

124
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA PARA
ESPUMAR POLIESTIRENO CON VARIABLES
CONTROLADAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA)
P R E S E N T A :
IGNACIO MONTERRUBIO ACOSTA

DIRECTOR DE TESIS: M. en I. ARMANDO ORTIZ PRADO



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Diseño y construcción de un sistema para espumar poliestireno con variables controladas

Alumno:
Ignacio Monterrubio Acosta

Director de Tesis:
M. en I. Armando Ortiz Prado

Junio 1997.



**Facultad
de Ingeniería**

**Universidad Nacional
Autónoma de México**

A mis padres

PRÓLOGO

Uno de los procesos de fundición más prometedores en la actualidad, es la fundición a la espuma perdida, éste proceso involucra modelos desechables de poliestireno expandido. El conformado de éstos modelos representa una de las barreras mas grandes para la aplicación de este proceso.

La maquinaria que se usa para la producción de los modelos es de un costo muy elevado y están diseñadas para producir altos volúmenes, por lo que para que la producción de modelos desechables sea rentable, es necesario que la producción sea alta, de otra forma cada pieza se hace mas costosa conforme la producción es menor.

Otro problema con el que la fundición al la espuma perdida se enfrenta, es el hecho de que en México la fundición se ha desarrollado en pequeñas y medianas empresas, haciendo aún mas difícil que éstas adopten un proceso que involucra maquinaria tan costosa y complicada. Tan sólo el equipo de conformado de modelos, requiere de una caldera, silos de almacenamiento, cámara de estabilización y otros elementos, que además de ser costosos requieren de espacio con el que muchas empresas no cuentan.

En México el ramo industrial que se dedica al espumado del poliestireno, enfoca su producción en embalajes y elementos de construcción para la ingeniería civil. En cualquiera de estos casos, los niveles de producción son altos, ya que la demanda de estos artículos está en aumento por las nuevas tecnologías y aplicaciones de el poliestireno expandido en dichas áreas. Por lo que es importante tener maquinaria alternativa, en la que se pueda desarrollar y optimar el espumado de poliestireno para su aplicación en la fundición y en otras áreas donde se requiera.

En la presente tesis se presenta el diseño y manufactura de un equipo para el espumado de poliestireno, cuyo objetivo es la producción de bajos volúmenes de poliestireno expandido, controlando las variables críticas durante el proceso, tales como la presión, temperatura y tiempo de residencia. La versatilidad de éste equipo representa una de las ventajas más importantes respecto a los equipos que ya existen comercialmente.

Inicialmente se presenta el diseño y manufactura de un primer prototipo para el espumado de pequeñas cantidades de poliestireno, cuyo diseño es radicalmente distinto al equipo ya existente. Los resultados de las pruebas realizadas en este primer prototipo, demostraron tanto algunas propiedades del poliestireno como del proceso de espumado. En el mismo capítulo se presenta el desarrollo de un segundo prototipo, basado tanto en el primero, como en equipos ya existentes, conjuntando las principales ventajas de ambos.

El diseño resultante, es un equipo muy versátil tanto por su tamaño como por su capacidad de adaptarse a diferentes tipos de poliestireno, la gran mayoría de sus elementos son fáciles de desmontar e intercambiar por los que sean más convenientes. Esta flexibilidad, hace a este diseño ideal para su uso en laboratorio, donde sólo se requiere de un espacio mínimo y es fácil controlar las principales variables del proceso. Su aplicación es extensible a la pequeña industria donde se requieren volúmenes bajos, ya que su fabricación es económica y es fácil de usar.

Contenido

Prólogo	<i>iii</i>
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Obtención del poliestireno	1
1.2 Comercialización del poliestireno	4
1.3 Espuma de poliestireno	4
1.4 Espumado de poliestireno	7
1.5 Procesos de espumado	9
1.6 Espumado continuo	11
1.7 Espumado por lotes	13
1.8 Procesos posteriores	14
Capítulo 2 Diseño y construcción del equipo para espumado de poliestireno	15
2.1 Identificación de la necesidad	15
2.2 Identificación de los requerimientos del equipo	16
2.3 Diseño conceptual del primer prototipo PEC1	24
2.4 Diseño de detalle del primer prototipo PEC1	28
2.5 Construcción del primer prototipo	32
2.6 Descripción de operación.	35
2.7 Pruebas del PEC1	35
2.8 Análisis de resultados del PEC1	36
2.9 Diseño conceptual del segundo prototipo PEL2	38
2.10 Diseño de detalle del segundo prototipo PEL2	43
2.11 Construcción del segundo prototipo	54
2.12 Descripción de operación.	58
2.13 Pruebas del PEL2	59
2.14 Análisis de resultados del PEL2	59

Capítulo 3	Pruebas de optimación del proceso de espumado con el PEL2	60
3.1	Objetivo de las pruebas	60
3.2	Definición de las pruebas	61
3.3	Pruebas de espumado	65
3.4	Evaluación de las pruebas de espumado	66
Capítulo 4	Conclusiones	72
4.1	Diseño del equipo	72
4.2	Desempeño del equipo	73
4.3	Resultados de las pruebas de espumado	75
4.4	Perspectivas del espumado con el PEL2	76
Referencias		77
Apéndice A	Planos	80
Apéndice B	Costo	101

Capítulo 1

Introducción

1.1 Obtención del Poliestireno

El poliestireno es un polímero, como tal está formado por la unión de varios monómeros, en éste caso el de estireno. El estireno C_8H_8 también conocido como estirolo es un hidrocarburo cíclico no saturado y aromático. Es un líquido incoloro que se encuentra en los aceites ligeros del alquitrán, su punto de fusión es a los $-30.6^{\circ}C$ y el de ebullición es a los $145.2^{\circ}C$. Industrialmente se obtiene de la destilación del petróleo crudo.

Este polímero es termoplástico lo que quiere decir que puede ser ablandado y vuelto a endurecer indefinidamente por acción del calor. La estructura del poliestireno es lineal como se muestra en la figura 1.1.

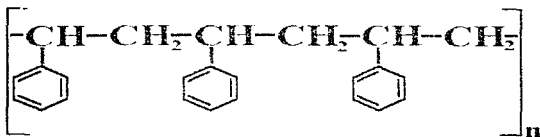


Fig. 1.1 Fórmula estructural del poliestireno.

Industrialmente el poliestireno se produce por dos procesos, la polimerización en masa y la polimerización en suspensión. En ambos casos el homopolímero atáctico del estireno se produce por una iniciación con radicales libres.

Polimerización continua o en masa

En la figura 1.2 se muestra un esquema de dos etapas (tanques y torre). Como se observa el estireno se introduce a tanques de aluminio a temperaturas de 80 a 82 °C para iniciar la polimerización.

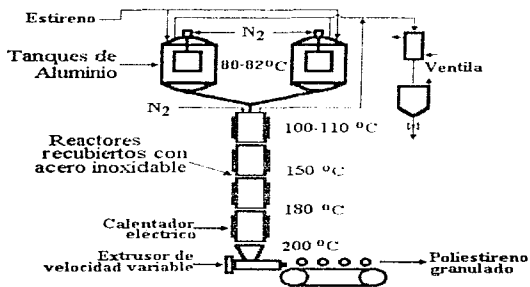


Fig. 1.2 Polimerización continua del estireno.

En esta polimerización es posible agregar un peróxido o una cantidad controlada de oxígeno para obtener una baja conversión en los reactores recubiertos de acero inoxidable (columna central de la fig. 1.2). Aquí es necesario dar agitación durante un lapso de 10 a 30 horas, tras las cuales se forma el homopolímero.

La polimerización final se obtiene en la torre, donde ésta se completa con temperaturas que van de 100 a 200 °C. En esta etapa se puede usar un raspador para ayudar a mover al polímero.

Finalmente en la parte baja un extrusor con ventila elimina el monómero que no reaccionó y le da forma de granulos al polímero.

Polimerización en suspensión

La polimerización en suspensión es un proceso discontinuo o por lotes, y puede requerir de 8 a 12 horas con temperaturas de 70 a 100 °C. Como se observa en la figura 1.3, el proceso es muy sencillo, el estireno es depositado en un reactor con agua y agentes para la suspensión, hasta que se forma el polímero. La coagulación no es necesaria puesto que las partículas son lo suficientemente grandes para que se puedan filtrar directamente. Estas partículas pasan a un tanque de lavado para que después de un tratamiento con vapor que elimina el monómero que no reaccionó, sean secadas.

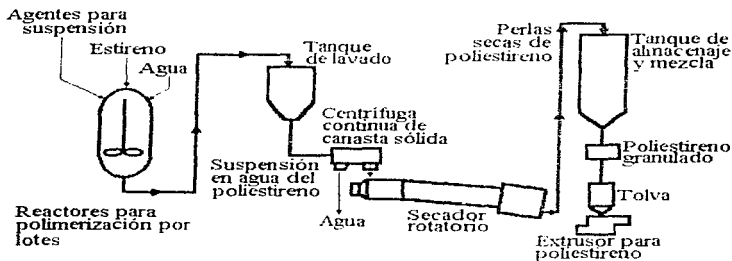


Fig. 1.3 Polimerización del estireno en suspensión

En la polimerización para la obtención de las perlas de poliestireno se hace reaccionar el monómero de estireno con peróxido de benzoilo, en suspensión acuosa, conteniendo agentes tensoactivos del tipo de ésteres del sorbitan, además de una cantidad de trifosfato de calcio como agente de superficie para evitar que las gotas reaccionantes se peguen durante el proceso.

1.2 Comercialización del poliestireno

En función de sus aplicaciones el poliestireno se comercializa de tres formas:

- Poliestireno de uso común o cristal
- Poliestireno de alto, medio o bajo impacto.
- Poliestireno expansible.

De las cuales una de las más conocidas, es la espuma de poliestireno, para lograr ésta, es necesario agregar un agente expansor, el cual se distribuye en forma de burbujas microscópicas llamadas celdas.

La adición de un agente expansor puede darse en:

- **La polimerización:** Una vez alcanzada una cierta conversión del monómero se adiciona al reactor la cantidad adecuada del pentano o algún hidrocarburo alifático como los clorofluorocarbonos que por razones ecológicas se han dejado de usar.
- **Procesos posteriores a la polimerización:** A las perlas ya seleccionadas se les suspende de nuevo en una solución acuosa de las mismas características de la anterior a la que se le agrega la cantidad necesaria del agente expansor. Una vez en suspensión se llevan a la temperatura de ablandamiento donde se facilita la absorción del agente espumante. El producto obtenido es más uniforme y no tiende a perder sus propiedades por el manejo posterior a la polimerización, consistente en lavado, clasificación y secado de las mismas.

1.3 Espuma de poliestireno

El poliestireno expansible industrialmente se le conoce por sus siglas EPS del inglés "Expandible Polistiren". Esta espuma es la más importante en proporción a su producción. Existen dos clases fundamentales de espuma de poliestireno, la extruída y la de perlas o UNICEL. Mediante el primer método se obtienen láminas de poliestireno espumado en diferentes rangos de densidad; sin embargo es difícil su conformado en piezas de geometrías complicadas por lo que su uso se limita por lo general a charolas y láminas de

embalajes; por otra parte el UNICEL permite crear piezas de estructura celular con una amplia gama de formas.

La espuma de poliestireno tiene resistencia moderada a los productos químicos, es atacado por los hidrocarburos aromáticos y los clorados como el thinner acetonas y otros. Su estabilidad al envejecimiento atmosférico es mala, ya que se amarillea y se cuartea por lo que su uso se restringe a unas cuantas aplicaciones; es decir se emplea como elemento desechable.

Una característica esencial de la espuma de poliestireno, es que posee densidades bajas y tiene buena estabilidad térmica, por lo que se puede usar como elemento estructural en la construcción o como modelos en fundiciones. Esta espuma cuenta con buenas propiedades eléctricas y absorbe poca agua.

Actualmente, la espuma de poliestireno es un material ampliamente usado. Su empleo mas común está en el embalaje donde se requiere de un material de baja densidad y relativa alta rigidez. Un claro ejemplo de su uso esta en la industria alimenticia, en charolas para alimentos como carne, pastas, alimentos preparados etc.

También es comúnmente usado en la construcción, principalmente como relleno en lozas, empleado como casetones (Figura 1.4) y bovedillas (Figura 1.5), que hacen mas ligeras las lozas y actúan como aislante térmico y acústico.

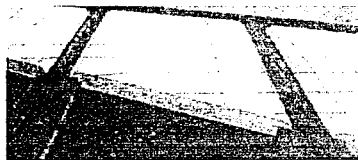


Fig. 1.4 Bovedilla de espuma de poliestireno



Fig. 1.5 Casetón de espuma de poliestireno

Estas ventajas representan grandes ahorros y relativa libertad de diseño para los constructores. El uso de la espuma de poliestireno se ha incrementado dados los "nuevos" sistemas de construcción, como lo es el panel W, el cual consiste en una malla electrosoldada, hecha con alambre de acero, la cual cuenta con un corazón de espuma de poliestireno, generalmente en tiras como se observa en la figura 1.6, aun que también se puede usar poliuretano y otros rellenos como se ve en la figura 1.7.

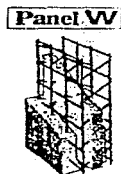


Fig. 1.6 Estructura del panel W

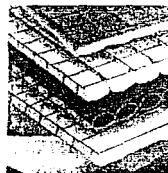


Fig. 1.7 Diferentes corazones del panel W

En otros casos se agregan perlas de poliestireno a la mezcla para hacer las lozas mas ligeras y mejorar sus propiedades termicas y acústicas.

Desde luego la fundición a la espuma perdida es una aplicación de la espuma de poliestireno, con amplias perspectivas hacia un futuro cercano, como se describe en el prólogo, ya que las técnicas para la fabricación de modelos como el de la figura 1.8 se mejoran continuamente.



Fig. 1.8 Múltiple de admisión producido mediante la fundición a la espuma perdida, a la izquierda el modelo de espuma de poliestireno

Otro uso no muy común está en nuevas tecnologías, como las membranas. Las cuales son capas delgadas de éste material que filtran moléculas en algunos compuestos.

1.4 Espumado del poliestireno

El EPS es una mezcla de poliestireno y un agente expansor que en la mayoría de los casos es gas pentano como se ilustra en la figura 1.9 ésta dispersión esta formada por una fase continua que forma el poliestireno y una fase discontinua que forma el pentano. El espumado es la acción de incrementar el volumen de la fase discontinua que a su vez incrementa el volumen de la mezcla, por lo que su densidad decrece.

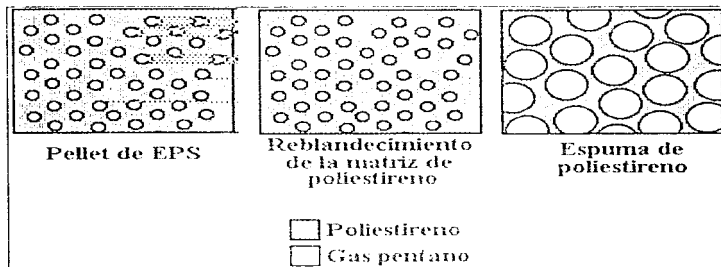


Fig. 1.9 Esquema del proceso de espumado

Durante el proceso de espumado, al pellet de EPS se le calienta a una temperatura en el rango de 102 a 120°C, mediante vapor de agua o cualquier fluido caliente. Es común el uso de vapor de agua ya que es muy eficiente en la transferencia de calor además de ayudar a la expansión; sin embargo también es posible usar aire caliente o agua.

A los 78°C el poliestireno se comienza a reblandecer haciéndose suave y dúctil, el pentano que se encuentra disperso en el, comienza a incrementar su

volumen por lo que modifica al poliestireno que se encuentra susceptible a cambios físicos.

Al llegar a un equilibrio de fuerzas entre la presión que ejerce el agente expansor y el esfuerzo que deforma al poliestireno, se llega al máximo espumado. En este punto el gas ha formado millones de pequeñas celdillas llenas de aire, vapor de agua y gas pentano.

Una vez logrado el punto óptimo de expansión cesa el suministro de calor y las perlas que se han formado pasan a una etapa de estabilización donde el poliestireno se endurece y la espuma conserva su forma. El vapor de agua y el aire penetran a las celdillas al existir un vacío debido a que el pentano se condensa cuando se enfría nuevamente.

Cuando el poliestireno expandido está conformado en piezas hechas a partir de perlas de poliestireno previamente expandidas (espumadas), el material es comúnmente conocido como UNICFL, esta forma de conformar piezas requiere de dos pasos:

1. Un preexpandido o espumado donde los pellets de poliestireno expansible se espuman hasta una densidad óptima (dependiendo de la necesidad), creando elementos individuales de diámetro pequeño, por lo general son esferas de 2-8 mm de diámetro, dependiendo de las características iniciales del pellet.
2. Un expandido final donde la perlas se expanden un 30% más, uniéndose unas con otras creando una pieza rígida de dimensiones variables.

El hecho de estar constituido por pequeñas partículas unidas entre sí, de una forma celular, le da la versatilidad para formar geometrías complejas, además de su estabilidad y rigidez. Estos atributos aunados a su bajo costo contribuyen a su amplio espectro de aplicación.

1.5 Procesos de espumado

El espumado puede llevarse a cabo de forma continua o por lotes, lo cual está en función de las necesidades que se tengan, así como de las características físicas del EPS. En ambos casos el equipo que se usa, es un tanque cilíndrico cuyo eje está orientado verticalmente, y cuenta con un agitador de paletas para mantener en movimiento al material. Este cilindro recibe vapor de agua, con el que transfiere el calor necesario para realizar el espumado.

En la preexpansión las perlas de poliestireno incrementan su volumen de 20 a 40 veces, por ejemplo de 620 kg/m^3 a 20 kg/m^3 y por lo general se usa vapor saturado como medio de conducción del calor. El incremento del volumen en las perlas depende de la temperatura y del tiempo que reciben calor, en la figura 1.10 se puede observar la relación entre estos, usando vapor como medio de transmisión de calor.

El tiempo excesivo de residencia en el preexpansor o el uso de vapor sobrecalentado puede dar como resultado el colapso de las perlas durante la descarga, ya que al recibir más calor el material está más arriba de su punto de fusión; por lo que las paredes de la celda en la espuma se hacen más delgadas y son más susceptibles a romperse ante la presión positiva que el gas ejerce cuando se calienta y aumenta su volumen o a la presión negativa cuando la perla sale y el gas disminuye su volumen al enfriarse. El vapor húmedo por otra parte no contiene demasiado calor, por lo que es preferible que el vapor que se inyecta se mantenga cerca de la saturación.

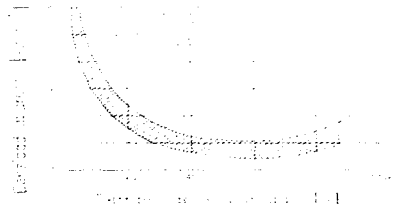


Fig. 1.10 Gráfica del comportamiento del EPS.

En la figura 1.10 el eje de las ordenadas representa la densidad aparente del poliestireno espumado, mientras que en el de las abscisas se encuentra el tiempo durante el cual se les espuma. La región sombreada de esta gráfica es una familia de curvas de presión ubicándose en la parte superior aquellas cuya presión es cercana a la atmosférica mientras que en la parte inferior, con las densidades mas bajas, aquellas cuya presión se encuentra entre 0.1 y 0.6 bar.

Sin embargo existe un límite de calentamiento en el cual la perla comienza a ganar densidad debido al proceso de adelgazamiento de las paredes en la celda de la espuma por lo que existe una región óptima de espumado, que para el ejemplo de la gráfica 1.10 se encuentra entre los 50 y 70 segundos. Estas condiciones óptimas varían según parámetros como la edad del material, contenido de gas, agente expansor, y otros que se discuten mas a fondo en el siguiente capítulo.

En el proceso de espumado es necesario revisar la densidad en intervalos frecuentes; ya que por lo regular ocurren algunas variaciones en el suministro de vapor, lo que afecta directamente al producto.

En condiciones normales la presión en la línea de vapor puede estar en el rango de 1 a 4.0 bar (temperatura de 120 a 150 °C). La presión del vapor es entonces reducida a 0.1 o 0.4 bar (temperatura de 102 a 110 °C). Para prevenir la generación de vapor sobrecalentado. En los equipos comerciales, los últimos metros de la tubería de vapor (entre la válvula de control de presión y el preexpansor) no se encuentran aislados térmicamente, precisamente para evitar que el vapor sobrecalentado afecte las perlas.

Igualmente es necesario que el condensado producto del vapor sea removido en forma eficiente, mediante una válvula de purga que se encuentre en el punto mas bajo de la línea. En el preexpansor el vapor se condensa en el pellet, lo que libera calor y produce que el estireno se reblandezca y que el pentano contenido en las perlas se expanda. Estas condiciones descritas se aplican a el proceso continuo y por lotes.

1.6 Espumado continuo

En la figura 1.11 se puede observar un esquema típico de un equipo para el espumado del poliestireno, en el se introduce el pellet por la tolva de alimentación, donde un alimentador de tornillo sinfin ingresa el pellet al interior del tanque. Por otra parte, el vapor es suministrado por las tomas de alimentación inferior y lateral, de tal forma que en la parte inferior del tanque se encuentre la mayor temperatura. En el fondo existe una placa perforada donde se separa el condensado del material, liquido condensado sale por la válvula de purga. Un agitador de paletas mantiene en movimiento al pellet el cual comienza a perder densidad del fondo hacia arriba, mientras que las paletas deflectoras que se encuentran fijas al tanque, rompen con los grupos que se forman.

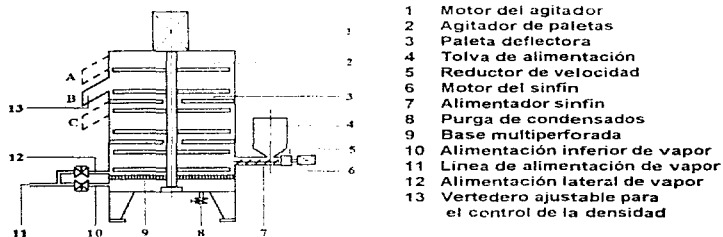


Fig. 1.11 Equipo para espumado continuo de poliestireno

Finalmente el pellet mas ligero tiende a seguir subiendo por el empuje que el pellet que esta entrando le proporciona y sale por el vertedero ajustable. En la posición A se obtienen densidades bajas, en la B medias y en la C altas, esto como efecto del tiempo que permanecen dentro del tanque.

En el espumado previo o preexpansión, la densidad de las perlas puede ser controlada de tres formas, que usualmente se realizan en el siguiente orden:

- Ajustando el suministro de energía
- Ajustando la velocidad de alimentación del pellet
- Ajustando la altura del ducto de descarga.

Estos tres procedimientos involucran el tiempo de residencia del pellet en el interior del expansor. Este tiempo puede variar de 2 a 5 minutos.

Se obtienen densidades de masa cercanas a los 12 kg/m^3 en una sola pasada; sin embargo si se requieren densidades inferiores se les da un tiempo de maduración de 3 a 6 horas, para que nuevamente se introduzcan al preexpansor bajo condiciones similares a las de la primer pasada. Para este tipo de preexpansión (2 pasadas) la densidad en la primer pasada debe llegar a ser $1\frac{1}{2}$ veces la densidad que se pretende antes del moldeo final.

1.7 Espumado por lotes

En la figura 1.12 se observa el esquema de un equipo de espumado por lotes. Cuenta con una válvula de seguridad para las sobrepresiones, las cuales son peligrosas debido a la temperatura que alcanza el vapor. En éste equipo la alimentación se realiza por la parte superior, donde una determinada carga de pellet es puesta en la tolva de alimentación para que una compuerta le permita el paso al interior del tanque.

Una vez en el interior, al igual que en el equipo continuo se le alimenta vapor mientras que un agitador de paletas mantiene en movimiento al material y unas placas deflectoras, que se encuentran fijas en el tanque rompen los conglomerados que se forman. La válvula de purga extrae los condensados que se forman y se separan mediante la placa multiperforada que se encuentra en el fondo.

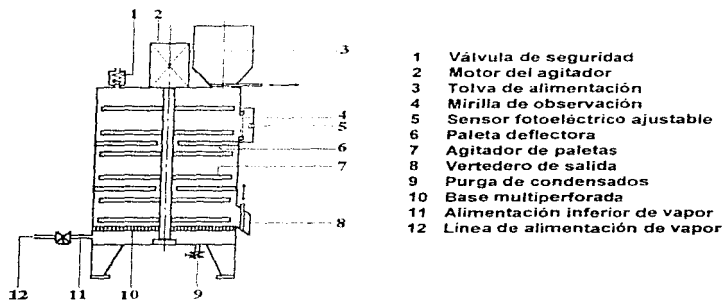


Fig. 1.12 Equipo para espumado de poliestireno por lotes

Después de un tiempo determinado, se puede observar el incremento del volumen del pellet mediante la mirilla colocada en un costado, ésta puede

contar con un sensor fotoeléctrico que detiene el proceso. Al alcanzar la densidad deseada se retira el material por el vertedero.

En este caso las perlas son expandidas bajo presiones de 0.1 a 0.6 bar regularmente. Aquí la densidad de masa de las perlas es controlada mediante el ajuste de los siguientes parámetros:

- Ajustando la cantidad de material por carga.
- Ajustando el tiempo de residencia que tienen las perlas en presencia de vapor.
- Ajustando la altura a la cual el vapor se corta si es que el equipo cuenta con un sistema de paro automático.
- Ajustando la presión del vapor
- Ajustando el gasto de vapor

Las densidades llegan a ser del orden de los 10 kg/m^3 en una sola pasada, dependiendo del tamaño del pellet y de la edad del material.

La ventaja mas significativa de este tipo de preexpansores es el hecho de que es posible obtener densidades muy bajas ($8\text{-}10 \text{ kg/m}^3$), y de existir un variación en la densidad puede ser corregida rápidamente evitando pérdidas y logrando producciones más homogéneas.

1.8 Procesos posteriores

Una vez que se ha dado el preexpandido se pasan las perlas a una cámara de reposo para evitar que ocurra un choque térmico y se colapsen, en ésta cámara el poliestireno se endurece y pueden ser llevadas a silos para su almacenamiento. Ahí maduran de 6 a 8 horas para ser llevado hasta las máquinas donde se realizarán los modelos.

Capítulo 2

Diseño y construcción del equipo para el espumado de poliestireno

2.1 Identificación de la necesidad

El uso de la espuma de poliestireno se ha generalizado al paso de los años, como se vio en el capítulo anterior éstas aplicaciones van desde embalajes, hasta aplicaciones de avanzada. Dentro de ésta gama de usos, existen algunos que no se han logrado difundir a pesar de las enormes ventajas que ofrecen. Tal es el caso de la fundición a la espuma perdida, la cuál se conoce desde los años sesenta. Este proceso de fundición supera a los tradicionales, ya que las piezas producidas son cualitativamente mejores, y más baratas.

Por desgracia, éste proceso de fundición sólo es usado por grandes compañías. Tal es el caso de la industria automotriz, ya que sólo éstas grandes compañías tienen la capacidad económica para sostener una investigación que determine los parámetros óptimos para cada pieza, además de contar con producciones suficientemente altas para lograr que la inversión inicial sea redituable.

Comercialmente no existe maquinaria de mediana capacidad, ya que en su mayoría el equipo de espumado está diseñado para la industria del embalaje, el cuál requiere de altas producciones. Es en este punto donde nace la necesidad de equipo especializado para la aplicación de la espuma de poliestireno en la fundición a la espuma perdida o en otras cuya producción sea de mediana o baja escala. Este equipo deberá permitir obtener cantidades precisas de material, con densidades específicas para cada aplicación y con el menor desperdicio posible.

2.2 Identificación de los requerimientos del equipo

Como se explica en el capítulo anterior existen ciertos parámetros esenciales para realizar el espumado, mediante los cuales, es posible controlar la densidad del producto final, ya que es muy importante que en esta etapa del proceso (espumado), se pueda obtener una amplia gama de densidades.

La densidad que se requiere está en función de las necesidades, es por ello que en la mayoría de las aplicaciones se buscan densidades bajas, ya que además de reducir costos por material se producen piezas más ligeras y fáciles de manejar; por otro lado siempre existirán aplicaciones donde sean necesarias densidades altas por, lo cual un equipo de esta naturaleza, debe ser capaz de manejar diferentes densidades.

Para tener un control sobre la densidad del material durante el espumado, es necesario manejar adecuadamente los siguientes parámetros :

Tiempo de residencia. Es el tiempo que el material se encuentra sometido a la transferencia de calor, usando como vehículo vapor de agua. El tiempo de residencia se controla directamente estableciendo el tiempo de entrada y el de salida del material; también es posible controlando el tiempo en que el proceso de espumado comienza y cuando es que termina, aún cuando el material permanezca dentro del equipo; sin embargo este método es complicado ya que aún después de haber terminado con el suministro de vapor, hay calor residual que dentro del entorno, el cual puede variar las propiedades del material ya espumado.

Calor suministrado. Es el calor que se le administra al material para que se realice el reblandecimiento del poliestireno y el incremento de volumen del agente expansor. Existen varias formas de controlar el calor, una de estas se realiza variando la calidad del vapor; usando vapor húmedo, saturado o sobrecalentado, otra es el gasto de vapor que se emplee para el proceso.

Temperatura y presión. Estas variables se encuentran ligadas una en función de la otra, conforme se aumenta la temperatura aumenta la presión, en estas condiciones se logra una transferencia de calor más rápida debido al incremento en el gradiente de temperaturas entre el vapor y el material, lo cuál en un extremo puede llegar a degradar el material: sin embargo por otro lado las presiones altas producen densidades mas bajas en el material, lo que determina que se debe llegar a un punto intermedio, en el que la presión permita optimar el proceso al máximo, sin que la temperatura tenga efectos contraproducentes.

Con el fin de obtener el control de éstas variables se definieron los valores para los siguientes parámetros:

Variable	Unidades	Rango
Presión de operación	bar	0-1.2
Volumen de producto	dm ³	2-10
Diámetro de la perla virgen	mm	0.2-2.5
Consumo de vapor	kg/hora	<5.36
Temperatura de operación	°C	20-160

Rango de presión

El rango de presión fue elegido en base a las curvas obtenidas de diferentes boletines técnicos, como el de Shell Plastics¹, donde como se observa en la figura 2.1, el rango de presión de la familia de curvas de comportamiento del styrocell, va de 0.1 a 0.3 barg; sin embargo en manuales similares de BASF², referente al mismo material que en su caso es Styropor, se menciona que el rango de presión es de 0-0.6 barg.

¹Pre-expansion and maturing of styrocell. Technical Bulletin Styrocell Technical Manual 5th Edition February 1989.

²Making cellular material from Styropor. BASF Publications B544c

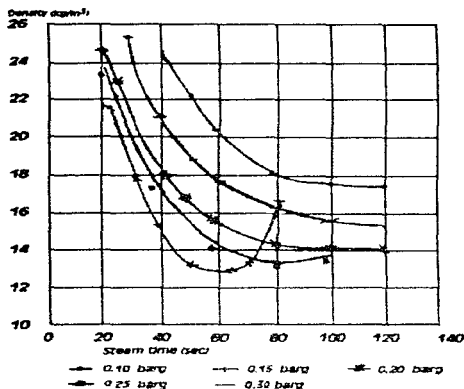


Fig. 2.1. Comportamiento del Styrocell.

Por otra parte en algunas industrias mexicanas dedicadas a este proceso³ se ha experimentado con presiones de hasta 1.2 barg, por lo que se considera a éste último como rango ideal de trabajo ya que permite experimentar espumados desde la presión atmosférica hasta altas presiones como lo es para este caso 1.2 barg.

Rango de volumen

Uno de los objetivos de este diseño, es la producción baja y media de producto, ya que en los equipos convencionales la producción es constante y por lo regular alta. En el caso de los preexpansores continuos, es necesario que el material llene el tanque hasta el vertedero de salida, ya que es la única

³Poliformas EPS S.A. de C. V. Thomas Alva Edison No.12 Parque industrial Cuamatla.

manera de asegurar que la densidad sea homogénea; por otra parte en los equipos de producción por lotes también es necesario completar la carga establecida, ya que si se procesa menos cantidad, ésta recibe más calor y crece enormemente la posibilidad de quemarla o de obtener características distintas a las deseadas.

El volumen que un preexpansor por lotes maneja, siempre tiende a ocupar su capacidad máxima, la cual fluctúa comercialmente entre 0.3 y 0.5 m³. En el caso del proceso continuo el volumen debe ser alto para poder establecer su continuidad, por lo que necesariamente el volumen producido rebasará varias veces la cifra antes mencionada.

Para que el objetivo de baja producción se cumpla, la cantidad espumada deberá ser menor a 0.3 m³; por otra parte, debido a las limitantes del generador de vapor así como la del costo del equipo, se fijó el volumen en un rango de 0.002 a 0.01 m³ (2-10 litros), ya que entre menor es el volumen, es más fácil el manejo de las diferentes pruebas con las que se pretende experimentar.

Rango del tamaño del material

Este equipo debe ser capaz de espumar un amplio rango de tamaños comerciales, por lo que según la clasificación de Polioles-BASF, se fijó el rango que esta empresa tiene, la cual contempla perlas con diámetros desde 0.2 hasta 2.5 mm.

Rango de consumo de vapor.

Sin duda alguna ésta es una de las limitantes más fuertes que se tienen en el diseño ya que el generador de vapor debe ser capaz de suministrar la cantidad necesaria de calor para que las perlas sean espumadas. Por otro lado este generador de vapor debe ser comercial ya que de requerirse una fabricación especial se encarecerá el proyecto.

Dadas las condiciones anteriores, se determinó el uso de calentadores de agua comerciales, ya que estos son capaces de alcanzar presiones de hasta 8.5 bar,

su uso e instalación es sencillo y su costo es bajo. Por lo regular, este tipo de calentadores tienen una eficiencia térmica de entre 40 y 80 %.

Mediante los datos de placa de un calentador de agua de capacidad media (38 litros), se determinó una potencia energética media. Los datos son los siguientes:

Capacidad	38 litros
Consumo energético	6800 kcal/hora
Recuperación	20-50 °C en 17 minutos

La potencia térmica real, es la cantidad de calor que el calentador suministra al fluido en cierta cantidad de tiempo, definiéndola de la siguiente manera:

$$\text{Potencia térmica real} = W_{tr} = \frac{C_p H_2O(\Delta T) \cdot \rho H_2O(\text{Volumen})}{\text{tiempo de recuperación}}$$

donde los valores en condiciones estándar son:

$$C_p H_2O = 4,1838 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\Delta T = 25 \text{ K}$$

$$\rho H_2O = 1 \text{ kg/litro}$$

$$\text{Volumen} = 38 \text{ litros}$$

$$\text{Tiempo de recuperación} = 17 \text{ minutos}$$

Substituyendo y haciendo las conversiones necesarias se obtiene que:

$$W_{tr} = 3,9 \text{ kW térmicos}$$

Si comparamos con su consumo de 7,9 kW térmicos (6800 kcal/hora) podemos determinar la eficiencia térmica:

$$\eta_{th} = \frac{W_{tr}}{\text{Consumo}} \times 100 = 49,36 \%$$

De aquí que para determinar su capacidad de producir vapor, se tomará en cuenta su potencia térmica real (W_{tr}) cuyo valor es de 3,9 kWt.

El vapor debe entrar al proceso muy cerca de la línea de saturación (fuera de la campana de humedad), no muy lejos, para que no se quemen las perlas, ni muy cerca para, que tenga suficiente energía; por lo que el vapor que entra en contacto con el material, deberá estar cerca de una presión de 1.4 bar absolutos, con una entalpía de 2700 kJ/kg.

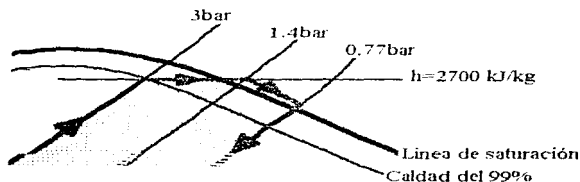


Fig. 2.2. Diagrama de Mollier

Como se observa en el diagrama de Mollier para vapor de agua (figura 2.2), existiendo únicamente válvulas entre el calentador de agua y el preexpansor, la entalpía es constante; por lo que si la presión que se maneja en el calentador de agua es de 3 bar absolutos, es posible definir perfectamente el estado al cual debe llegar el agua que se suministra a 20°C . Este punto está definido por su presión de 3 bar absolutos, calidad del 99% y entalpía de 2700 kJ/kg aproximadamente.

Si: $Wtr = GM \times (\Delta h)$ entonces el gasto de vapor (GM) es igual a:

$$GM = \frac{Wtr}{\Delta h}$$

donde:

$$\Delta h = 2700 - 4.1838(20) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = 2616.3 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Por lo tanto:

$$GM = \frac{3.9}{2616.3} = 1.5 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 5.36 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Por lo que el consumo que deberá de requerir el preexpansor deberá ser menor a los 5.36 kg/h para el caso de calentadores cuya capacidad sea mayor o igual a 38 litros. Cabe mencionar que esta situación se da cuando el calentador está con la válvula abierta y con los 38 litros de agua integros, ya que una vez en funcionamiento, y con algún porcentaje de agua consumido, si la válvula se encuentra cerrada y el calentador sobrepasa la presión determinada, éste comienza a guardar mas vapor por lo que al abrir la válvula habrá un excedente de vapor que favorece su capacidad.

Rango de temperatura

El rango de temperatura está íntimamente ligado al de presión, por lo que si tomamos en cuenta una presión de 5 bar absolutos en el calentador, el vapor alcanzará una temperatura aproximada de 150 °C por lo que el cálculo del equipo deberá ser hecho con ésta.

Además de las variables que se acaban de mencionar existen otros parámetros cualitativos:

- La superficie de la cámara de espumado.

La superficie debe de estar libre de bordes afilados o cambios bruscos en la geometría por donde el material está circulando, ya que durante el reblandecimiento el poliestireno es susceptible a cualquier deformación por pequeño que sea el esfuerzo.

- Mantener en movimiento al material.

Dado el reblandecimiento que sufre el material, este tiende a pegarse con sus semejantes, por lo que debe mantenerse en movimiento. Este movimiento debe ser suave ya que como se menciono anteriormente el material es susceptible a deformarse con cualquier esfuerzo.

- Aprovechamiento máximo del calor proporcionado.

La superficie interior deberá llevar un aislamiento térmico que la proteja del exterior, asimismo deberá exponerse la menor cantidad posible de material al exterior. Por otra parte el vapor deberá pasar la mayor cantidad de tiempo posible por donde están los pellets evitando caminos por donde pase sin tener contacto con el material.

- Evitar acumulación de condensados.

Los condensados son benéficos por que aumentan la transferencia de calor entre el vapor y la perla; por otra parte, en exceso (cuando se forman depósitos importantes de líquido) es perjudicial ya que evita la libre agitación de las perlas favoreciendo la formación de grumos.

- Que sea fácil de operar.

Deberá ser operado por una sola persona con supervisión limitada y en forma manual.

- Que sea seguro.

El preexpansor no deberá representar un riesgo durante su operación correcta, por lo que deberá estar bien aislado térmicamente y deberá proveerse con los elementos que eviten accidentes durante un posible siniestro ajeno al mismo.

2.3 Diseño conceptual del primer prototipo PEC1

Este prototipo fue diseñado pensando en crear una alternativa independiente a las ya existentes; por lo que todos los principios se revalorizaron, desde el hecho de hacer el proceso con un flujo continuo de vapor y discontinuo de material, en otras palabras un híbrido entre ambas clases de preexpansores, dando como resultado un preexpansor experimental de flujo continuo, al cual se le denominó como PEC1.

Dentro del contexto de las condiciones requeridas, en la identificación de necesidades del equipo, se definió la geometría del PEC1 como una cámara cilíndrica con eje horizontal, como se puede ver en la figura 2.3. Su perfil interior es suave y continuo, con el fin de lastimar lo menos posible a las perlas, además de que al imprimir el movimiento, adquieran naturalmente su forma esférica.

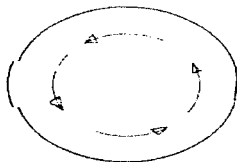


Fig. 2.3 Perfil interior.

Para dar movimiento al material existen dos opciones, la primera es mediante la energía cinética que el vapor tiene, realizando el movimiento por arrastre, mediante un flujo de vapor turbulento. La segunda es hacer uso de un agitador conectado a un motor externo.

Dado que la cantidad que se pretende espumar es relativamente baja (2-10 litros), cuya densidad es del orden de los $8-10 \text{ kg/m}^3$, se optó por la primera opción, ya que entre otras ventajas no requiere de equipo adicional para el proceso, solo se hace uso del vapor.

En base al principio de movimiento, es necesario que el vapor entre en el fondo de la cámara en forma tangencial, como se describe en la figura 2.4, esto con el objeto de que el material que se acumule en el fondo sea arrastrado por el chorro de vapor, imprimiéndole un movimiento circular al material, en el que se produzca, que las partículas más ligeras que ya se han expandido, tiendan a estar en el centro y por efecto de la fuerza centrífuga, las partículas más pesadas, tiendan a estar en contacto con la periferia y en algún momento con el chorro de vapor.

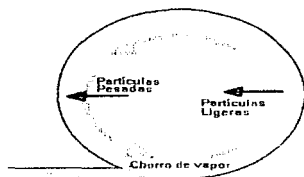


Fig. 2.2. Dinámica del vapor y el material en el perfil.

El material debe ser alimentado rápidamente y expulsado de la misma forma, para que sea lo más homogéneo posible y no se tengan variaciones entre las perlas. Por lo que se decidió que se usara el mismo chorro de vapor para realizar el arrastre del pellet hasta la cámara de espumado; de tal forma que el arrastre y el movimiento son producidos por la energía cinética del vapor.

Como se ve en la figura 2.5, debajo del contenedor de pellet, existe un estrangulamiento con un efecto de tobera, en el que a su salida, está en contacto con el interior del contenedor, produciendo un vacío y por lo tanto arrastrando al pellet hacia los ductos de alimentación de la cámara.

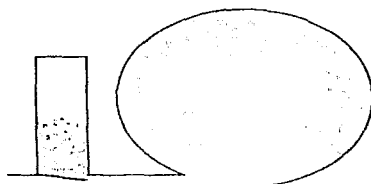


Fig. 2.5 Alimentación de material.

Para lograr la salida del material se planeó el uso de una diferencia de presiones, de tal forma que al existir una presión mayor en el interior de la cámara, y con una compuerta abierta en el sitio de más tránsito en algún punto de la periferia del cilindro, el pellet ya espumado comenzara a salir, con lo que se asegura que la mayoría esté afuera en el transcurso de una vuelta como se ve en la figura 2.6.

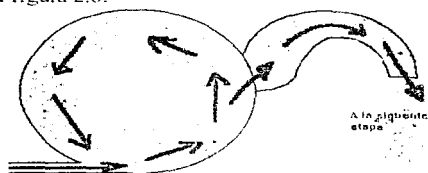


Fig. 2.6. Salida del material.

Para comprobar el principio de funcionamiento descrito anteriormente se realizó un modelo de cartón a escala 1:1, con el que se identificó el punto de mayor tráfico, el cuál es el lugar en el que se encuentra ilustrado el ducto de salida. Al realizar las pruebas en el modelo de cartón, el tráfico se observó como se ilustra en la figura 2.7:

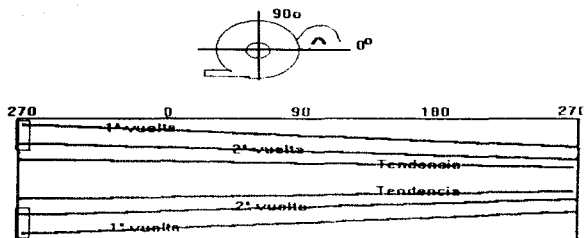


Fig. 2.7. Tendencia del material dentro del PEC1.

Como se puede observar, la tendencia es a girar en la mitad del cilindro ya que los extremos (junto a las tapas) se encuentran girando más rápido. Por otra parte a la altura de los 0° se observó que existía una tendencia a disminuir su velocidad por efecto de la gravedad, lo que produce que el material se acumule ligeramente en este punto.

Al acumularse el material, existe un desbordamiento; y se observó una tendencia a caer lateralmente hacia los chorros de vapor, donde nuevamente el material toma velocidad y el ciclo vuelve a comenzar.

Para el control de la temperatura, presión y gasto de vapor, se consideró el uso de diafragmas en los costados del cilindro. Estas aberturas permiten la salida del vapor y por lo tanto propician que el chorro de vapor tenga la fuerza necesaria para el arrastre. Por otro lado regulando estos diafragmas es posible regular la presión interior y el gasto de vapor.

2.4 Diseño de detalle del primer prototipo PEC1

Debido al uso de vapor, es necesario que el material del que se construya el preexpansor sea protegido de la corrosión o no sea propenso a ésta, por lo cual se decidió el uso de acero inoxidable para su fabricación; sin embargo dado su alto costo y difícil conformado (soldadura) se decidió hacer un modelo previo en lámina negra el cual demostraría la efectividad del diseño.

Este prototipo de lámina negra no cuenta con todos los aditamentos antes descritos, ya que sólo se pretende demostrar con este, el efecto dinámico del vapor sobre las perlas.

Dimensiones:

Las dimensiones fueron tomadas del modelo de cartón, las cuales están basadas en la menor superficie de contacto entre el interior de la cámara y el medio ambiente, esto con el objeto de reducir las pérdidas de calor por contacto y convección hacia el medio ambiente.

Partiendo de un volumen de 10 litros para un cilindro:

$$v = \pi r^2 l$$

Donde v , r y l son el volumen, radio y ancho del cilindro respectivamente. Para que se cumpla la condición de menor superficie $l = 2r$, por lo tanto:

$$r = \sqrt{\frac{v}{2\pi}}$$

Siendo el volumen 10 litros se le agregó un 20% para que el material pudiese tener movimiento, por lo que $r = 12.5$ cm, determinando finalmente un radio de 13 cm.

En el caso de los ductos de distribución se considero que cumplieren con un régimen turbulento. En este caso se propuso una sección transversal de 1x6 centímetros la cual se le realizó el siguiente análisis:

Si:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot d}{\mu}$$

donde:

Re = Número de Reynolds

 ρ = Densidad del vapor μ = Viscosidad absoluta del vapor

ρ se obtiene de tablas de vapor donde su volumen específico (a 1.3 bar absolutos presión de operación) es: $v=1325.4 \text{ cm}^3/\text{g}$; por lo tanto su densidad:

$$\rho = 0.7544 \text{ kg/m}^3$$

La velocidad se obtiene partiendo del gasto másico (GM) del calentador, con lo que se determina el gasto volumétrico (GV):

$$GV = \frac{GM}{\rho} = \frac{0.0015}{0.7544} = 1.99 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

El área del ducto está determinada por el producto de 0.06×0.01 metros, entonces $A=0.0006 \text{ m}^2$. De ahí que la velocidad se determina como:

$$V = \frac{GV}{A} = \frac{1.99}{0.6} = 3.166 \text{ m/s}$$

Se considera a d como la longitud menor en el ducto por lo que $d=0.01$ metros. Finalmente la viscosidad se encuentra en tablas, y para el vapor de agua tiene un valor de:

$$\mu = 1.02 \times 10^{-5} \text{ (N s)/m}^2$$

Por lo tanto:

$$Re = \frac{(3.166) \times (0.7544) \times (0.01)}{1.02 \times 10^{-5}} = 2405$$

Al ser el Reynolds mayor a 2000 se comprobó que se trata de un régimen turbulento.

El resto de las dimensiones fueron copiadas del modelo ya que solo se requería su carácter cualitativo por las razones antes descritas. Como resultado del análisis anterior se obtuvieron los planos para la fabricación del PEC1, denominados PEC1.1, PEC1.2 y PEC1.3 del apéndice A.

Como se puede observar en el corte longitudinal plano PEC1.2 (ver apéndice A) Figura 2.8, se conservó la geometría del diseño conceptual. En este diagrama, se pueden apreciar las zonas donde ocurre cada paso del proceso, desde donde se suministra el material hasta donde es extraído para la siguiente etapa.

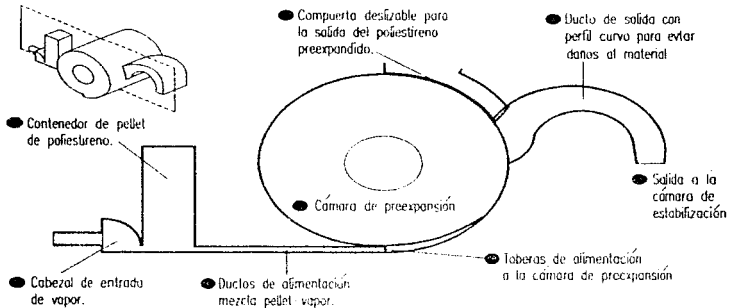


Fig. 2.8. Plano PEC1.2

El aspecto final es muy similar a lo que su vista isotérmica ofrece como se puede ver en la figura 2.9.

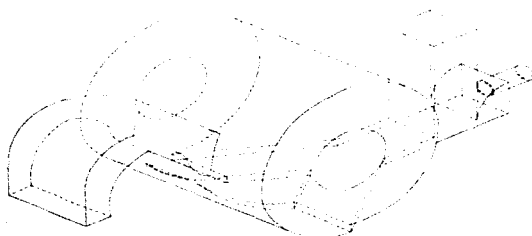


Fig. 2.9. Plano PEC1.2

2.5 Construcción del primer prototipo

Este prototipo fue hecho mediante pañería y soldadura autógena, sin material de aporte, el cual fue fabricado en el laboratorio de manufactura de la Facultad. Se emplearon 10 días hábiles para su conclusión, finalmente al comprobar que no existían fugas se corrigieron asperezas que podrían afectar el proceso y se le dio un acabado con una pintura de cromato de cromo para evitar la corrosión, además de una capa de laca acrílica color blanco para fines estéticos.

En la figura 2.10 se presenta una fotografía del modelo de lámina negra. El círculo central, es el lugar donde se colocarían los diafragma de regulación en el modelo definitivo y la izquierda de la foto se ve el cabezal de alimentación de vapor y el contenedor de pellet, en la parte inferior una regla de 30 cm muestra la escala del aparato.

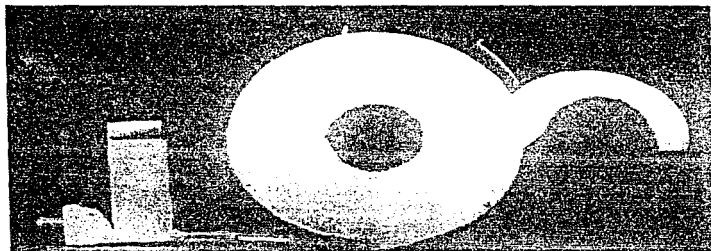


Fig. 2.10 Vista lateral.

En la siguiente figura 2.11 se observa una fotografía del ducto de salida con la compuerta en estado abierto:



Fig. 2.11 Compuerta de salida

En la figura 2.12 se observa el cabezal de admisión y el contenedor de pellet.

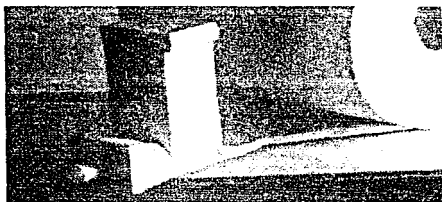


Fig. 2.12 Cabezal de admisión y contenedor de pellet.

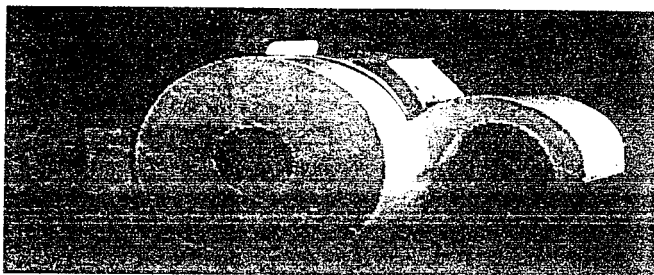


Fig. 2.13. Perfil del PE 1.

Finalmente es necesario diseñar un sistema de alimentación a la cámara de espumado de vapor y pellets.



Fig. 2.14. Ductos de alimentación a la cámara de espumado.

2.6 Descripción de operación

El procedimiento para realizar el espumado en este equipo, es muy sencillo, y se resume en los siguientes pasos:

1. Abrir la válvula de alimentación de vapor.
2. Cerrar la compuerta de descarga.
3. Cargar la cantidad necesaria de material en el contenedor de pellet, según el cálculo de volumen a obtener (10 litros como máximo).
4. Después del tiempo estimado para el espumado abrir la compuerta de salida.

2.7 Pruebas del PEC1

Para realizar la prueba se utilizó directamente el calentador de agua que se calculó al principio del capítulo, donde se alcanzan presiones de 4 kg/cm^2 a una temperatura aproximada de $120 \text{ }^\circ\text{C}$, con un gasto aproximado de 1.5 gramos de vapor por minuto. Estos experimentos fueron realizados en el laboratorio de termodinámica de la división de ciencias básicas de la facultad de ingeniería.

Se realizaron las conexiones entre el aparato y el calentador de agua mediante tubería de media pulgada de acero galvanizado y mangueras de hule.

Se realizaron básicamente dos experimentos, el primero en vacío seguido de uno con carga de EPS:

Prueba en vacío.

Esta prueba demostraría el efecto de la geometría en el aparato, por lo que se dio paso al vapor cuando éste tenía una presión aproximada de 3.5 kg/cm^2 , aquí se pudo observar una especie de vórtice, que se forma en el interior de la

cámara y como es que sale el vapor por los costados, que es precisamente el comportamiento que se esperaba.

Prueba con carga.

Esta prueba tuvo como objeto demostrar el efecto del vapor sobre el material física y dinámicamente, por lo que una vez que se constato la dinámica del flujo, se le agrego una carga de pellet en el contenedor, aproximadamente 100 ml de Styropor P-1015:

Styropor P-1015		
Distribución particula	>1.65 mm	01.0% máx.
	>1.00 mm	94.5% mín.
	<1.00 mm	05.5% máx.
	<0.67 mm	00.0%
Contenido agente neumático	5.5 - 7.0 % peso	
Contenido monómero residual	0.15 % máx.	
Contenido humedad total	1.0 % máx.	
Densidad aparente (1 atm)	11 - 30 kg/m ³	

Seguido de esto se dio paso al vapor. El vapor comenzó a realizar el arrastre; sin embargo al tiempo que esto, ocurría también el flujo de vapor que entraba a la cámara disminuyó hasta que cesó completamente.

2.8 Análisis de resultados del PEC1

El principal problema que presenta este equipo, son los ductos de alimentación ya que como se demostró anteriormente, las dimensiones que tiene son las mínimas para asegurar un régimen turbulento, de lo contrario al hacer estos ductos mas amplios el flujo tendería a ser laminar por lo que el arrastre se reduciría y prácticamente no existiría agitación.

El hecho de que los ductos se comenzaran a obstruir, radica en que las perlas comienzan muy rápido su expansión, ya que desde el instante en que están en

el contenedor de pellet, éstas se calientan; por lo que cuando se encuentran con el chorro de vapor, prácticamente estallan inflándose súbitamente y al final del ducto ya han duplicado su volumen lo que produce que se comience a obstruir el paso y finalmente se sellen los ductos.

Otro problema es la presión de operación, ya que si se deseara una presión mayor en el interior de la cámara, al colocar los diafragmas reguladores el flujo de vapor disminuiría, por lo que nuevamente el número de Reynolds en los ductos se reduciría provocando menos agitación. El hecho de no poder variar el rango de presión limita nuestro rango de densidad final.

En conclusión

Este aparato no cumple con los objetivos propuestos, principalmente por el efecto negativo que produce el precalentamiento de material y su consecuencia que es la obstrucción de los ductos. En segundo lugar, dado que los rangos de presión no se cumplen, se afectan directamente los rangos de densidad esperados, lo cual limita en gran medida la aplicación de este equipo.

En base a lo anterior, se decidió no efectuar reparaciones o modificaciones a este diseño, ya que además de ser complicado, habría que modificar más del 50 %, por lo que se decidió por una reevaluación completa, mediante un nuevo diseño que se denominó PEL2.

Este nuevo diseño deberá contar con los aspectos positivos del PE1 que funcionaron con éxito, tales como superficie de trabajo, dinámica del vapor, y las características que se definieron como requerimientos para este diseño.

2.9 Diseño conceptual del segundo prototipo PEL2

Este diseño se basa en los parámetros determinados al inicio de este capítulo, además de la experiencia adquirida con el PEC1; por lo que una de las modificaciones esenciales en este segundo prototipo, es la versatilidad.

Esta versatilidad, no se refiere únicamente a su capacidad de combinar las variables fundamentales del proceso, si no a la posibilidad de intercambiar físicamente sus elementos, con el fin de realizar modificaciones tanto en el proceso, como en el mismo aparato, a pesar de aumentar la complejidad del equipo.

Tipo de proceso. Se eligió que este preexpansor fuese de producción por lotes, ya que con ésta clase de equipo es posible tener un control más eficiente sobre el volumen a producir, sobre la presión durante el proceso y por ende la densidad del producto final.

Geometría y agitación. Ya que la agitación es un factor determinante en el proceso, y como la energía cinética del vapor no es suficiente para transmitir movimiento al material (como se demostró con el prototipo anterior), es necesario el uso de un elemento externo que realice esta acción. Por esa razón, se decidió el uso de un agitador de paletas, lo que en cierta medida determino que la geometría del PEL2 fuese cilíndrica, además de las siguientes razones:

- Para que la flecha con paletas pueda mover todo el material, éste tendrá que estar al alcance de ella, por lo que el extremo de las paletas barren y definen una superficie cilíndrica, la cual es necesaria para asegurar el movimiento uniforme del material.
- Al igual que en el prototipo anterior, el perfil de la superficie, debe ser suave y libre de bordes, para evitar que las perlas se maltraten. Una superficie cilíndrica asegura éstas características.

Este cilindro tiene su eje principal orientado verticalmente, ya que un fondo plano ofrece grandes ventajas en cuanto a la alimentación tanto del vapor

como la del material, así mismo para la recolección de condensados como se observa en la figura 2.15.

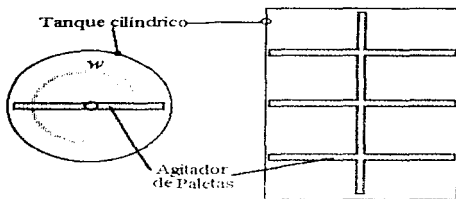


Fig. 2.15. Geometría del PEL2.

El uso de un agitador de paletas acarrea problemas como la formación de grumos, los cuales se adhieren a las mismas paletas, ya que al estar en movimiento, las perlas no se pegan a las paredes del cilindro, y tienden a seguir el movimiento del agitador, produciendo que la masa completa comience a girar, lo que favorece la producción de grumos.

La solución a este problema es instalar paletas deflectoras fijas a las paredes del cilindro, para que éstas rompan con dichos grumos como se observa en la figura 2.16:

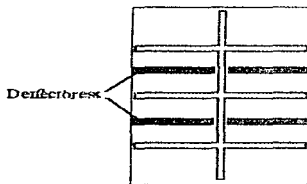


Fig. 2.16 Uso de deflectores en el PEL2.

Alimentación de vapor. En este caso, al estar los pellets en movimiento debido al agitador de paletas, no es necesario que el vapor entre de manera que haga mover los pellets, por lo que se busca que éste logre transmitir el calor lo más uniformemente posible al pellet, con el fin de que se obtengan densidades más homogéneas.

El tubo que lleva al vapor, es introducido lateralmente para no ocupar demasiado espacio en el fondo, ya que allí se depositara el condensado. El mencionado tubo conecta en el interior con un alimentador, el cual dirige el chorro de vapor hacia arriba, como se observa en la gráfica 2.17.

Por encima de este alimentador debe existir una tamiz que evite que la perla virgen pase al alimentador o a los condensados, evitando de esta manera que se obstruya algún conducto, por otra parte al tener una separación entre la salida del alimentador y el tamiz se logra un área de contacto del vapor más amplia sobre el pellet, lo que produce una transferencia de calor más uniforme. El chorro de vapor, también tiene la función de fluidizar el fondo, repartiendo el material por todo el cilindro y distribuyendo el esfuerzo de agitación a lo largo de todas las paletas, ya que se crea un lecho parcialmente fluidizado.

Así mismo la mezcla del chorro de vapor y el movimiento del agitador, lograra que las perlas mas pesadas caigan al fondo para que reciban mas calor mientras que en la parte superior tenderán a estar las mas ligeras, que ya se han expandido.

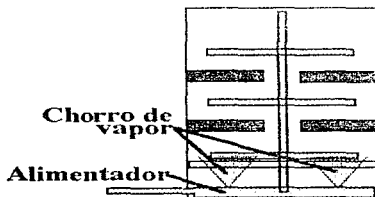


Fig. 2.17 Alimentación de vapor.

Alimentación y salida del material. El material se introduce por la parte superior, ya que al ser ésta la parte mas fría del equipo se evitan precalentamientos del material como en el PEC1, la gravedad hace que descienda hasta las mallas, mismas que lo ponen a disposición de los chorros de vapor.

Para la alimentación se diseñó una compuerta ubicada en la tapa la cual permite un sello similar al de una válvula automotriz, como se ve en la figura 2.18. Otra opción, es que la tapa sea desmontable: aun que esto solo sea para el prototipo debido a que será necesario una constante inspección de los elementos interiores.

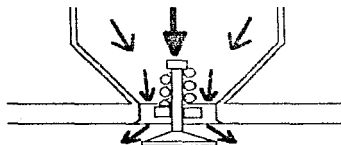


Fig. 2.18 Croquis del sistema de alimentación de pellet.

La salida del material se puede llevar a cabo con una compuerta lateral en el fondo del cilindro, ya que se puede considerar al material como un líquido, el cual, tiende a ocupar el recipiente que lo contiene, y al tener este una abertura en el fondo, el material tenderá a salir por ahí como se observa en la figura 2.19.

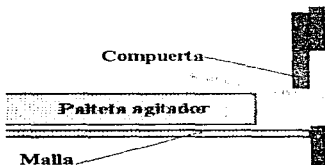


Fig. 2.19 Croquis del sistema para la salida del material.

Al igual que en el caso del sistema de alimentación (de pellet), esta compuerta de salida no se realizará en el prototipo ya que complica la construcción del mismo y su funcionamiento puede influir negativamente en otros principios de operación.

En el caso de un equipo comercial, es conveniente que la entrada y salida del material, se realice de forma fácil y semiautomática, ya que ahorra tiempo y mejora la eficiencia global del equipo.

Control de temperatura y presión. En este caso la presión interior debe estar en el rango previsto (0-1.2 barg); y para lograr que el vapor deje la mayor cantidad de energía dentro del cilindro, su entrada deberá encontrarse en la parte inferior del cilindro.

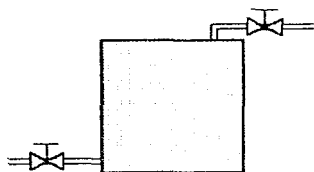


Fig. 2.18 Sistema de válvulas.

Mientras que en la parte superior; es necesario tener una válvula que regule el gasto de vapor, y simultáneamente (en conjunto con la válvula inferior) regule la presión interna. Es conveniente que esta segunda válvula se encuentre arriba; ya que al extraer el vapor en la zona mas fría del cilindro, se asegura el vapor haya tenido contacto con el pellet y perlas espumadas.

Aislamiento térmico y soporte. Para asegurar que se pierda la menor cantidad de energía por transferencia de calor al ambiente, es necesaria una carcasa, la cual simultáneamente tenga la función de soporte general, encerrando todo el conjunto antes descrito.

2.10 Diseño de detalle del segundo prototipo PEL2

Dimensiones del cilindro presurizado

Las dimensiones nuevamente se rigen por el volumen a espumar; sin embargo en ésta ocasión, el uso de un agitador de paletas limita el radio del cilindro, ya que una velocidad extrema en la punta del agitador dañaría el material.

El volumen predeterminado fue de 30 litros (3 veces el volumen a espumar), ya que en ésta coacción es necesario un espacio del doble del anterior para que las perlas tengan libertad de movimiento; así mismo es necesario contemplar un volumen muerto de aproximadamente 10 litros, este volumen muerto es ocupado por diferentes accesorios, como las mallas de separación, agitador, deflectores etc.

El diámetro se fijó en 29 cm, ya que es necesario que la cámara de espumado¹ tenga la menor cantidad de volumen en contacto con el cilindro, para evitar pérdidas de energía a través de ésta.

$$\text{Si } v = 0.03 \text{ m}^3 \quad \text{entonces } v = \pi \cdot r^2 \cdot l$$

$$\text{y como } r = 0.145 \text{ m}$$

$$l = \frac{v}{\pi \cdot r^2} = \underline{0.45 \text{ m}}$$

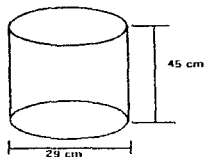


Fig. 2.19 Croquis de dimensiones

El resultado de lo anterior, se encuentra detallado en el plano PEL2.6 del apéndice B.

¹La cámara de espumado es la región delimitada por el cilindro presurizado el nivel de mallas y el nivel de la brida.

Ya que este preexpansor es técnicamente un tanque presurizado con agitador, se busco alguna norma que señalara el procedimiento par el calculo de tanques a presión. En la literatura existen muchos manuales y libros expresamente dedicados a estos cálculos.

En ésta bibliografía se recomienda el uso de modelos matemáticos ya establecidos para ese fin, los cuáles están fundamentados en la norma ASME Sección VIII división 1 y 2. En la división 1 se regulan los procedimientos a seguir según el fin al que se someterá el tanque; mientras que la división 2 provee líneas específicas para determinar el efecto de los esfuerzos combinados. El análisis de esfuerzos realizado en la división 2, considera todo tipo de esfuerzos en estado triaxial, de acuerdo con la teoría del máximo esfuerzo cortante.

Sin embargo, el texto así como los cálculos desarrollados en el presente análisis solo considerarán un estado biaxial de esfuerzos, de acuerdo con la teoría del esfuerzo cortante máximo, lo cual se demuestra esquemáticamente en la figura 2.20.

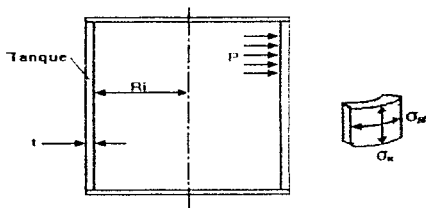


Fig. 2.20 Esquema de variables y esfuerzos.

Analizando el tanque longitudinalmente (x) y circunferencialmente (ϕ) se tienen los siguientes modelos matemáticos para determinar el correspondiente esfuerzo en el cilindro:

$$\sigma_x = \frac{P \cdot R_m}{2 \cdot t} \quad \sigma_\phi = \frac{P \cdot R_m}{t}$$

donde Rm es el radio medio. A partir de éstas ecuaciones se obtienen las expresiones que determinan el espesor mínimo permisible (t):

$$t = \frac{PRi}{2SE + 0.4P} \quad t = \frac{PRi}{SE - 0.6P}$$

donde S es el esfuerzo permisible y E es la eficiencia de la unión la cual se determina mediante tablas.

De ahí que :

$$\begin{aligned} S &= 380 \text{ MPa} \\ P &= 1.2 \text{ bar} \\ Ri &= 14.5 \text{ cm} \\ E &= 0.45 \end{aligned}$$

Por lo tanto, al substituir y hacer las conversiones de unidades, se tiene que:

$$t = 0.10 \text{ mm}$$

para ambos casos.

Este valor corresponde a un calibre de lámina inferior al 32. De hecho ésta lámina sería muy difícil de soldar; además de que en ella no se podría agregar ningún elemento de soporte. Dado lo anterior, se determinó el uso de lámina calibre 18 (1.21 mm).

Al realizar el análisis anterior con lámina calibre 18, la presión máxima permisible (P) alcanza un valor de 14.2 bar. Por lo que al construir el cilindro con esta lámina el factor de seguridad es:

$$F.S. = \frac{P_{estimada}}{P_{operación}} = \frac{14.2}{1.2} = 11.83$$

Por otra parte el resultado de los esfuerzos usando lamina calibre 18 es:

$$\sigma_{\lambda} = 7.19 \text{ MPa} \quad \sigma_{\phi} = 14.38 \text{ MPa}$$

que como ya se había previsto, estos valores están muy lejanos al punto de fluencia del material (380 MPa).

Para el cálculo de tapas planas existe el siguiente modelo matemático:

$$t = d \cdot \sqrt{\frac{C \cdot P}{S \cdot E}}$$

Donde C es un factor que depende del tipo de soldadura usado; éste factor también está tabulado, y se encuentra como cabezas planas de soldadura a tope, cuyo valor de C es igual a 0,33 como se observa en la figura 2.21.

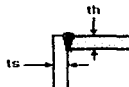


Fig. 2.21. Esquema de soldadura a tope con factor $C=0.33$

En este caso la eficiencia de la unión (E) es de 0.8 ; ya que además de la soldadura en la lámina, existe un refuerzo que consiste en dos aros de cuadrado de acero 1020. Uno de ellos se encuentra soldado a la lámina del cilindro y el otro lo está a la tapa. Finalmente ambos se sueldan entre sí, como se observa en el croquis de la figura 2.22.

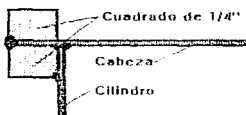


Fig. 2.22. Corte de soldadura entre cilindro y cabeza.

Substituyendo y haciendo las conversiones de unidades correspondientes se obtiene que

$$t = 0.3367 \text{ mm}$$

Lo cual corresponde aproximadamente un lámina calibre 29; sin embargo al igual que en el caso del cilindro, aquí se utilizará lámina calibre 18, por lo que la presión que ésta tapa soportará será de 15.5 bar, produciendo que el factor de seguridad en este caso sea de:

$$F.S. = \frac{P_{estimada}}{P_{operación}} = \frac{15.5}{1.2} = 12.9$$

En conclusión, dado el análisis anterior, el tanque se realizará completamente en lámina calibre 18 (1.21 mm de espesor), ya que como se demostró, éste es capaz de soportar la presión con un factor de seguridad mayor a 10.

Dimensiones de la carcaza

La carcaza cumple fundamentalmente con el trabajo de soporte del cilindro presurizado, por lo que se definió su material como lámina calibre 13 (2.28 mm de espesor) ya que éste material, resiste golpes de trabajo que pueden causar abolladuras, además tiene excelente estabilidad y sobre todo facilidad para su construcción.

Se definió un espacio de 5 cm entre el tanque presurizado y la carcaza, ya que es necesario colocar ciertos instrumentos y tuberías entre éstos; por lo que con 5 cm, se asegura que existirá facilidad para realizar las conexiones y los movimientos del equipo que sean necesarios. En cuanto a la altura, es necesario poco espacio entre las tapas y fondos, ya que esto contribuye a dar mayor estabilidad en la unión de ambos, por lo cuál se determinó que existiese un espacio de 1.5 a 2 cm entre los fondos y tapas.

En el caso de la carcaza se previó una entrada para la línea de vapor, la cual se encuentra encerrada en un ducto trapezoidal, éste evita que el operario tenga la posibilidad de sufrir alguna quemadura por la temperatura de la línea. Por otra parte también se tomó en consideración la salida del pellet, para lo cual se acondiciono una salida con compuerta, misma que se habilitará una vez que el prototipo demuestre su efectividad.

La carcaza resultante puede observarse en el plano PEL.2.1 del apéndice A. Así como en las fotografías de la figura 2.31.

La tapa de la carcaza, deberá soportar la fuerza que ejerce la presión interior, debido a que la tapa del cilindro presurizado está unida a la tapa de la carcaza. Para poder realizar con facilidad la apertura y cierre de la misma se propuso el uso de 3 broches descritos en el plano PEL.2.10, mismos que se pueden observar en la figura 2.37.

La presión máxima es de 1.2 kg/cm^2 lo que es igual a 0.12 MPa . El área de la tapa está definida por:

$$A = \pi \times r^2$$

el radio tiene un valor de 0.145 m , por lo que $A = 0.0661 \text{ m}^2$. La fuerza que ejerce la presión interior sobre la tapa es de:

$$\begin{aligned} \text{Fuerza} &= (\text{Presión}) \times (\text{Área}); \\ F &= (120 \text{ kPa})(0.0661 \text{ m}^2) = \mathbf{7.93 \text{ kN}} \end{aligned}$$

Si se colocan tres de estos broches equitativamente la fuerza se repartirá entre ellos; por lo que cada broche tendría que soportar una fuerza aproximada de 2.64 kN .

Como se puede observar en la el plano PEL.2.10 la sección mas delgada en el broche son los pernos que fijan las horquillas, cuya sección tiene un área de $3.12 \times 10^{-5} \text{ m}^2$.

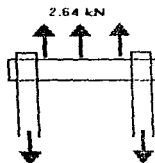


Fig. 2.23 Fuerza sobre el broche

Cada broche está sometido a las fuerzas de la manera esquemática que representa la figura 2.23, por lo que se puede observar que cada perno recibe una fuerza de 2.64 kN , la cual se divide en ambos extremos, cada uno con la mitad de la fuerza es decir 1.33 kN lo que representa un cortante puro de:

$$\tau = F/A = \frac{1.33}{3.12 \times 10^{-5}} = \mathbf{42.62 \text{ MPa}}$$

Tal esfuerzo está aun muy alejado del cortante máximo, el cual es del orden de 200 MPa ; por lo que se puede trabajar con un factor de seguridad cercano a 5.

Los planos de la tapa de la carcaza así como del cilindro presurizado se pueden observar en el apéndice A (bajo la identificación PEL2.2 y PEL2.5 respectivamente).

Sistema de agitación

El sistema de agitación se compone de:

- Carcaza del motor (PEL2.3 y PEL2.4)
- Motor de ½ HP rotor devanado.
- Juego de poleas de reducción (PEL2.12 y PEL2.13)
- Banda plana de lona con caucho (Fabricación especial)
- Brida de acoplamiento flexible (PEL2.14 y PEL2.15)
- Agitador de paletas (PEL2.12)
- Soporte superior para rodamiento (PEL2.7)
- Deflectores fijos (PEL2.9)

Dado que el material en si representa poca fuerza, se empleo un motor de ½ HP de rotor devanado, empleado comercialmente en licuadoras. Fue elegido en base a su alto par de arranque y la facilidad para variar su velocidad. Lo cual es conveniente si se requiere trabajar con diferentes cantidades de material.

El motor se encuentra sujeto a su carcaza, la cual a su vez se encuentra fija a la tapa de la carcaza principal, como se observa en la figura 2.24.

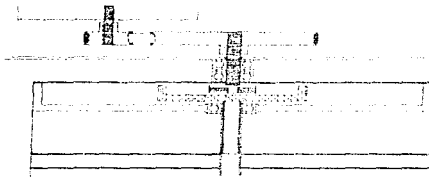


Fig. 2.24 Corte del sistema de agitación.

En la figura 2.24 se puede observar la flecha del motor acoplada con la polea menor (PEL2.12), la cual le transmite potencia a la polea mayor (PEL2.13)

mediante la banda plana. Esta banda esta hecha de lona con caucho con una sección de 3 mm de espesor por 10 mm de ancho. La longitud se determinó mediante la relación:

$$L = \sqrt{4C^2 - (D - d)^2} + \frac{1}{2}(D \cdot \theta_D + d \cdot \theta_d)$$

donde

- L = Longitud de la banda
 C = Distancia entre centros = 9.5 cm
 D = Diámetro de la polea mayor = 12 cm
 d = Diámetro de la polea menor = 3 cm

$$\theta_D = \text{Ángulo de contacto de polea mayor} = \pi + 2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{D-d}{2 \cdot C} \right) = 4.14 \text{ rad}$$

$$\theta_d = \text{Ángulo de contacto de polea menor} = \pi - 2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{D-d}{2 \cdot C} \right) = 2.15 \text{ rad}$$

como se aprecia en la figura 2.25A.

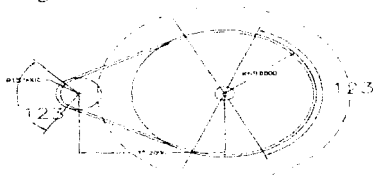


Fig. 2.25A Croquis del arreglo de poleas. (Acot: mm)

Lo que da como resultado una longitud de 44.77 cm.

La polea mayor está unida a la brida flexible. Esta brida permite montar y desmontar las tapas, y por consiguiente el acoplamiento entre las flechas (la de la polea mayor y la del agitador) las veces que sea necesario, además de transmitir la potencia sin deslizamiento.

Otra ventaja de esta brida y quizá la más importante es el hecho de que ambas flechas pueden o no estar concéntricas y la potencia aun se transmite íntegramente. Los centros pueden estar desfasados hasta 1 cm como se representa en la figura 2.25B.

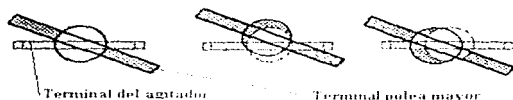


Fig. 2.25B Esquema de la brida flexible.

Ambas tapas, tanto la de la carcasa, como la del tanque presurizado están unidas mediante 4 tornillos de $\frac{1}{2}$ ", como se observa en la figura 2.24 en su interior existen dos rodamientos los cuales permiten que la flecha de la brida permanezca siempre en posición vertical.

Mas abajo se encuentra la contra parte de la brida, la cual asemeja una "Y", ésta se encuentra fija a la flecha del agitador y este a su vez esta fijo y centrado al cilindro presurizado mediante el soporte del rodamiento (PEL2.7).

El agitador está hecho con tubo de aluminio, unidos perpendicularmente a éste, existen 10 tramos de 12 cm de largo como se pueda observar en el plano PEL2.8, los cuales hacen el trabajo de la agitación.

En las paredes del tanque se encuentran intercalados tubos de aluminio iguales a los del agitador (deflectores). Estos tienen la función de romper los grumos que se forman en el material. Los deflectores (PEL 2.9) se encuentran montados sobre bases de lámina unidas mediante soldadura de punto, como se observa en el plano PEL2.6, y como se aprecia en la fotografía de la figura 2.26.

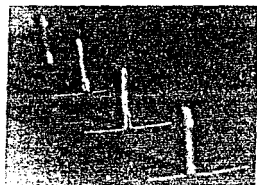


Fig. 2.26 Bases para deflectores

Sistema de vapor.

El vapor se maneja mediante tubería de acero galvanizado de 1" de diámetro, antes de entrar al preexpansor, se reduce a media. En el interior y la salida se conduce por medio de tubo de cobre de $\frac{3}{8}$ ".



Fig. 2.27. Anillo distribuidor.

Al entrar al interior del cilindro presurizado, el vapor es distribuido por un anillo hecho con tubo de cobre de $\frac{1}{2}$ " , el cual tiene perforaciones que dirigen al chorro de vapor hacia arriba, como se puede apreciar en la figura 2.27.

Es necesario que el vapor se estrangule en el extremo opuesto de la entrada, con el fin de que el calor sea aprovechado al máximo. Mediante tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ " , el vapor es conducido a través de la perforación que se puede apreciar tanto en la tapa del cilindro presurizado, como en la tapa de la careza (PEI.2.2 y PEI.2.5). En la salida es necesario que exista otra válvula de globo, para poder regular el flujo de vapor y tener control sobre la presión interior del cilindro.

Sistema de purga

Como se menciona en el diseño conceptual, es imprescindible que se drene periódicamente el agua del fondo; ya que el condensado puede provocar concentraciones de líquido que afectan al proceso, es por ello que haciendo uso de la diferencia de presiones, se colocó un tubo de cobre de $\frac{1}{4}$ " , el cual regula su flujo mediante una válvula que se encuentra en el exterior como se ve en la figura 2.28.



Fig. 2.28. Sistema de purga continua.

La "S" que se observa entre la válvula y el elemento terminal, sirve como elemento flexible que evita el mala tallo de este sistema. Es importante que la punta del elemento final este orientada hacia abajo, para que solo absorba líquido, ya que es posible que por algún motivo ajeno al proceso normal, absorba un pellet que obstruya al sistema.

Como se menciona en el diseño conceptual, debe existir un tamiz que evite el paso del pellet al fondo. Este tamiz está formado por dos medios círculos de madera, recubiertos con una malla de acero galvanizado que le da la rigidez y una malla fina de aluminio con claro de 0.3 mm que filtra el pellet, como se ve en la figura 2.29. Al estar este tamiz dividido por la mitad, le permite ser removido e instalado sin necesidad de retirar el agitador.



Fig. 2.29. Mallas separadoras

Instrumentación

Para la instrumentación se diseñó un tablero de control (figura 2.30) que se colocó en un costado de la careza principal, éste cuenta con termómetro, manómetro, cronómetro y una resistencia variable para controlar la velocidad del motor.



Fig. 2.30 Tablero de control.

El manómetro tiene una escala de 0 a 7 kg/cm^2 con una precisión de $\pm 0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$. El termómetro es de carátula con una precisión de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Finalmente el cronómetro cuenta con una precisión de ± 0.5 segundos.

2.11 Fabricación del segundo prototipo

El PEL2 fue hecho mediante soldadura de arco eléctrico con electrodo E-6013, en las uniones del tanque a presión como en la careaza. También se realizaron uniones mediante soldadura de punto. Lo anterior se desarrolló en el laboratorio de manufactura de la Facultad de Ingeniería, e un periodo de 30 días hábiles.

El ensamble y maquinado de las distintas piezas requirió de más de 60 días, debido a la complejidad del equipo así como a las diferencias entre piezas comerciales y especiales. El tanque a presión fue recubierto con una capa de pintura anticorrosiva, especial para altas temperaturas (hasta 540 °C). La careaza fue recubierta con anticorrosivo y con una capa de Laca acrílica color plata, como se ve en las fotografías de la figura 2.31.

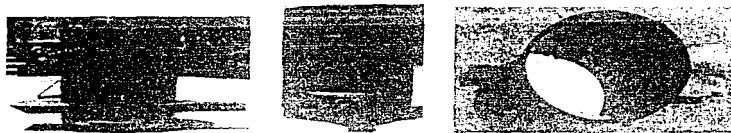


Fig. 2.31. Aspecto final de la careaza principal.

El tanque presurizado fue construido en acero inoxidable y este se le reforzó con un anillo de refuerzo construido en aluminio, como se ve en la Fig. 2.32.



Fig. 2.32. Tanque presurizado.

En la fotografía de la derecha (fig. 2.32) se puede observar el fondo del tanque presurizado, así mismo se puede observar en el fondo, el elemento terminal de la línea de purga, el tubo distribuidor de vapor y el rodamiento del agitador de paletas; éste último se encuentra fijo mediante una base hecha con lámina calibre 18, unida al fondo mediante soldadura de punto.

En la figura 2.33 se puede apreciar el agitador de aluminio (imagen de la izquierda), así mismo a la derecha se encuentra nuevamente, ahora con su soporte superior, el cual lo mantiene centrado en la boca del cilindro. En la misma fotografía de la derecha se puede apreciar la contra parte de la brida flexible.

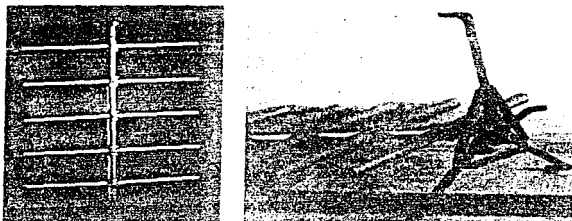


Fig. 2.33. Agitador de paletas.

El ensamble de los cilindros se llena a cabo mediante madera de pino de primera, esta madera al tener pocas resinas es un elemento muy resistente sobre todo en medios húmedos como el que se requiere, además de que es un buen aislante térmico.

Las mallas de la figura 2.29 se instalan sobre la tubería, aproximadamente 5 cm sobre el nivel del fondo, como se puede apreciar en la figura 2.34. Ahí mismo es posible apreciar como es que se han colocado los deflectores.



Fig. 2.34 Ensamble de mallas y deflectores.

El agitador es colocado en sus correspondientes soportes, para que finalmente se instale la brida flexible, como se observa en la figura 2.35.

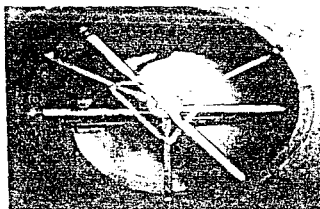


Fig. 2.35 Ensamble del agitador y transmisión.

Esta brida entra en el centro de la flecha del agitador y es asegurada mediante una chaveta, la cual pasa a través de un agujero que la brida posee en su parte inferior como se puede observar en la fotografía de la figura 2.36.



Fig. 2.36 Brida flexible (Parte inferior)

Finalmente en la figura 2.37 se presenta una fotografía de uno de los tres broches que cierran la tapa del PEL2.

Entre la carcasa principal y su tapa, así como entre el cilindro presurizado y su tapa existen empaques de hule, para asegurar el cierre hermético.

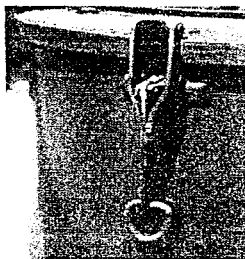


Fig. 2.37 Broche.

El resto de la fabricación consistió en la debida union de tuberías, ensamble mediante tornillos de $\frac{1}{8}$ ", como se puede observar en el plano PEL 2.16 del apéndice A.

Sistema eléctrico

El motor fue montado en su correspondiente carcasa como se observa en el plano PEL2.16. La instalación se realizó como se muestra en el diagrama de la figura 2.38, usando corriente alterna doméstica (127 V 60 Hz)



Fig. 2.38 Diagrama de conexión eléctrica

2.12 Descripción de operación

La operación de este prototipo involucra los siguientes pasos:

Pre calentamiento: Con el fin de perderla menor cantidad de energía posible durante el espumado, es necesario dar un pre calentamiento al equipo antes de comenzar una determinada serie de procesos. Este pre calentamiento consiste en dar paso libre al vapor a través del aparato durante un periodo de 30 segundos, con lo que se consigue que la cámara de espumado se caliente y al recibir la carga de pellet, ésta no tarde en reaccionar.

Alimentación de material: La alimentación se lleva acabo abriendo los 3 broches de la tapa, e introduciéndolos manualmente por la parte superior.

Agitación: Inmediatamente después de la alimentación es conveniente iniciar la agitación; ya que el calor posee el aparato inicia el reblandecimiento del material. La agitación se logra manipulando la resistencia variable del panel de control.

Suministro de vapor: Cuando el operador se asegura de que los broches están bien cerrados y el agitador funciona debidamente, se da inicio a la cuenta del cronómetro, simultáneamente se le da paso al vapor gradualmente, durante los primeros 20 segundos o hasta que se alcance la presión deseada.

Apertura del PEL2: Inmediatamente después de que el tiempo predeterminado ha concluido, es necesario detener el suministro de vapor, esperar a que la presión interior llegue a cero, ayudando a esto mediante la apertura total de la válvula superior. Es necesario retirar la tapa lo antes posible ya que el calor residual sigue afectando directamente a las perlas.

Retiro del material: Al abrir la tapa es conveniente hacer gira el agitador manualmente para que las perlas se enfrien, de lo contrario éstas sufrirán abolladuras y existirán marcadas diferencias de tamaño debido a que algunas continúan arriba de su temperatura de reblandecimiento. Una vez que se encuentran estables es necesario efectuar la extracción del material manualmente.

2.13 Pruebas del PEL2

Ya que el equipo es mas complicado que el prototipo anterior, éste se probó con agua, mientras todas las válvulas se encontraban cerradas, por un periodo de 1 hora. En esta prueba se pudo observar que los cordones de soldadura se mantuvieron secos; sin embargo en el área de las entradas de la línea de vapor así como la línea de purga existían ciertas fugas que se solucionaron con empaques de caucho y sílicón.

Una vez seco el tanque se probó con aire comprimido a presión de 6 bar. La presión se incremento paulatinamente durante 3 minutos en cada prueba, hasta alcanzar una presión interior de 1.8 bar, donde se observó que existía una fuga en el área de la tapa debido a la sobrepresión. Ya que la presión máxima de trabajo es de 1.2 bar se considero que el resultado era aceptable.

El agitador fue probado con material previamente expandido, en esta prueba se confirmó el funcionamiento de la brida flexible; sin embargo se observó que la banda perdía su recubrimiento de caucho por lo que se le colocó una banda ligeramente más apretada y el problema no se volvió a presentar durante 5 pruebas en las que operó continuamente.

2.14 Análisis de resultados del PEL2

Los resultados obtenidos anteriormente son en cualquier caso aceptables; ya que las condiciones a las que se sometió el aparato fueron mas allá de sus límites de operación, con lo que se asegura una operación eficiente y simultáneamente se obtiene la seguridad de que el preexpansor no fallará ante una situación fuera de control.

En conclusión

El PEL2 cumple con todas las expectativas de operación, las pruebas previas a las que se le sometió confirman su eficiente operación, así como la seguridad del operador. Por tal motivo se considera un diseño exitoso el cual será probado más a fondo durante los procesos de espumado.

Pruebas de espumado con el PEL2

3.1 Objetivo de las pruebas

- Comprobar el funcionamiento del equipo

Es necesario, pese a las pruebas descritas en la sección 2.13 del capítulo anterior, comprobar el correcto y seguro funcionamiento del equipo, ya que el proceso involucra otras variables, bajo las cuales el equipo aún no ha sido probado, como el efecto de la humedad en los sellos y el efecto del incremento de la temperatura en los elementos mecánicos.

Fig. 3.1. Aspecto del PEL2.



- Demostrar el control sobre las variables del proceso

Existen otros factores ajenos e indeterminables en el proceso de espumado, tal es el caso por ejemplo, de la variación en el poder calorífico del gas que se emplea para producir el vapor, lo que sin duda afecta al proceso. Este tipo de variables ajenas influyen positiva o negativamente en el producto final, lo que genera ciertos rangos de variación entre los modelos y la realidad.

Para demostrar el control de las variables se experimentará con la instalación, a fin de determinar los rangos en que existe control sobre éstas.

- **Evaluar rangos de homogeneidad del producto final.**

Es importante determinar el efecto que el PEL2 tiene sobre el material, especialmente en la homogeneidad del producto, por lo que mediante estas pruebas, se determinará que tan eficientemente se lleva a cabo el espumado, y por ende que tan equitativamente se reparte la energía suministrada al pellet.

Para determinar estas variaciones es necesario realizar pruebas físicas que sean comparables con los modelos y gráficas, así como con las gráficas similares del material virgen, con el objeto de cotejar los resultados obtenidos con los esperados.

- **Determinar los parámetros aproximados para el espumado en el PEL2**

Como conclusión de las pruebas se determinarán las condiciones aproximadas para el espumado del EPS mediante el PEL2, así como del procedimiento adecuado para llevar a cabo el proceso.

3.2 Definición de las pruebas

Análisis cualitativo

Mediante las siguientes pruebas se pretende demostrar los principios de funcionamiento del PEL2, en un aspecto cualitativo, con lo que se demostrará la efectividad en el desempeño del PEL2.

Prueba 3.1

Esta prueba determinará la efectividad de los broches de cierre, así como la eficiencia de los sellos ante una presión de 0 a 1.4 kg/cm². En el capítulo 2 se describe una prueba hecha con aire comprimido a una presión de 1.4 kg/cm²,

misma que se realizará nuevamente, ahora con vapor a 1.4 kg/cm^2 y las condiciones descritas en la tabla 3.1.

Tiempo de la prueba	Presión inicial	Presión final	Temperatura máxima	Tipo de incremento de presión	Número de repeticiones
segundos	kg/cm^2	kg/cm^2	$^{\circ}\text{C}$		
300	0	1.4	140	Lineal	7

Tabla 3.1. Condiciones generales de la prueba 3.1

Procedimiento:

- La prueba se inicia con el aparato vacío y en frío.
- Válvula superior en estado abierto.
- Apertura total de la línea de vapor (gasto máximo).
- Cierre progresivo de la válvula superior durante los 5 minutos.
- Al cabo del tiempo previsto cierre de la válvula inferior.
- La prueba se repite al bajar la temperatura del equipo abajo de los 40°C .

La prueba se considera satisfactoria si durante las pruebas no existen fugas de vapor tangibles ni caídas de presión en el interior del preexpansor que puedan afectar al proceso de espumado.

Prueba 3.2

En esta prueba se determinará el funcionamiento apropiado de la flecha del agitador; así como el correcto desempeño del sistema agitador-deflectores.

El equipo es cargado con 150 gramos de perlas de poliestireno previamente expandidas (en otro medio), accionando la agitación, mediante la resistencia variable conectada al motor. Es necesario dar 3 minutos entre pruebas para el enfriamiento del motor. Las condiciones de la prueba se pueden observar en la tabla 3.2.

Tiempo de la prueba	Presión inicial	Presión final	Temperatura máxima	Velocidad del agitador	Número de repeticiones
segundos	kg/cm^2	kg/cm^2	$^{\circ}\text{C}$		
300	0	0.5	(ambiental)	Máxima	7

Tabla 3.2. Condiciones generales de la prueba 3.2

Procedimiento:

- La prueba se inicia con la carga de material prevista.
- Válvulas abiertas.
- Inicio de la agitación a velocidad máxima.
- Apertura de la válvula de admisión.
- Al cabo del tiempo previsto (300 segundos), se cierra la válvula y se detiene la agitación.
- La prueba se repite después de 3 minutos.

La prueba se considera aceptable durante las pruebas el agitador opera sin problemas.

Prueba 3.3

Esta prueba tiene como objeto verificar el funcionamiento óptimo del PIEL2 durante el proceso de espumado. El equipo es cargado con 150 gramos (carga máxima) de perlas vírgenes de poliestireno P-1015, partiendo de una temperatura menor o igual a 40 °C. Es necesario dar 3 minutos entre pruebas para el enfriamiento del motor.

Tiempo de la prueba	Presión inicial	Presión final	Temperatura máxima	Velocidad del agitador	Número de repeticiones
segundos	kg/cm ²	kg/cm ²	°C		
60	0	1.1	150	Máxima	7

Tabla 3.3. Condiciones generales de la prueba 3.3

Procedimiento:

- La prueba se inicia con la carga de material prevista.
- Válvula superior abierta.
- Válvula inferior cerrada.
- Inicio de la agitación a velocidad máxima.
- Apertura gradual de la válvula inferior hasta la abertura máxima.
- Cierre de la válvula superior hasta alcanzar la presión deseada.
- Al cabo del tiempo previsto, se detiene el flujo de vapor.
- Cuando la temperatura descienda a menos de 40 °C cese de la agitación y retiro del material.

Esta prueba se considera aceptable si el desempeño general del PEL2 no es afectado durante el proceso de espumado. Para ser aceptable es necesario que el material espumado no forme grumos, y este bien separado.

Análisis Cuantitativo

Mediante las siguientes pruebas se pretende realizar un análisis cuantitativo del funcionamiento del PEL2. De esta forma se demostrará el control sobre las variables, se evaluarán los rangos de homogeneidad del producto final y como conclusión se determinarán los rangos para el espumado.

Prueba 3.4

Esta prueba permite determinar los rangos en lo cuales es posible controlar la presión y como consecuencia de esto la temperatura. En esta prueba se realizó una serie de 30 preexpansiones, determinando las condiciones de operación en tres diferentes presiones 0.5, 0.8 y 1.1 kg/cm². En esta prueba se fija la presión (en 0.5, 0.8 y 1.1 kg/cm²) y se varía el tiempo con el fin de encontrar un punto aproximado, donde el material alcance su máximo volumen y comience a degradarse.

Para estas, pruebas se cargó el preexpansor con 50 gramos de perla virgen P-1015, partiendo de una temperatura (del aparato) de 40 °C o menos y las condiciones descritas en la tabla 3.4.

Tiempo de la prueba	Presión inicial	Presión final	Temperatura máxima	Velocidad del agitador	Número de repeticiones
segundos	kg/cm ²	kg/cm ²	°C		
30-300	0	0.5-1.1	160	Máxima	30

Tabla 3.4. Condiciones generales de la prueba 3.4

Procedimiento:

- El preexpansor deberá estar a una temperatura de 40 °C o menor, sin material en su interior.
- Se suministra el material.

- Inmediatamente después del suministro de material, se coloca la tapa y se cierran los broches.
- Al registrar una presión de $5,5 \text{ kg/cm}^2$ en la caldera se da paso gradualmente al vapor.
- Mediante el manómetro del PI:1.2 se estabiliza la presión en 0,5, 0,8 y $1,1 \text{ kg/cm}^2$ según sea la prueba.
- El tiempo previsto depende de la presión en que se haya fijado la prueba, el cual varía en intervalos de entre 10 y 20 segundos. Al término de éste, se detiene el flujo de vapor.
- Inmediatamente después de que la presión llega a cero, se abre la tapa y se agita el material manualmente.
- Retiro del material y empaquetado del mismo en bolsas bien ventiladas y etiquetadas.

Esta prueba se considera aceptable si el material no presenta grumos ostensibles debidos a la apertura súbita de la línea de vapor, lo cual se considera como un error del operador.

3.3 Pruebas de espumado



Fig. 3.2 Generador de vapor

Las pruebas se llevaron a cabo, usando un calentador de agua de 38 litros como se mencionó anteriormente, el cual se encuentra instrumentado con manómetros y termómetros como se observa en la figura 3.2. En este equipo la manipulación de las válvulas se realiza de forma manual.

En la parte superior se encuentra una salida la cual conduce al vapor por las líneas que se encuentran aisladas térmicamente. Este calentador cuenta con 4 salidas, cada una instrumentada con un manómetro y un termómetro colocados antes de la válvula.

Una vez hecha la instalación que se observa en la figura 3.3 se iniciaron las pruebas descritas en la sección 3.1.



Fig. 3.3 Instalación del PEI2.

Las pruebas cualitativas (prueba 3.1, 3.2 y 3.3) concluyeron satisfactoriamente; por otra parte, las pruebas que determinan los efectos de las variables en el espumado (pruebas 3.4) tuvieron dificultades en cuanto al tiempo que el proceso requería para espumar. Aunado a lo anterior la limitante en la disponibilidad del material, produjo que solo se obtuvieran 13 pruebas analizables, las cuales se clasificaron y etiquetaron para su análisis posterior.

3.4 Evaluación de las pruebas de espumado

Prueba 3.1

El comportamiento del PEI2 fue aceptable en los rangos de presión y temperatura a los que se le sometió. Las lecturas del termómetro tuvieron un retardo de aproximadamente un minuto, por lo que las temperaturas que éste reporta, no son confiables y es necesario que por medio del dato de presión y una tabla de vapor o un diagrama de Mollier se determine la temperatura interior.

Respecto al sistema de cierre, éste fue bastante eficiente ya que en ningún momento se vio forzado o con fugas tangibles. Al llevar la presión interior mas allá del límite de diseño (1.2 bar), aproximadamente a los 1.4 kg/cm² se comenzó a escapar el vapor por la boca del cilindro presurizado; el vapor

entró entre ambos cilindros, ahí se condensó y finalmente se drenó por el fondo. Este comportamiento fue común en las 5 pruebas realizadas.

Como conclusión de esta prueba, comprobó que su operación es segura y eficaz ante las condiciones a las que se le sometió (1.4 kg/cm^2 , 120°C con carga de 150 g de EPS P-1015).

Prueba 3.2

En este caso la flecha fue capaz de realizar la agitación del material ya expandido; se observó que existía cierto deslizamiento entre la banda y la polea del motor, lo que produjo que el caucho de la banda se desgarrara y por lo cual se perdió tracción. Ante esto se colocó una banda nueva, la cual se le recortaron 2 mm de su longitud original (44.7 cm) quedando finalmente en 44.5, con lo que se evitó el problema mencionado en las seis pruebas finales de esta serie.

Prueba 3.3

Esta prueba tubo varias complicaciones, principalmente el hecho de que el material tenía la tendencia a formar grumos en la parte superior de la cámara de espumado por lo que se realizó en total una serie de 15 pruebas.

Tras el análisis de las primeras pruebas se determinó que la causa probable era la velocidad de arrastre del vapor, el cual pasa del fondo hacia la tapa llevando consigo perlas, las cuales al estar húmedas se pegan fácilmente a cualquier superficie que no este cercana al agitador.

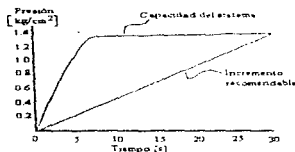


Fig. 3.4 Comportamiento de la presión

Como se observa en la gráfica de la figura 3.4, el PEL2 es capaz de incrementar su presión al punto máximo en un periodo no mayor a los 10 segundos (partiendo de una presión de caldera de 5.5 kg/cm²), sin embargo este súbito incremento de presión produce que exista un fuerte arrastre hacia la tapa provocando grumos de tamaño considerable.

La solución a este problema es efectuar un incremento escalonado de la presión, en un periodo aproximado de 30 segundos, de esta forma, se evita el problema y se obtienen resultados aceptables.

Esta prueba demostró el funcionamiento óptimo del PEL2 y así como su comportamiento durante el proceso de espumado.

Prueba 3.4

Los resultados de esta prueba, se clasificaron de acuerdo a la presión con que se realizaron, y el tiempo que duro el proceso; sin embargo en la gran mayoría de los casos las perlas resultaban degradadas con un aspecto similar a la superficie de una naranja. Estas perlas son el producto de un exceso de energía suministrada, ya que al suceder esto la celda que forma la espuma revienta provocando las deformaciones que se observaron. Este material, se desecho ya que sus propiedades de conformado (en los procesos posteriores) se alteran negativamente.

Se obtuvieron 15 muestras las cuales fueron tamizadas con mallas de 9, 7, 5 y 3 mm de luz de claro. Dichos resultados se encuentran en las tablas 3.5, 3.6 y 3.7.

Presión (kg/cm ²)	Tiempo [s]	Tamaño [mm]				
		3	5	7	9	
0.5	60	0	9	15	2	0
"	90	0	0	30	20	0
"	120	0	0	31	17	0.8
"	135	0	0	23	25	2
"	160	0	0	20	21	2.5
"	180	0	0	26	16	1

Tabla 3.5 Comportamiento del EPS P- 1015 espumado a 0.5 kg/cm²

Presión [kg/cm ²]	Tiempo [s]	Tamaño [mm]				
		<3	3-5	5-7	7-9	>9
0.8	60	0	0	56	11	0
"	75	0	0	22	25	3
"	90	0	0	23	19	3
"	120	0	0	25	24	1

Tabla 3.6 Comportamiento del EPS P- 1015 espumado a 0.8 kg/cm²

Presión [kg/cm ²]	Tiempo [s]	Tamaño [mm]				
		<3	3-5	5-7	7-9	>9
1.1	30	0	0	19	25	2
"	50	0	0	11	20	0.5
"	60	0	0	18	10	1.2

Tabla 3.7 Comportamiento del EPS P- 1015 espumado a 1.1 kg/cm²

Mediante estos datos se realizaron las gráficas de las figuras 3.5, 3.6 y 3.7, donde en el eje de las abscisas se encuentra el tiempo del proceso en segundos y en el eje de las ordenadas el porcentaje en masa. Cada color representa un rango de tamaño, el cual se encuentra en el recuadro de la derecha

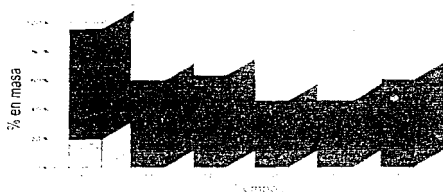


Fig. 3.5 Comportamiento del material con espumado de 0.5 kg/cm²

En la figura 3.5 se puede observar la influencia del tiempo de espumado sobre el material, en la barra de 60 segundos, existe una gran uniformidad del material en el rango de 5 a 7 mm de diámetro, conforme el tiempo se incrementa, crece el porcentaje de los diámetros mayores, obteniendo un máximo a los 160 segundos, cabe señalar que hasta esa prueba el acabado superficial fue brillante y liso.

En la barra de 180 segundos se puede observar como es que las proporciones de las perlas de mayor tamaño decrecen; debido a que existe cierta degradación del material esto se corrobora, ya que el acabado de las perlas es opaco.

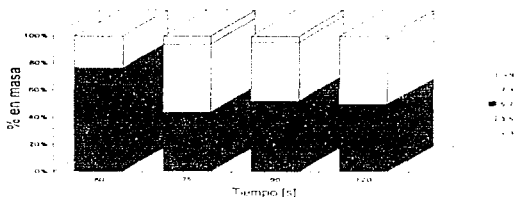


Fig. 3.6 Comportamiento del material con espumado de 0.8 kg/cm^2

En la figura 3.6 se puede observar un comportamiento similar al de la figura 3.5. A diferencia de la gráfica anterior se detecta la degradación del material desde la barra de 90 segundos.

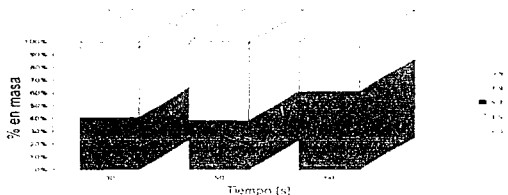


Fig. 3.7 Comportamiento del material con espumado de 1.1 kg/cm^2

Finalmente en la figura 3.7 se puede observar la influencia de las variables ante condiciones máximas de operación del PEI.2. Aquí como se observa solo se pudieron realizar tres pruebas; ya que más de 60 segundos el material se degradaba considerablemente al punto de cambiar de color y reducciones drásticas de tamaño.

Aquí se obtuvieron excelentes resultados a los 30 segundos, ya que las perlas que se encuentran en el rango de diámetro entre 7 y 9 mm fueron comparativamente en masa, la porción mas abundante. El acabado superficial fue excelente, se observa un acabado aperlado y muy brillante. Pasando los 30 segundos las perlas comenzaban a degradarse observando una superficie opaca.

En esta prueba se comprobó la influencia de la presión y del tiempo sobre el material; como se puede observar en la figura 3.8, donde se puede observar como es que varió el tiempo de degradación del material respecto a las 3 diferentes presiones usadas.

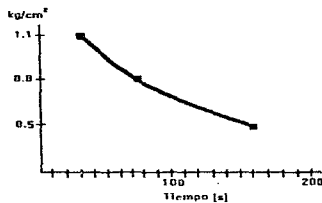


Fig. 3.8. Comportamiento del tiempo de degradación respecto a la presión.

Con las pruebas del presente capítulo se comprobó globalmente que:

- El PEL2 funciona correctamente.
- Las variables que afectan el proceso se pueden controlar.
- Existe una influencia directa del tiempo y la temperatura del proceso sobre el tamaño del material.

Capítulo 4

Conclusiones

El PEL2 es un preexpansor con un excelente desempeño, el cual es una base importante para la optimización del proceso de espumado de EPS. Las aplicaciones que éste encuentra son muy variadas, ya que cubre necesidades crecientes en los últimos años y es ideal para su uso tanto en centros de investigación como en la industria.

Evidentemente, la tendencia mundial se enfoca al ahorro de energía y recursos naturales; es por ello que el PEL2 ocupa un lugar de importancia dentro de la industria de la espuma de poliestireno, ya que su alta eficiencia energética, así como su control sobre las variables del proceso hacen de éste un equipo de vanguardia.

4.1 Diseño del equipo

El PEL2 es un equipo superior a los ya existentes en cuanto a su versatilidad. Como se menciona en la sección 2.9, esta versatilidad permite obtener un amplio rango de densidades que van desde los 40 hasta en algunos casos 8 kg/m^3 . Por otra parte sus elementos se adaptan a diferentes tamaños de material sin necesidad de complicados procesos de ensamble y desensamble. Esto da la pauta para que mediante el PEL2 se puedan realizar diferentes investigaciones, demostrando el desempeño de diversos elementos que afectan al proceso, y su efecto sobre el material espumado.

Una de las ventajas que ofrece el diseño es su acceso directo a la cámara de espumado, lo cual permite tener un control preciso sobre el material espumado, ya que al detectarse variaciones en tamaño o forma, basta con revisar las lecturas del panel de control e inspeccionar la cámara de espumado, para poder determinar el origen de la falla. Por otra parte en los equipos convencionales este tipo de revisiones afecta al proceso sensiblemente ya sea por tiempo o por material desperdiciado.

La brida flexible es un elemento de gran éxito en el diseño ya que no es afectada por la acumulación de perlas de poliestireno, así mismo la posibilidad de efectuar mal el ensamble es mínima debido a que cuenta con elementos flexibles que en el caso de coincidir ambas horquillas, éstas se deslizan hasta su posición normal.

Finalmente una de las grandes ventajas que ofrece el PEL2 es su bajo costo ya que como se observa en el apéndice B, este es del orden de los \$ 5,000.00 pesos, lo cual favorece su implementación en empresas de bajos recursos.

4.2 Desempeño del equipo

Dentro de los puntos más significativos del desempeño del PEL2 son:

- Menor tiempo del proceso.
- Menor consumo específico de energía.
- Mayor control de las variables del proceso.
- Seguridad en su operación.
- Alta confiabilidad debida a su versatilidad.
- Bajos costos de operación.
- Facilidad para la realización de mantenimiento.
- Flexibilidad para su acoplamiento a diferentes tipos de generadores de vapor.

El proceso de espumado industrialmente, haciendo uso de preexpansores convencionales de producción por lotes (como el PEL2), toma de 2 a 3 minutos con altos volúmenes de producción; sin embargo como se demostró en la pruebas de espumado, el PEL2 es capaz de realizar esto en 30 segundos.

El desempeño logrado por el PEL2 supera por mucho al de los equipos convencionales, ya que por cada centímetro cúbico de gas o combustible, se obtiene mucho más volumen del producto. Como se demostró en la sección 3.5 el tiempo de espumado es cinco veces menor en comparación con los otros equipos, la eficiencia global del proceso justificaría el uso de varios equipos similares al PEL2 con escalas industriales, ya que la diferencia radica en el control preciso que se tiene sobre las variables y la versatilidad de operación.

El operador es quizá la parte más importante del proceso, por lo que su seguridad es un factor determinante. Igualmente es imprescindible que este pueda leer los instrumentos al tiempo que maneja las válvulas y controles, por lo que el PEL2 cumple de manera óptima, inclusive el realizar mantenimiento resultará una tarea fácil debido a la sencillez de su construcción.

Es importante recalcar que en los usos de avanzada, tales como las membranas o la fundición a la espuma perdida, se requiere de diferentes densidades de espuma de poliestireno, para poder conformar modelos únicos, dicho requerimiento es cubierto por el PEL2 con facilidad ya que su baja producción y su extraordinario control sobre la densidad final en tiempos récord, le permiten tener la cantidad y densidad exacta de espuma de poliestireno requerida en los procesos específicos. Las ventajas que ofrece el PEL2 reducen los costos por desperdicio aumentando la calidad del producto.

Es necesario a partir de las aproximaciones de la sección 3.5, realizar un profundo estudio estadístico, que permita determinar el comportamiento del material ante las diferentes variables que influyen en el proceso.

4.3 Resultados de las pruebas de espumado

En las muestras analizadas se puede observar el efecto de la energía suministrada al material. Al incrementar la presión del vapor en la cámara de espumado se incrementa la temperatura, lo que propicia que exista un mayor intercambio de energía entre éste y el material. Por lo que suministrando vapor con más energía al proceso, se esperará que el tiempo que el espumado toma sea menor; sin embargo este vapor nunca deberá sobrepasar la temperatura de degradación del EPS.

Ante los resultados obtenidos se puede concluir que a mayor presión el tiempo de degradación decrece; por lo que una línea de investigación a seguir sería encontrar el límite de presión con el cual se minimice el tiempo de espumado.

Es importante aclarar que estas pruebas no son un análisis formal; por lo que los resultados que de aquí se desprenden son únicamente recomendaciones. El objetivo de estas pruebas es comprobar el funcionamiento del PEL2 y dar una aproximación de los parámetros de espumado en las presiones probadas.

Por lo antes expuesto, es necesario el análisis del espumado con un control preciso de las variables; el cual no se realizó, debido a que los objetivos del presente trabajo no lo contemplan. Sin embargo este análisis es una importante herramienta para la optimización de muchos procesos, como el de la fundición a la espuma perdida, y es una línea de investigación lo suficientemente amplia como para continuar con otros trabajos similares al presente.

4.4 Perspectivas del espumado con el PEL2

El PEL2 es un equipo de espumado de poliestireno ideal para su uso en laboratorio dadas las características de su comportamiento descritas anteriormente, es silencioso y seguro.

Industrialmente es un elemento indispensable para quienes pretende hacer un uso limitado de la espuma ya que como se ha explicado, éste material pierde propiedades con el paso del tiempo lo que produce pérdidas y altos costos de inventario. Con el PEL2 estos costos se eliminan ya que la cantidad requerida es producida en el momento en que se demande su uso, aumentando la calidad del producto final.

Quizá su empleo mas adecuado sea proyectarlo a una escala mayor. Para empresas pequeñas es aún recomendable el uso de calentadores de agua debidamente instrumentados, ya que requieren poco mantenimiento y puede llevar acabo este proceso fácilmente. En empresas medianas este equipo puede usarse con calderas de recuperación tal es el caso de las fundidores pequeñas donde por lo regular el calor de los hornos es desperdiciado cuando directamente se envía a la ambiente. Esto puede ser corregido mediante el uso de los llamados "HRSG" (Heat Recover Steam Generator) los cuales aprovechan esa energía para que sea usada en el espumado u otra aplicación; lo cual incrementa la eficiencia global de la planta. En la industrias donde se tienen calderas instaladas con procesos que liberan el vapor con suficiente energía es posible la instalación de un PEL2.

Inclusive en las empresas que se dedican a esta actividad es conveniente el uso de un PEL2 ya que con éste pueden manejar pedidos especiales o incluso experimentar cuales son los rangos indicados para la producción de cierta pieza ahorrando de esta forma valioso tiempo y muchos metros cúbicos de material.

Referencias

Howell, John R.
Principios de termodinámica para ingenieros
Mc Graw Hill
1990

Shigley, Joseph Edward
Diseño en ingeniería mecánica. 5^{ta} Edición.
Mc Graw Hill
1990

White, Frank M.
Fluid Mechanics. 3rd Edition.
Mc Graw Hill
1994

Incropera, Frank P.
Fundamentals of heat and mass transfer. 3rd Edition.
John Wiley & Sons
1990

Thornton, Peter A.
Ciencia de materiales para ingeniería
Prentice Hall

Miller, Irwin R.
Probabilidad y estadística para ingenieros. 4^{ta} Edición.
Prentice Hall
1992

Moss, Dennis R.
Pressure vessel design manual
Gulf
1987

Chossei, Robert
Pressure vessels
Mc Graw Hill
1993

Megyesy, Eugene F.
Manual de recipientes a presión.
Limusa

Navarro, Nicolás R.
Técnica del Dibujo. 3^{er} Edición. Tomo 2.
Paraninfo

Giesecke, Frederick E.
Principles of technical drawing
Mac Millan

Ceballos, L. José
Proceso de molde evaporativo.
Foseco S. A. de C. V.
1989

Shell plastics
Pre-expansion and maturing of Styrocell. Technical Bulletin.
Styrocell Technical Manual 5th Edition
Febrary 1989.

Shell plastics
Expandable polystyrene: The importance of steam. 2nd Edition.
Technical bulletin STY 4.1.

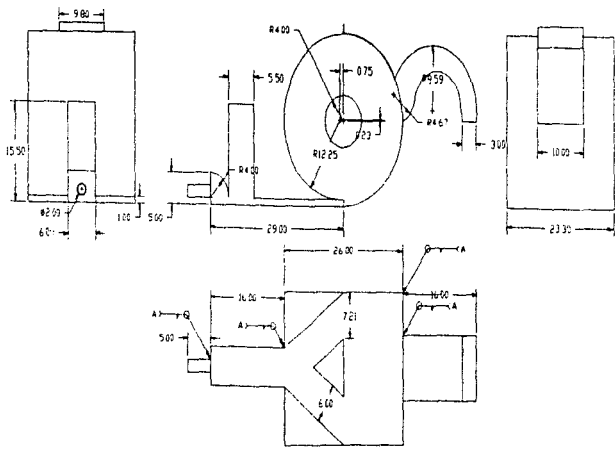
BASF
Making cellular material from Styropor.
BASF Publications
B544e

BASF
Styropor, Transformación de Styropor
BASF plásticos celulares
Folleto informativo

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

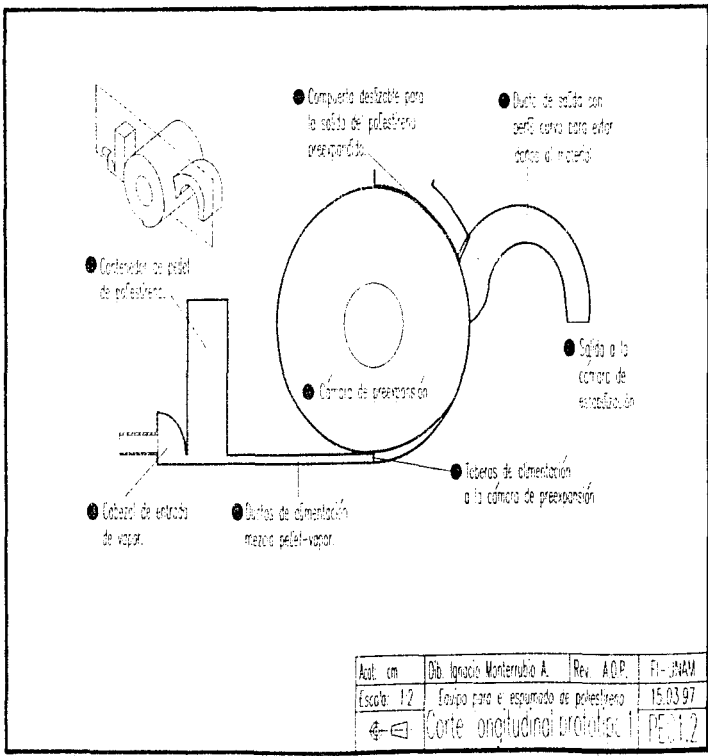
Apéndice A

Planos

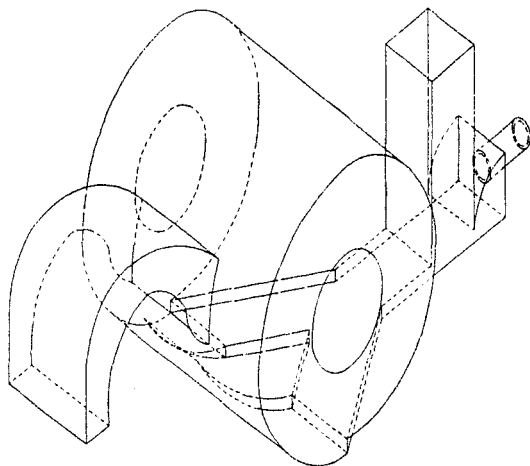



A - Sección a línea en material de corte en sus 4
 caras. Muestra la espesura de 0.2

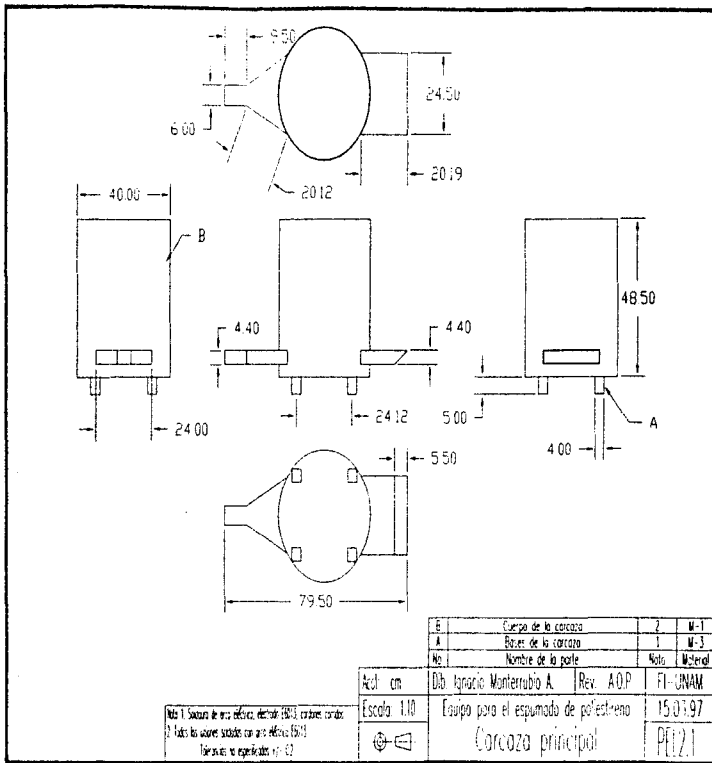
Act. cm	Dib. Ignacio Monterrubio A	Rev. A.D.P.	11-UNAM
Escala: 1:2	Equipo para el espumado de poliestireno		15/03/97
Primer prototipo			10/11

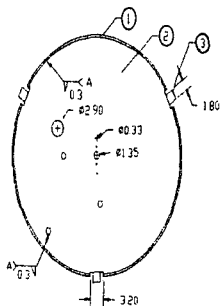
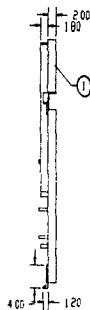
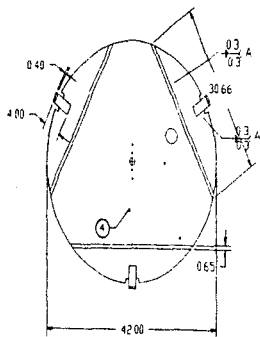


Aut. cm	Dib. Iñazio Monterrubio A.	Rev. A.O.P.	FI-JNAM
Escala: 1:2	Equipo para el espumado de poliestireno		15.03.97
←	Corte longitudinal frontal		PE-1.2



Acat. cm	Dib. Ignacio Monterrubio A.	Rev. A.O.P.	FI-UNAM
Escala: 1:2	Equipo para el espumado de poliestireno		15.03.97
	ISOMETRICO Prototipo 1		PECT.3

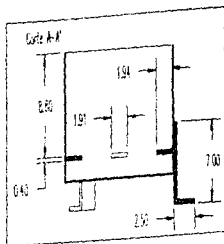
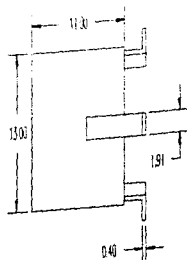
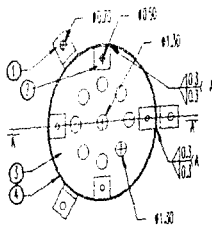




4	Base para la carcasa del motor		M. 6
3	Sistema del brazo		M. 5
2	Forma de la tapa		M. 1
1	Reservorio de sales		M. 4
No.	Nombre de la parte	Nota	Materia

Acab. en	Dib. Insaco Montarubio A	Rev. A.O.P.	CI-UNAM
Escala	1:10	Equipo para el escurrido de poliestireno	15-03-97
		1000 de 10 cm (1520)	01172

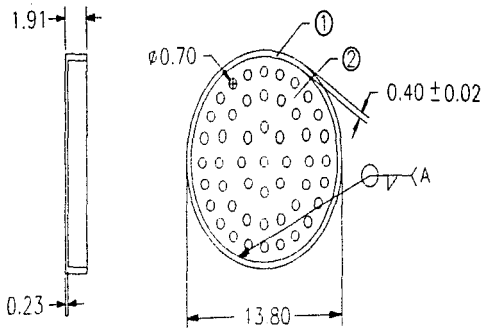
A - Ladrillo de oro eléctrico con electrolito
 B - Ladrillos de electrolito. 1/2 - 02



1	Cuerpo de la carcasa	W-7
2	Tornillos de la carcasa	W-7
3	Base para el armadura del motor	W-5
4	Base para acoplar con la carcasa principal	W-5
No.	Nombre de la parte	Materia

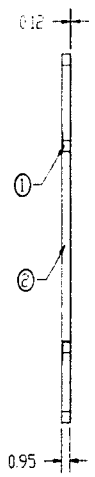
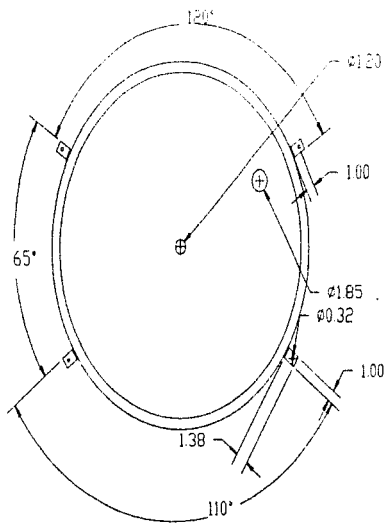
Acot. en	Dib. Ignacio Montarubio A	Rev. A.O.P.	FE-10244W
Escala	Equipo para el empacado de poliestireno		15.03.97
Carroza del motor			FE-123

A: Líneas de sus efectos en dibujo (E11)
B: Líneas y especificas (1-2)



A - Soldadura de arco eléctrico con método E6013
 B - Tubos con espesores ≥ 0.2

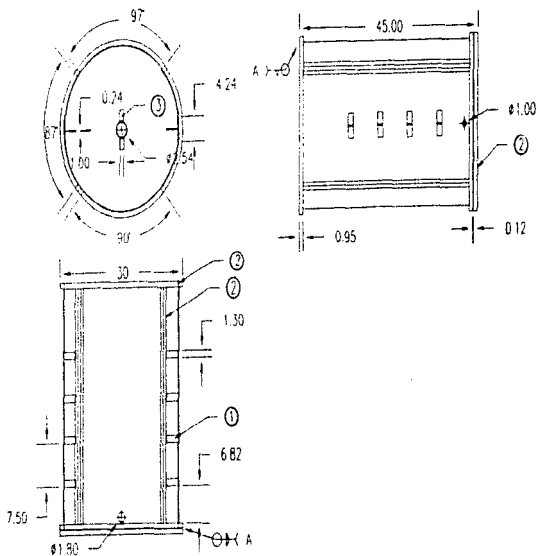
2	Fondo de la tapa			M-1
1	Borde de la tapa			M-3
No.	Nombre de la parte		Nota	Material
Acab. cm	Dib. Ignacio Monterrubio A	Rev. A.O.P.		Fi USAM
Escala	1:2	Equipo usado - esmaltado de pape lierno		15/03/97
		Tubo de la cabeza del motor		PL-4



2	Asa de refuerzo y soporte		M-7
1	Base para unirse con la tapa de la carcasa		M-7
No.	Nombre de la parte	Nota	Materia

Acab. en	Dib. Ignacia Monterrubio A.	Rev. A.O.P.	FI-UNAM
Escala:	1:10	Equipo para el espumado de poliestireno	15.03.97
⊕		Tapa del tanque presurizado:	PE 2.5

Dimensiones no especificas +/- 0.7



1	Boca para el rotámetro View		M-7
2	Refuerzos del cambio		M-7
3	Reces para los detectores		M-7
No	Nombre de la parte	Nota	Materia

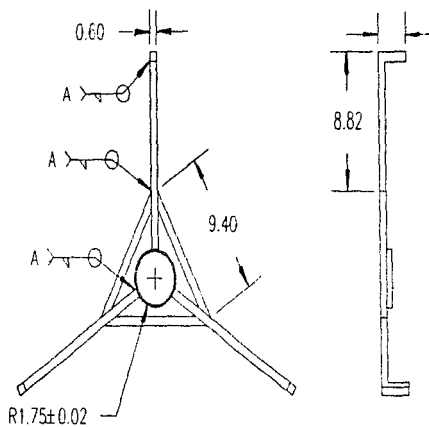
Aut. cm	Dib Ignacio Monterrubio A	Rev. AOP	El AVAV
Escala	1:10	Equipo para el esquadro de poliestireno	10/02/47

A - Unidad de area edificatoria construida 1/6/22
 B - Unidades no edificatorias 4/ 02



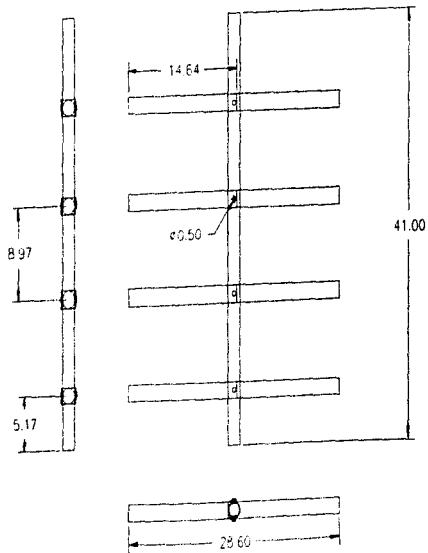
Proyecto presentado

10/02/47



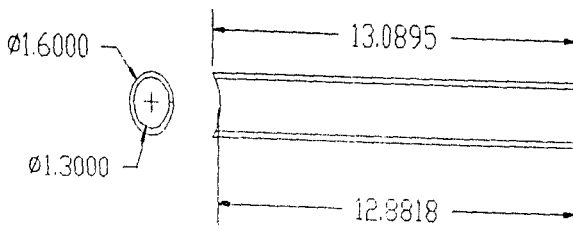
A = Sistema de arco pértiga con electrolito (E011)
 Posicionar en especificación 4/- 02

Acab: en	Dib: Ignacio Mantecubio A.	Rev: A.O.P.	FI-URVAM
Escala: 1:2	Equipo para el ensamblado de poliestireno		15.03.97
	Soporte del rodamiento superior		PE-07

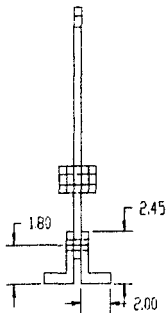
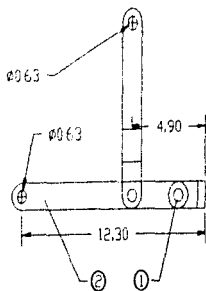
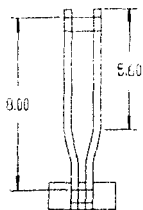


Kol. con.	Dib. Ignacio Monterrubio A.	Rev. A.G.P.	FI-LUNAM
Escala 1:2	Equipo para el escariado de pilesterno		15.05.97
	Aplicador de pintos		PII.8

Verificar, no es. Nota: 1/- 02

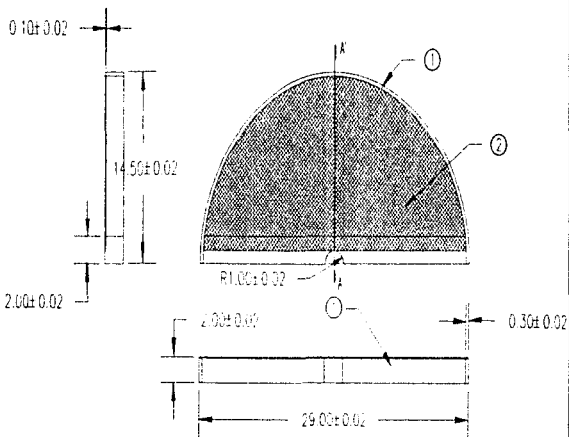


Aut: cm	Lib: Ignacio Monterrobia A.	Rev: A.O.P.	FI-UNAM
Escala: 1:1	Equipo para el esparado de poliestireno		15.03.97
Referencia de especificación: 41-01		Deflector	12.9



2	Pernos del brazo			M. B.
1	Brazos del brazo			M. S.
No	Nombre de la parte		Nota	Material

Azul em	Dpto. Ingeniería Mantenimiento A	Rev. A.C.P.	10	12/11/97
Fecha	11	Trabajo para el espumado de poliestireno		15/03/97
		Brazos de hierro		18/12/10



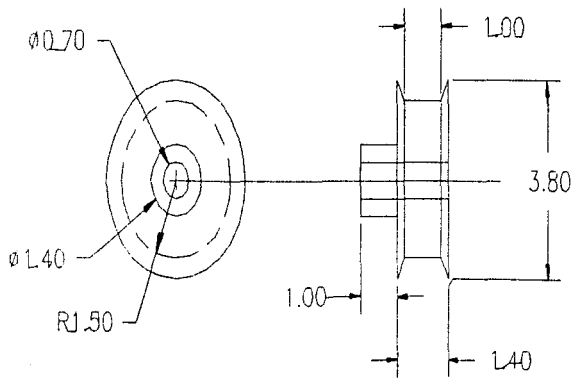
2	Nota de montaje		W-10
1	Detalle de madera		W-9
No.	Nombre de la parte	Nota	Madera 2

Acot. cm	Dib Ignacio Monterrubio A.	Rev. A.D.P.	FI-UNAM
Escolar 12	Equipo para el equipamiento de laboratorio		15-07-97

Unas medidas adicionales de sicon

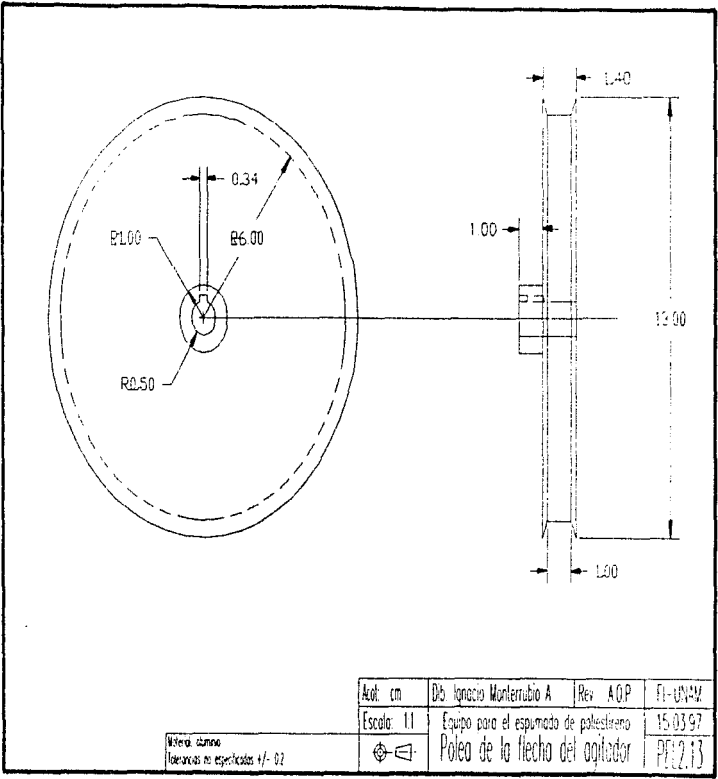
Mallas filtrantes

15-07-97




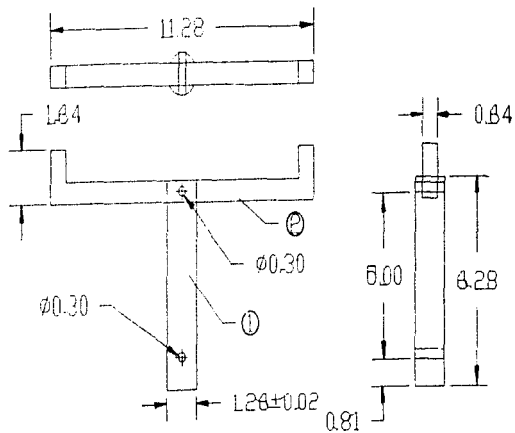
Acab: cm	Dis. Ignacio Monterrubio A	Rev. A.O.P.	FI-UNAM
Escala: 2:1	Equipo para el espumado de poliestireno		15.03.97
	Polea de la flecha del motor		PL2.12

Wired name
 (describa la aplicación) 1/ 02



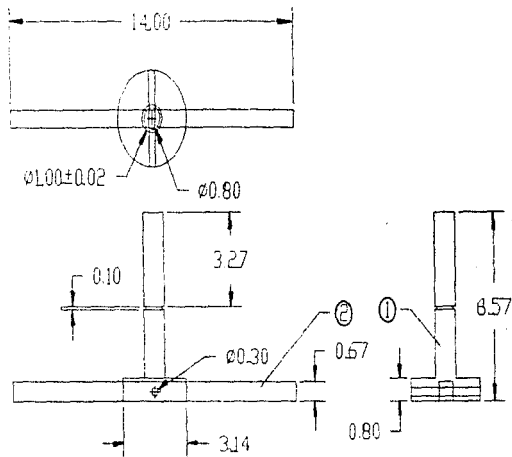
Wiera summo
 Tolerancias no especificadas +/- 0.2


Acot: cm	Db: Ignacio Monterrubio A	Rev: AOP	El: UNAM
Escala: 1:1	Equipo para el espumado de palestereno		15.03.97
	Polea de la flecha del agitador		PE:2.13

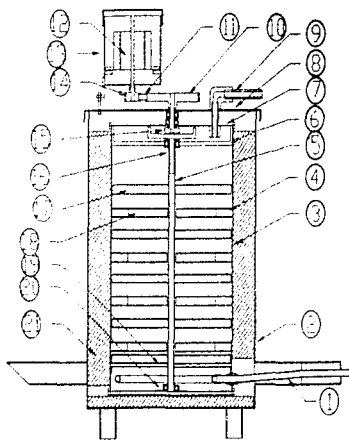


2	rosado		M-12
1	Pinta azul el capazo		M-13
No.	Nombre de la parte	Nota	Materia

Acab. cm	Dib. Ignacio Monterrubio A	Rev. A.B.P.	11-UNAM
Escala: 1:1	Largo para el ensamble de polietileno		15/05/97
	Brida flexible (torquillo)		00214



2	Componente de la Búsqueda		W-12
1	Perno para el apilador		W-13
No.	Formas de la parte		Acero / Metalico
Acad. cm	Dib. Ignacio Monterrubio A. (Rev. A) O.P.		P1-UNAM
Escala: 1:1	Equipo para el espumado de poliestireno		15.03.97
	Brida flexible (complemento)		PF12.15



21	Materia de soporte		
20	Base del instrumento inferior		
19	Much	PEL 11	
18	Deflector	PEL 19	
17	Brazo agitador		
16	Bandeja flexible	PEL 14	
15	Brazo flexible	PEL 15	
14	Fusos de la flecha de madera	PEL 12	
13	Carcasa del motor	PEL 23	
12	Motor de 1/2 HP		
11	Brazo plano		
10	Fusos de la flecha del agitador	PEL 13	
9	Salida del vapor		
8	Tapo de la carcasa	PEL 7	
7	Tapo del bloque presurizado	PEL 5	
6	Soporte del instrumento superior	PEL 7	
5	Asillador de papeles	PEL 24	
4	Bloque para deflector		
3	Bloque presurizado	PEL 6	
2	Carcasa principal	PEL 1	
1	Entrada de vapor		
No	Aunque de las partes		None

Autor	Dra. Ignacio Volveredo A	Rev	A.O.P	FI-UNAM
Fecha	Equipo para el espumado de poliestireno			15/03/97
	Corte esquemático			PEL 2.16

Lista de materiales

Clasificación	Descripción
M-1	Lámina negra calibre 13
M-2	Lámina negra calibre 18
M-3	PTR ½ x 1½" 3.2 mm espesor
M-4	Solera CR 1/8 x ¾"
M-5	Solera CR 3/16 x ½"
M-6	Tornillo de ¼ x 4" NS20
M-7	Cuadrado de ¼"
M-8	Redondo CR de ¼"
M-9	Madera de pino de 1"
M-10	Malla de aluminio de 0.2 mm L. C.
M-11	Placa de aluminio ½"
M-12	Cuadrado CR 3/8"
M-13	Redondo de aluminio 3/8"

Apéndice B

Costo

El costo aproximado del PEI.2 se determina en base al siguiente análisis de precios unitarios:

Concepto	Precio unitario (pesos)	Unidad	Cantidad	Costo (pesos)
Lámina negra cal 13	7	kg	20	140
Lámina negra cal 18	7	kg	15	105
Cuadrado de acero CR 1/4"	12	kg	1.5	18
Cuadrado de acero CR 3/8"	12	kg	0.5	6
Solera 1.8 x 1/2"	12	kg	1.5	18
Solera 3/16 x 1/2"	12	kg	1	12
Soldadura E-6013	15	kg	5	75
Tubo de aluminio 3/8"	10	m	4	40
Rodamientos 6202z	40	Pieza	4	160
Mallas circulares (fabricación artesanal)	120	Pieza	1	120
Cuadrado madera pino 1a	20	Pieza	2	40
Tubo de cobre 1/2"	15	m	2	30
Tubo de cobre de 3/4"	5	m	2	10
Válvula de globo 1/2"	35	Pieza	2	70
Válvula de paso 1/2"	20	Pieza	1	20
Codo 90° acero galvanizado 1/2"	8	Pieza	1	8
Cople acero galvanizado 1/2"	10	Pieza	1	10
Codo reducción acero galvanizado	15	Pieza	1	15
Cople bronce 1/2"	10	Pieza	1	10
Tuerca cónica de bronce 1/2"	5	Pieza	5	25
Tuerca cónica de bronce 1/4"	3	Pieza	4	12
Remaches de aluminio de 1.8"	0.30	Pieza	15	4.5
Banda plana de lona ahuyada	5	Pieza	1	5
Placa aluminio	30	kg	0.5	15
Tornillos diversos	25	Lote	1	25
Esmalte acrílico	55	Litro	1	55
Pintura anticorrosiva	55	Litro	1	55
Motor de 1/2 H.P.	200	Pieza	200	200
			Total	1,303.5

Precios aproximados del mes de Junio de 1997

El costo de la manufactura se determinó en base a los siguientes tiempos:

Concepto	Tiempo [horas]
Maquinado	16
Soldadura	16
Armado	8
Acabados	8

Con un total de 48 horas, lo que es igual a 6 jornadas de ocho horas. Tomando como base el sueldo de un maestro herrero, con un ayudante el cual para la ciudad de México representa aproximadamente 60 pesos por hora, da un total de \$ 2,880.00 pesos por concepto de mano de obra.

En suma

Costo de insumos.....	\$ 1,303.50
Costo de mano de obra.....	\$ <u>2,880.00</u>
Subtotal	\$ 4,183.50

Agregando un 20% por efecto de indirectos (energía eléctrica, consumibles, etc.) da un total de:

	\$ 4,183.50
20%	\$ <u>836.70</u>
Total	\$ 5,020.20