

Proyecto Final

Diseño de una Máquina Compactadora de Botellas PET

Tutor: Ricardo Lauretta

Alumno: André Parisier

Legajo: 47484

Fecha: 28-feb-14

Abstract

El principal objetivo de este proyecto es crear una máquina compactadora de botellas de PET de uso doméstico y para instituciones, buscando un diseño óptimo y económico según sus posibles clientes, usos y necesidades. La razón de esta máquina consiste en generar un vínculo entre un individuo y el reciclaje. Esto quiere decir que la actividad sea interactiva para facilitar globalmente la tarea del acopio (principal limitante del reciclaje).

Como limitaciones al diseño, se propuso que la máquina no puede ser de accionamiento manual y debe expulsar las botellas de forma automática hacia un recipiente contenedor.

Se diseñó y construyó una máquina compactadora original, innovadora, confiable y económicamente viable para instituciones y distintas empresas cumpliendo con todos los requisitos propuestos. Como sistema de accionamiento se propuso que el más apropiado para las condiciones propuestas es el actuador eléctrico. Sin embargo, considerando su elevado costo y limitaciones en las importaciones en la Argentina, se construyó un prototipo con un actuador neumático. Se destaca como ventaja que la cámara de compactación es universal para cualquier actuador.

Se comprobó la resistencia de la máquina diseñada, de manera que es considerada apta para el servicio requerido.

Se comprimieron botellas a un promedio de 25 % de su tamaño inicial.

Por lo tanto, se logra reducir el volumen de residuos acopiados en las instituciones donde se emplee la máquina, como así contribuir con la cadena de reciclaje.

Índice

U1: Proyecto Piloto.....	7
1.1. Acopio del PET	7
1.2. Condiciones para reciclar una botella PET	8
1.3. Objetivos.....	9
1.4. Requisitos.....	10
U2: Desarrollo Práctico	11
2.1. Cálculo de fuerza necesaria para poder comprimir una botella	11
2.2. Sistema de compactación	14
2.3. Cámara de Compactación	16
2.4. Frente de Compactación.....	21
U3: Dimensionamiento y Cálculos de Resistencia	22
3.1. Dimensionamiento del Pistón Neumático	22
3.2. Elección de Válvula.....	25
3.3. Accesorios:	25
3.4. Modelado y Cálculo Estructural de la Cámara de Compactación	27
3.5. Modelado y cálculo estructural del frente de compactación	32
3.6. Dimensionamiento y Resistencia de la Unión Soldada	36
3.7. Resistencia de la Cámara de Compactación	39
3.8. Dimensionamiento de las uniones abulonadas	42
U4: Propuesta Diseño	44
4.1. Solución Propuesta	44
4.2. Operación y Mantenimiento.....	48
4.2.1. Puesta en Marcha.....	48
4.2.2. Operación.....	49
4.2.3. Mantenimiento.....	49
4.2.4. Resultados Operativos	50
Conclusiones	51
Anexo A: PET.....	54
A-1: Descripción del PET.....	54
A-1.1. ¿Qué es el PET?	54
A-1.2. Historia:.....	54

A-1.3. Venatajas.....	55
A-1.4. Desventajas:.....	56
A-1.5. Datos Técnicos.....	56
A-1.6. Tipos de PET:.....	57
A-1.7. Aplicaciones: usos del PET	57
A-1.8. Comparación con otros materiales	58
A-2.1. Procesos de Producción	60
A-2.1.1. Producción del polímero PET:	60
A-2.1.2. Producción de PET para grado botella	62
A-2.2. Moldeado de PET para obtener botellas	62
A-2.2.1. Tratamientos del PET previo al formado del cuerpo	62
A-2.2.2. Formado de cuerpos huecos.....	63
A-2.2.3. Diagrama de Flujo para la Producción del PET	63
A-3: Reciclaje del PET	64
A-3.1. PET como residuo.....	64
A-3.2. Ventajas del reciclaje	64
A-3.3. Reciclaje.....	65
A-3.3.1. Reciclado Mecánico	66
A-3.3.2. Reciclado Químico.....	67
A-3.4. Producto obtenido: RPET	67
A-3.5. Reciclado de PET en Argentina.....	69
Anexo B: Marco Teórico	71
B-1. Sistemas de Compactación.....	71
B-2. Dimensionamiento de un cilindro neumático y compresor.....	74
B-3. Especificación de Válvulas	80
B-4. Conceptos comunes en máquinas compactadoras.....	81
B-5. Conceptos generales para cálculos de resistencia:	81

Lista de Tablas y Figuras

Figura 2.1.1: Esquema para ensayo de compresión de la botella

Tabla 2.1.1: Resultados

Figura 2.1.2: % Compactado vs. Carga (kg)

Tabla 2.2.1: Matriz de Decisión

Figura 2.3.1: Vista isométrica de la cámara

Figura 2.3.2: Vista de costado de la cámara

Figura 2.3.3: Vista de arriba de la cámara

Figura 2.3.4: Corte AA

Figura 2.3.5: Corte BB

Figura 2.3.6: Vista frontal de las chapas de sujeción

Figura 2.4.1: Frente de Compactación

Imagen 3.2.1: Electroválvula

Figura 3.4.2: Mallado del conjunto

Figura 3.4.3: Aplicación de la carga

Figura 3.4.4: Condiciones de borde

Tabla 3.4.1: Propiedades del Acero 1030

Figura 3.4.5: Desplazamientos en la cámara de compactación

Figura 3.4.6: Tensiones de Von Mises en la cámara de compactación

Figura 3.4.7: Fuerzas máximas en la cámara de compactación

Figura 3.5.1: Frente de compactación

Figura 3.5.2: Condiciones de borde y aplicación de cargas

Figura 3.5.3: Desplazamientos en el frente de compactación

Figura 3.5.4: Tensiones de Von Mises en la cámara de compactación

Figura 3.5.5: Fuerzas máximas en el frente de compactación

Figura 3.6.1: Especificación de Soldadura.

Tabla 3.8.1: Propiedades del bulón

Figura 4.1.1: Máquina Propuesta. Prototipo

Tabla A-1.8.1: Propiedades de distintos materiales

Tabla A-3.4.1: Botellas de PET y sus salidas más corrientes

Imagen B-1.1: Sistemas de Compactación Manuales

Figura B-2.1: corte de un cilindro típico “doble efecto”

Figura B-2.2: Diagrama de Presión-Fuerza

Figura B-2.3: Diagrama de Pandeo

Figura B-2.4: Diagrama de consumo de aire

Tabla B-3.1: Factor de compresión y constante de caída de presión

Tabla B-3.2: Índice C_v contra el tamaño del agujero de la válvula contra las pulgadas de viaje por segundo

Tabla B-5.1: Propiedades mínimas del metal de aporte

Tabla B-5.2: Esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte

Tabla B-5.3: Factores de concentración del esfuerzo K_{fs}

Tabla B-5.4: Cargas Constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete:

Tabla B-5.5: Especificaciones SAE para pernos de acero

Tabla B-5.6: Especificaciones ASTM para pernos de acero

Tabla B-5.7: Especificaciones para sujetadores métricos

Gráfico B-5.1: Gráfica de límites de resistencia a la fatiga contra resistencias o la tensión de resultados de ensayos reales de un gran número de hierros forjados y aceros aleados.

Tabla B-5.8: Propiedades mecánicas del hierro fundido gris, algunas aleaciones de aluminio y algunas aleaciones de titanio

Tabla B-5.9: Factor de Superficie

Tabla B-5.10: Áreas $A_{0,95\sigma}$ de perfiles estructurales no rotativos

Tabla B-5.11: Factores de confiabilidad k_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga

Figura B-5.2: Fracción de resistencia al a fatiga f

Figura B-5.3: Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla. Para cada criterio los puntos en o "arriba" de la recta respectiva indican falla.

Figura B-5.4: Gráfica de fallas de esfuerzos medios en ambas regiones de tensión y compresión.

U1: Proyecto Piloto

1.1. Acopio del PET

Hoy en día, el principal problema reconocido que limita directamente el reciclado es el volumen disponible. Por lo tanto, es necesario analizar el acopio del PET. Considerando que el PET es 100% reciclable, y que en año 2008 hubo un consumo anual aparente de 200.000 toneladas en Argentina y sólo se recicló el 34% (ver Anexo A), el resto se encuentra disperso en el medio ambiente y en rellenos sanitarios. Por lo tanto, se presenta una necesidad de desarrollar un sentido de conciencia social generalizado que derive en una estrategia para aumentar el reciclaje. Es necesario explorar alternativas para tender al autoservicio y que los distribuidores de productos que utilizan PET se incorporen a un programa eficiente de reciclaje para promover el desarrollo sustentable.

En una estrategia efectiva para aumentar el reciclaje, se debe prestar atención a:

- Concentrar atención en empaques que se pueden recuperar con mayor facilidad.
- **Aumentar la recolección de desperdicios al nivel de unidades familiares y multifamiliares.**
- Imposición de recolección obligatoria de desperdicios de empaques en distintos Municipios.

Es fundamental prestar mayor atención en el segundo punto y las distintas maneras de realizar esto.

Se propone que la forma más simple, económica y eficiente de realizar esto es mediante algún incentivo, que proponga una actividad interactiva, resultando en el crecimiento de la recolección de desperdicios.

Al hacer esto, presentamos una importante problemática en el aumento del acopio de PET con nuevas medidas. Esto sería el volumen físico disponible para la recolección de desperdicios y la creciente imposibilidad de su transporte a medida que aumenta el acopio.

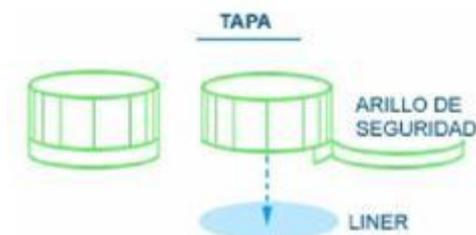
Las botellas de PET ocupan grandes volúmenes y poseen baja relación peso-volumen, implicando grandes áreas acondicionadas para poder almacenar. Esto presenta la necesidad de un equipo que permita la compactación de botellas, sin deteriorar sus propiedades, reduciendo el espacio requerido.

Además, el transporte de estos materiales se cotiza por volumen, reduciendo el costo asociado a la logística.

1.2. Condiciones para reciclar una botella PET

A continuación, se presentan una serie de requisitos para poder reciclar una botella. Va a ser necesario imponerlas en los envases a reciclar para poder integrar la reducción de volumen de residuos con el reciclaje. Es decir, aparte de estar aumentando el espacio para residuos se deben preparar los envases compactados para ser transportados y reciclados.

1. Se debe remover la tapa y el arillo de seguridad de la botella, ya que el PVC puede contaminar grandes cantidades de PET, y no pueden ser separados.



2. Remover las etiquetas:
Las etiquetas metalizadas dificultan el reciclado de cualquier plástico, ya que contaminan el PET. Algunos sistemas de impresión provocan que el PET reciclado tenga color, disminuyendo sus posibilidades de uso, mercados y precio.
3. Color: las botellas de PET transparentes tienen mejor valor y mayor variedad.
4. Evitar envases multicapa: los recubrimientos de otros materiales reducen la reciclabilidad del PET.

1.3. Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es crear una máquina compactadora de botellas de PET de uso doméstico y para instituciones, buscando un diseño óptimo y económico según sus posibles clientes, usos y necesidades. Se debe tratar de generar un vínculo entre un individuo y el reciclaje, reforzando dos puntos muy importantes y facilitando globalmente la tarea del acopio:

- Incentivar el acopio entre la gente: precisando que cuando se dispone un envase de PET usado, el usuario debe comprimirlo con la máquina a construir. Es por esto que se logra involucrarlo en la actividad de reciclaje.
- Reducir el volumen del reciclado: al comprimir un envase hasta aproximadamente el 25% de su volumen original, se logra facilitar el transporte y se reduce la ocupación de volumen del material a reciclar hasta que entran en proceso.

Para hacer una reducción de volumen general es necesario una máquina compactadora industrial, ya que a veces la fuerza máxima que puede aplicar un usuario no alcanza para realizar la compactación permanente. Además, puede que no sea ni suficiente para prensar una botella de mayor tamaño o multicapa.

Una compactadora doméstica ayudaría a disminuir el volumen de los residuos (envases a reciclar).

Para poder decidir el diseño de esta compactadora, es necesario evaluar diferentes variables:

- Envases de PET presentes en el mercado y su cantidad.
- Selección de un sistema a utilizar para la compactación en función de la practicidad, seguridad, costo de fabricación, operación y mantenimiento.

Objetivos Específicos:

1. Selección del sistema de compactación.
2. Dimensionamiento de accesorios y sistema de compactación.
3. Propuesta y dimensionamiento de la cámara de compactación y frente de compactación.
4. Cálculos de resistencia.
5. Propuesta de soporte.

Para poder estudiar las tensiones a las que va a estar sujeta la máquina compactadora se va a utilizar el software Siemens NX 8.0 para modelar la máquina con elementos finitos.

1.4. Requisitos

Para la construcción de la máquina compactadora, proponemos tener en cuenta lo siguientes criterios:

- Precio: según la situación actual de crisis económica mundial generalizada, se debe contar con un producto de costo óptimo, haciéndolo accesible a cualquier institución, así todos participan de la actividad de reciclaje. Se deberá seleccionar el sistema para la compactación: manual, neumático o hidráulico. De esta manera comparar en función de practicidad, costo de fabricación, operación y mantenimiento, y además seguridad.
- Comodidad: debe ser cómodo para el usuario, ya que ahora debe estar presente en su vida diaria. El tamaño deberá ser lo más reducido posible.
- Funcionamiento sencillo: esto ayuda a reducir el costo, y además debe considerar distintos problemas:
 - ✓ Expulsar la botella hacia un recipiente contenedor automáticamente.
 - ✓ Dispositivos antideslizamiento para que el proceso de compactación sea efectivo y la botella no pierda su posición efectiva.
- Versatilidad: el diseño para la cámara de compactación debe poder utilizarse con cualquier sistema de actuación.

Se busca diseñar una máquina compactadora que sea una solución original, innovadora, confiable y económicamente viable para instituciones y distintas empresas.

U2: Desarrollo Práctico

El primer paso en nuestros objetivos específicos es poder seleccionar el sistema de compactación que vamos a utilizar. Para poder hacer esto, lo primero va a ser determinar la fuerza necesaria para comprimir una botella y deformarla permanentemente, para lo que se realizó un ensayo (ver sección 2.1). De esta manera podemos seleccionar y dimensionar el sistema de compactación que vamos a emplear.

Subsiguientemente, es necesario proponer un diseño para la cámara y frente de compactación que cumplan con los requisitos enunciados en la sección 1.4.

Teniendo esto y la fuerza máxima que puede desarrollar el sistema de compactación, es necesario hacer un estudio de resistencia de distintos componentes de la máquina compactadora. Esto se va a realizar tanto para la propia cámara de compactación como para las uniones necesarias (soldaduras y sujetadores roscados).

Por último se va a proponer un diseño de soportes para la máquina.

2.1. Cálculo de fuerza necesaria para poder comprimir una botella

Objetivo:

Cuantificar la fuerza necesaria para comprimir botellas de PET individualmente hasta un 25% de su longitud original.

Hipótesis:

- Las formas de las botellas empleadas son uniformes.
- La carga es aplicada de manera uniforme sobre la botella para todos los ensayos.
- La carga aplicada sobre el cilindro macizo se distribuye uniformemente sobre este mismo.
- Se cuantifica el volumen comprimido como el cociente entre el largo inicial de la botella y el comprimido

Materiales:

- 6 botellas plásticas PET de distintas formas y tamaño de 0.5-0.6 lts
- 1 tramo de caño de 500 mm de acero AISI 410 (mismo caño que se va a utilizar en la compactadora)
 - ✓ Diámetro: 3 pulg ~ 77 mm
 - ✓ Espesor: 3 mm
- 1 cilindro macizo con las siguiente dimensiones:
 - ✓ Diámetro: 70 mm
 - ✓ Largo 800 mm
- 10 discos de 10 kg

Procedimiento:

1. Apoyar el caño verticalmente sobre una superficie plana según el siguiente esquema:

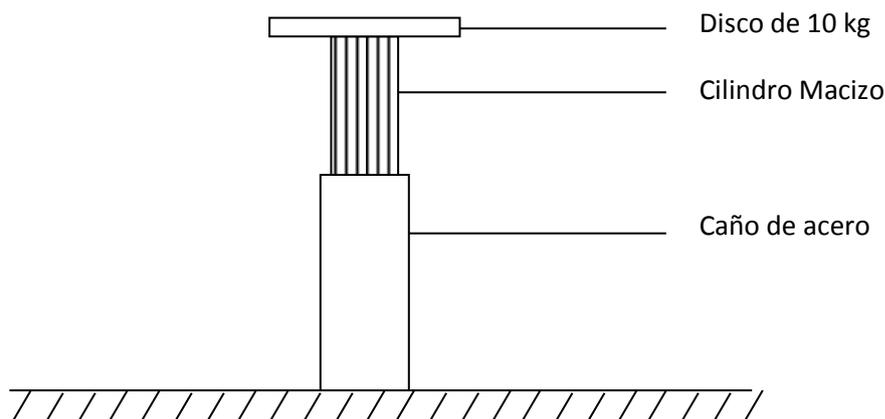


Figura 2.1.1: Esquema para ensayo de compresión de la botella

2. Anotar dimensiones de la botella plástica a ensayar.
3. Insertar una botella plástica dentro del caño, dejando que la parte inferior de la botella apoye sobre la superficie plana.
4. Insertar el cilindro macizo dentro del caño hasta que haga tope.
5. Apoyar un disco de 10 kg sobre el cilindro macizo y dejar que comprima la botella dentro del caño
6. Una vez ya comprimida la botella, remover el disco, el cilindro macizo y la botella dentro del caño para medir su dimensión final
7. Repetir todo el procedimiento previo, pero agregando otro disco de 10 kg.
8. Realizar el paso 7 hasta obtener mediciones finales de la botella hasta utilizar los 10 discos de 10 kg.

Resultados:

Para cuantificar que se cumpla con el objetivo de reducir el volumen al 25%, se define el cociente entre la longitud de la botella compactada y la longitud inicial tiene que ser menor o igual al 25 %.

En la tabla 2.1.1 se encuentran los resultados los distintos ensayos realizados:

Tabla 2.1.1: Resultados

Descripción	D (mm)	Lo (mm)	Lf (mm)	%	Longitud final (mm) según peso									
					10 kg	20 kg	30 kg	40 kg	50 kg	60 kg	70 kg	80 kg	90 kg	100 kg
Envase Eco de Los Andes	60	227	45	20%	196	117	87	72	65	57	47	46	45	45
Envase Eco de Los Andes	60	227	42	19%	190	124	84	75	62	55	46	45	42	42
Envase Glaciar	57	220	44	20%	180	121	92	70	66	58	49	45	44	44
Envase Glaciar	57	220	45	20%	178	119	88	74	64	55	49	45	45	45
Envase H2OH!	58	230	46	20%	201	134	97	78	67	55	52	47	46	46
Envase H2OH!	58	230	44	19%	195	122	89	76	64	54	49	46	44	44

Para cuantificar el porcentaje compactado de la botella podemos verla figura 2.1.2, donde se ve que para poder comprimir una botella y deformarla permanentemente a por lo menos un 25% de su volumen inicial, es necesario aplicar por lo menos una fuerza de 80 kg en la dirección axial, es decir el eje de la botella.

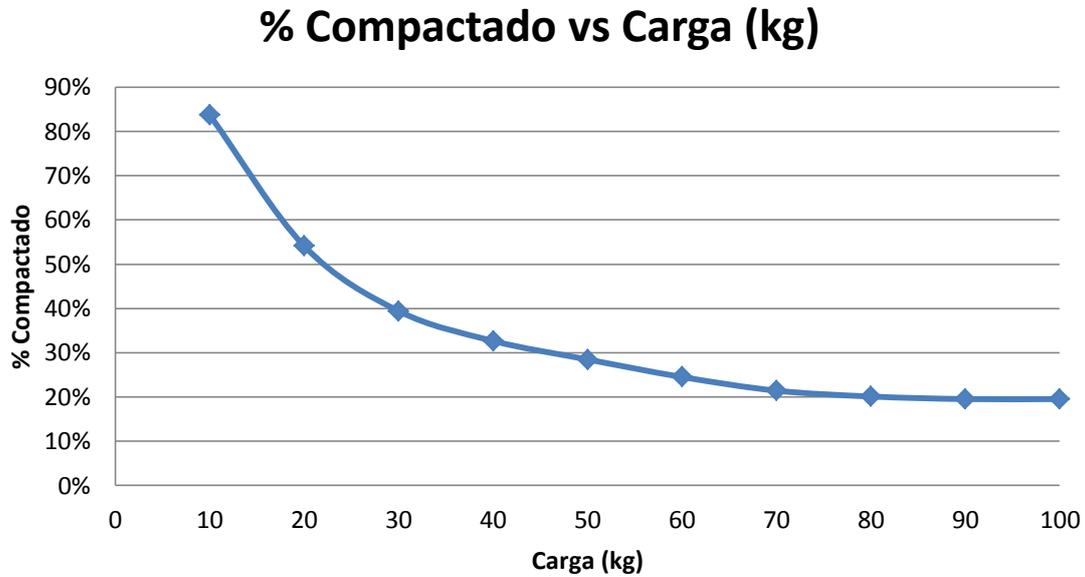


Figura 2.1.2: % Compactado vs. Carga (kg)

Considerando que pueden existir distintas formas de botellas en el mercado, establecemos como primer parámetro la necesidad de aplicar una fuerza de 80 kg (785 N) para comprimir permanentemente una botella PET.

2.2. Sistema de compactación

Lo primero para el desarrollo del prototipo es seleccionar un sistema de compactación de botellas de PET. Del ensayo realizado en la sección 2.1 definimos que como mínimo este debe poder aplicar una fuerza de hasta 80 kg.

Considerando los sistemas propuestos en el anexo B-1, vamos a tener en cuenta los siguientes criterios:

- **Inversión:** se debe tener un criterio económico cuando se selecciona el sistema.
- **Tamaño:** muchas veces la disponibilidad de espacio puede presentar un factor limitante.
- **Peso:** considerando que deseamos una máquina fácilmente transportable, el peso debe ser óptimo.
- **Disponibilidad:** dada la situación actual en la Argentina, es necesario tener en cuenta la disponibilidad si es que el producto seleccionado es importado.
- **Consumo de energía:** debe fomentar el ahorro de energía.
- **Operatividad:** debe ser simple para que lo pueda utilizar cualquier tipo de usuario.
- **Durabilidad:** considerar el período de vida útil del sistema.
- **Mantenimiento:** debe ser simple como para poder ser realizado por personal no calificado.
- **Fuerza máxima alcanzable:** debe ser suficiente para llegar a la deformación plástica de la botella.

Matriz de decisión:

Para poder evaluar los distintos criterios para cada tipo de sistema propuesto, vamos a utilizar una matriz de decisión con ponderaciones definidas y una escala de 0 a 10.

Las puntuaciones están basadas en los argumentos expuestos en el anexo B-1.

Criterio	Calificación	Ponderación	Sistemas Manuales	Actuadores Hidráulicos	Actuadores Neumáticos	Actuadores Eléctricos
Inversión	9	16%	10	5	7	2
Tamaño	8	15%	10	3	5	8
Peso	7	13%	9	2	5	7
Disponibilidad	10	18%	9	4	6	2
Consumo de energía	2	4%	8	5	7	2
Operatividad	6	11%	1	3	3	9
Durabilidad	6	11%	1	7	7	9
Mantenimiento	3	5%	2	5	7	9
Fuerza máxima	4	7%	1	8	7	8
			6,6	4,4	5,8	5,9

Algunos comentarios derivados de la matriz:

Debemos descartar completamente el sistema manual, ya que a pesar de cumplir con los requisitos que consideramos más importantes, no es lo suficientemente complejo como para desarrollar un análisis. Además, relevamos que existe una gran variedad de productos manuales, y no daría lugar a un desarrollo práctico para proponer un diseño.

El sistema hidráulico, si bien excede la fuerza necesaria a aplicar, supone un mayor costo, mayor consumo de energía y la necesidad de implementar bombas para su accionamiento. Además, es necesario considerar el fluido hidráulico y el costo que esto lleva asociado. Consideramos que este sistema puede ser útil para comprimir más de una botella dentro de una misma cámara, sabiendo que se va a necesitar una fuerza más grande.

El sistema neumático tiene el mismo problema, ya que si no contamos con un sistema de provisión de aire, es necesario el uso de un compresor, que lleva asociado costo y mantenimiento.

Consideramos un mecanismo de accionamiento eléctrico como la mejor alternativa para la solución que se va a proponer más adelante. Considerando las ventajas expuestas en el anexo B-1 (plasmadas en la matriz de decisión), podemos destacar que no necesita un depósito como así el resto de los sistemas (un depósito de fluido hidráulico o un compresor). El concepto de mejorar el tamaño y peso para tener mejor transportabilidad resulta un peso importante para estos sistemas.

Sin embargo, tienen un costo muy elevado y por la situación actual del país con los productos importados resulta complejo conseguir estos actuadores de las características que vamos a necesitar (carrera y fuerza). Lo importante para fabricar el prototipo es reducir el costo y asegurar la disponibilidad de las piezas involucradas.

Por lo tanto para poder reducir el costo y disponibilidad del prototipo, vamos a diseñar una propuesta con un sistema de accionamiento neumático con una cámara de compactación diseñada para ser universal a cualquier tipo de actuador. Más adelante se va a ver que cambiando sólo la unión y el sistema de accionamiento es posible cambiar el sistema de compactación.

2.3. Cámara de Compactación

Para seleccionar la forma de la cámara de compactación vamos a tener en cuenta los siguientes factores:

- Disponibilidad de los materiales necesarios para su construcción.
- Minimizar las operaciones de mecanizado necesarias.
- Seleccionar los materiales para minimizar el costo del diseño.

Propuesta: el diseño que se va a presentar debe estar inspirado en cualquier cañería común y corriente. Esto supone una gran disponibilidad del material ya que se puede comprar como material sobrante o algún rezago.

Consiste en que la acción de un pistón neumático dentro de esta cámara sea capaz de comprimir una botella para deformarla plásticamente y expulsarla sin la necesidad de un segundo accionamiento (manual o mecánico).

De esto surgen cuestiones importantes:

1. Es necesario poder comprimir la botella contra una superficie, por lo que se decide soldar una chapa de un espesor a definir contra un extremo de la cámara de compactación.
2. Se debe ensamblar la cámara de compactación con el sistema de compactación. En este caso, se propone un diseño para el sistema de accionamiento que va a tener el prototipo (actuador neumático).

Para poder hacer esto se decidió usar 2 chapas: la primera chapa va a ir abulonada al actuador neumático, de manera que se aprovechan las uniones roscadas que este ya presenta. Posteriormente, agujereando las chapas en sus esquinas, es posible unir las chapas mediante el uso de bulones, con dimensiones a definir. Esto sería análogo a lo que es una brida común y corriente. Cabe destacar que presenta la ventaja que no es necesario fabricar una brida especial y el problema se puede solucionar con 2 piezas simples y un posterior trabajo de mecanizado. Ver figuras 2.3.

3. Para poder diseñar los soportes de la máquina, se va a utilizar otra chapa igual abulonada al otro extremo del actuador para posteriormente sujetarla contra una pared.

Como criterio, se decidió no fabricar "piezas especiales", por lo que el diseño va a consistir en distintas piezas, fáciles de conseguir a un costo bajo, con posteriores operaciones de mecanizado y ensamblado.

A continuación se pueden ver los planos, con dimensiones en mm para la cámara propuesta:

Figura 2.3.1: Vista isométrica de la cámara

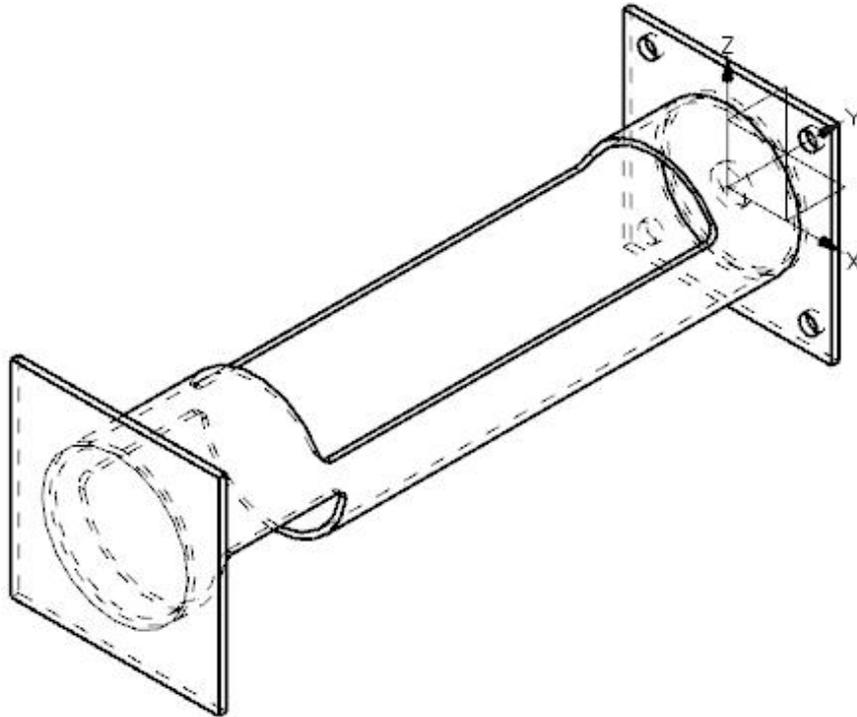
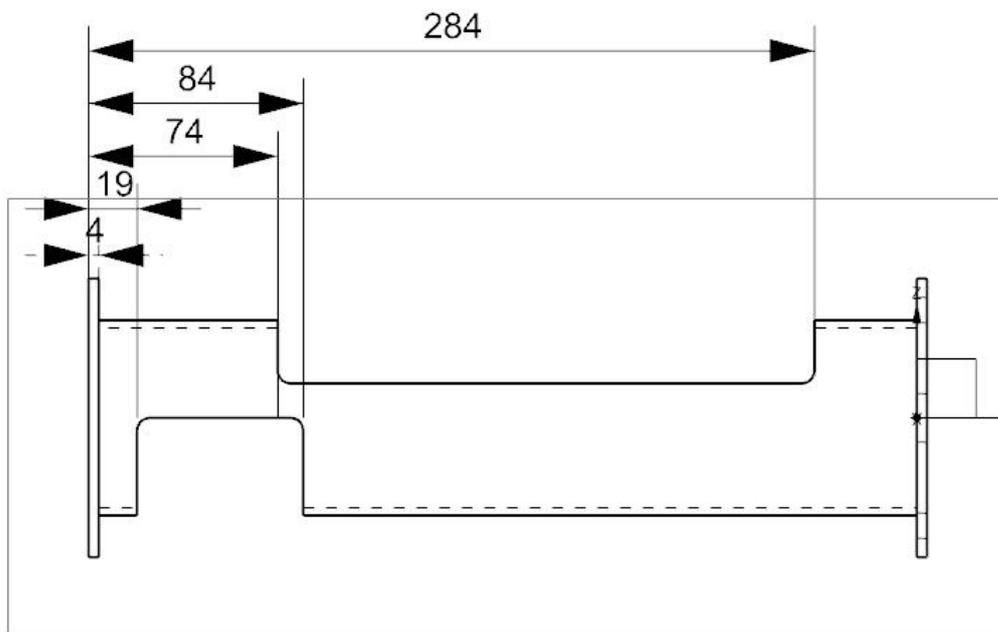


Figura 2.3.2: Vista de costado de la cámara



Nota: todos los radios de acuerdo son 10 mm

Figura 2.3.3: Vista de arriba de la cámara

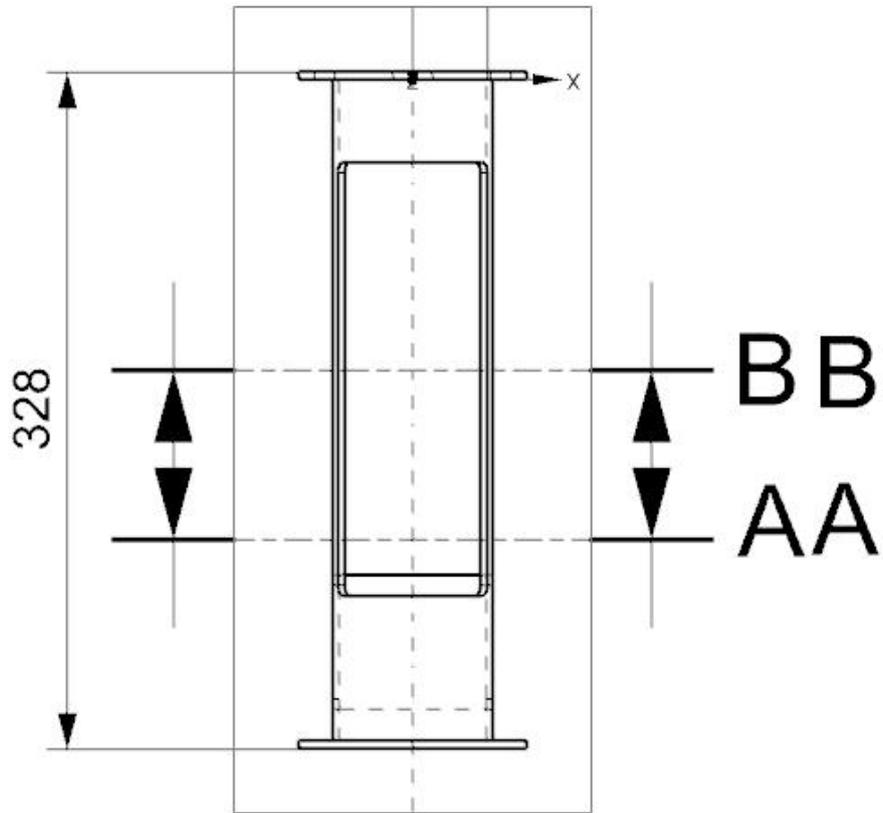
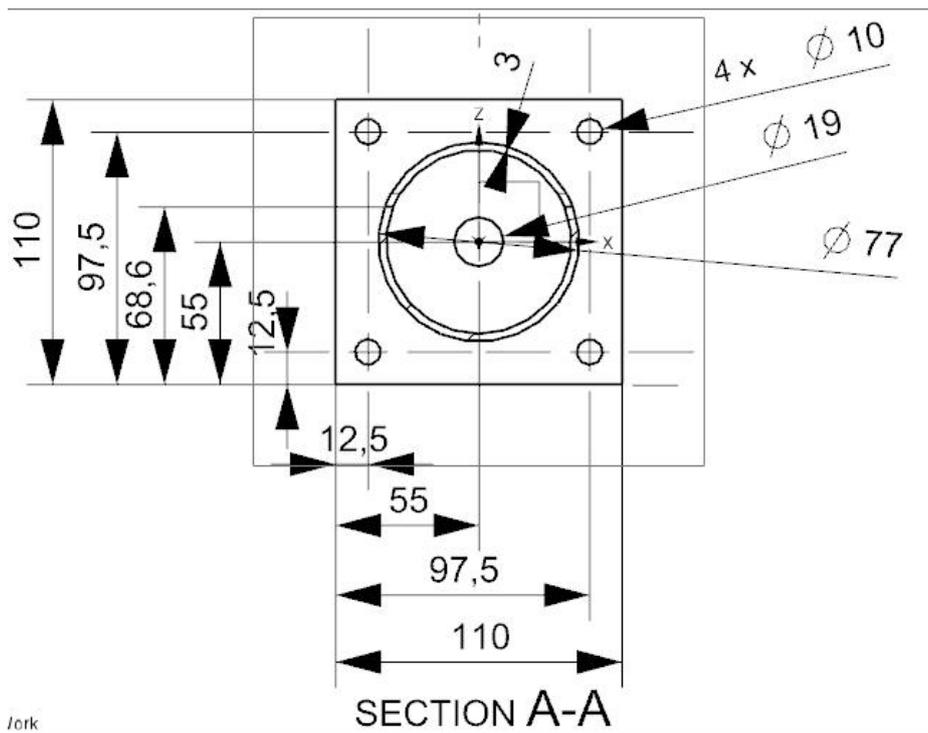
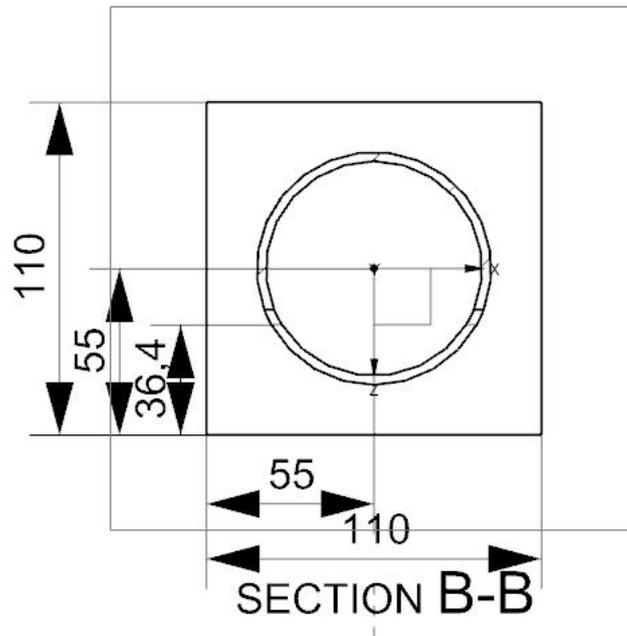


Figura 2.3.4: Corte AA



fork

Figura 2.3.5: Corte BB



Algunos comentarios sobre el diseño:

- Para unir las chapas al caño mecanizado van a ser necesarias unas operaciones de soldadura a desarrollar más adelante.
- Los radios garantizan mayor resistencia de la estructura (verificado en la sección 3.4).
- Las operaciones de mecanizado necesarias sobre el caño sirven para:
 - ✓ Ingreso de la botella a comprimir – dimensión definida según los tamaños de botellas investigadas en la sección 2.1.
 - ✓ Expulsión automática de la botella comprimida: considerando que en la sección 2.1 se definió que hay que comprimir la botella a un 25% de su longitud original, se deja un tamaño mayor para asegurar la correcta expulsión de la botella. Esto surge de que la mejor forma de remover la botella comprimida es por el lado inferior de la cámara de compactación de manera que se reduce la fuerza necesaria para empujar la botella comprimida hasta que cae simplemente por efecto de gravedad. Además, el tiempo de desalojo del material resulta ser el más corto posible, comparando con la necesidad de utilizar algún sistema de accionamiento mecánico para poder expulsar el material compactado sin necesidad de aportar energía extra para esta operación que supondría un costo elevado para el diseño. Para poder reforzar la unión entre el cilindro y la chapa contra la que se comprime la botella, se deja un espacio de 15 mm para que se suelde el extremo entero con la chapa.

A continuación se pueden ver los planos de las chapas para unir el pistón neumático con la cámara de compactación y con la pared:

Cabe mencionar que se utilizan los agujeros del actuador para sujetar esta chapa. Para esto se van a necesitar bulones M10.

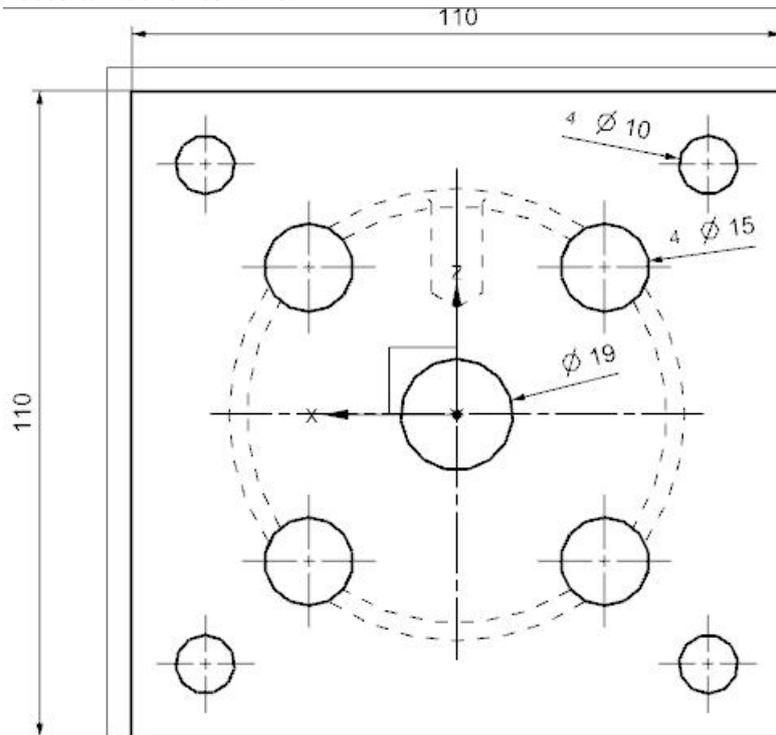


Figura 2.3.6: Vista frontal de las chapas de sujeción

Nota: estas chapas tienen un espesor de 4 mm.

2.4. Frente de Compactación

Esto va a ser la placa que va a ir acoplada al extremo del vástago pistón, adquiriendo el mismo movimiento lineal con la finalidad de suministrar la energía a la botella en el proceso de compactación.

Considerando el diseño propuesto en la sección 2.3, se propone que el frente de compactación sea una chapa circular con suficiente holgura para poder tener un movimiento libre dentro del caño y no aplicar cargas adicionales.

Para poder acoplar el frente de compactación al vástago del cilindro neumático, se va a aprovechar el extremo roscado que viene incluido en la provisión del actuador neumático. Para esto, el frente va a ir acoplado mediante el uso de tuercas.

A continuación se pueden ver los planos, con dimensiones en mm para el frente de compactación propuesto:

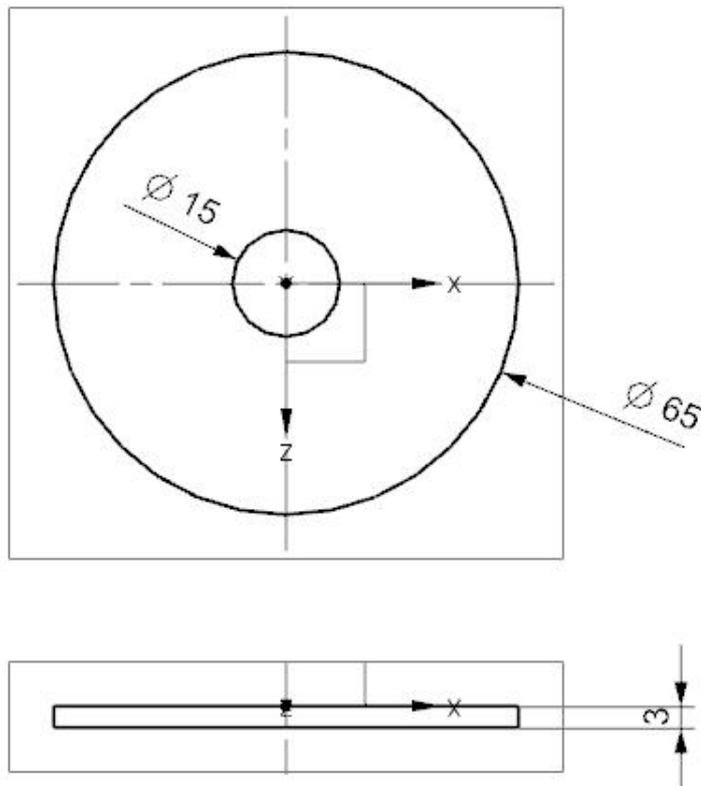


Figura 2.4.1: Frente de Compactación

U3: Dimensionamiento y Cálculos de Resistencia

3.1. Dimensionamiento del Pistón Neumático

Para el dimensionamiento del pistón neumático a utilizar, vamos a utilizar dos parámetros:

1. Carrera del pistón: tiene que poder cumplir con el recorrido necesario para comprimir la botella. Es decir, tiene que poder atravesar el largo de toda la cámara de compactación propuesta en la sección 2.3: 300 mm.
2. Fuerza máxima: Esta fuerza (80 kg) está definida por el ensayo realizado en la sección 2.1

Cilindro Neumático

- i. Factor de pandeo como en columnas de Euler: con un soporte sin guiado rígido el factor de pandeo es de 2.
- ii. Longitud Efectiva (h) [mm] = Carrera * Factor de pandeo
= 300 mm * 2 = 600 mm
- iii. $F_{emp} [N] = p_{max} * A_{cil} = 785 \text{ N}$ (de sección 2.1)
- iv. Determinación del diámetro del vástago en función de la carrera y de la fuerza: Utilizando el gráfico B.2-3, trazando una línea vertical desde $F = 785 \text{ N}$ hasta la intersección con la línea $l = 600 \text{ mm}$, se obtiene:

$$\Phi_{vástago} = 16 \text{ mm}$$

Cálculo de la superficie del émbolo:

Se puede considerar pérdidas por fricción como un 10% y un adicional por contrapresión y pérdidas de carga de 20%

$$\begin{aligned} F_{real-avance} &= F_{teórica} - F_{rozamiento} \\ &= F_{teórica} - 0.1 F_{teórica} = 0.9 F_{teórica} = 0.9 (p - CP) * A_{émbolo} \end{aligned}$$

Del ensayo realizado en la sección 2.1 sabemos se necesita una fuerza mínima para comprimir permanentemente la botella de 785 N :

De tal manera, para dimensionar tomamos $F_{real-avance} = 785 \text{ N}$

$$A_{émbolo} = 1.39 * (785 \text{ N}) / 600000 \text{ Pa} = 0,00182 \text{ m}^2$$

Sabiendo que $A_{émbolo} = \pi * \Phi_e^2 / 4$

$$\Phi_e = 48,1 \text{ mm} \approx 50 \text{ mm} \text{ (medida estándar)}$$

Condiciones de Servicio del Cilindro:

Condiciones para la utilización de actuadores



Fluido			
Bajo condiciones normales, los actuadores neumáticos de Festo pueden utilizarse con aire comprimido lubricado y sin lubricar. En caso de ser necesario el uso de aire de otra calidad, se indica en el texto de los datos técnicos del	producto correspondiente. La elección de materiales, la configuración geométrica de las juntas dinámicas y la lubricación básica aplicada en fábrica permiten el funcionamiento con aire comprimido no	lubricado. Sin embargo, no se admite el funcionamiento sin lubricación en las siguientes condiciones:	<ul style="list-style-type: none"> • Si un actuador funcionó una vez con aire comprimido lubricado siempre tendrá que ser utilizado con aire lubricado, ya que la lubricación adicional provoca el lavado de la lubricación de fábrica.
Condiciones normales de utilización		Frecuencia	
Los actuadores neumáticos sirven para transformar la energía de la presión en un movimiento; con ello se desarrollan y transmiten esfuerzos. La utilización de los cilindros como muelles o elementos	de amortiguación no forma parte de las condiciones normales de utilización, ya que con ello se producen cargas adicionales.	Si los actuadores neumáticos son accionados a la velocidad máxima permitida, hay que realizar unas pausas entre los movimientos de las carreras.	Para un funcionamiento sin lubricación hay que establecer la frecuencia máxima en función de una velocidad media de 1 m/s.
Posición de montaje	Presión de funcionamiento	Presión de trabajo	
En principio, los actuadores de Festo pueden montarse en cualquier posición. Si es necesario considerar limitaciones o adoptar medidas especiales, consultar los datos técnicos del producto correspondiente.	Las indicaciones de "máx." o "máx. admisible" indican la presión máxima admisible para el correcto funcionamiento de un elemento neumático.	Se trata del margen entre la presión mínima necesaria y máxima admisible para el correcto funcionamiento de un	elemento o sistema neumático. En la neumática, esta presión también se denomina presión de trabajo.

Consumo de aire (fórmulas de sección B-2):

$Q = (\pi/4) * (\Phi_e^2 - \Phi_v^2) * l * (p + 1) * 10^{-6}$; dónde:

- Φ_e = diámetro del émbolo (mm) = 50 mm
- Φ_v = diámetro del vástago (mm) = 16 mm
- l = carrera (mm) = 300 mm
- p = presión relativa de funcionamiento (bar) = 6 bar

$Q_{avance} = (\pi/4) * (50 \text{ mm})^2 * 300 \text{ mm} * (6 \text{ bar} + 1 \text{ bar}) * 10^{-6} = 4,12 \text{ lts}$

$Q_{retroceso} = (\pi/4) * ((50 \text{ mm})^2 - (16 \text{ mm})^2) * 300 \text{ mm} * (6 \text{ bar} + 1 \text{ bar}) * 10^{-6} = 3,70 \text{ lts}$

Consumo de aire por ciclo = $Q_{avance} + Q_{retroceso} = 7,82 \text{ lts}$

Pistón propuesto:

Por un tema de disponibilidad y costo, se propone el siguiente pistón: Marca Festo modelo ADVU-63-30-A-P-A. Esto es porque ya contamos con el mismo para poder desarrollar el prototipo.

Hoja de datos

Característica	Propiedades
Carrera	1 ... 300 mm
Diámetro del émbolo	63 mm
Amortiguación	P: amortiguación por tope elástico/placa a ambos lados
Posición de montaje	Indistinto
Forma de funcionamiento	de doble efecto
Extremo del vástago	Rosca exterior
Construcción	Émbolo Vástago
Detección de la posición	Para sensores de proximidad
Variantes	vástago simple
Presión de funcionamiento	0,6 ... 10 bar
Fluido	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Indicación sobre los fluidos de funcionamiento y de mando	Opción de funcionamiento con lubricación (necesaria en otro modo de funcionamiento)
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura ambiente	-20 ... 80 °C
Energía del impacto en las posiciones finales	0,7 J
Fuerza teórica con 6 bar, retroceso	1.750 N
Fuerza teórica con 6 bar, avance	1.870 N
Masa móvil con carrera de 0 mm	134 g
Peso adicional por 10 mm de carrera	107 g
Peso básico con carrera de 0 mm	1.059 g
Masa adicional por 10 mm de carrera	16 g
Tipo de fijación	a elegir: con taladro pasante con accesorios
Conexión neumática	G1/8
Información sobre el material del tornillo con collar	Acero cincado
Información sobre el material de la tapa	Aleación forjable de aluminio
Información sobre el material de las juntas dinámicas	TPE-U(PU) NBR
Información sobre el material del vástago	Acero de aleación fina
Información sobre el material de la camisa del cilindro	Aleación forjable de aluminio

- Carga de 1870 N
- $\Phi_e = 63 \text{ mm}$
- $l = 300 \text{ mm}$
- $\Phi_{\text{vástago}} = 13 \text{ mm}$
- Consumo de Aire por ciclo

$$Q_{\text{avance}} = (\pi/4) * (63\text{mm})^2 * 300 \text{ mm} * (6 \text{ bar} + 1 \text{ bar}) * 10^{-6} = 6,54 \text{ lts}$$

$$Q_{\text{retroceso}} = (\pi/4) * ((63\text{mm})^2 - (13\text{mm})^2) * 300 \text{ mm} * (6 \text{ bar} + 1 \text{ bar}) * 10^{-6} = 6,27 \text{ lts}$$

$$Q = 12,81 \text{ lts/ciclo} = 0,002135 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.2. Elección de Válvula

Especificación

Considerando que el tamaño nominal debe ser igual al del cilindro (implica iguales conexiones), tenemos la Electroválvula Festo modelo VUWG-L10-B52-G14:

- 5/2 vías
- Presión de control hasta 10 bar
- Fluido: Aire comprimido según ISO 8573-1:2010
- Conexión de 1/4" roscada

Imagen 3.2.1: Electroválvula



3.3. Accesorios:

Dimensionamiento del compresor

Se pueden distinguir los siguientes lineamientos:

- Presión de servicio: 6 bar
- Caída de presión admisible:
 - Red central: 0,03 bar
 - Red distribución: 0,03 bar
 - Red conexión: 0,04 bar
 - Unidad de mantenimiento y manguera: 0,5 bar
- Flujo volumétrico:
 - $Q_d = 12,81$ lts
 - Factor de uso (F_u) = 10%
 - Factor de simultaneidad (F_s) = 1
 - Fugas: 10 a 30% (%F)
 - Reserva: 30-40% (%R)

$$Q = F_s * (1 + \%F) * (1 + \%R) * Q_d * F_u$$

$$= (1 + 0,3) * (1 + 0,4) * 12,81 * 0,1 = 2,33 \text{ lts/ciclo} = 0,00038857 \text{ m}^3/\text{s} = 23,3 \text{ lts/m}$$

- Cálculo de diámetro interno para la cañería (flexible)

$$d = 5 \sqrt{\frac{1,6 \times 10^3 \times \dot{V}^{1,85} \times L}{\Delta p \times p_1}}$$

$$d = \sqrt[5]{\frac{1,6 \times 10^3 * 0,00038857^{1,85} * 2}{1,5 * 7}}$$

$d = 0,172 \text{ cm} = 1,72 \text{ mm}$

Por lo tanto, tomamos $d = \frac{1}{4}''$ (valor estándar).

Compresor propuesto:

Para poder desarrollar el prototipo, vamos a utilizar un compresor Downen Pagio modelo CA2525SP con potencia de 2,5 hp, capacidad de 27 lts, presión de 0,8 MP. Esto se debe a que ya lo tenemos y no es necesario comprar otro para poder realizar el desarrollo.

Se presenta una lista de elementos relativos al funcionamiento del equipo neumático. Tienen como fin la preservación de los sistemas.

- Tubería de $\frac{1}{4}''$ para hacer la interconexión entre el compresor, la electroválvula y el cilindro neumático.
- Comando bimanual para poder accionar la electroválvula y así activar el sistema de compactación.
- Aceite para lubricación del compresor seleccionado.

3.4. Modelado y Cálculo Estructural de la Cámara de Compactación

Objeto:

- ✓ Realizar un análisis estructural de la cámara de compactación propuesta para el modelo de la compactadora mediante el uso de elementos finitos.
- ✓ Obtener tensiones y desplazamientos máximos en la estructura.
- ✓ Obtener fuerzas de reacción máximas.

Modelización del Problema:

- Se modela el conjunto de la cámara de compactación con el software Siemens NX 8.0 usando las dimensiones propuestas en la sección 5.4.2.

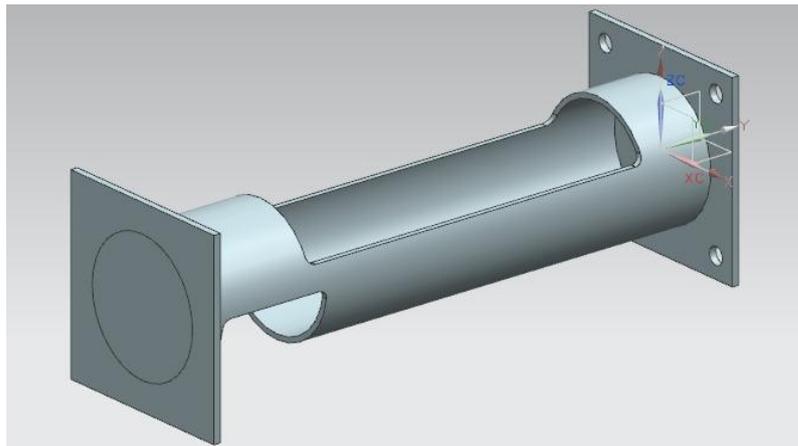


Figura 3.4.1: Conjunto de la cámara de compactación

- Se mallan las piezas con elementos tetraédricos de 27 nodos para modelar correctamente los componentes mecánicos del conjunto. El costo computacional de realizarlo en 3D en lugar de cáscaras no es elevado y se pudo realizar varias corridas.

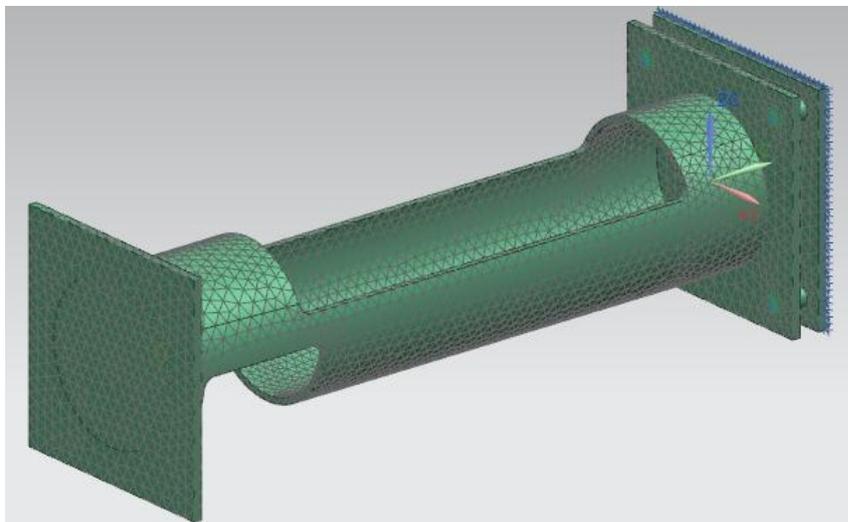


Figura 3.4.2: Mallado del conjunto

- Carga: Se aplica una fuerza de 1870 N distribuida uniformemente sobre la superficie donde se comprimiría la botella.

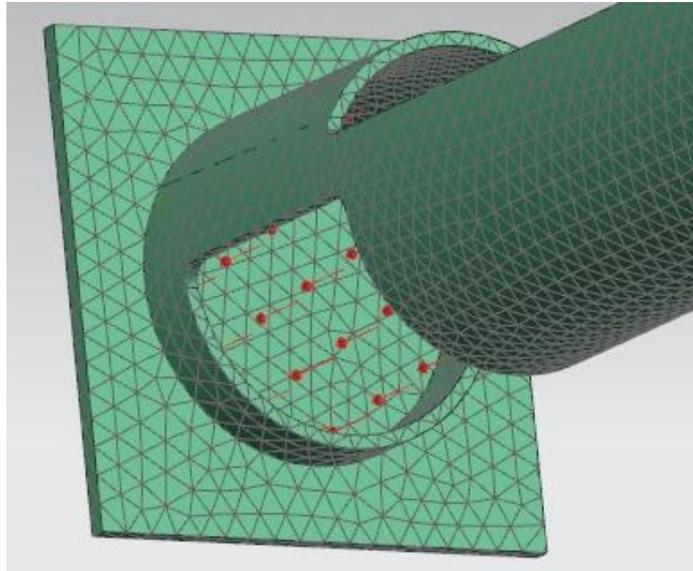


Figura 3.4.3: Aplicación de la carga

- Condiciones de Borde: bulones modelados usando elementos viga, y el efecto que tienen sobre las partes es tenido en cuenta mediante el uso de rigid links. La placa que se ve en la figura 3.4.4 está fija.

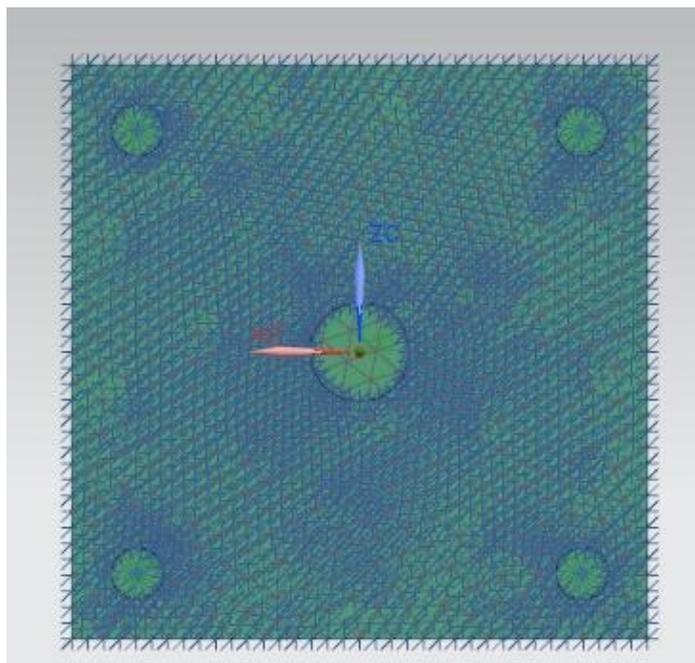


Figura 3.4.4: Condiciones de borde

Hipótesis

- Material isotrópico y homogéneo
- Material: Acero AISI 1030 - se adoptan propiedades según la tabla 5.4.8.1

Tabla 3.4.1: Propiedades del Acero 1030

Composición Química	
CC	Mn
0,27-0,34	0,6-0,9
Propiedades Físicas	Sistema Métrico
Propiedades Mecánicas	
Densidad	7.85 g/cc
Dureza, Brinell	149
Tensión última	525 MPa
Tensión de fluencia	440 MPa
Elongación	12 %
Reducción de area	35 %
Módulo de Elasticidad	205 GPa
Razón Poisson's	0.29
Propiedades Eléctricas	
Resistencia Eléctrica	1.66e-005 ohm-cm
Propiedades Térmicas	
CTE, línea 20°C	11.7 µm/m-°C
Capacidad Térmica	0.486 J/g-°C
Conductividad Térmica	51.9 W/m-K

Nota: Se propone este material considerando su buena maquinabilidad, buena formabilidad, capacidad de soldar con cualquier método, capacidad de trabajar en frío.

- Matrices indeformables
- Las formas de las botellas son uniformes, apoyan completamente sobre la superficie de la cámara de compactación y se comprimen todas de la misma manera.
- Se adoptan materiales elásticos y formulación de pequeños desplazamientos.
- La fuerza aplicada por el vástago del pistón neumático es uniformemente distribuida sobre la superficie correspondiente de la chapa sin ningún tipo de excentricidad (ver figura 5.4.8.3)
- No se considera el peso propio en el análisis ya que la máquina va a estar completamente apoyada sobre una superficie plana.
- La chapa abulonada al pistón neumático se considera una sola pieza junto con este.
- No se considera coeficiente de fricción.
- No se consideran efectos térmicos.

Resultados

- Desplazamiento: se puede observar un desplazamiento máximo de 0,21 mm en el nodo 234797 (ver figura 3.4.5).

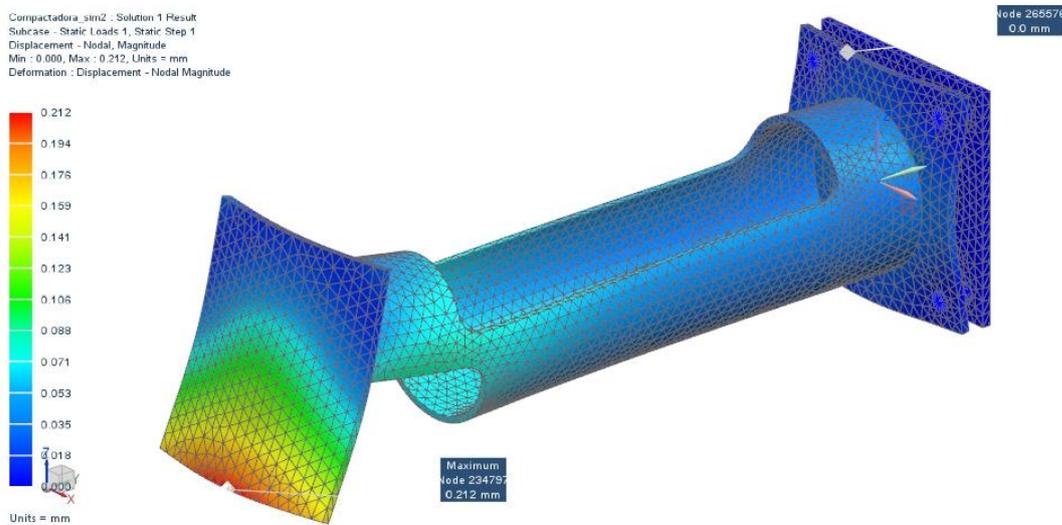


Figura 3.4.5: Desplazamientos en la cámara de compactación

Podemos identificar este nodo en el gráfico en la chapa donde se realiza la compactación de la botella. Se ve que la magnitud encontrada es un valor permisible.

- Tensiones de Von Mises: se encuentra una tensión máxima de 139,73 MPa en el elemento 118465, nodo 25742 (ver figura 3.4.6).

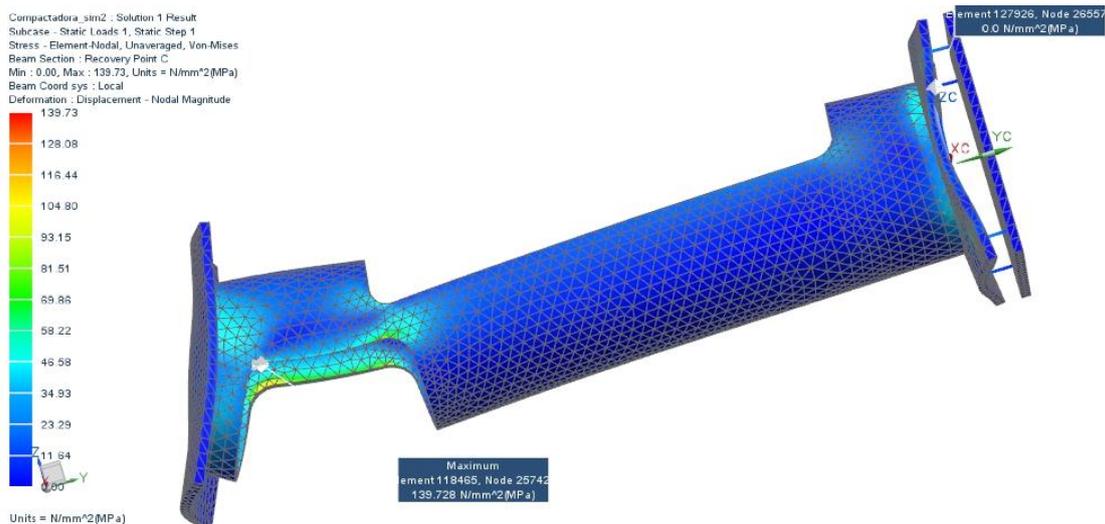


Figura 3.4.6: Tensiones de Von Mises en la cámara de compactación

Se encuentra este valor máximo en los radios del espacio para expulsar la botella compactada.

En las uniones soldadas se encuentra una tensión máxima de 65,9 MPa.

- Fuerzas Máximas: Se encuentran fuerzas de reacción máximas de 508,04 N en el nodo 12600 (ver figura 3.4.7).

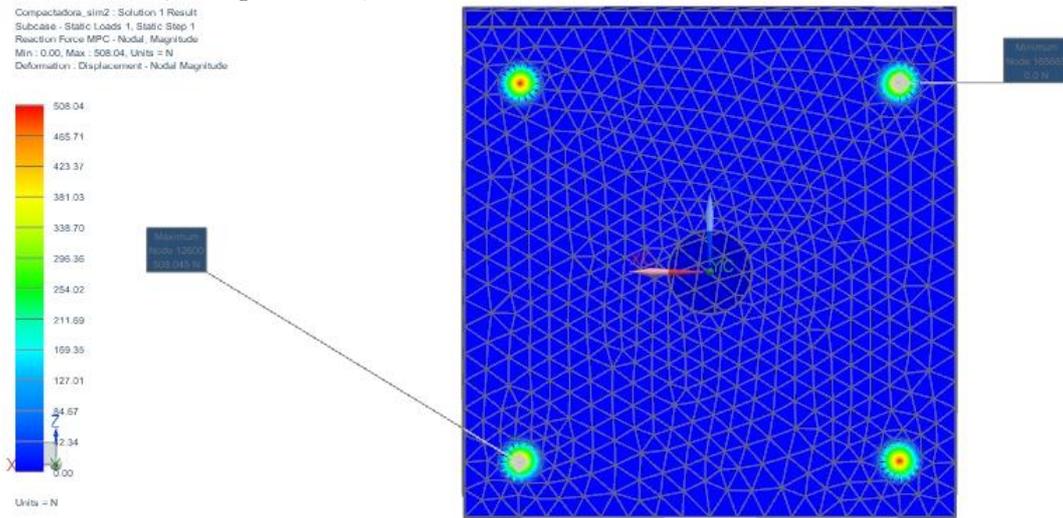


Figura 3.4.7: Fuerzas máximas en la cámara de compactación

Esta fuerza se compone de la siguiente manera (resultado obtenido del NX):

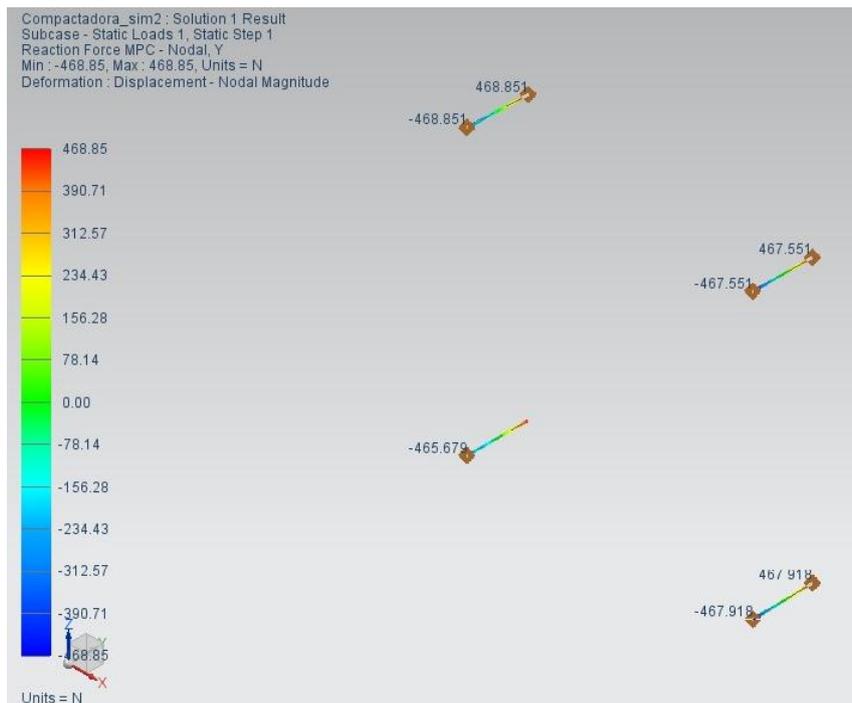
$$F_x = 124,57 \text{ N}$$

$$F_y = 468,85 \text{ N}$$

$$F_z = 153,98 \text{ N}$$

Se puede ver que estos nodos coinciden con los bulones que vamos a utilizar.

Verificación de Cargas en el componente y:



$$\sum F_y = 468,85 \text{ N} + 467,55 \text{ N} + 467,92 \text{ N} + 465,68 \text{ N} - 1870 \text{ N} = 0$$

3.5. Modelado y cálculo estructural del frente de compactación

Objeto:

- ✓ Realizar un análisis estructural del frente de compactación propuesto para el modelo de la compactadora mediante el uso de elementos finitos.
- ✓ Obtener tensiones y desplazamientos máximos en la estructura.
- ✓ Obtener las fuerzas de reacción.

Modelización del Problema:

- Se modela el conjunto de la cámara de compactación con el software Siemens NX 8.0 usando las dimensiones propuestas en la sección 2.4.

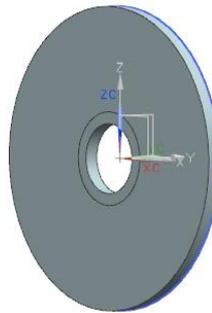


Figura 3.5.1: Frente de compactación

- Se mallan las piezas con elementos tetraédricos de 27 nodos para modelar correctamente los componentes mecánicos del conjunto. El costo computacional de realizarlo en 3D en lugar de cáscaras no es elevado y se pudo realizar varias corridas.
- Carga: Se aplica una fuerza de 1870 N distribuida uniformemente la línea donde comprime el pico de la botella.
- Condiciones de Borde: Se fija la superficie donde sujetaría la tuerca al frente de compactación

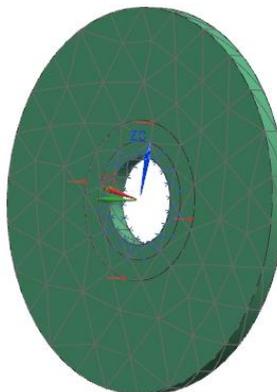


Figura 3.5.2: Condiciones de borde y aplicación de cargas

Hipótesis

- Material isotrópico y homogéneo
- Material: Acero AISI 1030 - se adoptan propiedades según la tabla 3.4.1

Nota: Se propone este material considerando su buena maquinabilidad, buena formabilidad, capacidad de soldar con cualquier método, capacidad de trabajar en frío. Es el mismo material que la cámara de compactación.

- Matrices indeformables
- Las formas de las botellas son uniformes, apoyan con el pico sobre el frente sin desplazarse durante la compactación y se comprimen todas de la misma manera.
- Se adoptan materiales elásticos y formulación de pequeños desplazamientos.
- La fuerza es aplicada sobre la circunferencia donde apoyaría el pico de la botella (ver figura 3.5.2)
- No se considera el peso propio en el análisis.
- No se considera coeficiente de fricción.
- No se consideran efectos térmicos.

Resultados

- Desplazamientos: se observa un desplazamiento máximo de $4,13 \cdot 10^{-3}$ mm en el nodo 854.

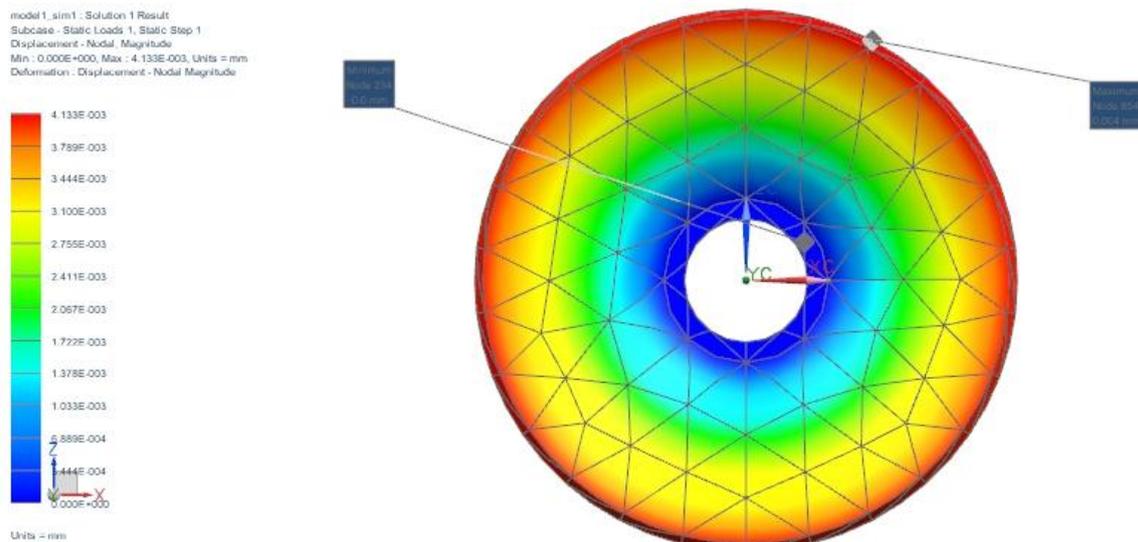


Figura 3.5.3: Desplazamientos en el frente de compactación

Consideramos el desplazamiento máximo encontrado despreciable.

- Tensiones de Von Mises: se encuentra una tensión máxima de 44,40 MPa en el elemento 203 nodo 729 (ver figura 3.5.4).

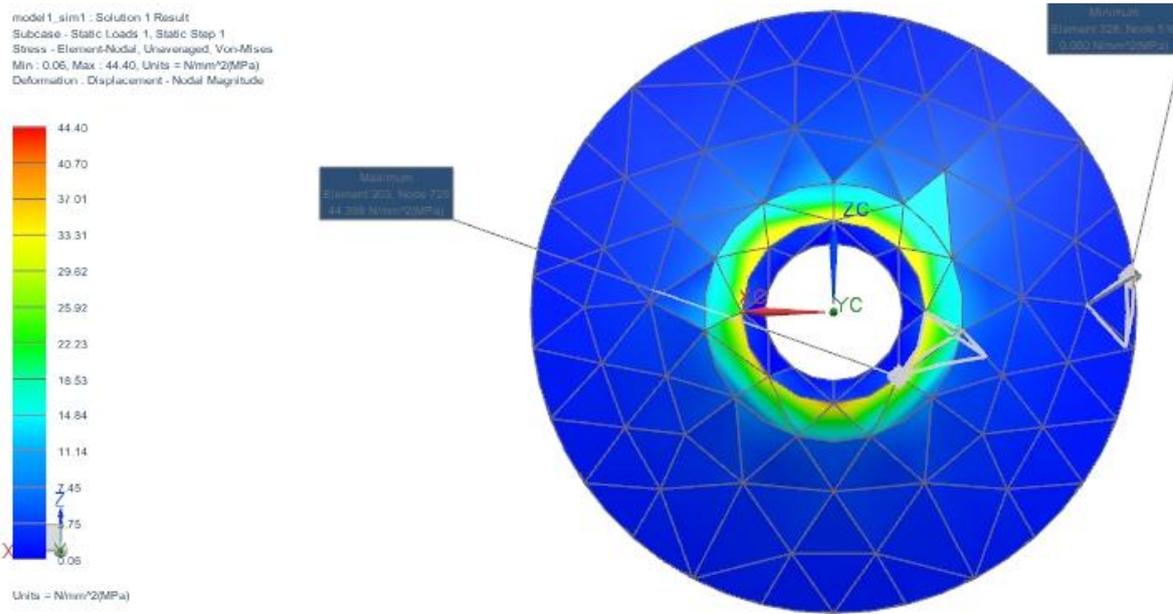


Figura 3.5.4: Tensiones de Von Mises en la cámara de compactación

- Fuerzas Máximas: Se encuentran fuerzas de reacción máximas de 197,04 N en el nodo 778 (ver figura 3.5.5).

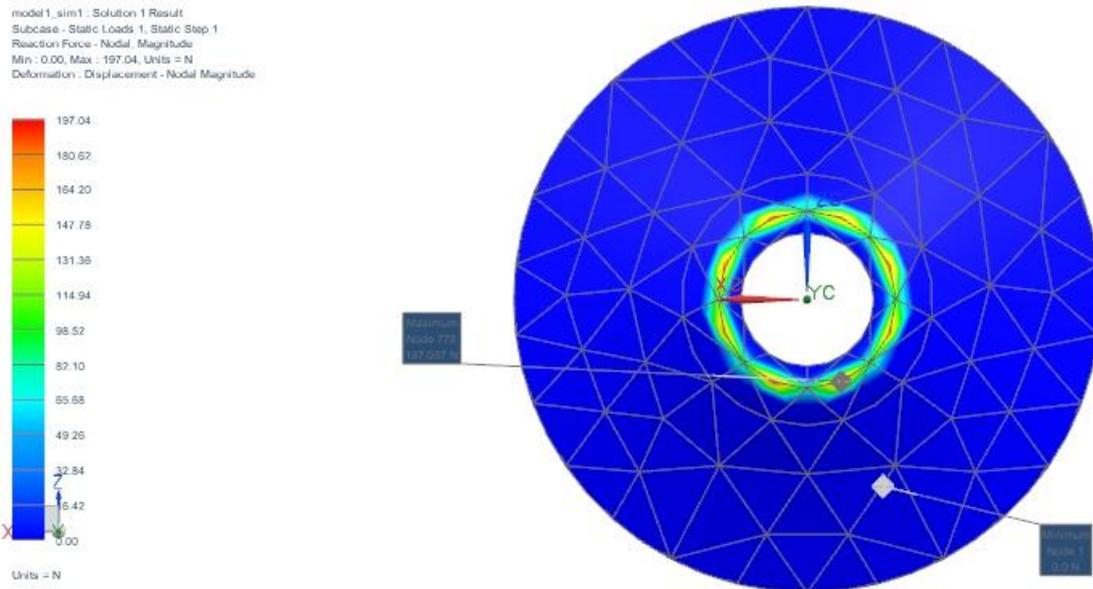
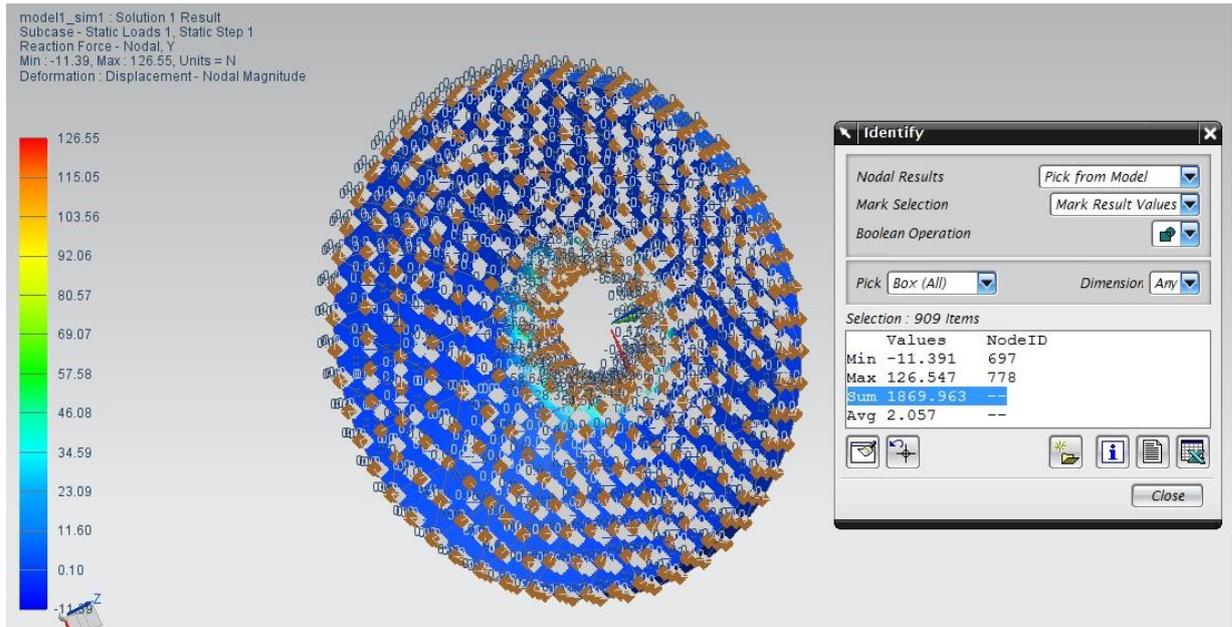


Figura 3.5.5: Fuerzas máximas en el frente de compactación

Verificación de las cargas en componente Y:



$$\sum F_y = 0$$

3.6. Dimensionamiento y Resistencia de la Unión Soldada

La estructura de la máquina diseñada contiene uniones soldadas. Por lo tanto, es necesario dimensionar los cordones de soldadura que unir el caño mecanizado con las chapas. Esta unión es la más importante, ya que según el estudio realizado en la sección 3.4, en la sección donde debemos soldar encontramos un esfuerzo máximo de 62,04 MPa.

Se utiliza una soldadura de filete para simplificar el diseño de la máquina. Este tipo de soldadura se rige por la norma NAG-100 por lo que listamos las siguientes características:

- Tipo de Soldadura: Filete
- Longitud del cordón de soldadura: 242 mm
- Tipo de electrodo: E 6013. Se elige un electrodo rutílico, ya que es el más común.
- Garganta de la soldadura (vale para los dos extremos):
 - $h = 1,4 t$;
Dónde t = espesor más fino entre los componentes soldados ($t = 3$ mm).

$$h = 4,2 \text{ mm}$$

Por lo mencionado anteriormente, podemos especificar la soldadura por filete de la siguiente manera:

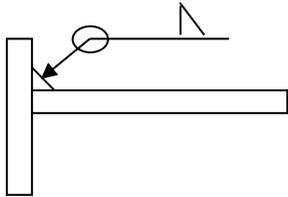


Figura 3.6.1: Especificación de Soldadura.

Resistencia de la Soldadura

Para realizar los siguiente cálculos se utilizaron las formulas propuestas en el marco teórico del proyecto (anexo B)

Podemos identificar los siguientes pasos para verificar fatiga:

1. Determinar el límite de resistencia a la fatiga. En el caso de los aceros, se estimará como:

$$S'_e = 0.5S_{ut} \quad S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)}$$

Considerando como material de aporte el electrodo E 7013, de la tabla 5.3.5.1 sabemos que $S_{ut} = 482$ MPa y $S_y = 393$ MPa, entonces:

$$S'_e = 241 \text{ MPa}$$

2. Se debe ajustar S'_e para determinar S_e :

$$S_e = S'_e k_a k_b k_c k_d k_e k_f \text{ [MPa]}$$

- Factor de superficie k_a : de la tabla B-5.9; tenemos $a=272$ y $b = -0,995$
 $k_a = 272*(482 \text{ MPa})^{-0.995} = 0.582$
- Factor de tamaño k_b : Para carga axial no hay efecto de tamaño, entonces
 $k_b = 1$.
- Factor de modificación de carga k_c : para carga axial $k_c = 0.85$
- Factor de temperatura de funcionamiento k_d : para el trabajo a temperatura ambiente $k_d = 1$.
- Factor de confiabilidad k_e : definiendo una confiabilidad del 95%; del a tabla B-5.11; tenemos:
 $k_e = 0.868$
- Factor de efectos varios k_f
 Despreciamos el resto de los efectos que pueden reducir o aumentar la resistencia a la fatiga se incluyen en este factor. Algunos de estos efectos son corrosión, recubrimiento electrolítico, metalizado por aspersion, frecuencia cíclica y corrosión por frotamiento.

$$k_f = 1$$

Por lo tanto tenemos:

$$S_e = 0.582 * 1 * 0.85 * 1 * 0.868 * 1 * S'_e = 0.43 * 241 \text{ MPa} = \mathbf{103,63 \text{ MPa}}$$

3. Determinación del factor de concentración del esfuerzo a la fatiga (K_f o K_{fs})

De la tabla B-5.3 podemos encontrar el factor de concentración de esfuerzo de fatiga:

$$K_{fs} = 1,5$$

4. Aplicar K_{fs}

$$S_e = 103,63 \text{ MPa} / 1,5 = \mathbf{69,09 \text{ MPa}}$$

5. Es necesario calcular σ_m y σ_a , aplicando K_f a ambos esfuerzos de ser necesario en presencia de una muesca:

$$\sigma_a = \sigma_m = (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}})/2 = \mathbf{32,95 \text{ MPa}}$$

En ausencia de la muesca σ_a y σ_m son iguales a los esfuerzos nominales.

6. Aplicar un criterio de falla por fatiga:

$$\text{Para } \sigma_m \geq 0;$$

Utilizando el método de Goodman modificado tenemos:

$$\sigma_a/S_e + \sigma_m/S_{ut} = 32,95/69,09 + 32,95/482 \text{ MPa} = 0,55$$

Ahora sabemos que $1/n = 0,55$. Se obtiene **$n = 1,83$**

Tomamos este valor que es mayor al obtenido mediante la teoría de la energía de distorsión: $n = 1,67$ (Tabla B-5.2)

7. Verificación de fluencia localizada:

$$\sigma_m + \sigma_a = 65,9 \text{ MPa}$$

$$S_y/n = 393 \text{ MPa} / 1,83 = 214,75 \text{ MPa}$$

Verifica ya que $\sigma_m + \sigma_a < S_y/n$

8. Determinación de los ciclos de vida

- Primero, obtener la fracción de resistencia a la fatiga f :
Teniendo que $S_{ut} = 482 \text{ MPa} = 70 \text{ kpsi}$; entonces tenemos del gráfico B-5.2

$$f = 0,9$$

- Determinación de las constantes de vida a la fatiga a y b :

$$a = (f S_{ut})^2 / S_e = (0,9 \cdot 482)^2 / 69,09 = 3026,37 \text{ MPa}$$

$$b = -(1/3) * \log (f S_{ut}/S_e) = -(1/3) * \log (0,9 * 482/69,09) = -0,266$$

- Ahora con Goodman Modificado tenemos:

$$S_f = \sigma_a / (1 - (\sigma_m/S_{ut}))$$

$$= 32,95 / (1 - (32,95/482)) = 35,37 \text{ MPa}$$

- Se obtienen los ciclos de vida N :

$$N = ((S_f/n)/a)^{1/b}$$

$$= ((35,37/1,83)/3026,37)^{-1/0,266} = \mathbf{1,78 \cdot 10^8 \text{ Ciclos}}$$

3.7. Resistencia de la Cámara de Compactación

Para realizar los siguiente cálculos se utilizaron las formulas propuestas en el marco teórico del proyecto (Anexo B)

Podemos identificar los siguientes pasos para verificar fatiga:

1. Primero se determina el límite de resistencia a la fatiga. En el caso de los aceros, se estimará como:

$$S'_e = 0.5S_{ut} \quad S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)}$$

Considerando las propiedades del acero AISI 1030 en la sección 3.4:

$S_{ut} = 525 \text{ MPa}$ y $S_y = 440 \text{ MPa}$, entonces:

$$S'_e = 262,5 \text{ MPa}$$

2. Se debe ajustar S'_e para determinar S_e :

$$S_e = S'_e k_a k_b k_c k_d k_e k_f \text{ [MPa]}$$

- Factor de superficie k_a : de la tabla B-5.9; tenemos $a=4,51$ y $b = -0,265$
 $k_a = 4,51 * (525 \text{ MPa})^{-0,265} = 0,86$
- Factor de tamaño k_b : para carga axial no hay efecto de tamaño
 $k_b = 1$
- Factor de modificación de carga k_c : Para carga axial $k_c = 0,85$
- Factor de temperatura de funcionamiento k_d : a temperatura ambiente $k_d = 1$
- Factor de confiabilidad k_e : definiendo una confiabilidad del 95%; del a tabla B-5.11 tenemos:

$$k_e = 0,868$$

- Factor de efectos varios k_f

Despreciamos el resto de los efectos que pueden reducir o aumentar la resistencia a la fatiga se incluyen en este factor. Algunos de estos efectos son corrosión, recubrimiento electrolítico, metalizado por aspersion, frecuencia cíclica y corrosión por frotamiento.

$$k_f = 1$$

Por lo tanto tenemos:

$$S_e = 0,86 * 1 * 0,85 * 1 * 0,868 * 1 * S'_e = 0,6345 * 262,5 \text{ MPa} = 166,56 \text{ MPa}$$

3. Determinación del factor de concentración del esfuerzo a la fatiga (K_f o K_{fs})

- Primero es necesario encontrar el factor teórico de concentración del esfuerzo de las gráficas de factores teóricos de concentración del esfuerzo:

Utilizando la tabla A-15 del Shigley mencionado en la bibliografía:

$$K_t = 2,6$$

- Del método gráfico enunciado en el marco teórico, obtenemos $q = 0,83$.

$$K_f = 1 + q (K_t - 1) = 2,33$$

- Utilizando la ecuación de Neuber:

$$K_f = 1 + ((K_t - 1) / (1 + (a/r)^{1/2})) = 2,34$$

Tomamos $K_f = 2,34$

4. Aplicar K_f

$$S_e = 166,56 \text{ MPa} / 2,34 = \mathbf{71,18 \text{ MPa}}$$

5. Es necesario calcular σ_m y σ_a :

$$\sigma_a = \sigma_m = (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}) / 2 = \mathbf{69,87 \text{ MPa}}$$

De la sección 3.4 sabemos:

$$\sigma_{\text{máx}} = 139,73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{mín}} = 0 \text{ MPa}$$

6. Aplicar un criterio de falla por fatiga:

Para $\sigma_m \geq 0$;

Utilizando el método de Goodman modificado tenemos:

$$\sigma_a / S_e + \sigma_m / S_{ut} = 69,87 / 71,18 + 69,87 / 525 = 1,11$$

Ahora sabemos que $1/n = 1,11$;

$$\mathbf{n = 0,90}$$

7. Verificación de fluencia localizada:

$$\sigma_m + \sigma_a = 139,73 \text{ MPa}$$

$$S_y / n = 440 \text{ MPa} / 0,9 = 488,89 \text{ MPa}$$

Verifica ya que $\sigma_m + \sigma_a < S_y / n$

8. Determinación de los ciclos de vida

- Determinación de la fracción de resistencia a la fatiga f:

Teniendo que $S_{ut} = 525 \text{ MPa} = 76,1 \text{ kpsi}$; entonces tenemos del gráfico 5.3.5.5:

$$f = 0,9$$

- Determinación de las constantes de vida a la fatiga a y b:

$$a = (f S_{ut})^2 / S_e = (0,9 * 525)^2 / 71,18 = 3136,50 \text{ MPa}$$

$$b = -(1/3) * \log (f S_{ut}/S_e) = -(1/3) * \log (0,9 * 525/71,18) = -0,274$$

Ahora con Goodman Modificado tenemos:

$$S_f = \sigma_a / (1 - (\sigma_m/S_{ut}))$$

$$= 69,87 / (1 - (69,87/525)) = 80,60 \text{ MPa}$$

- Ahora podemos Obtener los ciclos de vida N:

$$N = ((S_f/n)/a)^{1/b}$$

$$= ((80,60/0,9)/3136,50)^{-1/0,274} = \mathbf{4,33 * 10^5 \text{ Ciclos}}$$

3.8. Dimensionamiento de las uniones abulonadas

Las uniones abulonadas se van a dimensionar utilizando el Shigley (mencionado en la bibliografía). Particularmente la sección 8. Ya se sabe que la máquina compactadora va a ir totalmente apoyada sobre una superficie plana.

1. Se utilizan bulones con las siguientes propiedades: de tabla 8-1 en el Shigley

Bulón	Diámetro Nominal (mm)	Área de esfuerzo de tensión (At mm ²)	Área del diámetro menor (Ar mm ²)	Área del diámetro mayor (Ad mm ²)	Clase de Propiedad	Sult (MPa)	Sp (MPa)	Sy (MPa)
M6	6	20,1	17,9	28,3	4,6	400	225	240

2. Determinación de la longitud de la rosca:

De la ecuación 8-14 del Shigley:

$$L_T = 2d + 6 = 18 \text{ mm}$$

3. Rigidez del sujetador

$$\text{Agarre} = l = 19,75 \text{ mm}$$

Compuesta del espesor de las chapas, el espacio entre ellas y el espesor de la arandela 6 N (tabla A-32 del anexo de Shigley)

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \quad (\text{ecuación 8-17})$$

$$l_t = l - l_d = 19,75 - 12 = 7,75 \text{ mm}$$

$$l_d = L - L_T = 30 - 18 = 12 \text{ mm}$$

$$k_b = \frac{28,3 \cdot 20,1 \cdot 207000}{28,3 \cdot 7,75 + 20,1 \cdot 12} = 255681,7$$

4. Rigidez del Elemento:

Utilizando la ecuación 8-23 del Shigley:

$$k_m = E \cdot d \cdot A \cdot \exp(Bd/l) = 207000 \cdot 10 \cdot 0,78715 \cdot \exp(0,62873 \cdot 10/19,75)$$

$$k_m = 1183401,7$$

De la figura 8-16 del Shigley $A = 0,78715$ y $B = 0,62873$

5. Resistencia del Perno: sección 8-7 del Shigley

Según las ecuaciones 8-30 y 8-31 del Shigley definimos la precarga F_i :

$$F_i = 0,75 \cdot A_t \cdot S_p = 0,75 \cdot 20,1 \cdot 225 = 3391,9 \text{ N}$$

Carga resultante en el perno: F_b

$$F_b = (k_b / (k_b + k_m)) \cdot P + F_i = 0,17767 \cdot 468,85 + 3391,9 = 3475,14 \text{ N}$$

Tenemos $P = 468,85 \text{ N}$ y $C = k_b / (k_b + k_m) = 0,17767$

Carga resultante en los elementos conectados: F_m

$$F_m = 1 - (k_b / (k_b + k_m)) * P - F_i = (1 - 0,17767) * 468,85 - 3391,9 = -3006,35 \text{ N}$$

6. Factor de carga:

De la ecuación 8-28 del Shigley tenemos:

$$n = \frac{S_p A_t - F_i}{CP} = \frac{225 * 20,1 - 3391,9}{0,17767 * 468,85} = 13,57 > 1$$

Esto asegura que el esfuerzo en el perno es menor que la resistencia de prueba.

U4: Propuesta Diseño

Para poder accionar el prototipo propuesto y construido, lo hay que había que hacer es posicionar la máquina compactadora previamente ensamblada con el actuador neumático. Luego, conectar el actuador con la electroválvula (posicionada sobre el cuerpo del cilindro) y con el compresor o línea de aire. De esta manera, simplemente accionando un switch conectado a la electroválvula, se admite el ingreso de aire al actuador que genera el movimiento axial, comprimiendo la botella previamente ingresada en la cámara de compactación.

Al terminar la compactación, se observó como la botella compactada cae hacia un contenedor, eliminando la necesidad de remover la botella de la máquina manualmente.

4.1. Solución Propuesta

Luego de una serie de cálculos y verificaciones, se ha llegado a una propuesta para la máquina compactadora de botellas PET.

Es importante mencionar que el diseño de la máquina presentada fue ideado para minimizar el desperdicio de materiales y así disminuir su costo al mínimo. Además, el sistema de expulsión de las botellas logra evitar gastos relativos a equipos auxiliares de accionamiento.

Se utilizan los siguientes materiales para la construcción de la máquina:

- Actuador Neumático Festo modelo ADVU-63-30-A-P-A (ver hoja de datos en sección 3.1)
- Electroválvula Festo modelo VUWG-L10-B62-G14.
La válvula es accionada por un mando bimanual.
(nota: el prototipo se desarrolló con un simple switch ya que no tenía este material).
- Tuberías de ¼" para interconexión entre actuador, electroválvula y mecanismo de provisión de aire (compresor).
- Compresor de Aire Downen Pagio Modelo CA2525SP, capacidad de 27 lts, presión de 0,8 MPa y admisión de aire de 206 lts/min.
- Aceite de lubricación para el compresor mencionado (ver requerido por manual del fabricante).
- Chapas de espesor 4 mm (material acero AISI 1030) mecanizadas según dimensiones propuestas en la sección 2.3
- Caño (material AISI 1030) mecanizado según dimensiones propuestas en la sección 2.3.
- 8 Bulones M6 (L = 30 mm) + 4 Tuercas M6 (Ancho = 10 mm; Altura = 5,2 mm) + 4 Arandelas 6 N (DI = 6,65 mm; DE = 13 mm; espesor = 1,75 mm) + 8 Bulones M10 (L = 40 mm).
- Electrodo para soldar 6030

Se construyó el siguiente prototipo para la máquina compactadora:

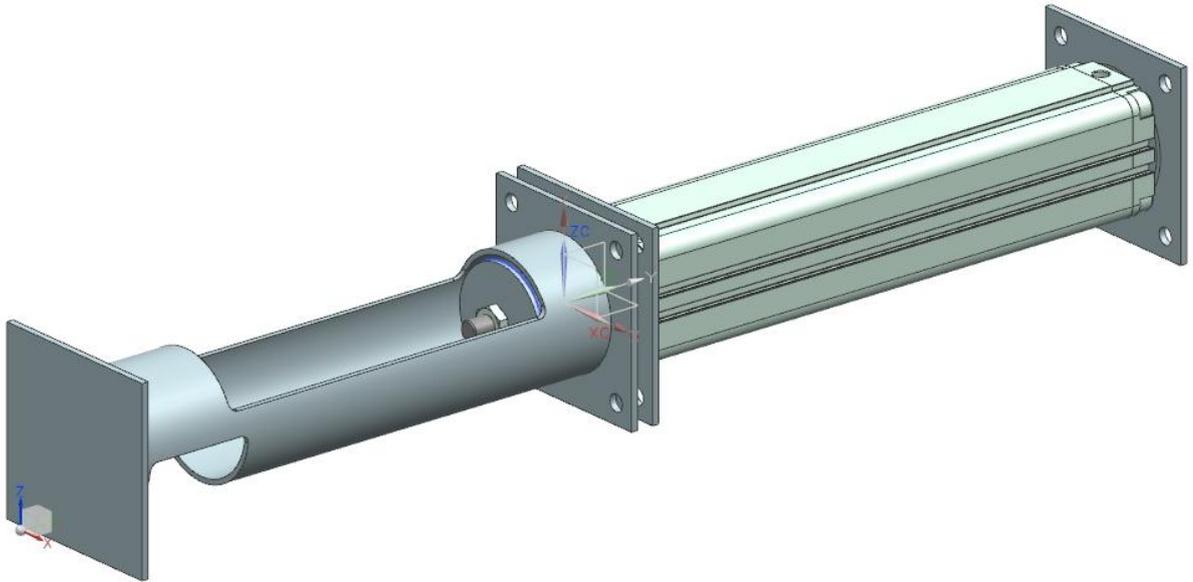


Figura 4.1.1: Máquina Propuesta.

Se mecanizó el tramo de cañería con las dimensiones propuestas en la sección 2.3:

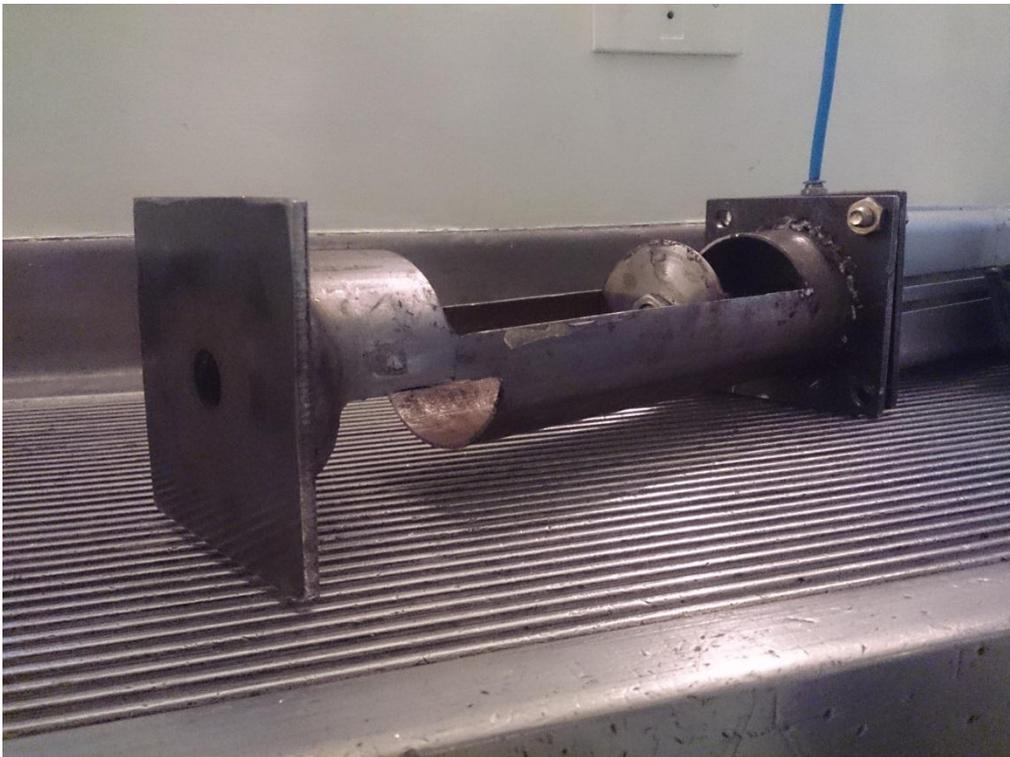


Imagen 4.1.1: Cámara de compactación ensamblada

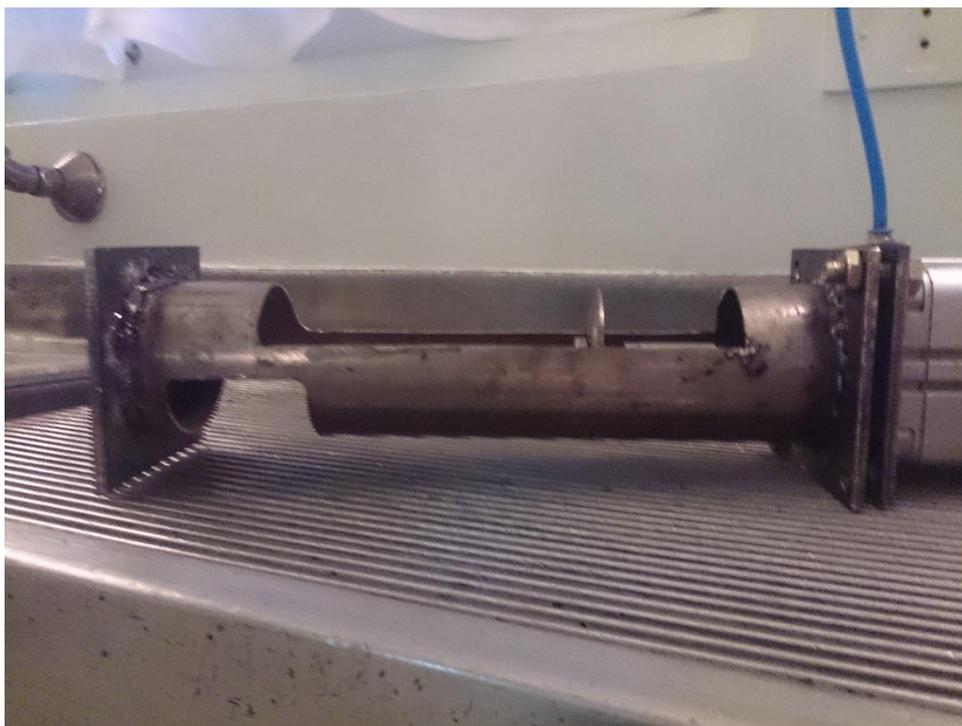


Imagen 4.1.2: Cámara de compactación

Se soldó la cámara a las chapas utilizando 4 electrodos E 6013



Imagen 4.1.3: Soldadura

Cabe mencionar que se mecanizó el tramo de cañería con los radios especificados previamente para proporcionar mayor resistencia a la estructura:

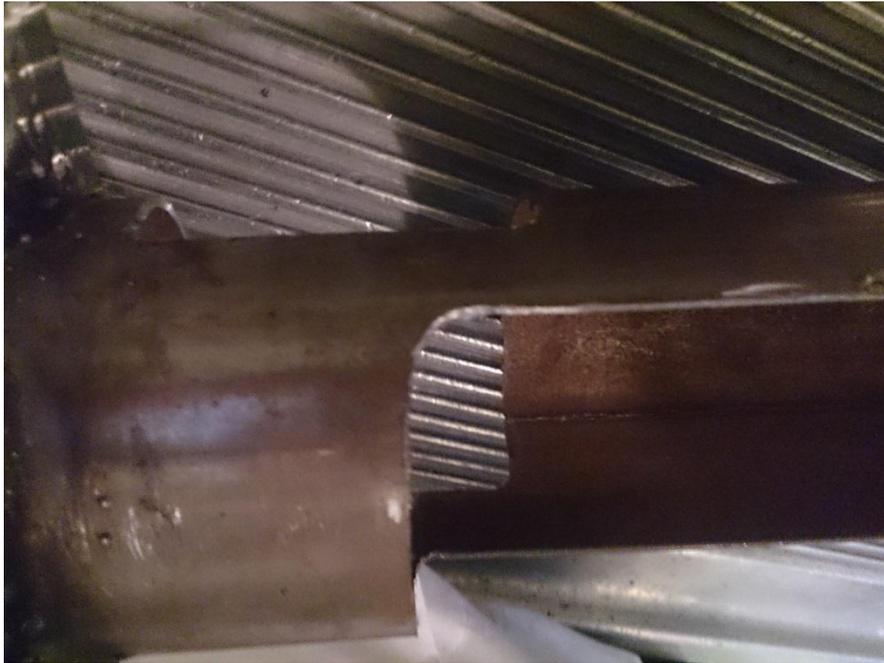


Imagen 4.1.4: Radios de seguridad

En ensamblado se realizó con los bulones especificados en la sección 3.8:

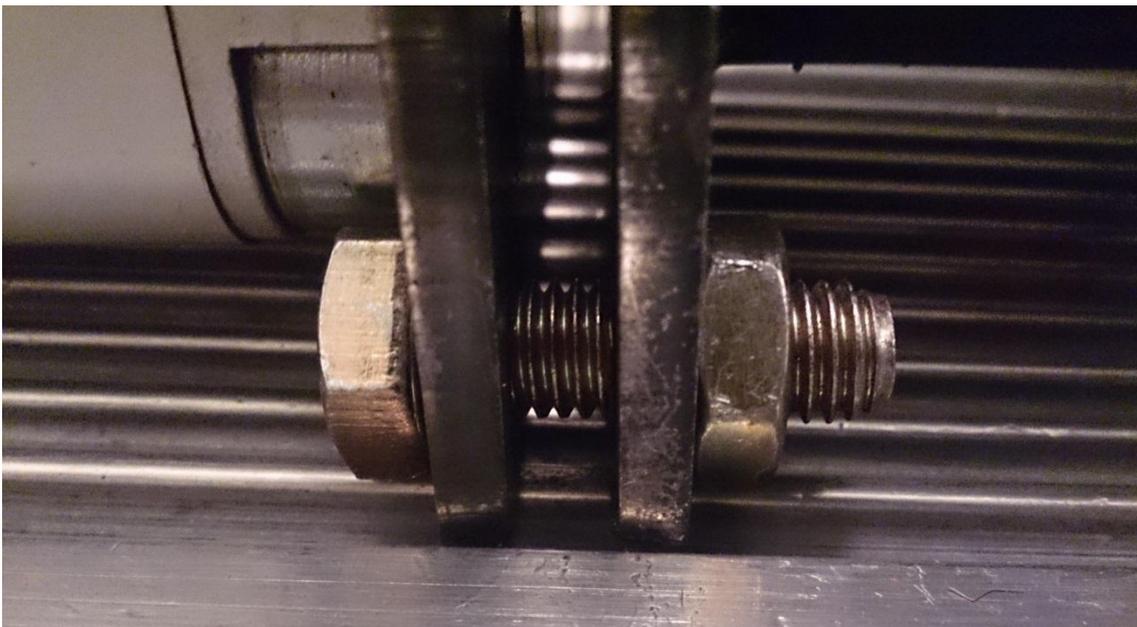


Imagen 4.1.5: Uniones abulonadas.

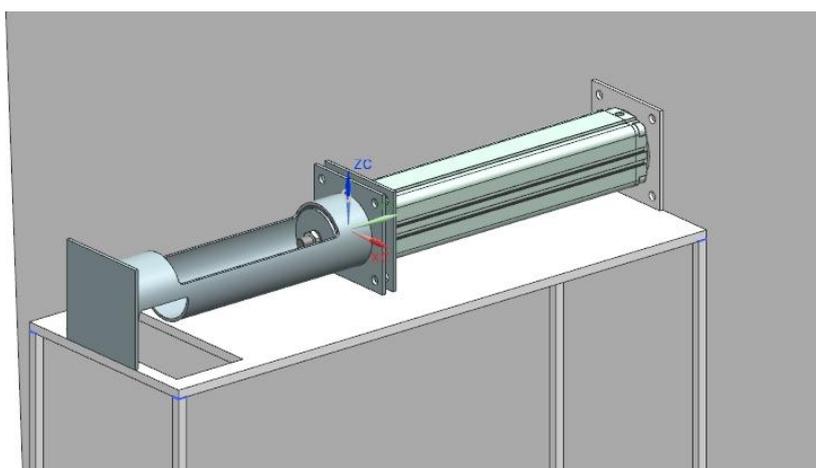
4.2. Operación y Mantenimiento

Es necesario presentar una serie de instrucciones y recomendaciones para poder poner en marcha la máquina compactadora y para establecer un plan de mantenimiento ubicando las fallas que puede llegar a sufrir el prototipo.

4.2.1. Puesta en Marcha

Considerando que el prototipo está construida y ensamblada como en la figura 4.1.1, se proponen los siguientes pasos para su puesta en marcha (PEM):

1. Apoyar la máquina compactadora sobre una mesa con una ranura para que caigan las botellas compactadas hacia el recipiente como en la siguiente figura:



2. Utilizar 4 bulones de los especificados (M6) para sujetar la máquina contra la pared. Los bulones M10 se utilizan para sujetar las chapas al actuador. Se utiliza este tamaño para aprovechar los agujeros existentes en el cilindro.
3. Engrasar las superficies que pueden estar sometidas a movimiento relativo prolongado.
4. Conectar con la máquina compactadora con la electroválvula, el switch y el compresor usando las tuberías de 1/4".
5. Para el caso de las válvulas debe chequearse bien la dirección de flujo y la posición correcta, según lo que indique el fabricante.
6. Verificar que el compresor tenga el aceite especificado por el fabricante y su correcto funcionamiento.
7. Se debe cargar el compresor.

Una vez realizados estos pasos, la máquina compactadora está lista para usarse.

4.2.2. Operación

Se recomienda la siguiente secuencia de pasos para la operación de la máquina compactadora de botellas PET (prototipo):

1. Una vez que la máquina compactadora esté conectada a una línea de suministro de aire comprimido o a un compresor (cargado), ingresar la botella que se desea compactar a la máquina compactadora
2. Pulsar el mando bimanual de arranque para accionar la electroválvula
3. Se inicia la carrera de compactación por parte del pistón. Al llegar al final de la carrera éste se detendrá automáticamente.
El pistón regresa a su posición inicial automáticamente.
4. Una vez comprimida la botella cae hacia el recipiente contenedor.
Ahora el dispositivo está listo para compactar otra botella.

Nota: si se cambia el actuador neumático por uno eléctrico, sólo hay que modificar el ensamble entre la cámara y el sistema de compactación, asegurándose que cumpla con la fuerza mínima necesaria para comprimir una botella definido en la sección 2.1.

4.2.3. Mantenimiento

Para los componentes utilizados para el desarrollo del prototipo de la máquina compactadora de botellas PET, se resumen los siguientes procedimientos de mantenimiento que van a tener grandes efectos en la operación de los sistemas neumáticos:

- Si se utiliza un compresor, cambio periódico del nivel de aceite según recomendación del compresor. Asegurar que se mantenga un nivel apropiado.
- Mantener todas las conexiones entre el actuador neumático, la electroválvula y el suministro de aire apretadas.
- Siempre deben ser ajustados los niveles y presiones correctas de operación.
- Revisar periódicamente que los bulones utilizados estén ajustados correctamente para soportar la máquina.
- Seguir las recomendaciones mencionadas en la sección 3.1 para el actuador Festo.

Recomendamos realizar informes que detallen las operaciones realizadas, y si es que se debe tomar alguna acción de reemplazo, explicar la acción tomada, las piezas requeridas y la fecha de reparación.

4.2.4. Resultados Operativos

Se destaca que con el prototipo construido se logró comprimir botellas a menos del 25% de su volumen inicial (utilizando el criterio definido en la sección 2.1 para determinar la compresión de una botella):



Imagen 4.2.4.1.: Botella compactada

Conclusiones

En primer lugar, se seleccionó el sistema de compactación que tenga las mejores características de acuerdo a los criterios enunciados en la sección 2.2. A través de una matriz de selección se decidió que el sistema indicado es el actuador eléctrico. Sin embargo, se optó por desarrollar un prototipo con un actuador neumático por ya disponer de este mismo.

Se propuso un diseño para la estructura de la cámara de compactación basado en un criterio de rigidez y en el máximo aprovechamiento de los materiales disponibles para reducir los costos al máximo. Además, el diseño contempló el máximo aprovechamiento posible del espacio disponible y una construcción simple. Se estandarizó el material de construcción (acero AISI 1030).

Se ensayó que la fuerza máxima necesaria para comprimir una botella PET permanentemente a menos de un 25% de su volumen inicial fue de 80 kg. Considerando que ya teníamos el actuador, utilizamos una marca Festo modelo ADVU-63-30-A-P-A y una electroválvula marca Festo modelo VUWG-L10-B62-G14, a pesar que podemos utilizar uno menor.

Buscando la mayor simplicidad, seguridad y comodidad de operación se optó por activar el mecanismo de compactación a través de un mando bimanual conectado a la electroválvula. El prototipo se realizó con un simple switch.

Subsiguientemente, modelando con elementos finitos se obtuvieron los esfuerzos máximos, las deformaciones y las fuerzas de reacción que sufre la estructura al ser aplicada la carga máxima que puede entregar el actuador neumático seleccionado. En la zona más comprometida de la estructura se encontró una tensión de von mises máxima de 139,73 MPa en el nodo 25742, mientras que en las zonas a soldar fue de 65,90 MPa. El desplazamiento máximo fue de 0,21 mm en el nodo 234797 (considerado despreciable) y las fuerzas de reacción fueron de 508,04 N en el nodo 12600.

Para estudiar la resistencia y determinar la cantidad de ciclos que soporta la estructura, se utilizó el criterio de Goodman Modificado. Para la soldadura se determinó una vida útil de $1,78 \cdot 10^8$ ciclos mientras que para la estructura de la cámara de compactación, en la zona más comprometida, fue de $4,33 \cdot 10^5$ ciclos.

Para comprobar la viabilidad de la máquina compactadora se procedió a construir un prototipo con las dimensiones y especificaciones propuestas.

Al ensayarlo se comprobó que se cumplieron los objetivos y requisitos expuestos en las secciones 1.3 y 1.4. Principalmente se logró la posibilidad de expulsar la botella automáticamente sin necesidad de una posterior operación y comprimir una botella a menos de 25% de su tamaño inicial. Además, se descartó el sistema manual de compactación y se logró un diseño innovador y sencillo.

Se presentaron indicaciones para la instalación y puesta en marcha de la máquina compactadora, como así una serie de recomendaciones para el mantenimiento requerido.

Finalmente, es muy importante destacar que se logra fomentar el reciclaje de botellas PET por dos motivos fundamentales: se logra reducir el volumen de acopio que acarrea una reducción en el costo de transporte como así un aumento del espacio disponible para acopiar la basura dentro de instituciones y se incentiva el reciclaje a través de una solución que requiere interacción con el usuario.

ANEXO

Anexo A: PET

A-1: Descripción del PET

A-1.1. ¿Qué es el PET?

El PET (Polietilén Tereftalato) es un polímero plástico lineal con alto grado de cristalinidad y se comporta como un termoplástico, por lo que se clasifica en el grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres y es de alta calidad. Estas condiciones lo hacen apto para ser transformado por diferentes procesos: extrusión, inyección, inyección-soplado, soplado de preforma y termoformado.

Actualmente, este tipo de plástico es muy usado en envases de bebidas y textiles y se puede obtener de una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico ($C_6H_4(COOH)_2$) y etilenglicol (CH_2OHCH_2OH). Es enfriado rápidamente para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas y lamelas de cristales, que da como resultado un aspecto transparente, ya que estos cristales no alcanzan a desarrollarse completamente, por lo que no intervienen con la trayectoria de la longitud de onda de la luz visible.



Se clasifica como una resina sintética termoplástica o un polímero termoplástico semicristalino. Para clasificarlo, se hace en función de la viscosidad intrínseca (VI), que aumenta con el peso molecular.

A-1.2. Historia:

El PET fue descubierto por los científicos británicos J.R. Whinfield y J.T. Dickson en el año 1941, y lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras (para la industria textil). Junto a W.K. Birtwhistle y C.G. Ritchie they crearon la primera fibra de poliéster y la llamaron Terileno. Así empezó a ser utilizado como materia prima.

Es importante resaltar que surge como necesidad de encontrar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto, ya que en estas épocas el país se encontraba en plena guerra.

A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra.

Alrededor de 1952 se comenzó a emplear en forma de film para el envasado de alimentos. Sin embargo, la aplicación que representa su principal mercado fue de envases rígidos a partir de 1976. Al permitir el embotellado de bebidas carbonatadas y bebidas poco sensibles al oxígeno, tuvo un crecimiento acentuado.

Por este motivo, los fabricantes de máquinas internacionales han dedicado mayor esfuerzo técnico y comercial a este polímero. Así han diseñado equipos y líneas adaptados a los parámetros de transformación de PET, que al tener mayor disponibilidad a todas las embotelladoras permitió su comercialización y expansión en todo el mundo.

Por último, cabe destacar que el PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico hasta un alto nivel de sofisticación, principalmente debido a la creciente demanda del

producto mundialmente sostenida por su diversificación en usos. De esta manera ha podido sustituir materiales ya implantados.

A-1.3. Ventajas

- Alta transparencia y brillo: permite conservar sabor y aroma de alimentos. Además, está aprobado para uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios. Sin embargo es fácil de imprimir con tintas, ya que admite cargas de colorantes.
- Biorentación: permite obtener excelentes propiedades mecánicas - alta rigidez y dureza, alta resistencia al desgaste y corrosión, y buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento y resistencia a la abrasión.
- Buena resistencia química: en especial a grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes. (nota: resistente a multitud de agente químicos agresivos que no son soportados por otros materiales).
- Buena resistencia térmica (estabilidad al intemperie): posee una gran indeformabilidad al calor por lo que permite cocción en microondas. La temperatura soportable por el PET sin deformación ni degradación es mayor en comparación al resto de los materiales.
- Cristalización: permite lograr resistencia térmica para usar en bandejas termoformadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción.
- Buen comportamiento como aislante eléctrico.
- Uso en mercados específicos: compatible con materiales que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases.
- Factor Barrera: muy buena barrera a CO₂ y aceptable barrera a O₂ y humedad. Esto significa que ofrece una buena resistencia al paso de agentes exteriores al interior del envase. Por lo tanto, es reconocido como un excelente protector en el envasado de productos alimenticios, y así supera a muchos materiales en cuanto a calidad sanitaria.
- Viscosidad intrínseca (VI): depende de la longitud de la cadena polimérica. Al ser más larga, es más rígido, por lo que la VI es mayor.
- Peso: peso medio de un envase de agua de 1500 cm³ es de 37 a 39 gramos, por lo que resulta ser muy liviano y además tiene una consistencia aceptable para proteger el producto que contiene y dar sensación de seguridad al consumidor.
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.
- Esterilización: resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma.
- Costo: en comparación con otros polímeros (PVC, PP, LDPE, GPPS) ha sufrido menos fluctuaciones en el precio en los últimos años.
- **Fácil reciclado y recuperación:** desde el punto de vista ambiental, es la resina que presenta mayores aptitudes para el reciclado. La recolección de envases sirve para la recuperación del material, que puede usarse para otros productos (fibras de relleno, resinas de poliéster y otros productos de uso no crítico) separando sus componentes, pero no se vuelve a usar como envases. (nota: puede disminuir su viscosidad con la historia térmica).
- Ventaja ambiental: se reduce drásticamente la energía utilizada en el transporte. En comparación con vidrio, debido a su ligereza, un camión puede transportar 60%

más contenido y 80% menos de envase. Esto supone un ahorro de combustible y la resultante contaminación atmosférica del 10%

A-1.4. Desventajas:

- Secado: es necesario para evitar pérdida de propiedades.
- Costo de equipamiento: son necesarios equipos de inyección soplado con bioorientación. De todas maneras se supone una buena amortización en función de gran producción.
- Temperatura: si se someten a temperaturas mayores a 70 °C no mantienen buenas propiedades. El PET cristalizado (opaco) resulta ser una excepción de esto, ya que tiene buena resistencia hasta 230 °C.
- No se aconseja el uso permanente en intemperie.

A-1.5. Datos Técnicos¹

PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECIFICO	gr/cm ³	D-792	53479	1.39
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
RES. A LA COMPRESION (1 Y 2 % DEF)	Kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm ²	D-790	53452	1450
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	15
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm ²	D-638	53457	37000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.20
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BUENA
PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CALOR ESPECIFICO	Kcal/Kg.°C	C-351		0.25
TEMP. DE FLEXION B/CARGA (18.5Kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
TEMP. DE USO CONTINUO EN AIRE	°C			-20 a 110
TEMP. DE FUSION	°C			255
COEF. DE DILATACION LINEAL DE 23 A 100°C	por °C	D-696	52752	0.00008
COEF. DE CONDUCCION TERMICA	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

¹ <http://www.iq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm> 6/10/2012

A-1.6. Tipos de PET:

Se puede distinguir tres tipos fundamentales de PET: el grado textil, el grado botella y el grado film.

En primer lugar, el grado textil fue la primera aplicación industrial del PET y es denominado poliéster: se usó durante la Segunda Guerra Mundial para reemplazar las fibras naturales como algodón o hilo, que venían de Egipto. Entre sus grandes cualidades, se encuentra su alta resistencia a la deformación, su estabilidad dimensional y un fácil cuidado de la prenda tejida (lavado y secado rápido sin necesidad de planchar). Está limitado por una difícil tintura, formación de bolitas y acumulación de electricidad estática.

En segundo lugar, el grado botella se comenzó a producir en Europa a partir de 1974 y se empezó a comercializar en los EEUU. Es en este campo donde consiguió un gran crecimiento y una demanda sostenida, ya que el PET ofrece características favorables: resistencia contra agentes químicos, transparencia, ligereza, menores costos de fabricación y comodidad de manejo.

La aplicación más reciente fue el envasado de aguas minerales, productos farmacéuticos, de droguería o alimenticios.

Por último, el PET grado film, se usa más que nada para fabricar películas fotográficas, de rayos X y de audio.

A-1.7. Aplicaciones: usos del PET

En el campo de los envases (fabricados por inyección o soplado con biorientación, por extrusión o soplado), sirve para:

- Bebidas carbónicas
- Aguas minerales
- Aceite
- Zumos, té
- Vinos y bebidas alcohólicas
- Detergentes y productos de limpieza
- Productos cosméticos
- Salsas y otros alimentos
- Productos químicos y lubricantes
- Productos para tratamientos agrícolas
- Películas
- Contenedores alimentarios
- Cintas de audio/video
- Fotografía
- Aplicaciones eléctricas
- Electrónicas
- Embalajes especiales
- De Rayos X

En el resto de los campos puede ser usado para:

- Tubos
- Perfiles
- Marcos
- Paredes
- Construcción
- Piezas inyectadas
- Fibras Textiles

A-1.8. Comparación con otros materiales

Se puede ver que el PET es el material con mayor flexibilidad en propiedades, y en este sentido tiene mayor adaptabilidad a distintos procesos de fabricación.

Se puede ver una excelente combinación de propiedades del material: su transparencia, de baja densidad, de alta resistencia, la flexibilidad de formatos y buenas propiedades organolépticas, entre otros. Las propiedades restantes están siendo mejoradas constantemente con nuevas tecnologías y combinación con otros materiales. Un ejemplo de esto son las líneas de películas de Evertis destinadas a tasas mucho más bajas permeabilidad a los gases por la combinación de PET, PE y EVOH.

Además, los envases tienen que reunir los nuevos requisitos que exigen los consumidores, el comercio y la protección del medio ambiente: antes debían facilitar su transporte y proteger el producto, pero ahora deben ofrecer la posibilidad de fabricarlos económicamente, reutilizarlos razonablemente y eliminarlos con seguridad al final de su ciclo de vida. El PET cumple la mayor parte de estos requisitos, por lo que está reemplazando al vidrio, al PVC y otros plásticos con los que todavía se fabrican botellas y envases similares.

Es por esto que el PET es hoy la materia prima más importante para el mercado de los envases para agua, refrescos y bebidas carbonatadas. También tiene un importante mercado para los alimentos.

Por último, es muy importante destacar que, en un ámbito donde la conciencia por el cuidado del medio ambiente y las industrias relacionadas están creciendo exponencialmente, el PET tiene la mejor capacidad de reciclaje para su reutilización.

Tabla A-1.8.1: Propiedades de distintos materiales

PROPIEDAD	PET	PVC	HOPE	PP	PS	HOPE con barreras de Nylon	Vidrio	Aluminio
<i>Transparencia</i>	Excelente	Excelente	Malo	Malo	Excelente	Malo	Excelente	Muy Malo
<i>Resistencia</i>	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Malo	Excelente	Muy Mal	Excelente
<i>Impermeabilidad</i>	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno	Excelente	Excelente	Excelente
<i>Barrera para el paso de gases</i>	Bueno	Bueno	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo	Excelente	Excelente	Excelente
<i>Capacidad de llenado en caliente</i>	Bueno	Muy Malo	Muy Malo	Bueno	Muy Malo	Malo	Excelente	Excelente
<i>Resistencia a microondas</i>	Bueno	Malo	Malo	Malo	Muy Malo	Malo	Excelente	Malo
<i>Capacidad de reciclaje</i>	Excelente	Muy Malo	Bueno	Malo	Malo	Muy Malo	Bueno	Excelente
<i>Propiedades organolépticas</i>	Excelente	Bueno	Malo	Bueno	Malo	Malo	Excelente	Bueno
<i>Flexibilidad de Formas</i>	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno	Muy Malo

A-2: Producción de PET

A-2.1. Procesos de Producción

A-2.1.1. Producción del polímero PET:

Industrialmente, el PET se obtiene a partir de la polimerización, partiendo de dos productos intermedios: ácido tereftálico (TPA) y dimetiltereftalato (DMT).

Materias primas: Al principio la mayoría de los plásticos se fabricaban a partir de resinas de origen vegetal, como la celulosa, el furufal, aceites de semillas y derivados del almidón o del carbón. Hoy, la mayoría de los plásticos se elaboran con derivados del petróleo, ya que sus materias primas son tan baratas como abundantes. Sin embargo, la existencia mundial de petróleo es limitada, por lo que se están investigando constantemente otras fuentes de materias primas (ej: gasificación del carbón).

Aditivos Químicos: se usan para conseguir una propiedad determinada.

- Antioxidantes: proteger al polímero de degradaciones químicas por el oxígeno o el ozono.
- Estabilizadores: protegen de la intemperie.
- Plastificantes: dan un polímero más flexible
- Lubricantes: reducen la fricción.
- Pigmentos: colorean plásticos.
- Sustancias ignífugas y antiestáticas.
- Materiales de refuerzo: cuando se fabrican plásticos en forma de material compuesto, que dan materiales con resistencia y estabilidad de metales pero más ligeros.
- Gas: con plásticos dan lugar a *espumas plásticas*, que conforman una masa de gran tamaño y muy ligera.

Se registra la viscosidad intrínseca (VI) del polímero obtenido en un reómetro. Cuando se alcanza un valor deseado, se introduce nitrógeno rompiendo el vacío. Esto sirve para detener la reacción y para evitar fenómenos de oxidación. Además, ejerce una suave presión sobre la masa fundida, obligándola a pasar por una matriz, cayendo en forma de spaghetti en una batea con agua fría, donde se enfría y consolida.

Estos hilos pueden pasar por una cortadora, reduciéndolos a gránulos, amorfos con baja VI (0.55 a 0.65), que tamizados y desempolvados pueden ser enviados a almacenamiento y fabricación. Esta baja VI implica un bajo peso molecular, por lo que para ser apto para producción de botellas, se necesitan dos pasos siguientes.

A-2.1.2. Producción de PET para grado botella

Son necesarios 2 pasos más al polímero obtenido:

Cristalización: se refiere al cambio de estructura de los polímeros semi-cristalinos. Es un fenómeno físico en el que las macromoléculas pasan de una disposición espacial desordenada (estructura amorfa y transparente) a una estructura uniforme y desordenada (estructura cristalina y opaca a la luz). Esto le confiere a la resina una coloración blanca lechosa. Durante este proceso, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm^3 a 1.4 g/cm^3

Se obtiene con un tratamiento térmico a $130\text{-}160 \text{ }^\circ\text{C}$ por un tiempo que varía entre 10 min y 60 min. Además, para evitar el bloqueo del gránulo, se mantiene en agitación por algún movimiento mecánico.

Polimerización en estado sólido: esta reacción de polimerización sirve para aumentar el peso molecular de la resina hasta los valores adecuados de VI para la fabricación de la botella (0.72 - 0.86). Además, se elimina parte del acetaldehído (A.A.) que se forma en la primera polimerización. Para ser un buen polímero debe tener valores inferiores a 1 ppm.

El proceso consiste cargar el granulo cristalizado en un reactor cilíndrico, donde es sometido a un flujo de gas inerte (nitrógeno) a una temperatura elevada (aprox. $200 \text{ }^\circ\text{C}$) durante tiempos muy largos. De acá se obtiene PET con elevado porcentaje de cristalinidad (mayor a 50) y con VI para grado botella.

A-2.2. Moldeado de PET para obtener botellas

A-2.2.1. Tratamientos del PET previo al formado del cuerpo

Para obtener la forma final y acabado de un plástico, se debe tener en cuenta tres factores: tiempo, temperatura y deformación.

Se precisan diferentes procesos para una correcta transformación:

Secado: Almacenando el PET en una tolva, se procede a calefaccionar a una temperatura de $170 \text{ }^\circ\text{C}$ por aproximadamente un mínimo de 4 horas. Este proceso es mucho más efectivo con aire seco

Deshumidificado: es un equipo deshumidificador de aires que se aplica antes de ser ingresado en la tolva de secado. Con esto se evitan condensaciones y fenómenos perjudiciales para la transformación del PET.

Cristalizado: Bate el material ya usado (y triturado) a una temperatura aproximada de 100 °C para que adquiera propiedades precisas para su re-utilización. De aquí se vuelve a introducir en la tolva secadora.

A-2.2.2. Formado de cuerpos huecos

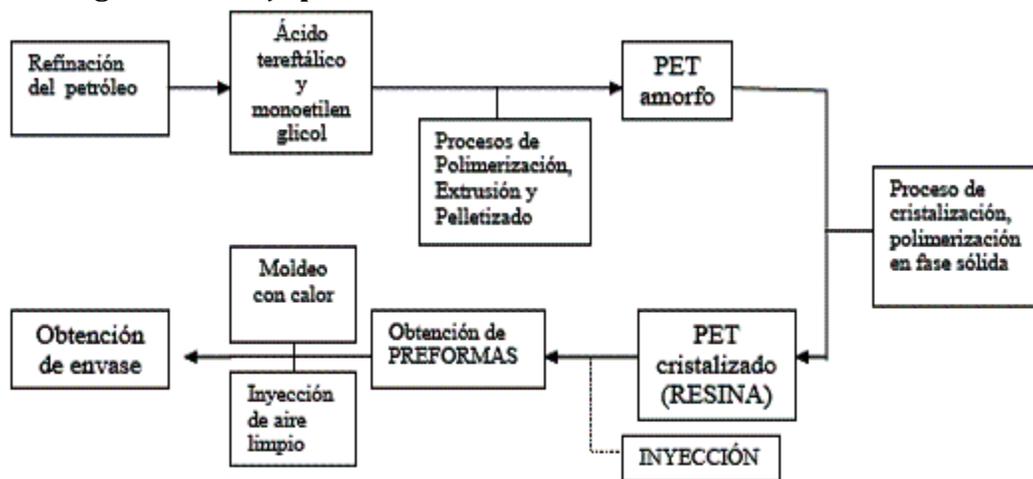
Sistema de Inyección - Soplado: primero se obtiene una preforma que es una especie de tubo de ensayo realizado por inyección y soplado del PET. Una vez fabricada es enfriada y luego ligeramente calentada.

Una vez calentada, una cánula estira esa preforma hasta el fondo del molde, donde es sometida a una presión de aire en su interior de alrededor de 40 kg/cm³. De esta manera, se realiza un estirado que adapta la preforma a las paredes del molde.

Sistema Soplado de Preformas: es similar al sistema de inyección - soplado, ya que se divide en dos procesos (generación de la preforma y el posterior soplado de la misma), pero la preforma puede ser realizada en una inyectora o adquirida de un fabricante de preformas. Esta máquina es menos costosa que la anterior, pero necesitar una preforma aparte suele ser un problema.

Sistema de Extrusión - Soplado: Primero, el material es ingresado a una tolva superior, donde un husillo lo extrusiona y almacena en un cabezal acumulador. Se procede a expulsar el material cuando el molde lo precisa, generando el envase en un solo paso, ya que este sistema no precisa una preforma.

A-2.2.3. Diagrama de Flujo para la Producción del PET



A-3: Reciclaje del PET

A-3.1. PET como residuo

El PET puede ser clasificado como un residuo sólido urbano, que constituye una problemática para la sociedad de consumo actual. El crecimiento de su consumo ha generado basurales, vertederos y rellenos sanitarios que representan un impacto ambiental y humano. Por ejemplo, el caso del Centro de Disposición final de la CEAMSE de Villa Domínica, que presentó una contaminación ambiental de residuos líquidos de los rellenos ponía en peligro los cursos de agua y los suelos que concluyó en una alta tasa de enfermedades entre la población que vivía junto al predio.

Además, la incorrecta disposición del PET pasa a ser el principal problema ambiental que puede traer. Una vez que se convierte en residuo, su presencia en las corrientes superficiales y en el drenaje es evidente, provocando taponamiento y dificultades en los procesos de drenaje. En consecuencia, facilita las inundaciones y genera basura en el agua.

Químicamente es inerte en el medio ambiente, pero el impacto visual que puede producir es muy perceptible a la población.

En cuanto a su tiempo de degradación, una botella de PET tarda alrededor de 500 años en degradarse.

Desde un punto de vista económico, es muy recomendable aprovechar los residuos de PET y reutilizarlos, ya que representa un ahorro, tanto de materia prima como de recursos energéticos.

Por esto es que impulsar el reciclaje de PET es una medida urgente, tanto por la limpieza pública y el manejo de una gestión integral de residuos para evitar su acumulación en rellenos sanitarios, como para desarrollar una economía sustentable con enfoque en el ahorro, considerando el marco de agotamiento de recursos mundiales.

A-3.2. Ventajas del reciclaje

- Reducir la cantidad de basura: al usar los residuos para reelaborar el producto, no es necesario ocupar espacio.
- Ahorro de energía y recursos naturales: reutilizando los residuos no es necesario malgastar materia prima, y esta puede ser utilizada para generar energía extra. En otras palabras, cuantos menos residuos se generen más eficiente va a ser el aprovechamiento de la materia y energía. Por lo tanto, más perdurables los recursos del planeta y el equilibrio ambiental.
- Ahorro de dinero.
- Nuevos empleos: se empieza a desarrollar la industria de reciclaje, que necesita una estructura para poder funcionar, tanto administrativa como técnica.
- Protección del medio ambiente: al tratar los residuos, se deja de sufrir las consecuencias del impacto ambiental que estos pueden tener. Además, de esta manera se elimina la generación de contaminantes.

- Ahorro de espacio: evita la formación de basureros nuevos para contener estos residuos. De esta manera, se colabora con la recuperación de los suelos.
- Se impide la proliferación de plagas, que puede estar dada por la mala disposición de la basura, tanto en la ciudad como en basurales.
- Contribuir a la reducción de desperdicio.

Algunos hechos sobre el RPET:²

- Reciclando 1 tonelada de PET ahorra hasta 5.66 m³ de espacio
- Cada libra de escapa usada de RPET reduce la energía usada en 84% y los gases emitidos en 71%.
- Durante el 2009, sólo se recuperó el 7% de todos los plásticos producidos.
- Al reciclar 1 botella de PET el ahorro de energía equivale a 6 horas de una lámpara de 60 Watt.
- Para hacer poliéster reciclado, se usa un 90% menos de agua que si fuese virgen.
- Las botellas de plástico mal dispuestas, sólo en los EEUU, pueden dar la vuelta al mundo 5 veces. Además van a tardar más de 500 años en empezar a descomponerse.
-

A-3.3. Reciclaje

Considerando al PET como material, ofrece ventajas extraordinarias que facilitan su reciclaje: la calidad del reciclado puede ser superior a la del producto original, y el volumen creciente de uso puede justificar economías de escala. Además, la tecnología existente en materia de métodos de recuperación y procesamiento ya es muy avanzada y creciente.

El reciclado de botellas de PET tiene como fin generar una actividad rentable, con nuevos puestos de trabajo y un compromiso con el medio ambiente.

Considerando la basura como un residuo colocado en el lugar equivocado, el reciclado comienza con el acopio de los residuos (tratado en Unidad 4). La mayoría de las ciudades europeas y americanas tienen un horario muy organizado para la recolección de material reciclable.

De todas maneras, existe un limitante muy importante para la cantidad de producto recuperado obtenible: el volumen de recolección de desperdicios de PET. Sin embargo, se puede incentivar normas impositivas para afectar positivamente los volúmenes de acopio.

Para fomentar el reciclaje, se están empezando a implementar medidas de regulación a las industrias, aumentando el contenido de reciclados y fomentar el diseño de productos más fácilmente recuperables.

En el contexto del reciclado, en Noviembre del 2005 la Legislatura porteña aprobó la 'Ley de Basura Cero' (Ley 1854), que propone la minimización, recuperación y reciclado de los

² <http://rethinkfabrics.com/eco-stats> 7/10/11

residuos sólidos urbanos de la ciudad de Buenos Aires. De esta manera, acompañando el crecimiento de las industrias asociadas al reciclado y recuperación de materiales, se puede reducir la cantidad de basura que se entierra. Por otra parte, el plan genera una actividad económica que demanda mano de obra y crea circuito de materiales y energía eficiente y sustentable.

Subsiguientemente se pueden distinguir diferentes técnicas de reciclado: mecánico y químico.

A-3.3.1. Reciclado Mecánico

Es la más usada en la actualidad y consiste en la molienda, separación y lavado de los envases. Resultan en escamas que pueden ser usadas en forma directa en la fabricación de productos por inyección o por extrusión.

- Primera fase: identificación y clasificación de botellas, lavado y separación de etiquetas, triturado, separación de partículas pesadas de otros materiales (polipropileno, polietileno, etc.), lavado final, secado mecánico y almacenaje de la escama.
- Segunda fase: se seca la escama de gran pureza, se incrementa su viscosidad y se cristaliza. De esta manera ya está lista para su transformación nuevos elementos de PET.

Una fracción se puede usar para hacer nuevos empaques para contacto con alimentos.

Entre las desventajas, se puede mencionar la necesidad de secar material, el mayor consumo energético, la degradación del PET y la pérdida de VI de hasta un 30%, ya que el material es alimentado en frío y húmedo a la extrusora de granulación. En otras palabras, resulta ser menos costoso, pero se obtiene un producto final de menor calidad (PET puro incoloro, PET verde puro).

Nota: este tipo de reciclado tiene mayor valor y variedad de usos en el mercado usando envases transparentes. Envases multicapa o recubiertos con otros materiales pueden reducir la reciclabilidad del PET.

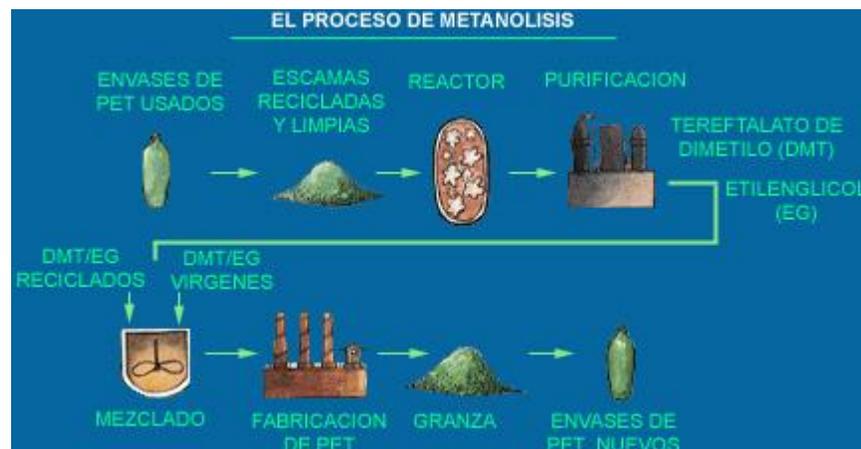


A-3.3.2. Reciclado Químico

Se realiza a través de dos procesos, metanólisis y glicólisis, luego de procesos mecánicos de limpieza y lavado. Durante éstos, el PET se despolimeriza: se separan las moléculas que lo componen para luego ser empleadas en la fabricación de PET. En otras palabras, consiste en la separación de los componentes básicos de la resina y la síntesis de nueva materia virgen. Esto permite mayor gama de materiales a reciclar y un ahorro de gas y petróleo.

Con este método, se puede obtener el PET multicapa con barrera de color y el PET puro de colores intensos, opacos y negros.

Cabe destacar que se obtiene un producto con el mismo valor que el material virgen, por lo que se pueden mezclar con éste en la planta de polimerización. Además, el proceso puede consumir menos energía que los métodos para hacer el material virgen, siendo más económico aún considerando la aplicación de etapas.



A-3.4. Producto obtenido: RPET

La 'R' indica que el material ha sido re-polimerizado. Para hacer esto, los fabricantes de resina reintroducen el material recuperado en el reactor en la etapa de monómero intermedio, antes de la polimerización primaria. Hay tres tipos básicos de PET: post-industrial (constituido por desechos del transformador), post-consumo y perdido (no existe documentación de donde se obtuvo). Las botellas recicladas entran en la categoría de PET post-consumo.

Para cerrar el ciclo de vida del PET es necesario desarrollar mercados que absorban el RPET producido. Los principales mercados son los siguientes:

- Fibra textil: como artículos de relleno de productos (bolsas de dormir, almohadillas, etc.)

- Flejes: cintas, cajas rígidas, etc.
- Lamina: blisters, bandejas, envases ligeros y flexibles, etc.
- Piezas y productos industriales: se obtienen por procesos de inyección, por lo que precisa mayor calidad de escama. Principalmente dentro de la industria electrónica (carcasas de TV, radio, cajas de CD, cajas y conectores eléctricos, etc.), producción de piezas para automatización (retrovisores, piezas de quipos de audio, equipos de climatización, etc.) o producción de tapones.
- Envases: la fabricación de envases con RPET depende de la legislación de cada país. Por ejemplo, en Italia y España está prohibido su uso para esta aplicación. De todas maneras, tiene dos aplicaciones fundamentales: envases multicapas, de manera que las capas de RPET no están en contacto con el alimento, o producción de envases en que el RPET puede estar en contacto.

En conclusión, hay dos factores muy importantes a tener en cuenta cuando se considera la producción de productos finales con RPET: la calidad de la tecnología de reciclado disponible y la calidad del material puesto a disposición de los recicladores.

Tabla A-3.4.1: Botellas de PET y sus salidas más corrientes

Pet Puro Incoloro	Beb. refrescantes Aguas	Fibra Lámina	Reciclado Mecánico
Pet Puro Incoloro	Aceites Vinagres	Fibra Lámina	Reciclado Mecánico
Azul ligero Pet Puro	Aguas	Fibra Lámina (Polioles, compuestos)	Reciclado Mecánico Reciclado Químico
Verde Pet Puro	Aguas Beb. refrescantes	Fleje	Reciclado Mecánico
Colores intensos, opacos, negro y otros. Puro Pet	Detergentes, Perfumes, etc ...	Polioles (Compuestos)	Reciclado Químico (Reciclado mecánico)
Botellas barrera de color, Pa, Evoh, Pen ...	Cerveza, Zumos de fruta, Etc ...	Botellas (Compuestos)	Reciclado Químico (Reciclado mecánico)

A-3.5. Reciclado de PET en Argentina

La actividad de reciclado comenzó alrededor del año 1995. Al principio, se comenzó a procesar PET post-industrial y a menor medida, pero en un grado creciente, envases de PET post-consumo.

Se puede ver un claro incremento en las unidades recicladas por un aumento en el nivel de conciencia ambiental en la población, puesto en manifiesto con un número en incremento de programas de recolección diferenciada en los Municipios.

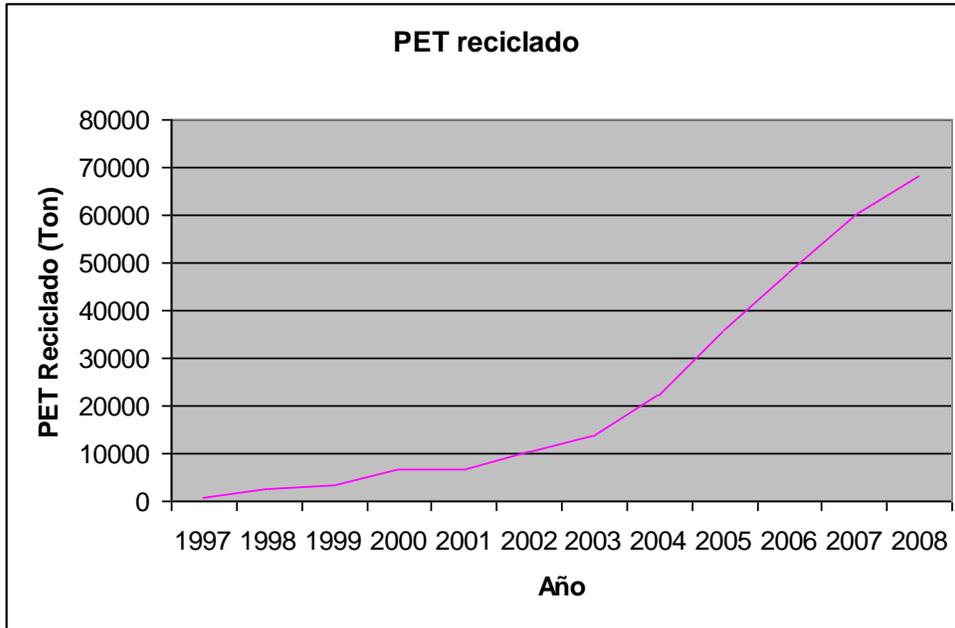
Este incremento representa que el reciclado encuentra más eco en la sociedad y sus instituciones. Se genera estímulo en la conciencia colectiva y controles sociales sobre la gestión de residuos, dando un fuerte impulso a las industrias relacionadas con el cuidado del medio ambiente y el reciclado. Esto es un fuerte beneficio desde el punto de vista económico, generando nuevos puestos de trabajo.

3

RECICLADO DE PET EN ARGENTINA (Posindustrial y Posconsumo)

AÑO	PET Reciclado (en Ton)	Envases Reciclados (en millones)	Consumo Anual Aparente (en Ton. Métricas)	Porcentaje Recuperado
1997	780	18	70.000	1,11
1998	2.700	61	90.000	3,00
1999	3.500	80	105.000	3,33
2000	6.600	150	130.000	5,00
2001	8.580	200	145.000	5,91
2002	10.250	238	115.000	8,91
2003	13.700	342	135.000	10,14
2004	22.100	552	160.600	13,70
2005	36.000	900	166.000	21,70
2006	48.000	1200	177.500	27,05
2007	60.000	1500	180.000	33,00
2008	68.000	1700	200.000	34,00

³ http://www.arpet.org/p_sobre_PET.html



Se puede ver un creciente incremento en las unidades recicladas, que es debido a una mayor conciencia social en la población y al incremento de los programas de recolección diferenciada en Municipios. Esto solo refleja la acción de cada familia o individuo inscriptos en un programa municipal.

Al valorar los beneficios y la importancia para el conjunto de la sociedad, el reciclado encuentra cada vez más resueno en la sociedad y sus instituciones. De esta manera, se puede lograr un impulso en las industrias de reciclado.

Posibles mejoras de reciclaje:

Los recicladores afirman que el principal problema radica en la falta de recolección de envases de un solo uso descartados fuera del hogar. Para poder promover esto, en diciembre de 2002 la Legislatura porteña sancionó la Ley 992⁴ para mejorar las condiciones de trabajo de los recuperadores a través de la creación de Centros Verdes: "...lugares donde, construida la infraestructura permitirá las tareas de selección, enfardado y acopio de materiales reciclables a los Recuperadores urbanos, ya sea se trate de una organización o de forma personal"

Además, en noviembre de 2005 se promovió la Ley 1854⁵ que propone la minimización, recuperación y reciclado de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Buenos Aires. De esta manera se alentaba el crecimiento de las industrias asociadas al reciclado y recuperación de materiales. Este plan genera una actividad económica que demanda mano de obra.

⁴ <http://www.cedom.gov.ar/es/legislacion/leyes/html/ley992.html>

⁵ <http://www.cedom.gov.ar/es/legislacion/leyes/html/ley1854.html>

Anexo B: Marco Teórico

Es necesario hacer una descripción de los conceptos que vamos a utilizar a través del desarrollo del proyecto. Esto se hace para poder fundamentar los conocimientos y principios que se van a poner en práctica.

B-1. Sistemas de Compactación

A continuación se va a hacer una breve descripción con los puntos claves de cada sistema que se considera como solución al problema impuesto.

i. Compactación Manual:

El sistema de compactación manual consiste simplemente en un mecanismo biela-manivela que permite comprimir el objeto en cuestión:

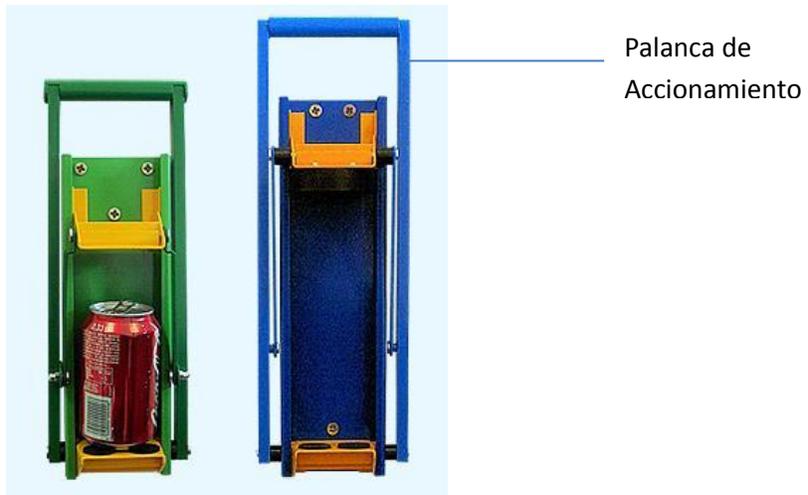


Imagen B-1.1: Sistemas de Compactación Manuales

Simplemente requiere una acción manual para girar la palanca indicada en la imagen B-1.1, que comprime el objeto insertado en la cámara de compactación.

Para poder dimensionarlo es necesario hacer un estudio de resistencia en los puntos de compromiso.

La principal ventaja que puede mencionarse de este sistema es el reducido costo que implica su construcción.

Encontramos como desventaja la corta vida útil que han presentado en la experiencia este tipo de máquinas, y además la necesidad de tener una acción de fuerza manual. Al ser imposible controlar la forma en que acciona esta fuerza el 'usuario', esto puede comprometer el dimensionamiento de la máquina, siendo difícil encontrar una solución óptima.

ii. Actuadores Hidráulicos:

Los sistemas de accionamiento hidráulicos consisten en la aplicación de la mecánica de fluidos incompresibles en ingeniería, dispositivos que funcionan con líquidos, por lo general agua o aceite. En general, como el agua oxida todo, se usan aceites con aditivos (son más costosos).

Se puede trabajar aproximadamente entre 1000 y 5000 psi (hasta 10000 psi), por lo que son aptos para mayor presión. La velocidad de desplazamiento es generalmente menor a 0,5 m/s. La pérdida en red es menor al 3% de presión del actuador.

Entre las ventajas se menciona las siguientes:

- Elevados niveles de fuerza o momentos de torsión: por fluido incompresible.
- Velocidad de actuación fácilmente controlable: se hace controlando flujo másico.
- Instalaciones compactas por mayor relación entre potencia y volumen.
- Protección simple con sobrecarga.
- Permite sistemas con cambio rápido de sentido.

Entre las desventajas se menciona lo siguiente:

- Instalaciones complejas: necesitan un circuito de retorno que significa duplicar las cañerías.
- El fluido usado es muy sensible a la contaminación
- Costo y química del fluido y válvulas.
- Tienen sensibilidad a la temperatura, salvo con gran cantidad de aditivos.
- Vibraciones: el fluido no amortigua el movimiento.

iii. Actuadores Neumáticos:

Es una tecnología que emplea aire comprimido como energía para mover y hacer funcionar mecanismos. Las instalaciones neumáticas son máquinas y/o aparatos que generan trabajo mecánico útil mediante la aplicación de energía transmitida por aire comprimido (o aspirado).

Trabajan en presiones entre 3 y 15 bar, generalmente alrededor de los 6 bar. Tienen una velocidad de desplazamiento hasta 1,5 m/s y una pérdida en red de alrededor del 5% de presión del actuador.

Entre las ventajas se menciona lo siguiente:

- Fácil transporte de energía a distancia apreciable.
- Sin problemas por fugas.
- Baja peligrosidad
- Produce movimientos rápidos y aceptablemente precisos
- Instalación sencilla

Entre las desventajas se menciona lo siguiente:

- Compresibilidad del fluido.
- Baja relación de potencia/volumen.
- Acondicionamiento local del aire comprimido

- Baja eficiencia en la conversión de energía
- Ruidoso
- Perdidas de traslado importantes

Para la generación del aire comprimido se puede utilizar compresores. Entre los parámetros utilizados para la correcta selección de un compresor y acondicionamiento del aire podemos mencionar los siguientes:

- Caudal requerido más reservas.
- Presión suficientemente superior que la de la línea / dispositivos.
- Presencia o ausencia de aceite en aire
- Varios compresores menores más flexible que uno grande.
- Considerar flexibilidad futura de la instalación.
- Disponibilidad de espacio/infraestructura.
- Uso simultáneo del calor de compresión
- Considerar los costos de operación por sobre los de adquisición

iv. Actuadores Eléctricos

Este tipo de actuadores utilizan energía eléctrica para la generación de movimiento controlado y trabajo útil. Basa su funcionamiento en la interacción de campos magnéticos donde al menos uno de ellos es controlado.

Entre las ventajas se menciona lo siguiente:

- Fácil transporte de energía a distancia apreciable.
- Produce movimientos rápidos y precisos.
- Instalación sencilla y flexible.
- Alta eficiencia y bajas pérdidas.
- Existe en todos lados.

Entre las desventajas se menciona lo siguiente:

- Control de velocidad/torque es difícil.
- Personal especializado para el mantenimiento y para su programación
- Difícil control de sobrecargas: no es seguro.
- Peligrosidad en el manejo
- Dificultad con movimientos lineales.

Cabe mencionar que para mayor potencia se sugiere utilizar sistemas eléctricos, ya que en hidráulica se necesita demasiado fluido.

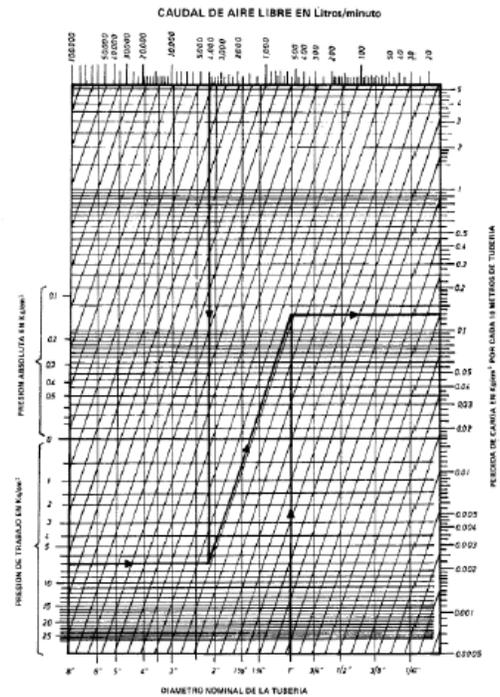
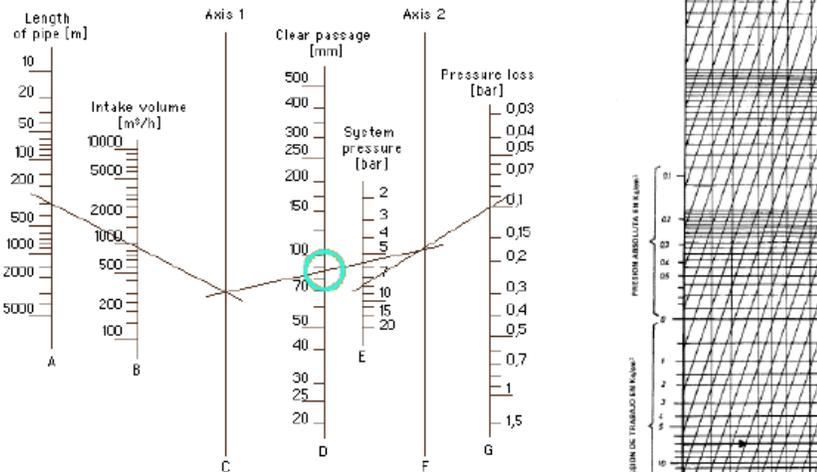
B-2. Dimensionamiento de un cilindro neumático y compresor

Compresor

Para el dimensionamiento de un compresor, se toman en cuenta los siguientes criterios: flujo volumétrico, presión de servicio, largo de tubería y caída de presión.

Entre las metodologías existentes, se mencionan las siguientes:

- Nomogramas



- Tabular

Passage (L/min free air)	Length of pipeline (m)															
	10	20	30	40	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	
100		1/4"		3/8"												
200		3/8"														
300			1/2"													
400																
500				3/4"												
750						1"										
1000																
1500						1 1/4"										
2000								1 1/2"								
2500																
3000									2"							
3500																
4000													DN 65			
4500																
5000																
6000																
7000														DN 80		
8000																

Pressure drop : approx. 0.1 bar for an 8-bar network pressure

- Cálculo: diámetro interno de la línea

$$d = 5 \sqrt{\frac{1,6 \times 10^3 \times \dot{V}^{1,85} \times L}{\Delta p \times p_1}}$$

d = Internal diameter of the pipeline [cm]

\dot{V} = Total volumetric flow rate [Nm³/s]

L = Nominal length of the pipeline [m]

Δp = Pressure drop [bar]

p_1 = Operating pressure [bar a]

Se pueden distinguir los siguientes lineamientos:

- Presión de servicio: utilizar valor estándar 6 bar salvo necesidad
- Caída de presión admisible:

- Red central: 0,03 bar
- Red distribución: 0,03 bar
- Red conexión: 0,04 bar
- Unidad de mantenimiento y manguera: 0,5 bar
- Longitud de tubería: conexiones más equivalentes de accesorios.
- Flujo volumétrico:
 - Consumo de dispositivos (Qd): de datos fabricante, tablas empíricas o cálculo directo.
 - Factor de uso (Fu): para un solo dispositivo es 1.
 - Factor de simultaneidad (Fs)
 - Fugas: 10 a 30% (%F)
 - Reserva: 30-40% (%R)

$$Q[\text{Nm}^3/\text{s}] = F_s * (1 + \%F) * (1 + \%R) + \sum Q_d * F_u$$

Nr. Dispositivos	Factor de simultaneidad
1	1
2	0,94
3	0,89
4	0,86
5	0,83
6	0,80
7	0,77
8	0,75
9	0,73
10	0,71
11	0,69
12	0,68
13	0,67
14	0,66
15	0,65
100	0,20

Dispositivo	Factor uso
Taladradora	30%
Lijadora	40%
Rectificadora	40%
Remachadora	30%
Martillo neumático	15%
Curvadora	20%
Pistola soplado	10%
Fresadora	75%
Maq. Alimentación	80%
Mortero	15%

Cilindro Neumático

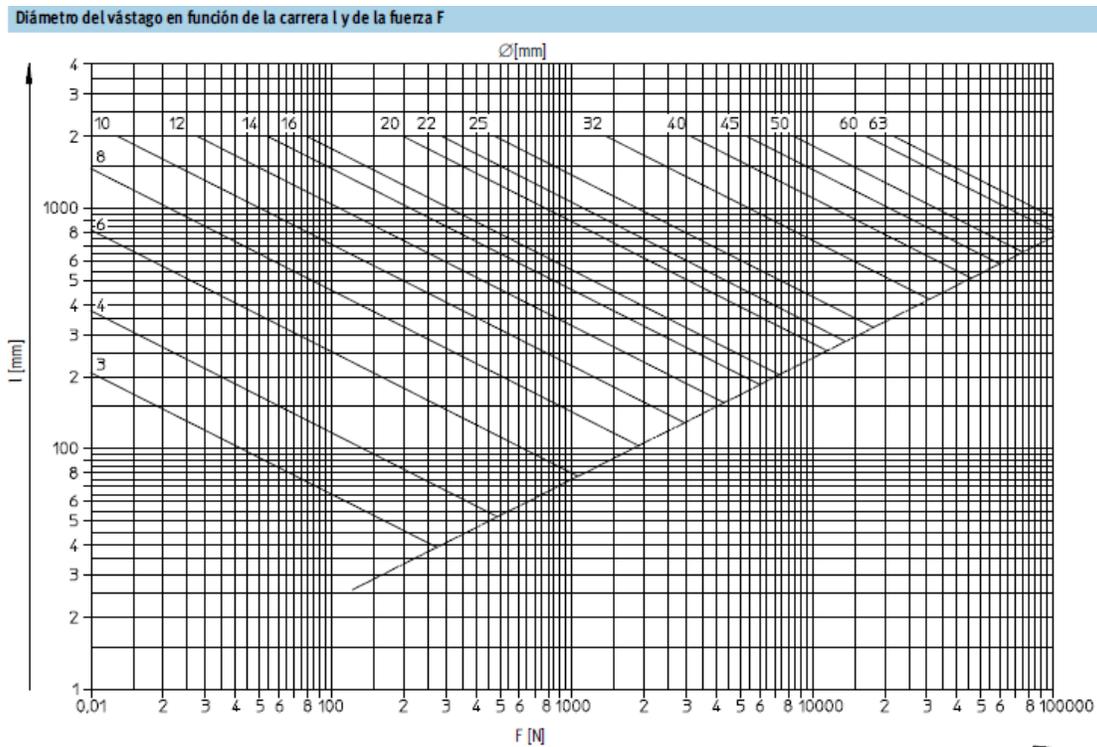
v. Verificación de Pandeo:

- Factor de pandeo como en columnas de Euler: se determina según agarre.

Conexión del extremo del vástago	Factor de pandeo
Fijo y guiado rígido	0,5
Pivote y guiado rígido	0,7
Soporte sin guiado rígido	2
Pivote (extremo derecho) y guiado rígido	1
Pivote (central) y guiado rígido	1,5
Pivote (extremo izquierdo) y guiado rígido	2

- Rigidez del cilindro es difícil de estimar: según combinación del cilindro, el sello, la tapa, la carrera y el diámetro.
- Gráficos del fabricante para determinar el diámetro del vástago según la longitud efectiva y la fuerza.

Figura B-2.3: Diagrama de Pandeo



vi. Longitud Efectiva (h) [mm] = Carrera *Factor de pandeo

- vii. $F_{emp} [N] = p_{max} * A_{cil}$; donde la presión máxima está determinada por los sellos y el trabajo interno.

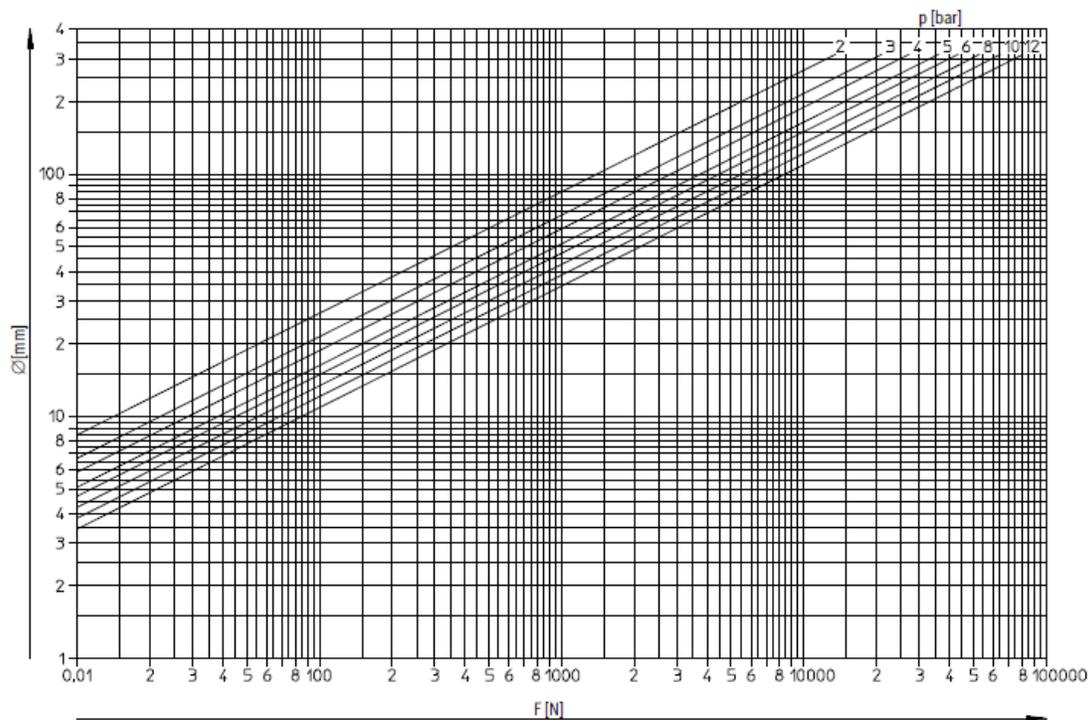
Pasos para el dimensionamiento:

- Se calcula la carga mecánica requerida
- Las pérdidas por fricción son aproximadamente del 10%
- Se considera un adicional por contrapresión (contra escape) y pérdidas de carga hasta 40%.
- Se selecciona el diámetro de catálogo en función de la capacidad y la presión de trabajo
- Verificación del vástago al pandeo
- Estimación de la energía de amortiguación final: según la masa que se mueve

Figura B-2.2: Diagrama de Presión-Fuerza

Presión de funcionamiento p en función del diámetro del émbolo y de la fuerza F

En el diagrama se ha considerado aprox. un 10% de pérdidas por rozamiento.



viii. Consumo de aire:

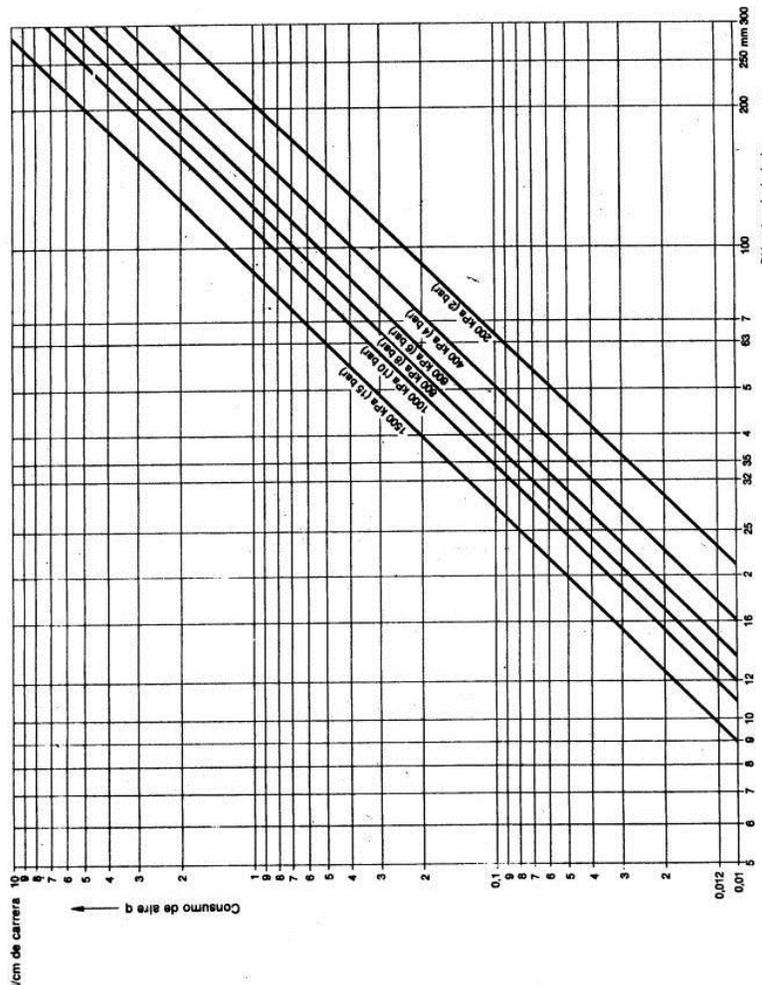
Es necesario tener una conciencia del consumo de aire que va a tener el dispositivo para poder disponer del aire y conocer el gasto de energía que acarrea. Se obtiene del siguiente cálculo:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot (d1^2 - d2^2) \cdot h \cdot (p + 1) \cdot 10^{-6}$$

- Q = Consumo de aire por cm de carrera [l]
- d1 = Diámetro del émbolo [mm]
- d2 = Diámetro del vástago [mm]
- h = Carrera [mm]
- p = Presión relativa de funcionamiento [bar]

Sin embargo, en el diagrama B-2.4 se pueden establecer los datos de consumo de una manera más sencilla y más rápida. Los valores están expresados por cm de carrera para los diámetros más corrientes de cilindros y para presiones de 200 a 1.500 kPa. Se expresa en litros (aire aspirado) por minuto.

Figura B-2.4: Diagrama de consumo de aire



B-3. Especificación de Válvulas

La necesidad de normalizar el cálculo de dimensiones de las válvulas, tanto en tamaño como en capacidad de paso del fluido, ha llevado a los fabricantes y a usuarios a adoptar un coeficiente que refleja la capacidad de las válvulas de control.

El denominado coeficiente C_v : caudal en galones USA por minuto que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada (psi).

Si utilizamos unidades métricas se puede usar el coeficiente K_v , que la norma internacional IEC-534-1987 sobre válvulas de control de procesos industriales define como "caudal de agua (de 5 a 40 gr C) en m³/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 bar"

El coeficiente K_v para una válvula totalmente abierta se denomina K_{vs} , mientras que el mínimo valor recibe el nombre de K_{v0} . De esta manera el cociente K_{vs}/K_{v0} se denomina "campo de control"

Equivalencia entre los coeficientes:

$$K_v = 0,86 C_v \text{ (m}^3\text{/h)}$$

Considerando que una válvula se comporta esencialmente como un orificio de paso variable que permite la circulación de un cierto caudal a una determinada pérdida de carga; se puede utilizar la ecuación de Bernoulli para obtener:

$$K_v = Q * (\text{densidad/caída de presión})^{1/2},$$

Q= caudal máximo en m³/h

Densidad en kg/dm³

Pérdida de carga en bar para el caudal máximo

Especificación

- Cálculo de caudales para condiciones (p y Δp) distintas a las normales
- Por nombra el fabricante informa K_v = coeficiente global de fricción para cada válvula
- Se puede calcular Q_n (caudal nominal) como función de p_1 (abs), p_2 (abs), T_1 , Δp
- Ecuación generalizada: $Q_n = 328 * K_v * \sqrt{\Delta p(p_1 + p_2) / (G * T_1)}$
- Tamaño nominal:
 - a. Se identifica por la rosca de las conexiones.
 - b. Corresponde al menor diámetro de la válvula por la que atraviesa el fluido.

B-4. Conceptos comunes en máquinas compactadoras

Es necesario definir los componentes estructurales que forman parte de una máquina compactadora. Sólo se van a introducir elementos comunes:

- i. Sistema de Compactación: este es el que va a generar la fuerza para poder compactar la botella. Va a surgir de una elección entre los que fueron mencionados en la sección 5.3.1.
- ii. Cámara de Compactación: esto será la estructura en la que se realiza un proceso de aplastado de la botella de plástico gracias a la acción de un cilindro neumático. La botella compactada va a adquirir una forma según el diseño de esta cámara.
Para esta parte, es muy importante generar un diseño eficiente para la inserción y el posterior expulso de la botella.
- iii. Frente de Compactación: Es una estructura reforzada con la que se va a lograr el empuje de la botella de plástica. Debe ir unida en el extremo del vástago del cilindro.

B-5. Conceptos generales para cálculos de resistencia:

Resistencia de las uniones Soldadas

Se listan las siguientes tablas para poder calcular la resistencia de uniones soldadas:

Tabla B-5.1: Propiedades mínimas del metal de aporte

AWS Electrode Number*	Tensile Strength kpsi (MPa)	Yield Strength, kpsi (MPa)	Percent Elongation
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

*The American Welding Society (AWS) specification code numbering system for electrodes. This system uses an E prefixed to a four- or five-digit numbering system in which the first two or three digits designate the approximate tensile strength. The last digit includes variables in the welding technique, such as current supply. The next-to-last digit indicates the welding position, as, for example, flat, or vertical, or overhead. The complete set of specifications may be obtained from the AWS upon request.

Tabla B-5.2: Esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte

Type of Loading	Type of Weld	Permissible Stress	n*
Tension	Butt	0.60S _y	1.67
Bearing	Butt	0.90S _y	1.11
Bending	Butt	0.60-0.66S _y	1.52-1.67
Simple compression	Butt	0.60S _y	1.67
Shear	Butt or fillet	0.30S _y [†]	

*The factor of safety n has been computed by using the distortion-energy theory.

[†]Shear stress on base metal should not exceed 0.40S_y of base metal.

Tabla B-5.3: Factores de concentración del esfuerzo K_fs

Type of Weld	K _f
Reinforced butt weld	1.2
Toe of transverse fillet weld	1.5
End of parallel fillet weld	2.7
Butt joint with sharp corners	2.0

Tabla B-5.4: Cargas Constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete:

Schedule A: Allowable Load for Various Sizes of Fillet Welds								Schedule B: Minimum Fillet Weld Size, h	
Strength Level of Weld Metal (EXX)									
	60*	70*	80	90*	100	110*	120		
Allowable shear stress on throat, ksi (1000 psi) of fillet weld or partial penetration groove weld									
τ =	18.0	21.0	24.0	27.0	30.0	33.0	36.0		
Allowable Unit Force on Fillet Weld, kip/linear in									
τf =	12.73h	14.85h	16.97h	19.09h	21.21h	23.33h	25.45h		
leg Size h, in	Allowable Unit Force for Various Sizes of Fillet Welds, kip/linear in								
1	12.73	14.85	16.97	19.09	21.21	23.33	25.45		
7/8	11.14	12.99	14.85	16.70	18.57	20.41	22.27		
3/4	9.55	11.14	12.73	14.32	15.92	17.50	19.09		
5/8	7.96	9.28	10.61	11.93	13.27	14.58	15.91		
1/2	6.37	7.42	8.48	9.54	10.61	11.67	12.73		
7/16	5.57	6.50	7.42	8.35	9.28	10.21	11.14		
3/8	4.77	5.57	6.36	7.16	7.95	8.75	9.54		
5/16	3.98	4.64	5.30	5.97	6.63	7.29	7.95		
1/4	3.18	3.71	4.24	4.77	5.30	5.83	6.36		
3/16	2.39	2.78	3.18	3.58	3.98	4.38	4.77		
1/8	1.59	1.86	2.12	2.39	2.65	2.92	3.18		
1/16	0.795	0.930	1.06	1.19	1.33	1.46	1.59		

Material Thickness of Thicker Part Joined, in	Weld Size, in
*To 1/4 incl.	1/8
Over 1/4 To 1/2	3/16
Over 1/2 To 3/4	1/4
†Over 3/4 To 1 1/2	5/16
Over 1 1/2 To 2 1/2	3/8
Over 2 1/2 To 6	1/2
Over 6	5/8

Not to exceed the thickness of the thinner part.
 *Minimum size for bridge applications does not go below 3/16 in.
 †For minimum fillet weld size, schedule does not go above 5/16 in fillet weld for every 3/4 in material.

*Fillet welds actually tested by the joint AISC-AWS Task Committee.
 †f = 0.707τ_φ.

Source: From Omer W. Blodgett [ed.], *Stress Allowables Affect Weldment Design*, D412, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, May 1991, p. 3. Reprinted by permission of Lincoln Electric Company.

Cálculo de Sujetadores Roscados

En las normas para pernos, la resistencia se especifica mediante cantidades ASTM mínimas, la resistencia mínima de prueba o la carga mínima de prueba y la resistencia mínima de tensión.

La carga de prueba es la carga máxima (fuerza) que un perno puede soportar sin sufrir deformación permanente. La resistencia de prueba está dada por el cociente de la carga de prueba y el área de esfuerzo a tensión

Tabla B-5.5: Especificaciones SAE para pernos de acero

| SAE Specifications for Steel Bolts

SAE Grade No.	Size Range Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Low or medium carbon	
2	$\frac{1}{4}$ - $\frac{3}{4}$ $\frac{7}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	55	74	57	Low or medium carbon	
		33	60	36		
4	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	65	115	100	Medium carbon, cold-drawn	
5	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
		74	105	81		
5.2	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Low-carbon martensite, Q&T	
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	105	133	115	Medium-carbon alloy, Q&T	
8	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Medium-carbon alloy, Q&T	
8.2	$\frac{1}{4}$ -1	120	150	130	Low-carbon martensite, Q&T	

*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

Tabla B-5.6: Especificaciones ASTM para pernos de acero

ASTM Specifications for Steel Bolts

ASTM Designation No.	Size Range, Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
A307	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	low carbon	
A325, type 1	$\frac{1}{2}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Medium carbon, Q&T	
A325, type 2	$\frac{1}{2}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	low-carbon, martensite, Q&T	
A325, type 3	$\frac{1}{2}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Weathering steel, Q&T	
A354, grade BC	$\frac{1}{4}$ - $2\frac{1}{2}$ $2\frac{3}{4}$ -4	105 95	125 115	109 99	Alloy steel, Q&T	
A354, grade BD	$\frac{1}{2}$ -4	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A449	$\frac{1}{4}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$ $1\frac{3}{4}$ -3	85 74 55	120 105 90	92 81 58	Medium-carbon, Q&T	
A490, type 1	$\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A490, type 3	$\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$	120	150	130	Weathering steel, Q&T	

*Minimum strengths are strengths exceeded by 99 percent of fasteners.

Tabla B-5.7: Especificaciones para sujetadores métricos

Metric Mechanical-Property Classes for Steel Bolts, Screws, and Studs*

Property Class	Size Range, Inclusive	Minimum Proof Strength, [†] MPa	Minimum Tensile Strength, [†] MPa	Minimum Yield Strength, [†] MPa	Material	Head Marking
4.6	M5-M36	225	400	240	Low or medium carbon	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Low or medium carbon	
5.8	M5-M24	380	520	420	Low or medium carbon	
8.8	M16-M36	600	830	660	Medium carbon, Q&T	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Medium carbon, Q&T	
10.9	M5-M36	830	1040	940	Low-carbon martensite, Q&T	
12.9	M1.6-M36	970	1220	1100	Alloy, Q&T	

*The thread length for bolts and cap screws is

$$l_T = \begin{cases} 2d + 6 & l \leq 125 \\ 2d + 12 & 125 < l \leq 200 \\ 2d + 25 & l > 200 \end{cases}$$

where l is the bolt length. The thread length for structural bolts is slightly shorter than given above.

[†]Minimum strengths are strength exceeded by 99 percent of fasteners.

Resumen de ecuaciones de diseño importantes para el método del esfuerzo-vida

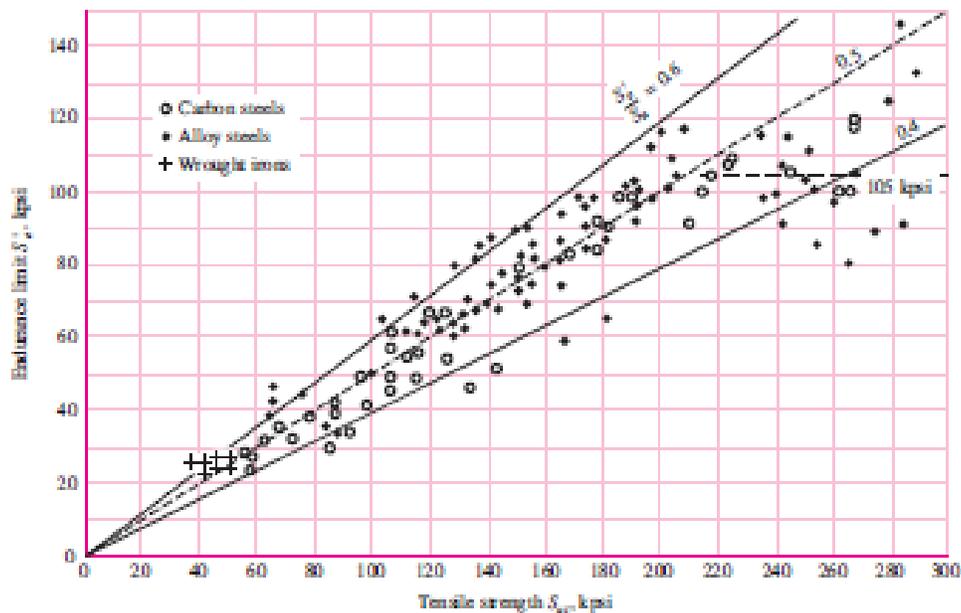
Podemos identificar los siguientes pasos para verificar fatiga:

1. Primero se determina el límite de resistencia a la fatiga. En el caso de los aceros, se estimará como:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Donde S_{ut} es la resistencia a la tensión mínima. Se debe reservar el símbolo S_e para el límite de resistencia de un elemento de máquina particular sujeto a cualquier tipo de carga.

Gráfico B-5.1: Gráfica de límites de resistencia a la fatiga contra resistencias o la tensión de resultados de ensayos reales de un gran número de hierros forjados y aceros aleados.



Graph of endurance limits versus tensile strengths from actual test results for a large number of wrought irons and steels. Ratios of S'_e/S_u of 0.60, 0.50, and 0.40 are shown by the solid and dashed lines. Note also the horizontal dashed line for $S'_e = 105$ kpsi. Points shown having a tensile strength greater than 210 kpsi have a mean endurance limit of $S'_e = 105$ kpsi and a standard deviation of 13.5 kpsi. (Collated from data compiled by H. J. Grover, S. A. Gordon, and L. R. Jackson in *Fatigue of Metals and Structures*, Bureau of Naval Weapons Document NAVWEPS 0025-534, 1960; and from *Fatigue Design Handbook*, SAE, 1968, p. 42.)

Se puede utilizar la tabla B-5.8 para obtener los límites de resistencia de diferentes clases de hierros fundidos, pulidos o maquinados.

Tabla B-5.8: Propiedades mecánicas del hierro fundido gris, algunas aleaciones de aluminio y algunas aleaciones de titanio

(a) Typical Properties of Gray Cast Iron

[The American Society for Testing and Materials (ASTM) numbering system for gray cast iron is such that the numbers correspond to the minimum tensile strength in kpsi. Thus an ASTM No. 20 cast iron has a minimum tensile strength of 20 kpsi. Note particularly that the tabulations are typical of several heats.]

ASTM Number	Tensile Strength S_{UT} , kpsi	Compressive Strength S_{UC} , kpsi	Shear Modulus of Rupture S_{MR} , kpsi	Modulus of Elasticity, Mpsi		Endurance Limit* S_e , kpsi	Brinell Hardness H_B	Fatigue Stress-Concentration Factor K_f
				Tension [†]	Torsion			
20	22	83	26	9.6-14	3.9-5.6	10	156	1.00
25	26	97	32	11.5-14.8	4.6-6.0	11.5	174	1.05
30	31	109	40	13-16.4	5.2-6.6	14	201	1.10
35	36.5	124	48.5	14.5-17.2	5.8-6.9	16	212	1.15
40	42.5	140	57	16-20	6.4-7.8	18.5	235	1.25
50	52.5	164	73	18.8-22.8	7.2-8.0	21.5	262	1.35
60	62.5	187.5	88.5	20.4-23.5	7.8-8.5	24.5	302	1.50

* Polished or machined specimens.

[†] The modulus of elasticity of cast iron in compression corresponds closely to the upper value in the range given for tension and is a more constant value than that for tension.

Mechanical Properties of Three Non-Steel Metals (Continued)

(b) Mechanical Properties of Some Aluminum Alloys

[These are typical properties for sizes of about $\frac{1}{2}$ in; similar properties can be obtained by using proper purchase specifications. The values given for fatigue strength correspond to $50(10^7)$ cycles of completely reversed stress. Aluminum alloys do not have an endurance limit. Yield strengths were obtained by the 0.2 percent offset method.]

Aluminum Association Number	Temper	Strength			Elongation in 2 in., %	Brinell Hardness H_B
		Yield, S_y , MPa (kpsi)	Tensile, S_{UT} , MPa (kpsi)	Fatigue, S_f , MPa (kpsi)		
Wrought:						
2017	O	70 (10)	179 (26)	90 (13)	22	45
2024	O	76 (11)	186 (27)	90 (13)	22	47
	T3	345 (50)	482 (70)	138 (20)	16	120
3003	H12	117 (17)	131 (19)	55 (8)	20	35
	H16	165 (24)	179 (26)	65 (9.5)	14	47
3004	H34	186 (27)	234 (34)	103 (15)	12	63
	H38	234 (34)	276 (40)	110 (16)	6	77
5052	H32	186 (27)	234 (34)	117 (17)	18	62
	H36	234 (34)	269 (39)	124 (18)	10	74
Cast:						
319.0*	T6	165 (24)	248 (36)	69 (10)	2.0	80
333.0 [†]	T5	172 (25)	234 (34)	83 (12)	1.0	100
	T6	207 (30)	289 (42)	103 (15)	1.5	105
335.0*	T6	172 (25)	241 (35)	62 (9)	3.0	80
	T7	248 (36)	262 (38)	62 (9)	0.5	85

* Sand casting.

[†] Permanent-mold casting.

(c) Mechanical Properties of Some Titanium Alloys

Titanium Alloy	Condition	Yield, S_y (0.2% offset) MPa (kpsi)	Strength Tensile, S_{UT} MPa (kpsi)	Elongation in 2 in., %	Hardness (Brinell or Rockwell)
Ti-35Al	Annealed	210 (30)	275 (40)	30	135 HB
Ti-50Al	Annealed	310 (45)	380 (55)	25	215 HB
Ti-0.2 Pd	Annealed	280 (40)	340 (50)	28	200 HB
Ti-8 Al-1 Mo-1 V	Annealed	760 (110)	790 (115)	16	36 HRC
Ti-8 Al-1 Mo-1 V	Annealed	900 (130)	965 (140)	15	39 HRC
Ti-6 Al-6 V-2 Sn	Annealed	970 (140)	1030 (150)	14	38 HRC
Ti-6Al-4V	Annealed	830 (120)	900 (130)	14	36 HRC
Ti-13 V-11 Cr-3 Al	Sol. + aging	1207 (175)	1276 (185)	8	40 HRC

[†] Commercially pure alpha titanium.

2. Se debe ajustar S'_e para determinar S_e :

$$S_e = S'_e k_a k_b k_c k_d k_e k_f \text{ [MPa, lpc]}$$

Dónde:

- S'_e límite de resistencia básica de una barra de prueba del material seleccionado [MPa, lpc]
- k_a factor de superficie
- k_b factor de tamaño
- k_c factor de modificación de carga
- k_d factor de temperatura
- k_e factor de confiabilidad
- k_f factor de efectos diversos

Factor de superficie k_a

Para describir la dependencia del límite de resistencia en la calidad de la superficie, la resistencia a la fatiga de la pieza con carga de fatiga asciende con el aumento de la calidad de la superficie. Este efecto se aprecia más en materiales de alta calidad.

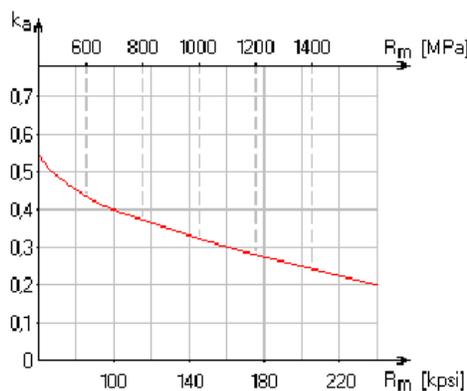
$$k_a = aS_{ut}^b$$

Donde S_{ut} es la resistencia mínima a la tensión y los valores de a y b se encuentran en la tabla B-5.9:

Surface Finish	Factor a		Exponent b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hotrolled	14.4	57.7	-0.718
Asforged	39.9	272.	-0.995

Tabla B-5.9: Factor de Superficie

La siguiente curva para uniones por soldadura de calidad estándar se utiliza para determinar el factor k_a .



Factor de tamaño k_b

A continuación se incluyen las fórmulas de cálculo para la determinación del factor k_b para ejes rotatorios

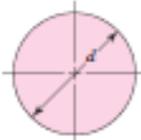
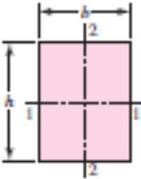
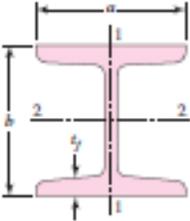
$$k_b = \begin{cases} 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 \leq d \leq 10 \text{ pulg} \\ 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual $K_b = 1$.

Cuando se utiliza una sección no circular, es necesario emplear una dimensión efectiva de, que se obtiene igualando el volumen de material sometido al esfuerzo igual o superior al 95% del esfuerzo máximo con el mismo volumen en la muestra de viga rotativa.

Se puede utilizar la siguiente tabla:

Tabla B-5.10: Áreas $A_{0.95\sigma}$ de perfiles estructurales no rotativos

	$A_{0.95\sigma} = 0.01046d^2$ $d_e = 0.370d$
	$A_{0.95\sigma} = 0.05hb$ $d_e = 0.808\sqrt{hb}$
	$A_{0.95\sigma} = \begin{cases} 0.10at_f & \text{axis 1-1} \\ 0.05ba & \text{axis 2-2} \end{cases} \quad t_f > 0.025a$
	$A_{0.95\sigma} = \begin{cases} 0.05ab & \text{axis 1-1} \\ 0.052xa + 0.1t_f(b-x) & \text{axis 2-2} \end{cases}$

Factor de modificación de carga k_c

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases}$$

Factor de temperatura de funcionamiento k_d

Se puede obtener de la siguiente ecuación polinomial de cuarto orden:

$$k_d = 0.975 + 0.432(10^{-3})T_F - 0.115(10^{-5})T_F^2 + 0.104(10^{-8})T_F^3 - 0.595(10^{-12})T_F^4$$

Donde $70 \leq T_F \leq 100^\circ \text{ F}$

El efecto que la temperatura de funcionamiento tiene sobre el límite de resistencia depende en gran medida de las propiedades del material utilizado. El límite de resistencia de los aceros estructurales de uso común que funcionan en el rango aproximado de -20 a 200° C no depende en exceso de la temperatura y, por tanto, se puede utilizar el factor $k_d = 1$.

Factor de confiabilidad k_e

El factor de modificación de la confiabilidad aplicable puede escribirse como:

$$k_e = 1 - 0.08z_a$$

Tabla B-5.11: Factores de confiabilidad k_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga

Reliability, %	Transformation Variate z_a	Reliability Factor k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Factor de efectos varios k_f

Todos los demás efectos que pueden reducir o aumentar la resistencia a la fatiga se incluyen en este factor. Algunos de estos efectos son corrosión, recubrimiento electrolítico, metalizado por aspersion, frecuencia cíclica y corrosión por frotamiento.

3. Determinación del factor de concentración del esfuerzo a la fatiga (K_f o K_{fs})

Primero es necesario encontrar un factor de concentración del esfuerzo K_t (o K_{ts}), que se usa con el esfuerzo nominal para obtener el esfuerzo máximo resultante debido a la irregularidad o defecto.

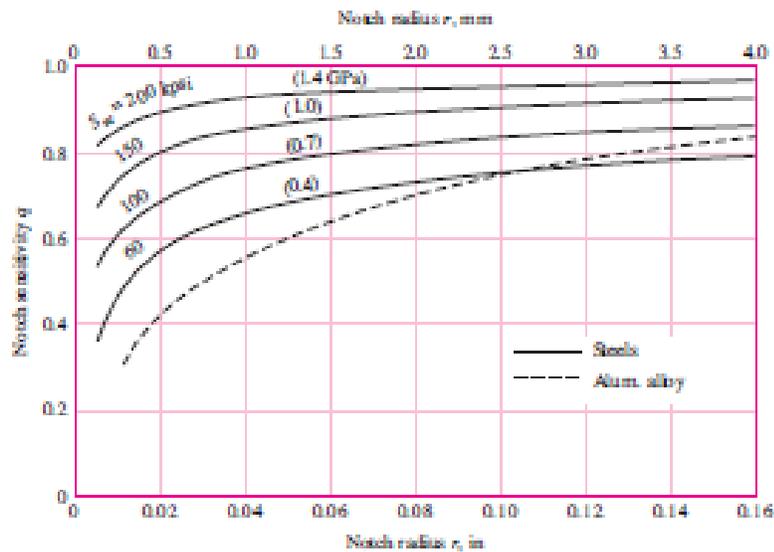
Para obtener el factor de concentración del esfuerzo por fatiga K_f , es conveniente pensarlo como un factor reducido de K_t , debido a la disminución de la sensibilidad de la muesca.

$K_f = \text{esfuerzo máximo en la pieza con muesca} / \text{esfuerzo en la pieza sin muesca}$

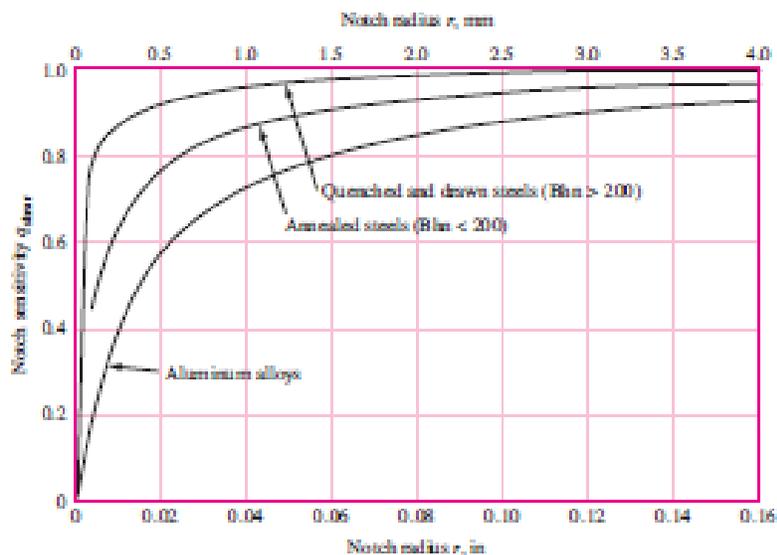
Se define $K_f = 1 + q(K_t - 1)$;

$$K_{fs} = 1 + q(K_{ts} - 1);$$

Donde q es la sensibilidad de la muesca y se encuentra usualmente entre cero y la unidad. Se puede usar la siguiente figura para la carga de flexión y axial:



Para carga cortante se emplea el siguiente gráfico:



De manera alternativa se puede aplicar la ecuación de Neuber:

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{a}/r}$$

Donde $a^{1/2}$ se define como constante de Neuber y es una constante del material.

La constante de Neuber puede aproximarse mediante la siguiente ecuación (Para S_{ut} en kpsi):

$$\begin{aligned} \sqrt{a} = & 0.245\,799 - 0.307\,794(10^{-2})S_{ut} \\ & + 0.150\,874(10^{-4})S_{ut}^2 - 0.266\,978(10^{-7})S_{ut}^3 \end{aligned}$$

4. Aplicar K_f o K_{fs} .
5. Determinar las constantes de vida a la fatiga a y b con las siguientes ecuaciones:

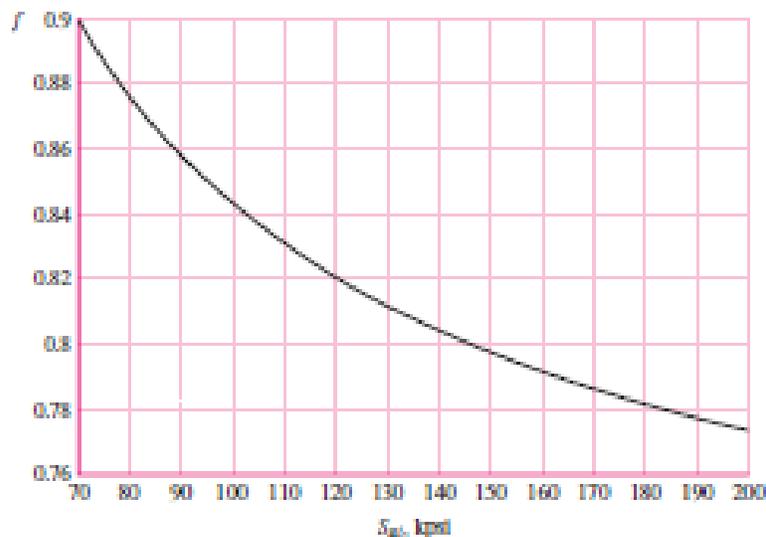
$$a = (f S_{ut})^2 / S_e$$

$$b = -[\log(f S_{ut} / S_e)] / 3$$

Determinación de f :

Si $S_{ut} \geq 70$ kpsi; se puede obtener f de la siguiente figura:

Figura B-5.2: Fracción de resistencia al a fatiga f



Si $S_{ut} < 70$ kpsi; $f = 0.9$

Para calcular S_e , K_f o K_{fs} , utilizar los pasos detallados en la sección previa.
Subsiguientemente:

1. Es necesario calcular σ_m y σ_a , aplicando K_f a ambos esfuerzos de ser necesario en presencia de una muesca:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$$

$$\sigma_a = |\sigma_{\max} - \sigma_{\min}|/2$$

En ausencia de la muesca σ_a y σ_m son iguales a los esfuerzos nominales.

2. Aplicar un criterio de falla por fatiga:

Para $\sigma_m \geq 0$;

- Soderberg: $\sigma_a/S_e + \sigma_m/S_y = 1/n$
- Goodman-modificado $\sigma_a/S_e + \sigma_m/S_{ut} = 1/n$
- Gerber $n\sigma_a/S_e + (n\sigma_m/S_{ut})^2 = 1$
- ASME-elíptico $(\sigma_a/S_e)^2 + (\sigma_m/S_{ut})^2 = 1/n^2$

Donde n es el factor de diseño o de seguridad

Para $\sigma_m < 0$; $\sigma_a = S_e/n$

Figura B-5.3: Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla. Para cada criterio los puntos en o "arriba" de la recta respectiva indican falla.

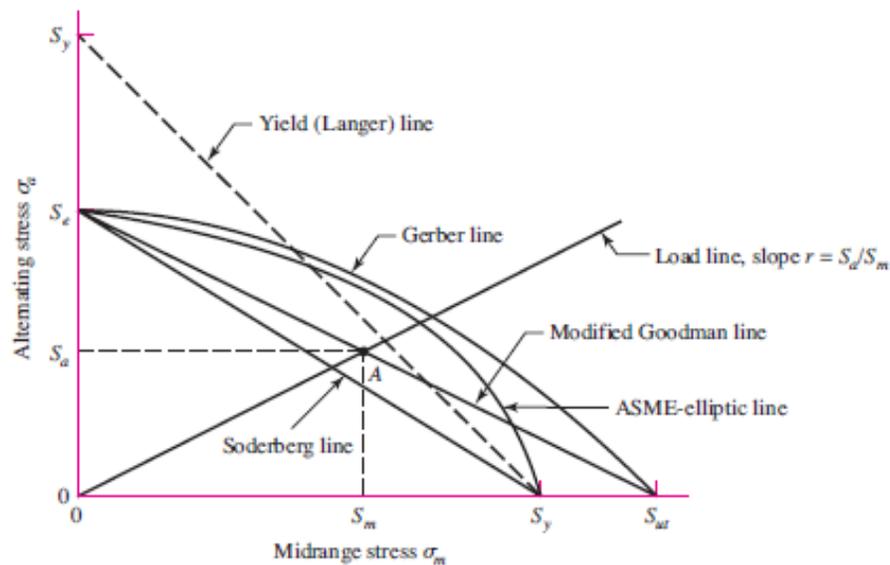
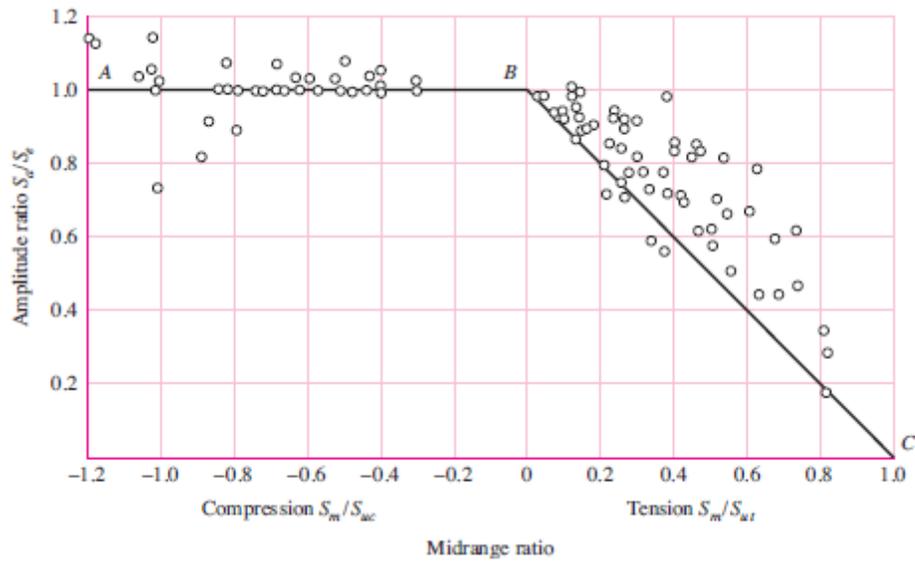


Figura B-5.4: Gráfica de fallas de esfuerzos medios en ambas regiones de tensión y compresión.



3. Verificar fluencia localizada:

$$\sigma_m + \sigma_a = S_y/n$$

4. Resistencia a la fatiga de la vida finita:

$$\text{Tenemos } S_f = a N^b;$$

Donde N son los ciclos hasta la falla y las constantes a y b están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$a = (f S_{ut})^2 / S_e$$

$$b = -(1/3) * \log (f S_{ut}/S_e)$$

f representa la fracción de resistencia a la fatiga de S_{ut} a los 10^3 ciclos para $S_e = S'_e = 0,5S_{ut}$.

Según Goodman Modificado:

$$S_f = \sigma_a / (1 - (\sigma_m/S_{ut}))$$

Ahora podemos determinar la vida finita:

$$N = ((S_f/n)/a)^{1/b}$$

Bibliografía

1. Bathe, K. J., "Finite Element Procedures", 2nd edition, Prentice, 1995.
2. Budynas, R. G. y Nisbett, J. K., "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley", 8va edición, Mc Graw Hill.

Páginas de Internet consultadas:

- <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>
6/10/2012
- <http://www.cedom.gov.ar/es/legislacion/leyes/html/ley992.html>
- <http://www.cedom.gov.ar/es/legislacion/leyes/html/ley1854.html>
- http://www.cohimar.com/util/neumatica/neumatica_hidraulica22.html
- <http://www.cohimar.com/util/neumatica/neumatica9.html>
- <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.ar/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>
- <http://www.casagoyo.com.ar/detalles-tecnicos.php>
- [http://www.downpagioweb.com.ar/Compresores-de-Aire-descripcion-9994224-1\)](http://www.downpagioweb.com.ar/Compresores-de-Aire-descripcion-9994224-1)
- <http://www.festo.com.ar>