

PRESENTACIÓN

Los materiales compuestos han sido utilizados para resolver problemas tecnológicos durante mucho tiempo, pero solo desde los años sesenta empezaron a capturar la atención de la industria gracias a la introducción de compuestos poliméricos. Desde entonces se han vuelto materiales comunes para el diseño y fabricación de productos para una gran variedad de aplicaciones en ingeniería, que incluyen componentes para la industria automotriz, partes espaciales, industria marítima, etc.

Debido a que los materiales compuestos involucran dos o más materiales, las técnicas de procesamiento utilizadas son muy diferentes a aquellas utilizadas para procesar metales. Dado que existen varias alternativas para procesar este tipo de materiales, el ingeniero debe seleccionar la técnica y las condiciones adecuadas para realizar este trabajo a un bajo costo. Para esto se debe tener un amplio conocimiento de las limitaciones y beneficios de cada proceso. La técnica de moldeo por compresión, es una de las más difundidas por su relativa simplicidad y conveniencia en cuanto a operación y procesamiento de compuestos.

El propósito de este proyecto de titulación es diseñar una máquina que permita procesar diferentes tipos de materiales compuestos mediante la técnica de moldeo por compresión, para su posterior estudio en el laboratorio con la gran ventaja de su adaptabilidad a otras aplicaciones y su costo menor a otras máquinas de similares características.

Objetivos

- Diseñar una prensa calefactora para procesamiento de materiales compuestos mediante moldeo por compresión.
- Establecer los parámetros funcionales para el diseño de la prensa calefactora tomando como punto de partida las propiedades de los materiales que se van a procesar
- Diseñar un sistema de compresión adecuado para la prensa calefactora

- Seleccionar un sistema eléctrico de calefacción que pueda incorporarse al sistema de compresión de la prensa
- Seleccionar un sistema de control de temperatura para el sistema calefactor de la prensa

Alcances

- Estudiar las principales propiedades de los materiales poliméricos que se procesarán mediante moldeo por compresión con la finalidad de definir los rangos de operación de la prensa a diseñar.
- Estudiar diferentes sistemas de compresión y de calefacción que sean apropiados para la prensa a diseñar
- Estudiar diversas alternativas de sistemas de control de temperaturas que permitan trabajar dentro de un rango específico de operación y que a su vez tengan un costo moderado.

RESUMEN

El desarrollo sistemático de nuevos y mejores materiales para aplicaciones de ingeniería ha obligado a que países en vías de desarrollo como el nuestro se involucren en la investigación sobre materiales compuestos. Mediante esta investigación se busca optimizar productos existentes, con el fin de adaptarlos a las necesidades específicas de una aplicación en particular.

El presente proyecto de titulación concibe el diseño de una Prensa Calefactora, desarrollada dentro de los requerimientos del Departamento de Materiales de la Escuela Politécnica Nacional, para la fabricación de láminas y planchas de materiales compuestos. Estos elementos se utilizarán para fabricar productos específicos y para obtener probetas para su posterior análisis, mediante ensayos mecánicos.

El trabajo detallado a continuación conduce a la definición de especificaciones de los diferentes sistemas de la máquina, estos son: sistema de compresión (capacidad de carga de 15 toneladas provista por un conjunto bomba manual-cilindro hidráulico), estructural (bastidor rígido de dos columnas) y de calentamiento (rango de temperatura de los platos calefactores de aluminio 300x300x25.4 mm³, de 25°C a 300°C, 220 VAC). Del mismo modo, se presenta en detalle el equipamiento y funcionamiento del resto de elementos constitutivos de todo el conjunto. El diseño se enfoca en obtener una máquina cuyo costo total sea menor al de equipos ya existentes en el mercado y cuya adaptabilidad sea mayor, con opción de utilizarla en otras aplicaciones mediante el reemplazo de algunos de sus componentes.

El capítulo 1 contiene una recopilación de aspectos generales referentes a los materiales compuestos, su composición, características especiales, etc. Posteriormente se detallan los criterios para la selección de un adecuado proceso de fabricación, y se indican los tipos de procesamiento de los materiales tanto termoplásticos como termoestables. Se ha brindado especial atención al moldeo por compresión. Finalmente se establecen los parámetros de prensado para el equipo a diseñar en base del análisis de datos bibliográficos para diferentes

materiales. Además se describen los diferentes tipos de prensas utilizados en el proceso de moldeo por compresión.

El capítulo 2 describe el proceso de selección de la alternativa adecuada para el diseño de la máquina. Presenta los diferentes sistemas de la máquina: compresión, calentamiento, estructural y control de temperatura, estableciendo por lo menos dos alternativas y seleccionando la mejor opción en base a los parámetros de evaluación definidos.

Los capítulos 3 y 4 hacen referencia al diseño del sistema calefactor y estructural, respectivamente. Cabe señalar que el sistema hidráulico para la compresión de las placas calefactoras fue seleccionado de catálogos comerciales en base a los parámetros previamente establecidos. Para el sistema calefactor se tomó en cuenta el análisis tanto en estado transitorio como en estado estable. El diseño del sistema estructural se basa en la resistencia de los elementos constituyentes de la prensa seleccionados, comprobándose en base a criterios del manual de construcción de la AISC. Se detallan además el diseño de elementos importantes como los tornillos de potencia utilizados y las soldaduras en las zonas críticas de la prensa. Finalmente el diseño se lo simula de manera global en el programa ALGOR V19 con el objetivo de garantizar el diseño de todos los elementos constituyentes de la prensa y garantizar su correcto funcionamiento.

Se presenta además un análisis de costos de los diferentes sistemas que conforman la máquina, luego de haber realizado la cotización de los mismos y presentado la mejor opción. En el último capítulo se dan las conclusiones extraídas durante la realización del presente diseño y además se enumeran algunas recomendaciones para posibles aplicaciones posteriores.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS

En la actualidad los ingenieros disponen de aproximadamente más de 80000 materiales diferentes para el diseño y fabricación de productos aplicables en diferentes campos. Estos materiales van desde aquellos ordinarios, usados desde hace varios cientos de años (como cobre, hierro fundido y latón), hasta materiales avanzados y recientemente desarrollados como compuestos, cerámicos y aceros de alto rendimiento. Dependiendo de sus características principales (como rigidez, dureza, densidad y temperatura de fusión), estos materiales pueden dividirse en cuatro grupos fundamentales: (1) Metales, (2) Plásticos, (3) Cerámicos, y (4) Compuestos. En este capítulo se dará una breve descripción de las características principales de los materiales compuestos.

1.1 MATERIALES COMPUESTOS¹

Los materiales compuestos han sido utilizados para resolver problemas tecnológicos durante mucho tiempo, pero solo desde los años sesenta empezaron a captar la atención de la industria, con la introducción de los compuestos poliméricos. Desde entonces los compuestos se han convertido en materiales comunes en el diseño y fabricación de productos para una gran variedad de aplicaciones en ingeniería, que incluyen componentes de automotores, partes espaciales, industria marítima, industria petrolera, etc.

El crecimiento en el uso de los materiales compuestos (composites) ocurrió debido a que se incrementó el conocimiento respecto a su desempeño y al aumento de la competencia del mercado global para el uso de componentes livianos. Entre todos los materiales, los compuestos tienen el potencial para reemplazar ampliamente al acero y al aluminio, muchas veces con un mejor desempeño. Se puede ahorrar entre un 60 y un 80% en peso cuando en un componente el acero es reemplazado por un compuesto. Si se reemplaza al aluminio, se puede ahorrar del 20 al 50% en peso.

1.2 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS¹

Un material compuesto puede definirse como la unión de dos o más materiales que se integran para dar una combinación única de propiedades. Esta definición de material compuesto es muy general y puede incluir aleaciones metálicas, copolímeros plásticos, minerales, y madera. Los compuestos reforzados difieren de los compuestos anteriores en que los materiales constitutivos son diferentes a nivel molecular y son mecánicamente separables. En forma general, los materiales constitutivos trabajan juntos pero permanecen en sus formas originales. Las propiedades finales de los compuestos son mejores que las propiedades de sus materiales constitutivos.

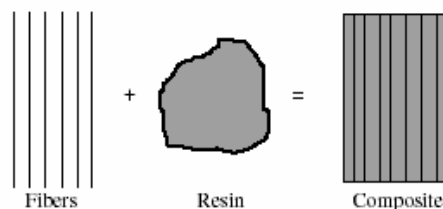


Figura 1.1. Formación de un compuesto por fibras y resina.¹

El concepto principal cuando se habla de un material compuesto es el de que éste está conformado por una matriz y uno o más materiales de refuerzo. Entre los compuestos más comunes están aquellos elaborados con fibras sintéticas integradas en una matriz, que es el material que las rodea y las fija, tal como se muestra en la Figura 1.1. En este trabajo la atención se centra en los casos en que la matriz está conformada por polímeros. Los refuerzos pueden ser fibras, partículas o filamentos, y los materiales de la matriz pueden ser metales, plásticos, o cerámicos. Los refuerzos pueden hacerse de polímeros, cerámicos y metales. Las fibras pueden ser continuas, largas o cortas. Los compuestos más utilizados son los de matriz polimérica reforzados con fibras de un material cerámico, como el carbono o el vidrio. Generalmente las fibras ocupan alrededor del 60% del volumen en los compuestos de este tipo.

Las propiedades de los compuestos reforzados con fibras dependen fundamentalmente de la orientación o la forma en que estén entretejidas las fibras en la matriz. Las fibras soportan la carga y su resistencia es mayor a lo largo del eje de la fibra. La forma de la fibra se selecciona dependiendo del tipo de aplicación (estructural o no estructural) y el método de fabricación.

1.3 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS COMPUESTOS

Los materiales compuestos son diseñados y fabricados para aplicaciones en que existen altas solicitaciones y es necesario mantener bajo el peso. Estos materiales ofrecen varias ventajas sobre los materiales de ingeniería tradicionales, las cuales se describen a continuación:

1. Brindan la posibilidad de integrar partes. Varios componentes metálicos pueden ser reemplazados por un solo componente compuesto.
2. Las estructuras compuestas proporcionan un mecanismo de monitoreo en línea con la ayuda de sensores. Esta característica se usa para supervisar el daño por fatiga en estructuras aeroespaciales o para supervisar el flujo de la resina en un proceso. Los materiales que incorporan sensores son conocidos como materiales inteligentes.
3. Poseen una rigidez específica alta. Alcanzan la rigidez del acero con un quinto del peso e igualan la rigidez del aluminio con la mitad del peso.
4. La resistencia específica (proporción de resistencia-a-densidad) de un material compuesto es muy alta, está en el rango de 3 a 5 veces la del acero y aleaciones de aluminio. Debido a esta rigidez y resistencia específica más altas, las partes compuestas son más ligeras que sus contrapartes.
5. Los materiales compuestos ofrecen una alta resistencia a la corrosión. El hierro y aluminio se corroen en presencia de agua o aire y requieren protección mediante revestimientos y aleaciones especiales. Debido a que la superficie exterior de los compuestos más usados se forma por plásticos, la resistencia a la corrosión y al ataque químico es muy buena.
6. Su utilización se incrementó debido a su flexibilidad durante el diseño. Por ejemplo, el coeficiente de expansión térmica (CTE) de estructuras hechas

de compuestos laminados puede hacerse cero seleccionando convenientemente los materiales y su secuencia de estratificación. Debido a que el CTE para los compuestos es mucho más bajo que para los metales, las estructuras compuestas proporcionan una estabilidad dimensional buena.

7. Pueden obtenerse productos con la forma final o una aproximada a la final. Esta característica permite eliminar varias operaciones de maquinado, reduciendo así los tiempos o ciclos de proceso y por ende los costos.
8. Se puede fabricar partes de apariencia complicada, con contornos especiales, y que a veces no son posibles de obtener usando metales, sin necesidad de soldar o remachar.
9. Permiten emplear una diversidad de técnicas de diseño durante la fabricación de componentes. Estas técnicas ayudan a minimizar el número de partes en un producto, así permiten reducir los tiempos de ensamblaje y unión.
10. Ofrecen una buena resistencia al impacto.
11. La capacidad de absorción o amortiguamiento de ruido y vibraciones es mejor en los materiales compuestos que en los metales.
12. Utilizando técnicas apropiadas de diseño y manufactura, se pueden fabricar partes compuestas de forma más rentable. Los compuestos ofrecen libertad en el diseño, permitiendo modular las propiedades principales y evitando así el sobre-diseño de los productos. Esto se logra cambiando parámetros tales como la orientación de las fibras, tipo de fibra, y/o sistemas de resina.
13. Pueden ser de baja toxicidad.
14. Los costos de las herramientas requeridas para procesar materiales compuestos son menores que los de las utilizadas para procesar metales. Esto se debe a los bajos requerimientos de presión y temperatura de los correspondientes procesos de fabricación. Los compuestos también brindan una gran flexibilidad para cambios en los diseños, lo cual es muy importante en un mercado competitivo donde la vida del producto se va reduciendo continuamente.

A pesar de presentar ventajas considerables sobre los materiales convencionales, los compuestos presentan algunos inconvenientes. Por ejemplo, los materiales compuestos de matriz polimérica y otros tienden a ser muy anisotrópicos. Es decir, su resistencia, rigidez y otras propiedades físicas y mecánicas son diferentes de acuerdo a la orientación del material.

1.4 MATERIAS PRIMAS PARA FABRICACIÓN DE PARTES¹

Cada método de manufactura utiliza un tipo específico de sistema de materiales para la fabricación de las partes. Esto se debe a que un determinado sistema de materiales pueden tener excelentes desempeños con un proceso de fabricación, pero para otros procesos no resultan tan convenientes.

Las materias primas para procesos de manufactura de compuestos de matriz polimérica se pueden dividir en dos grupos:

- Termoestables, son aquellos que una vez que solidificaron no pueden refundirse.
- Termoplásticos, estos materiales pueden refundirse o reformarse aun después de haber solidificado.

Los materiales termoestables y los termoplásticos tienen sus propias ventajas y desventajas en términos de procesabilidad, reciclabilidad, almacenamiento, costo y rendimiento. En todos los sistemas compuestos existen los refuerzos y las resinas, que son los dos ingredientes principales.

1.5 REFUERZOS EN FORMA DE FIBRA¹

Los refuerzos son constituyentes importantes de un compuesto ya que proporcionan la rigidez y la resistencia necesarias al material. Los refuerzos más comunes son: el vidrio, carbono, aramida y fibras de boro. Los diámetros más comunes de estas fibras se encuentran en un rango de entre 5 – 20 μm . Debido a que este diámetro es tan pequeño, la fibra es flexible y conforma con facilidad la forma requerida. En los compuestos, la resistencia y la rigidez son proporcionadas por las fibras. La matriz da la rigidez a la estructura y transfiere la carga a las fibras.

Las fibras utilizadas en los materiales compuestos pueden estar en muchas formas, tales como fibras continuas y discontinuas, fibras cortas y largas, fibras orgánicas e inorgánicas. Pero las fibras más ampliamente usadas en plásticos fibro-reforzados son las fibras de vidrio, puesto que son más baratas que otros tipos de fibra. Las fibras continuas son usadas para varios sistemas de resinas termoplásticas y termoestables. Las fibras cortas se usan para hacer moldeo por inyección y moldeo por compresión.

1.6 MATERIALES PARA LA MATRIZ¹

Los compuestos se fabrican reforzando el material que hace las veces de matriz con fibras. La matriz rodea las fibras y las protege del ataque químico y ambiental. Para que las fibras absorban la máxima carga, la matriz debe tener un módulo más bajo y una elongación mayor que los refuerzos. La selección de la matriz se la realiza basándose en los requerimientos químicos, térmicos, eléctricos, de inflamabilidad, rendimiento, costo y manufactura. La matriz determina la temperatura de servicio de los compuestos así como los parámetros de procesamiento para la manufactura de las partes.

1.6.1 RESINAS TERMOESTABLES

Los materiales termoestables no pueden ser reconvertidos o refundidos una vez que ya han sido curados o procesados debido a que estos materiales forman cadenas moleculares tridimensionales entrecruzadas (ver Figura 1.2). Esto hace que las moléculas pierdan flexibilidad y no puedan ser reprocesadas. Mientras mayor sea el número de entrecruzamientos, el material será más rígido y térmicamente estable. Los termoestables se pueden ablandar a temperaturas elevadas, lo cual a veces se usa para crear una curvatura o encorvar estructuras tubulares. Los termoestables son quebradizos, por lo que generalmente se los utiliza con algún refuerzo o relleno.

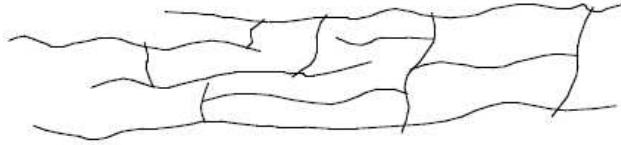


Figura 1.2. Entrecruzamiento de las moléculas de materiales termoestables.¹

Las resinas termoestables son de fácil procesabilidad, impregnación de fibra, poseen buena estabilidad térmica y dimensional, rigidez moderada y buena resistencia al ataque químico. Los termoestables comúnmente utilizados son los epóxicos, poliéster, viniléster, fenólicos y poliamidas.

EPÓXICOS

Los epóxicos son sistemas de resinas muy versátiles pues exhiben un amplio rango de propiedades. Así, muestran un bajo encogimiento y una excelente adherencia. Puesto que pueden formularse con otros materiales o pueden mezclarse con otros epóxicos, existen varias calidades de epóxicos con diferentes niveles de rendimiento aplicables para diferentes necesidades, como son en aplicaciones aeroespaciales y del género deportivo. Cambiando la formulación, las propiedades de los epóxicos pueden diferir; pueden ser cambiadas las temperaturas de procesamiento, los tiempos de ciclo, la compactabilidad, la dureza, y se puede mejorar la resistencia a la temperatura.

FENÓLICOS

Estos materiales de baja toxicidad son utilizados en las paredes interiores de los aviones, así como en otros campos, por su bajo costo y por ser resistentes a la llama. Los fenólicos son formados por la reacción de un fenol y un formaldehído, catalizados por un ácido o una base. Puede utilizarse úrea, resorcinol o melamina en lugar del fenol para obtener propiedades diferentes. Sus características de curado son diferentes a las de otras resinas termoestables como los epóxicos debido a que se genera agua durante esta reacción, misma que debe ser removida durante el proceso. Los fenólicos son generalmente oscuros y por ende se usan en aplicaciones donde el color no interesa, pero requieren de propiedades como:

- Resistencia a altas temperaturas
- Buenas propiedades eléctricas
- Alta resistencia al desgaste
- Resistencia al ataque químico y una estabilidad dimensional alta

Por su fácil procesabilidad y facilidad de maquinado, tolerancias estrechas y gran resistencia, son usados para fabricar partes de misiles y discos de freno.

POLIÉSTER

Los poliésteres son sistemas de resina económicos que ofrecen excelente resistencia a la corrosión, aunque sus temperaturas de operación son más bajas que las de los epóxicos. Los poliésteres pueden ser resinas termoplásticas o termoestables

VINILÉSTERES

Ofrecen una buena resistencia al ataque químico y a la corrosión. Por ende son de gran aplicación en la fabricación de tubería y tanques para la industria química. Son más baratos que los epóxicos y se usan en la industria automotriz y otras aplicaciones de alto volumen, donde el costo es crítico en la selección del material para la fabricación.

CIANATO ÉSTERES

Ofrecen excelente resistencia y tenacidad, poseen buenas propiedades eléctricas y un bajo nivel de absorción de humedad comparado con otras las resinas. Si son formulados correctamente, sus propiedades los hacen resistentes a altas temperaturas, tal como las resinas de poli-imida y bismalimida, son aplicados en naves espaciales, aviones, proyectiles.

BISMALIMIDA Y POLI-IMIDA

Son usados para aplicaciones de altas temperaturas en aviones, misiles y circuitos. Su temperatura de transición está en un rango de entre 550 y 600°F, considerando que algunas poli-imida sobrepasan los 700°F. Siendo estos valores mucho más altos que para los epóxicos y poliésteres, su poca aplicación se atribuye a que son difíciles de procesar. El inconveniente de este tipo de resina es

que presenta una dureza más baja que la de los epóxicos y tienen un mayor grado de absorción de humedad.

POLIURETANO

Son de amplia aplicación en la industria automotriz, para la fabricación de parachoques, capuchas, tableros, etc. Son económicos para la fabricación de capas resistentes al impacto.

1.6.2 RESINAS TERMOPLÁSTICAS

Los materiales termoplásticos son más dúctiles y más tenaces que las resinas termoestables y se usan para una amplia variedad de aplicaciones no estructurales sin necesidad de rellenos o refuerzos. Pueden fundirse calentándolos y solidifican al enfriarse, lo que les da la capacidad de reconformarse o reprocesarse. Las moléculas de los termoplásticos no se entrecruzan, por consiguiente son flexibles. Los termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos (Figura 1.3). En un termoplástico amorfo las moléculas se distribuyen al azar, mientras que en uno cristalino las moléculas se distribuyen en forma ordenada.

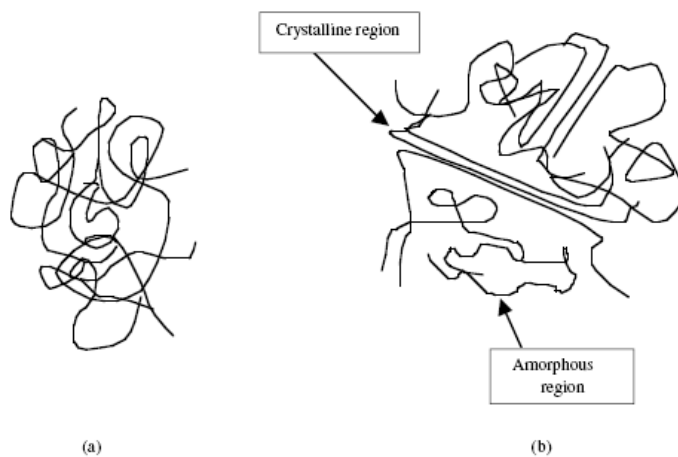


Figura 1.3. Disposiciones moleculares (a) amorfo (b) semicristalino¹

La baja rigidez y resistencia de los termoplásticos hace que para aplicaciones estructurales se requiera la utilización de rellenos o refuerzos. En comparación a los termoestables, estos materiales generalmente tienen una baja resistencia a la fluencia, especialmente a las altas temperaturas. Además son más susceptibles a los solventes en comparación con los termoestables. Generalmente los compuestos termoplásticos requieren de más altas temperaturas y presiones de conformado que los sistemas termoestables. Además, no poseen un nivel de integración de partes tan alto como el de los sistemas termoestables. Su alta viscosidad hace que algunos procesos de manufactura se vuelvan más difíciles.

NYLONS

También denominados poliamidas, se encuentran en una gran variedad incluyendo nylon 6, nylon 66, nylon 11, etc. Estos ofrecen una gran variedad de propiedades físicas y mecánicas y son considerados como plásticos de ingeniería. Proporcionan buenos acabados superficiales y lubricidad. Una consideración importante para los diseños con los nylons es que absorben la humedad y esto afecta las propiedades y la estabilidad dimensional de las partes. Los refuerzos de vidrio minimizan este problema y producen un material más fuerte y resistente al impacto. La resistencia al impacto de compuestos de nylon y vidrio es más alta que los materiales de ingeniería convencionales como el aluminio y el magnesio.

POLIPROPILENO (PP)

El polipropileno es de los materiales termoplásticos que más baja densidad tiene (0.9 g/cm^3), Posee una buena rigidez, resistencia, resistencia química y a la fatiga, es muy versátil y económico. Es usado fundamentalmente en la fabricación de partes de máquina, componentes de automóvil (tableros) y artículos para el hogar.

POLIETERETERCETONA (PEEK)

PEEK es una nueva generación de termoplásticos, que ofrece la posibilidad de uso a altas temperaturas. Los compuestos de PEEK reforzados con carbono han demostrado ser de gran utilidad en fuselajes, partes de satélites y otras varias estructuras aeroespaciales, pudiendo usarse continuamente a 250°C . Debido a su gran tolerancia a los daños, mejor resistencia a los solventes y resistencia a las

altas temperaturas, son de gran interés en la industria de la aviación. Tiene un porcentaje de absorción de agua que es casi 10 veces menor al de los epóxicos: 0.5% a temperatura ambiente, mientras que para epóxicos de calidad aeroespacial se tiene entre el 4 y el 5% de absorción de agua. La desventaja de este compuesto es su alto costo. La tenacidad es de 50 a 100 veces superior a la de los epóxicos. Es un material semi-cristalino con un máximo de cristalinidad del 48%.

POLIFENILENE SULFIDE (PPS)

Es un termoplástico de ingeniería con una cristalinidad del 65%. Proporciona temperaturas de servicio u operación continuas altas (225°C). En el mercado están disponibles preimpregnados adhesivos de PPS reforzado con los nombres comerciales como Ryton y Techtron. Estos son procesados a temperaturas de entre 300 y 345°C. Estos compuestos se usan para aplicaciones donde se requiere una gran resistencia mecánica y resistencia al ataque químico a elevadas temperaturas.

1.7 PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS¹

Los compuestos no presentan elevados requerimientos de presión y temperatura para el procesamiento de partes en comparación con el procesamiento de partes metálicas. Por esto, los elementos fabricados se obtienen con una forma aproximada a la final utilizando herramientas de bajo costo. Existen dos grandes beneficios al producir este tipo de partes. Primero, se minimiza el requerimiento de maquinado y su costo; segundo, se minimiza el desperdicio de material y se disminuyen los costos.

1.7.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN

Procesar es la ciencia de transformar los materiales de una forma a otra. Debido a que los compuestos involucran dos o más materiales diferentes, las técnicas de procesamiento usadas son muy diferentes a las utilizadas para procesar metales.

Por la variedad de técnicas disponibles para procesar los materiales, el ingeniero debe seleccionar la técnica y las condiciones adecuadas para realizar este trabajo a un bajo costo, para esto se debe tener un amplio conocimiento de las limitaciones y beneficios de cada proceso.

En la tabla 1 se presentan los criterios de selección para el proceso de fabricación de materiales compuestos. Entre los parámetros o criterios de selección se encuentran los siguientes:

Velocidad de producción, la cual depende de la aplicación y necesidad de mercado, siendo diferente para el mercado automotriz en comparación con el aeroespacial. Además, existen técnicas de procesamiento de compuestos convenientes para cada nivel de volumen de producción.

Costo, el cual depende básicamente de las herramientas utilizadas, mano de obra, materia prima, ciclo de procesamiento y ensamblaje.

Tamaño, el cual determina la selección del proceso de fabricación. En tamaños pequeños es necesaria la utilización de moldes, mientras que para tamaños grandes se utiliza el moldeo abierto.

TABLA 1.1. Criterios de selección para el proceso de fabricación.¹

Proceso	Velocidad de Producción	Costo	Resistencia	Tamaño	Forma	Materia Prima
Bobinado	Lento a rápido	Bajo a alto	Alta	Pequeño a grande	Asimétrica y cilíndrica	Fibras continuas con epóxicos y resinas de poliéster
Pultrusión	Rápido	Bajo a medio	Alta (solo en dirección longitudinal)	No tiene restricción en la longitud; tamaño pequeño a media de sección cruzada	Sección constante cruzada	Fibras continuas con poliéster y resinas de viniléster
Estratificación manual	Lento	Alto	Alta	Pequeño a grande	Simple a compleja	Preimpregnados con resinas epóxicas
Estratificación húmeda	Lento	Medio	Media a alta	Mediano a grande	Simple a compleja	Poliéster y resina epóxica
Aspersión	Medio a rápido	Bajo	Baja	Pequeño a mediano	Simple a compleja	Fibras cortas con resinas catalizadas
RTM (Moldeo por transferencia de resina)	Medio	Bajo a medio	Media	Pequeño a mediano	Simple a compleja	Prefabricados con viniléster y epóxicos
SRIM (Moldeo estructural por inyección y reacción)	Rápido	Bajo	Media	Pequeño a mediano	Simple a compleja	Prefabricados con resinas de polisocianuros
Moldeo por Compresión	Rápido	Bajo	Media	Pequeño a mediano	Simple a compleja	Compuestos para moldeo
Estampado	Rápido	Medio	Media	Mediano	Simple	Compuestos impregnados con termoplásticos
Moldeo por Inyección	Rápido	Bajo	Baja a media	Pequeño	Compleja	Pellets
Roll wrapping	Medio a rápido	Bajo a medio	Alta	Pequeño a mediano	Tubular	Preimpregnados

1.7.2 PASOS BÁSICOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE COMPUESTOS

En la fabricación de elementos hechos de compuestos existen cuatro pasos básicos: mojado/impregnación, estratificación, consolidación y solidificación. Todos los procesos de fabricación incluyen los mismos cuatro pasos, aunque estos son realizados de diferentes maneras.

Impregnación

En este paso, las fibras y resinas son mezcladas para formar una lámina. El objetivo de este paso es asegurar que la resina fluya a través de todas las fibras. Los principales parámetros que afectan el proceso de impregnación son la viscosidad, la tensión superficial y la capilaridad.

Estratificación

En este paso, los compuestos laminados son formados mediante la colocación de preimpregnados (o mezclas de fibras y resina) formando los ángulos deseados y en los lugares donde se necesitan. El espesor deseado se logra colocando varias capas de la mezcla de fibras y resina. El objetivo de este paso es conseguir una arquitectura o distribución deseada de las fibras de acuerdo al diseño. El desempeño de la estructura de un compuesto depende de la orientación de las fibras y la secuencia de estratificación de las capas.

Consolidación

Este paso implica la creación de un contacto íntimo entre cada lámina o capa de preimpregnado, y asegura que todo el aire atrapado entre capas sea removido durante el proceso. La consolidación es importante en la obtención de partes de buena calidad pues si no se la logra existirán porosidades. La consolidación de los compuestos de fibras continuas implica dos procesos importantes: flujo de resina a través del medio poroso y la deformación elástica de las fibras.

Durante el proceso de consolidación, la presión aplicada es compartida tanto por la resina como por la estructura de fibras. En un inicio, sin embargo, la presión

aplicada es soportada únicamente por la resina. Las fibras experimentan una deformación plástica cuando la presión se incrementa y la resina fluye hacia las fronteras.

Solidificación

El paso final es la solidificación, la cual puede tomar menos de un minuto para los termoplásticos, o más de 120 minutos para los termoestables. El vacío o la presión se mantienen durante este período. En compuestos termoestables, la tasa de solidificación depende de la formulación de la resina y la cinética del curado. Durante el curado se suministra calor para acelerar la tasa de curado de la resina. En resinas termoestables, usualmente mientras mayor es la temperatura de curado más rápido es el proceso de entrecruzamiento. En los termoplásticos en cambio no existe un cambio químico durante la solidificación y por lo tanto se requiere de menor tiempo.

1.8 MOLDEO POR COMPRESIÓN (COMPUESTOS TERMOESTABLES)¹

Los compuestos laminares de moldeo (SMC's por sus siglas en inglés) y los compuestos volumétricos de moldeo (BMC's) son los materiales base más comunes para el moldeo por compresión. El moldeo por compresión es popular en la industria automotriz debido a su similitud con el proceso de estampado. En el moldeo por compresión de SMC's el componente final es producido en una sola operación de moldeo. En cambio, en la operación de estampado, la lámina de metal avanza a través de varias series del proceso de estampado para obtener la forma final. Una de las ventajas de los SMC's sobre el acero radica en su facilidad de incluir nervaduras en una tercera dimensión. Agujeros, bordes y espesores no uniformes pueden ser creados durante el proceso de moldeo. Este proceso es utilizado para obtener superficies clase A. Para este tipo de superficies, el porcentaje total de fibras contenidas está limitado a un 30% para optimizar la suavidad superficial.

1.8.1 FABRICACIÓN DEL ELEMENTO

En la operación de moldeo por compresión, los SMC's se cortan en piezas rectangulares y se los ubica en la mitad inferior de un molde precalentado. Estas capas rectangulares se denominan carga. La carga usualmente cubre del 30 al 90% del área total; el área remanente es cubierta por el flujo de la carga.

La cantidad de carga se determina calculando el volumen final o peso de la pieza. El molde es cerrado mediante el desplazamiento de la mitad superior del molde a una cierta velocidad. Comúnmente, la velocidad de trabajo del molde es de 40 mm/s con SMC's y 80 mm/s con GMT's (termoplásticos reforzados con mats de fibra de vidrio). Los GMT's se fabrican utilizando fibra de vidrio y resinas termoplásticas tales como el polipropileno.

En el moldeo por compresión, los moldes son precalentados a aproximadamente 140°C. Con el movimiento del molde la carga empieza a fluir y llena la cavidad. El flujo del compuesto ocasiona la eliminación del aire atrapado tanto en el molde como en la carga. Después de alcanzar un grado razonable de curado bajo presión y calor, se abre el molde y se retira la parte.

Para secciones delgadas, la temperatura permanece uniforme a través del espesor de la parte y alcanza un valor similar al de la temperatura del molde. La temperatura constante a través de todo el espesor permite un curado uniforme en el elemento, evitando de este modo las tensiones residuales. Para secciones gruesas, la distribución de temperatura no es uniforme a través del espesor. En este tipo de secciones, la capa adyacente al molde alcanza rápidamente la temperatura de éste. Toma algún tiempo para que la capa del centro alcance la temperatura del molde debido a la baja conductividad térmica del material de carga.

El moldeo por compresión de SMC's puede presentar algunos defectos. Estos pueden ubicarse en la superficie exterior o pueden ser defectos internos tales como porosidades, ampollas y líneas soldadas. Las porosidades son ocasionadas por aire atrapado, mientras que las ampollas son grietas interlaminares formadas

al final del moldeo debido al exceso de presión de gas dentro de la parte moldeada.

Los moldes son contruidos tomando en cuenta el tipo de formulación del material que será usado en la elaboración de los elementos. Por esto es importante verificar el ajuste del elemento si la formulación del material cambia después que el molde sea maquinado.

1.8.2 DISEÑO DEL MOLDE

El moldeo por compresión comprende la operación en conjunto de dos moldes acoplados simultáneamente. La carga es colocada en la mitad inferior del molde previo al proceso. El aire atrapado y el exceso de resina escapan a través de la línea de separación de las dos mitades. El molde usualmente se lo fabrica en acero con recubrimiento de níquel o cromo para mejorar el acabado superficial del elemento moldeado y la resistencia al desgaste de molde. Las dos mitades del molde deben mantener un buen alineamiento y en lo posible minimizar las tolerancias del espesor del elemento moldeado. El diseño del molde es crítico y por lo tanto debe ser capaz de absorber el exceso de presión durante el moldeo sin ninguna deflexión apreciable. La presión de moldeo es de 2 a 30 MPa (290 a 4350 psi).

1.8.3 MÉTODOS PARA LA APLICACIÓN DE PRESIÓN Y CALOR

El calor necesario para el curado de la resina durante el moldeo por compresión es suministrado por el molde. Éste es usualmente precalentado alrededor de los 120 a 170°C. El calentamiento del molde se lo obtiene ya sea por circulación de vapor o por electricidad. La presión para un flujo uniforme del material de carga en la cavidad lo suministra el movimiento relativo de las dos mitades del molde. La mitad superior se mueve a una velocidad de 40 mm/s durante la operación.

1.8.4 VENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOESTABLES

- Facilidad de procesamiento debido al estado inicial líquido de la resina.
- Los requerimientos de presión y calor son menores en comparación con los de los termoplásticos.

- Un sistema simple de bajo costo puede ser utilizado para el procesamiento.

1.8.5 DESVENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOESTABLES

- Se requiere un mayor tiempo de curado.
- Una vez realizado el curado y solidificado el material, los elementos de compuestos termoestables no pueden adoptar nuevas formas.

1.9 PRENSADO EN CALIENTE (TERMOPLÁSTICOS)¹

En este proceso, denominado también moldeo por compresión de termoplásticos preimpregnados, los materiales se apilan y luego se sitúan entre los moldes calientes.

1.9.1 APLICACIONES PRINCIPALES

Se usa principalmente para moldear formas simples tales como láminas planas. No ha ganado mucha importancia comercial y se utiliza para fabricar partes de espesor constante.

1.9.2 MATERIAS PRIMAS BÁSICAS

Las principales materias primas usadas en este proceso son los preimpregnados termoplásticos (prepregs) hechos con fibras unidireccionales. Además se pueden utilizar plásticos tales como el polipropileno, el nylon, el PVC, entre otros.

1.9.3 HERRAMIENTAS

Los moldes utilizados en este proceso se fabrican con aceros inoxidable o aluminio. En el diseño del molde se debe considerar la contracción y la expansión. Es deseable tener el mismo coeficiente de expansión térmica entre el compuesto y los materiales de las herramientas cuando se fabrican partes con superficies contorneadas. El diseño del molde para este proceso es mucho más simple que el utilizado para moldeo por inyección ya que en este caso no se tiene que cortar los montantes pues el material crudo se inyecta directamente en el molde. El molde se lo coloca entre dos platinas calientes para formar el elemento.

1.9.4 FABRICACIÓN DE LAS PARTES

En el prensado en caliente las partes de compuesto se fabrican colocando preimpregnados en un molde, de modo que se cubra completamente la superficie de este. Los preimpregnados se cortan según los requerimientos de forma, tamaño y de ángulo formado por la fibra. Luego se apilan con la orientación de fibra deseada y se unen mediante soldadura de puntos. Esta soldadura se usa para evitar que los prepregs tengan movimiento relativo durante su manejo. Después de que los prepregs se colocan en la orientación deseada, las láminas se ubican dentro del molde, mismo que debe tener aplicado en su superficie algún agente que ayude a la fácil remoción de la parte moldeada. El molde es posteriormente cerrado y colocado entre las dos placas calientes del equipo de moldeo por compresión. Se aplica una presión ligera sobre el material hasta que se alcance la temperatura de fusión del mismo. Una vez que se ha llegado a la temperatura de equilibrio se aplica una presión de moldeo durante un tiempo específico y luego se la remueve para un prensado en frío. La presión se mantiene durante el enfriamiento hasta que la parte ha solidificado completamente. Algunos equipos de prensado en caliente poseen un sistema de enfriamiento, en cuyo caso el molde es enfriado sin necesidad de ser removido de la prensa. Luego de que se enfría el molde, este es abierto y la parte es removida.

Existen dos parámetros que proporcionan una buena solidificación de las partes: primero, se debe tener un contacto íntimo entre las capas adyacentes; segundo, se debe tener una temperatura y tiempo suficientes para que la auto-adhesión tenga lugar en la interface. Para crear un contacto íntimo se necesita remover el aire presente en la interface. Sin dos capas adyacentes físicamente en contacto el proceso de auto-adhesión no empezará. Los estudios revelan que una temperatura de entre 360 y 400°C proporciona una buena consolidación del material con una presión de 2 a 4 atm, y con un rango de tiempo de 5 a 30 min, esto incluye el tiempo en que el molde alcanza la temperatura de equilibrio.

1.9.5 MÉTODOS PARA APLICAR CALOR Y PRESIÓN

En este proceso el calor para procesar es aplicado colocando el molde entre dos placas calientes, las placas son calentadas eléctricamente. Se selecciona la temperatura deseada, las placas primero calientan el molde y luego el material del prepreg. La presión es aplicada moviendo la una placa contra la otra. Normalmente se mueve la placa inferior contra la superior, que se mantiene estacionaria. Se mantiene el calor y la presión según el ciclo del proceso recomendado por el fabricante o basado en la experiencia dada por los procesos de moldeo.

1.9.6 VENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS

- El ciclo de procesamiento es corto debido a que no existe reacción química, lo que permite utilizar estos materiales para métodos de producción de gran volumen.
- Los compuestos termoplásticos pueden ser reprocesados con la aplicación de presión y calor.

1.9.7 DESVENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS

- Se requiere de maquinaria robusta para su procesamiento.
- Los compuestos termoplásticos no son fáciles de procesar y algunas veces requieren de equipo sofisticado para la aplicación de presión y calor.

1.10 PARÁMETROS DE PRENSADO

Dependiendo del proceso de fabricación, se selecciona un material base adecuado el cual es colocado sobre el molde/herramienta. Luego se aplica calor y presión para transformar el material base a la forma final. Los requerimientos de calor, presión y temperatura son diferentes para cada sistema de materiales. En general, mientras más alta es la temperatura de fusión de un material, mayor es la temperatura y presión requeridas para el procesamiento. Los parámetros de prensado para la máquina son:

- Temperatura

- Presión
- Tiempo

TEMPERATURA

Durante el procesamiento de compuestos, las fibras no se funden y por ello el calor solo es requerido para una apropiada consolidación de la matriz. Los termoplásticos tienen temperaturas de fusión en el rango de 100 a 350°C y por tanto requieren menor flujo de calor y menor presión, comparados con el acero y el aluminio. La temperatura requerida para los termoestables depende de la formulación de la resina y del procedimiento de curado. Los termoestables están en estado líquido a temperatura ambiente y por tanto son fáciles de procesar. Estos materiales requieren calor para un rápido curado del material. A continuación se muestra una tabla que presenta diferentes rangos de temperatura máxima de servicio para termoplásticos y termoestables.

TABLA 1.2. Temperaturas máximas de uso para termoplásticos y termoestables.¹

Material	Temperatura máxima de uso continuo [°C]
TERMOESTABLES	
Viniléster	60 – 150
Poliéster	60 – 150
Fenólicos	70 – 150
Epóxico	80 – 215
Cianato ésteres	150 – 250
Bismaleimida	230 – 320
TERMOPLÁSTICOS	
Polietileno	50 – 80
Polipropileno	50 – 75
Acetal	70 – 95
Nylon	75 – 100
Poliéster	70 – 120
PPS	120 – 220
PEEK	120 – 250
Teflón	200 – 260

Las temperaturas de procesamiento mediante moldeo por compresión generalmente se encuentran en un rango de alrededor de 30°C por encima de las temperaturas de uso continuo. A continuación se presenta una tabla de valores típicos de temperatura de procesamiento.

TABLA 1.3. Temperaturas típicas de procesamiento.²

TERMOPLÁSTICOS	
Polímero	Temperatura [°C]
Cloruro de polivinilo	140 – 175
ABS	162 – 190
Acetales	200 – 245
TERMOESTABLES	
Fenólicos	143 – 193
Urea-melamina	149 – 171
Siliconas	177

De los datos obtenidos se establece que la temperatura máxima de operación de la prensa será de 300°C, con intervalos de 5°C.

PRESIÓN

La presión necesaria para procesar polímeros depende del tipo de material y las características a obtenerse. No existe una presión establecida para cada material, sin embargo existe un rango establecido de las comúnmente utilizadas para procesamiento de termoplásticos y de termoestables. Este rango se ha obtenido experimentalmente. A continuación se presenta una tabla de valores referenciales tanto para termoplásticos como termoestables. Cabe resaltar que el valor mostrado es el de la presión manométrica.

TABLA 1.4. Presiones típicas de procesamiento.²

TERMOPLÁSTICOS	
Polímero	Presión [psi]
Cloruro de polivinilo	500 – 2000
Celulósicos	500 – 5000
TERMOESTABLES	
Fenólicos	1500 – 5000
Úrea-melamina	2000 – 5000
Siliconas	1000 – 3000

De acuerdo a los datos recopilados, basados en datos bibliográficos y experimentales, se establece que el valor máximo de procesamiento es de 5000 psi. Por consiguiente, este valor de presión manométrica se considera como un parámetro de diseño.

TIEMPO

Este parámetro tiene una relación inversa con la temperatura. Esto es, a mayores temperaturas se requieren menores tiempos de prensado. Los rangos de variación de tiempo son amplios y pueden durar algunos minutos.

1.11 TIPOS DE PRENSAS PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN

Las prensas utilizadas para el proceso de moldeo por compresión deben cumplir con la condición de mantener la presión mientras dura el proceso. Las prensas que se utilizan para este requerimiento son: Hidráulicas, Neumáticas y Autoclaves.

1.11.1 PRENSAS HIDRÁULICAS

Las prensas hidráulicas se componen de un émbolo que se desplaza dentro de un cilindro, debido a la compresión del fluido de trabajo, que es obligado a circular por la acción de una bomba, la cual puede ser accionada de forma manual o mediante dispositivos eléctricos.

1.11.2 PRENSAS HIDRÁULICAS MANUALES

En este tipo de prensas los elementos constitutivos son: un marco rígido, un émbolo y cilindro hidráulico, dos placas acopladas sobre vigas que se mantienen rígidas y fuertemente unidas a las columnas. El cilindro hidráulico forma un solo cuerpo con la prensa. El accionamiento de la bomba se produce por la operación manual del usuario.

1.11.3 PRENSAS HIDRÁULICAS ELÉCTRICAS

El principio de funcionamiento y los elementos constitutivos de este tipo de prensas es similar al anterior. La diferencia radica en que el accionamiento de la bomba que impulsa el aceite se lo hace mediante un motor eléctrico.

1.11.4 PRENSAS NEUMÁTICAS

Las prensas neumáticas mantienen la misma estructura que las prensas hidráulicas, diferenciándose en que el pistón y el émbolo son accionados por aire a altas presiones. Para esto se requiere de la ayuda de un compresor de aire el cual acciona todo el sistema neumático.

1.11.5 AUTOCLAVE

Los autoclaves son una combinación de un sistema hidráulico y uno de calentamiento por vapor saturado. El primero proporciona la compresión del molde, mientras que el segundo actúa directamente sobre éste para calentarlo sin necesidad de utilizar placas calefactoras.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE LA PRENSA

La prensa calefactora a diseñar consta de varios sistemas, los cuales se muestran en la figura 2.1. Cabe señalar que la prensa además incluye un sistema de control de temperatura el cual será seleccionado luego de la evaluación de las alternativas planteadas.

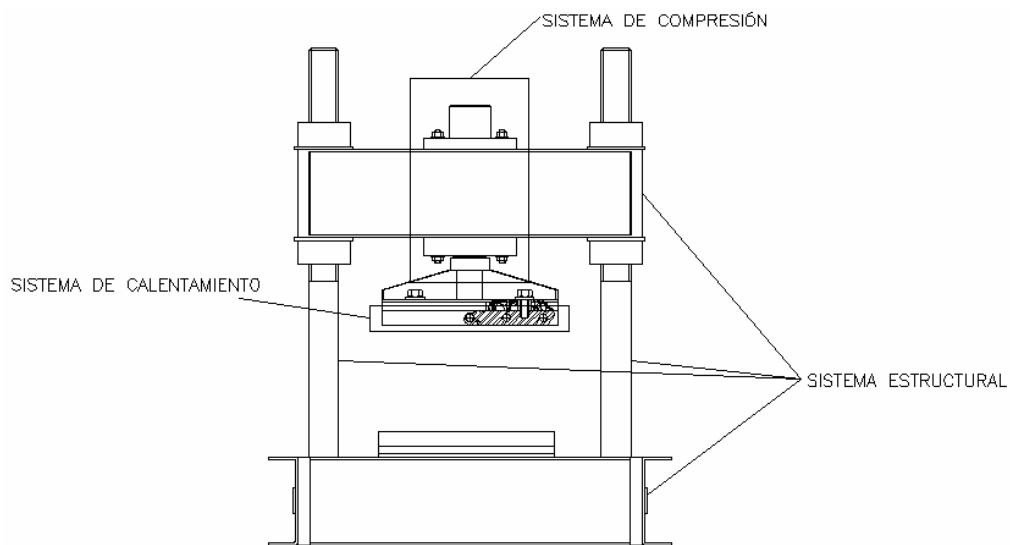


Figura 2.1. Esquema de la prensa con sus respectivos sistemas.

2.1 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Para realizar la selección adecuada de los sistemas constitutivos de la prensa se evaluará cada una de las alternativas descritas. Su evaluación y posterior selección dependen de un grupo de factores o parámetros. Se enumerará factores de orden técnico como son: funcionalidad, montaje, operación y control, mantenimiento y acoplamiento. Por otra parte, dentro del aspecto económico se tomarán en cuenta factores como: materias primas, procesos de fabricación y costos.

Los factores de evaluación presentados para cada alternativa planteada tendrán un valor de acuerdo a su importancia dentro del sistema. El factor costo es la sumatoria de los factores previamente descritos y su valor corresponderá al 100%, siendo este valor el ideal. La alternativa con el valor más cercano al ideal será la seleccionada.

2.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS POSIBLES

El presente análisis se lo realizará enfocándose a las alternativas de mayor importancia debido a que pueden presentarse varias posibles soluciones.

2.2.1 SISTEMA DE COMPRESIÓN

Se han tomado en cuenta dos alternativas principales, las que se analizarán comparativamente a continuación.

Sistema Hidráulico Manual con Gato Botella Industrial

Este sistema consta de un pistón o émbolo provisto de una barra tipo tubo multietápico, la cual es empujada sucesivamente conforme se va aplicando aceite a presión al cilindro. Esto permite desplazar el plato de compresión. El sistema va acoplado directamente al bastidor.



Figura 2.2. Ejemplos de gato botella industrial.

Ventajas:

- El uso de un pistón hidráulico permite una fácil operación por lo reducido de sus pesos y dimensiones.
- El fluido de trabajo, en este caso aceite hidráulico, permite la constante lubricación del sistema evitando así el desgaste del mismo.
- Su sistema de operación es relativamente simple, proporcionado por una válvula de paso que permite que el aceite fluya en el sistema desplazando el émbolo y logrando así el movimiento deseado.
- Bajo costo del sistema.

Desventajas:

- Posición de uso limitada, (solo se puede utilizar la botella industrial en posición vertical, con el cilindro ascendente).
- Menor desplazamiento del émbolo por accionamiento del gato botella industrial en comparación al conjunto cilindro - bomba manual.
- Para el accionamiento del gato botella industrial el operario debe encontrarse cerca de la zona de trabajo.

Eliminado: ,

Sistema Hidráulico con Bomba y Cilindro de Simple Acción

Este sistema es similar al anterior, con la diferencia de que las capacidades de carga son superiores a las del gato hidráulico debido a la configuración del sistema.



Figura 2.3. Bomba y cilindro de simple acción.

Ventajas:

- Permite la utilización del cilindro en diferentes posiciones (vertical ascendente, vertical descendente y horizontal) lo que facilita diferentes

tipos de configuración del sistema.

- Mayor recorrido del pistón por accionamiento de la bomba.
- Permite el cambio de velocidad de accionamiento.
- Permite que el operario se mantenga alejado de la zona de peligro debido a que la instalación se encuentra a mayor distancia.
- Permite la automatización del sistema mediante la adición de una bomba eléctrica utilizando el mismo tipo de cilindro.

Desventaja:

- Costo elevado en comparación con el sistema anterior.

2.2.2 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Se utiliza placas calefactoras para el calentamiento de los moldes, tanto para prensas hidráulicas manuales, hidráulicas eléctricas o neumáticas a excepción de los autoclaves. Debido a las exigencias de temperatura de entre 100 y 300°C se pueden utilizar varias alternativas para calentar el molde. Estas pueden ser: resistencias eléctricas, vapor sobrecalentado o aceite calentado. A continuación se presentan diferentes alternativas para el calentamiento de las placas de compresión, analizando sus ventajas y desventajas.

Calentamiento por resistencias eléctricas

El calentamiento de las placas se lo realiza mediante el acoplamiento de resistencias eléctricas insertadas en agujeros realizados en éstas. Generalmente estas resistencias se conectan a una fuente de 220 V

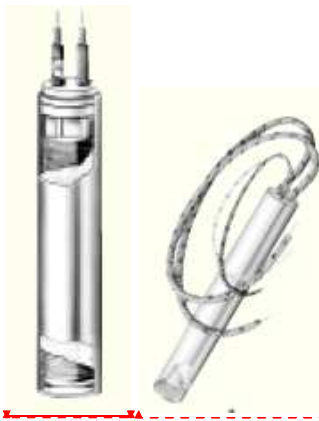
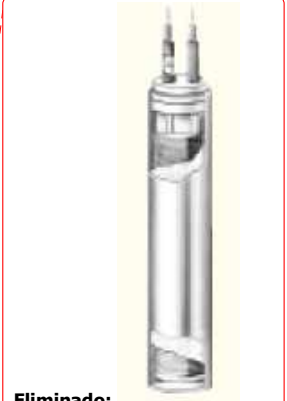


Figura 2.4. Resistencias eléctricas tipo cartucho.

Eliminado: <sp>

Con formato: Fuente: (Predeterminado) Arial, Español (Ecuador)



Eliminado:

Con formato: Español (Ecuador)

Con formato: Fuente: (Predeterminado) Arial, Español (Ecuador)

Ventajas:

- Facilidad de instalación.
- No requiere de equipos ni aditamentos adicionales.
- Costo del sistema relativamente bajo.

Desventajas:

- Para procesos de producción a gran escala el costo de energía es relativamente alto, aunque este no es el caso en situaciones experimentales.

Calentamiento con vapor sobrecalentado

Este sistema de calentamiento requiere que las placas calefactores sean fundidas o maquinadas de tal manera que permita la circulación de vapor a través de ellas. Este vapor se lo obtiene de un caldero.

Ventajas:

- Permite obtener similares condiciones de temperatura en procesos de producción donde se requieran de varias prensas, disminuyendo los costos y simplificando la operación.

Desventajas:

- Elevada inversión inicial en las instalaciones pues se requiere de un caldero que cumpla con ciertas especificaciones para conseguir el vapor en condiciones óptimas.
- Implementación de instalaciones adecuadas para la conducción del vapor, lo que representa un costo adicional.

2.2.3 CONFIGURACIÓN DEL BASTIDOR

Se presentan tres diferentes tipos de bastidor, cada uno de los cuales se analizará a continuación.

Bastidor Rígido Fijo

Este tipo de bastidor se denomina “cuello de cisne” o bastidor tipo C. Está formado por dos piezas robustas de gran resistencia y tamaño. Debido a la excentricidad que existe entre la línea de acción de la fuerza y el centro de

gravidad del bastidor, éste soporta grandes esfuerzos de flexión en la garganta, por lo cual debe tener una alta rigidez para evitar excesivas deflexiones. La mesa de compresión generalmente se encuentra fija al bastidor, lo que restringe su funcionalidad.

Ventajas:

- Soporta cargas elevadas.
- Estructura compacta.

Desventajas:

- No permite regular la distancia de acuerdo al tamaño del molde.
- Dificultad en la reparación y mantenimiento por la configuración de su estructura.

Bastidor Rígido de Dos Columnas

Como su nombre lo indica, este tipo de bastidor está constituido por dos columnas que están rígidamente acopladas sobre la base de la prensa. Estas columnas sirven de guías a la viga de acople del sistema de compresión. Este tipo de estructura requiere una menor robustez puesto que permite distribuir la carga en la misma línea de acción.



Figura 2.5. Bastidor rígido de dos columnas.

Ventajas:

- Permite regular la distancia entre placas en función del tamaño del molde.

- Proporciona un mayor espacio libre en las placas y menores obstáculos para el operador de la prensa.
- Da la posibilidad de variar sus elementos constitutivos (especialmente las columnas), por elementos cilíndricos o perfiles estructurales dependiendo del rango de desplazamiento de la viga, según la aplicación que vaya a tener la prensa.

Desventajas:

- Su configuración estructural no permite la operación con cargas relativamente altas en comparación con otros tipos de estructura.

Bastidor con Cuatro Montantes Fijos

Los montantes pueden ser fabricados de perfiles estructurales o perfiles en plancha. Este tipo de prensa es de gran aplicación en el campo industrial. Su estructura es más robusta, por ende el espacio para la instalación y operación es mayor.

Eliminado: s

Ventajas:

- Su configuración estructural permite soportar cargas superiores que el bastidor de dos columnas y ligeramente inferiores al rígido fijo.

Desventajas:

- Debido a la robustez de la máquina, se requiere de mayor espacio libre para su instalación.
- Disminuye el espacio de operación de la prensa y dificulta la colocación de los moldes.
- Costo de fabricación y diseño más elevado en comparación a los anteriores.



Figura 2.6. Bastidor con cuatro montantes fijos.

2.2.4 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Reóstato y termocupla

Este sistema consta de un reóstato de pasos fijos, el cual permite seleccionar la temperatura de trabajo de acuerdo con una señal enviada por una termocupla.



Figura 2.7. Reóstato.

Ventajas:

- Bajos costos de implementación y mantenimiento.

Desventajas:

- Este control de temperatura no permite una variación pequeña de rangos.
- Existe una alta tasa de pérdidas de energía en forma de calor.
- No permite automatizar el sistema.

Termostato Electrónico

Está provisto de un dispositivo electrónico para la regulación de la temperatura de

un medio a través de una sonda semiconductor a larga distancia. Esta sonda transmite la señal de la temperatura medida al circuito electrónico, el cual actúa sobre un relé conmutador hacia el dispositivo que puede influir en dicha temperatura, que pueden ser por ejemplo: resistencia eléctrica, bomba, válvula, caldera, quemador, etc.



Figura 2.8. Termostato electrónico (controlador de temperatura)

Ventajas:

- El termostato es ajustable dependiendo del tipo de trabajo a realizar ya sea calentamiento o enfriamiento.
- El regulador está concebido para su intervención libre de polo, es decir, para el circuito de regulación se puede usar cualquier tensión (igual o inferior a 250 V), sea alterna o continua.
- La medición de la temperatura se puede hacer a larga distancia.
- Las sondas semiconductoras son intercambiables y garantizan alta calidad de funcionamiento.
- Facilidad de acoplamiento con otros sistemas.

Desventaja:

- Precio relativamente **alto** en comparación con el sistema anterior.

Eliminado: superior

2.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para la selección de las alternativas se elabora una tabla con los parámetros más importantes a considerar. La calificación se evalúa de acuerdo a un peso que se le da a estos parámetros según su influencia en el **diseño**. La de mayor puntuación es la seleccionada.

Eliminado: proyecto

SISTEMA DE COMPRESIÓN

Factor	Alternativa 1 Manual/Gato Industrial	Alternativa 2 Manual/Bomba- Cilindro	Alternativa Ideal
Capacidad de carga	25	25	30
Operación y Control	20	25	30
Mantenimiento	8	7	10
Acoplamiento	5	8	10
Versatilidad	10	17	20
Costo	68	82	100
Evaluación	136	164	200
Selección		X	

SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Factor	Alternativa 1 Resistencias Eléctricas	Alternativa 2 Vapor Sobrecalentado	Alternativa Ideal
Operación y Control	29	23	30
Instalación	29	20	30
Velocidad de Respuesta	15	10	20
Mantenimiento	15	10	20
Costo	88	63	100
Evaluación	176	126	200
Selección	X		

CONFIGURACIÓN DEL BASTIDOR

Factor	Alternativa 1 Rígido Fijo	Alternativa 2 Rígido de Dos Columnas	Alternativa 3 4 Montantes Fijos	Alternativa Ideal
Capacidad de carga	17	15	18	20
Funcionalidad	20	23	20	25
Regulación (mesa)	17	24	24	25
Mantenimiento	7	9	8	10
Mat. Prima y procesos de fabricación	15	15	15	20
Costo	76	86	85	100
Evaluación	152	172	170	200
Selección		X		

CONTROL DE TEMPERATURA

Factor	Alternativa 1 Reóstato y Termocupla	Alternativa 2 Reóstato Electrónico	Alternativa Ideal
Perdidas de energía	15	25	30
Funcionalidad	20	25	30
Variabilidad de rangos	10	18	20
Mantenimiento	15	15	20
Costo	60	83	100
Evaluación	120	166	200
Selección		X	

Por el análisis expuesto, la alternativa idónea de la prensa para el proceso de moldeo por compresión se compone de los siguientes sistemas: Sistema de compresión con conjunto bomba y cilindro hidráulico, sistema de calentamiento con resistencias eléctricas, bastidor rígido de dos columnas y un sistema de control de temperatura eléctrico.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA CALEFACTOR DE LA MÁQUINA

El presente capítulo muestra los cálculos necesarios para calentar un plato de aluminio de 300x300x25.4 mm³. Estas medidas se escogieron con miras a la producción de diversos tipos de elementos moldeados, y a que se desea fabricar láminas y planchas a partir de las cuales se obtendrán probetas estandarizadas para practicar ensayos mecánicos.

3.1 DISEÑO DE LAS PLACAS CALEFACTORAS

El presente análisis se lo realiza con el fin de determinar la energía necesaria para realizar el calentamiento de los platos desde la temperatura ambiente hasta una temperatura aproximada de 300°C, tomando como referencia los rangos de temperatura de procesamiento de los compuestos dada en el Capítulo 1.

Para garantizar una buena conductividad térmica en las placas calefactoras se utilizará planchas de aluminio. El espesor de estas planchas dependerá del diámetro de los elementos calefactores (resistencias eléctricas) alojados en su interior, y de la disponibilidad en el mercado de estos elementos.

Para efectos de cálculo, el análisis de la transferencia de calor del proceso de prensado se lo dividirá en balance de energía en estado transitorio y balance de energía en estado estable.

3.2 ANÁLISIS EN ESTADO TRANSITORIO

En este análisis se determina la energía necesaria en un tiempo establecido para calentar a los platos de aluminio desde una temperatura ambiente de 25°C hasta una máxima de trabajo de 300°C considerada para el presente diseño.

El balance de energía se lo realiza en el siguiente volumen de control

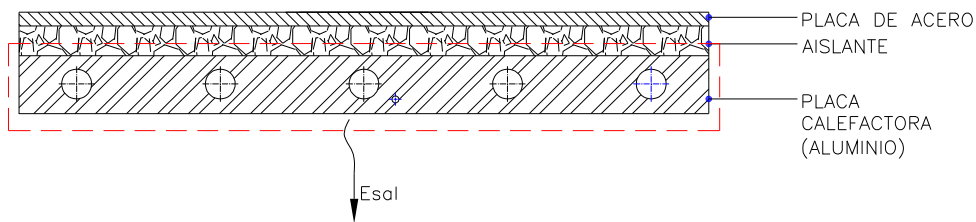


Figura 3.1. Volumen de control para el análisis en estado transitorio.

$$E_g = E_{sal} + E_{alm} \quad (3.1)$$

Donde:

E_g = energía generada [W]

E_{sal} = energía perdida [W]

E_{alm} = energía almacenada en los platos [W/h]

Energía almacenada en los platos de aluminio.

$$E_{alm} = m \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

Donde:

m = masa del plato de aluminio [kg]

c_p = calor específico del plato [W/kg°C]

$\frac{\partial T}{\partial t}$ = variación de la temperatura respecto al tiempo [°C/h]

Las propiedades del aluminio son:³

$$c_p = 0.243 \text{ [Wh/kg°C]}$$

$$\rho = 2770 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

Con formato: Inglés (Estados Unidos)

La masa del plato de aluminio se calcula:

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = \rho \cdot \left(a^2 e - n\pi \cdot \frac{d^2}{4} a \right)$$

Donde:

V = volumen del plato [m^3]
 ρ = densidad del aluminio [kg/m^3]
 a = lado de la superficie cuadrada del plato [m]
 e = espesor del plato [m]
 n = número de resistencias
 d = diámetro del agujero [m]

$$m = 2770 \cdot \left(0.3^2 \cdot 0.0254 - 5\pi \cdot \frac{0.012^2}{4} \cdot 0.3 \right)$$

$$m = 5.86 \text{ kg}$$

Por lo tanto la energía almacenada:

$$E_{alm} = 5.86 \cdot 0.243 \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$E_{alm} = 1.42 \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Pérdidas de Energía

$$E_{sal} = q_{conv} + q_{rad} \quad (3.3)$$

Calor perdido por convección

$$q_{conv} = q_{conv(S)} + q_{conv(L)} \quad (3.4)$$

Donde:

q_{conv} = calor total perdido por convección.

$q_{conv(S)}$ = calor perdido por convección parte superior del plato.

$q_{conv(L)}$ = calor perdido por convección parte lateral del plato.

El cálculo del calor perdido por convección en la parte superior del plato se lo calcula de la siguiente manera:

$$q_{conv(S)} = h_s \cdot A_s \cdot \Delta T$$

$$q_{conv(S)} = h_s \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.5)$$

Donde:

h_s = coeficiente de convección de la pared horizontal [W/m^2K]

A_s = área superior del plato [m^2]

T_s = Temperatura superficial del plato [K]

T_∞ = Temperatura del aire [K]

$$A_s = a^2$$
$$A_s = 0.3^2 = 0.09m^2$$

El coeficiente de convección asociado entre el plato de aluminio (pared horizontal) y el aire se calcula con la ecuación:

$$h_s = \frac{k_{aire}}{L_c} \cdot \overline{Nu}_{L(s)} \quad (3.6)$$

Donde:

k_{aire} = conductividad térmica del aire [W/mK]

L_c = longitud característica [m]

\overline{Nu}_L = número de Nusselt

Las propiedades se evalúan a la temperatura de película:

$$T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$
$$T_p = \frac{573.15 + 298.15}{2}$$
$$T_p = 435.65 \text{ } ^\circ K$$

Para la longitud característica se tiene la siguiente ecuación:

$$L_c = \frac{A_s}{P}$$
$$L_c = \frac{a^2}{4a} = 0.075 \text{ m}$$

Se determina si la convección se da en flujo laminar, a través del cálculo del número de Rayleigh. Para $Ra_{L(s)} \leq 10^7$ se cumplirá con la condición indicada.

$$Ra_{L(s)} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) L_c^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (3.7)$$

Donde:

g = gravedad [m/s^2]

$\beta = 1/T_p$ [$^{\circ}K^{-1}$]

α = coeficiente de difusividad térmica [m^2/s]

ν = viscosidad cinemática [m^2/s]

$$Ra_{L(S)} = 1.9 \cdot 10^6 < 10^7$$

Por lo tanto se procede a calcular el número de Nusselt con la siguiente fórmula:

Placa superior

$$\begin{aligned}\overline{Nu}_{L(S)} &= 0.27 Ra_L^{1/4} \\ \overline{Nu}_{L(S)} &= 10.03\end{aligned}\tag{3.8}$$

Obteniendo el siguiente coeficiente de convección:

$$\begin{aligned}h_S &= \frac{k_{aire}}{L_c} \cdot \overline{Nu}_{L(S)} \\ h_S &= 3.64 \text{ [W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{K]}\end{aligned}$$

Para la placa inferior la fórmula se modifica de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\overline{Nu}_{L(S)} &= 0.54 Ra_L^{1/4} \\ \overline{Nu}_{L(S)} &= 20.07\end{aligned}\tag{3.9}$$

El coeficiente de convección será el siguiente:

$$\begin{aligned}h_S &= \frac{k_{aire}}{L_c} \cdot \overline{Nu}_{L(S)} \\ h_S &= 9.71 \text{ [W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{K]}\end{aligned}$$

Se escoge el mayor coeficiente de convección. Reemplazando su valor en la ecuación 3.5 se tiene:

$$q_{conv(S)} = 0.87(T_s - T_{\infty}) \text{ [W]}$$

El cálculo del calor perdido a través de la cara lateral se lo realiza de la siguiente manera:

$$q_{conv(L)} = h_L \cdot A_L \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.10)$$

Donde:

h_L = coeficiente de convección de la pared vertical [W/m²·K]

A_L = área lateral del plato [m²]

El coeficiente de convección asociado entre el plato de aluminio (pared vertical) y el aire se calcula con la ecuación:

$$h_L = \frac{k_{aire}}{L_c} \cdot \overline{Nu}_{L(L)} \quad (3.11)$$

La longitud característica es igual al espesor del plato de aluminio porque se considera como pared vertical³.

$$L_c = e = 0.0254 \text{ m}$$

Se determina si la convección se da en flujo laminar, a través del cálculo del número de Rayleigh. Para $Ra_{L(L)} \leq 10^9$ se cumplirá con la condición indicada.

$$Ra_{L(L)} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) L_c^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (3.12)$$

Donde:

g = gravedad [m/s²]

$\beta = 1/T_f$ [°K⁻¹]

α = coeficiente de difusividad térmica [m²/s]

ν = viscosidad cinemática [m²/s]

$$Ra_{L(L)} = 7.4 \cdot 10^4 < 10^9$$

Por lo tanto se procede a calcular el número de Nusselt con la siguiente ecuación:

$$\overline{Nu}_{L(L)} = 0.68 + \frac{0.67 \cdot (Ra_{L(L)})^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (3.13)$$

$$\overline{Nu}_{L(L)} = 9.13$$

El coeficiente de convección será el siguiente:

$$h_L = 13.05 \text{ [W/m}^2\text{°K]}$$

El calor perdido por las caras laterales será:

$$q_{conv(L)} = 0.39(T_s - T_\infty) \text{ [W]}$$

Por lo tanto el calor total perdido por convección es:

$$q_{conv} = q_{conv(S)} + q_{conv(L)}$$

$$q_{conv} = 1.26(T_s - T_\infty) \text{ [W]}$$

Calor perdido por Radiación

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_T \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad (3.14)$$

Donde:

ε = emisividad del aluminio a temperatura ambiente.

σ = constante de Stefan – Boltzmann

T_s = Temperatura superficial

T_a = Temperatura de los alrededores

A_T = área superficial del plato de aluminio.

Los valores correspondientes son los siguientes:

$$\varepsilon = 0.04$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$T_s = 573.15 \text{ K}$$

$$T_a = T_\infty = 298.15 \text{ K (*se asume una variación mínima de temperatura entre el ambiente y los alrededores)}$$

$$A_T = a^2 + 4ae$$

El coeficiente de radiación superficial se calcula mediante un balance de energía de la siguiente manera:

$$h_{rad} A_T (T_s - T_a) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_T (T_s^4 - T_a^4)$$

$$h_{rad} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_a^4)}{(T_s - T_a)}$$

$$h_{rad} = 0.82 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

El calor perdido por radiación se lo calcula con la siguiente fórmula:

$q_{rad} = h_{rad} A_T (T_s - T_a)$, por lo tanto su valor es:

$$q_{rad} = 0.098 (T_s - T_a) \text{ [W]}$$

Las pérdidas de energía son:

$$E_{sal} = 1.26 \cdot (T_s - T_a) + 0.098 \cdot (T_s - T_a)$$

Entonces la energía necesaria para calentar los platos de aluminio adopta la siguiente expresión:

$$E_g = E_{alm} + E_{sal}$$

$$E_g = 1.42 \frac{\partial T}{\partial t} + 1.26(T_s - T_a) + 0.098(T_s - T_a)$$

Simplificado los términos:

$$E_g = 1.42 \frac{dT_s}{d\theta} + 1.358(T_s - T_a) \quad (3.15)$$

Se procede a resolver la ecuación diferencial obtenida para determinar el tiempo necesario para que los platos calefactores alcancen la temperatura de trabajo

$$T_s = \frac{E_g + 0.098 \cdot T_a}{\frac{1.42}{0.098}} + C_1 e^{-\frac{0.098}{1.42} \theta} \quad (3.16)$$

La constante C_1 se la calcula aplicando las condiciones de borde:

$$\theta = 0 \text{ h, } T = 298 \text{ °K}$$

Por lo tanto tiene el siguiente valor:

$$C_1 = -\frac{E_g}{0.098}$$

Reemplazando en la ecuación (3.16):

$$T_s = \frac{E_g \cdot \left(1 - e^{-\frac{0.098}{1.42} \theta}\right)}{0.098} + T_a$$

Considerando que la temperatura máxima de trabajo es de 300°C y la temperatura de los alrededores es de 25°C, se evalúa la expresión anterior a diferentes tiempos. El objetivo es determinar la cantidad de energía necesaria entregada a los platos para un tiempo preestablecido de calentamiento.

T [h]	t [min]	E _g [W]
0.08	5	4895
0.10	6	3919
0.12	7	3268
0.13	8	3017
0.15	9	2617
0.17	10	2311

3.3 ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE

El análisis se realiza una vez que los platos calefactores han alcanzado la temperatura de trabajo requerida y se está prensando el material. El material utilizado para efecto de cálculo es fibra de vidrio reforzada (BMC)⁹, ya que posee la mayor densidad y calor específico y es factible de procesarlo por compresión.

$$E'_g = E'_{sal} + E'_{alm}$$

Energía absorbida por el compuesto

$$E'_{alm} = m_c \cdot c_{pc} \cdot \frac{dT}{d\theta}$$

m_c = masa del compuesto [kg]

c_{pc} = calor específico del compuesto [W.h/kg°C]

$\frac{dT}{d\theta}$ = variación de la temperatura respecto al tiempo

$$m_c = e \cdot A_p \cdot \rho$$

e = espesor de la probeta [m]

A_p = área de prensado de la lámina de compuesto [m²]

ρ = densidad del compuesto [kg/m³]

$e = 0.005$ [m]

$c_{pc} = 0.42$ [Wh/kg°C]

$\rho = 2000$ [kg/m³]

$$A_p = a_1 \cdot a_1$$

Donde

a_1 = lado del molde

$$A_p = 0.0625 \text{ m}^2$$

Entonces

$$m_c = 0.625 \text{ kg}$$

Por lo tanto

$$E'_{alm} = 0.263 \frac{dT}{d\theta}$$

Energía perdida por Convección y Radiación

Pérdidas de calor por convección

$$E'_{sal} = q'_{conv} + q'_{rad}$$

$$q'_{conv} = q'_{conv(S)} + q'_{conv(L)}$$

$q'_{conv(t)}$ = energía perdida por convección parte superior del plato [W]

$q'_{conv(L)}$ = energía perdida por convección parte lateral del plato [W]

$$q'_{conv(S)} = h'_s \cdot A'_s \cdot \Delta T'$$

$$q'_{conv(S)} = h'_s \cdot A'_s \cdot (T_s - T_\infty)$$

h'_s = coeficiente de convección de la pared horizontal [W/m²°K]

A'_s = área superior del plato sin el área del molde [m²]

T_s = Temperatura superficial del plato [K]

$T_\infty = T_a$ = Temperatura del aire [K]

$$A'_s = a^2 - A_p$$

$$A'_s = 0.0275 \text{ m}^2$$

El valor del lado equivalente correspondiente a esta área es $a_1 = 0.165$ [m]

$$h'_s = \frac{k_{\text{aire}}}{L'_c} \cdot \overline{Nu}_{L(S)}$$

k_{aire} = conductividad térmica del aire [W/m°K]

L'_c = longitud característica [m]

$\overline{Nu}_{L(S)}$ = número de Nusselt

Las propiedades se evalúan a la temperatura de película:

$$T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

$$T_p = \frac{573.15 + 298.15}{2}$$

$$T_p = 435.65 \text{ °K}$$

La longitud característica se calcula con la siguiente fórmula:

$$L'_c = \frac{A'_s}{P}$$

$$L'_c = 4.16 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$Ra_{L(S)} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) L_c^3}{\alpha \cdot \nu}$$

$$Ra_{L(S)} = 0.32 \cdot 10^6 < 10^7$$

$$\overline{Nu}_{L(S)} = 0.27 Ra_{L(S)}^{1/4}$$

$$\overline{Nu}_{L(S)} = 6.46$$

$$h_{S'} = \frac{k_{aire}}{L_c} \cdot \overline{Nu}_{L(S')}$$

$$h_{S'} = 5.64 \text{ [W/m}^2\text{°K]}$$

$$q'_{conv(S)} = 0.155 \cdot (T_s - T_\infty) \text{ [W]}$$

El coeficiente de convección de la pared vertical $h_{L'}$ [W/m²°K] se lo calcula de manera similar que en el estado transitorio. Se tiene entonces

$$h_{L'} = 13.05 \text{ [W/m}^2\text{°K]}$$

$$q'_{conv(L)} = h_{L'} \cdot A_{L'} \cdot (T_s - T_\infty)$$

$$A_{L'} = 4 \cdot a \cdot e$$

$$q'_{conv(L)} = 0.397 \cdot (T_s - T_\infty) \text{ [W]}$$

Por lo tanto:

$$q'_{conv} = q'_{conv(S)} + q'_{conv(L)}$$

$$q'_{conv} = 0.55 \cdot (T_s - T_\infty) \text{ [W]}$$

Pérdidas de calor por radiación

El coeficiente de radiación superficial es el mismo que en el estado transitorio:

$$h'_{rad} = 0.82 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

$$A_T' = A_S' + A_L'$$

$$A_T' = 0.058 \text{ m}^2$$

$$q'_{rad} = h'_{rad} A_T' (T_s - T_a)$$

$$q'_{rad} = 0.047 (T_s - T_a) \text{ [W]}$$

$$E'_{sal} = q'_{conv} + q'_{rad}$$

$$E'_{sal} = 0.597 \cdot (T_s - T_a)$$

Cuando las planchas se encuentran abiertas, las pérdidas de calor por convección y radiación se realizan en un área mayor, de forma similar al estado transitorio.

$$E_{sal} = 1.26 \cdot (T_s - T_a) + 0.098 \cdot (T_s - T_a)$$

La energía total perdida en los alrededores cuando la máquina está trabajando es

$$E_{sal(Total)} = E_{sal} + E'_{sal}$$

$$E_{sal(Total)} = 1.955 \cdot (T_s - T_a)$$

Entonces:

$$E'_g = E'_{alm} + E_{sal(Total)}$$

$$E'_g = 0.263 \frac{dT}{d\theta} + 1.955 \cdot (T_s - T_a)$$

Resolviendo la ecuación diferencial:

$$T_s = \frac{E'_g + 1.955 \cdot T_a}{\frac{0.263}{1.955}} + C_1 e^{\frac{1.955}{0.263} \theta}$$

Condiciones iniciales:

$$\theta = 0 \text{ h, } T = 298 \text{ K}$$

La constante C_1 toma el siguiente valor:

$$C_1 = -\frac{E'_g}{1.955}$$

Reemplazando en la ecuación:

$$T_s = \frac{E'_g \cdot \left(1 - e^{\frac{1.955}{0.263} \theta}\right)}{1.955} + T_a$$

t [h]	t [min]	E _g [W]
0.08	5	1200
0.10	6	1025
0.12	7	908
0.13	8	868
0.15	9	800
0.17	10	750

Considerando un espesor de la matriz polimérica de 1 cm, los resultados de la energía necesaria en estado estable se presentan de la siguiente manera:

t [h]	t [min]	E _g [W]
0.08	5	2087
0.10	6	1730
0.12	7	1492
0.13	8	1401
0.15	9	1256
0.17	10	1146

Se puede observar que conforme el espesor del material aumenta, la energía necesaria para su procesamiento es mayor, pero dichos valores son menores a los calculados en estado transitorio. Por lo tanto, considerando que el tiempo en dicho estado se encontrará dentro de un rango de 5 a 8 minutos, la potencia necesaria para realizar el procesamiento de los compuestos es de aproximadamente 4000 [W]. De allí que sea necesario la utilización de cinco resistencias de 800 [W] cada una, para cada plato calefactor. El tipo de resistencia es de cartucho y sus características se especifican en el Anexo 4.

CAPÍTULO 4

DISEÑO MECÁNICO Y CÁLCULOS

Siendo el objetivo del presente proyecto de titulación el diseño de una prensa para procesamiento de materiales compuestos, este capítulo abarca el estudio del sistema estructural y funcional que conforma la prensa. Esto implica un análisis de los diferentes estados de carga, con la finalidad de establecer un sistema de cargas que resulte crítico para el diseño. Para los cálculos de diseño se tomará como punto de partida el estado crítico de carga al cual será sometida la estructura. El diseño y selección de cada uno de los elementos se lo hará de acuerdo a la disponibilidad de materiales en el mercado.

4.1 CONFIGURACIÓN DE LA ESTRUCTURA

De acuerdo con la selección de alternativas realizada, la prensa hidráulica manual para el procesamiento de materiales compuestos mediante moldeo por compresión consta de los siguientes elementos:

- 2 columnas
- 2 vigas, 1 fija y 1 móvil
- Sistema de compresión
- Sistema de calentamiento
- Base soportante

Se considerará como ESTRUCTURA para efecto de cálculos posteriores, al conjunto formado por las dos columnas y dos vigas, el cual conforma el marco de la prensa.

4.2 CÁLCULO DE FUERZAS Y ESFUERZOS

4.2.1 PARÁMETROS DE CÁLCULO

Para la alternativa seleccionada se toma en cuenta dos factores principales:

- Factor geométrico
- Factor estructural

FACTOR GEOMÉTRICO

Este factor se ve influenciado principalmente por el molde de mayor tamaño a utilizarse en la prensa. Las dimensiones de dicho molde son 0.3 x 0.3 x 0.005 m, mismas que fueron escogidas con miras a obtener probetas de ensayo típicas y partes para fabricación de prototipos.

FACTOR ESTRUCTURAL

Se lo determina en base a un valor aproximado de carga necesario para lograr la compactación del compuesto. En la Tabla 1.4 se presentan valores promedio de presiones para diferentes materiales. El valor promedio máximo para la compactación se estableció en 5000 psi (3.52×10^6 kgf/m²).

Establecidas las dimensiones de los moldes, se puede calcular la fuerza de compresión máxima requerida con la siguiente expresión:

$$F_{m\acute{a}x} = P_{m\acute{a}x} \cdot A_{m\acute{a}x}$$
$$F_{m\acute{a}x} = 10000 \text{ kgf}$$

4.2.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Para iniciar el proceso de cálculo es necesario determinar todas las fuerzas que actúan sobre la estructura. Debido a que ésta resiste las cargas externas en virtud de los momentos flexionantes que se desarrollan en los extremos de sus miembros, las conexiones deben estar en capacidad de transmitir momentos así como carga axial y cortante. Por lo tanto se debe plantear diversas hipótesis de carga y simulaciones con combinaciones de dichas fuerzas a las que puede estar sometida la prensa en servicio.

ANÁLISIS DE CARGAS

A continuación se elaborará un estudio de las cargas que pueden o no actuar sobre la estructura, calculando su valor para su posterior análisis en la condición crítica de trabajo. Se asumirá que la estructura será fabricada en acero, dadas las buenas propiedades mecánicas de este material, por su existencia en el mercado local y por su relativamente bajo costo.

Las cargas pueden dividirse en dos tipos:

- Cargas estáticas
- Cargas dinámicas

CARGAS ESTÁTICAS

Actúan sin variar en el tiempo o con una velocidad de aplicación muy baja, por lo que se considera que tienen un valor constante. Las cargas muertas se las representa en forma puntual, logrando de esta manera alcanzar la condición crítica, deseable para el diseño.

Eliminado: n

Las cargas estáticas que se considerarán son:

- Carga de peso propio
- Carga de seguridad

CARGA DE SEGURIDAD

Depende del tipo y sollicitaciones que la estructura posea y su valor se toma considerando factores de montaje y elementos secundarios. Este valor corresponde al 30% de la carga aplicada en la estructura.

$$W_s = 0.3 \cdot \text{carga aplicada}$$

$$W_s = 3000 \text{ kgf}$$

CARGAS DINÁMICAS

Varían en función del tiempo, o su velocidad de aplicación no es despreciable. En el diseño de la prensa calefactora estas cargas se las considerará puntuales. Con

esta aproximación se alcanza la condición crítica deseable para el diseño. La carga dinámica que se considerará es la de maquinaria.

CARGA DE MAQUINARIA

Considera el tipo de sistema que se utiliza para el accionamiento de la prensa, y su valor se ve determinado en base a expresiones recomendadas para ciertos tipos de estructuras. En caso de la prensa de columnas se recomienda la siguiente expresión:

$$W_{maq} = 1.3 \cdot (\text{carga aplicada} + \text{peso de accesorios})$$

$$W_{maq} = 13000 \text{ kgf}$$

4.2.3 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS DE CARGA

La carga de diseño se determinará tomando en cuenta todos los elementos considerados en la estructura. Para esto se debe plantear un análisis aproximado de marco rígido con el fin de obtener las posibles combinaciones de carga y determinar el valor crítico para la estructura.

En la hipótesis de carga, desde el punto de vista del análisis estructural, no puede darse la suma de todas las condiciones de carga en una sola combinación. Por consiguiente se considerarán las siguientes cargas con su respectiva combinación:

CARGA MUERTA 1

- carga de peso propio de las vigas

CARGA MUERTA 2

- carga de peso propio de la estructura
- carga de seguridad

CARGA DINÁMICA

- carga de maquinaria

Para el análisis de marco rígido de la prensa se tomarán en cuenta todas las cargas que estarán aplicadas en forma perpendicular a las vigas asumiéndolas como puntuales, para con ello plantear las siguientes hipótesis de carga:

HIPÓTESIS 1

carga de diseño = carga muerta 1 + carga muerta 2

HIPÓTESIS 2

carga de diseño = carga muerta 2 + carga dinámica

HIPÓTESIS 3

carga de diseño = carga dinámica

A excepción del peso propio de las columnas y vigas, los valores de las cargas serán:

Carga de seguridad $W_s = 3000$ kgf

Carga de maquinaria $W_{maq} = 13000$ kgf

Peso propio estructura $W_e = 70$ kgf (valor aproximado, correspondiente a la suma del dato del peso de la estructura dado por el programa SAP2000, el valor calculado del peso de las placas y peso aproximado de los accesorios)

FACTOR DE SEGURIDAD

La seguridad de la estructura se ve influenciada en forma directa por factores como: resistencia de los materiales, construcción, etc. Los cuales determinan la presencia de dos tipos de factores:

- Seguridad estructural
- Seguridad mecánica

SEGURIDAD ESTRUCTURAL

El correcto funcionamiento de una estructura se ve a menudo afectado por deformaciones excesivas en sus elementos constituyentes, ocasionando fallas e incluso rupturas de los elementos principales o conexiones. El factor de seguridad se expresa como la relación entre la resistencia calculada de la estructura S y la carga interna calculada P .⁴

$$n = \frac{S}{P}$$

El factor de seguridad mínimo requerido es de 1.6.

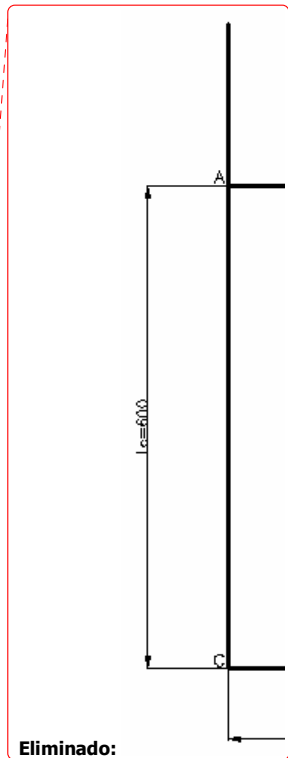
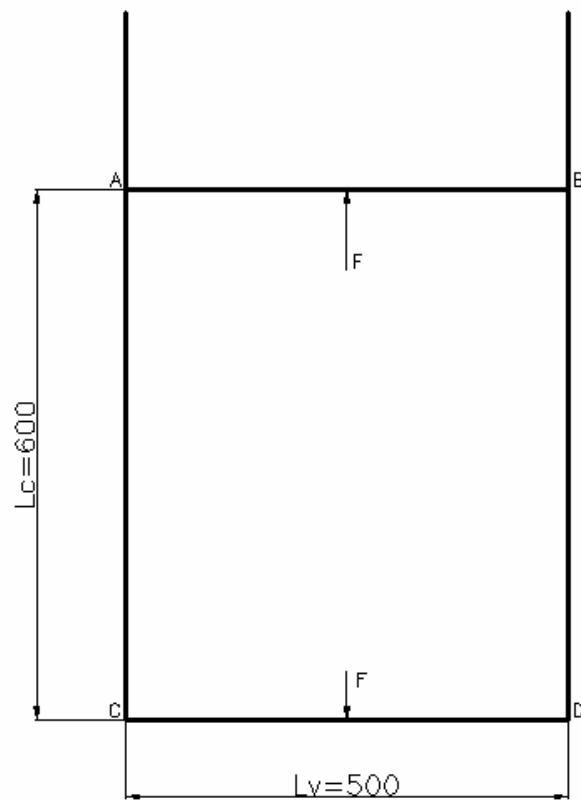
SEGURIDAD MECÁNICA

Este factor toma en cuenta juntas empernadas, elementos desmontables, diseño de las soldaduras, etc. Se debe tener presente que de las observaciones efectuadas sobre juntas con largo tiempo de servicio, se recomienda un factor de seguridad $n \geq 2.5$

Eliminado: \geq

4.3 CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA

Las dimensiones finales del bastidor se definen a partir de los diseños preliminares de todo el conjunto.



Eliminado:

Figura 4.1. Dimensiones para el cálculo de la estructura.

De lo expuesto en la sección de planteamiento de la hipótesis de carga se determina que la condición crítica de carga corresponde a la hipótesis 3 o carga de maquinaria, cuyo valor es 13000 kgf. En tal virtud la capacidad del cilindro hidráulico será de 15 ton. Sin embargo, para cuestiones de cálculo se utilizará el valor de 13 ton (127400 N). La ubicación del cilindro en el bastidor es simétrica, lo que determina que la carga aplicada sea de la misma forma y actúe directamente sobre los elementos AB y CD, que por su posición actúan como vigas y soportan cargas de flexión.

La carga en la viga superior AB está distribuida en una longitud de 160 mm correspondiente a la longitud de la placa de soporte del cilindro hidráulico. La dimensión de esta placa se la toma en base a la facilidad de montaje del cilindro y la distribución de la carga sobre la viga. En la viga inferior CD se distribuye en una longitud de 300 mm correspondiente a la longitud del plato calefactor. De lo analizado se desprende que los elementos horizontales sean similares, al igual que los elementos verticales AC y BD, los que soportan cargas de flexión y tracción. La carga a partir del cilindro hidráulico se asume como carga estática y se ubica dentro del bastidor de la siguiente manera.

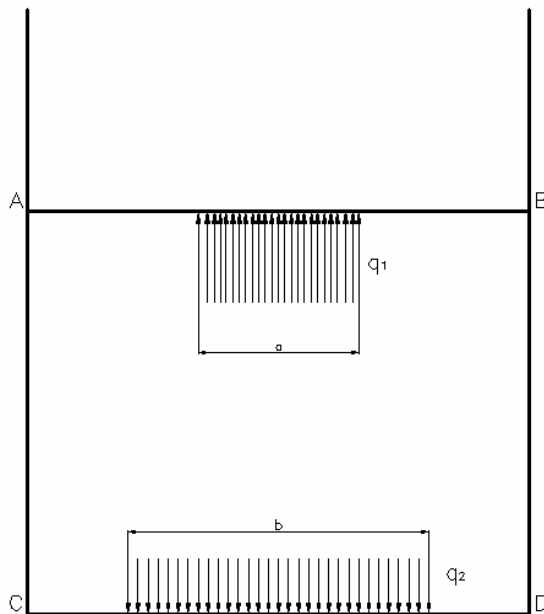


Figura 4.2. Ubicación de la carga en la estructura.

Donde:

$$q_1 = \frac{F}{a}$$
$$q_1 = 796 \frac{N}{mm}$$
$$q_2 = \frac{F}{b}$$
$$q_2 = 425 \frac{N}{mm}$$

Por ser la estructura rígida se considera que los apoyos tienden a constituir empotramientos.

4.4 DETERMINACIÓN DE LOS MOMENTOS INICIALES DE EMPOTRAMIENTO

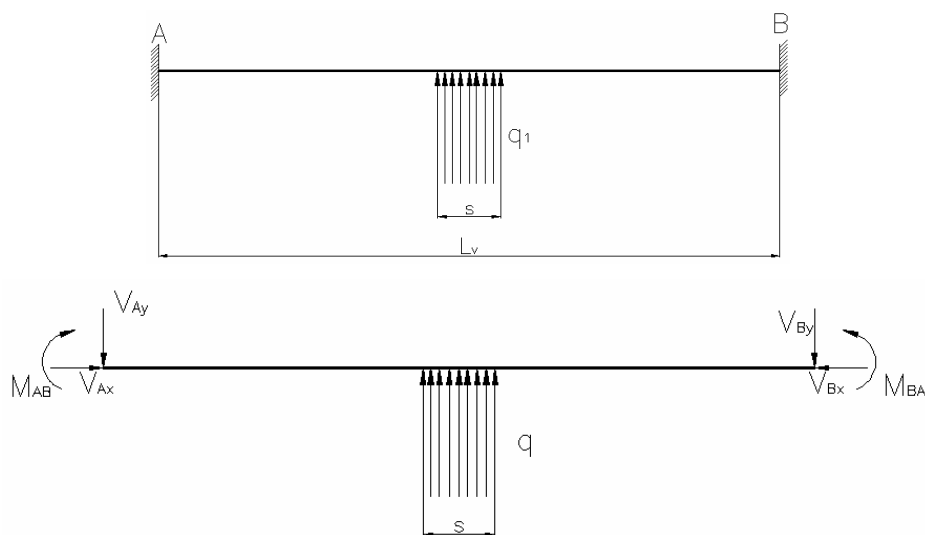


Figura 4.3. Determinación de los momentos iniciales de empotramiento.

$$M_{AB} = -M_{BA} = \frac{q \cdot s}{24 \cdot L} (3L^2 - s^2)^{[6]}$$

Para viga AB

$$M_{AB} = -M_{BA} = \frac{q \cdot s}{24 \cdot L} (3L^2 - s^2)$$

$$M_{AB} = -M_{BA} = 7690 \text{ Nm}$$

Para viga CD

$$M_{CD} = -M_{DC} = \frac{q \cdot s}{24 \cdot L} (3L^2 - s^2)$$

$$M_{CD} = -M_{DC} = 1169 \text{ Nm}$$

Por otra parte se tiene que

$$k_i = \frac{4EI_i}{L_i} \text{ Rigidez absoluta del elemento } i$$

$$\alpha_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \text{ Factor de distribución de momentos sobre el elemento } i, \text{ y}$$

n = número de elementos en una junta.

Dado que los materiales a ser utilizados tanto en vigas como en columnas son similares, el módulo de elasticidad es el mismo y el factor de distribución de momentos dependerá únicamente de la relación que se obtenga de los valores de inercias de vigas y columnas. El factor de distribución determina el valor del momento en los extremos de cada miembro que de acuerdo a los elementos a utilizarse soportarán mayor o menor flexión en los extremos.

Los elementos más solicitados de la estructura y que resisten directamente la carga en forma transversal a su dirección son los que actúan como vigas, y deberán tener mayor inercia I_1 . Los elementos que trabajan en dirección perpendicular a las vigas, denominados columnas, trabajan a flexión y tracción, y la sollicitación a flexión dependerá de la distribución de momentos. Para obtener un diseño en el que no existan sobredimensionamientos, se determina que la relación de inercias oscile entre 10 y 20. Un valor mayor a 20 (I_1/I_2) determina que las columnas trabajen casi exclusivamente a tracción debido a que los esfuerzos por flexión serían insignificantes. Por esta razón, estos miembros deberán tener

una sección transversal pequeña para resistir la carga de tracción. Con relaciones de inercia menores a 10, las columnas resultan sobredimensionadas.

De lo anotado, y para no obtener un modelo no estético o sobredimensionado, se considera que los elementos resultantes deben tener dimensiones que guarden relación razonable con las dimensiones de los demás miembros, y procurar que las conexiones produzcan la menor cantidad de concentradores de esfuerzos.

Luego de definir los elementos que mejor satisfacen los criterios señalados, y tomando en cuenta lo anterior, se seleccionan como elementos AB y CD perfiles estructurales doble C 150x50x6, y como columnas, ejes de 50.8 mm de diámetro.

Entonces se obtiene:

$$I_1 = 293.2 \text{ cm}^4, I_2 = 32.7 \text{ cm}^4$$

$$\frac{I_1}{I_2} = 8.96$$

Por consiguiente se obtiene que las columnas se encuentran sobredimensionadas, sin embargo se mantiene el diámetro seleccionado por facilidad de maquinado y por estética.

$$\alpha_1 = \frac{\frac{4EI_1}{L_1}}{\frac{4EI_1}{L_1} + \frac{4EI_2}{L_2}} = 0.91$$

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1 = 0.09$$

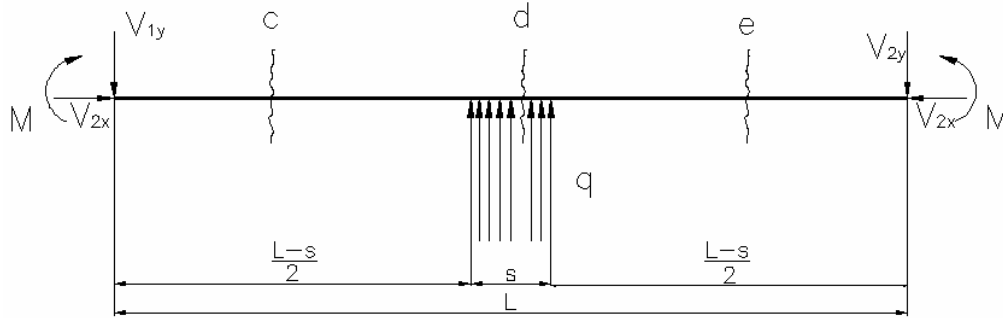
El momento generado en los extremos del bastidor, dada la simetría de la estructura, se calcula de la siguiente manera⁷:

$$M_{AB} = -M_{AC} = M \text{ inicial de empotramiento} \times \alpha_2$$

$$M_{AB} = -M_{AC} = 692.1 \text{ [Nm]}$$

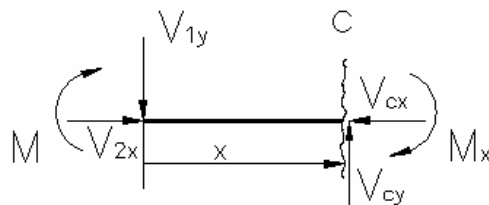
$$M_{DC} = -M_{DB} = 105.21 \text{ [Nm]}$$

4.5 DISTRIBUCIÓN REAL DE ESFUERZOS CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN VIGAS Y COLUMNAS



$$V_{1x} = V_{2x} = \frac{qs}{2}$$

$$V_{1y} = V_{2y}$$



$$\sum F_y = 0 \uparrow (+)$$

$$V_y = V_{1y} = \frac{qs}{2}$$

$$\sum M_c = 0$$

$$M_x = -M + V_{1y} \cdot x$$

$$\text{Si } x = 0; M_x = -M$$

$$\text{Si } x = \frac{L-s}{2}; M_x = -M + \frac{qs}{4}(L-s)$$

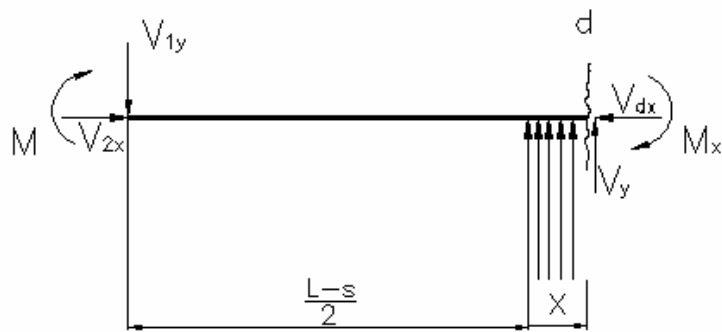
$$\sum F_y = 0 \uparrow (+)$$

$$V_y = V_{1y} - qx$$

$$\text{Si } x = 0 ; V_y = \frac{qs}{2}$$

$$\text{Si } x = \frac{s}{2} ; V_y = 0$$

$$\text{Si } x = s ; V_y = -\frac{qs}{2}$$



$$\sum M_d = 0$$

$$M_x = -M + V_{1x} \cdot \left(\frac{L-s}{2} + x \right) - \frac{qx^2}{2}$$

$$\text{Si } x = 0 ; M_x = -M + V_{1y} \cdot \left(\frac{L-s}{2} \right)$$

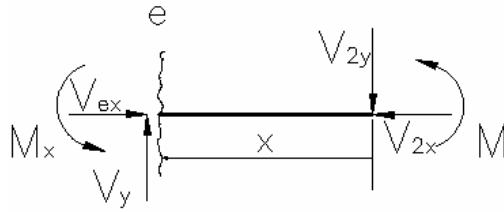
$$M_x = -M + \frac{qs}{4} \cdot (L-s)$$

$$\text{Si } x = \frac{s}{2} ; M_x = -M + V_{1y} \cdot \frac{L}{2} - \frac{qs^2}{8}$$

$$M_x = -M + \frac{qsL}{4} - \frac{qs^2}{8}$$

$$\text{Si } x = s ; M_x = -M + V_{1y} \cdot \left(\frac{L-s}{2} \right) - \frac{qs^2}{2}$$

$$M_x = -M + \frac{qs}{4} \cdot (L-s)$$



$$\sum F_y = 0 \downarrow (+)$$

$$V_y = V_{2y} = -\frac{qs}{2}$$

$$\sum M_e = 0$$

$$M_x = -M + V_{2y} \cdot x$$

$$\text{Si } x = 0 ; M_x = -M$$

$$\text{Si } x = \frac{L-s}{2} ; M_x = -M + \frac{qs}{4}(L-s)$$

DIAGRAMA DEL ESFUERZO CORTANTE

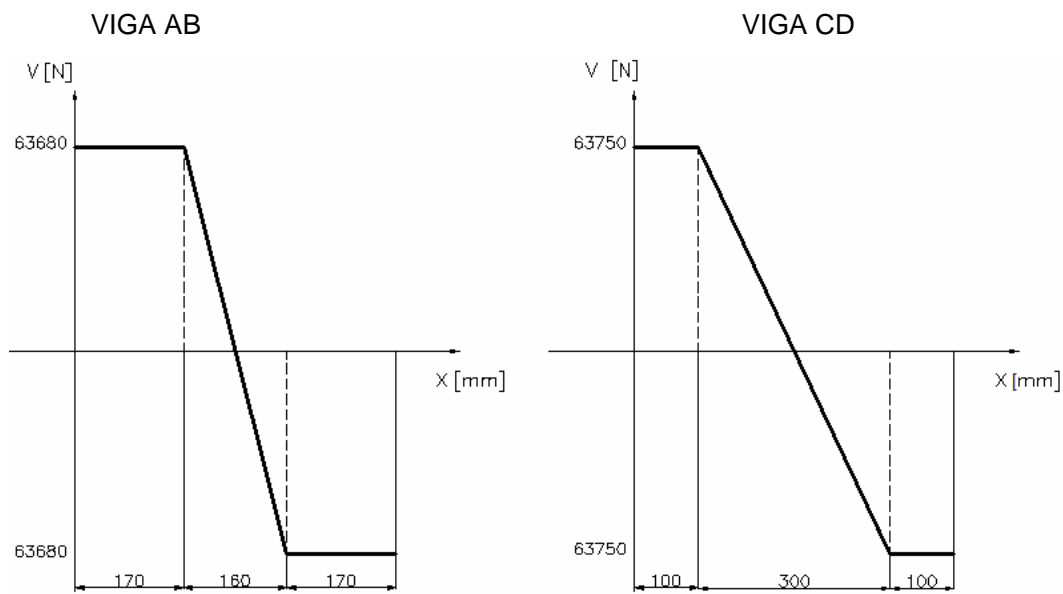


Figura 4.4. Diagramas de esfuerzo cortante de las vigas AB y CD.

DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR

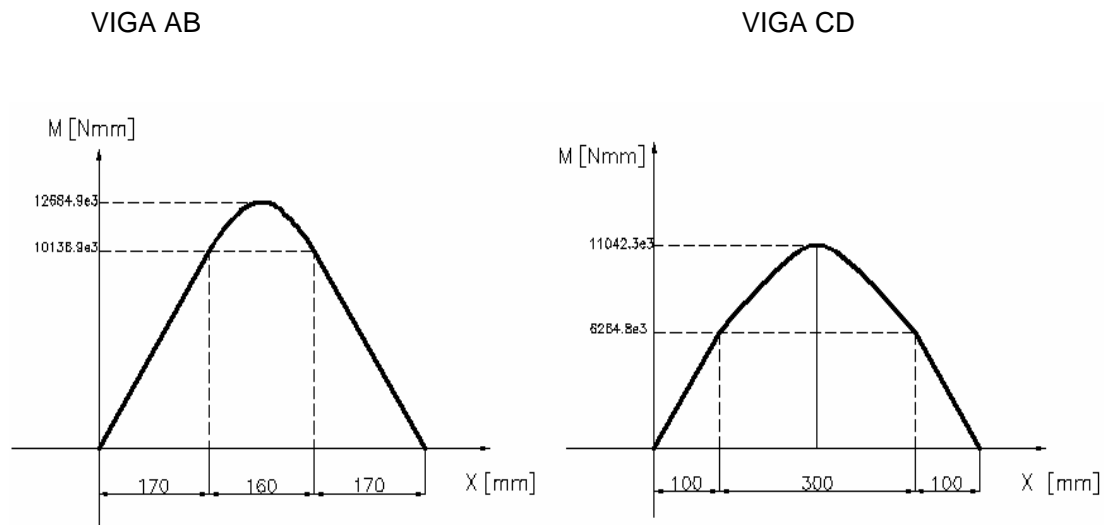


Figura 4.5. Diagramas de momento flector de las vigas AB y CD.

4.6 VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS CONSIDERADOS COMO VIGAS Y COLUMNAS

4.6.1 VIGAS

Los elementos AB y CD soportan cargas de flexión con un momento máximo de 12684.9 Nm, en el caso de AB, valor exclusivo para la relación de inercias $I_1 = 9 I_2$. De acuerdo a la selección de materiales realizada, las vigas están constituidas por perfiles C 150x50x6.

Esfuerzo debido a la flexión: $(f_b)^8$

$$fb = \frac{M_{\max} \cdot C}{I} = \frac{M_{\max}}{S}$$

$$fb = \frac{12684.9 \cdot 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}}{39097.1 \text{ mm}^3}$$

$$fb = 324.4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Resistencia a la flexión: Fb^8

$$Fb = \frac{12 \cdot 10^3 Cb}{\frac{ld}{Af}}; Cb = 1$$

$$Fb = 441.26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} (64 \text{ ksi})$$

Por lo tanto

$$\frac{fb}{Fb} = 0.74$$

$$\frac{fb}{Fb} \leq 1$$

4.6.2 ESFUERZO CORTANTE EN LAS VIGAS

Aunque la sección de vigas de acero raramente se controla por esfuerzo cortante, es prudente verificarlo, particularmente en este caso debido a que las vigas son cortas, las cargas prácticamente concentradas y de valor significativo. Siempre que los esfuerzos cortantes calculados excedan de los admisibles, deben reforzarse sobrecargadas con refuerzos o placas que aumenten el espesor del alma de los perfiles.

El esfuerzo cortante máximo τ_{\max} para un perfil estructural es:

$$\tau_{\max} = \frac{V}{A_{\text{alma}}}$$

$$\tau_{\max} = 56.07 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

El esfuerzo cortante permisible es F_r

$$F_r = 0.4 \cdot F_y$$

$$F_r = 99.3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\tau}{F_r} \leq 1$$

4.6.3 APLASTAMIENTO HORIZONTAL DEL ALMA

El aplastamiento horizontal del alma o arrugamiento ocurre debido a la concentración de esfuerzos en la unión del patín con el alma de la viga, al transmitir la compresión del patín relativamente ancho al alma muy delgada.

Según la AISC el esfuerzo de compresión en la garganta del filete no debe exceder de $0.75 F_y$, caso contrario es necesario utilizar refuerzos, ya que no es posible en este caso incrementar la longitud de apoyo de la carga o de la reacción.

Carga aplicada⁸:

$$\frac{q \cdot s}{t(s + 2k)} \leq 0.75 F_y$$

$$\frac{127400}{4 \cdot (160 + 2 \cdot 4)} \leq 0.75 \cdot 248.21$$

$$189.58 > 186.15$$

Se nota que el valor obtenido es mayor que el permitido según la AISC, lo cual sugiere la utilización de elementos reforzantes. Sin embargo, como se ve en el análisis de los resultados de la simulación realizada en el programa ALGOR (Anexo 10), la utilización de dichos elementos es opcional. El número, característica y espaciamiento de los mismos queda a criterio del constructor.

4.6.4 COLUMNAS

Los elementos que trabajan en posición vertical en la estructura, soportan cargas de tracción con cargas de flexión dependiendo de la relación de inercias definida.

Estos elementos van a estar constituidos por ejes de 50.8 mm de diámetro, a los cuales se verificará su resistencia.

Esfuerzo combinado a tracción y flexión⁸.

Con formato: Español
(Ecuador)

$$f_T = fa + fb$$

$$f_T = \frac{V_{1x}}{A} + \frac{M}{S}$$

$$f_T = 86.92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Resistencia combinada a tracción y flexión.

$$\frac{fa}{0.6Fy} + \frac{fb}{Fb} \leq 1$$

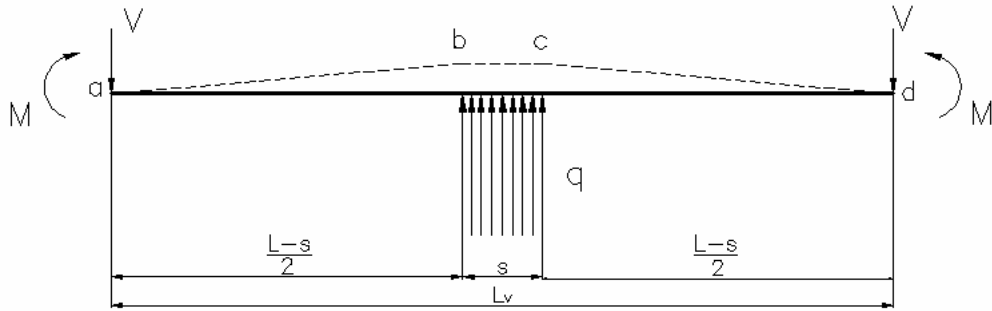
$$\frac{fa + fb}{0.6Fy} \leq 1$$

$$0.58 \leq 1$$

Por lo tanto, el perfil seleccionado como columna soportará las condiciones de carga dentro del bastidor.

4.7 CÁLCULO DE DEFORMACIONES EN EL BASTIDOR

Las deformaciones permisibles en el bastidor serán máximo de 0.5 mm en las vigas y 1 mm en las columnas. Se determina la deformación máxima en la viga, la cual ocurrirá en el centro de la misma. El método a utilizarse es el de la doble integración.



Para el tramo ab

$$0 \leq x \leq 1$$

$$E \cdot I \frac{d^2 Y}{dX^2} = M_x$$

$$E \cdot I \frac{d^2 Y}{dX^2} = -M + V_{1y} \cdot x$$

$$E \cdot I \frac{dY}{dX} = -M \cdot x + V_{1y} \cdot x^2 + C_1 \quad (4.1)$$

$$E \cdot IY = -M \cdot \frac{x^2}{2} + V_{1y} \cdot \frac{x^3}{3} + C_1 x + C_2 \quad (4.2)$$

Para el tramo bc

$$0 < x < s$$

$$E \cdot I \frac{d^2 Y}{dX^2} = M_x$$

$$E \cdot I \frac{d^2 Y}{dX^2} = -M + V_{1y} \cdot (1 + x) - \frac{qx^2}{2}$$

$$E \cdot I \frac{dY}{dX} = -M \cdot x + V_{1y} \left(1 \cdot x + \frac{x^2}{2} \right) - \frac{qx^3}{6} + C_3 \quad (4.3)$$

$$E \cdot IY = -M \cdot \frac{x^2}{2} + V_{1y} \left(\frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} \right) - \frac{qx^4}{24} + C_3 x + C_4 \quad (4.4)$$

Condiciones de borde:

- La deformación por tracción en los elementos verticales corresponde a la deformación en los extremos de las vigas⁵

$$\Delta = \frac{V \cdot L_c}{A_c \cdot E}$$

- Según la forma de la elástica en la viga, su pendiente en la mitad es cero y corresponde a la deformación máxima.

En bc para $x = \frac{s}{2}$, $\frac{dY}{dx} = 0$

- En el punto b de los tramos ab y bc la pendiente y deformación es la misma.

Para el tramo ab: $\left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=l} = tg\theta_1$

Para el tramo bc: $\left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=0} = tg\theta_1$

Aplicando las condiciones en la ecuación 4.1

$$E \cdot I \cdot tg\theta_1 = -M \cdot l + \frac{qs}{4}l^2 + C_1 \quad (4.5)$$

En la ecuación (4.2)

$$\begin{aligned} Y_{x=0} &= \Delta \\ C_2 &= E \cdot I \cdot \Delta \end{aligned} \quad (4.6)$$

En la ecuación (4.3)

$$\begin{aligned} \left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=0} &= tg\theta_1 \\ C_3 &= E \cdot I \cdot tg\theta_1 \end{aligned} \quad (4.7)$$

En la ecuación (4.3)

$$\begin{aligned} \left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=\frac{s}{2}} &= \frac{s}{2} = 0 \\ C_3 &= \frac{Ms}{2} - \frac{qs^2}{24}(6 \cdot l + s) \end{aligned} \quad (4.8)$$

En la ecuación (4.2)

$$\begin{aligned} Y|_{x=l} &= \Delta b \\ E \cdot I \cdot \Delta b &= -M \cdot \frac{l^2}{2} + \frac{qs}{12}l^3 + C_1 \cdot l + C_2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

En la ecuación (4.4)

$$Y|_{x=0} = \Delta b$$

$$C_4 = E \cdot I \cdot \Delta b \quad (4.10)$$

Igualando (4.5), (4.7) y (4.8)

$$C_1 = M \left(l + \frac{s}{2} \right) - \frac{qs}{4} \left(\frac{s^2}{6} + l \cdot s + l^2 \right)$$

Igualando (4.9) y (4.10)

$$C_4 = -\frac{M \cdot l^2}{2} + \frac{qs \cdot l^3}{12} + C_1 \cdot l + C_2$$

En la ecuación (4.4)

$$Y \Big|_{x=\frac{s}{2}} = Y_{\max}$$

Reemplazando los respectivos valores para $x = \frac{s}{2}$ se obtiene como resultado:

$$Y_{\max} = 0.57 \text{ mm}$$

La deformación en los elementos que actúan como columnas será:

$$\Delta = \frac{V \cdot Lc}{Ac \cdot E}$$

$$\Delta = 0.06 \text{ mm}$$

De los resultados obtenidos se aprecia que la selección de los elementos que constituyen las vigas es adecuada. La configuración establecida en el cálculo no incluye elementos rigidizantes que incrementen la inercia del conjunto, por lo que el valor de deformación se encuentra en el límite. Sin embargo, se realizó la simulación de la configuración real en el programa ALGOR V19, comprobándose la correcta selección de los elementos. Los resultados se encuentran en el Anexo 10.

4.8 DISEÑO DE LAS SUJECIONES ROSCADAS⁵

En base a la disposición de la prensa y las cargas que ésta soportará, los elementos que trabajan como columnas poseen un sector roscado en su parte

superior, con la finalidad de posicionar la viga superior a la altura requerida así como también soportar el peso de la misma y la carga actuante. Un tornillo de transmisión de potencia se ajusta a este tipo de requerimiento, por lo que su diseño se especifica a continuación. Se tomará como material del tornillo al acero ASTM A36 y para la tuerca se utilizará bronce fosfórico.

Diámetro exterior: 50.8 mm

Fuerza: 63703 N

Nº de hilos por pulgada: 4

Factor de fricción f (acero y bronce): 0.07

Se calcula el paso de la rosca:

$$p = \frac{1}{N}$$
$$p = 0.25 \text{ in}$$

El diámetro medio d_m se lo calcula como sigue:

$$d_m = d - \frac{p}{2}$$
$$d_m = 1.75 \text{ in}$$

El diámetro de raíz d_r se lo calcula de la siguiente manera:

$$d_r = d - p$$
$$d_r = 1.5 \text{ in}$$

El avance de la rosca l , se lo calcula con la fórmula:

$$l = n \cdot p$$
$$l = 0.25$$

A continuación se calcula el par de torsión T requerido para superar la fricción en la rosca y soportar la carga.

$$T = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{l + \pi \cdot f \cdot d_m}{\pi d_m - fl} \right)$$

$$T = 101684 \text{ Nmm}$$

El par de torsión necesario para bajar la carga se determina de acuerdo con la ecuación:

$$T = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\pi \cdot f \cdot d_m - l}{\pi d_m + fl} \right)$$

$$T = 96588 \text{ Nmm}$$

Al obtenerse un par de torsión positivo mediante esta ecuación se dice que el tornillo es autobloqueante. Para tal condición debe cumplirse que $f > \tan \lambda$ donde

$$\lambda = \frac{l}{\pi d_m}$$

Los esfuerzos nominales en la rosca del tornillo de transmisión de potencia se relacionan con los parámetros de la rosca como se muestra a continuación. El esfuerzo de apoyo σ_B , es

$$\sigma_B = \frac{2F}{\pi d_m n_t \rho}$$

Siendo n_t el número de hilos en contacto.

El esfuerzo flexionante en la raíz del hilo se determina mediante

$$\sigma_b = \frac{6F}{\pi d_r n_t \rho}$$

$$\sigma_b = 125.71 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_b \leq 0.6\sigma_y$$

El esfuerzo cortante transversal τ en el centro de la raíz del hilo debido a la carga F se expresa como

$$\tau = \frac{3F}{\pi d_r n_t \rho}$$

$$\tau = 62.85 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau \leq 0.4\sigma_y$$

4.9 DISEÑO DE LAS SOLDADURAS⁵

De la simulación realizada a la viga superior se desprende que la zona de mayor esfuerzo se encuentra localizada en la unión barra perforada – perfiles por existir concentradores de esfuerzos geométricos, los mismos que serán corregidos

mediante soldadura. De acuerdo a la constitución de la viga y por el tipo de elementos a unir, se utilizará soldadura de filete con juntas en ángulo y en traslape.

DIMENSIÓN DE LA SOLDADURA

En una soldadura de filete el esfuerzo máximo se considera como el esfuerzo cortante en la garganta, cualquiera sea la dirección de aplicación de la carga. Para el correcto dimensionamiento de la soldadura es necesario calcular la resistencia del material de aporte y de la unión.

La fuerza permisible por longitud unitaria para el electrodo seleccionado para esta aplicación, ER70S-6, y para un tamaño de filete de 6 mm, es 3.71 kip/pulg^[5]. El tamaño de filete fue seleccionado de acuerdo al espesor del perfil C, y se asume longitud completa de soldadura para la barra perforada. Se asume la fuerza aplicada de 63700 N, correspondiente a la fuerza cortante en la viga.

$$F = 3.71 \cdot l$$

$$F = 97458 \text{ N}$$

$$F_{perm} \geq F_{aplicada}$$

Por lo tanto la resistencia del material de aporte es satisfactoria.

Se calcula la resistencia de la unión soldada; la resistencia a la cedencia de la viga es de $S_y = 36 \text{ ksi}$ (acero ASTM A36).

$$\tau_{perm} = 0.4 \cdot S_y$$

$$\tau_{perm} = 248.56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} (14.4 \text{ kpsi})$$

El esfuerzo cortante τ en el metal base adyacente a la soldadura está dado por

$$\tau = \frac{F}{2hl}$$

$$\tau = 35.38 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} (5.13 \text{ kpsi})$$

Como $\tau_{perm} > \tau$, la unión resulta satisfactoria cerca de los cordones de soldadura.

En el ensamblaje de los diferentes elementos constitutivos de la prensa se han utilizado algunas uniones soldadas cuyos cálculos no se ha realizado por cuanto en la simulación realizada no presentan altas sollicitaciones mecánicas. Sin embargo, se vio la necesidad de especificar los respectivos tipos de uniones y procesos utilizados, al igual que para las uniones barra perforada – perfil, detallados mediante los correspondientes WPS's. Estos se encuentran en el Anexo 9.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE COSTOS

El presente capítulo hace referencia a los costos combinados de equipos, materiales y mano de obra. Los costos de materiales incluyen perfiles metálicos, placas, ejes. El costo de equipos incluye máquinas y accesorios tanto hidráulicos como eléctricos. Los costos referentes a mano de obra son un estimado del valor de las horas/hombre necesarias para ejecutar las diferentes operaciones de maquinado de los elementos. No se incluyen los costos correspondientes a diseño, elaboración de planos y cálculos correspondientes debido a que se trata de un proyecto de titulación.

Los equipos y accesorios detallados a continuación corresponden a los existentes en el mercado nacional y sus valores son los proporcionados por las empresas distribuidoras de los mismos.

COSTO DE EQUIPOS

Tabla 5.1. **Costo de los componentes del Sistema Hidráulico.**

Eliminado: S

DESCRIPCIÓN	VALOR
Bomba hidráulica manual P-392, 10000 psi Marca ENERPAC	341.58
Cilindro hidráulico simple acción, capac. 15 T Marca ENERPAC	435.14
Adaptador para manómetro <u>GA-1, Marca ENERPAC</u>	38.07
Manguera hidráulica acero-caucho <u>H-9206, Marca ENERPAC</u>	80.75
Acople de manguera <u>CH-604, Marca ENERPAC</u>	19.04
Manómetro <u>GP-10S</u> , calibración 0-10000 psi (0-700 bares), unidades por división 100 psi (10 bares) Marca ENERPAC	239.33
TOTAL:	914.58

Tabla 5.2. Costo de los componentes del Sistema de Calentamiento.

Eliminado: S

DESCRIPCIÓN	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	VALOR TOTAL
Resistencia eléctrica tipo cartucho 1/2 x 10 pulg, marca TEMPCO	45.14	10	451.4
Termocupla Tipo J 1/8x 4 pulg, <u>TEMPCO</u>	24.00	1	24.00
Controlador de Temperatura <u>E5GN</u> Marca OMRON <u>(Ver Anexo 7)</u>	165.74	1	165.74
Relay estado sólido <u>G7J</u> marca OMRON <u>(Ver Anexo 8)</u>	26.00	1	26.00
TOTAL:			667.14

COSTO DE MATERIALES

Tabla 5.3. Costo de los componentes del Sistema Estructural

Eliminado: S

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	VALOR UNITARIO(/kg)	VALOR TOTAL
Perfil estructural C 150x50x6	Acero A36	56.79	56.79
Placa 110x160x20	Acero A36	5.30	5.30
Placa 110x160x30	Acero A36	6.45	6.45
Placa 300x300x6	Acero A36	8.92	17.84
Barra perforada 90x50, long:600	Acero SAE 1024	3.40	50.49
Barra acero calibrado diám:2 pulg, long:1.7m	Acero AISI 1045		
Barra acero para construcción de maquinaria diám:3 pulg, long:86mm	Acero AISI 1045		
TOTAL:			136.87

... [1]

Tabla 5.4. Costo de las operaciones de mecanizado.

DESCRIPCIÓN	VALOR HORA/HOMBRE	DURACIÓN (HORAS)	VALOR TOTAL
Torneado	8.00	16	128.00
Fresado	10.00	24	240.00
Taladrado	3.00	6	18.00
Soldadura	20.00	3	60.00
TOTAL			446.00

La siguiente tabla resume los costos totales aproximados de la prensa calefactora.

Tabla 5.5. Resumen de costos.

No.	DESCRIPCIÓN	[USD]
1	MATERIALES	137
2	EQUIPOS Y ACCESORIOS	1582
3	OPERACIONES	446
4	OTROS (Material eléctrico e insumos)	100
TOTAL		2265
*	IMPONDERABLES (15% TOTAL)	339

El costo total de la máquina más los costos de posibles imponderables da un valor de USD 2601. Este valor resulta menor comparado con máquinas de características aproximadas a la diseñada, de venta en los EE.UU., cuyo costo es de USD 4210. Las características de estas prensas son: capacidad máxima 12 toneladas, rango de temperatura de los platos calefactores (152.4x152.4 mm²) de 65°C a 260°C. ^[10]

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. Mediante la metodología utilizada en este trabajo se ha logrado diseñar una prensa calefactora para procesamiento de materiales compuestos. Esta prensa tiene las siguientes especificaciones: capacidad 15 toneladas provisto por accionamiento de un conjunto bomba manual y cilindro hidráulico, rango de temperatura de los platos calefactores de 25°C a 300°C con control automático, bastidor rígido de dos columnas.
2. El diseño de la prensa cumple con los requerimientos de funcionalidad y maniobrabilidad definidos, los cuales permiten moldear diversos componentes y probetas de materiales compuestos de matriz polimérica en las dimensiones especificadas en el desarrollo de la tesis.
3. El diseño estructural de la prensa de dos columnas permite obtener una capacidad de carga elevada en comparación con sus dimensiones, disminuyendo el peso y proporcionando un espacio de trabajo adecuado para la aplicación.
4. El sistema de compresión puede ser fácilmente automatizado cambiando el cilindro hidráulico manual por una bomba hidráulica eléctrica buscando de esta manera disminuir el esfuerzo físico a realizar y tiempo de trabajo a emplear. Esto incrementaría además el rango de aplicaciones de la prensa debido al control de desplazamiento del émbolo del cilindro.
5. La adecuada selección del sistema de control y eléctrico (resistencias) permite una distribución de temperatura uniforme y flujo constante de calor, requeridos para cada tipo específico de matriz polimérica.
6. La adaptabilidad del diseño de la prensa permite otras aplicaciones a más de la especificada en el presente proyecto. Mediante el cambio de

los elementos calefactores y de compresión se lograría: obtención de probetas metalográficas, doblado de probetas metálicas entre otros.

7. La selección de los elementos constitutivos de la prensa se realizó en base a su disponibilidad en el mercado, facilidad de ensamblaje y tipo de material, proporcionando de esta manera una máquina con un costo menor en comparación a similares disponibles en nuestro medio.
8. La utilización de los cilindros soportantes de material cerámico (cromita) se ajusta perfectamente al diseño de la máquina debido a que evitan la existencia de puente térmico entre el plato de compresión y el plato calefactor y a la vez resisten la carga aplicada.

6.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable determinar el correcto ajuste entre las resistencias de cartucho y el plato de aluminio ya que de este factor dependerá la adecuada transferencia de calor y vida útil de la resistencia. Dicho ajuste se lo puede calcular utilizando las fórmulas presentadas en el Anexo 4.
- La simulación de los elementos estructurales constitutivos de la prensa debe ajustarse lo más cercanamente posible a la realidad, para evitar aproximaciones erróneas al diseño final.
- Es necesario identificar el tipo específico de matriz polimérica para la selección adecuada de la temperatura de procesamiento.
- Debido a la temperatura de calentamiento relativamente baja se puede utilizar como material aislante fibra de vidrio compactada de espesor 12.7 mm.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAZUMDAR, SANJAY K.; Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering; 2002.
- [2] FLINN, RICHARD; Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones; McGraw-Hill; México; 1991.
- [3] INCROPERA FRANK; Fundamentos de Transferencia de Calor; Pearson Educación; Cuarta edición; México; 1999.
- [4] BRESLER; Diseño De Estructuras De Acero; Limusa; México; 1990.
- [5] SHIGLEY, JOSEPH; Diseño En Ingeniería Mecánica; McGraw-Hill; México; 2002.
- [6] GULDAN, RICHARD; Tablas Auxiliares Para El Cálculo De Las Estructuras Aporticadas y Vigas Continuas.
- [7] KINNEY , J.S.; Análisis de Estructuras Indeterminadas; Ed. Continental; México; 1976.
- [8] AISC; Manual Of Steel Construction; AISC; Chicago; 1980.
- [9] www.matweb.com
- [10] www.coleparmer.com/catalog/vcatalog_page.asp?p=1304
- [11] ROSEN, SEPHEN. Fundamental Principles of Polymeric Materials. Second Edition, Rolla Missouri, 1993.
- [12] AMERICAN WELDING SOCIETY; Structural Welding Code AWS D1.1/D1.1M:2002; 18ava Edición; USA; 2002
- [13] LINCOLN ELECTRIC COMPANY; The Procedure Handbook Of Arc Welding; Middletown USA; 1973.
- [14] ENERPAC; Catálogo De Equipos Hidráulicos; Milwaukee USA; 2002.
- [15] TEMPCO; Catálogo De Equipo De Calentamiento Eléctrico; 2005.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	13
RESUMEN	15
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS	17
1.1 MATERIALES COMPUESTOS	17
1.2 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	18
1.3 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS COMPUESTOS	19
1.4 MATERIAS PRIMAS PARA FABRICACIÓN DE PARTES	21
1.5 REFUERZOS EN FORMA DE FIBRA	21
1.6 MATERIALES PARA LA MATRIZ	22
1.6.1 RESINAS TERMOESTABLES	22
1.6.2 RESINAS TERMOPLÁSTICAS	25
1.7 PROCESAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS	27
1.7.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN	27
1.7.2 PASOS BÁSICOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE COMPUESTOS	30
1.8 MOLDEO POR COMPRESIÓN (COMPUESTOS TERMOESTABLES)	31
1.8.1 FABRICACIÓN DEL ELEMENTO	32
1.8.2 DISEÑO DEL MOLDE	33
1.8.3 MÉTODOS PARA LA APLICACIÓN DE PRESIÓN Y CALOR	33
1.8.4 VENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOESTABLES	33
1.8.5 DESVENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOESTABLES	34
1.9 PRENSADO EN CALIENTE (TERMOPLÁSTICOS)	34
1.9.1 APLICACIONES PRINCIPALES	34
1.9.2 MATERIAS PRIMAS BÁSICAS	34
1.9.3 HERRAMIENTAS	34
1.9.4 FABRICACIÓN DE LAS PARTES	35
1.9.5 MÉTODOS PARA APLICAR CALOR Y PRESIÓN	36
1.9.6 VENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS	36
1.9.7 DESVENTAJAS DEL PROCESAMIENTO DE TERMOPLÁSTICOS	36
1.10 PARÁMETROS DE PRENSADO	36
1.11 TIPOS DE PRENSAS PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN	39
1.11.1 PRENSAS HIDRÁULICAS	39
1.11.2 PRENSAS HIDRÁULICAS MANUALES	40
1.11.3 PRENSAS HIDRÁULICAS ELÉCTRICAS	40
1.11.4 PRENSAS NEUMÁTICAS	40
1.11.5 AUTOCLAVE	40

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE LA PRENSA

	41
2.1 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN	41
2.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS POSIBLES	42
2.2.1 SISTEMA DE COMPRESIÓN	42
2.2.2 SISTEMA DE CALENTAMIENTO	44
2.2.3 CONFIGURACIÓN DEL BASTIDOR	45
2.2.4 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA	48
2.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	49

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA CALEFACTOR DE LA MÁQUINA

	52
3.1 DISEÑO DE LAS PLACAS CALEFACTORAS	52
3.2 ANÁLISIS EN ESTADO TRANSITORIO	52
3.3 ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE	60

CAPÍTULO 4

DISEÑO MECÁNICO Y CÁLCULOS

	66
4.1 CONFIGURACIÓN DE LA ESTRUCTURA	66
4.2 CÁLCULO DE FUERZAS Y ESFUERZOS	67
4.2.1 PARÁMETROS DE CÁLCULO	67
4.2.2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	67
4.2.3 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS DE CARGA	69
4.3 CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA	71
4.4 DETERMINACIÓN DE LOS MOMENTOS INICIALES DE EMPOTRAMIENTO	73
4.5 DISTRIBUCIÓN REAL DE ESFUERZOS CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN VIGAS Y COLUMNAS	76
4.6 VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS CONSIDERADOS COMO VIGAS Y COLUMNAS	79
4.6.1 VIGAS	79
4.6.2 ESFUERZO CORTANTE EN LAS VIGAS	80
4.6.3 APLASTAMIENTO HORIZONTAL DEL ALMA	81
4.6.4 COLUMNAS	81
4.7 CÁLCULO DE DEFORMACIONES EN EL BASTIDOR	82
4.8 DISEÑO DE LAS SUJECIONES ROSCADAS	85
4.9 DISEÑO DE LAS SOLDADURAS	87

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE COSTOS _____ 90

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____ 93

6.1 **CONCLUSIONES** _____ 93

6.2 **RECOMENDACIONES** _____ 94

BIBLIOGRAFÍA _____ 95

Eliminado: 92

Eliminado: 92

Eliminado: 92

Eliminado: 92
