ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Diseño y Construcción de Prototipo de Extrusión Directa para Producir Perfiles de Plomo Artesanal"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIEROS MECÁNICOS

Presentada por:

Diana María Garófalo Méndez
Mario Gonzalo Hidalgo León

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2011

AGRADECIMIENTO

A Dios, a nuestros padres y a las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de esta tesis, a mis amigos, especialmente al Ing. Ignacio Wiesner F. por su invaluable colaboración y a la Empresa INTRAMET

DEDICATORIA

A DIOS

A NUESTRAS MADRES

A NUESTROS PADRES

A NUESTRAS FAMILIAS

A NUESTROS AMIGOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gustavo Guerrero M.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Ignacio Wiesner F.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Julián Peña E.
VOCAL.

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamentación de Graduación de la ESPOL).

Mario Gonzalo Hidalgo León

Diana María Garófalo Méndez

RESUMEN

En este trabajo se realizaron objetivos fundamentales de: diseñar y construir un prototipo donde se realizó el proceso de extrusión directa en caliente, y se encontró los valores adecuados de los parámetros en el proceso de la extrusión de plomo.

Se consideró la presión teórica requerida para efectuar el proceso de extrusión, utilizó una prensa hidráulica de laboratorio que tiene mandos para variar la velocidad de extrusión.

Se extrusó 6 probetas, las cuales se obtuvo variando 3 parámetros del proceso: relación de extrusión, temperatura de precalentamiento de la palanquilla y velocidad de extrusión.

Se realizó ensayos de metalografía en el producto extruido, se verificó el cambio en propiedades de las probetas extruidas y finalmente se presentaron las conclusiones, resultados analizados y comparados con las propuestas de trabajo hechas en la introducción, planos correspondientes y la tabla de costos del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN II

ÍNDICE GENERAL..... III

ABREVIATURAS……V

SIMBOLOGÍA……VI

ÍNDICE DE FIGURAS..... VII

ÍNDICE DE TABLAS .....……..X

ÍNDICE DE PLANOS…….XIII

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 2

    1.1. TIPOS DE EXTRUSIÓN..... 3

    1.2. EQUIPOS USADOS PARA LA EXTRUSIÓN 6

    1.3. VARIABLES DEL PROCESO..... 10

    1.4. DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA EXTRUSIÓN 31

    1.5. DEFECTOS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN 39

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO Y CÁLCULO DE LA MATRIZ DE EXTRUSIÓN 43

2.1. CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE EXTRUSIÓN 45
2.2. CÁLCULO DE CILINDRO 47
2.3. CÁLCULO DEL CONTENEDOR 56
2.4. CÁLCULO DEL PERNO DEL CONTENEDOR 58
2.5. CÁLCULO DE LAS COLUMNAS 66
2.6. CÁLCULO DE LA MATRIZ 73

CAPÍTULO 3

3. TRABAJO EXPERIMENTAL 76
3.1. EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS 76
3.2. METODOLOGÍA 77
3.3. ADAPTACION DE LA PRENSA UNIVERSAL 79
3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 84
3.5. EVALUACION Y RESULTADOS DE LAS PROBETAS EXTRUIDAS 91
3.6. COMPARACIÓN DE COSTO, PRODUCTO ARTESANAL VERSUS PRODUCTO EXTRUIDO 102

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 104

APÉNDICE

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

F	Fuerza necesaria para extruir el material
σ_o	Límite elástico del material
A_o	Área inicial de la palanquilla, área del cilindro
Af	Área final de la palanquilla
σ_{pb}	Límite elástico del plomo
R	Relación de extrusión
P_b	Presión de trabajo de la bomba
F_1	Fuerza máxima en el vástago de Ø 50mm
σ_t	Esfuerzo tangencial
σ_r	Esfuerzo radial
σ_l	Esfuerzo longitudinal
P_i	Presión interna
P_o	Presión externa
r_i	Radio interno
r_o	Radio externo
S_y	Esfuerzo a la fluencia
S_{ut}	Esfuerzo a la Tracción
N	Factor de seguridad
σ_{perm}	Esfuerzo normal permisible
T_{perm}	Esfuerzo cortante permisible
σ'	Esfuerzo efectivo de Von Mises

SIMBOLOGÍA

l	Longitud de zona sujeta del perno
l_t	Longitud de rosca axialmente cargada
l_s	Longitud del perno sin roscar
l_{perno}	Longitud del perno
l_{rosca}	Longitud de la rosca
k_b	Rigidez del perno
A_t	Área de esfuerzo sometido a tensión
E_b	Módulo de elasticidad del perno
A_b	Área de diámetro mayor del perno
K_m	Constante del material
C	Factor de rigidez
F_{total}	Fuerza total en el porta dados
F	Fuerza aplicada sobre cada perno
P_b	Fuerza del perno tomada de F
F_b	Fuerza resultante en el perno
σ_b	Esfuerzo máximo a tensión en el perno
Mpa	Megapascal
N_y	Factor de seguridad a la fluencia
D	Diámetro de la columna
S_r	Factor de esbeltez
l	Longitud de la columna
k	Radio de giro
I	Segundo momento de la sección transversal de la columna
A	Área de la sección transversal de la columna
P_{cr}	Carga unitaria crítica
l_{eff}	Factor de longitud efectiva
T	Temperatura
V	Velocidad de extrusión

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁG.

FIGURA 1.1 TIPOS DE EXTRUSIÓN 4

FIGURA 1.2 TÍPICA PRENSA DE EXTRUSIÓN VERTICAL 8

FIGURA 1.3 PRENSA DE EXTRUSIÓN HORIZONTAL 9

FIGURA 1.4 MÁQUINA EXTRUSORA 10

FIGURA 1.5 PRESIÓN DE EXTRUSIÓN VS. RECORRIDO DEL VÁSTAGO11

FIGURA 1.6 VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO..... 21

FIGURA 1.7 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO QUE EMERGE DE LA RELACIÓN DE EXTRUSIÓN DE PLOMO. VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN = 76 MM/MIN Ø PALANQUILLA= 51 MM, LARGO =64 MM 22

FIGURA 1.8 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO QUE EMERGE CON LA VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN DE ALUMINIO. RELACIÓN DE EXTRUSIÓN 16:1 ØPALANQUILLA= 38 MM. LARGO 51 MM. 23

FIGURA 1.9 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL EN PRODUCTOS CON EL DESPLAZAMINETO PARA DOS ALEACIONES DE ALUMINIO 25

FIGURA 1.10 INTERDEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA PRESIÓN Y VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN..... 27
FIGURA 1.11 DIAGRAMA DE FLUJO EN LA EXTRUSIÓN 33
FIGURA 2.1 DISEÑO BASE DE MATRIZ 44
FIGURA 2.2 CILINDRO SOMETIDO A PRESIONES INTERNAS Y EXTERNAS 48
FIGURA 2.3 CILINDRO DE PRUEBA..... 49
FIGURA 2.4 DISTRIBUCIONES DE ESFUERZOS TANGENCIALES Y RADIALES EN LA PARED DE UN CILINDRO CON PRESIÓN INTERNA..... 50
FIGURA 2.5 ESTADO DE ESFUERZO DEL CILINDRO..... 54
FIGURA 2.6 ESTADO DE DEFORMACIÓN DEL CILINDRO..... 55
FIGURA 2.7 DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DEL CILINDRO .. 55
FIGURA 2.8 ESTADO DE ESFUERZO DEL ENSAMBLAJE DEL CONTENEDOR 56
FIGURA 2.9 ESTADO DE DEFORMACIÓN DEL ENSAMBLAJE DEL CONTENEDOR 57
FIGURA 2.10 DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DEL ENSAMBLAJE DEL CONTENEDOR 57
FIGURA 2.11 CONJUNTO ATORNILLADO A TENSIÓN 59
FIGURA 2.12 ENSAMBLE CONTENEDOR 61

FIGURA 2.13 DIVERSAS CONDICIONES TERMINALES DE COLUMNA, Y SUS CURVAS DE DEFLEXIÓN RESULTANTES 68
FIGURA 2.14 LÍNEAS DE FALLA DE COLUMNAS EULER, JOHNSON Y COLUMNAS CORTAS..... 71
FIGURA 2.15 DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DE LA COLUMNA SOPORTE 72
FIGURA 2.16 ESTADO DE ESFUERZO DEL ENSAMBLAJE DE LA MATRIZ 73
FIGURA 2.17 ESTADO DE DEFORMACIÓN DEL ENSAMBLAJE DE LA MATRIZ 74
FIGURA 2.18 DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DEL ENSAMBLAJE DE LA MATRIZ 74
FIGURA 3.1 SECUENCIA DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS PARA LAS PRUEBAS DE EXTRUSIÓN. 78
FIGURA 3.2 PRENSA UNIVERSAL VERSA TESTER UPDATED..... 80
FIGURA 3.3 CAJA DE TARAJE DE 25000 KGF 81
FIGURA 3.4 CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 1 EXTRUIDA..... 95
FIGURA 3.5 CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 2 EXTRUIDA..... 95
FIGURA 3.6 CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 3 EXTRUIDA..... 96
FIGURA 3.7 CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 4 EXTRUIDA..... 96
FIGURA 3.8 CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 5 EXTRUIDA..... 97
FIGURA 3.9 CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 6 EXTRUIDA..... 97

FIGURA 3.10 MESA DE PULIDO CON BASE DE VIDRIO Y CANALES DE ACRÍLICO. 99
FIGURA 3.11 PULIDO CON PASTA DE DIAMANTE 100
FIGURA 3.12 ATAQUE QUÍMICO CON REACTIVO. 100
FIGURA 3.13 MICROSCOPIO LEITZ ASISTIDO POR COMPUTADORA.. 101

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 TEMPERATURAS PARA EXTRUSIÓN (1) 16

TABLA 2 VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN 18

TABLA 3 PARTES DE MATRIZ 44

TABLA 4 CÓDIGO AISC 52

TABLA 5 DIMENSIONES PRINCIPALES DE LAS ROSCAS DE TORNILLO UNIFIED NATIONAL STANDARD 60

TABLA 6 ESPECIFICACIONES Y RESISTENCIAS SAE PARA PERNOS DE ACERO 62

TABLA 7 PARÁMETROS DE RIGIDEZ PARA LA ECUACIÓN km 64

TABLA 8 FACTORES DE LONGITUD EFECTIVA, SEGÚN LA CONDICIÓN TERMINAL DE LA COLUMNA 69

TABLA 9 SECUENCIA DE FOTOS 1-4 DE CALIBRACIÓN DE PRENSA UNIVERSAL 83

TABLA 10 SECUENCIA DE FOTOS 5-8 DE CALIBRACIÓN DE PRENSA UNIVERSAL 84

TABLA 11 SECUENCIA DE FOTOS 1-4 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN, ELABORACIÓN DE LA PALANQUILLA 86

TABLA 12 SECUENCIA DE FOTOS 5-12 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN, ELABORACIÓN DE LA PALANQUILLA 87

TABLA 13 SECUENCIA DE FOTOS 1-8 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN, PARTES DE MATRIZ DE EXTRUSIÓN 88
TABLA 14 SECUENCIA DE FOTOS 1-8 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN 89
TABLA 15 SECUENCIA DE FOTOS 9-16 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN..... 90
TABLA 16 SECUENCIA DE FOTOS 1-3 PROBETAS EXTRUIDAS 92
TABLA 17 SECUENCIA DE FOTOS 4-6 PROBETAS EXTRUIDAS 93
TABLA 18 ESTADO SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS EXTRUIDAS..... 94
TABLA 19 SECUENCIA DE FOTOS 5-6 METALOGRAFÍAS DE PROBETAS EXTRUIDAS 102
TABLA 20 COSTOS DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE EXTRUSIÓN..... 103

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 PLANO GENERAL MATRIZ

PLANO 2 CONTENEDOR

PLANO 3 EJE SOPORTE

PLANO 4 PLACA SOPORTE

PLANO 5 PORTA MATRIZ

PLANO 6 DADOS

PLANO 7 PORTA MATRIZ

(VER APÉNDICE)

INTRODUCCIÓN

En la industria del procesamiento de los metales se busca la implementación de mecanismos y procedimientos que hagan productos de mejor calidad, que reduzcan sus costos de producción e impongan una tendencia al ahorro de recursos.

El objetivo principal de este trabajo de tesis es realizar el estudio de la extrusión aplicando tecnologías diferentes, comúnmente utilizadas en las industrias y que son celosamente guardadas.

Entre los principales objetivos específicos propuestos para el desarrollo de este trabajo de tesis, se tienen los siguientes:

- Estudiar los parámetros de extrusión y posteriormente recomendar las mejores condiciones para la producción.
- Diseño y construcción de la matriz para ser adaptada a la prensa universal para realizar el proceso de extrusión.
- Mejorar la calidad del producto en cuanto a acabado superficial y tamaños, encontrados en el mercado.

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

GENERALIDADES

La extrusión es un proceso de conformación plástica, mediante la cual una palanquilla de metal es reducida en sección forzándola a fluir a través de un molde.

Para realizar la extrusión se requieren presiones elevadas, por lo que la mayoría de los metales se extruyen en caliente con el fin de reducir el límite de fluencia.

El proceso es utilizado para producir piezas de gran longitud y sección transversal constante como barras, perfiles de secciones sólidas y huecas, tubos, alambres, etc.

1.1. TIPOS DE EXTRUSIÓN

Existen dos tipos principales de extrusión:

- Directa.
- Indirecta.

EXTRUSIÓN DIRECTA

Como se muestra en la figura 1.1a en la extrusión directa se coloca una palanquilla caliente en el contenedor, y mediante un embolo empujado por un vástago se aplica la presión necesaria contra la palanquilla para que esta fluya a través de la matriz.

EXTRUSIÓN INDIRECTA

En la extrusión indirecta se emplea un vástago hueco el cual empuja a la matriz, mientras el extremo opuesto del cuerpo de extrusión está cerrado con una placa, como se muestra en la figura 1.1b. A veces se mantiene fijo el vástago y la matriz, empujando contra ellos al cuerpo que contiene la palanquilla.

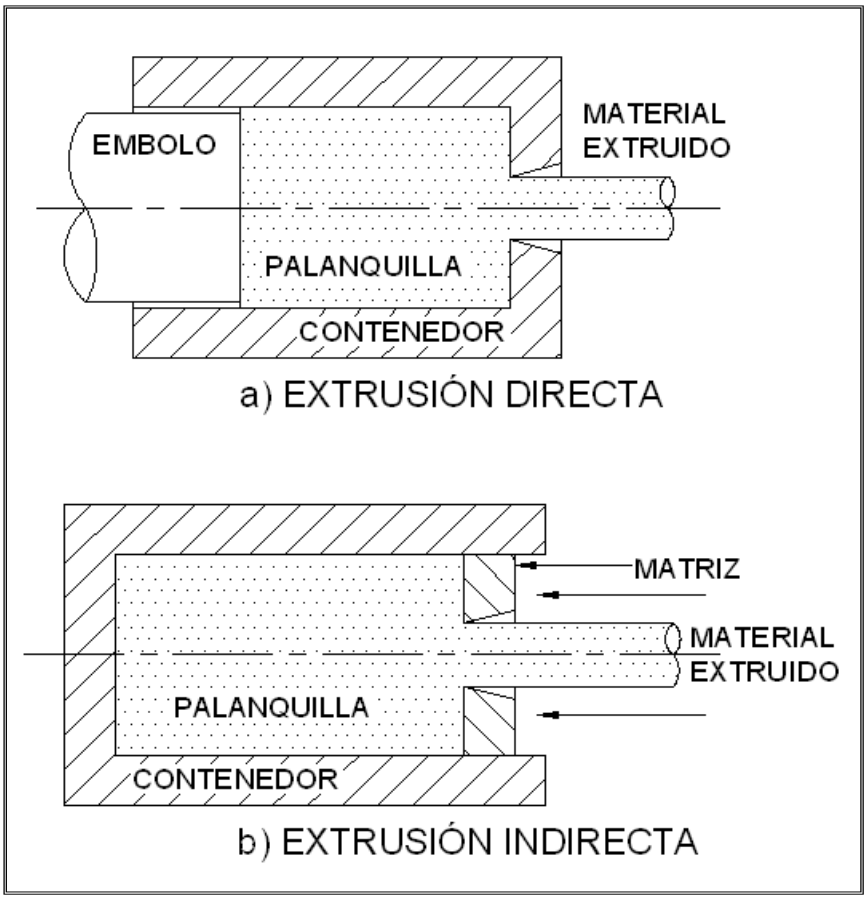


FIGURA 1.1. TIPOS DE EXTRUSIÓN

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE EXTRUSIÓN

La extrusión indirecta ofrece un número de ventajas, entre estas se tiene:

- Una reducción de la máxima carga, relativa a la extrusión directa en un 25-30%.

- La presión de extrusión no es función del largo de la palanquilla, porque no hay un movimiento relativo entre la palanquilla y el contenedor. Consecuentemente el largo de la palanquilla no está limitado por la carga requerida para este desplazamiento sino por el largo del cuerpo del contenedor.
- No se produce demasiado calor por la poca fricción existente entre la palanquilla y el contenedor, por lo tanto no ocurre un gran incremento de temperatura en la superficie de la palanquilla hasta el final de la extrusión, consecuentemente en la extrusión indirecta hay menor tendencia a la ruptura o fisura de las superficies, por lo tanto se pueden utilizar velocidades de extrusión significativamente altas.
- El tiempo de vida de las herramientas es mayor por existir menor fricción y menor incremento de temperatura.
- La desventaja de la extrusión indirecta es que las impurezas o defectos en la superficie de la palanquilla afectan la superficie del producto extruido. Por ello es necesario utilizar palanquillas maquinadas en muchos casos. También el área de la sección transversal para extruír es limitada por el tamaño del contenedor.

1.2. EQUIPOS USADOS PARA LA EXTRUSIÓN

PRENSAS

La gran parte de los procesos de extrusión en caliente se efectúan con prensas hidráulicas que pueden ser horizontales o verticales. Las prensas horizontales son las más comunes, en algunas aplicaciones se utilizan prensas mecánicas.

Las prensas verticales presentan las ventajas de una mayor facilidad de alineación del vástago y las herramientas, mayor velocidad de producción y menor exigencia de espacio que las prensas horizontales. En cambio necesitan una gran altura de nave, y cuando han de fabricarse piezas de una longitud considerable es necesario excavar un hueco en el piso del taller.

Las prensas verticales producen también enfriamiento homogéneo de la palanquilla en el cuerpo de extrusión, logrando con ello una deformación simétricamente uniforme.

En las prensas horizontales la palanquilla reposa directamente sobre el cuerpo, por lo que la parte inferior de contacto con dicho cuerpo se enfriará más rápidamente y la deformación no será

uniforme, produciendo alabeo de las barras y espesor no uniforme de tubos. Esto puede evitarse si el cuerpo se calienta internamente.

Para la fabricación de tuberías de paredes delgadas es recomendable utilizar prensas verticales especialmente cuando se requiere espesores uniformes. Para la mayoría de los perfiles, barras y tubos se utiliza prensas horizontales.

Las prensas para extrusión en caliente son seleccionadas en términos de su capacidad de fuerza, esto es la fuerza que la prensa es capaz de aplicar sobre la palanquilla. Sin embargo el proceso de extrusión en si depende de la presión ejercida sobre el metal.

La presión máxima usada en muchas prensas para la extrusión es de aproximadamente 1050 Mpa (150Kpsi). Esta presión esta cercana del límite de resistencia a la tensión de los muchos de los aceros de herramientas usados para extrusión. Presiones de trabajo que sobrepasan este límite pueden causar fallas prematuras en las herramientas.

La presión necesaria para la extrusión es la principal consideración para la selección de la prensa. Es entonces necesario seleccionar una prensa que tenga suficiente capacidad, ya que así podrá trabajarse con temperaturas más bajas en la palanquilla,

velocidades más rápidas y con ello obtener el producto extruido con buenas propiedades.

Las prensas para extrusión requieren una estructura rígida que permitan alinear con precisión el embolo, la palanquilla y el molde. Prensas modernas proporcionan estos ajustes adecuados, permitiendo dar estabilidad en las herramientas, logrando con ello tener el producto extruido con adecuadas tolerancias.

FIGURA 1.2. TÍPICA PRENSA DE EXTRUSIÓN VERTICAL

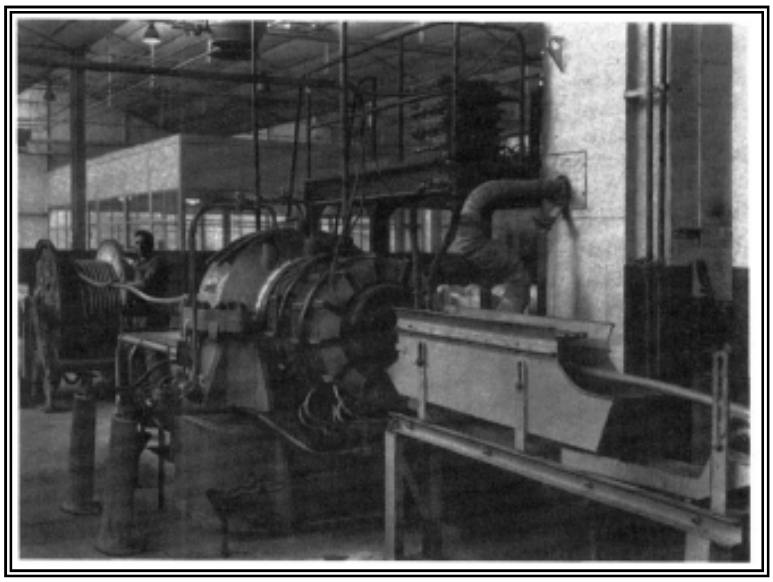


FIGURA 1.3. PRENSA DE EXTRUSIÓN HORIZONTAL

ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS

Adicionalmente a la prensa se necesitan accesorios complementarios para el proceso de extrusión, puesto que la mayoría de las operaciones para extrusión en caliente, se necesitan medios para calentar las palanquillas.

Para grandes producciones se requiere equipos automáticos para transportar las palanquillas calientes al cuerpo de extrusión. Es necesario disponer también de medios para mantener caliente el cuerpo de extrusión, especialmente cuando se trabaja con aleaciones que requieren velocidades de extrusiones pequeñas.

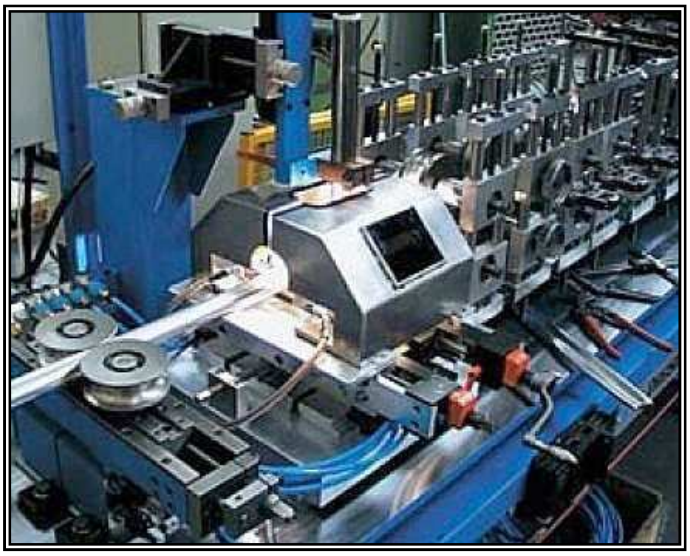


FIGURA 1.4. MÁQUINA EXTRUSORA

También se requiere una sierra para cortar la forma extruida, de forma que se pueda expulsar de la matriz, material que se desecha. Además se utiliza una mesa transportadora para recoger el producto y una máquina enderezadora para corregir los alabeos del producto extruido.

1.3. VARIABLES DEL PROCESO

Las principales variables del proceso que determinan la fuerza necesaria para producir la extrusión son:

- Lubricación
- Temperatura.
- Velocidad de extrusión.

- Relación de extrusión.

TIPO DE EXTRUSIÓN

La presión necesaria para efectuar el proceso de extrusión varia considerablemente dependiendo del tipo de extrusión.

La presión de extrusión, es la fuerza de extrusión dividida para el área de la sección transversal de la palanquilla. En la fig. 1.5 puede observarse la variación que experimenta la presión en función del recorrido del vástago tanto para la extrusión directa como para la indirecta.

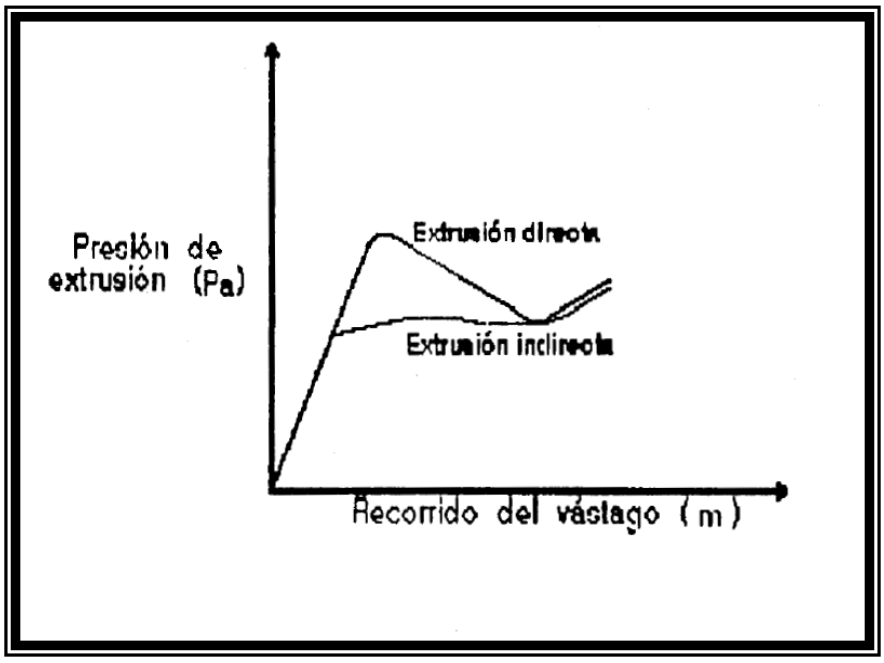


FIGURA 1.5. PRESIÓN DE EXTRUSIÓN VS. RECORRIDO DEL VÁSTAGO

En la extrusión directa como se aprecia existe una elevación rápida de la presión al comienzo del recorrido del vástago. Esto se debe a la compresión inicial que se ejerce sobre la palanquilla hasta llenar el cuerpo de extrusión.

Cuando se alcanza el valor máximo de presión, el metal empieza a fluir, decreciendo la presión a medida que la extrusión prosigue ya que disminuye la fuerza de fricción al ser menor la longitud de la palanquilla que va quedando dentro del cuerpo.

En la extrusión indirecta no hay movimiento relativo de la palanquilla y el cuerpo, por lo que la presión se mantiene aproximadamente constante a lo largo del recorrido del vástago, y que representa la presión necesaria para deformar el metal en la matriz.

La curva de extrusión directa se aproxima a la de la curva de la extrusión indirecta cuando la longitud de la palanquilla todavía sin extruír se aproxima a 0. Las dos curvas se vuelven bruscamente hacia arriba cuando, al final del recorrido del vástago, se intenta extruír un disco delgado de palanquilla que queda en la matriz.

Puesto que no es económico desarrollar las elevadas presiones que serían necesarias para extruir totalmente la palanquilla, se desecha un pequeño despunte que es necesario expulsar del cuerpo.

LUBRICACIÓN

La presión de extrusión disminuye considerablemente con el uso de lubricantes apropiados.

Algunas aleaciones de aluminio son posibles extruír sin utilizar lubricación en la palanquilla, contenedor y la matriz. Se logra incluso producir algunas secciones complejas con gran acabado superficial y buenas tolerancias dimensionales. La mayoría de aleaciones de otros metales como cobre, titanio, plomo, magnesio, aceros al carbono, aceros inoxidables y aceros para herramientas son extruidas con grafito y una variedad de lubricantes de base de vidrio.

Mezclas comerciales de grasa que contienen películas lubricantes sólidas como el grafito, a menudo proveen paca o ninguna protección a la matriz cuando se extruyen aleaciones de titanio y acero.

El proceso Sejournet es el más usado para la extrusión de aceros y aleaciones de titanio, en este proceso, la palanquilla caliente es rodada sobre un lecho de base de vidrio o es rociada con polvo de vidrio a fin de que toda la superficie la quede cubierta.

Antes de que la palanquilla sea introducida en el interior del contenedor, un sistema de lubricación actúa inmediatamente delante del dado, este sistema de lubricación puede compactar vidrio, lana de vidrio o ambos, luego la palanquilla es colocada rápidamente en el contenedor. El ciclo de extrusión entonces empieza.

Como lubricante el vidrio, exhibe características únicas como su habilidad para ablandar la palanquilla caliente y simultáneamente para proteger las herramientas por lo general se mantiene a una temperatura que es considerablemente más baja que la de la palanquilla.

En la extrusión de titanio y acero, la temperatura de la palanquilla debe estar entre 500 y 550 ºC.

Por lo tanto la compatibilidad puede conseguirse solamente con el uso de lubricantes apropiados, protegiendo con una película fina el dado, insertando dados cerámicos y diseñando estos para minimizar el desgaste de la herramienta.

Lubricantes de vidrio tienen buenos resultados en una producción básica de longitudes largas.

La selección entre grasas y vidrios están basada principalmente en la temperatura de extrusión. A temperaturas bajas la lubricación es usada solamente para reducir la fricción a temperaturas moderadas hay también algún aislamiento entre la palanquilla caliente y la herramienta por la fundición parcial de los lubricantes y formación de vapor. A temperaturas sobre 1000ºC se impide un sobrecalentamiento de la herramienta. La película lubricante puede también impedir la oxidación.

Los lubricantes pueden clasificarse básicamente en dos grupos, los cuales se utilizan a acuerdo a la temperatura de trabajo.

- **Bajo 1000ºC:** Grasas lubricantes como grasas, grafito, asfalto, mica, bentonita, bisulfato de molibdeno y plásticos (polímeros a altas temperaturas).

- **Sobre 1000ºC:** Vidrios lubricantes como vidrio, basalto y polvos cristalinos.

TEMPERATURA

La temperatura necesaria que se da a la palanquilla para realizar el proceso de extrusión depende del tipo de material a ser extruido. Sin embargo esta temperatura varía mucho de acuerdo al tipo de aleación, como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1

TEMPERATURAS PARA EXTRUSIÓN (1)

MATERIAL	TEMPERATURA DE PALANQUILLA ºC
Aleaciones de plomo	90-260
Aleaciones de magnesio	340-430
Aleaciones de aluminio	340-510
Aleaciones de cobre	650-1100
Aleaciones de titanio	870-1040
Aleaciones de níquel	1100-1260
Aceros	1100-1260

La mayor parte de los metales se extruyen en caliente. Puesto que el trabajo en caliente genera aparición de problemas como la oxidación de la palanquilla, ablandamientos de las herramientas de extrusión, es conveniente trabajar a la temperatura más baja que proporcione al metal suficiente plasticidad.

La temperatura de trabajo más alta es aquella en que aparece la fragilidad en caliente o, en los metales puros el punto de fusión. Como la deformación producida por la extrusión es muy intensa, se debe produce considerable calentamiento interno. Por ello la temperatura límite superior de extrusión debe muy baja que la temperatura de fusión o el intervalo de fragilidad en caliente, a fin de tener seguridad en los resultados.

Para una deformación determinada, se puede trabajar por extrusión a temperaturas más elevadas que las empleadas en forja o laminación por que las elevadas tensiones de compresión aminoran la posibilidad de agrietamiento. A pesar de ello se puede producir grietas en la extrusión de formas no simétricas, como consecuencia del flujo desigual en las diferentes secciones.

VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN

Las velocidades son esenciales para la extrusión en caliente. Una velocidad excesiva puede causar un sobrecalentamiento de la palanquilla, roturas y otros defectos superficiales. Una velocidad que es baja reduce la productividad e incrementa la presión a medida que recorre el vástago por el enfriamiento de la palanquilla. Velocidades bajas reducen también la vida de la herramienta por el prolongado tiempo de contacto entre la palanquilla caliente con la matriz y el contenedor. Las velocidades de extrusión para algunos materiales se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2

VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN

MATERIAL	VELOCIDAD (mm/s)
Aluminio	12.7-25.4
Cobre	50.8-76.2
Latón	25.4-50.8
Acero	152.4-203.2

La variación de la velocidad en la prensa se logra utilizando bombas variables o válvulas reguladoras de caudal.

Las velocidades de extrusión se relacionan directamente con las temperaturas desarrolladas durante el proceso.

Una compleja situación térmica se desarrolla cuando la palanquilla calentada es colocada en el interior del contenedor, y el proceso de extrusión empieza.

Las temperaturas están influenciadas por algunos factores, entre los que se tiene:

- Generación de calor debido a la deformación plástica.
- Generación de calor debido a la fricción existente entre el material a extruirse con la matriz y el contenedor.
- Transferencia de calor dentro de la palanquilla.
- Transferencia de calor entre la palanquilla y las herramientas.
- El calor transportado con el producto extruido.

Estos fenómenos ocurren simultáneamente y resultan de una compleja relación entre el material y las variables de proceso, esto es; el material de la palanquilla y las herramientas con la

temperatura, fricción, velocidad de extrusión, forma de la sección extruida y reducción de área.

El porcentaje de producción puede incrementarse aumentando la relación de extrusión y la velocidad de extrusión, manteniendo la presión de extrusión en un nivel óptimo.

Para este propósito los esfuerzos en el flujo del material extruido deben conservarse relativamente bajos, esto se logra por ejemplo incrementando la temperatura de precalentamiento de la palanquilla.

La combinación de temperatura alta en la palanquilla y gran reducción en el área, causan un considerable aumento de temperatura en el material extruido, especialmente cerca de la sección superficial porque la mayor parte de la deformación plástica y la energía producida por la fricción es transformada en calor. Esto puede causar defectos en la superficie o deficiencias en caliente.

Con una relación de extrusión de extrusión 40:1, las velocidades del proceso están en el orden de 0.6 a 1.2 m/min. La figura 1.6 muestra el rango de velocidades encontradas en la extrusión de varias aleaciones de aluminio.

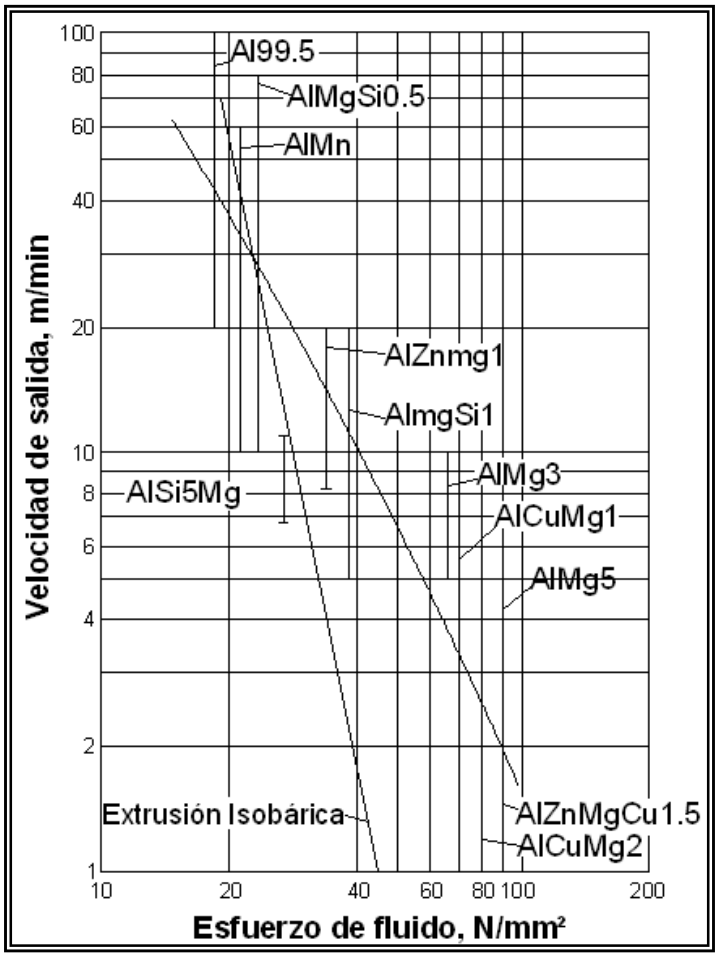


FIGURA 1.6. VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN PARA ALEACIONES DE ALUMINIO

La relación de extrusión depende grandemente de la presión del flujo de la aleación bajo las condiciones del proceso, la cual depende de la temperatura de extrusión y la cantidad de fuerza. Las velocidades son relativamente altas para aleaciones suaves, pero son bajas para aleaciones duras como la 70775 y la 2024.

El incremento de temperatura y la distribución de temperatura ha sido objeto de numerosas investigaciones (1). Las figuras 1.7 y 1.8 muestran los efectos de la relación de extrusión y la velocidad en el incremento de la temperatura.

Un simple análisis teórico fue hecho para investigar el efecto de la velocidad en el incremento de la temperatura.

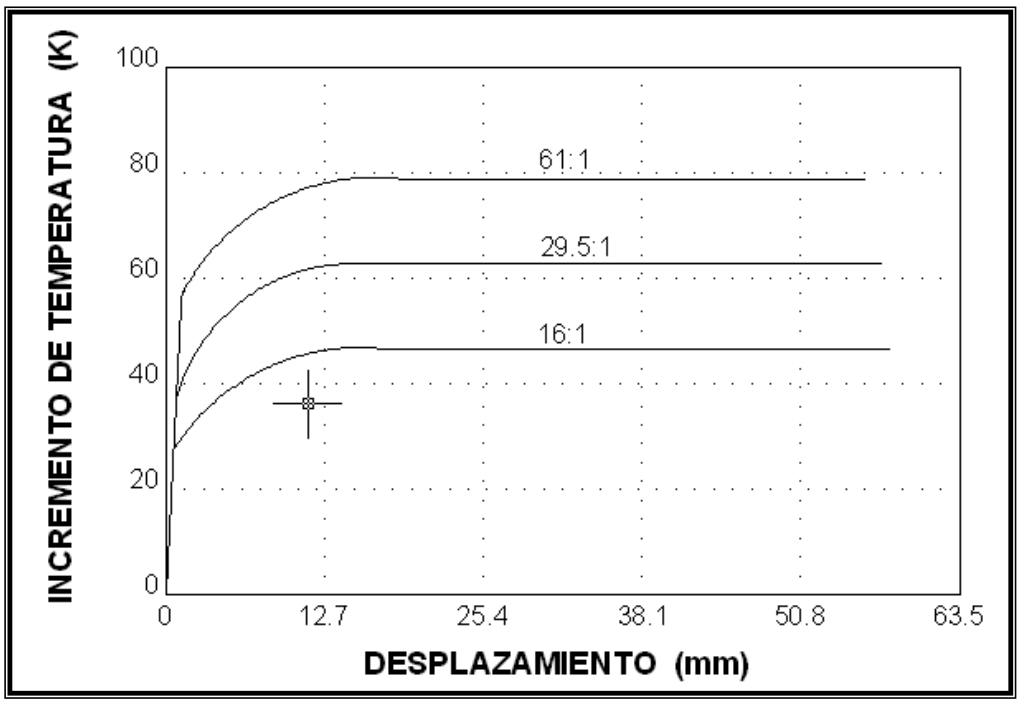


FIGURA 1.7. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO QUE EMERGE DE LA RELACIÓN DE EXTRUSIÓN DE PLOMO. VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN = 76 MM/MIN Ø PALANQUILLA= 51 MM, LARGO =64 MM

En este estudio, se asume que la palanquilla tiene un largo infinito, la fricción existente entre la palanquilla con el contenedor y la matriz puede ser despreciada y que la temperatura es la misma en el interior del contenedor como en la palanquilla. La temperatura de la palanquilla varía a través de toda la longitud, pero se asume constante en alguna sección transversal. El modelo predice una relación sigmoidal entre el logaritmo de la velocidad y la elevación de la temperatura.

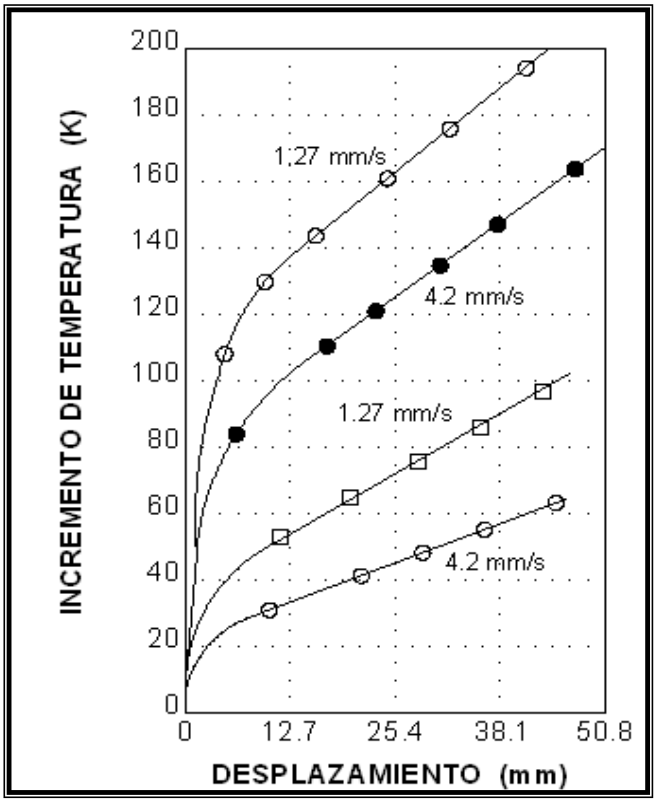


FIGURA 1.8. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO QUE EMERGE CON LA VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN DE ALUMINIO. RELACIÓN DE EXTRUSIÓN 16:1 ØPALANQUILLA= 38 MM. LARGO 51 MM.

Teórica y prácticamente, estudios de distribución de temperatura en la extrusión de aleaciones de aluminio fueron realizadas bajo condiciones en las cuales el contenedor y las herramientas estaban inicialmente a igual temperatura que la palanquilla; en este caso se dedujo que el incremento de temperatura fue de 95ºC.

Para propósitos prácticos, puede estimarse que en la extrusión de aleaciones fuertes, el incremento máximo de temperatura encontrado no excedía 100 ºC.

Con aleaciones suaves, para los cuales se requieren presiones más bajas el incremento de temperatura bajo condiciones normales no excedía de 50ºC. Como se ve en la figura 10 basada en predicciones teóricas y evidencias experimentales, la temperatura del producto aumenta al incrementar la velocidad de extrusión.

La temperatura en la superficie es más alta que en el centro del producto, por consiguiente la temperatura superficial del producto puede acercarse a la temperatura crítica en la que la deficiencia en caliente puede ocurrir solamente hacia el final del ciclo de extrusión.

La temperatura del producto extruido que está emergiendo desde el dado es uno de los factores esenciales que influencian la calidad del producto. Por consiguiente, en procedimiento ideal para establecer la máxima velocidad de extrusión en todo el tiempo es medir la temperatura y usarla para controlar la velocidad.

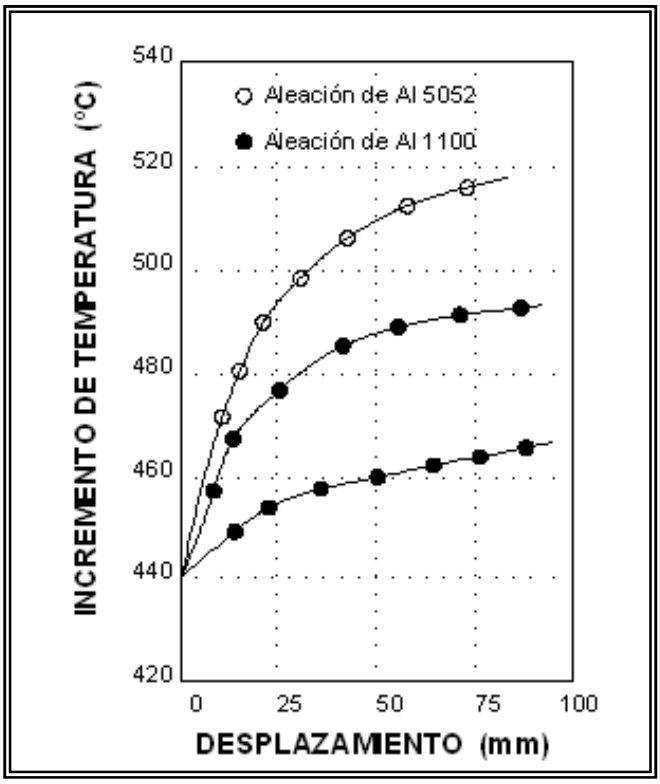


FIGURA 1.9. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL EN PRODUCTOS CON EL DESPLAZAMIENTO PARA DOS ALEACIONES DE ALUMINIO

INTERDEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA, VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN Y PRESIÓN

Cuando se aumenta la velocidad de extrusión, se incrementa la presión. Aumentando aproximadamente 10 veces la velocidad, el

incremento de presión es alrededor del 50%. Las palanquillas se enfrían más a velocidades de extrusión más bajas. Cuando este efecto es pronunciado se presenta un aumento real de la presión de extrusión con el recorrido del vástago, por el aumento del límite elástico a medida que la palanquilla se enfría.

La consecuencia es que se necesitan velocidades de extrusión elevadas para las aleaciones de alta resistencia que necesitan altas temperaturas de extrusión, ya que en este caso, aumenta el efecto de la baja velocidad de extrusión en el enfriamiento de la palanquilla. El aumento de la temperatura producido por la deformación del metal es mayor a velocidades de extrusión elevadas y pueden acentuarse las dificultades relacionadas con la fragilidad en caliente.

La selección de velocidades de extrusión y temperaturas adecuadas ha de hacerse por tanteos para cada aleación y dimensiones de la palanquilla. La interdependencia de estos factores se muestra esquemáticamente en la Fig. 1.10.

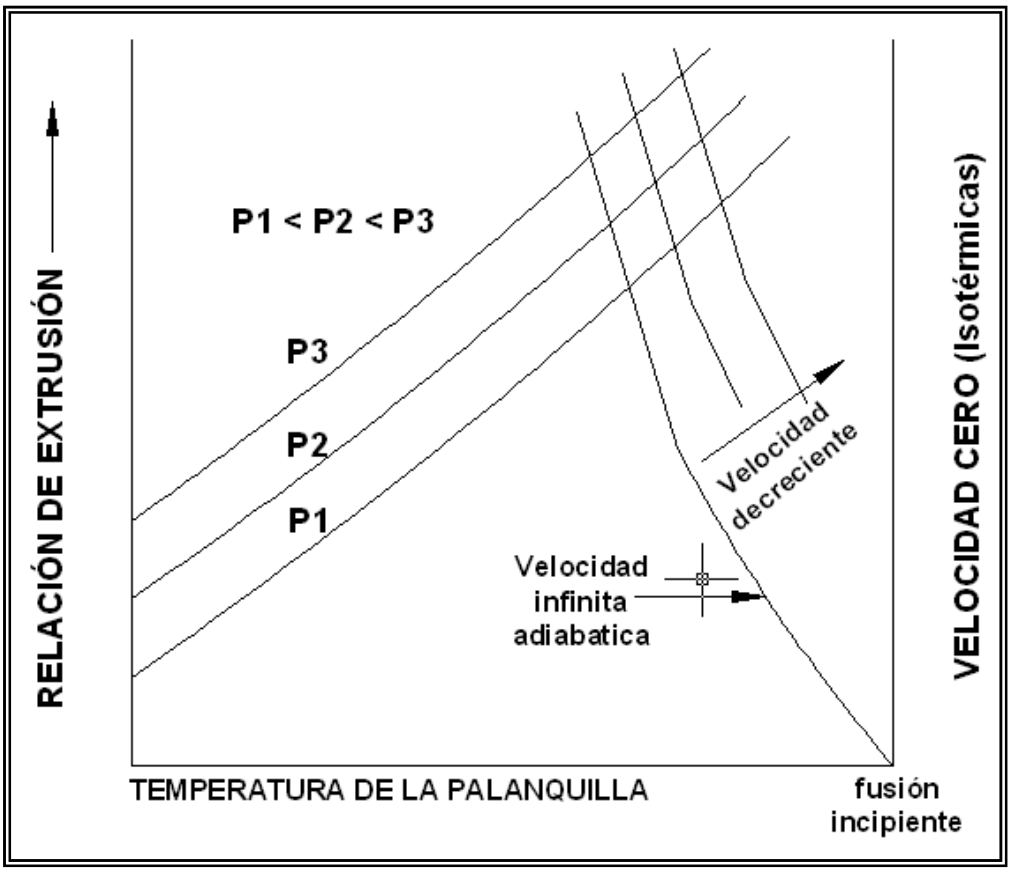


FIGURA 1.10. INTERDEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA PRESIÓN Y VELOCIDAD DE EXTRUSIÓN

Para una presión determinada se pude obtener una relación de extrusión más elevada empleando una temperatura más elevada. Para una temperatura determinada es posible conseguir una relación de extrusión trabajando a presión más alta.

La temperatura máxima de la palanquilla en el supuesto de que no existan limitaciones de debidas a la resistencia mecánica de las

herramientas y la matriz debe ser inferior a la temperatura a que se pueda producir fusión incipiente o fragilidad en caliente durante la extrusión.

La elevación de temperatura en la extrusión está determinada por la velocidad de extrusión y la magnitud de la deformación, por lo que las curvas que representan el límite de seguridad en la extrusión se elevan hacia la izquierda. La peor situación corresponde a una velocidad de extrusión infinita, para la cual no hay disipación de calor generado en la deformación.

A velocidades más bajas es mayor la disipación de calor y aumenta la relación de extrusión admisible para una temperatura determinada de precalentamiento. El intervalo de extrusión en que se pueden operar corresponde a la región que queda bajo las curvas de presión constante y velocidad de extrusión.

RELACIÓN DE EXTRUSIÓN

La relación de extrusión existente entre las secciones transversales de la palanquilla y el producto extruido.

$$R=A_0/A_f$$

La presión que se necesita para realizar la extrusión en caliente es de importante consideración, pues en base a esta se selecciona la prensa.

La determinación de la presión es difícil para la extrusión de formas y secciones complicadas especialmente aquellas que tienen paredes delgadas.

Criterios basados en experiencias se han tomado en cuenta para hacer estimaciones. Formulas han sido desarrolladas para estimar la presión necesaria, usando la fricción, la forma y otros parámetros. Sin embargo, para formas sencillas como barras redondas y tubos una aproximación predice que la presión de extrusión es una función aproximadamente lineal del logaritmo natural de la relación de extrusión. La fuerza de extrusión está dada por la siguiente ecuación 1.

$$F = \sigma_0 A_0 Ln(R)$$

Donde:

$\boldsymbol{\sigma_0}$ es el límite elástico en las condiciones de temperatura y velocidad de deformación empleadas en la extrusión.

R es la relación de extrusión.

La presión requerida para la extrusión es determinada mediante la ecuación 1, pero los valores obtenidos son solamente aproximaciones. Esta ecuación predice una fuerza de extrusión que es más baja que la observada realmente, porque no tiene en cuenta factores como la deformación no homogénea de la palanquilla, configuración del producto extruido.

El largo de la palanquilla así como la fricción entre la palanquilla con las herramientas tiene influencia en la fuerza requerida.

El tratamiento analítico completo de estos factores es muy difícil e imposibilita el cálculo exacto de las fuerzas de extrusión y la presión. Es frecuente que el límite elástico efectivo, o constante de extrusión, se calcule mediante una operación de extrusión a partir de una presión observada y la relación de extrusión empleando la ecuación.

Para un tamaño dado de la palanquilla y un juego determinado de condiciones de extrusión, habrá límite superior de la relación de extrusión que se puede obtener con una prensa de capacidad fija.

Cuando la variación de dimensiones producida por la extrusión se expresa como tanto por ciento de reducción de sección, se ve enseguida que pequeños incrementos en el porcentaje de reducción, en la región del 90%, van acompañados de grandes incrementos de la presión de extrusión, así por ejemplo: casi se duplica la presión de extrusión cuando aumenta el porcentaje de reducción del 95 al 99%. Esto equivale a un aumento del 20% en la relación de extrusión.

Los metales de fácil extrusión como el latón o el zinc, puede trabajarse con relaciones de extrusión mayores de 100%, mientras que las aleaciones difíciles de extruír, como las aleaciones a base de níquel para temperaturas elevadas no pueden extruirse a relaciones superiores a 20%.

1.4. DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA EXTRUSIÓN

La presión que se requiere para efectuar el proceso de extrusión depende de la forma en que el metal fluya en el cuerpo de la extrusión así como en la matriz.

En algunos casos los efectos que se presentan en las piezas extruidas se relacionan directamente con la manera en que el metal se deforma durante el proceso.

Se han llevado a cabo investigaciones minuciosas sobre las características del flujo de los metales blandos, tales como el plomo, el estaño, y el aluminio empleando la técnica de la palanquilla partida. Hay que tener en cuenta la deformación del metal tanto en el cuerpo de extrusión así como en la matriz.

La figura 1.11 muestra el diagrama de flujo, obtenido con una retícula cuadrada en la extrusión directa con matriz plana.

En la figura 1.11a corresponde al caso de la extrusión de la palanquilla bien lubricada, que se desliza a lo largo de las paredes del cuerpo. La deformación es relativamente uniforme hasta las inmediaciones de la entrada de la matriz, donde el metal fluye más fácilmente a través de esta última que a lo largo de las paredes del cuerpo.

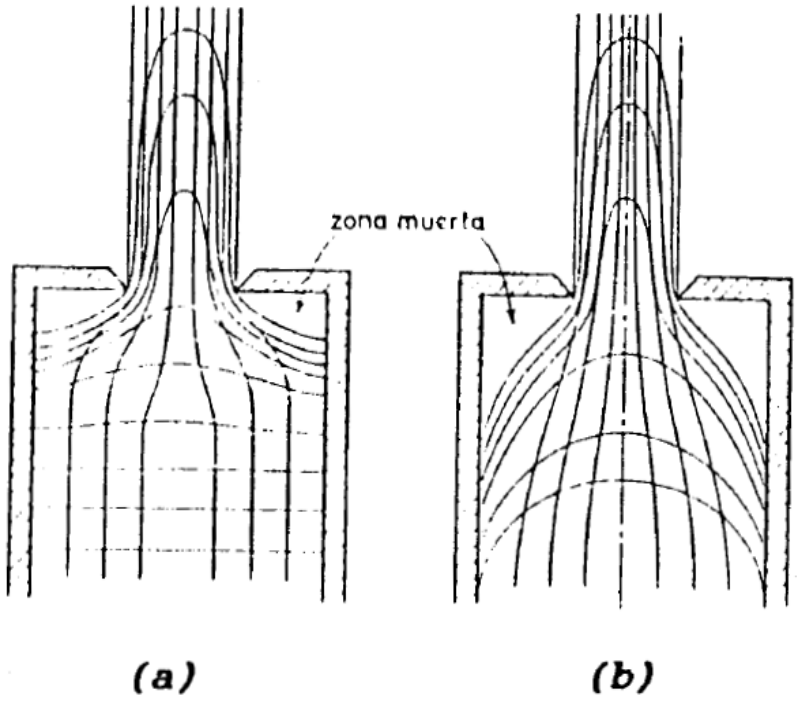


FIGURA 1.11. DIAGRAMA DE FLUJO EN LA EXTRUSIÓN
(A) CON LUBRICACIÓN ADECUADA
(B) SIN LUBRICACIÓN ADECUADA

En las esquinas de la matriz hay una zona muerta de metal estancado que sufre poca deformación. Los elementos del centro de la palanquilla soportan casi exclusivamente un alargamiento pura hacia la varilla extruida, que corresponde al cambio en la sección transversal de la palanquilla al producto extruido.

Los elementos próximos a los lados de la palanquilla sufren un intenso cizallamiento. La deformación por cizallamiento, que se produce en una sección transversal mucho mayor que la de la barra

extruida, requiere un consumo de energía que no está en relación con el cambio de dimensiones experimentado por la palanquilla al formar el producto extruido.

Este trabajo superfluo es la causa principal de la discrepancia que se encuentra entre las presiones de extrusión reales y las calculadas sobre la base de una deformación ideal.

Cuando la fricción entre la palanquilla y el cuerpo de la extrusión es elevada, se produce un intenso cizallamiento tanto en la palanquilla como en el flujo del metal a través de la matriz, lo que origina una zona muerta mayor como se ve en la figura 1.11b.

Como la velocidad del metal en el centro es más elevada que cerca a la superficie, hay tendencia a la acumulación del metal sobre las paredes y eventualmente se moverá hacia el centro de la palanquilla. Esto da lugar al llamado efecto de extrusión.

Si el metal tiene una resistencia al cizallamiento a lo largo de las paredes, menor que las tensiones de fricción, se producirá una separación a lo largo de esas paredes y quedará una delgada película de metal en el cuerpo de extrusión.

El flujo no homogéneo a través de una matriz de extrusión se puede modificar variando el ángulo de la matriz. Haciendo disminuir el ángulo de una matriz cónica, para que se aproxime al ángulo natural de flujo frente a una matriz plana, es menor la deformación de cizallamiento, pero aunque el flujo sea más uniforme con las matrices de ángulo pequeño, las fuerzas de fricción son más elevadas. Por esta razón no se puede llegar a la conclusión de que la presión de extrusión sea más pequeña cuando el flujo es más uniforme. Para muchas operaciones está entre 45 y 60º.

En la extrusión indirecta no hay fricción entre la palanquilla y las paredes del cuerpo de extrusión. Con una matriz plana existe una zona muerta, como la de la figura 1.11a y el flujo no es uniforme.

MATERIALES PARA EXTRUSIÓN EN CALIENTE

Dependiendo del material usado, el proceso de extrusión permite obtener productos que suelen utilizarse en la transportación, construcciones mecánicas, construcciones civiles, industrias eléctricas, etc.

Prácticamente todos los metales pueden ser extruidos, pero la facilidad para la extrusión varia con las propiedades de deformación del metal.

PLOMO Y ESTAÑO:

Presentan alta ductilidad y son fáciles para extruír. La adición de elementos aleantes incrementa la fuerza requerida pero la extrusión no presenta problema y es realizada calentando la palanquilla a una temperatura máxima de 300ºC.

Las aplicaciones principales están en la elaboración de tubos, alambres y barras. Las prensas verticales se utilizan para producir conductores eléctricos.

ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO

Son los materiales más ideales para realizar extrusión y estos son los más comúnmente se extruyen. Comercialmente muchas aleaciones de aluminio existen para extruír. Las temperaturas de las palanquillas generalmente se calientan hasta una temperatura que fluctúa entre 300 y 595ºC dependiendo de la aleación.

Las principales aplicaciones están en la industria aeroespacial, partes para aviones, tubos, alambres, barras, varillas, perfiles huecos, secciones estructurales para arquitectura y en la industria automotriz, al producto extruido a menudo se le efectúa un tratamiento térmico con el fin de mejorar las propiedades.

MAGNESIO Y ALEACIONES DE MAGNESIO

Productos extruidos de magnesio y aleaciones de magnesio son usados en la industria aeroespacial y plantas nucleares. Con similares temperaturas de la palanquilla la capacidad de extrusión de estos materiales es similar a la del aluminio, pero periodos más largos de calentamiento son usualmente necesarios para mantener uniforme la temperatura de la palanquilla.

ZINC Y ALEACIONES DE ZINC

La extrusión de zinc a sus aleaciones requiere presiones que son generalmente más altas que las utilizadas para el plomo, aluminio y magnesio. La temperatura de la palanquilla generalmente esta en un rango de 205 a 345ºC.

Las aplicaciones principales incluyen tubos, varillas, barras, componentes de armamento, accesorios de electrodomésticos.

COBRE Y ALEACIONES DE COBRE

El proceso de extrusión es ampliamente usada para producir alambres, barras, tubos, varillas, conductores eléctricos, conectores y electrodos de soldadura. Las temperaturas de las palanquillas varían dependiendo de la aleación en un rango de 595 a 995ºC.

ACEROS

Para la extrusión de acero es necesario utilizar vidrio o algún lubricante para alta temperatura. Con ello se evita el excesivo calentamiento en las herramientas como consecuencia de la temperatura elevada de la palanquilla (995 a1300ºC). Además se requiere altas velocidades para minimizar el contacto entre la palanquilla y las herramientas.

Los productos incluyen secciones estructurales (generalmente requeridas en cantidades pequeñas) y tubos con pequeños huecos. Por razones económicas formas estructurales de aceros,

especialmente las que se requieren en grandes cantidades son conformadas por proceso de rolado.

1.5. DEFECTOS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Debido a la deformación heterogénea en la extrusión directa, el centro de la palanquilla se mueve más rápidamente que la periferia y el resultado es la aparición de una zona muerta que se extiende a lo largo de la superficie externa.

Después de que se han extruido dos tercios aproximadamente de la palanquilla, el metal externo de la superficie se desplaza hacia el centro y fluye a través de la matriz en las proximidades del eje de la barra. Como la superficie de la palanquilla suele estar cubierto de una película de óxido, el tipo indicado de flujo origina óxidos internos en la dirección de la extrusión. Este defecto puede considerarse como análogo a un rechupe interno y se denomina defecto de extrusión. En la sección transversal del producto extruido aparecerá como un anillo de óxido.

La tendencia del defecto de extrusión aumenta por fricción con las paredes del cuerpo. Si la palanquilla caliente se coloca en un cuerpo

de extrusión frío, se puede endurecer la capa superficial y aumentar la resistencia del flujo. Con ello es mayor la tendencia del centro de la palanquilla a extruír antes que la capa superficial e incrementa la posibilidad de formación del defecto de extrusión.

Una forma de evitar el defecto de extrusión es realizar esta solamente hasta el momento en que el óxido de la superficie comienza a entrar en la matriz, y entonces desechar el resto de la palanquilla. Este procedimiento sin embargo tiene serios inconvenientes económicos, por que el defecto de extrusión puede aparecer cuando aún queda en el cuerpo el 30% de la palanquilla.

Otro procedimiento empleado con frecuencia en la extrusión de latón, consiste en emplear un embolo de diámetro ligeramente inferior al del cuerpo. Cuando el vástago empuja el embolo hacia delante y deja la superficie oxidada dentro del cuerpo del contenedor.

Una solución parecida que se emplea para el níquel y las aleaciones de alta temperatura, es mecanizar la superficie de la palanquilla antes de introducirla en el cuerpo de extrusión. Para que este procedimiento tenga éxito es necesario evitar que la palanquilla mecanizada se oxide al calentarla a la temperatura de extrusión.

En la extrusión indirecta, por la forma del flujo, la superficie oxidada de la palanquilla se acumula en la superficie del producto extruido, produciendo lo que suele llamarse un rechupe externo; este defecto se puede eliminar empleando un embolo de diámetro ligeramente más pequeño que el interno del cuerpo a fin de que corte circularmente la capa oxidada y la del eje dentro del cuerpo de extrusión.

Cuando se continúa con la extrusión hasta que queda adentro del cuerpo de extrusión una longitud de palanquilla aproximadamente igual a la cuarta parte de su diámetro, el flujo radial hacia la matriz origina un orificio interno, o embudo, en el extremo posterior del producto extruido. Este orificio puede extenderse hasta alguna distancia del extremo posterior del producto extruido y es necesario despuntar este y desechar el metal afectado. La longitud de este defecto puede aminorarse considerablemente si la cara de la herramienta que empuja al metal forma cierto ángulo respecto al eje del vástago.

Se puede producir agrietamiento superficial por extruír a una elevada velocidad o a excesiva temperatura.

La deformación no uniforme que se produce en la extrusión da lugar a una considerable variación de la estructura y las propiedades desde el extremo frontal al posterior, en la dirección longitudinal del producto extruido, y desde la superficie al centro en la sección transversal.

La fuerte deformación de cizalladura de las capas superficiales del producto extruido hace que estas capas estén mucho mas deformadas que en el centro. Si se calienta el producto extruido, después que este abandona la prensa, las capas superficiales y el centro responden de manera diferente. Cuando se produce recristalización, el tamaño de grano de las capas superficiales será mayor.

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO Y CÁLCULO DE LA MATRIZ DE EXTRUSIÓN

El éxito de cualquier diseño depende en mucho de la validez y de lo apropiado de los modelos de ingeniería que se utilicen para prever y analizar su comportamiento, antes de elaborar cualquier herramienta. La creación de un modelo de ingeniería útil para un diseño es probable la parte más difícil y la mas desafiante de todo el proceso. Su éxito depende principalmente de la experiencia así como la habilidad. Es de máxima importancia una comprensión completa de los principios y los fundamentos de la ingeniería.

Con la información del herramental, prensa de tracción y espacio físico disponible para el diseño de la matriz, a continuación se presenta el diseño en base a la forma de la matriz reconociendo sus partes principales, figura 2.1:

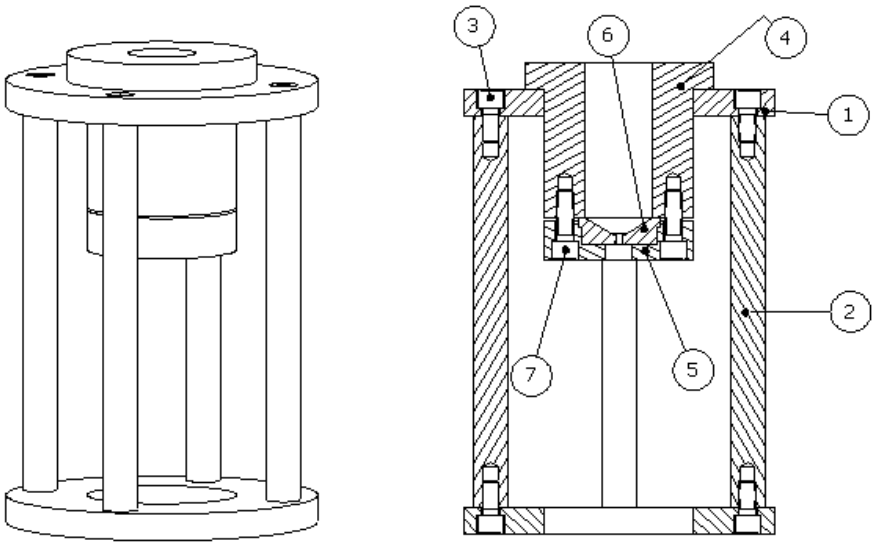


FIGURA 2.1. DISEÑO BASE DE MATRIZ

TABLA 3

PARTES DE MATRIZ

DESCRIPCIÓN DE PARTES Y MATERIALES		
Número	**Descripción**	**Material**
1	Placa base	ASTM A36
2	Soporte	SAE 1045
3	Perno ½”x1” Gr 5	Acero al medio carbono
4	Cilindro	SAE 705
5	Porta dado	SAE 1045
6	Dado	SAE 705
7	Perno ½”x1-1/2” Gr 5	Acero al medio carbono

2.1. CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE EXTRUSIÓN

La fuerza necesaria para extruír el material viene dado por la ecuación:

$$F = \sigma_0 A_0 Ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

El valor de σ_0 es el límite elástico del material a ser extruido en las condiciones de temperatura y velocidad de deformación empleadas en la extrusión. Sin embargo esta ecuación nos permite calcular un valor aproximado de la fuerza requerida. Puesto que no se tiene certeza de cuanto es la disminución de σ_0 con el incremento de la temperatura, y considerando que la fuerza aumenta por otros factores como el flujo no homogéneo del material, la fricción existente de la palanquilla con la matriz y el contenedor, se va a considerar el valor de σ_0 a la temperatura ambiente.

Se van a producir barras de diámetro 8,10 y 12 mm. La fuerza necesaria para extruír se calcula considerando la máxima relación de extrusión.

σ_{Pb} = 8.96 MPa

$A_0 = Area\ \ inicial$

$$A_f = Area\ final$$

$$A_0 = \pi x r^2 = \pi x (0.025m)^2$$

$$A_0 = 1.97 x 10^{-3} m^2$$

$$A_f = \pi x r^2 = \pi x (0.004m)^2$$

$$A_f = 5.027 x 10^{-5} m^2$$

Donde la fuerza necesaria para extruír el material es:

$$F = \sigma_{Pb}\ x\ A_0 Ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

$$F = 8.96\ x\ 1.97\ x 10^{-3}\ x\ Ln\left(\frac{1.97\ x 10^{-3}}{5.027\ x 10^{-5}}\right) Mpa\ \ m^2$$

$$F = 64752N$$

En la prensa se utilizará una válvula de alivio con el fin de regular la presión de la bomba si se regula la válvula de alivio a 45 MPa, se tendrá la fuerza máxima en el vástago de Ø 50mm.

P_b: Presión de trabajo de la bomba

A_0: Área del Cilindro

$F_1 = P_b\ x\ A$, donde

$$A_0 = \pi x (0.025m)^2$$

$$A_0 = 1.97 x 10^{3} m^2$$

$$F_1 = 45\ MPa\ x\ 1.97 x 10^{-3}\ m^2$$

$$F_1 = 88650\ N$$

Puesto que esta fuerza es mayor que la requerida F1> F, el material si va ser extruido.

2.2. CÁLCULO DEL CILINDRO

Para el cálculo del contenedor se va a utilizar un cilindro, debido a que se desarrollan esfuerzos radiales y tangenciales con magnitudes que dependen del radio del elemento a consideración. Al determinar el esfuerzo radial σ_r y el esfuerzo tangencial σ_t, se supone que la elongación longitudinal es constante alrededor de la circunferencia del cilindro. En otras palabras, una sección recta (plana) del cilindro permanece plana después de ser sometido a un esfuerzo.

Para el caso los esfuerzos serán calculados con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2 - P_0 \cdot r_0^2 - \frac{r_i^2 \cdot r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2}}{r_0^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_r = \frac{P_i \cdot r_i^2 - P_0 \cdot r_0^2 + \frac{r_i^2 \cdot r_o^2 (P_o - P_i)}{r^2}}{r_0^2 - r_i^2}$$

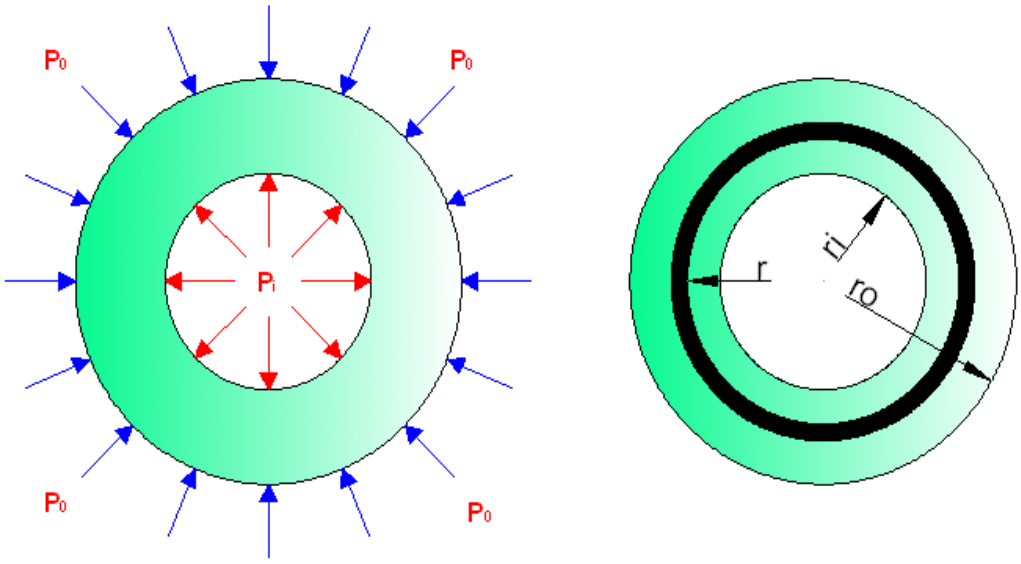


FIGURA 2.2. CILINDRO SOMETIDO A PRESIONES INTERNAS Y EXTERNAS

Con referencia a la figura 2.2, el radio interior r_i de 25mm, el radio exterior r_o de 55mm, la presión interna p_i de 45Mpa y la presión exterior p_o la cual para el caso será de 0, entonces las magnitudes de los esfuerzos tangencial y radial se simplifican por las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_t = \frac{P_i \cdot r_i^2}{r_0^2 - r_i^2}(1 + \frac{r_o^2}{r^2})$$

$$\sigma_r = \frac{P_i \cdot r_i^2}{r_0^2 - r_i^2}(1 - \frac{r_o^2}{r^2})$$

$$\sigma_l = \frac{P_i \cdot r_i^2}{r_0^2 - r_i^2}$$

El material del cilindro a comprobar es de acero AISI-4340 con un esfuerzo a la fluencia S_y *de 710 Mpa*, el esfuerzo a la tracción S_{ut} *de 1110 Mpa*.

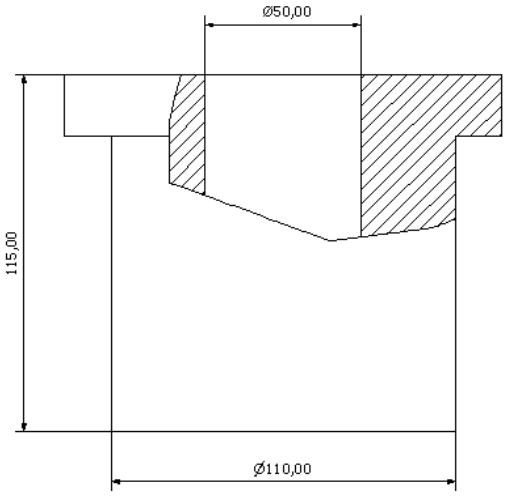


FIGURA 2.3. CILINDRO DE PRUEBA

Como el cilindro va a estar sometido a presión interna, la distribución de los esfuerzos tangencial y radial en el espesor de la pared, ambos serán máximos en la superficie interior. El esfuerzo

tangencial (de anillo) es la tensión y el esfuerzo radiales a compresión.

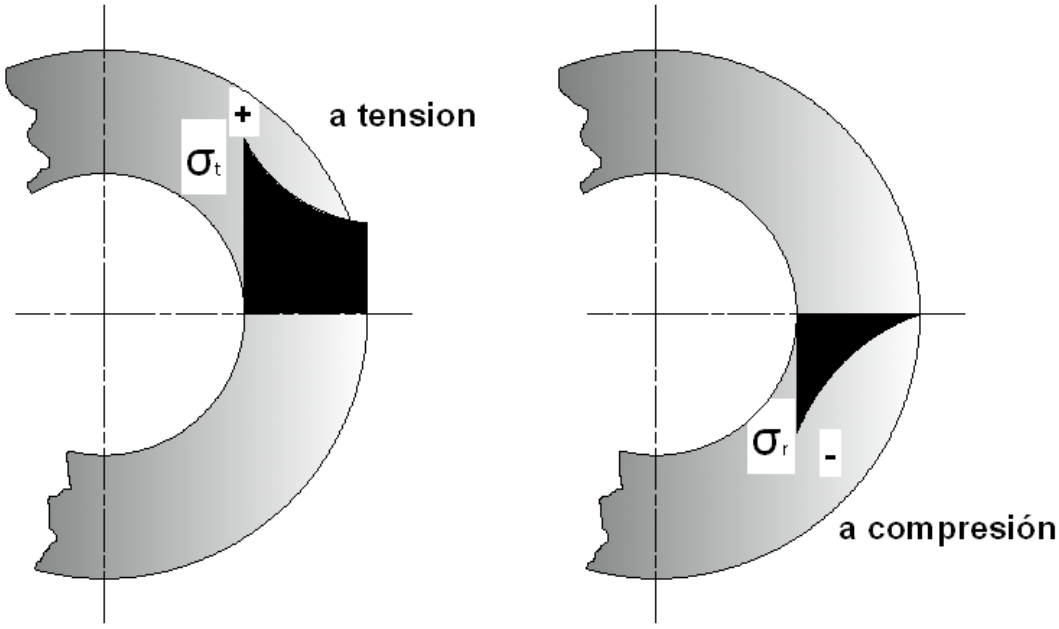


FIGURA 2.4. DISTRIBUCIONES DE ESFUERZOS TANGENCIALES Y RADIALES EN LA PARED DE UN CILINDRO CON PRESIÓN INTERNA

Por lo el punto más crítico es en $r=r_i$, por lo que se deduce que el esfuerzo tangencial va hacer el más crítico, entonces:

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 P_i}{r_0^2 - r_i^2}\left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_t = \frac{0.025^2 \text{ x } 45}{0.055^2 - 0.025^2}\left(1 + \frac{0.055^2}{0.025^2}\right)\frac{m^2 \text{ Mpa}}{m^2}$$

$$\sigma_t = 68.45 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 P_i}{r_0^2 - r_i^2}\left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right)$$

$$\sigma_r = \frac{0.025^2 \text{ x } 45}{0.055^2 - 0.025^2}\left(1 - \frac{0.055^2}{0.025^2}\right)\frac{m^2 \text{ Mpa}}{m^2}$$

$$\sigma_r = -45 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_l = \frac{r_i^2 P_i}{r_0^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_l = \frac{0.025^2 \text{ x } 45}{0.055^2 - 0.025^2}\frac{m^2 \text{ Mpa}}{m^2}$$

$$\sigma_l = 11.72 \text{ Mpa}$$

La AISC designa a las resistencias mínimas especificadas reducidas por factores de multiplicación, que varían entre 40 y 90% para garantizar la seguridad, como el esfuerzo normal permisible σ_{perm}, entonces se tiene la relación entre los esfuerzos permisibles y las resistencias mínimas especificadas mediante el código AISC y se especifican como:

TABLA 4

CÓDIGO AISC

TENSIÓN	$0.45\ S_y \leq \sigma_{perm} \leq 0.60\ S_y$
CORTANTE	$T_{perm} = 0.4\ S_y$
FLEXIÓN	$0.60\ Sy \leq \sigma_{perm} \leq 0.75\ Sy$
APLASTAMIENTO	$\sigma_{perm} = 0.90\ Sy$

En el caso del análisis del cilindro, éste se encuentra sometido a flexión por lo tanto el esfuerzo permisible del material del cilindro será:

$$\sigma_{\text{perm}} = 0.60\ S_y$$

$$\sigma_{\text{perm}} = 0.60\ (710)\text{Mpa}$$

$$\sigma_{\text{perm}} = 426\ \text{Mpa}$$

Se determina el factor de seguridad, con base en la teoría de la energía de distorsión, ya que existen tres esfuerzos principales, se va a calcular el esfuerzo efectivo σ' de Von Mises. El esfuerzo efectivo de von Mises para el caso tridimensional se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}$$

Donde los esfuerzos cortantes **T** son 0, por lo tanto:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2}}$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(68.45 - (-45))^2 + ((-45) - 11.72)^2 + (11.72 - 68.45)^2}{2}}$$

$$\sigma' = 98.25 \text{ Mpa}$$

El factor de seguridad está dado por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma'}$$

$$N = \frac{426}{98.25} \frac{\text{Mpa}}{\text{Mpa}}$$

$$N = 4.34$$

Para la comprobación de los resultados se utilizará el programa de elementos finitos *SolidWorks*© que se basa en la generación de mallas para elementos finitos con tecnología Dual Domain permitiendo que modelos sólidos de CAD en 3D sean analizados directamente, eliminando el tiempo utilizado en el paso de la

creación de un modelo tradicional de análisis de fibra neutra (midplane). Esta tecnología puede ahorrar horas, días y semanas de preparación del modelo y permite el análisis de todas las partes que forman el diseño.

Se analiza si las dimensiones son las adecuadas para las condiciones de trabajo. Mediante el software de diseño *SolidWorks*©, se observa el elemento en estados de esfuerzos, deformaciones y factor de diseño (factor de seguridad), en este caso el tipo de análisis será estático por las condiciones de trabajo de la matriz.

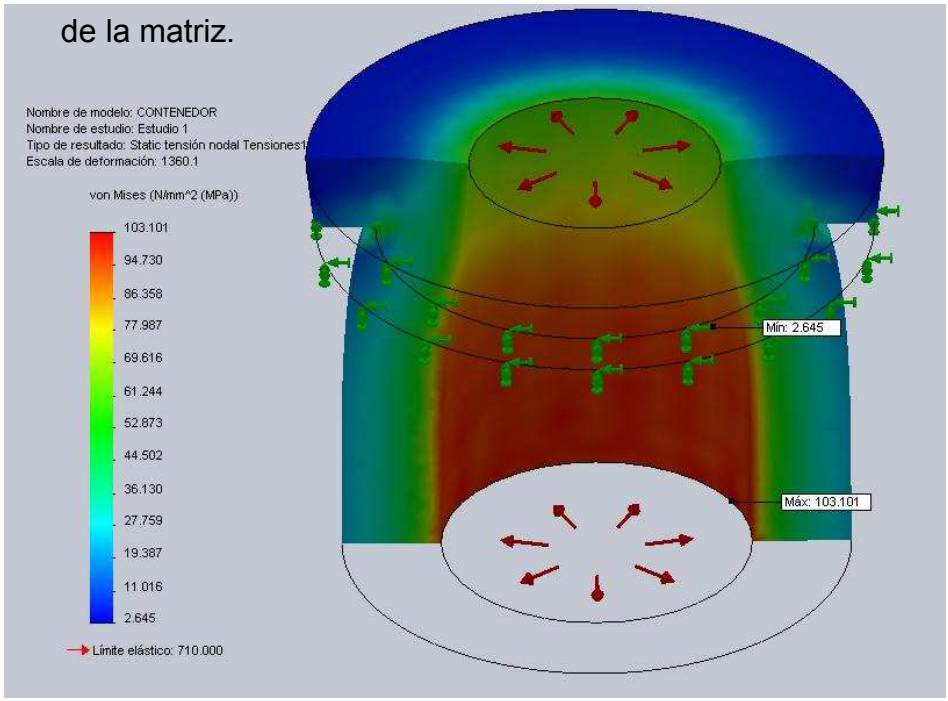


FIGURA 2.5. ESTADO DE ESFUERZO DEL CILINDRO

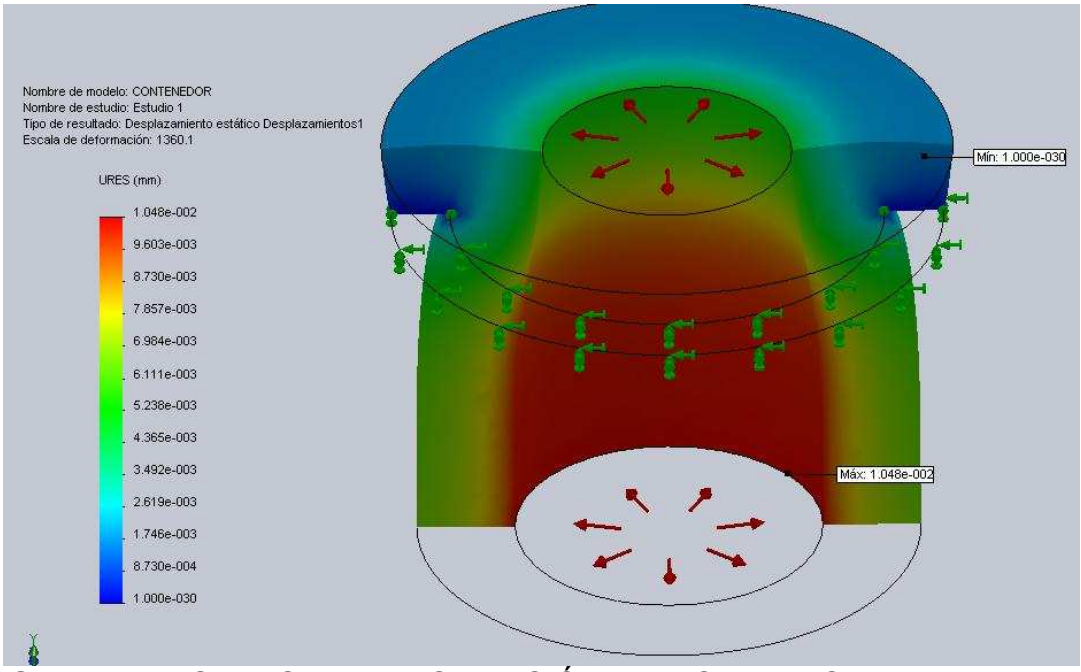


FIGURA 2.6. ESTADO DE DEFORMACIÓN DEL CILINDRO

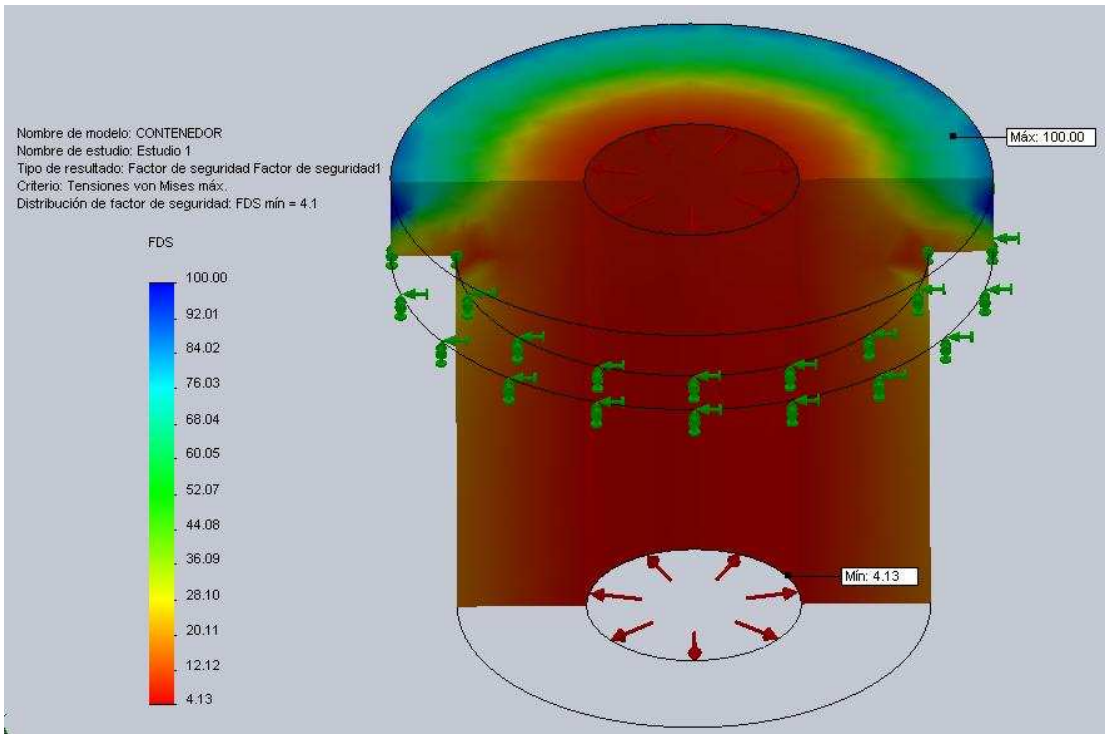


FIGURA 2.7. DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DEL CILINDRO

De acuerdo a los datos obtenidos, se determina que para la presión de la prensa de tracción, el esfuerzo provocado en el cilindro es menor que el límite de fluencia del material, la deformación sufrida es pequeña para concluir un fallo en el material teniendo un factor de diseño de 4.13

Por tanto, las dimensiones del cilindro soporta las cargas de trabajo sin deformaciones considerables y dando factores de seguridad muy confiables.

2.3. CÁLCULO DEL CONTENEDOR

Ahora se realizará el estudio del ensamblaje del contenedor, aplicando las cargas de trabajo al que estará sometido.

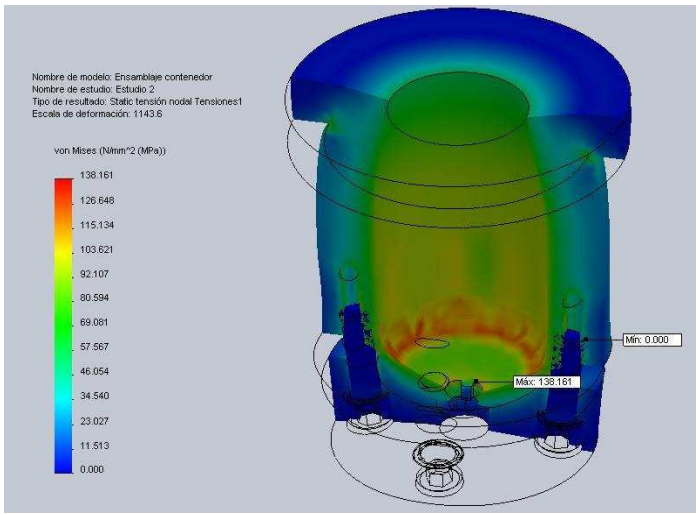


FIGURA 2.8. ESTADO DE ESFUERZO DEL ENSAMBLAJE DEL CONTENEDOR

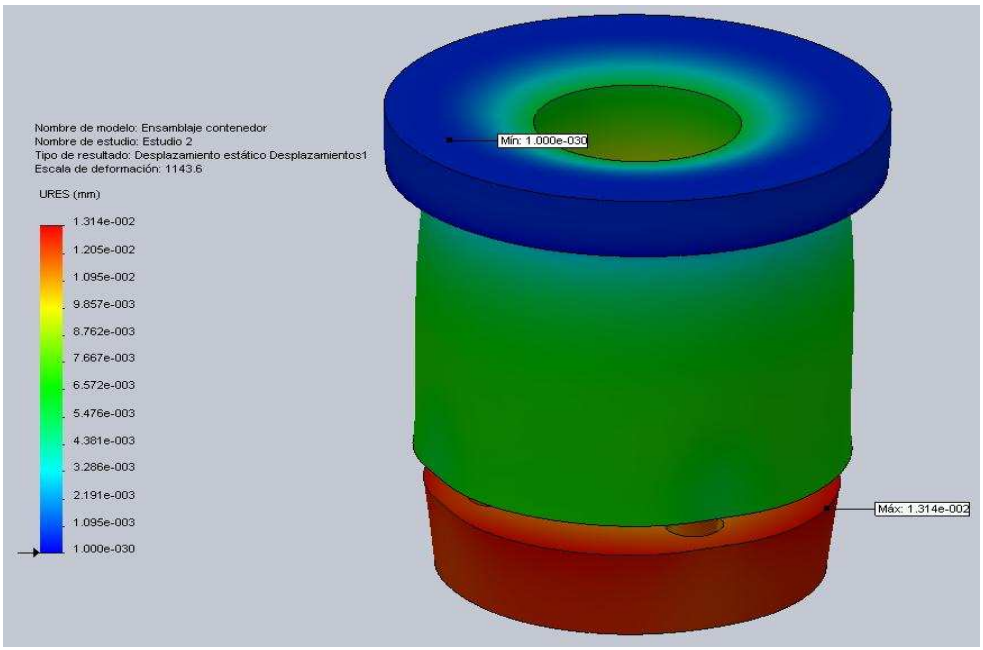


FIGURA 2.9. ESTADO DE DEFORMACIÓN DEL ENSAMBLAJE DEL CONTENEDOR

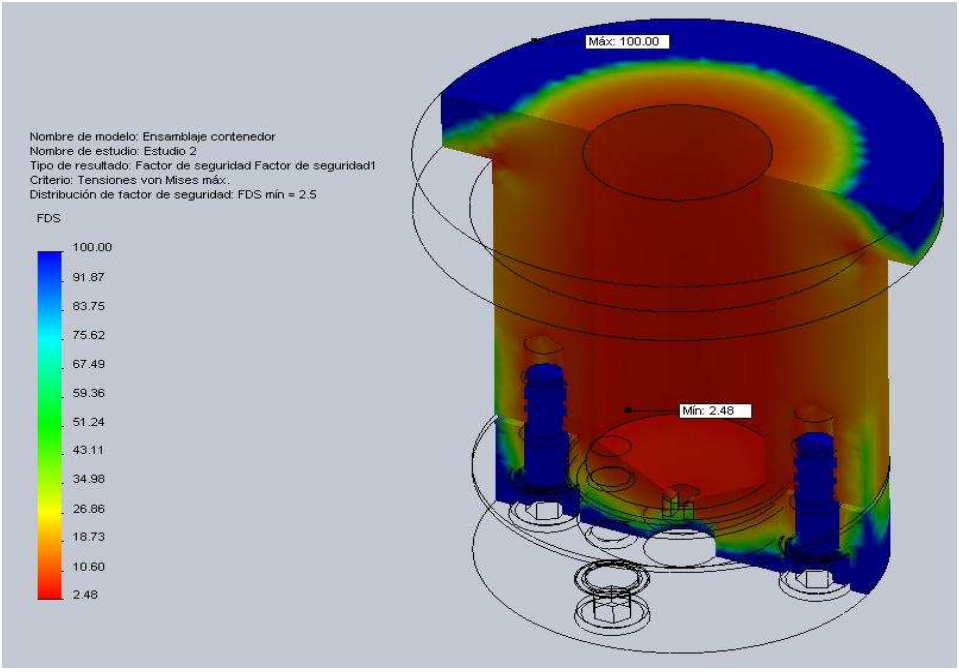


FIGURA 2.10. DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DEL ENSAMBLAJE DEL CONTENEDOR

Los resultados de la simulación muestran que el esfuerzo producido por la presión ejercida por la prensa de tracción, es menor al límite

de fluencia de los materiales provocando una deformación despreciable, como se observa en la escala a colores. Así mismo, el factor de diseño mínimo es 2.48

En consecuencia, se concluye que las dimensiones del contenedor, como se muestra en el Plano 002, hacen que el contenedor trabaje correctamente bajo las condiciones dadas.

2.4. CÁLCULO DEL PERNO DEL CONTENEDOR

Las tuercas y los tornillos de un diseño podrían parecer uno de los aspectos de menor interés, pero de verdad es uno de los más fascinantes. El éxito o fracaso de un diseño tal vez dependa de la selección adecuada y el empleo de sujetadores. Y lo que es más, el diseño y fabricación de sujetadores es un negocio importante, y es una parte fundamental de nuestra economía.

Una de las aplicaciones principales de los pernos es sujetar las piezas juntas en situaciones donde las cargas aplicadas colocan los pernos a tensión, según se aprecia en la figura 2.11.

Para el cálculo del perno, se sabe que esté sujeta a los cilindros que forman el contenedor.

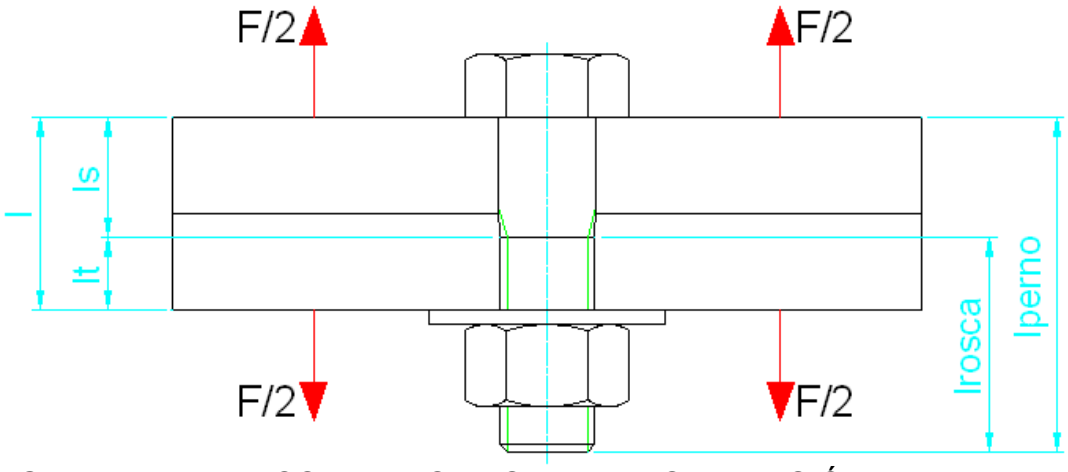


FIGURA 2.11. CONJUNTO ATORNILLADO A TENSIÓN

Se desea examinar las cargas, de flexiones y esfuerzos del perno. Para un perno redondo, de diámetro d y de longitud de rosca axialmente cargada l dentro de su zona sujeta de longitud L, según se muestra en la figura 2.11, la constante de resorte es:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{l_t}{A_t E_b} + \frac{l_s}{A_b E_b}$$

Como el perno está formando una junta, la constante del material k_m será:

$$k_m = dEAe^{b(\frac{d}{l})}$$

El factor de rigidez de la unión C es:

$$C = \frac{k_b}{k_m + k_b}$$

TABLA 5

DIMENSIONES PRINCIPALES DE LAS ROSCAS DE TORNILLO UNIFIED NATIONAL STANDARD

		Roscas bastas—UNC			Roscas finas—UNF		
Tamaño	Diámetro mayor d (in o pulg)	Hilos por pulgada	Diámetro menor d_r (in)	Área de esfuerzo a tensión A_t (in^2)	Hilos por pulgada	Diámetro menor d_r (in)	Área de esfuerzo a tensión A_t (in^2)
0	0.0600	–	–	–	80	0.0438	0.0018
1	0.0730	64	0.0527	0.0026	72	0.0550	0.0028
2	0.0860	56	0.0628	0.0037	64	0.0657	0.0039
3	0.0990	48	0.0719	0.0049	56	0.0758	0.0052
4	0.1120	40	0.0795	0.0060	48	0.0849	0.0066
5	0.1250	40	0.0925	0.0080	44	0.0955	0.0083
6	0.1380	32	0.0974	0.0091	40	0.1055	0.0101
8	0.1640	32	0.1234	0.0140	36	0.1279	0.0147
10	0.1900	24	0.1359	0.0175	32	0.1494	0.0200
12	0.2160	24	0.1619	0.0242	28	0.1696	0.0258
1/4	0.2500	20	0.1850	0.0318	28	0.2036	0.0364
5/16	0.3125	18	0.2403	0.0524	24	0.2584	0.0581
3/8	0.3750	16	0.2938	0.0775	24	0.3209	0.0878
7/16	0.4375	14	0.3447	0.1063	20	0.3725	0.1187
1/2	0.5000	13	0.4001	0.1419	20	0.4350	0.1600
9/16	0.5625	12	0.4542	0.1819	18	0.4903	0.2030
5/8	0.6250	11	0.5069	0.2260	18	0.5528	0.2560
3/4	0.7500	10	0.6201	0.3345	16	0.6688	0.3730
7/8	0.8750	9	0.7307	0.4617	14	0.7822	0.5095
1	1.0000	8	0.8376	0.6057	12	0.8917	0.6630
1 1/8	1.1250	7	0.9394	0.7633	12	1.0167	0.8557
1 1/4	1.2500	7	1.0644	0.9691	12	1.1417	1.0729
1 3/8	1.3750	6	1.1585	1.1549	12	1.2667	1.3147
1 1/2	1.5000	6	1.2835	1.4053	12	1.3917	1.5810
1 3/4	1.7500	5	1.4902	1.8995			
2	2.0000	4.5	1.7113	2.4982			
2 1/4	2.2500	4.5	1.9613	3.2477			
2 1/2	2.5000	4	2.1752	3.9988			
2 3/4	2.7500	4	2.4252	4.9340			
3	3.0000	4	2.6752	5.9674			
3 1/4	3.2500	4	2.9252	7.0989			
3 1/2	3.5000	4	3.1752	8.3286			
3 3/4	3.7500	4	3.4252	9.6565			
4	4.0000	4	3.6752	11.0826			

Donde la fuerza del perno F_b se obtiene:

$$\mathrm{F_b} = \mathrm{C.F}$$

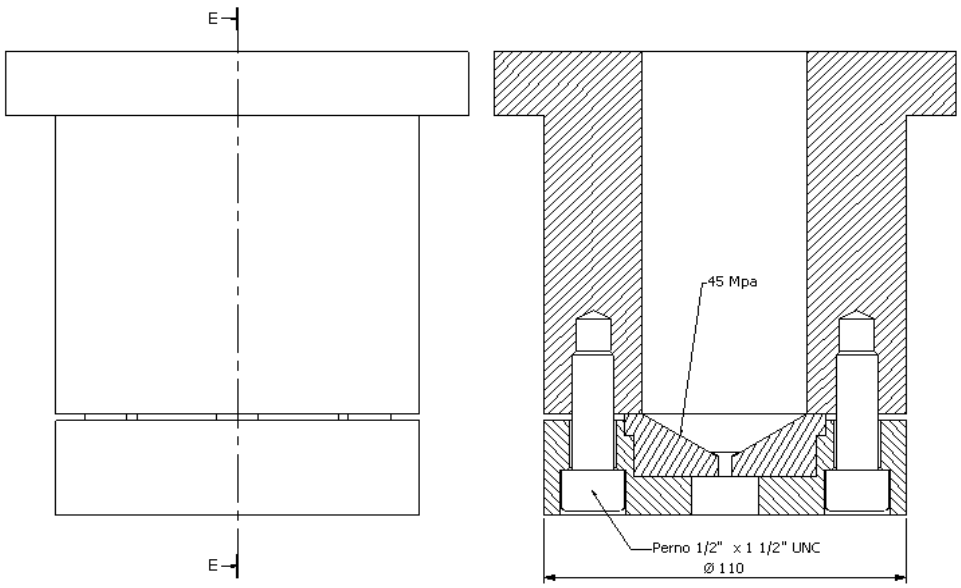


FIGURA 2.12. ENSAMBLE CONTENEDOR

Los datos que se tienen para el análisis del perno son los siguientes:

4 Pernos de ½" x 1-1/2" UNC Gr.5

Presión = 45 Mpa = 6527 psi

D_{int} 50mm = 2"

E = 207 Gpa = 30Mpsi

Las fuerzas en cada uno de los pernos se determinan a partir de la presión conocida y las dimensiones del cilindro, suponiendo que todos los pernos comparten equitativamente la carga.

La fuerza total en el porta dado es:

$$F_{total} = \quad PA = P\frac{D_{int}^2}{4} = 6527.\frac{\pi.(2)^2}{4} = 20505.18\ lb$$

Y la fuerza aplicada F sobre cada perno es

$$F = \frac{F_{total}}{N_{pernos}} = \frac{20505.18}{4} = 5126.3\ lb$$

Primero se encontrará la rigidez de un perno. Su área de esfuerzo a tensión se determina a partir de la tabla 5 como 0.1419 in^2. La longitud de sujeción se da como 1-1/2". Las longitudes de las roscas y del vástago del perno serán por lo tanto

TABLA 6

ESPECIFICACIONES Y RESISTENCIAS SAE PARA PERNOS DE ACERO

Número de grado SAE	Rango de dimensión del diámetro exterior (in)	Resistencia de prueba mínima (kpsi)	Límite de fluencia elástico mínimo (kpsi)	Resistencia mínima a tensión (kpsi)	Material
1	0.25-1.5	33	36	60	bajo o medio carbono
2	0.25-0.75	55	57	74	bajo o medio carbono
2	0.875-1.5	33	36	60	bajo o medio carbono
4	0.25-1.5	65	100	115	medio carbono, estirado en frío
5	0.25-1.0	85	92	120	medio carbono, T y R*
5	1.125-1.5	74	81	105	medio carbono, T y R
5.2	0.25-1.0	85	92	120	martensita de bajo carbono, T y R
7	0.25-1.5	105	115	133	aleación de bajo carbono, T y R
8	0.25-1.5	120	130	150	aleación de medio carbono, T y R
8.2	0.25-1.0	120	130	150	martensita de bajo carbono, T y R

* Templado y revenido.

$$l = 1.5"$$

$$l_{rosca} = 2d + 6.35 = 2(0.5) + 0.25 = 1.25"$$

$$l_s = l - l_{rosca}$$

$$l_s = 1.5 - 1.25 = 0.25"$$

A partir del cual se puede encontrar la longitud de rosca l_t que está en la zona de sujeción:

$$l_t = l - l_s = 1.5 - 0.25 = 1.25"$$

Se determina la rigidez del perno a partir de la ecuación:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{l_t}{A_t E_b} + \frac{l_s}{A_b E_b} = \frac{1.25}{(0.1419).30E6} + \frac{0.25(4)}{\pi(0.5^2).30E6}$$

$$\frac{1}{k_b} = 3.36E-7\ \frac{in}{lb}$$

$$k_b = 2.976E6\ \frac{lb}{in}$$

Una junta confinada permite que las superficies metálicas estén en contacto igual que si no existiera junta, por lo que el análisis de la

rigidez del material por alto la junta confinada. La rigidez del material en las zonas del perno se puede calcular con los factores de la tabla 7 aplicados en la ecuación.

TABLA 7

PARÁMETROS DE RIGIDEZ PARA LA ECUACIÓN $\boldsymbol{k_m}$

Material	E (GPa)	ν	A	b
Acero	206.8	0.291	0.78715	0.62873
Aluminio	71.0	0.334	0.79670	0.63816
Cobre	118.6	0.326	0.79568	0.63553
Fundición de hierro gris	100.0	0.211	0.77871	0.61616

$$k_m = dEAe^{b(\frac{d}{l})}$$

A=0.78715 b=0.62873

$$k_m = 0.5(30E6)0.78715e^{0.62873(\frac{0.5}{1.5})}$$

$$k_m = 1.456E7\ \frac{lb}{in}$$

El factor de rigidez de la unión para el diseño es:

$$C = \frac{k_b}{k_m + k_b} = \frac{2.976E6}{1.456E7 + 2.976E6}$$

$$C = 0.1697$$

$$P_b = CF = 0.1697x5126.3 = 870\ lb$$

Para encontrar la carga resultante en el perno una vez aplicada la carga F

$$F_b = P_b + F$$

$$F_b = 870 + 5126.3 = 5996.3\ lb$$

El esfuerzo máximo a tensión en el perno es:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_t} = \frac{5996.3}{0.1419} = 42258\ \frac{lb}{in}$$

Como el caso se trata de una situación de esfuerzo uniaxial, por lo que el esfuerzo principal y el esfuerzo Von Mises son idénticos al esfuerzo a tensión aplicado. El factor de seguridad a la fluencia será por lo tanto

$$N_y = \frac{S_y}{\sigma_b} = \frac{85000}{42258} = 2.01$$

Los resultados de los cálculos muestran que el esfuerzo producido por la presión ejercida por la prensa de tracción, es menor al límite

de fluencia del material provocando una deformación despreciable. Así mismo, el factor de diseño mínimo es 2.01

En consecuencia, se concluye que las dimensiones del perno seleccionado, hacen que el contenedor trabaje correctamente bajo las condiciones dadas.

2.5. CÁLCULO DE LAS COLUMNAS

Cuando se invierte la dirección de la carga axial para colocar al miembro en compresión, sola pudiera no ser suficiente para determinar cuál es la carga segura para este miembro. Se trata ahora de una columna, y puede fallar por pandeo más que por compresión. El pandeo ocurre súbitamente, incluso en materiales dúctiles y como tal es uno de los modos de falla más peligrosos.

Una columna corta fallará a compresión y puede calcularse su esfuerzo a compresión. Cuando la carga axial aplicada exceda algún valor crítico, una columna intermedia o una larga fallará por pandeo. En el momento del pandeo, el esfuerzo a compresión puede aun estar muy por debajo del límite de fluencia del material.

El factor que determina si una columna es corta o larga es su razón de esbeltez S_r.

$$S_r = \frac{l}{k}$$

Donde l es la longitud de columna y k es su radio de giro. El radio de giro se define como

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Donde I es el más pequeño momento de inercia o sea el segundo momento de la sección transversal de la columna, y A es su área en la mima sección transversal.

Por lo general, una columna corta, se define como aquella cuya razón de esbeltez es ligeramente menor a 10. En este caso se aplicara el límite elástico del material a compresión como factor limite, a fin de compararlo con el esfuerzo de compresión, donde D=25mm.

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\pi D^4}{64} X \frac{1}{\frac{\pi D^2}{4}}} = \sqrt{\frac{D^2}{16}} = \sqrt{\frac{0.025^2}{16}}$$

$$k = 0.0063\, m$$

El análisis teórico supone que la carga está perfectamente centrada sobre el eje de la columna. Esta condición pocas veces se cumple en la práctica. Cualquier excentricidad en la carga generará un momento, creando deflexiones mayores a lo que este modelo pudiera indicar.

Por estas razones, para l_{eff} el AISC (American Institute of Steel Construction, en su Manual of Steel Construction) propone valores más elevados en comparación con los teóricos, y algunos diseñadores hasta manejan valores aun más conservadores.

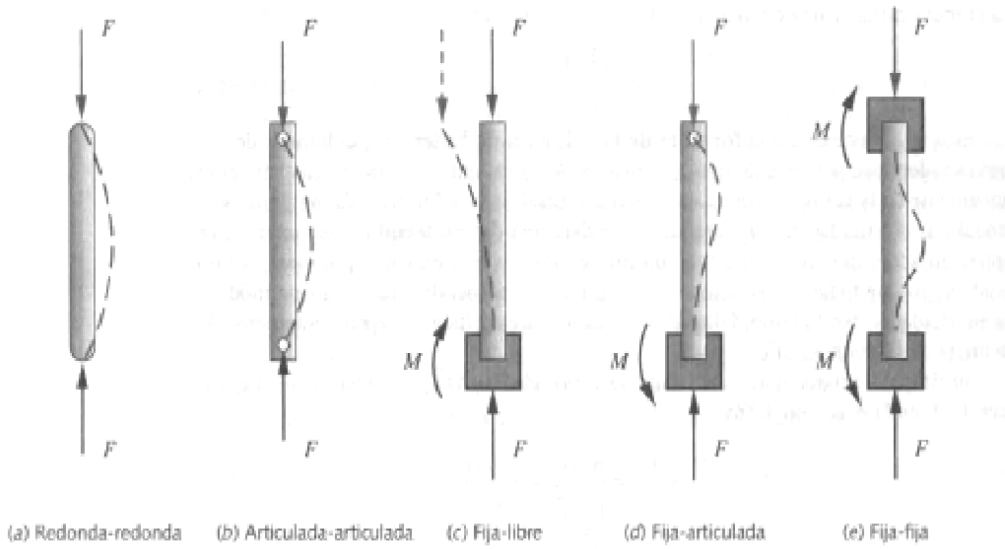


FIGURA 2.13. DIVERSAS CONDICIONES TERMINALES DE COLUMNA, Y SUS CURVAS DE DEFLEXIÓN RESULTANTES

$$S_r = \frac{l_{eff}}{k}$$

TABLA 8

FACTORES DE LONGITUD EFECTIVA, SEGÚN LA CONDICIÓN TERMINAL DE LA COLUMNA

Condiciones terminales	Valor teórico	Recomendado por AISC*	Valor conservador
Redonda-redonda	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$
Articulada-articulada	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$	$l_{eff} = l$
Fija-libre	$l_{eff} = 2l$	$l_{eff} = 2.1l$	$l_{eff} = 2.4l$
Fija-articulada	$l_{eff} = 0.707l$	$l_{eff} = 0.80l$	$l_{eff} = l$
Fija-fija	$l_{eff} = 0.5l$	$l_{eff} = 0.65l$	$l_{eff} = l$

En el caso de la columna de la investigación, esta se encuentra con una condición de los extremos fija-fija, por lo tanto

$$S_r = \frac{0.65l}{k} = \frac{0.65(0.295)}{0.0063}$$

$$S_r = 30.44$$

El punto D normalmente se toma en la intersección de la curva de Euler y en la línea horizontal en $S_{yc}/2$. El valor de $(S_r)_D$ correspondiente a este punto se puede determinar a partir de la ecuación, también conocida como carga unitaria crítica.

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{S_y}{2} = \frac{\pi^2 E}{{S_r}^2}$$

Despejando da como resultado

$$(S_r)_D = \pi \sqrt{\frac{2E}{S_y}}$$

La ecuación de la parábola ajustada entre los puntos A y D es

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \frac{1}{E}\left(\frac{S_y S_r}{2\pi}\right)^2$$

El valor de S_r se lo comparará con el valor $(S_r)_D$ que corresponde al punto tangente entre las curvas Euler y Johnson. Se utilizara el valor recomendado por AISC (tabla 8) para una columna fija-fija.

$$(S_r)_D = \pi \sqrt{\frac{2E}{S_y}}$$

Donde el límite de fluencia S_y de la columna del caso es de 370Mpa

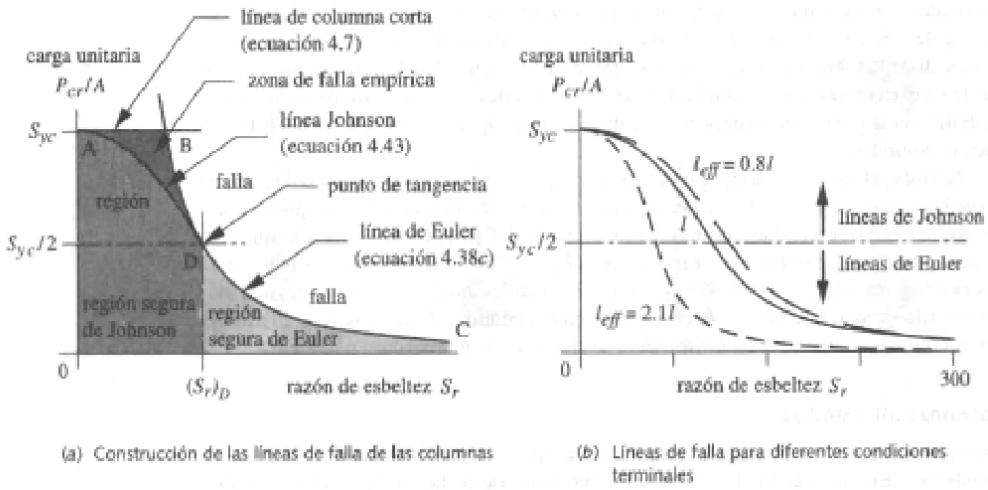


FIGURA 2.14. LÍNEAS DE FALLA DE COLUMNAS EULER, JOHNSON Y COLUMNAS CORTAS

$$(S_r)_D = \pi\sqrt{\frac{2E}{S_y}} = \pi\sqrt{\frac{2(207x10^9)}{370x10^6}}$$

$$(S_r)_D = 105.1$$

La razón de esbeltez de esta columna queda hacia la izquierda del punto tangente y, por lo tanto, en la región Johnson de la figura 26, por lo que se deberá emplear la ecuación adecuada, para determinar la carga crítica P_{cr} y aplicar el factor de seguridad con el fin de determinar la carga permisible P_{perm}.

$$P_{cr} = A\left[S_y - \frac{1}{E}\left(\frac{S_y S_r}{2\pi}\right)^2\right]$$

$$P_{cr} = \frac{\pi(0.025^2)}{4}\left[370x10^6 - \frac{1}{207x10^9}\left(\frac{370x10^6x30.44}{2\pi}\right)^2\right]$$

$$P_{cr} = 174004\ N$$

Comparando con la fuerza aplicada a cada columna

$$F = \sigma_x A = 11.25x10^6x4.91x10^{-4}$$

$$F = 5524\ N$$

$$N = \frac{P_{cr}}{F} = \frac{174004}{5524} = 19$$

Ahora se comprobará el análisis con el programa de elementos finitos *SolidWorks*©, donde se aplican las cargas de trabajo al que estarán sometidas columnas soportes.

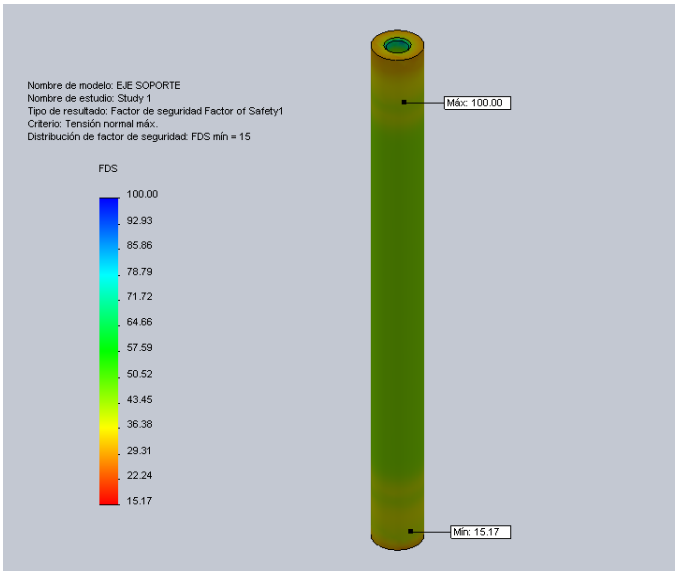


FIGURA 2.15. DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DE LA COLUMNA SOPORTE

Los resultados de la simulación muestran que el esfuerzo producido por la presión ejercida por la prensa de tracción, es menor al límite de fluencia de los materiales provocando una deformación despreciable. Así mismo, el factor de diseño mínimo es 15.17

En consecuencia, se concluye que las dimensiones de las columnas soportes, como se muestra en el Plano 003, hacen que el contenedor trabaje correctamente bajo las condiciones dadas.

2.6. CÁLCULO DE LA MATRIZ

Nuevamente se utiliza el software de diseño *SolidWorks*© para analizar las reacciones que se producen en la matriz totalmente armada, los esfuerzos, deformaciones y factor de diseño del elemento.

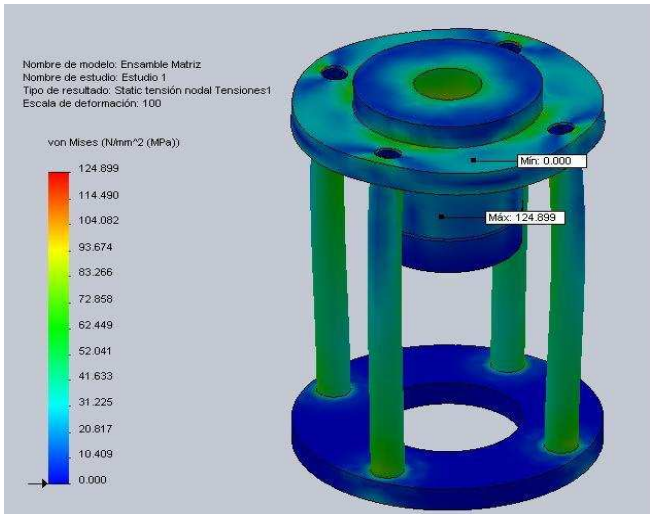


FIGURA 2.16. ESTADO DE ESFUERZO DEL ENSAMBLAJE DE LA MATRIZ

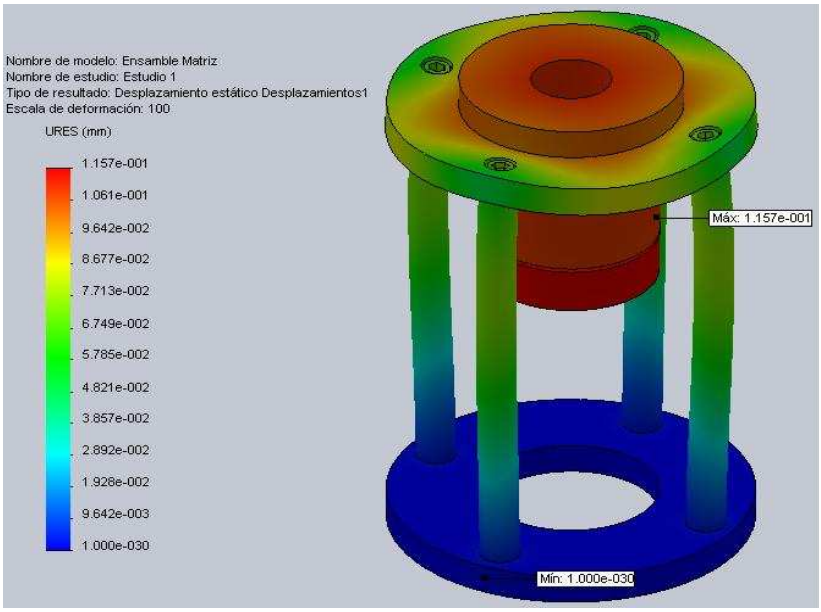


FIGURA 2.17. ESTADO DE DEFORMACIÓN DEL ENSAMBLAJE DE LA MATRIZ

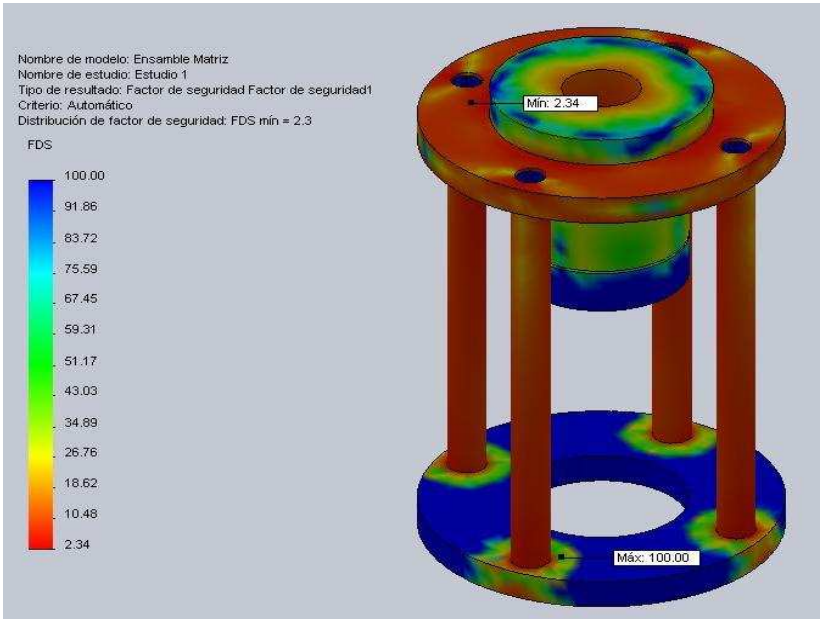


FIGURA 2.18. DISTRIBUCIÓN DEL FACTOR DE DISEÑO DEL ENSAMBLAJE DE LA MATRIZ

Los resultados de la simulación muestran que el esfuerzo producido por la presión ejercida por la prensa de tracción, es menor al límite de fluencia de los materiales provocando una deformación despreciable, como se observa en la escala a colores. Así mismo, el factor de diseño mínimo es 2.34

En consecuencia, se concluye que las dimensiones de la matriz, como se muestra en el Plano 001, hacen que la matriz trabaje correctamente bajo las condiciones dadas.

CAPÍTULO 3

3. TRABAJO EXPERIMENTAL

A fin de contar con un equipo apropiado para la experimentación de la extrusión fue necesario adaptar los equipos de laboratorio existentes. El resultado se encuentra en la foto Nº 3.1. Se adapto un castillo para acomodar la matriz de extrusión para tres relaciones de extrusión, la prensa se acopla a una computadora que posee el programa LAB VIEW, para que quede graficado la fuerza versus el tiempo y finalmente se usa el horno de laboratorio para la preparación de los lingotes para los ensayos.

3.1. EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Los equipos y materiales utilizados en las pruebas de extrusión son los siguientes:

- Prensa universal

- Horno
- Prototipo de matriz para extrusión
- Computadora
- Guantes
- Tenazas
- Palanquillas de plomo

3.2. METODOLOGÍA

La metodología para realizar las pruebas experimentales, es variando 3 parámetros fundamentales que intervienen en el proceso de extrusión:

- Relación de extrusión
- Temperatura
- Velocidad de extrusión.

En el esquema siguiente se observa la secuencia de la variación de parámetros para realizar las pruebas.

Para realizar las pruebas de extrusión, se ha diseñado 3 dados con diferentes perforaciones, para poder obtener diferentes relaciones de extrusión. Para cada relación de extrusión se ha variado la velocidad

y la temperatura de pre-calentamiento de la palanquilla, obteniendo 6 probetas.

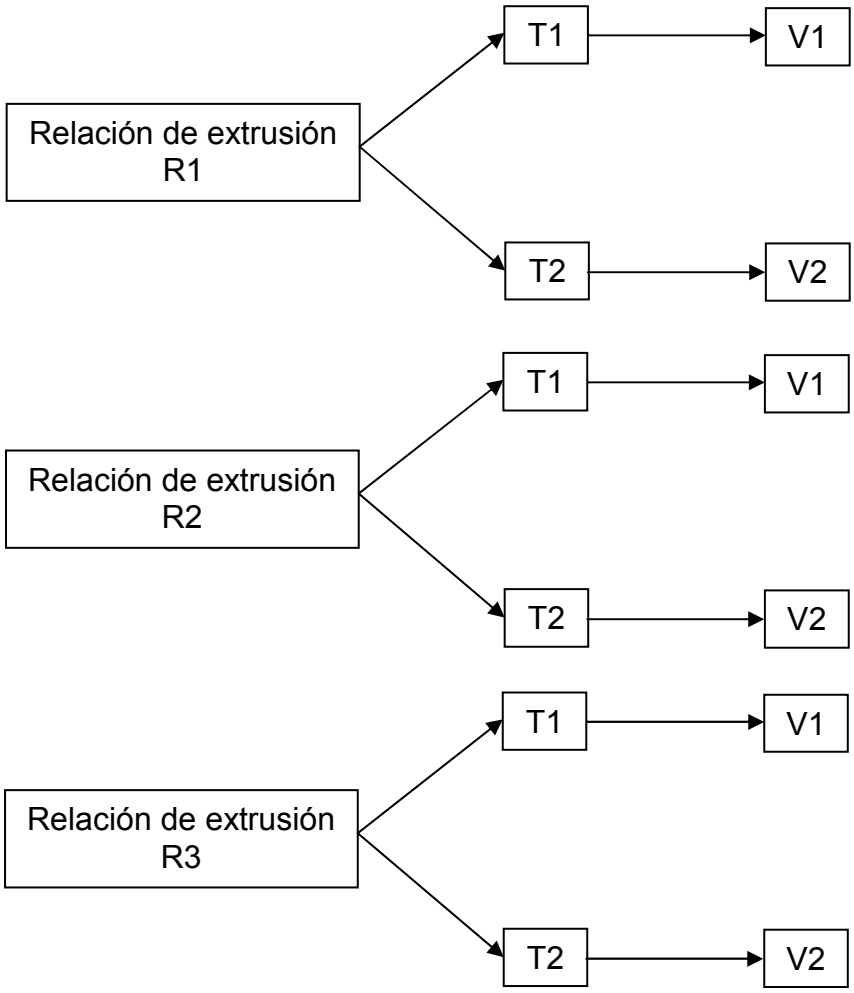


FIGURA 3.1. SECUENCIA DE LA VARIACIÓN DE PARÁMETROS PARA LAS PRUEBAS DE EXTRUSIÓN.

R1 =23.95 R2=35.30 R3=55.10

V1=1.1mm/seg T1=260

V2=2.0mm/seg T2=300

3.3. ADAPTACIÓN DE LA PRENSA UNIVERSAL.

La prensa universal es de marca VERSA TESTER UPDATEP con una capacidad máxima de 15000 Kg, que permite llevar a cabo ensayos mecánicos de tracción, compresión, impacto, dureza y adicionalmente registro de temperatura. Los resultados de estos ensayos son presentados y monitoreados en tiempo real mediante un ordenador.

El sistema está compuesto por un mecanismo que ejecutan el ensayo y generan una señal eléctrica que es recibida por la tarjeta de adquisición de datos, la cual comunica al ordenador a una frecuencia de mil datos por segundo (1Khz).

Para lograr la comunicación desde la tarjeta de adquisición de datos hacia el ordenador, deben estar instalados en el computador los siguientes componentes:

- Programa LabVIEW 8.2
- Librerías y toolkit
- Drivers de la tarjeta de adquisición de datos
- Programas VI para cada uno de los ensayos

FIGURA 3.2. PRENSA UNIVERSAL VERSA TESTER UPDATED

Para la calibración de de la prensa universal se utiliza la *Caja de Taraje*, que es un instrumento de calibración tanto para las pruebas a tracción como de las pruebas a compresión, esta Caja de Taraje puede soportar presiones de hasta 25000 Kgf.

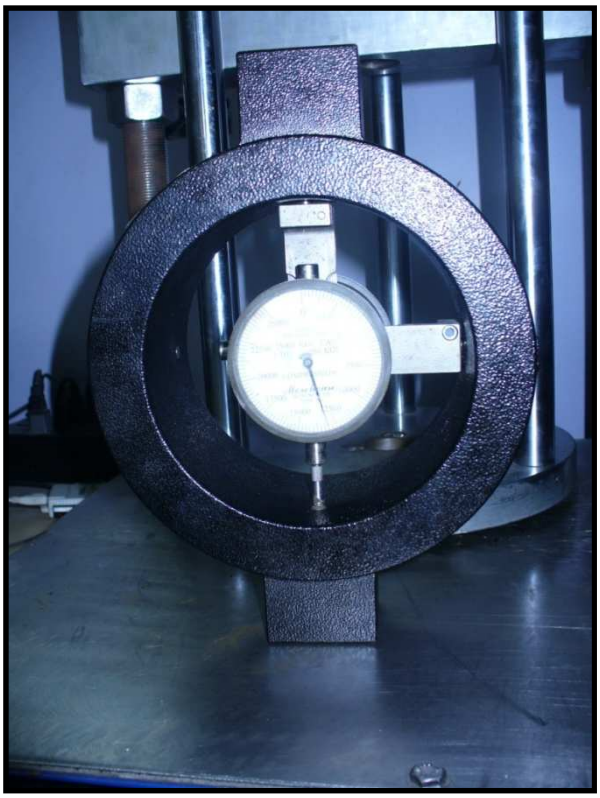


FIGURA 3.3. CAJA DE TARAJE DE 25000 KGF

A continuación se presenta el procedimiento para la calibración de la prensa universal:

1. Se coloca la caja de taraje en la zona de compresión de la Máquina Universal de Ensayos.
2. Se prepara la Máquina Universal de Ensayos en la escala a calibrar y se ajusta al cero de referencia.
3. Se alista el software con el programa LabVIEW 8.2 y también se lo pone en cero de referencia que fue de 1000 Kgf y se lo deja listo para tomar las lecturas.

4. Se aplica la carga de compresión, se observa cómo va elevándose progresivamente la presión.
5. Se para la carga hasta alcanzar que las lecturas se igualarán, tanto en la caja de taraje como en el software.
6. Se registra el valor de equilibrio que fue de 15000 Kgf.
7. Se registra la gráfica de calibración que se produjo en la computadora.
8. Se repite procedimiento para otras 2 probetas de calibración.

A continuación se muestra la secuencia fotográfica de la calibración de la prensa universal:

TABLA 9

SECUENCIA DE FOTOS 1-4 DE CALIBRACIÓN DE PRENSA UNIVERSAL

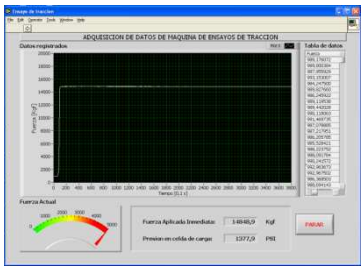
ÍTEM	FOTOS	ÍTEM	FOTOS
1		2	
3		4	

TABLA 10

SECUENCIA DE FOTOS 5-8 DE CALIBRACIÓN DE PRENSA UNIVERSAL

ÍTEM	FOTOS	ÍTEM	FOTOS
5		6	
7		8	

3.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El objetivo del proyecto es producir barras cilíndricas tipo H de Ø 8, 10 y 12 mm de plomo. Para ello se parte de palanquillas cilíndricas de Ø 50mm y 115 mm de largo las cuales van a ser colocadas en el

contenedor de la matriz, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se arma el cuerpo de extrusión con la matriz.
2. Regular la válvula de alivio a la presión necesaria.
3. Regular la válvula de caudal, para obtener la velocidad deseada.
4. Introducir la palanquilla y el contenedor en el horno, y se procede a realizar el precalentamiento, hasta alcanzar una temperatura como máximo de 300ºC. La medición de la temperatura se la realiza con un termómetro digital.
5. Lubricar las paredes del contenedor con bisulfato de molibdeno o grafito, justo antes de sacar la palanquilla del horno.
6. Sacar la palanquilla del horno y colocarla en el contenedor, el embolo debe estar sobre la palanquilla.
7. Proceder a bajar el vástago de la prensa para efectuar el proceso de extrusión.
8. Se registra la fuerza y el tiempo que dura el proceso en la computadora que se encuentra conectada a la prensa universal, dando graficas del proceso.
9. Terminado el proceso de extrusión, retirar el producto extruido de la matriz.

10. Repetir el procedimiento para las 5 palanquillas restantes, de acuerdo a los valores requeridos de las variables del proceso.

TABLA 11

SECUENCIA DE FOTOS 1-4 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN, ELABORACIÓN DE LA PALANQUILLA

ÍTEM	FOTOS	ÍTEM	FOTOS
1		2	
3		4	

TABLA 12

SECUENCIA DE FOTOS 5-12 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN, ELABORACIÓN DE LA PALANQUILLA

ÍTEM	FOTOS	ÍTEM	FOTOS
5		6	
7		8	
9		10	
11		12	

TABLA 13

SECUENCIA DE FOTOS 1-8 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN, PARTES DE MATRIZ DE EXTRUSIÓN

ÍTEM	FOTOS	ÍTEM	FOTOS
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	

TABLA 14

SECUENCIA DE FOTOS 1-8 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

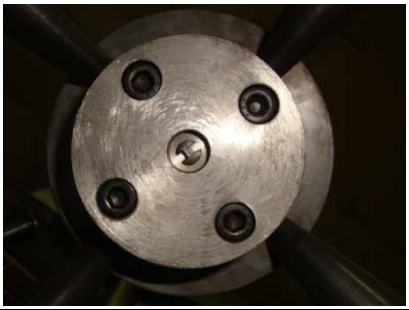
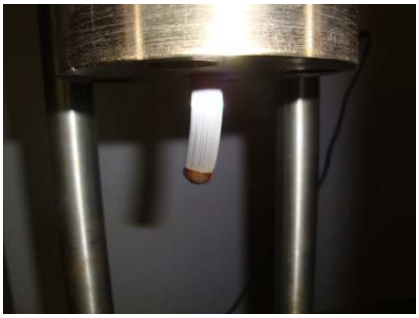
ÍTEM	FOTOS	ÍTEM	FOTOS
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	

TABLA 15

SECUENCIA DE FOTOS 9-16 DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

ÍTEM	FOTOS	ÍTEM	FOTOS
9		10	
11		12	
13		14	
15		16	

3.5. EVALUACIÓN Y RESULTADOS DE LAS PROBETAS EXTRUIDAS

En esta sección se analiza el material producido en INTRAMET en comparación con el que se vende en el mercado nacional.

Se requirió una muestra de plomo, la misma que fue comprada en una de las empresas distribuidoras de este producto.

ESTADO SUPERFICIAL

El estado superficial de las probetas se las analizará macroscópicamente para determinar que defectos están presentes.

TABLA 16

SECUENCIA DE FOTOS 1-3 PROBETAS EXTRUIDAS

ÍTEM	FOTOS
1	
2	
3	

TABLA 17

SECUENCIA DE FOTOS 4-6 PROBETAS EXTRUIDAS

ÍTEM	FOTOS
4	
5	
6	

Los defectos superficiales de cada una de las probetas se presentan en la siguiente tabla 18.

TABLA 18

ESTADO SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS EXTRUIDAS

PROBETA	PARAMETROS			ESTADO SUPERFICIAL		
	V (mm/seg.)	T (°C)	RELACIÓN EXTRUSION	OXIDACION	EXFOLIACIONES	GRIETAS
1	1,1	260	23,95	NO	NO	NO
2	2	300	23,95	NO	NO	NO
3	1,1	260	35,30	NO	NO	NO
4	2	300	35,30	NO	NO	NO
5	1,1	260	55,10	NO	NO	NO
6	2	300	55,10	NO	NO	NO

CURVAS GENERADAS POR EL PROGRAMA LABVIEW 8.2

En las gráficas generadas por el programa LABVIEW 8.2, se puede dar cuenta como varía la fuerza producida por el embolo contra la palanquilla, en todas las gráficas se puede observar el incremento de la fuerza en pequeño lapso de tiempo, sin embargo cuando se alcanza la máxima fuerza, esta empieza a disminuir ya que la fluencia del material extruido ha sido alcanzada. La temperatura juega un papel importante ya que se puede observar que las dos primeras probetas no alcanzan a extruirse en su totalidad puesto que estaban a una menor temperatura de precalentamiento y la matriz no se encontraba precalentada.

A las restantes 4 probetas y a la matriz se les incrementó la temperatura de precalentamiento, con esto se evitó los problemas de extrusión.

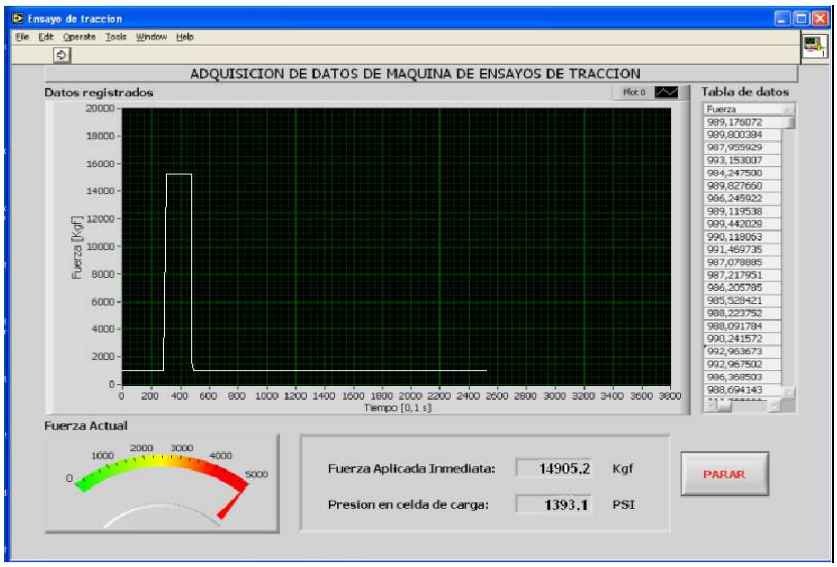


FIGURA 3.4. CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 1 EXTRUIDA

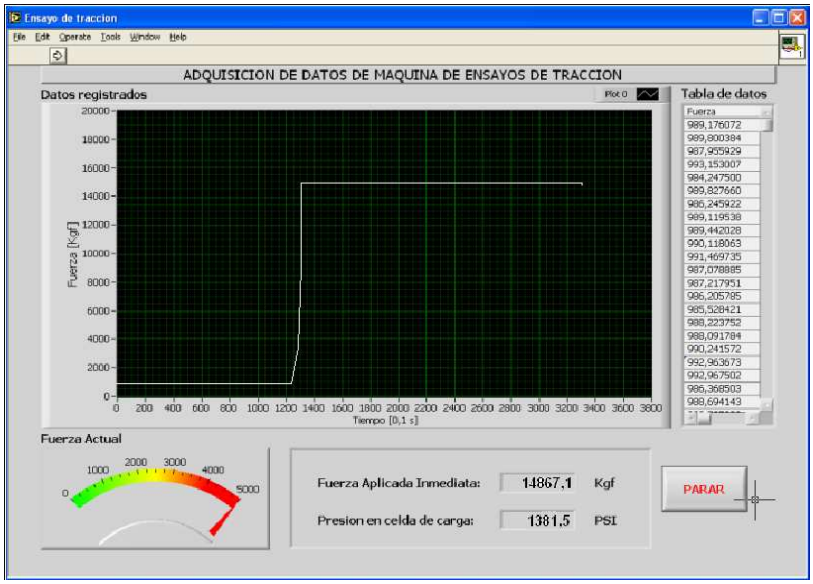


FIGURA 3.5. CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 2 EXTRUIDA

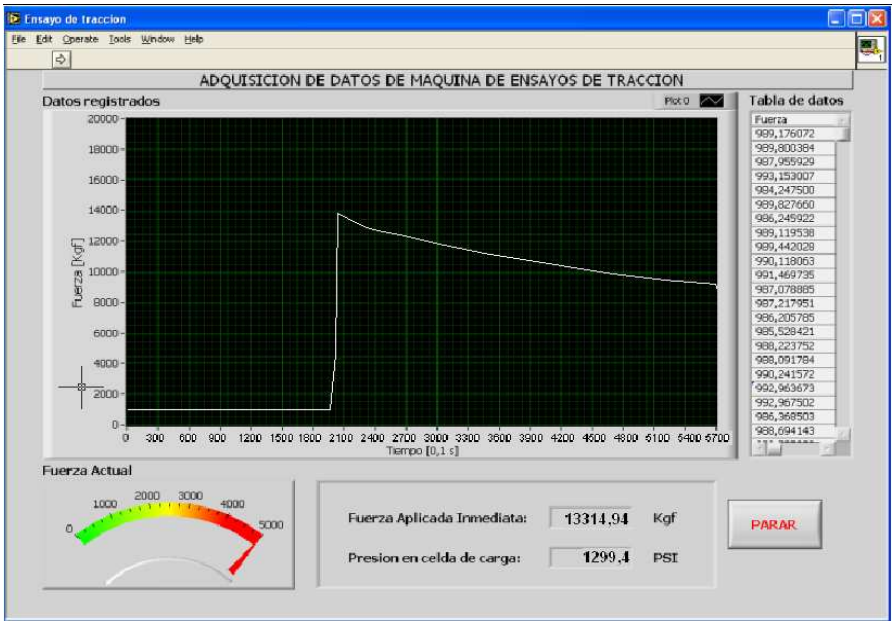


FIGURA 3.6. CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 3 EXTRUIDA

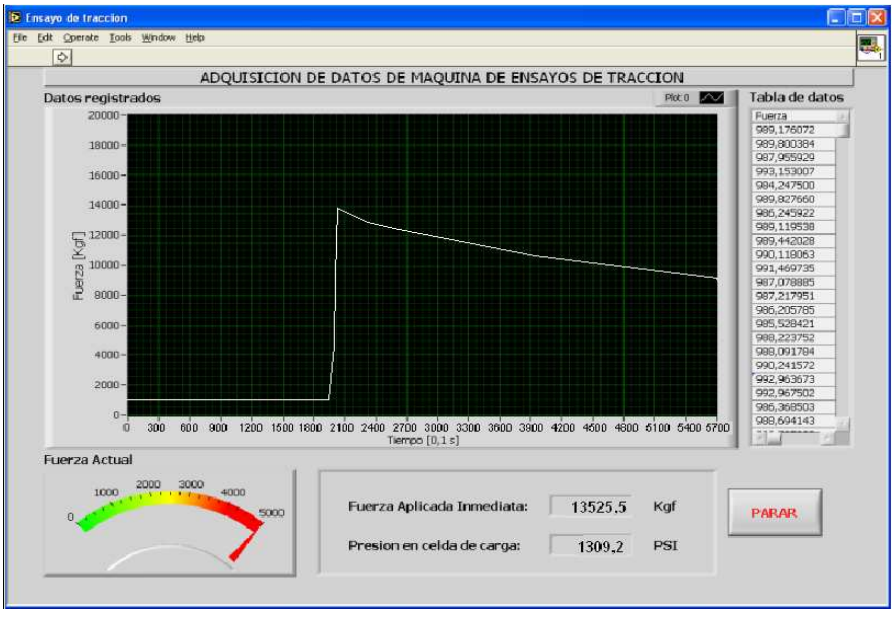


FIGURA 3.7. CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 4 EXTRUIDA

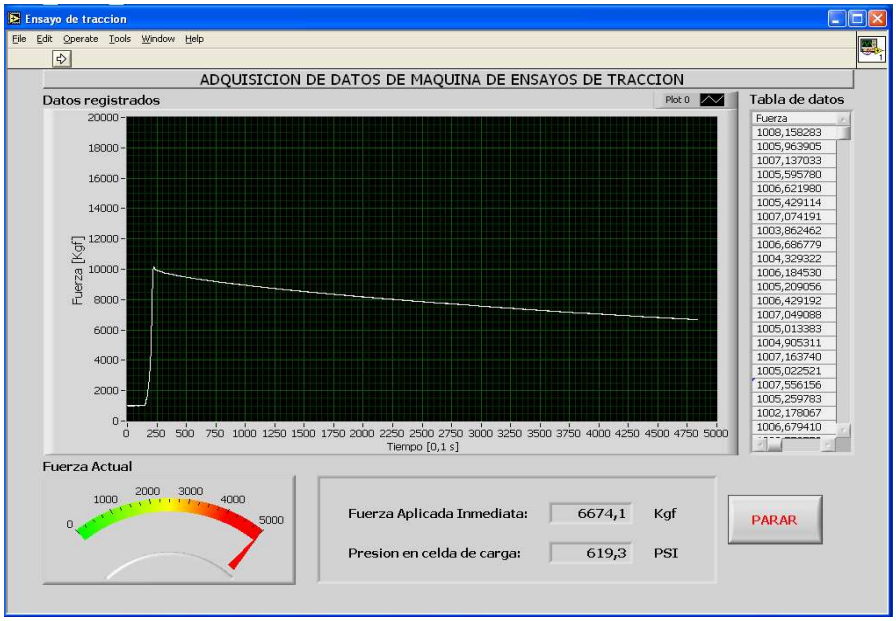


FIGURA 3.8. CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 5 EXTRUIDA

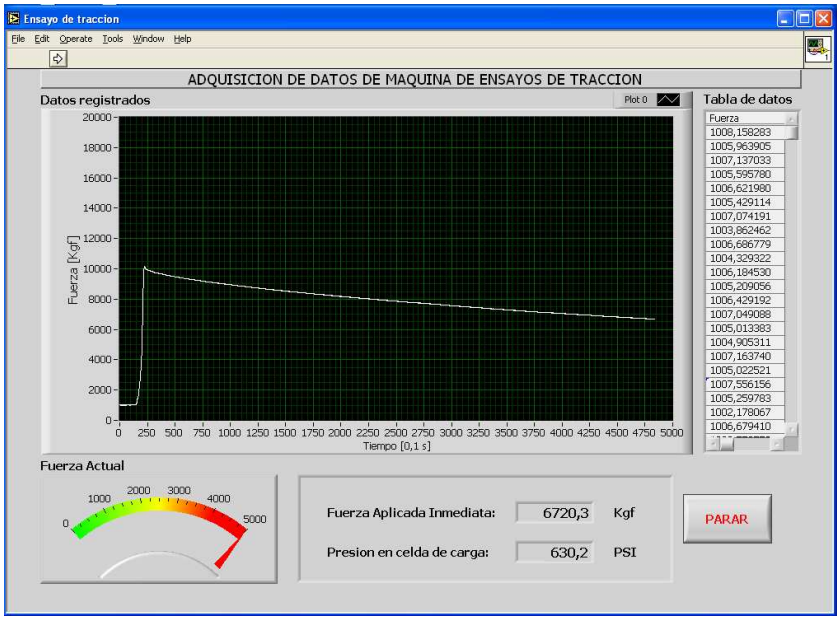


FIGURA 3.9. CURVA FUERZA VS TIEMPO, PROBETA 6 EXTRUIDA

PROCEDIMIENTO PARA OBTENER RESULTADOS DE METALOGRAFÍA

ENSAYO METALOGRÁFICO

Se analiza este material que se considera Patrón de calidad, para ello se hace los siguiente ensayos metalográficos.

El plomo es analizado por medio de ensayos de laboratorio para establecer la calidad del mismo y así considerarlo como patrón de calidad y tener una referencia para el trabajo que se realizará.

En adelante se sigue la secuencia en operaciones para la preparación del metal hasta que este apto para la observación microscópica, actividad que no es fácil ya que es muy suave y se raya con mucha facilidad, por lo tanto su preparación es muy delicada.

- **PASO 1** Primero se pule en seco con lijas de carburo de Silicio de distintas numeraciones progresivas en mesas de pulido con diseño de Intramet hechos con base de vidrio y canales de acrílico. Estas permiten que la dirección del pulido siempre sea la correcta y evitan el contacto con impurezas. En la figura se ve la mesa de pulido y la técnica de preparación en "seco"

FIGURA 3.10. MESA DE PULIDO CON BASE DE VIDRIO Y CANALES DE ACRÍLICO.

- **PASO 2** El pulido final se hizo con pasta de diamante de 0,5 micras en una mesa para pulido manual, esto se hizo cuando la probeta estaba libre de rayas, es el acabado que se le debe dar a la probeta, el cual debe realizarse con mucho cuidado girando la probeta en forma de 8 sobre el paño para obtener pulidos ultra finos hasta obtener una superficie similar a la de un espejo, esta técnica es aplicada con mucho éxito en Intramet.

FIGURA 3.11. PULIDO CON PASTA DE DIAMANTE

- **PASO 3** Se realiza el Ataque Químico en la Soborna diseño y construcción de Intramet, Sumergiendo las probetas en un recipiente con reactivo de Nital al 2 %.

FIGURA 3.12. ATAQUE QUÍMICO CON REACTIVO.

- **PASO 4** Observación en el microscopio de la probeta con la superficie pulida y atacada químicamente.

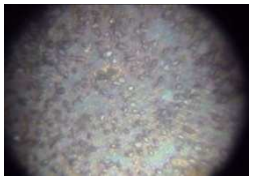
- **PASO 5** Realizar la técnica del pulido final con ataque químico y observación por tres veces hasta que se repita la misma observación en el microscopio, con la adaptación tecnológica hecha en Intramet y con ello cuenta con una herramienta cuya velocidad de respuesta es rápida, lo cual fue muy valioso en el presente caso.

FIGURA 3.13. MICROSCOPIO LEITZ ASISTIDO POR COMPUTADORA

- **PASO 6** Observación y comparaciones microscópicas. Luego de observar las seis probetas y con la técnica de tres veces de pulido y ataque químico en cada una de las probetas se obtiene las metalografías más representativas, las cuales al compararlas con metalografías conocidas en el manual de micro estructuras del manual de la ASTM y con la **metalografía** del patrón se obtiene:

TABLA 19

SECUENCIA DE FOTOS 5-6 METALOGRAFÍAS DE PROBETAS EXTRUIDAS

PROBETA	FOTOS	PROBETA	FOTOS
PATRÓN			
1		2	
3		4	
5		6	

3.6. COMPARACIÓN DE COSTO, PRODUCTO ARTESANAL VERSUS PRODUCTO EXTRUIDO

En el presente subcapítulo se realizó una evaluación económica de la construcción del prototipo para la elaboración de perfiles extruidos de plomo.

TABLA 20

COSTOS DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE EXTRUSIÓN

Recursos	Nombre	Costos (dólares)	Cantidad	Total(dólares)
Mano de obra	MECANIZADO	5,0	40 horas	200
	CORTE POR HILO	25,0	3 UND	75
Materias primas	Plomo	2,5	20 kilos	50
	Aceros	4,01	31.12 Kilos	124,80
	Plomo (patrón)	8,0	0.400 Kilos	3,20
			TOTAL	453.00

COSTO TOTAL DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO = 453,00 Dólares

El costo de 1 kilogramo del producto posicionado (fundido) en el mercado es de 20 dólares, mientras que el costo del producto extruido será de 10 dólares. Se determina que la producción del producto extruido será más rentable en un 50% que el producto fundido.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Con relación al objetivo general y los objetivos específicos establecidos en la introducción de esta tesis, comparándolos con los resultados encontrados durante la experimentación se tienen las siguientes conclusiones:

- La aplicación de la extrusión directa realizada en Intramet como técnica para producción de perfiles artesanales, demostró ser eficaz, por obtención de una barra con perfil perfectamente definido y utilizable para la aplicación artesanal en la elaboración de vitrales artísticos.

- La adaptación de la prensa universal con la matriz de extrusión dio buenos resultados, se logró establecer una velocidad de extrusión comparable a máquinas de tipo industrial de 1,1 a 2 mm/s, con fuerzas de magnitud 64752 N, definidas por ecuaciones utilizadas con una desviación de 1%.

- A través de los experimentos se demuestra que la calidad superficial del producto es comparable al importado, muy superior al que existe en el mercado local hecho artesanalmente por fundición. Cualitativamente los resultados demuestran un producto de alta calidad.

- El método de fabricación usado para tallar el perfil en la matriz de extrusión es el que ha garantizado el éxito del acabado superficial y la precisión dimensional, ya que fue hecho por proceso de electroerosión por hilo. Además en el diseño de la matriz se aplicó programas de computación SolidWorks e Inventor que ayudaron a definir las dimensiones resistentes de la matriz, que fueron verificados durante la experimentación.

RECOMENDACIONES

- El proceso de extrusión directa requiere más estudios para utilizarlos en otras aplicaciones y no tan solo a la elaboración de productos semiacabados, existen muchas formas para trabajar por este método, por lo tanto se recomienda seguir experimentando con otros materiales no ferrosos y con máquinas diseñadas construidas localmente.

- Que la FIMCP promueva seminarios especializados en Elementos Finitos, orientados a definir elementos mecánicos para máquinas de procesos de manufactura para trabajar metales.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook. Forming and Forming. 9TH Edition, Metals Parts Ohio, 1979.
2. DIETER GEORGE. Mechanical Metallurgy. 3TH Edition, Mc Graw – Hill, New York, 1986.
3. BOHLER. Manual de aceros industriales.
4. AVNER SIDNEY. Introducción a la Metalurgia Física. Segunda Edición, México, 1988.
5. COLANGELO AND HEISER. Analysis of Metallurgical Failures. John Wiley & Sons, New York, 1973.
6. SIVARAMAN GURUSWAMY, Engineering Properties and Applications of lead alloys, 1979.
7. SEROPE KALPAKJIAN, Manufactura y Tecnología, 4TH Edition, Mc Graw – Hill, New York, 2002.
8. JOSEPH EDWARD SHIGLEY, Diseño en ingeniería mecánica, 8TH Edition, Mc Graw – Hill, New York, 2008.
9. ROBERT NORTON, Diseño de maquinas, 2TH Edition, Prince Hall, 2004.