación, estos dentro de la última fase del rol del diseño de herramientas; planos tanto de piezas individuales como de ensambles y listas de materiales (LDM). Debido a que esta materia es inherente a cualquier tipo de diseño en ingeniería y para los cuales existen estándares internos específicos, en este apartado mencionaré algunas generalidades de dichos documentos así como algunos de los principios clave que tomé en cuenta.

Dibujos de Ingeniería o Planos

El propósito principal de un plano es comunicar de manera clara y sin ambigüedades la forma, dimensiones e intención de diseño de una pieza o ensamble para su producción. Es una herramienta que debe facilitar el trabajo al usuario, no complicarlo. Esto implica su elaboración mediante un diseño centrado en el cliente (i.e. manufactura, ensamble y calidad), una filosofía aplicada en diversidad de procesos.

Siempre dimensionar con la idea en mente de cómo medir o inspeccionar la pieza, permite una medición precisa, evita errores y complicaciones en dichos procesos, lo que acelera la producción. Toda dimensión debe tener una tolerancia, la cual determina los límites de variación dimensional dentro de los cuales una pieza seguirá cumpliendo con su propósito. Dar siempre el mayor intervalo posible y solo especificar tolerancias tan cerradas como sea necesario de acuerdo a la función de la pieza, es un principio básico para reducir los costos de manufactura. Incluir tolerancias ayuda a identificar las dimensiones críticas y usadas de forma correcta, aseguran el ensamble con otras piezas. Para calidad, las tolerancias determinan el criterio de aceptación cuando se inspecciona una pieza. Recordar que las tolerancias pueden ser dimensionales, geométricas, de fuerza o carga (e.g. tolerancia para la especificación en la fuerza de un resorte) y para criterios en alguna prueba (e.g. tolerancia para la dureza superficial en una placa de corte). Estos principios son base para la aplicación de *Dimensiones y Tolerancias Geométricas (GD&T)*, la herramienta que en última instancia permite comunicar, mediante simbología y de manera condensada la intención de diseño.

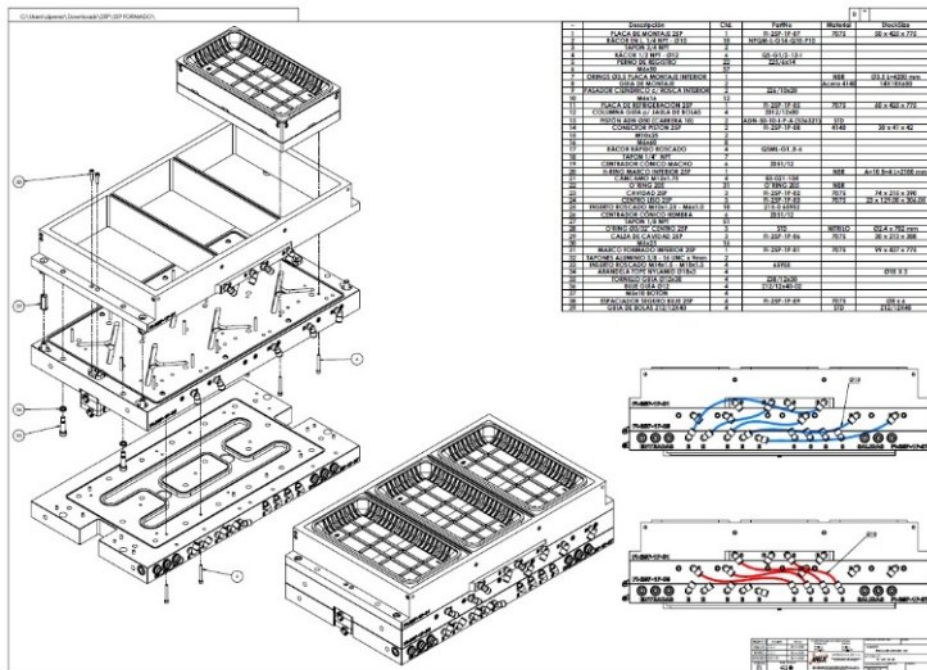
Un plano especial en estos proyectos es el requerido para la fabricación de los orificios de ventilación en cavidades, uno de los últimos pasos en cuanto a su maquinado. Una incorrecta realización puede llegar a la catastrófica situación de comunicar un barrenado de refrigeración con uno de ventilación, lo que implica tiempos y costos de reparación totalmente indeseados. Por tanto, este dibujo debe especificar la posición de los puntos de ventilación en las cavidades y la orientación del orificio (i.e. ángulo de trayectoria) para encontrarse con el barrenado opuesto de mayor dimensión, de acuerdo a como fueron visualizados en la etapa de diseño. En estos planos incluí vistas superiores y laterales en escala natural, con modo de bordes ocultos visibles, así como vistas de sección.

En cuanto a ensambles, algunas de las estrategias usadas con el objeto de aumentar la eficiencia en el armado de los herramientas, fue la inclusión de planos de subensambles. Incluso por muy fácil que sean los subensambles, esto permite mantener un plano de ensamble principal más limpio y claro, evitando conjeturas posiblemente erróneas en el personal encargado de este proceso. Otro detalle que puede ser

pasado por alto es el dibujo de las mangueras para conexión entre racores, tanto para refrigeración como las requeridas en el fin de brazo robótico del sistema apilador.

Listas de Materiales (LDM, BOM)

Esta lista es un documento en forma de tabla donde se especifica cada una de las piezas que componen un ensamble. Incluye un número consecutivo para cada pieza única o ítem, es decir, el orden en que las piezas se muestran en el plano de ensamble, el nombre o descripción, número de parte o clave interna y cantidades respectivas. Estos cuatro elementos son los básicos para un plano de ensamble. También puede incluirse el material, si son componentes para fabricarse o componentes disponibles para comprarse (i.e. elementos estándar), dimensiones generales relevantes o dimensiones de material en bruto, proveedor, entre otros. Esta información detallada es necesaria para la lista requerida por compras. En la *figura 2.23* se muestra el plano correspondiente al ensamble principal del molde inferior. Se puede distinguir en la vista explosiva los subensambles de una sola cavidad, del marco de sujeción, placa de refrigeración, placa de montaje y una vista isométrica con el ensamble finalizado. Las vistas frontales indican las conexiones de mangueras indicando claramente la función de entrada o salida de refrigeración.



▲ Fig. 2.23 Plano de ensamble general para molde con cavidades de “fondo plano”

Cuando se usa una estructura de planos de subensambles, es importante mantener el número consecutivo en la LDM correspondiente al ensamble principal, en congruencia con la numeración de las piezas de los subensambles. Esto permite tener una sola LDM consolidada sin duplicar los consecutivos. Dicho de otro modo, el racor con número de parte “XYZ-123” del ensamble “A”, debe mantener el mismo número de ítem, que el racor “XYZ-123” instalado en algún otro(s) subensamble(s) “B” y/o “C”, etc.

Lista de verificación (checklist)

Junto con los dibujos de ingeniería y listas de materiales, la documentación del diseño de los herramientas se complementó con toda la información generada al inicio y durante el desarrollo del proyecto. A manera de lista para verificar esta información se muestran los siguientes puntos.

1. Solicitud de desarrollo
2. Plano de producto
 - 2.1. Espesores de pared mínimos
 - 2.2. Dimensiones críticas para desempeño
 - 2.3. Acabado superficial
 - 2.4. Leyendas y grabados
3. Resina y coeficiente de contracción
4. Calibre y ancho de lámina
5. Plano de especificación
 - 5.1. Número de cavidades
 - 5.2. Producción proyectada
6. Máquina termoformadora
 - 6.1. Aire de conformado y/o vacío
 - 6.2. Fuerza de cierre
 - 6.3. Tercer movimiento para plugs
 - 6.4. Conexiones para refrigeración y aire a presión
 - 6.5. Tipo de prensa para corte y capacidad
 - 6.6. Tipo de sistema de apilado
 - 6.7. Carrera de platinas
 - 6.8. Dimensión Máx./Mín. de herramientas
 - 6.9. Peso máximo de herramientas
7. Tipo de cavidades, negativo o positivo
 - 7.1. Material de cavidades
 - 7.2. Acabados superficiales
 - 7.3. Sistema de refrigeración
 - 7.4. Cavidades intercambiables
8. Cajas de presión y vacío
9. Plugs fijos o móviles.
10. Sistema de sujeción de lámina
 - 10.1. Cilindros de aire y/o resortes
 - 10.2. Elementos guía
11. Sistema y elementos para desmoldeo
12. Sistemas de cambios rápidos
13. Archivos p/ manufactura de refacciones (cuchillas, matrices o punzones)
14. Reportes de dureza final en piezas tratadas
15. Archivos de modelo sólido
16. Planos y listas de materiales

3 Resultados

El proyecto asignado se cumplió en su totalidad con los entregables ya mencionados. Como primer punto, mantuve una disposición de molde con un porcentaje de lámina no termoformada menor al 30%. Mantener un bajo porcentaje de lámina no termoformada es importante debido a que este material no produce una ganancia económica sino que por el contrario, genera un costo extra al tener que ser reprocesado (i.e. reciclado). En la industria de termoformado de lámina delgada este valor puede llegar a ser superior al 50%.

En la revisión de diseño no se requirieron cambios mayores. Se validaron diversidad de aspectos y dudas relativos a manufactura, ensamble, funcionamiento e instalación de los herramientas. Dos observaciones fueron hechas. La primera, en la selección de pistones para el marco de sujeción, elegí pistones de doble efecto. Esta decisión no fue la más acertada debido al funcionamiento que se requiere. Los pistones se desempeñan más como resortes de aire, no se activan por medio de válvulas, sino que continuamente se suministran con aire a presión regulado. La contracción del pistón se lleva a cabo por la fuerza de cierre de la prensa. Por tal motivo, la elección óptima para el requerimiento es un pistón de simple efecto. La segunda observación, en el sistema de eyectores, la inclusión de barrenos con mayor holgura para el ajuste de los expulsores no fueron diseñados desde un principio. Estos dos puntos se documentaron para incluirse en los siguientes herramientas. Los cambios no influyeron significativamente en incremento de tiempos de entrega.

En el apartado de la documentación, un resultado a destacar fue la selección de este proyecto como guía para un nuevo estándar interno en los planos de ensambles, con comentarios positivos de los usuarios finales y mejora en los tiempos del proceso de ensamblaje.

De acuerdo a los requerimientos definidos para los herramientas, se logró diseñar, fabricar y ensamblar un molde multicavidad, flexible para una familia de productos. Esto gracias a la habilitación de insertos o fondos intercambiables.



▲ Fig. 3.1 Vista actual del molde con insertos denominados “fondo con costillas” y contramolde con plugs

Ensamblados los herramentales, se validó el funcionamiento preliminar de los subsistemas mediante pruebas de flujo por cavidad y molde completo, movimientos de marcos accionados por cilindros o resortes, movimiento de pisadores, corte en el troquel de una hoja de lámina plástica de bajo calibre y/u hoja de papel, accionamiento de ventosas e inspección de calidad. Los herramentales fueron embalados y enviados a planta junto con la documentación correspondiente, como especificaciones, planos de ensamble, instrucciones de operación y funciones especiales de ser el caso. En la *figura 3.1* se muestra una vista actual del ensamble finalizado, tanto del molde con las cavidades así como del contramolde con los plugs. Se puede apreciar el montaje de los insertos referidos como “fondo con costillas” y pequeñas áreas planas en forma de rombo para posicionar las ventosas.

La prueba de los herramentales en la máquina termoformadora fue el siguiente paso para la completa validación del funcionamiento del molde, troquel y apilador. El montaje ocurrió sin mayor contratiempo. Las ayudas presentes tanto en los herramentales como en cada estación de la máquina, cumplieron su objetivo para el acoplamiento. La posición en las conexiones para aire presurizado en los pistones y agua en los distribuidores permitieron un fácil manejo de las mangueras para la instalación.

Respecto al material de la resina usada, fue posible termoformar PET en ambos calibres, con una transparencia aceptable y espesores finales uniformes. El desmoldeo de las piezas fue exitoso, las zonas con ángulos negativos (i.e. tacones de apilado) mantuvieron su geometría y función. El sistema de acuñado mediante pisadores permitió conseguir un labio de charola con las características de planicidad y acabado superficial aptos para el sellado con película. El proceso de termoformado se mantuvo estable en un tiempo de ciclo de 2.57 s, equivalente a 23.34 ciclos/min. El mínimo requerido en las especificaciones del proyecto se estableció en 20 ciclos/min (*Fig. 3.2*).

En la estación de corte, el troquel permitió un ajuste fino para mantener la repetibilidad en el corte perimetral de las piezas, de acuerdo a la contracción real de la lámina. No se presentaron zonas con desprendimientos irregulares a lo largo del contorno de las piezas ni se presentó el efecto pelo de ángel.

El sistema de fin de brazo para la recolección y apilado se mantuvo estable a la velocidad obtenida en la estación de termoformado. No se encontraron deformaciones en la geometría de los productos por efectos de la separación entre las piezas termoformadas y lámina.

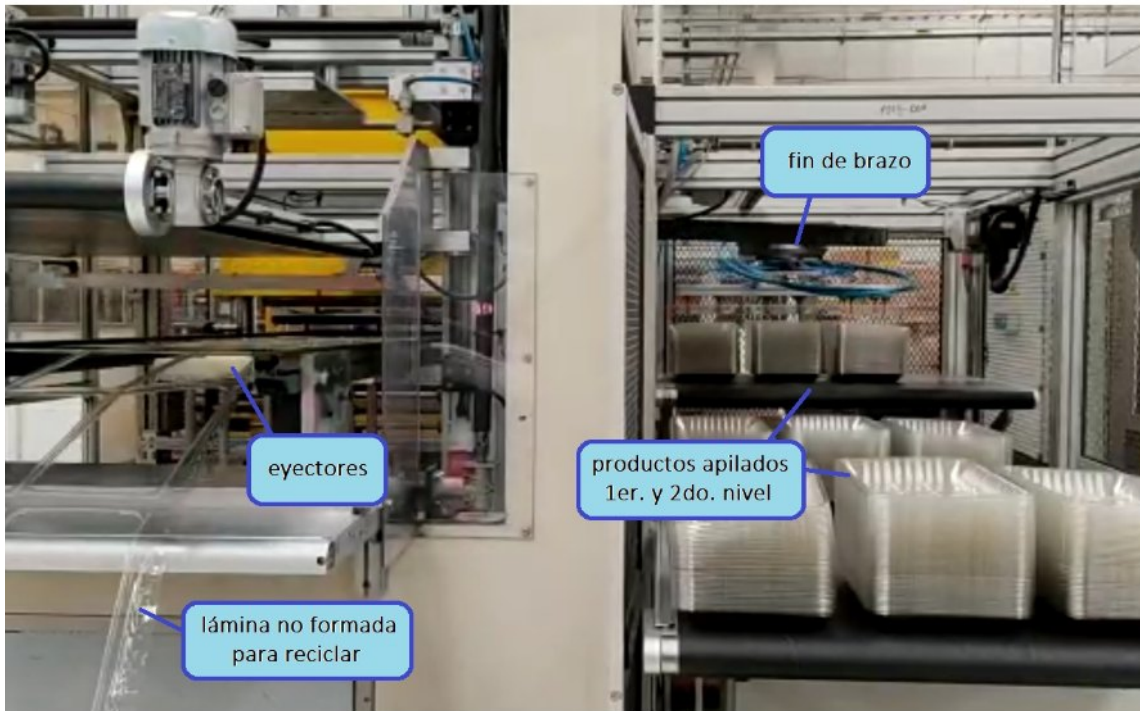
Las dimensiones finales se encontraron dentro de las tolerancias especificadas en el plano de producto.



▲ Fig. 3.2 Tiempos de ciclo durante prueba de molde

En la *figura 3.3* se muestra una perspectiva a la salida de la máquina termoformadora. Se observan varias de las acciones que suceden en la estación final del proceso de producción. Por un lado el sistema de eyectores que ha regresado a su posición retraída, es decir, cuando la platina inferior está en su punto mínimo. La lámina no termoformada sigue su camino hacia el mandril (no visible) para enrollarse en él y posteriormente ser reciclada. El fin de brazo se encuentra en la posición de colocar los productos recolectados sobre una banda transportadora. Esta banda compensa progresivamente la altura de las pilas y al final de un número conveniente de ciclos, las envía a un segundo nivel donde los productos se encuentran listos para embalaje manual.

Con estos resultados en la prueba de herramientas inicial, no se requirió una segunda prueba. Los parámetros de proceso determinados permitieron obtener producto conforme bajo las pruebas de calidad especificadas por el cliente. Con ello se liberó el herramental junto con dichos parámetros para comenzar producción.



▲ Fig. 3.3 Vista durante prueba de herramientas a la salida de la máquina termoformadora

4 Conclusiones

En este reporte se han documentado las estrategias seguidas y consideraciones tomadas para el diseño de herramientas en la industria del termoformado de lámina delgada. La documentación permite tener una referencia para el desarrollo de los siguientes proyectos, no solo en la plataforma asignada sino en una amplia variedad de maquinaria para termoformado. Recordar incluso que gran cantidad de principios son válidos para lámina gruesa. Esta variedad de puntos tratados a lo largo del presente informe, puede contribuir a marcar una pauta en las revisiones finales de diseño de los herramientas, antes de liberar la información a las áreas de manufactura y ensamble. Se eliminan posibles falsas conjeturas y reduce pasar por alto elementos críticos para el desarrollo del proyecto.

También se mencionaron formas de optimizar costos durante el desarrollo de lanzamiento de un nuevo producto. Tomando en cuenta que el material o resina plástica usada es una parte considerable del costo total de producción, fácilmente puede ser el 50% por ciento en la industria de lámina delgada, se comprobó que diseñando los productos con el mínimo espesor de lámina inicial resulta en múltiples beneficios, entre ellos, reducir el costo de material y lograr ciclos de producción más cortos, que se traduce en menor tiempo del uso de la máquina termoformadora. Por tanto, buscar la optimización de este parámetro siempre será una tarea principal para un producto más rentable. El caso es análogo en la reducción del porcentaje de lámina no termoformada o esqueleto.

Con este proyecto comprobé la importancia en la estandarización de los herramientas. Múltiples beneficios acompañan este enfoque en diferentes niveles; desde reducción en costos asociados a la manufactura, reducción de inventarios en materia prima, herramientas y refacciones, menor tiempo de ensamble, tiempos más cortos en la instalación y puesta en marcha de los herramientas.

Es de principal importancia la definición de una superficie plana cuando se usa un sistema de acuñado mediante pisadores refrigerados y el funcionamiento de un sistema de plugs fijo en el contramolde, para productos de relativa poca profundidad. Es completamente factible usar esta plataforma con cavidades

nuevas, para una línea de productos de menor altura o con cambios en las geometrías de las paredes. En productos más profundos se tendría que evaluar si es factible mantener un sistema de plugs fijo.

En diversidad de industrias si bien no es el ideal, las condiciones en el piso de producción pueden cambiar de un turno a otro y por lo tanto, los parámetros de producción para un mismo herramental. Un diseño robusto prevé la posible ocurrencia de estas situaciones y considera tener elementos flexibles ante tales cambios, brindando la posibilidad de realizar un ajuste en el herramental o en el mejor de los casos, que este pueda absorber dichas variaciones (e.g. cuchillas independientes, estructura para fin de brazo). En contraparte identificar elementos críticos que deben ser diseñados a prueba de errores (e.g. una sola orientación en el montaje de insertos intercambiables) es una de varias formas donde se demuestra el criterio para el ejercicio de la profesión.

Comprobé como los conceptos aplicados de ingeniería concurrente, diseño centrado en el usuario, diseño para manufactura-ensamble-mantenimiento, entre otros, garantizan un proyecto exitoso y económicamente rentable al evitar añadir costos innecesarios durante la fase de diseño. No sobra repetir que esta es una de las fases con menor costo en el desarrollo del lanzamiento de un nuevo producto, pero las decisiones que se toman en este punto tienen una de las mayores implicaciones en el costo total del proyecto. Por lo tanto hacer una mejora, un cambio o anticipar un error en esta etapa, siempre tendrá un costo menor que hacerlo en etapas avanzadas, donde significa incurrir en mayor tiempo de lanzamiento del producto y costos elevados.

Más allá de las políticas de trabajo en una empresa y la delimitación de responsabilidades para cada colaborador, mi rol como diseñador de herramientas no lo acoté a entregar archivos de modelo sólidos, planos, listas de materiales, etc. Involucrarme en la medida de lo posible con las actividades y personal encargado de los procesos de entrada (proveedores) y procesos subsecuentes (voz del cliente, VOC) resultaron en invaluable retroalimentación para una mejora continua.

Sin la comprensión del diseño de producto, proceso de termoformado, funcionamiento de la máquina termoformadora, sus ventajas y limitaciones, comportamiento de materiales, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, transferencia de calor, así mismo de los procesos de manufactura aditiva (*AM*), prototipado rápido, maquinado convencional, maquinado por control numérico (*CNC*), barrenado profundo, rectificado, procesos manuales, ensamble, conocimiento de elementos estándar, sería imposible desarrollar de manera efectiva el trabajo aquí descrito. En mi caso específico, una parte de estos conocimientos fueron aprendidos durante la carrera. El resto de tópicos como el termoformado, dimensiones y tolerancias geométricas (*GD&T*), impresión 3D, mecanizado por electroerosión (*EDM*), realicé cursos de capacitación dentro y fuera de la empresa así como búsqueda de información en revistas y literatura especializada con las últimas innovaciones o tendencias en la materia. El aprendizaje continuo impera en el día a día de la práctica profesional y personal, también a través de lo transmitido por jefes y colaboradores. Afirmo con el respaldo de la experiencia profesional, que la formación universitaria recibida en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, me brindó los elementos base para poder comprender nuevos conocimientos técnicos y seguir construyendo a partir de los mismos.

En el otro lado, la práctica exige contar con sólidas habilidades blandas como la comunicación asertiva. Es lugar común en diversidad de industrias que el colaborador que mejor sabe vender su trabajo (una idea, diseño, producto, servicio) se llevará el proyecto a casa, por sobre quien tenga cuantitativamente una mejor propuesta pero que no supo comunicarla a su equipo, al supervisor, a los tomadores de decisiones o al cliente. De igual forma se tiene la negociación y liderazgo para llegar a acuerdos que logren cumplir un objetivo común, donde el estar en desacuerdo es más la norma que la excepción. Realizar una efectiva labor de trabajo en equipo, donde existen diferentes puntos de vista y saber lidiar con cada uno de ellos requirió de ese desarrollo interpersonal, no es una habilidad optativa. Se sabe que estas capacidades vuelven más efectivos los conocimientos técnicos. Es por ello que resulta de principal interés para la industria seguir reforzando estas áreas desde la etapa académica en pos de un perfil profesional mas completo en los egresados.

Referencias

1. SCHWARZMANN, Peter e ILLIG. Thermoforming: A Practical Guide. 2nd ed. Munich, Carl Hanser Verlag, 2019.
2. ROSEN, Stanley R. Thermoforming: Improving Process Performance. Dearborn, Society of Manufacturing Engineers, 2002.
3. THORNE, James L. Understanding Thermoforming. 2nd ed. Munich, Carl Hanser Verlag, 2008.
4. ENGELMANN, Sven. Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
5. La cristalinidad, ¿amigo o enemigo durante el procesamiento del PET? *Plastics Technology México*. Publicado 01 mayo 2017 [en línea]. [Última consulta: 25 mayo 2022]. Disponible en: <www.pt-mexico.com/articulos/la-cristalinidad-amigo-o-enemigo-durante-el-procesamiento-del-pet>
6. THORNE, James L. Thermoforming 101: Alphabet Soup? *SPE Thermoforming Quarterly*, Vol. 23, No. 2, 2004.
7. Technical Resources - HYTAC - CMT Materials
CMT Materials [en línea]. [Última consulta: 25 mayo 2022].
Disponible en: <<https://cmtmaterials.com/technical-resources/>>
8. G.N. PLASTICS COMPANY. Cut-In-Place Tooling Handbook. Revision 4. Chester, G.N. Plastics Company Limited, 1998.
9. ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG. Mould Construction Manual RD 53c. Ed. EN / 05.12. Heilbronn, ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, 2012.
10. Designing/Manufacturing with HYTAC
CMT Materials [en línea]. [Última consulta: 25 mayo 2022].
Disponible en:
<<https://cmtmaterials.com/wp-content/uploads/2016/01/Designing-with-HYTAC.pdf>>