

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA EXTRUSIÓN DIRECTA, INVERSA Y MIXTA, EN FRÍO DE PERFILES METÁLICOS NO FERROSOS PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEL DECEM

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

**JOSÉ MIGUEL BEDÓN ALMEIDA
DANILO GUSTAVO ESTÉVEZ ESPINOSA**

DIRECTOR: ING. HERNÁN OJEDA

CODIRECTOR: ING. PABLO FIGUEROA

Sangolquí, 2012 - 10

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

A U T O R I Z A C I Ó N

Nosotros,

SR. DANILO GUSTAVO ESTÉVEZ ESPINOSA

SR. JOSÉ MIGUEL BEDÓN ALMEIDA

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA EXTRUSIÓN DIRECTA, INVERSA Y MIXTA, EN FRÍO DE PERFILES METÁLICOS NO FERROSOS PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEL DECEM”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Quito, 19 de Octubre 2012

Sr. Danilo G. Estévez E.

Sr. José M. Bedón A.

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA EXTRUSIÓN DIRECTA, INVERSA Y MIXTA, EN FRÍO DE PERFILES METÁLICOS NO FERROSOS PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEL DECEM” fue realizado en su totalidad por JOSÉ MIGUEL BEDÓN ALMEIDA Y DANILO GUSTAVO ESTÉVEZ ESPINOSA, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero mecánico.

Ing. Hernán Ojeda

Ing. Pablo Figueroa

Sangolquí, 2012-10-19

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA EXTRUSIÓN DIRECTA, INVERSA Y MIXTA, EN FRIO DE PERFILES METÁLICOS NO FERROSOS PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DEL DECEM”

ELABORADO POR:

José Miguel Bedón Almeida

Danilo Gustavo Estévez Espinosa

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Xavier Sánchez
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Sangolquí, 2012-10

DEDICATORIA

*A Dios, a mi madre Alexandra,
a mi abuelita Gladys y a mi
hermana Anita, fuente de
inspiración todos estos años.*

José

Porque estar sin la compañía de Dios sería estar vacío, se lo dedico como un logro tanpreciado y anhelado por todos aquellos que me rodean, a mi padre Gustavo que siempre ha sido mi ejemplo de perseverancia y honestidad, a mi madre Myriam que con sus incansables consejos supieron llenarme de valores y llevarme siempre por el camino del bien y a mis hermanas Viviana y Pamela que con su eterna alegría mantuvieron siempre por lo alto mi ímpetu por seguir adelante en el transcurso de toda mi carrera.

Danilo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios quien ha sido mi guía y fortaleza durante toda mi vida, a mi familia que hizo posible mi formación profesional y ante todo mi formación personal. A quien en todo momento estuvo conmigo y fue mi motivación de nuevas metas y expectativas durante el desarrollo de este proyecto.

Danilo

A Dios por darme la oportunidad de vivir esta hermosa experiencia en la universidad, a mi madre Alexandra y Abuelita Gladys por todos sus esfuerzos, a Jessica Flores quien fue ayuda idónea durante toda la época de universidad, a mis amigos de toda la vida y a todo aquel quien hizo posible el poder alcanzar este gran triunfo en mi vida.

José

A nuestro Ingeniero Hernán Ojeda quién nos brindó un apoyo incondicional tanto en las aulas del saber como fuera de ellas, que jamás desistió y fue partícipe y guía en nuestra formación profesional.

Danilo y José

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AUTORIZACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	iii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
NOMENCLATURA.....	xxii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxiv
RESUMEN.....	xxv
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 GENERAL.....	3
1.3.2 ESPECÍFICOS.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO.....	4
1.5 ALCANCE DEL PROYECTO.....	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 PROCESOS DE MANUFACTURA SIN ARRANQUE DE VIRUTA.....	5
2.1.1 SINTERIZADO.....	5
2.1.2 FUNDICIÓN.....	6
2.1.3 LAMINADO.....	7
2.1.4 TREFILADO.....	8
2.1.5 DOBLADO.....	9

2.1.6	ROLADO	10
2.1.7	EMBUTICIÓN	10
2.1.8	FORJA.....	11
2.1.8.1	RECALCADO	12
2.1.8.2	PERFORADO.....	12
2.1.8.3	ESTAMPADO.....	13
2.1.8.4	EXTRUSIÓN	13
2.2	PRENSAS USADAS PARA LA EXTRUSIÓN	14
2.3	DELIMITACIÓN ENTRE EXTRUSIÓN EN CALIENTE Y EXTRUSIÓN EN FRÍO	16
2.4	VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN.....	17
2.5	DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA EXTRUSIÓN.....	17
2.5.1	DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR EFECTOS DEL TRABAJO EN FRÍO.....	22
2.6	EXTRUSIÓN EN CALIENTE.....	22
2.7	EXTRUSIÓN EN FRÍO.....	23
2.7.1	TIPOS DE EXTRUSIÓN EN FRÍO	24
2.7.1.1	EXTRUSIÓN DIRECTA.....	24
2.7.1.2	EXTRUSIÓN INVERSA.....	26
2.7.1.3	EXTRUSIÓN MIXTA.....	28
2.7.2	VENTAJAS DE LA EXTRUSIÓN EN FRÍO	28
2.7.3	DESVENTAJAS DE LA EXTRUSIÓN EN FRÍO.....	29
2.7.4	CARACTERÍSTICAS DE LA PIEZA EXTRUIDA	30
2.7.5	CÁLCULO DE FUERZAS NECESARIAS PARA DEFORMAR PLÁSTICAMENTE A LOS MATERIALES A EXTRUIR	31
2.7.5.1	CÁLCULO INGENIERIL DE LA FUERZA DE EXTRUSIÓN.....	33
2.7.5.2	CÁLCULO REAL DE LAS FUERZAS DE EXTRUSIÓN	33
2.8	MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	40

2.8.1	ACEROS DE HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO	40
2.8.2	PROPIEDADES MECÁNICAS	40
2.8.2.1	DUREZA.....	40
2.8.2.2	RESISTENCIA A LA FLUENCIA	42
2.8.2.3	RESISTENCIA A LA TENSIÓN.....	42
2.8.2.4	LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD.....	43
2.8.2.5	LÍMITE ELÁSTICO	43
2.8.2.6	MODULO DE ELASTICIDAD EN TENSIÓN, E	43
2.8.2.7	DUCTILIDAD.....	43
2.8.2.8	ESFUERZO DE FLUENCIA A LA TENSIÓN EN TRABAJO EN FRÍO.....	44
2.9	TIPOS DE RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN.....	45
2.9.1	PERFECTAMENTE ELÁSTICA	45
2.9.2	ELÁSTICA Y PERFECTAMENTE PLÁSTICA.....	46
2.9.3	ELÁSTICA Y ENDURECIBLE POR DEFORMACIÓN.....	46
2.10	MATERIALES UTILIZADOS PARA EXTRUSIÓN EN FRÍO	46
2.11	LUBRICACIÓN EN LA EXTRUSIÓN	47
2.12	TRATAMIENTOS TÉRMICOS	50
2.12.1	RECOCIDO	51
2.12.2	NORMALIZADO	51
2.12.3	TEMPLADO.....	51
2.12.4	REVENIDO.....	51
2.12.5	NITRURACIÓN.....	52
2.12.6	CEMENTACIÓN.....	52
	CAPÍTULO 3: ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	53
3.1	CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONALIDAD	53
3.1.1	MATRIZ DE EXTRUSIÓN DIRECTA.....	53

3.1.2	MATRIZ DE EXTRUSIÓN INVERSA.....	54
3.1.3	MATRIZ DE EXTRUSIÓN MIXTA	55
3.1.4	ACOPLAMIENTO A PRENSA HIDRÁULICA DEL DECEM	56
3.2	SELECCIÓN DE MATERIALES ESTANDARIZADOS	57
3.2.1	PUNZÓN, DADOS Y MATRICES.....	57
3.2.2	PORTA MATRICES Y PORTA PUNZONES	59
3.2.3	MATERIALES PARA EXTRUSIÓN DIRECTA INVERSA Y MIXTA.....	60
	CAPÍTULO 4: CÁLCULO Y DISEÑO	61
4.1	PARÁMETROS DE DISEÑO	61
4.1.1	ESFUERZO A COMPRESIÓN	62
4.1.2	ESFUERZO A CORTANTE.....	62
4.1.3	FALLA AL PANDEO	62
4.1.4	FALLA POR FATIGA.....	64
4.1.4.1	LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA	64
4.1.4.2	RESISTENCIA A LA FATIGA.....	64
4.1.4.3	FACTORES QUE MODIFICAN EL LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA	65
4.2	CÁLCULO DE FUERZAS PARA EXTRUSIÓN.....	66
4.2.1	DIRECTA.....	66
4.2.1.1	FUERZA PARA EJE DE ALUMINIO.....	66
4.2.1.2	FUERZA PARA EJE DE PLOMO	67
4.2.1.3	FUERZA PARA PERFIL I DE PLOMO	68
4.2.2	INVERSA.....	70
4.2.3	MIXTA	72
4.2.3.1	FUERZA PARA DADO DE REDUCCIÓN DE ALUMINIO	72
4.2.3.2	FUERZA PARA DADO DE REDUCCIÓN DE PLOMO.....	74
4.3	CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL EQUIPO	77

4.3.1	DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN DIRECTA	77
4.3.1.1	EJEMPLO DE CÁLCULO DEL DADO DE EXTRUSIÓN DIRECTA	77
4.3.1.2	CÁLCULO PARA MATRIZ SUPERIOR	79
4.3.1.3	CÁLCULOS PARA MATRIZ INFERIOR	80
4.3.1.4	CÁLCULO DEL PUNZÓN	82
4.3.2	DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN INVERSA	86
4.3.2.1	MATRIZ DE EXTRUSIÓN INVERSA	86
4.3.2.2	EXPULSOR PARA EXTRUSIÓN INVERSA	89
4.3.2.3	PUNZÓN PARA EXTRUSIÓN INVERSA	90
4.3.3	DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN MIXTA	96
4.3.3.1	MATRIZ DE EXTRUSIÓN MIXTA	96
4.3.3.2	EXPULSOR PARA EXTRUSIÓN MIXTA	97
4.3.3.3	PUNZÓN PARA EXTRUSIÓN MIXTA	99
4.3.4	DISEÑO ESTRUCTURAL DEL EQUIPO	103
4.3.4.1	PORTA MATRICES	103
4.3.4.2	PORTA PUNZONES	105
4.4	SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EN SOLIDWORKS	106
4.4.1	EXTRUSIÓN DIRECTA (FACTORES DE SEGURIDAD)	108
4.4.1.1	DADO	108
4.4.1.2	PORTA MATRIZ INFERIOR	109
4.4.1.3	PORTA MATRIZ SUPERIOR	109
4.4.1.4	PUNZÓN	110
4.4.2	EXTRUSIÓN INVERSA (FACTORES DE SEGURIDAD)	110
4.4.2.1	MATRIZ	110
4.4.2.2	EXPULSOR	111
4.4.2.3	PUNZÓN	111
4.4.3	EXTRUSIÓN MIXTA (FACTORES DE SEGURIDAD)	112

4.4.3.1	PUNZÓN	112
4.4.3.2	MATRIZ.....	112
4.4.3.3	EXPULSOR.....	113
4.5	RESUMEN DE FACTORES DE SEGURIDAD	114
CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.....		115
5.1	PLANOS DE CONSTRUCCIÓN	115
5.1.1	EXTRUSIÓN DIRECTA.....	115
5.1.1.1	DADO SECCIÓN “I”	115
5.1.1.2	DADO SECCIÓN CIRCULAR DE 25MM A 18MM	115
5.1.1.3	PUNZÓN	115
5.1.1.4	PORTA MATRIZ SUPERIOR	115
5.1.1.5	PORTA MATRIZ INFERIOR.....	115
5.1.1.6	MONTAJE DEL EQUIPO	115
5.1.2	EXTRUSIÓN INVERSA.....	115
5.1.2.1	PUNZÓN	115
5.1.2.2	MATRIZ Y EYECTOR	115
5.1.2.3	MONTAJE DEL EQUIPO	115
5.1.3	EXTRUSIÓN MIXTA.....	116
5.1.3.1	PUNZÓN	116
5.1.3.2	MATRIZ Y EYECTOR	116
5.1.3.3	MONTAJE DEL EQUIPO	116
5.1.4	PLACAS PORTA MATRIZ Y PORTA PUNZÓN.....	116
5.1.4.1	PLACA PORTA MATRIZ.....	116
5.1.4.2	PLACA PORTA PUNZÓN	116
5.2	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN.....	117
5.2.1	DIAGRAMAS DE PROCESO DE LOS ELEMENTOS A FABRICARSE	117

5.2.1.1	PORTA MATRICES Y PORTA PUNZONES	117
5.2.1.2	GUÍAS PORTA MATRICES Y GUÍAS PORTA PUNZONES.....	118
5.2.1.3	EXTRUSIÓN DIRECTA – PUNZÓN.....	119
5.2.1.4	EXTRUSIÓN DIRECTA – DADOS	120
5.2.1.5	EXTRUSIÓN DIRECTA – MATRIZ SUPERIOR.....	121
5.2.1.6	EXTRUSIÓN DIRECTA – MATRIZ INFERIOR.....	122
5.2.1.7	EXTRUSIÓN INVERSA – PUNZÓN.....	123
5.2.1.8	EXTRUSIÓN INVERSA – MATRIZ.....	124
5.2.1.9	EXTRUSIÓN INVERSA – EYECTOR.....	125
5.2.1.10	EXTRUSIÓN MIXTA – PUNZÓN.....	126
5.2.1.11	EXTRUSIÓN MIXTA – MATRIZ.....	127
5.2.1.12	EXTRUSIÓN MIXTA – EYECTOR.....	128
	CAPÍTULO 6: PRUEBAS Y VALIDACIÓN DE DISEÑO	129
6.1	PRUEBAS Y REPORTES DE FUNCIONAMIENTO	129
6.1.1	EXTRUSIÓN DIRECTA.....	130
6.1.1.1	EJE DE ALUMINIO.....	130
6.1.1.2	EJE DE PLOMO.....	133
6.1.1.3	PERFIL I.....	135
6.1.2	EXTRUSIÓN INVERSA – TUBO HUECO HEXAGONAL.....	138
6.1.2.1	PORCENTAJE DE ERROR	139
6.1.3	EXTRUSIÓN MIXTA.....	140
6.1.3.1	DADO DE REDUCCIÓN – ALUMINIO	140
6.1.3.2	DADO DE REDUCCIÓN – PLOMO.....	141
6.2	ANÁLISIS DE METALES NO FERROSOS.....	144
6.2.1	ANÁLISIS A LA COMPRESIÓN DE ALUMINO.....	144
6.3	PROPUESTA PARA PRACTICA DE LABORATORIO	147

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS ECONÓMICO, FINANCIERO Y AMBIENTAL	148
7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO	148
7.1.1 COSTOS DE MATERIA PRIMA DIRECTA	148
7.1.2 COSTOS DE MANO DE OBRA DIRECTA.....	149
7.1.3 COSTOS DE MATERIA PRIMA INDIRECTA.....	150
7.1.4 COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN.....	150
7.1.5 DEPRECIACIÓN	151
7.2 ANÁLISIS FINANCIERO.....	152
7.2.1 INGRESOS	152
7.2.2 EGRESOS.....	153
7.2.3 FLUJO DE CAJA NETO	154
7.2.4 TASA INTERNA DE RETORNO	155
7.2.5 VALOR ACTUAL NETO	156
7.3 ANÁLISIS AMBIENTAL.....	157
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	158
8.1 CONCLUSIONES	158
8.2 RECOMENDACIONES.....	159
BIBLIOGRAFÍA	161

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN.....	17
TABLA 2.2 TEMPERATURAS DE VARIOS METALES EN LA EXTRUSIÓN EN CALIENTE.....	23
TABLA 2.3 PRESIÓN UNITARIA PARA EXTRUSIÓN EN FRÍO	33
TABLA 2.4 PROPIEDADES DE MANUFACTURA DE VARIAS ALEACIONES NO FERROSAS	39
TABLA 2.5 ACEROS PARA TRABAJO EN FRÍO	40
TABLA 2.6 CONVERSIÓN DE DUREZAS	41
TABLA 2.7 LUBRICANTES COMUNES PARA ALGUNOS MATERIALES.....	49
TABLA 3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES PARA PUNZONES, DADOS Y MATRICES.....	57
TABLA 3.2 PROPIEDADES DE ACERO PARA TRABAJO EN FRÍO DF2	59
TABLA 3.3 SELECCIÓN DE MATERIALES PARA PORTA MATRICES Y PORTA PUNZONES.....	59
TABLA 3.4 PROPIEDADES DE ACERO ASTM A36	60
TABLA 3.5 PROPIEDADES DEL ALUMINO	60
TABLA 3.6 PROPIEDADES DEL PLOMO	60
TABLA 4.1 ESFUERZOS EN EQUIPO EXTRUSOR	61
TABLA 4.2 RESUMEN DE FUERZAS PARA LA EXTRUSIÓN DIRECTA.....	70
TABLA 4.3 RESUMEN FACTORES DE SEGURIDAD EQUIPO EXTRUSOR	114
TABLA 6.1 FUERZAS PARA EXTRUSIÓN DIRECTA–EJE DE ALUMINIO ..	131
TABLA 6.2 FUERZAS PARA EXTRUSIÓN DIRECTA–EJE DE PLOMO.....	133
TABLA 6.3 FUERZAS PARA EXTRUSIÓN DIRECTA–PERFIL I.....	135
TABLA 6.4 FUERZAS PARA EXTRUSIÓN INVERSA–TUBO HUECO HEXAGONAL.....	138
TABLA 6.5 FUERZAS PARA EXTRUSIÓN MIXTA – DADO DE REDUCCIÓN ALUMINIO.....	140

TABLA 6.6 FUERZAS PARA EXTRUSIÓN MIXTA – DADO DE REDUCCIÓN PLOMO	141
TABLA 6.7 FUERZA VS. DESPLAZAMIENTO TOCHO 1	144
TABLA 6.8 FUERZA VS. DESPLAZAMIENTO TOCHO 2	145
TABLA 6.9 FUERZA VS. DESPLAZAMIENTO TOCHO 3	146
TABLA 7.1 COSTOS DE MATERIA PRIMA DIRECTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXTRUSOR	148
TABLA 7.2 COSTOS DE MANO DE OBRA DIRECTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXTRUSOR	149
TABLA 7.3 COSTOS DE LA MATERIA PRIMA INDIRECTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXTRUSOR	150
TABLA 7.4 COSTOS TOTALES DE PRODUCCIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO EXTRUSOR	150
TABLA 7.5 DEPRECIACIÓN DEL EQUIPO EXTRUSOR	151
TABLA 7.6 INGRESOS NETOS DEL PROYECTO	152
TABLA 7.7 EGRESOS NETOS DEL PROYECTO	153
TABLA 7.8 FLUJO DE CAJA NETO	154
TABLA 7.9 TASA INTERNA DE RETORNO	155
TABLA 7.10 VALOR ACTUAL NETO	156

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 PASTILLA DE FRENO DE MATERIAL CERÁMICO SINTERIZADO	6
FIGURA 2.2 FUNDICIÓN.....	7
FIGURA 2.3 LAMINADO.....	8
FIGURA 2.4 TREFILADO	9
FIGURA 2.5 DOBLADO	9
FIGURA 2.6 ROLADO	10
FIGURA 2.7 EMBUTICIÓN.....	10
FIGURA 2.8 FORJADO	11
FIGURA 2.9 RECALCADO	12
FIGURA 2.10 PERFORADO.....	12
FIGURA 2.11 ESTAMPADO	13
FIGURA 2.12 PERFILES DE ALUMINIO EXTRUIDOS.....	14
FIGURA 2.13 DIAGRAMAS DE FLUJO DE MATERIAL EN LA EXTRUSIÓN CON LUBRICACIÓN Y SIN LUBRICACIÓN.....	18
FIGURA 2.14 LA DEFORMACIÓN NO HOMOGÉNEA EN LA EXTRUSIÓN...21	
FIGURA 2.15 EXTRUSIÓN DIRECTA.....	24
FIGURA 2.16 PERFILES OBTENIDOS EN LA EXTRUSIÓN DIRECTA.....	25
FIGURA 2.17 SECUENCIA DE EXTRUSIÓN DIRECTA DE UN EJE	26
FIGURA 2.18 EXTRUSIÓN INDIRECTA PARA PRODUCIR UNA SECCIÓN TRANSVERSAL SÓLIDA	27
FIGURA 2.19 EXTRUSIÓN INDIRECTA PARA PRODUCIR UNA SECCIÓN TRANSVERSAL HUECA	27
FIGURA 2.20 EJEMPLOS DE EXTRUSIÓN MIXTA.....	28
FIGURA 2.21 DIAGRAMA TRACCIÓN AXIAL.....	32
FIGURA 2.22 PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA EXTRUSIÓN.....	33

FIGURA 2.23 CURVAS TÍPICAS DE LA PRESIÓN DEL PISÓN EN FUNCIÓN DE LA CARRERA DEL PISÓN PARA LA EXTRUSIÓN DIRECTA E INDIRECTA	38
FIGURA 2.24 DIAGRAMA TÍPICO DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA PARA ALUMINIO Y OTROS METALES QUE NO TIENEN PUNTO DE FLUENCIA.....	42
FIGURA 2.25 DIAGRAMA ESFUERZO DEFORMACIÓN	44
FIGURA 2.26 TRES CATEGORÍAS DE RELACIONES ESFUERZO CONTRA DEFORMACIÓN	45
FIGURA 2.27 CICLOS DE TEMPERATURA-TIEMPO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS TÉRMICOS	50
FIGURA 3.1 A) DADO I PARA EXTRUSIÓN DIRECTA, B) PERFIL I EXTRUIDO	53
FIGURA 3.2 DADO PARA EXTRUSIÓN DIRECTA.....	53
FIGURA 3.3 A) TUBO CON AGUJERO HEXAGONAL – B) PERFILES DE EXTRUSIÓN INVERSA	54
FIGURA 3.4 A) DADO DE REDUCCIÓN HEXAGONAL – B) ACOPLAMIENTO PARA SACAR LA RUEDA DE UN VEHÍCULO – C) ACOPLAMIENTO DE UN DESTORNILLADOR.....	55
FIGURA 3.5 PRENSA HIDRÁULICA DE 60 TONELADAS DEL DECEM.....	56
FIGURA 4.1 ELEMENTOS A SER DISEÑADOS.....	61
FIGURA 4.2 CONDICIONES TERMINALES DE COLUMNAS - CURVAS DE DEFLEXIÓN RESULTANTES.	63
FIGURA 4.3 LÍNEA DE FALLAS DE COLUMNAS EULER JOHNSON Y COLUMNAS CORTAS.....	63
FIGURA 4.4 INGRESO DE PROPIEDADES DE MATERIALES PARA SIMULACIONES COMPUTACIONALES.....	106
FIGURA 4.5 SELECCIÓN DE PUNTOS FIJOS SOLIDWORKS.....	107
FIGURA 4.6 INTRODUCCIÓN DE FUERZAS SOLIDWORKS.....	107

FIGURA 4.7	FACTOR DE SEGURIDAD EN DADO DE EXTRUSIÓN DIRECTA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	108
FIGURA 4.8	FACTOR DE SEGURIDAD EN MATRIZ INFERIOR DE EXTRUSIÓN DIRECTA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.....	109
FIGURA 4.9	FACTOR DE SEGURIDAD EN MATRIZ SUPERIOR PARA EXTRUSIÓN DIRECTA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.....	109
FIGURA 4.10	FACTOR DE SEGURIDAD EN PUNZÓN DE EXTRUSIÓN DIRECTA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	110
FIGURA 4.11	FACTOR DE SEGURIDAD EN MATRIZ PARA EXTRUSIÓN INVERSA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	110
FIGURA 4.12	FACTOR DE SEGURIDAD EN EXPULSOR DE EXTRUSIÓN INVERSA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	111
FIGURA 4.13	FACTOR DE SEGURIDAD EN PUNZÓN DE EXTRUSIÓN INVERSA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	111
FIGURA 4.14	FACTOR DE SEGURIDAD EN PUNZÓN DE EXTRUSIÓN MIXTA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	112
FIGURA 4.15	FACTOR DE SEGURIDAD EN MATRIZ PARA EXTRUSIÓN MIXTA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	112
FIGURA 4.16	FACTOR DE SEGURIDAD EN EYECTOR DE EXTRUSIÓN MIXTA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	113
FIGURA 5.1	DIAGRAMA DE PROCESOS: PORTA MATRIZ Y PORTA PUNZÓN.....	117
FIGURA 5.2	DIAGRAMA DE PROCESOS: GUIAS PORTA MATRICES Y PORTA PUNZONES.....	118
FIGURA 5.3	DIAGRAMA DE PROCESOS: PUNZÓN EXTRUSIÓN DIRECTA.	119
FIGURA 5.4	DIAGRAMA DE PROCESOS: DADOS EXTRUSIÓN DIRECTA.	120

FIGURA 5.5 DIAGRAMA DE PROCESOS: MATRIZ SUPERIOR EXTRUSIÓN DIRECTA.	121
FIGURA 5.6 DIAGRAMA DE PROCESOS: MATRIZ INFERIOR EXTRUSIÓN DIRECTA.	122
FIGURA 5.7 DIAGRAMA DE PROCESOS: PUNZÓN EXTRUSIÓN INVERSA.	123
FIGURA 5.8 DIAGRAMA DE PROCESOS: MATRIZ EXTRUSIÓN INVERSA.	124
FIGURA 5.9 DIAGRAMA DE PROCESOS: EYECTOR EXTRUSIÓN INVERSA.	125
FIGURA 5.10 DIAGRAMA DE PROCESOS: PUNZÓN EXTRUSIÓN MIXTA.	126
FIGURA 5.11 DIAGRAMA DE PROCESOS: MATRIZ EXTRUSIÓN MIXTA. .	127
FIGURA 5.12 DIAGRAMA DE PROCESOS: EYECTOR EXTRUSIÓN MIXTA.	128
FIGURA 6.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	129
FIGURA 6.2 CORRECTA LUBRICACIÓN DE CADA ELEMENTO ANTES DE REALIZAR LA EXTRUSIÓN	130
FIGURA 6.3 EXTRUSIÓN DIRECTA DE UN TOCHO DE ALUMINIO Ø25 MM A UN Ø18.....	130
FIGURA 6.4 EJE DE ALUMINIO EXTRUIDO EN MATRICES.....	131
FIGURA 6.5 EXTRUSIÓN DIRECTA – EJE DE PLOMO	133
FIGURA 6.6 EJE DE PLOMO EN MATRIZ DIRECTA, CON BUEN ACABADO SUPERFICIAL	134
FIGURA 6.7 EJE DE PLOMO EN DADO CIRCULAR DE MATRIZ DIRECTA, CON UNA LIGERA DESVIACIÓN	134
FIGURA 6.8 EXTRUSIÓN DIRECTA DE PERFIL I	135
FIGURA 6.9 EXTRUSIÓN DE PERFIL I COMPLETAMENTE RECTO	136
FIGURA 6.10 EXTRACCIÓN DE MATERIAL EN DADO I.....	136

FIGURA 6.11	EXTRUSIÓN CONTINUA DE PERFIL I	137
FIGURA 6.12	EXTRUSIÓN INVERSA – TUBO HUECO HEXAGONAL.....	138
FIGURA 6.13	EXTRACCIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO MEDIANTE EXTRUSIÓN INVERSA DE PLOMO	139
FIGURA 6.14	EXTRUSIÓN MIXTA – DADO DE REDUCCIÓN ALUMINIO ..	140
FIGURA 6.15	EXTRUSIÓN MIXTA – DADO DE REDUCCIÓN PLOMO	142
FIGURA 6.16	EXTRACCIÓN DEL PRODUCTO OBTENIDO MEDIANTE EXTRUSIÓN MIXTA	142
FIGURA 6.17	DIAGRAMA FUERZA VS DESPLAZAMIENTO TOCHO 1 DE ALUMINIO.....	145
FIGURA 6.18	DIAGRAMA FUERZA VS DESPLAZAMIENTO TOCHO 2 DE ALUMINIO.....	146
FIGURA 6.19	DIAGRAMA FUERZA VS DESPLAZAMIENTO TOCHO 3 DE ALUMINIO.....	147

NOMENCLATURA

d_0	Diámetro inicial de tocho (mm).
A_0	Área inicial (mm^2).
A_f	Área final de la sección recta de la parte extruida (mm^2).
R_x	Relación de extrusión.
ϵ	Deformación ideal.
ϵ_x	Deformación real.
a	Constante empírica de Johnson
b	Constante empírica de Johnson
k	Coeficiente de resistencia del material extruido (Mpa).
n	Exponente de endurecimiento por deformación (Mpa).
K_x	Factor de forma del dado en extrusión.
C_x	Perímetro de la sección transversal extruida (mm).
C_c	Perímetro de un círculo de la misma área que la forma extruida (mm).
P_f	Presión adicional requerida para superar la fricción (MPa)
μ	Coeficiente de fricción en la pared del recipiente.
p_0	Presión del tocho contra la pared del contenedor (Mpa).
Y_f	Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación (Mpa).
L_0	Longitud del tocho a ser extruido (mm).
P	Presión de extrusión (Mpa).
F	Fuerza de extrusión (kgf).
T_f	Temperatura de Fusión ($^{\circ}\text{C}$)
S_y	Límite de fluencia (Mpa).
σ_c	Esfuerzo a compresión (Mpa).
n	Factor de seguridad.
D_c	Diámetro de corte (mm).
τ_{co}	Esfuerzo cortante (Mpa).
S_{sy}	Esfuerzo cortante máximo (Mpa).
P_i	Presión interna en cilindro (N/mm^2).
σ_1	Esfuerzo principal (Mpa).
σ_2	Esfuerzo principal (Mpa).

σ_3	Esfuerzo principal (Mpa).
Lff	Longitud efectiva (mm).
r	Radio de giro (mm).
Srd	Línea de fallo de columnas de Euler.
Fcr	Fuerza de pandeo (kgf).
Sut	Resistencia última a la tensión (Mpa).
f	Fracción de resistencia a la fatiga
Sf	Resistencia a la fatiga (Mpa).
Se	Límite de resistencia a la fatiga (Mpa).
ka	Factor de modificación de condición superficial.
kb	Factor de modificación del tamaño.
kc	Factor de modificación de carga.
kd	Factor de modificación de la temperatura.
ke	Factor de confiabilidad.
kf	Factor de modificación de efectos varios.
ST	Resistencia a la tensión a la temperatura de operación.
SRT	Resistencia a la tensión a temperatura ambiente.
Za	Variación de transformación.
Se´	Límite de resistencia la fatiga en viga rotatoria (Mpa).

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Características Acero DF-2

ANEXO B: Características Acero XW-5

ANEXO C: Características Acero XW-41

ANEXO D: Tabla de calidades superficiales

ANEXO E: Valores de La rugosidad media

ANEXO F: Ajustes recomendados

ANEXO G: Valores numéricos de amplitudes de zonas de tolerancia

ANEXO H: Práctica de Laboratorio

ANEXO I: Planos

RESUMEN

En el laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM no se cuenta con los equipos necesarios para realizar prácticas referentes a la conformación plástica de los metales, por lo que este proyecto está orientado a ayudar al estudiante a comprender práctica y teóricamente el proceso de extrusión.

La extrusión en frío de metales no ferrosos se basa en la deformación plástica y así obtener perfiles y figuras de acuerdo sea la necesidad, que elaborados con otro método de manufactura metalmeccánico sería muy costoso y demandaría mucho tiempo de trabajo. La extrusión tiene como materia prima pequeños tochos del material deseado, con dimensiones establecidas de acuerdo al producto final, y se los dará forma mediante una prensa hidráulica del mismo laboratorio.

En este proyecto se analiza y se estudia las características y propiedades mecánicas específicamente aluminio y plomo, para su posterior deformación sin arranque de viruta.

Como objetos de estudio se encuentran tres procesos de deformación, que son la extrusión directa, extrusión inversa y extrusión mixta, con lo que el estudiante del Departamento de las Ciencias de la Energía y Mecánica, de forma práctica puede comprobar lo aprendido de forma teórica en la materia de Procesos de Manufactura II y así mejorar y afianzar dichos conocimientos.

Se define un método para obtener las fuerzas necesarias para la deformación plástica en la extrusión directa, inversa y mixta, y mediante este método se llega a obtener el esfuerzo de fluencia promedio del plomo del cual no existe mayor información.

Se analiza las variables que intervienen en la extrusión como son: temperatura, acabado superficial, lubricación, etc., y qué pasaría si no son consideradas o tomadas en cuenta en el proceso.

Se realiza el diseño del equipo extrusor y el análisis de cada uno de los elementos y los fenómenos que podrían provocar su mal funcionamiento o su falla total como es el análisis a compresión, tracción, cortante puro, pandeo y fatiga, y además se encuentra una simulación mediante la plataforma de diseño Solidworks con el cual se corrobora el análisis de esfuerzos obtenidos mediante dichos cálculos.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

Los sistemas de producción se encuentran directamente vinculados con los Procesos de Manufactura, es decir con los procesos de conformación plástica de materiales, que permitan optimizar su consumo, paralelamente los tiempos de producción, lo que significa la ganancia en la industria, por lo tanto un futuro Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica del Ejército debe estar en capacidad de identificar y trabajar con estos procesos, y para lo cual se han estudiado cátedras que cumplen con este objetivo, pero no sería nada de este estudio sin poner en práctica los conocimientos adquiridos, para lo cual el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica cuenta con un laboratorio en el cual los futuros ingenieros se encuentran en capacidad de identificar cada uno de los procesos de conformación plástica de materiales como es la extrusión en frío. Actualmente en la cátedra de Procesos de Manufactura II existen prácticas determinadas que muestran en qué consiste este tipo de extrusión, ya que se cuenta con una prensa manual en la que con la ayuda de matrices hechas por los mismos estudiantes se logra demostrar la teoría antes dictada, sin embargo es necesario profundizar esta área con técnicas y equipos modernos, claras y precisas de tal manera que en un futuro se pueda seguir aportando a la industria ecuatoriana con ideas emprendedoras y nuevas tecnologías, para lo cual son necesarios equipos específicos que estén destinados a la ilustración didáctica de lo que es la extrusión en frío.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Con el transcurso del tiempo los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica al cursar varias asignaturas han podido constatar los métodos de aprendizaje así como los instrumentos pedagógicos e infraestructura, las cuales actualmente nos hizo comprender que en la ingeniería, los laboratorios forman una parte muy importante en este campo ya que por este tipo de aprendizaje teórico-práctico mejora el entendimiento y rendimiento de los estudiantes incrementando su nivel de satisfacción académica.

En la materia de Procesos de Manufactura II en la que se estudia la conformación plástica de los materiales en frío o en caliente, la realización de una práctica de laboratorio es de gran importancia, lamentablemente no se cuenta con los equipos necesarios para realizar prácticas regulares referentes a la extrusión directa, inversa y mixta.

El laboratorio cuenta con una prensa y se realizan prácticas de extrusión de una manera inapropiada lo que causa que el estudiante no consiga los resultados idóneos y no logra ganar la experiencia necesaria como para aplicarla en un futuro en el ámbito profesional.

Mediante la ejecución de este proyecto el estudiante podrá realizar prácticas de laboratorio con las que afianzarán los conocimientos que ha obtenido de manera teórica.

Cabe recalcar que los países industrializados del mundo basan su desarrollo con la aplicación de estos procesos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Diseñar y construir un equipo para la extrusión directa, inversa y mixta, en frío de perfiles metálicos no ferrosos concretamente en plomo y aluminio para el Laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM, que afiance el conocimiento teórico-práctico del estudiante.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un equipo de extrusión, para que los estudiantes del DECEM, puedan poner en práctica los conocimientos adquiridos en la materia de Procesos de Manufactura II.
- Elaborar piezas y/o perfiles metálicos no ferrosos aplicando los métodos de extrusión directa, inversa y mixta para obtener elementos como: perfiles, tubos y otras formas.
- Implementar prácticas a la materia de Procesos de Manufactura II sobre extrusión directa, inversa y mixta, para verificar los efectos de las fuerzas en la conformación plástica de los metales.
- Generar tecnología propia (Nacional).
- Aplicar procesos tecnológicos para la fabricación del equipo de extrusión que permitan la obtención de objetos mediante la conformación plástica de los metales.
- Verificar los factores y coeficientes de plasticidad de materiales metálicos no ferrosos.
- Aprovechar la deformabilidad, ductilidad, plasticidad de los metales para realizar el proceso de extrusión.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO

Es importante implementar este proyecto para el laboratorio de Maquinas y Herramientas para:

- Implementar el laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM con prácticas de Procesos de Manufacturas II, que facilitará el aprendizaje de los estudiantes en lo correspondiente a conformación plástica de materiales.
- Complementar el aprendizaje, así como generar nuevas experiencias a los estudiantes del DECEM que actualmente cursan la asignatura de Procesos de Manufactura II.
- Contribuir a la Escuela Politécnica del Ejercito (ESPE) y a la Carrera de Ingeniería Mecánica del DECEM con el desarrollo constante en los laboratorios.
- Realizar prácticas de extrusión directa, inversa y mixta en donde el estudiante adquiera experiencia en el área metalmeccánica.
- Aprovechar al máximo las instalaciones del laboratorio de Maquinas y Herramientas

1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance de este proyecto es el diseño y construcción de un equipo para la extrusión directa, inversa y mixta, en frio de perfiles metálicos no ferrosos para el Laboratorio de Máquinas y Herramientas del DECEM que permita la consolidación de los conocimientos de procesos de manufactura.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 PROCESOS DE MANUFACTURA SIN ARRANQUE DE VIRUTA

A continuación se puntualiza brevemente los principales procesos de manufactura sin arranque de viruta:

Procesos sin arranque de viruta:

- Sinterizado
- Fundición
- Laminado
- Trefilado
- Doblado
- Rolado
- Embutición
- Forja
- Recalcado
- Perforado
- Estampado
- Extrusión

2.1.1 SINTERIZADO

El sinterizado es un tratamiento sólido de un polvo previamente compactado a una temperatura inferior a la fusión del constituyente principal en la cual sus partículas se unen por fenómenos de soldadura en estado sólido. En la fabricación de cerámicas, este tratamiento térmico transforma de un producto en polvo en otro compacto y coherente. La sinterización se utiliza de modo generalizado para producir formas cerámicas de alúmina, berilia, ferrita y titanatos (figura 2.1). En el proceso, la difusión atómica en estado sólido tiene

lugar entre las superficies de contacto de las partículas a fin de que resulten químicamente unidas.



Figura 2.1 Pastilla de freno de material cerámico sinterizado ¹

2.1.2 FUNDICIÓN

Es la introducción de un material fundido en una cavidad previamente preparada o molde, en donde solidifica. Pueden producirse formas intrincadas de casi cualquier tamaño a partir de una material que pueda fundirse.

Estos metales son: Hierro, acero, aluminio, bronce, cobre, latón, magnesio, zinc, etc.

Para la fundición debe fabricarse un molde con cavidad con la forma y tolerancias de la pieza ya que esta contrae cuando enfría. El material del molde debe ser refractarios y los equipos con temperatura adecuada, más un ventero adecuado para evacuar aire y gases de fundición, en la figura 2.2 se muestra un ejemplo de fundición en arena.

De más está decir que el molde debe permitir el retiro de la colada y para luego hacer operaciones de eliminación de sobrantes.

¹Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizaci%C3%B3n>

Hay seis tipos de procesos de colado:

- Fundición en arena
- Fundición en molde permanente
- Fundición en matriz
- Fundición por centrifugado
- Fundición por revestimiento(cera perdida)
- Fundición por casquete(o vaina)

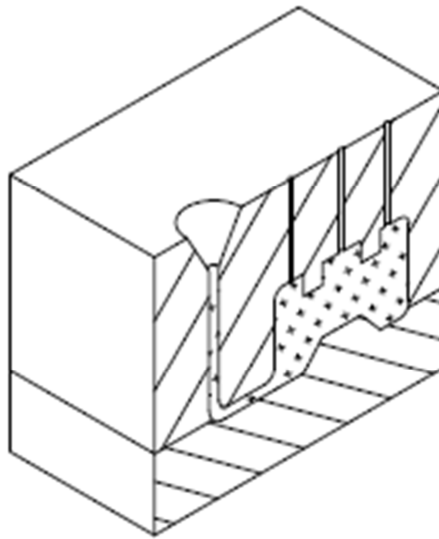


Figura 2.2 Fundición²

2.1.3 LAMINADO

El laminado es un proceso de deformación volumétrica en el que se reduce el espesor inicial del material trabajado mediante las fuerzas de compresión que ejercen dos rodillos sobre la pieza/material de trabajo (en la figura 2.3 se muestra un ejemplo de laminado). Los rodillos giran en sentidos opuestos para que fluya el material entre ellos, ejerciendo fuerzas de compresión al pasar entre ellos y de cizallamiento originadas por el rozamiento que se produce entre los rodillos y el metal. Los procesos de laminado requieren gran inversión de capital, debido a ello los molinos de laminado se usan para la producción de grandes cantidades de productos estándar (láminas, placas, etc.).

²Fuente: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/2.1%20Procesos%20de%20Fabricacion.pdf>

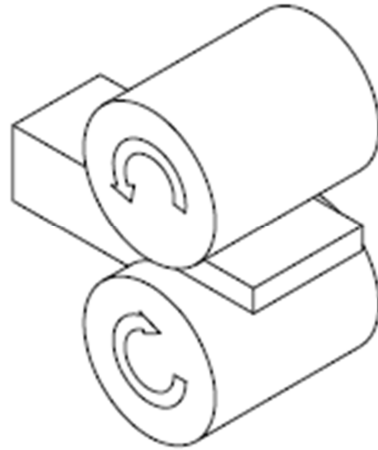


Figura 2.3 Laminado³

2.1.4 TREFILADO

Es la operación de conformación en frío consistente en la reducción de sección de un alambre o varilla haciéndolo pasar a través de un orificio cónico practicado en una herramienta llamada hilera o dado.

Los materiales más utilizados para su conformación mediante trefilado son el acero, el cobre, el aluminio y los latones, aunque puede aplicarse a cualquier metal o aleación dúctil, en la figura 2.4 se muestra un ejemplo de cómo es el trefilado.

El trefilado propiamente dicho consiste en el estirado del alambre en frío, por pasos sucesivos a través de hileras, dados o trefilas de carburo de tungsteno cuyo diámetro es paulatinamente menor. Esta disminución de sección da al material una cierta acritud en beneficio de sus características mecánicas.

³Fuente: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/2.1%20Procesos%20de%20Fabricacion.pdf>

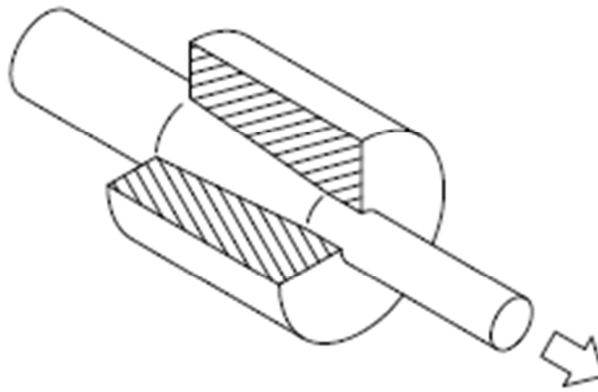


Figura 2.4 Trefilado⁴

2.1.5 DOBLADO

En el trabajo con laminas de metal el doblado se define como la deformación del metal alrededor de un eje recto, en la figura 2.5 se muestra un ejemplo de cómo es el proceso de doblado, durante la operación de doblado el metal dentro del plano neutral se comprime, mientras que el metal por fuera del plano neutral se estira. El metal se deforma plásticamente, así que el doblado toma una forma permanente al remover los esfuerzos que lo causaron. El doblado produce poco o ningún cambio en el espesor de la lamina metálica

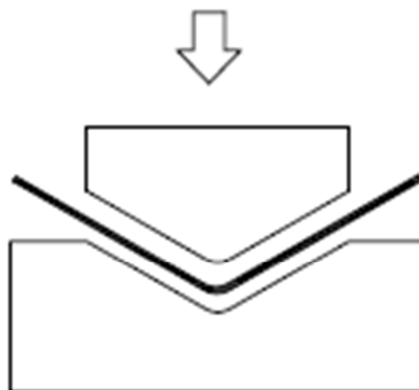


Figura 2.5 Doblado⁵

⁴Fuente,⁵Fuente: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/2.1%20Procesos%20de%20Fabricacion.pdf>

2.1.6 ROLADO

Es un proceso de conformado mecánico por flexión, mediante el cual se deforma una lámina metálica y se le da forma de superficie desarrollable, considerando como tal, la que puede extenderse sobre un plano sin sufrir deformación, figura 2.6.

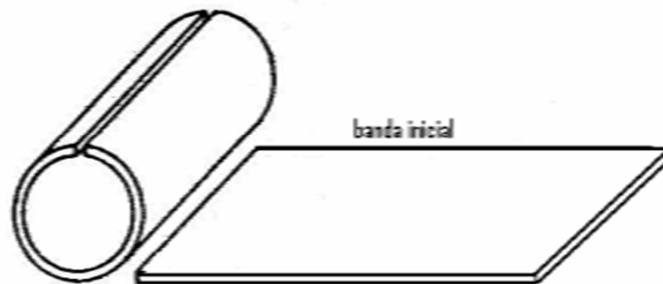


Figura 2.6 Rolado⁶

2.1.7 EMBUTICIÓN

Es el proceso mecánico con el que se da a una chapa delgada la forma hueca de una pieza mediante presión; se realiza con una prensa en la que se fija un punzón con la forma interior de la pieza que se quiere reproducir, y que presiona la chapa hasta darle la misma forma que el punzón, en la figura 2.7 se muestra un ejemplo de embutición.

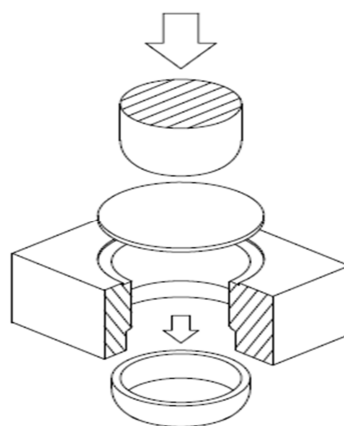


Figura 2.7 Embutición⁷

⁶Fuente,⁷ Fuente: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/2.1%20Procesos%20de%20Fabricacion.pdf>

2.1.8 FORJA

Forjado es un proceso de deformación donde se comprime entre dos dados el material de trabajo, usando para esto un impacto para formar el producto, este proceso permite la fabricación de gran cantidad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales, y otras aplicaciones, en la figura 2.8 se muestra un ejemplo gráfico de como se da el proceso de forja. También podemos ver que industrias de aceros y otros metales básicos usan el forjado para fijar la forma básica de grandes piezas para luego maquinar, obteniendo su forma y dimensiones definitivas.

El forjado se lleva a efecto de distintas maneras, la mayoría de las operaciones se realiza en caliente (por arriba y por debajo de la temperatura de cristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, sin embargo, el forjado en frío también es muy común para ciertos productos, la ventaja del forjado en frío es la mayor resistencia del componente que resulta del endurecimiento por deformación.

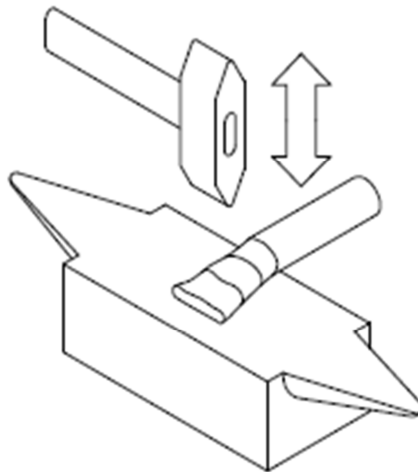


Figura 2.8 Forjado⁸

⁸Fuente: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/2.1%20Procesos%20de%20Fabricacion.pdf>

2.1.8.1 Recalcado

Consiste en la concentración o acumulación de material en una zona determinada y limitada de una pieza (normalmente en forma de barra, figura 2.9a). Por tanto, una consecuencia directa de este proceso es que disminuye la longitud de la barra inicial y aumenta la sección transversal de ésta en la zona recalçada. Las piezas más usuales son cabezas de tornillos, planchas de blindaje, bulones, remaches, clavos, etc., figura 2.9b.

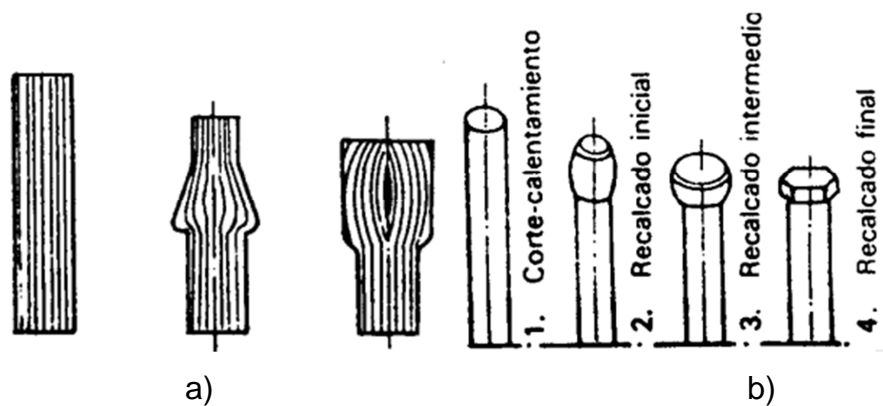


Figura 2.9 Recalcado

a) Operación de recalcado a partir de una barra, b) Obtención de la cabeza de un perno⁹

2.1.8.2 Perforado

El método de perforado se usa para la realización de agujeros en la mayoría de materiales. Una aplicación importante es la construcción de tubería sin costura figura 2.10, la cual es usada en trabajos de alta presión y temperatura como también para transportar gas y líquidos químicos.



Figura 2.10 Perforado

Tubos sin costura¹⁰

⁹Fuente: *Estampado en frío de la chapa Mario Ross, 8va edición.*

¹⁰Fuente: http://www.tranox.de/_es/04_04.html.

2.1.8.3 Estampado

La estampación es un tipo de proceso de fabricación por el cual se somete un metal a una carga de compresión entre dos moldes, figura 2.11. La carga puede ser una presión aplicada progresivamente, para lo cual se utilizan prensas y martinets. Los moldes, son estampas o matrices de acero, una de ellas deslizante a través de una guía (martillo o estampa superior) y la otra fija (yunque o estampa inferior).

Si la temperatura del material a deformar es mayor a la temperatura de recristalización, se denomina estampación en caliente, y si es menor se denomina estampación en frío.

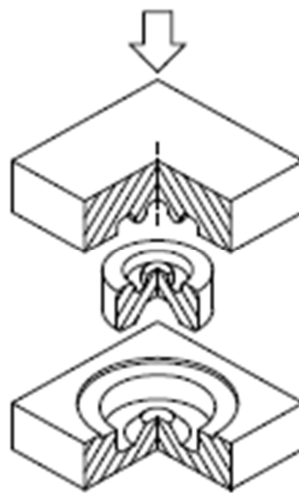


Figura 2.11 Estampado¹¹

2.1.8.4 Extrusión

La extrusión es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de una matriz de una sección transversal deseada.

Las dos ventajas principales de este proceso por encima de procesos manufacturados son la habilidad para crear secciones transversales muy complejas y el trabajar con materiales dúctiles, que hacen posible su

¹¹ Fuente: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/2.1%20Procesos%20de%20Fabricacion.pdf>

deformación plástica, porque el material solamente encuentra fuerzas de compresión y de cizallamiento. También las piezas finales se forman con una terminación superficial excelente, en la figura 2.12 se muestra ejemplos de perfiles de aluminio extruidos.

El proceso de extrusión puede hacerse con el material caliente o frío.

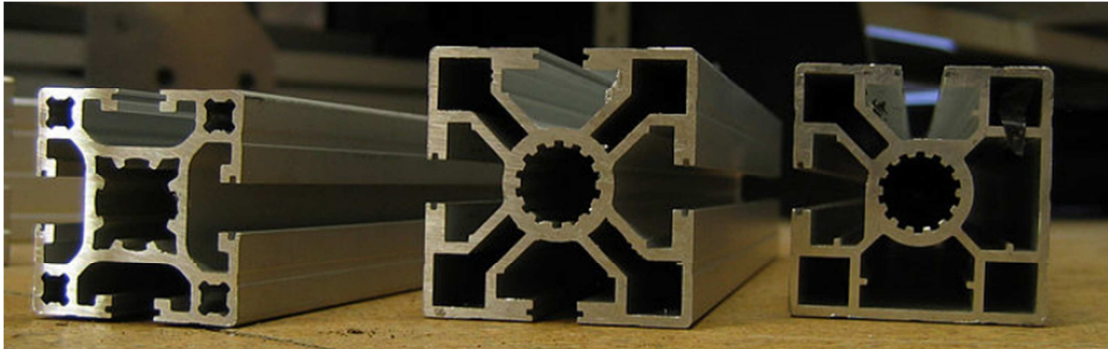


Figura 2.12 Perfiles de aluminio extruidos¹²

2.2 PRENSAS USADAS PARA LA EXTRUSIÓN

La gran parte de los procesos de extrusión en caliente y frío 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.

Las prensas verticales producen también enfriamiento homogéneo del material extruido, logrando con ello una deformación simétricamente uniforme.

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

¹²Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Extruded_aluminium_section_x3.jpg

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 frío y caliente son seleccionadas en términos de su capacidad de fuerza, esto es la fuerza que la prensa es capaz de aplicar sobre el punzón. Sin embargo el proceso de extrusión en si depende de la presión ejercida sobre el metal a extruir.

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.

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

2.3 DELIMITACIÓN ENTRE EXTRUSIÓN EN CALIENTE Y EXTRUSIÓN EN FRÍO

La extrusión en caliente y la extrusión en frío se encuentran delimitadas por la temperatura de recristalización.

La temperatura de recristalización de un metal determina si el trabajo en caliente o en frío está siendo cumplido o no. El trabajo en caliente de los metales toma lugar por encima de la recristalización o rango de endurecimiento por trabajo.

El trabajo en frío debe hacerse a temperaturas por debajo del rango de recristalización y frecuentemente es realizado a temperatura ambiente. Para el acero, la recristalización permanece alrededor de 500°C a 700°C, aunque la mayoría de los trabajos en caliente del acero se hacen a temperaturas considerablemente arriba de este rango. Para el aluminio y plomo la temperatura de recristalización es:

$$T_{\text{recristalización}} = (0.4 - 0.5)T_f \quad (\text{Ec 2.1})$$

donde:

T_f es la temperatura de fusión ($T_{f\text{Aluminio}} = 660^\circ\text{C}$ - $T_{f\text{Plomo}} = 330^\circ\text{C}$)

No existe tendencia al endurecimiento por trabajo mecánico hasta que el límite inferior del rango recristalino se alcanza. Algunos metales, tales como el plomo y el estaño, tienen un bajo rango recristalino y pueden trabajarse en caliente a temperatura ambiente, pero la mayoría de los metales comerciales requieren de algún calentamiento.

Las composiciones aleadas tienen una gran influencia sobre todo en el rango de trabajo conveniente, siendo el resultado acostumbrado aumentar la temperatura del rango recristalino. Este rango también puede incrementarse por un trabajo anterior en frío.

2.4 VELOCIDADES DE EXTRUSIÓN

Las velocidades son esenciales para la extrusión en caliente. Una velocidad excesiva puede causar un sobrecalentamiento del material extruido, 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 del material extruido.

Velocidades bajas reducen también la vida de la herramienta por el prolongado tiempo de contacto entre el material extruido caliente con la matriz y el contenedor. Las velocidades de extrusión para algunos materiales se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 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

Fuente:<http://ingivanfuentes.es.tl/EXTRUSION.htm>

2.5 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 a través de 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 matriz partida.

La figura 2.13a muestra el diagrama de flujo, obtenido en la extrusión directa con matriz plana

La figura 2.13b corresponde al caso de la extrusión con los elementos bien lubricados. 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.

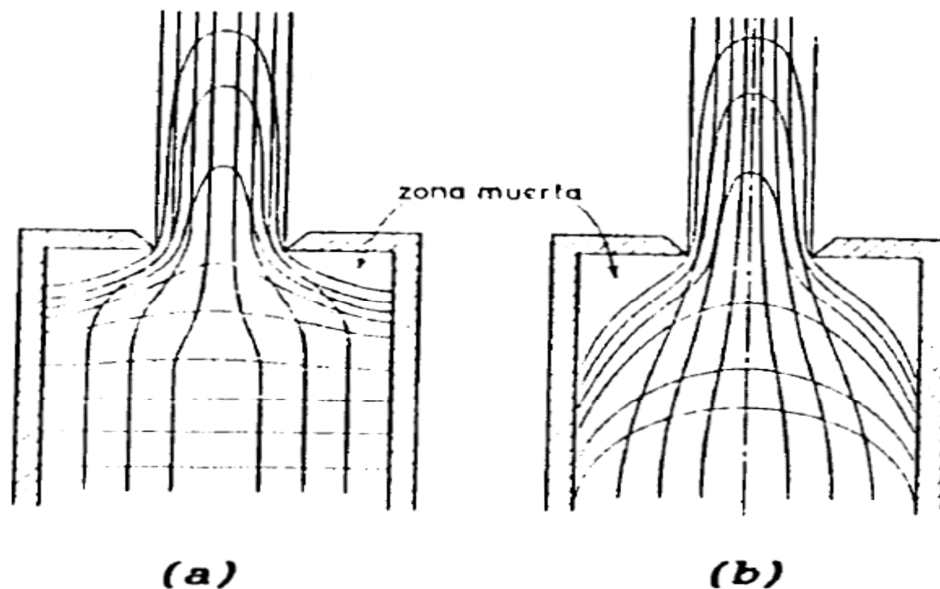


Figura 2.13 Diagramas de flujo de material en la extrusión con lubricación y sin lubricación¹³

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

¹³Fuente: *Estampado en frío de la chapa* Mario Ross, 8va edición.

Los elementos próximos a los lados del punzón 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 el punzón al formar el producto extruido.

Esta 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 el punzón y las paredes de la matriz es elevada, se produce un intenso cizallamiento el flujo del metal a través del dado de extrusión, lo que origina una zona muerta mayor como se ve en la figura 2.13b.

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 del punzón. 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 60°.

En la extrusión indirecta no hay fricción entre el punzón y las paredes del cuerpo de extrusión. Con una matriz plana existe una zona muerta, como la de la figura 2.13a y el flujo no es uniforme.

La deformación tiende a ser no homogénea. La no homogeneidad es, en general, una función de la razón h/L (altura media h sobre la longitud comprimida L). En la figura 2.14 h es igual al diámetro medio $(d_0 + d_1)/2$, donde la deformación es no homogénea cuando la razón h/L es grande (Figura 2.14b). En toda la deformación no homogénea, existe trabajo redundante necesario para crear la deformación interna que no se muestra en la forma externa.

Puesto que ahora la deformación se concentra en las zonas exteriores, éstas se alargan de modo directo, mientras que el centro de la extrusión no se deforma directamente sino que lo arrastra el material de la superficie. Esto genera esfuerzos de tensión secundarios en el núcleo, el cual finalmente sufre una fractura en punta de flecha característica (también se describe como defecto de estallido central, Figura 2.14b).

El peligro es mayor cuando $h/L \geq 2$. La situación se puede remediar disminuyendo la razón h/L , lo cual implica una reducción más grande de esta manera h menor y L mayor (Figura 2.14c). Con un componente de geometría fija, ninguna de estas soluciones es permisible; entonces, la única esperanza es el uso de un material más dúctil.

Cuando la carrera de extrusión se lleva demasiado lejos, el flujo no homogéneo del material conduce a la generación de un rechupe concéntrico (Figura 2.14d).

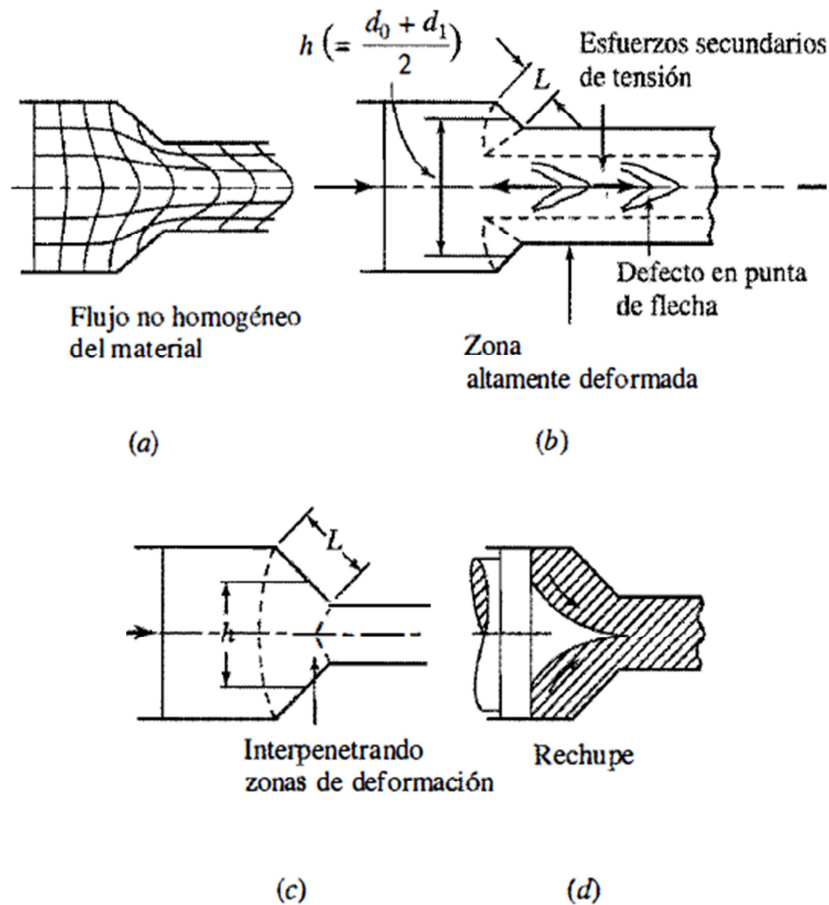


Figura 2.14 La deformación no homogénea en la extrusión¹⁴

resulta en a) la aceleración del centro y, si el material tiene ductilidad limitada, puede conducir a b) defectos internos (en punta de flecha) en razones h/L elevadas. c) El desarrollo de presión hidrostática asegura un buen producto en razones h/L bajas, d) Un rechupe se forma si la extrusión se lleva demasiado lejos.

Cuando hay huellas de lubricante en la extrusión no lubricada, se forma una zona parcial de metal muerto, el lubricante atrapado en la frontera de dicha zona se extruye en el producto para formar defectos subsuperficiales. Con el calentamiento subsecuente, los gases causan ampollamiento en estas localizaciones.

¹⁴Fuente: *Procesos de Manufactura*, John A. Schey, 3ed.

2.5.1 DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR EFECTOS DEL TRABAJO EN FRÍO

En consecuencia directa del trabajo o de la deformación, se habla de endurecimiento por trabajo o endurecimiento por deformación. La razón de ello se encuentra en el mecanismo de la deformación plástica.

Un material sometido al trabajo en frío también se endurece por deformación. La densidad de dislocaciones se incrementa y cuando se realice un ensayo de tensión en el material, se necesitará un esfuerzo mayor para iniciar y mantener la deformación plástica; de esta manera, el límite de fluencia se incrementa. El endurecimiento por deformación es importante debido a que el metal dúctil se hace más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente.

Puesto que muchos materiales trabajados en frío retienen un nivel razonable de ductilidad, el trabajo en frío ofrece al diseñador un método de bajo costo para obtener materiales de resistencia elevada. Sin embargo, existe un precio que hay que pagar: el incremento del esfuerzo de fluencia puede generar presiones excesivas en las herramientas, y la reducción de la ductilidad puede causar la fractura de la pieza de trabajo.

2.6 EXTRUSIÓN EN CALIENTE

La extrusión en caliente se hace a temperaturas elevadas para evitar el trabajo forzado y hacer más fácil el paso del material a través del troquel. La mayoría de la extrusión en caliente se realiza en prensas hidráulicas horizontales con rango de 250 a 12.000 ton. Rangos de presión de 30 a 700 Mpa (4400 a 102.000 psi), por lo que la lubricación es necesaria, puede ser aceite o grafito para bajas temperaturas de extrusión, o polvo de cristal para altas temperaturas de extrusión. La mayor desventaja de este proceso es el costo de las maquinarias y su mantenimiento.

Tabla 2.2 Temperaturas de varios metales en la extrusión en caliente

Material	Temperatura [°C (°F)]
Magnesio	350-450 (650-850)
Aluminio	350-500 (650-900)
Cobre	600-1100 (1200-2000)
Acero	1200-1300 (2200-2400)
Titanio	700-1200 (1300-2100)
	1000-1200 (1900-2200)
Aleaciones Refractarias	Mayores a 2000 (4000)

Fuente: <http://ingivanfuentes.es.tl/EXTRUSION.htm>

Se hace fluir el material que previamente se ha calentado hasta una temperatura entre la de cristalización y la de fusión (Tabla 2.2). El sitio por donde fluye es la matriz, que tendrá la sección de la pieza. Es un método muy empleado por el que se obtienen gran cantidad de piezas.

Se pueden usar metales básicos o en combinación de otros como aleantes, siendo los más utilizados el aluminio, cobre, cinc, estaño y níquel, así como sus aleaciones, dependiendo del tipo de metal utilizado la facilidad para extruir.

Las prensas de extrusión en caliente son específicas para este proceso. Son de tipo horizontal y disponen de un cabezal fijo, un contenedor que es donde se pone el lingote, una matriz que es donde se prensa y un punzón que va a empujar a ese lingote.

2.7 EXTRUSIÓN EN FRÍO

Consiste en obligar a una porción de material colocado en el fondo de una matriz a deformarse plásticamente y extenderse entre las paredes de la matriz y las del punzón que la comprime.

Se suele utilizar para producir piezas metálicas, frecuentemente en forma terminada o casi terminada, piezas de vehículos, máquinas textiles,

electrodomésticas y perfiles extrusionados para la construcción arquitectónica e ingenieril.

Los materiales que son comúnmente tratados con extrusión fría son: plomo, estaño, aluminio, cobre, circonio, titanio, molibdeno, berilio, vanadio, niobio y acero.

Algunos ejemplos de productos obtenidos por este proceso son: los tubos plegables, el extintor de incendios, cilindros del amortiguador, pistones automotores, entre otros.

2.7.1 TIPOS DE EXTRUSIÓN EN FRÍO

2.7.1.1 Extrusión Directa

Un tocho de metal se carga a un recipiente y un pistón comprime el material forzándolo a fluir a través de una aberturas que hay en un dado situado al extremo opuesto del recipiente (figura 2.15). Al aproximarse el pistón al dado, una pequeña porción del tocho permanece y no puede forzarse a través de la abertura del dado. Esta porción extra llamada tope o cabeza, se separa del producto, cortándola justamente después de la salida del dado.

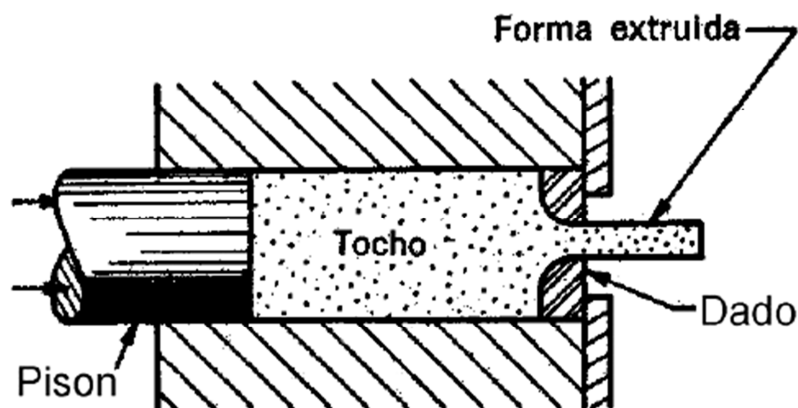


Figura 2.15 Extrusión Directa¹⁵

¹⁵ Fuente: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-323.pdf>

Un problema en la extrusión directa es la gran fricción que existe entre el tocho y la pared interna del recipiente al forzar el deslizamiento del tocho hacia la abertura del dado. Esta fricción ocasiona un incremento sustancial de la fuerza requerida en el pistón para la extrusión directa.

En la extrusión directa se pueden hacer secciones huecas (por ejemplo, tubos) por medio del proceso que se ilustra en la figura 2.16. El tocho inicial se prepara con una perforación paralela a su eje.

Esto permite el paso de un mandril que se fija en el bloque simulado. Al comprimir el tocho, se fuerza al material a fluir a través del claro entre el mandril y la abertura del dado. La sección transversal resultante es tubular. Otras formas semi-huecas se extruyen usualmente de esta misma manera.

El tocho inicial en la extrusión directa es generalmente redondo, pero la forma final queda determinada por la abertura del dado. Obviamente la dimensión más grande de la abertura del dado debe ser más pequeña que el diámetro del tocho. La extrusión directa hace posible una infinita variedad de formas en la sección transversal.

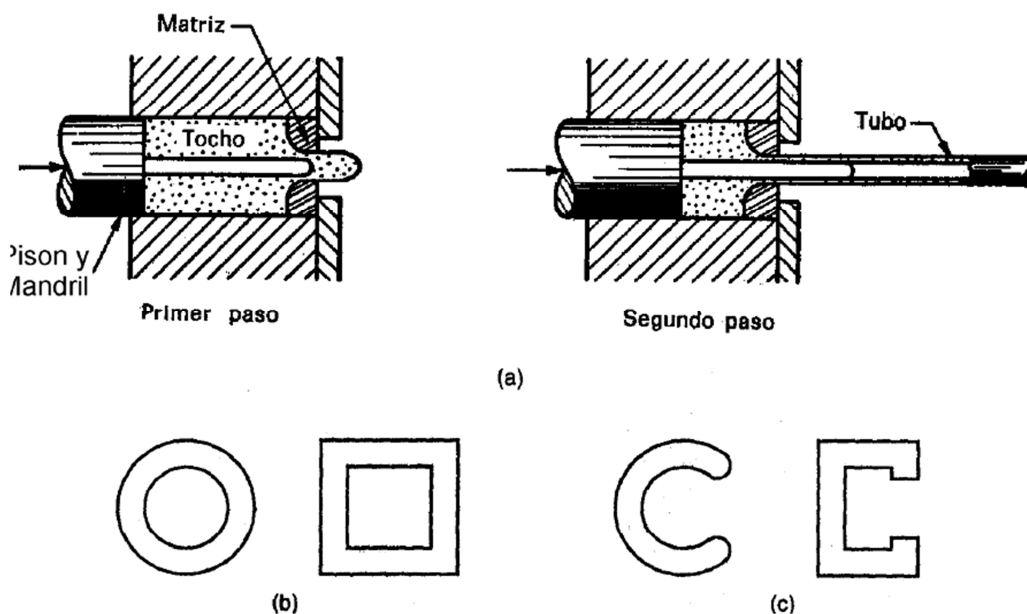


Figura 2.16 Perfiles obtenidos en la extrusión directa

(a) Extrusión directa para producir una sección transversal hueca o semi-hueca; (b) hueca y (c) semi-hueca¹⁶

¹⁶ Fuente: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecnologia/II/PDF/cap-323.pdf>

La presión generada por el punzón sobre las paredes internas de la matriz genera esfuerzos principales, como se muestra en la figura 2.17, donde se tiene que $\sigma_1 = \sigma_2$.

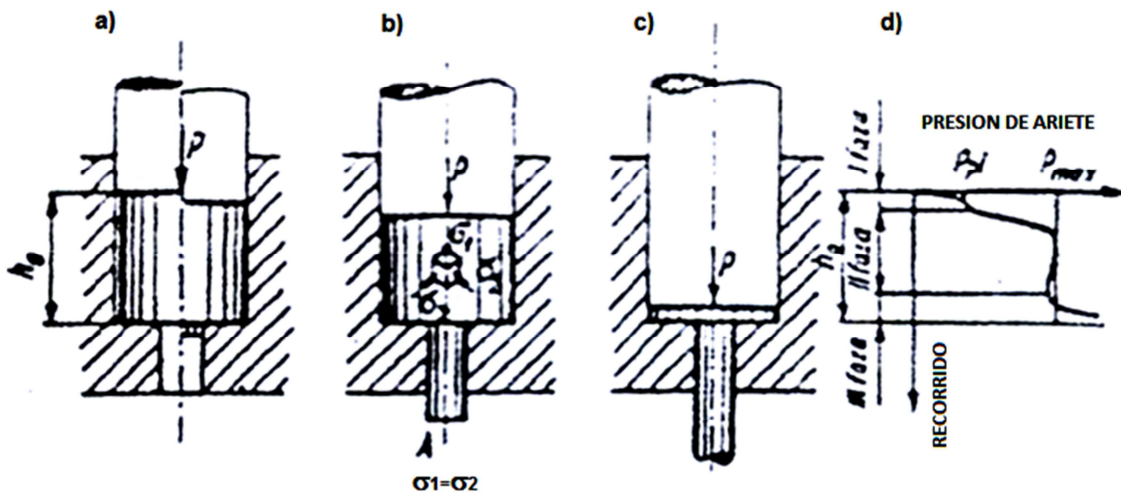


Figura 2.17 Secuencia de extrusión directa de un eje

Secuencia de extrusión directa de un eje

- a) I Fase – Recalcado, b) II Fase – Extrusión, c) III Fase – Terminación de la extrusión, d) Secuencia o curva de la fuerza de extrusión¹⁷

2.7.1.2 Extrusión Inversa

También llamada extrusión hacia atrás o extrusión inversa, el dado está montado sobre el pisón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente, figura 2.18. Al penetrar el pisón en el material de trabajo fuerza al metal a fluir a través del claro en una dirección opuesta a la del pisón. Como el tocho no se mueve con respecto al recipiente, no hay fricción en las paredes del recipiente. Por consiguiente, la fuerza del pisón es menor que en la extrusión directa.

Las limitaciones de la extrusión indirecta son impuestas por la menor rigidez del pistón hueco y la dificultad de sostener el producto extruido tal como sale del dado.

¹⁷Fuente: *Conformación plástica en frío*, StanilawErber, KazimierzKuczynski

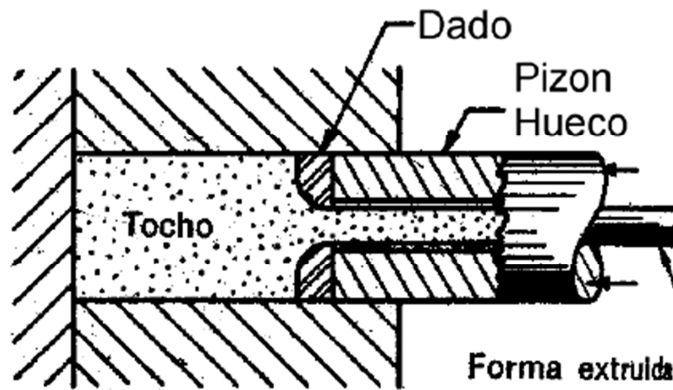


Figura 2.18 Extrusión indirecta para producir una sección transversal sólida¹⁸

La extrusión indirecta puede producir secciones huecas, como las de la figura 2.19. En este método el pistón presiona en el tocho, forzando al material a fluir alrededor del pistón y tomar una forma de copa. Hay limitaciones prácticas en la longitud de la parte extruida que pueden resolverse por este método.

El sostenimiento del pistón se convierte en un problema a medida que la longitud del trabajo aumenta.

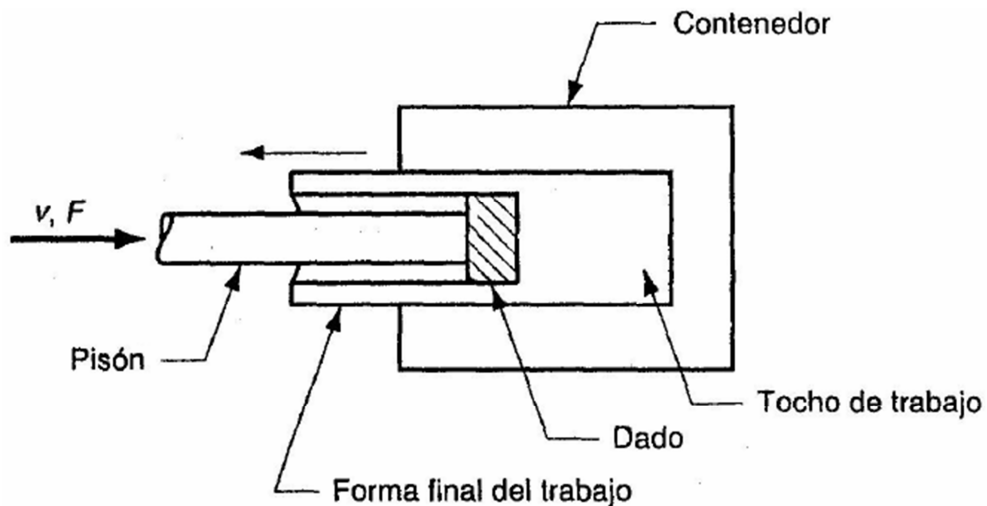


Figura 2.19 Extrusión indirecta para producir una sección transversal hueca¹⁹

¹⁸Fuente: <http://materias.fcyt.umss.edu/extrusionindirecta>

¹⁹Fuente: <http://deformacionplastica.edu>

2.7.1.3 Extrusión Mixta

Existe un tercer sistema combinación de los dos anteriores en el que el material fluye simultáneamente en y contra el sentido de movimiento del embolo, obteniéndose así cuerpos huecos y macizos, paredes de distinto espesor, incluso con rebordes y escalonadas. La figura 2.20 muestra ejemplos de este tipo de extrusión.

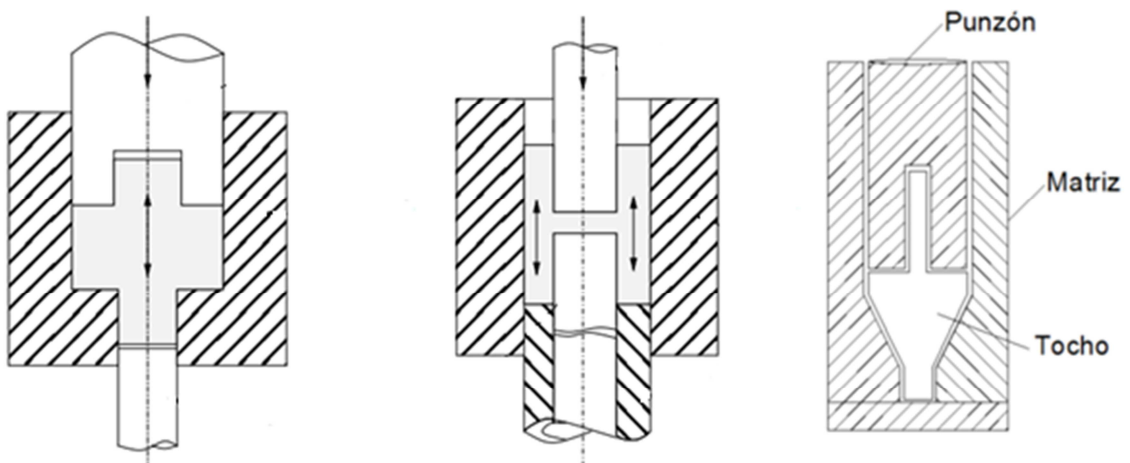


Figura 2.20 Ejemplos de extrusión mixta²⁰

2.7.2 VENTAJAS DE LA EXTRUSIÓN EN FRÍO

Estas son las principales ventajas que posee las piezas de conformación plástica en frío frente a las conformadas en caliente:

- El material como resultado de la deformación plástica adquiere un elevado límite de plasticidad y dureza, como también una adecuada orientación de las fibras moleculares, que influye positivamente en la explotación del producto.
- La principal ventaja es la falta de oxidación lo que se traduce en una mayor fortaleza.

²⁰ Fuente: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1933/1/pcd.pdf>

- Posibilidad de dar a los metales formas a menudo imposible obtenerlas por otros métodos, por ejemplo, modelar tapas, caparazones, cubiertas de pared delgada.
- Buen aprovechamiento del material, ya que se generan muy pocos desperdicios.
- Se elimina la necesidad de operaciones posteriores de mecanizado, debido a que sus acabados dimensionales son muy buenos.
- El acabado superficial es superior al de extrusión en caliente, debido a que carece de capa de óxido.
- Economía del material por existir poco desperdicio, poco peso y racional conformación.
- Posibilidad de crear tensiones residuales, las que favorablemente pueden incidir en el límite de las tensiones permitidas, como en la resistencia a la fatiga de los productos.
- Elevado grado de conformación en una sola operación.
- Menor costo de manufactura en función del gran rendimiento del proceso, corto tiempo unitario y la posibilidad de utilizar personal de baja preparación.
- Larga durabilidad de la herramienta (equipo) y muchos de sus elementos sirven para grandes producciones de objetos. El poco desgaste de la herramienta conformadora permite y garantiza una repetitiva exactitud dimensional de los productos, además, estas herramientas como el punzón y matriz son fáciles de regenerar, por ejemplo, mediante el cromado que le devuelve su dimensión original, o por rectificación se pueden utilizar en otras operaciones

2.7.3 DESVENTAJAS DE LA EXTRUSIÓN EN FRÍO

Aunque la extrusión de piezas en frío tiene un gran peso en la industria, a veces se opta por su conformación en caliente debido a estos principales defectos:

- Menor equilibrio entre fuerzas requeridas, ductilidad y propiedades finales que en laminación tibia.

- Quebraduras de superficie si el material se pega temporalmente al troquel.
- Requerimiento de un posterior tratamiento térmico, mientras en extrusión tibia no es necesario.
- Mayor presión que en extrusión tibia o en caliente y por lo tanto menor ductilidad de la pieza.
- Debe tenerse especial control en el material de la pieza, la condición superficial, precisión dimensional del tocho y su calidad.
- Los esfuerzos requeridos en las matrices son muy grandes.
- Debe tenerse especial cuidado con el diseño de las matrices.
- Alto costo de las matrices, máquinas y equipos, especialmente de las herramientas y equipos de automatización, como también para mantenimiento y operaciones de extrema exactitud que se requiere de personal altamente calificado.
- El proceso de producción debería disponer de cierta flexibilidad, ante el requerimiento de cambiar herramientas y/o equipos para generar nuevos productos.

2.7.4 CARACTERÍSTICAS DE LA PIEZA EXTRUIDA

Las piezas extrudidas en las matrices directas, inversas y mixtas tienen las siguientes características principales:

- Bajo costo de producción comparado con otros procesos metalmecánicos.
- Buen acabado superficial, con relación a las matrices utilizadas y a condiciones iniciales de tochos.
- Bajos tiempos de producción.

2.7.5 CÁLCULO DE FUERZAS NECESARIAS PARA DEFORMAR PLÁSTICAMENTE A LOS MATERIALES A EXTRUIR

Deformación plástica se la llama a aquella que es permanente, que subsiste en el material luego de cesar la fuerza que la provocó.

Analizando el efecto de la tracción uniaxial sobre una probeta cilíndrica de sección A_0 y largo L_0 , se puede tener un concepto más claro de la deformación plástica.

Si la fuerza axial no sobrepasa cierto valor límite F_0 , entonces el alargamiento de la probeta provocado por la acción de la fuerza $F < F_0$ está en el límite elástico, donde la probeta retorna a su largo inicial L_0 al cesar la fuerza F .

Si la fuerza axial es mayor a F_0 , entonces la relación del incremento del largo de la probeta con el valor de F se observa en el diagrama 2.21 como la línea OAB.

El incremento total del largo L_0 es la suma del alargamiento elástico y plástico:

$$\Delta l = \Delta l_{\text{elast}} + \Delta l_{\text{plast}} \quad (\text{Ec 2.2})$$

Al terminar la carga en el diagrama 2.21 el gráfico corresponde al segmento BC donde el alargamiento elástico desaparece, pero se mantiene el alargamiento plástico Δl_p . Por lo tanto la probeta tendrá el largo:

$$L = L_0 + \Delta l_{\text{plast}} \quad (\text{Ec 2.3})$$

Paralelamente con el incremento del largo, disminuye la sección transversal A . Por cuanto la deformación plástica produce únicamente un cambio mínimo de la densidad del material, se puede aceptar con aproximación que su volumen no depende de las deformaciones plásticas presentadas.

Entonces se presentan las relaciones siguientes:

$$A=A_0 (L_0/L) \quad (\text{Ec 2.4})$$

Si se realiza las comparaciones correspondientes del largo de la probeta l, o de la sección A con el largo L_0 o con la sección A_0 respectivamente, se pueden obtener coeficientes diferentes, que caracterizan la deformación plástica de la probeta.

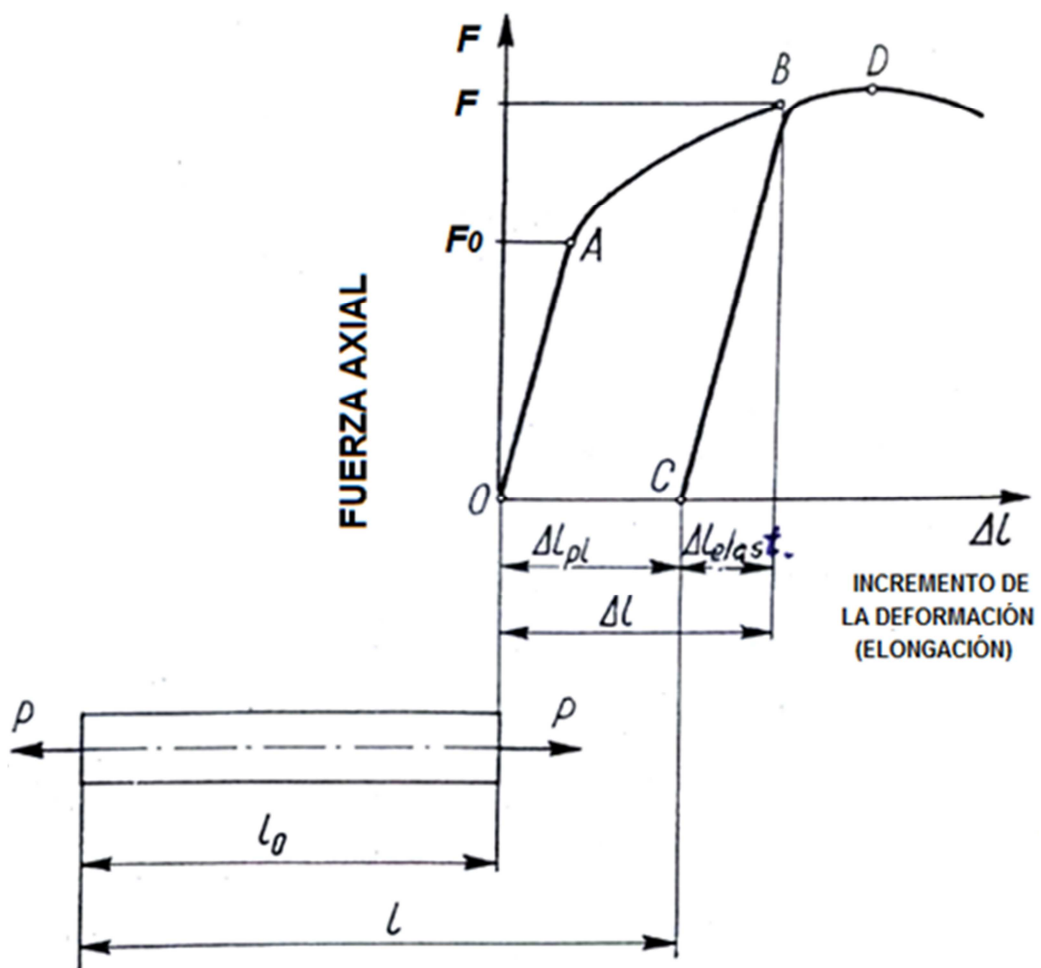


Figura 2.21 Diagrama tracción Axial²¹

²¹ Fuente: Conformación plástica en frío, Stanilaw Erber, Kazimierz Kuczynski

2.7.5.1 Cálculo ingenieril de la fuerza de extrusión

En el cálculo ingenieril para la fuerza de extrusión en frío no se consideran fuerzas de rozamiento y se la obtiene al aplicar la siguiente fórmula:

$$F = p * A_o \quad (\text{Ec 2.5})$$

donde:

p = Presión Unitaria en Kg/mm² obtenida de la tabla 2.3.

Ao = área transversal de la sección del material de inicio en mm²

Tabla 0.3 Presión unitaria para extrusión en frío en Kg/mm²

Forma de Extrusión	Aluminio	Cobre	Bronce	Acero 0,2% C	Acero 0,5% C
Directa	40 - 60	80 - 100	100 - 190	170 - 180	200 - 220
Indirecta	80 - 120	150 - 200	200 - 250	220 - 230	260 - 280

Fuente: Conformación plástica en frío, StanilawErber, KazimierzKuczynski

2.7.5.2 Cálculo real de las fuerzas de extrusión

El diagrama asume que tanto el tocho como la extrusión tienen una sección redonda transversal.

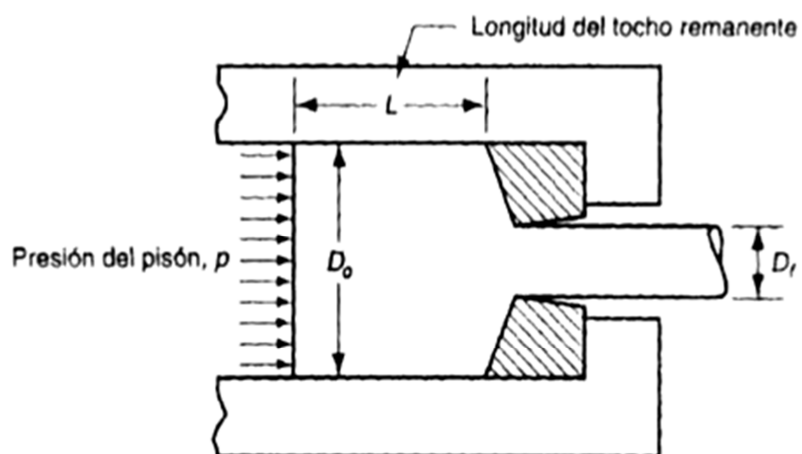


Figura 2.22 Parámetros importantes para la extrusión²²

²²Fuente: proceso de manufactura, JOHN A. SCHEY. 3ed

Un parámetro importante es la relación de extrusión también llamada relación de reducción. La relación se define como:

$$R_x = \frac{A_o}{A_f} \quad (\text{Ec 2.6})$$

donde:

R_x = relación de extrusión;

A_o = área de la sección transversal del tocho inicial, (mm²);

A_f = área final de la sección recta de la parte extruida, (mm²).

La relación se aplica tanto para la extrusión directa como para la indirecta. El valor de R_x se puede usar para determinar el esfuerzo real en la extrusión, dado que la deformación ideal ocurre sin fricción y sin trabajo redundante:

$$\varepsilon = \ln(R_x) \quad (\text{Ec 2.7})$$

La presión aplicada por el pistón para comprimir el tocho a través de la abertura del dado se describe en la figura 2.22 y se puede calcular bajo la suposición de deformación ideal como sigue:

$$P = \bar{Y}f * \varepsilon \quad (\text{Ec 2.8})$$

donde:

$\bar{Y}f$ = esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, (MPa).

De hecho, la extrusión no es un proceso sin fricción, y las ecuaciones anteriores subestiman totalmente la deformación y la presión en una operación de extrusión. La fricción existe entre el dado y el material de trabajo, a medida que el tocho se comprime y pasa a través de la abertura del dado. En la extrusión directa, también existe la fricción entre la pared interna del contenedor y la superficie del tocho.

La fricción incrementa la deformación experimentada por el metal. Por tanto, la fuerza real es mayor que la obtenida en la ecuación 2.8, que supone una extrusión sin fricción.

La siguiente ecuación empírica propuesta por Johnson para estimar la deformación de extrusión ha ganado considerable reconocimiento:

$$\epsilon x = a + b \ln(Rx) \quad (\text{Ec 2.9})$$

donde;

ϵx = deformación real de extrusión, a y b son constantes empíricas para el ángulo del dado. Los valores típicos de estas constantes son $a = 0.8$ y $b = 1.2$ a 1.5 . Los valores de a y b tienden a aumentar cuando se incrementa el ángulo del dado.

La presión del pistón para desempeñar la extrusión indirecta se puede estimar con base en la fórmula de Johnson para la deformación de extrusión como sigue:

$$P = \bar{Y}f * \epsilon x \quad (\text{Ec 2.10})$$

$$\bar{Y}f = \frac{K}{\epsilon} * \left[\frac{\epsilon^{n+1}}{n+1} \right] \quad (\text{Ec 2.11})$$

donde:

K = el coeficiente de resistencia.

n = el exponente de endurecimiento por deformación.

En la extrusión directa, el efecto de fricción entre las paredes del recipiente y el tocho ocasiona que la presión del pistón sea más grande que para la extrusión indirecta, en la tabla 2.4 se pueden encontrar propiedades de manufactura de varias aleaciones no ferrosas.

Se puede escribir la siguiente expresión que aísla la fuerza de fricción en el recipiente de la extrusión directa.

$$\frac{P_f \pi D_o^2}{4} = \mu p_o \pi D_o L \quad (\text{Ec 2.12})$$

donde:

P_f = presión adicional requerida para superar la fricción, (MPa);

$\pi D_o^2 / 4$ = área de la sección transversal del tocho, (mm²);

μ = coeficiente de fricción en la pared del recipiente;

p_o = presión del tocho contra la pared del contenedor,

$\pi D_o L$ = área de la interfase entre el tocho y la pared del recipiente, (mm²).

El miembro a la derecha de la ecuación indica la fuerza de fricción entre el tocho y la pared del contenedor, el lado izquierdo, la fuerza adicional del pisón para superar dicha fricción. En el peor de los casos, ocurre adherencia a la pared del recipiente con lo cual el esfuerzo de fricción iguala la resistencia a la fluencia cortante del metal de trabajo:

$$\mu p_o \pi D_o L = Y_s \pi D_o L \quad (\text{Ec 2.13})$$

donde:

Y_s = resistencia a la fluencia cortante, (MPa).

Si se asume que $Y_s = \bar{Y}f / 2$, entonces P_f reduce a:

$$P_f = \bar{Y}f \frac{2L}{D_o} \quad (\text{Ec 2.14})$$

De tal manera se puede usar la siguiente fórmula para calcular la presión del pisón en la extrusión directa:

$$P = \bar{Y}f \left(\epsilon x + \frac{2L}{D_o} \right) \quad (\text{Ec 2.15})$$

donde:

El término $2L/D_o$ representa la presión adicional debida a la fricción en la interface contenedor - tocho. L es la porción de la longitud del tocho remanente para extruirse y D_o es el diámetro original del tocho.

Nótese que P disminuye al reducirse la longitud remanente del tocho durante el proceso.

En la figura 2.23 se presentan las curvas típicas de la presión del pistón en función de la carrera del pistón para la extrusión directa e indirecta. La ecuación 2.16 probablemente sobrestima la presión del pistón. Las presiones podrían ser menores que los valores calculados por la ecuación 2.15 con una buena lubricación.

La fuerza del pistón en la extrusión directa, indirecta y mixta es simplemente la presión p de la ecuación multiplicada por el área del tocho A_o .

(Ec 2.16)

Las ecuaciones previas para la presión del pistón, ecuaciones 2.15 y 2.16, se aplican a los orificios circulares del dado. La forma del orificio del dado afecta la presión requerida del pistón en una operación de extrusión. Una sección transversal compleja, figura 2.16(c), requiere más presión y fuerza que una sección circular. El efecto de la forma del orificio del dado puede valorarse por el factor de forma, definido como la relación entre la presión requerida para extruir una sección transversal de la forma dada y la presión de extrusión para una sección redonda de la misma área. Podemos expresar el factor de forma como sigue:

— **(Ec 2.17)**

donde:

K_x = factor de forma del dado en extrusión;

C_x = perímetro de la sección transversal extruida, (mm);

C_c = perímetro de un círculo de la misma área que la forma extruida, (mm)

$\frac{C_x}{C_c}$

de 1.0 hasta cerca de 6.0. La ecuación puede no ser válida para valores mayores al límite superior de esta escala.

Como indica la ecuación 2.17, el factor de forma es una función del perímetro de la sección transversal del material extruido, dividida por el perímetro de una sección circular de área igual. Una forma circular es la forma más simple con un valor de $K_x = 1.0$. Las secciones huecas de superficies delgadas tienen factores de forma más altos y difíciles de extruir.

El aumento de la presión no se incluye en ecuaciones anteriores, los cuales se aplican solamente para secciones transversales redondas, ecuación 2.15. Para formas distintas a la redonda la expresión correspondiente para una extrusión indirecta es:

$$F = K_x \hat{Y}_f \varepsilon_x \quad (\text{Ec 2.18})$$

En el diseño del equipo extrusor para este proyecto en la extrusión inversa y mixta también se debe considerar rozamiento entre el material a extruirse y las paredes de la matriz, y por tal motivo el cálculo para las fuerzas de extrusión directa, inversa y mixta se lo realiza con la siguiente fórmula:

$$F = K_x \hat{Y}_f \left(\varepsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) \quad (\text{Ec 2.19})$$

donde:

F = fuerza de extrusión (MPa);

K_x = factor de forma;

Los demás términos tienen el mismo significado anteriormente mencionados.

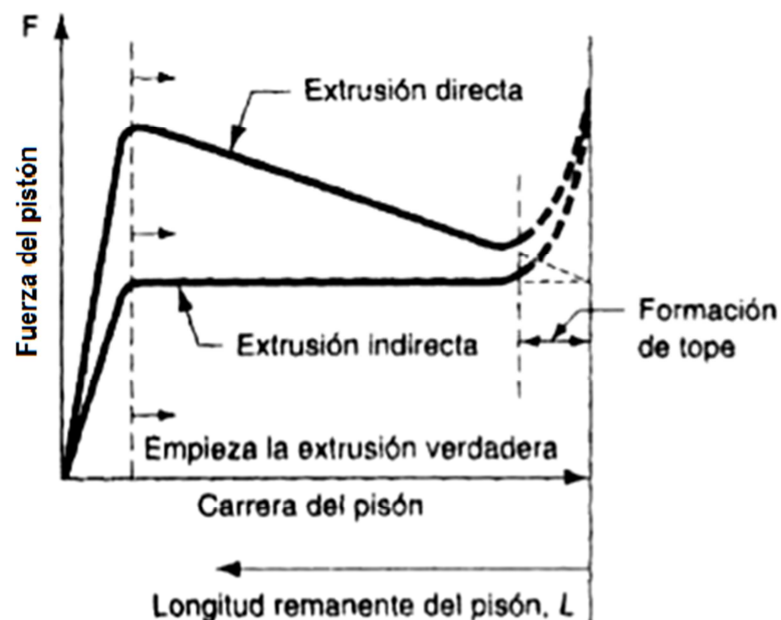


Figura 2.23 Curvas típicas de la presión del pistón en función de la carrera del pistón para la extrusión directa e indirecta²³

²³Fuente: proceso de manufactura, JOHN A. SCHEY. 3ed

Tabla 2.4 Propiedades de manufactura de varias aleaciones no ferrosas

Designación y composición, %	Liquidus/solidus, °C	Trabajo en caliente					Trabajo en frío						
		Temperatura usual, °C	Esfuerzo de fluencia, ^a MPa			Factibilidad ^f	Esfuerzo de fluencia ^c MPa		$\sigma_{0.2}$, MPa	TS, ^d MPa	Elongación, ^e %	η RA, %	Temperatura de recocido, °C
			no °C	C	m		K	n					
Metales ligeros:													
1100 Al (99%)	657/643	250-550	300	60	0.08	A	140	0.25	35	90	35		340
~3003 Al (1Mn)	649/648	290-540	500	14	0.22	A			40	110	30		370
~2017 Al (3.5Cu, 0.5Mg, 0.5Mn)	635/510	260-480	400	35	0.13	A			70	180	20		415 (F)
5052 Al(3.5Mg)	650/590	260-510	400	90	0.12	B	380	0.15					
6061-0(1Mg, 0.6Si, 0.3Cu)	652/582	300-550	500	36	0.12				90	190	25		340
6061-T6	NA*	NA	480	35	0.13	A	210	0.13	55	125	25	65	415 (F)
~7075 Al(6Zn, 2Mg, 1Cu)	640/475	260-455	400	50	0.16	A	220	0.16	275	310	8	45	
			500	37	0.17				100	230	16		415
~7075 Al(6Zn, 2Mg, 1Cu)	640/475	260-455	450	40	0.13	B	400	0.17					
Metales bajo punto de fusión:													
Sn (99.8%)	232	100-200				A				15	45	100	150
Pb (99.7%)	327	20-200	100	10	0.1	A				12	35	100	20-200
Zn (0.08% Pb)	417	120-275	75	260	0.1	A				130/170	65/50		100
			225	40	0.1								
Aleaciones para temperatura elevada:													
Ni (99.4Ni + Co)	1 446/1 435	650-1 250				A			140	440	45	65	650-760
Hastelloy X (47Ni, 9Mo, 22Cr, 18Fe, 1.5Co, 0.6W)	1 290	980-1 200	1 150~	140	0.2	C			360	770	42		1 175
Ti (99%)	1 660	750-1 000	600	200	0.11	C			480	620	20		590-730
			900	38	0.25	A							
Ti-6Al-4V	1 660/1 600	790-1 000	600	550	0.08	C			900	950	12		700-825
			900	140	0.4	A							
Circonio	1 852	600-1 000	900	50	0.25	A			210	340	35		500-800
Uranio (99.8%)	1 132	~700	700	110	0.1				190	380	4	10	

^a Los espacios vacíos indican no disponibilidad de datos. Compilados de varias fuentes; la mayoría de los datos del esfuerzo de fluencia son de T. Altan y F.W. Bolger, *Trans ASME, Ser. B.J. Eng. Ind.* **95**: 1009 (1973).

^b El esfuerzo de fluencia en el trabajo en caliente es para una deformación de $\epsilon = 0.5$. Para convertir a 1 000 psi, divida los esfuerzos calculados entre 7.

^c El esfuerzo de fluencia en el trabajo en frío es para tasas moderadas de deformación, alrededor de $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$. Para convertir a 1 000 psi, divida los esfuerzos entre 7.

^d Donde se dan dos valores, el primero es longitudinal, el segundo transversal.

^e El enfriamiento en el horno se indica con F.

^f Clasificaciones relativas, con A como la mejor, correspondiente a la ausencia de agrietamiento en el laminado y en el forjado en caliente.

*NA no aplicable al temple -T6.

Fuente: *Proceso de manufactura, JOHN A. SCHEY. 3ed*

2.8 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

2.8.1 ACEROS DE HERRAMIENTAS DE TRABAJO EN FRÍO

Son aquellos que nos sirven para operaciones de corte y conformado en frío, elaboración de matrices, estos aceros principalmente trabajan sobre metal, madera y plástico, tabla 2.5.

La principal función de estos aceros es trabajar generalmente con durezas altas, que generan una gran resistencia al desgaste, combinada con la tenacidad que se requiere para el trabajo a efectuar en este caso la extrusión.

Tabla 2.5 Aceros para trabajo en frío

IBCA	UDDEHOLM	AISI
DF2	ARNE	O1
XW5	SVERKER 3	D6
XW41	SVERKER 21	D2

Fuente: Catalogo de aceros para trabajo en frío Ivan Bohman

2.8.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de los mismos de resistir acciones de cargas o fuerzas.

Las propiedades mecánicas principales son: resistencia a la tensión (S_u), Resistencia a la fluencia (S_y), Límite de proporcionalidad, Límite elástico, Módulo de elasticidad (E), Dureza, Ductilidad.

2.8.2.1 Dureza

Dureza es la característica de los materiales a no dejarse rayar o penetrar por otro material.

Dos son las escalas más usadas: Dureza Brinell y Dureza Rockwell.

Normalmente se habla de dureza Brinell (HB) para materiales que no tienen altas durezas y de Rockwell C (HRC) para materiales muy duros. Hay equivalencias entre HRC y HB, (Tabla 2.6).

Tabla 2.6 Conversión de durezas

TABLA DE CONVERSIÓN DE DUREZAS
COMPARACIÓN APROXIMADA ENTRE DUREZA Y CARGA MÁXIMA A LA TRACCIÓN

BRINELL bola 10 mm 3000 KG	ROCKWELL A diamante 60 kg	ROCKWELL B bola 1/16 100 kg	ROCKWELL C diamante 150 kg	ROCKWELL D diamante 100 kg	ROCKWELL E bola 1/8 100 kg	VICKERS	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN kg/mm2
	85.6		68	76.9		940	
	84.5		66	75.4		865	
	83.4		64	73.8		800	
	82.3		62	72.2		746	
	81.2		60	70.7		697	
615	80.1		58	69.2		653	238.1
577	79.0		56	67.7		613	220.5
543	78.0		54	66.1		577	205.7
512	76.8		52	64.6		544	192.3
481	75.9		50	63.1		513	179.7
455	74.7		48	61.4		484	167.7
432	73.6		46	60.0		458	155.7
409	72.5		44	58.5		434	146.5
390	71.5		42	56.9		412	136.7
371	70.4		40	55.4		392	128.2
353	69.4		38	53.8		372	120.5
336	68.4		36	52.3		354	113.4
319	67.4		34	50.8		336	107.1
301	66.3		32	49.2		318	102.9
286	65.3		30	47.7		302	97.2
271	64.3		28	46.1		286	92.3
258	63.3		26	44.6		272	89.1
247	62.4		24	43.1		260	83.8
237	61.5	100	22	41.6		248	81.0
226	60.5	98	20	40.1		238	77.5
222	59.5	97				222	
210	58.3	95				210	
200	57.0	93				200	
190	55.8	91				190	
180	54.6	89				180	
172	53.4	87				172	
165	52.3	85				165	
159	51.1	83				159	
153	50.0	81				153	
147	48.9	79				147	
141	47.9	77				141	
137	46.8	75				137	
132	45.8	73				132	
127	44.8	71			100.0	127	
123	43.8	69			99.0	123	
119	42.8	67			97.5	119	
116	41.8	65			96.0	116	
112	40.9	63			95.0	112	
108	40.0	61			93.5	108	
106	39.0	59			92.5	106	
103	38.1	57			91.0	103	
100	37.2	55			90.0	100	
		53			89.0		
		51			87.5		
		49			86.5		
		47			85.0		
		45			84.0		
		43			82.5		
		41			81.5		

Fuente: <http://centraltrust.net/ivanbohman/productopdf/ACEROS ESPECIALES-WEB>

Existe una relación entre la dureza y el límite a la fluencia de los aceros que es:

$$S_{y0,2} = 3,3 \cdot HB \quad (\text{Ec 2.20})$$

donde: $S_{y0,2}$ = Límite de fluencia del material

En el caso del equipo para extrusionar es importante tener una alta dureza superficial puesto que se requiere que el material soporte altas cargas de compresión.

2.8.2.2 Resistencia a la fluencia

La parte del diagrama esfuerzo –deformación unitaria donde hay un gran incremento de la deformación con poco o ningún aumento del esfuerzo se llama resistencia a la fluencia (S_y). Esta propiedad indica que en realidad, el materia ha cedido o se ha alargado en gran medida y en forma plástica permanente

2.8.2.3 Resistencia a la tensión

Se considera que el punto máximo de la curva esfuerzo- deformación unitaria (Figura 2.24) es la resistencia última a la tensión. En este punto de la prueba se mide el máximo esfuerzo aparente de una barra de prueba del material.

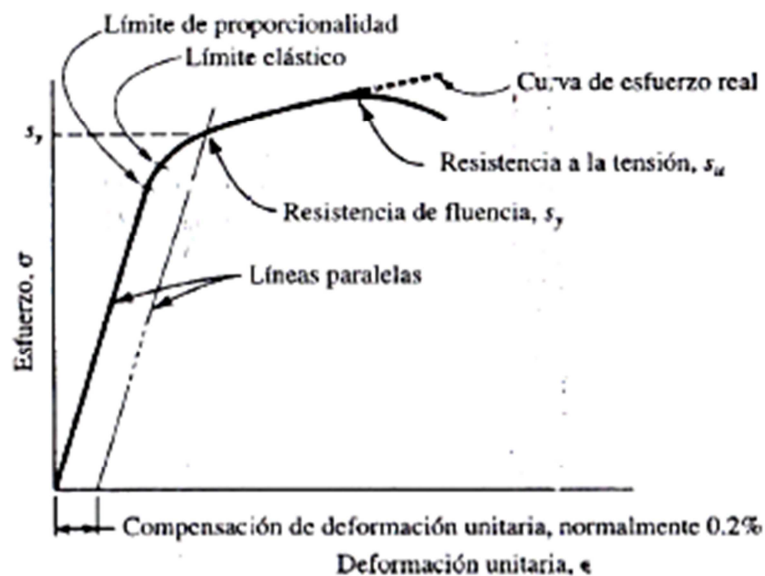


Figura 2.24 Diagrama típico de esfuerzo-deformación unitaria para aluminio y otros metales que no tienen punto de fluencia²⁴

²⁴Fuente: *Diseño de elementos y maquinas*, Robert L. Mott, 4ed.

2.8.2.4 Límite de proporcionalidad

El punto de la curva de esfuerzo-deformación unitaria donde se desvía de una línea recta se llama límite de proporcionalidad. Esto es, por debajo de este valor de esfuerzo, u otros mayores, el esfuerzo ya no es proporcional a la deformación unitaria.

2.8.2.5 Límite elástico

En algún punto llamado límite elástico, el material tiene cantidad de deformación plástica, por lo que no regresa a su forma original después de liberar la carga. Por debajo de este nivel, el material se comporta en forma totalmente elástica. El límite de proporcionalidad y el límite elástico están bastante cerca de la resistencia a la fluencia. Como son difíciles de determinar rara vez se les cita.

2.8.2.6 Modulo de Elasticidad en tensión, E

Para la parte rectilínea del diagrama esfuerzo-deformación unitaria, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria y el valor de E, el modulo de elasticidad, es la constante de proporcionalidad. Esto es:

$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación unitaria}} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{Ec 2.21})$$

Esta es la pendiente de la parte rectilínea del diagrama. El módulo de elasticidad indica la rigidez o resistencia a la deformación del material.

2.8.2.7 Ductilidad

La ductilidad es el grado en el cual un material se deformará antes de su fractura final. Lo contrario de ductilidad es fragilidad. Cuando se usan materiales dúctiles en elementos de máquinas, se detecta con facilidad la falla, y es rara una falla repentina. También los materiales dúctiles resisten, bajo condiciones normales, las cargas repetidas sobre los elementos de máquinas mejor que los materiales frágiles.

2.8.2.8 Esfuerzo de fluencia a la tensión en trabajo en frío

Para los cálculos del trabajo de metal, el límite de fluencia y la resistencia a la tensión son de importancia secundaria. La primera preocupación es el esfuerzo que se requiere para deformar el material de la pieza de trabajo.

La tensión verdadera sigue incrementándose después de la estricción, ya que aunque la carga requerida se reduce, el área se reduce aun más.

Los datos derivados de la curva fuerza de tensión-desplazamiento se pueden graficar para definir la curva esfuerzo real-deformación real (Figura 2.25). Como comparación, la curva esfuerzo de ingeniería-deformación real se muestra también en la figura 2.24 con líneas discontinuas.

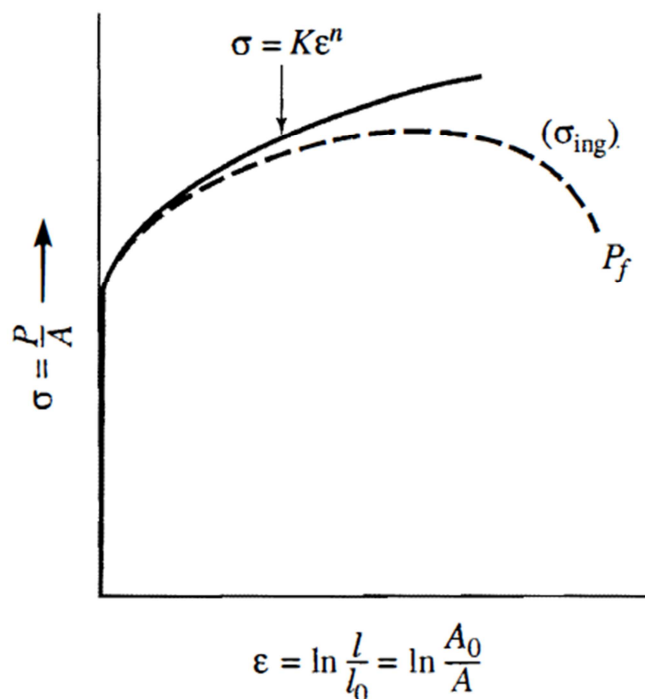


Figura 2.25 Diagrama esfuerzo deformación²⁵

²⁵Fuente: Procesos de Manufactura, John A. Schey, 3ed.

2.9 TIPOS DE RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN

La curva de esfuerzo contra deformación real proporciona mucha información acerca del comportamiento plástico. Como ya se ha indicado, la ley de Hooke ($\sigma = E\epsilon$) gobierna el comportamiento de los metales en la región elástica, y la curva de fluencia o flujo ($\sigma = K\epsilon^n$) determina el comportamiento en la región plástica. Hay tres formas básicas de relación esfuerzo-deformación que describen el comportamiento de casi todos los tipos de materiales sólidos, tal como se muestra en la figura 2.26:

2.9.1 PERFECTAMENTE ELÁSTICA

El comportamiento de este material está definido completamente por su rigidez, indicada por el módulo de elasticidad E más que ceder a la fluencia plástica, se fractura. Los materiales frágiles como los cerámicos, muchos tipos de hierro colado y polímeros termofijos presentan curvas de esfuerzo contra deformación dentro de esta categoría; estos materiales no son buenos candidatos para operaciones de conformado (figura 2.26a)

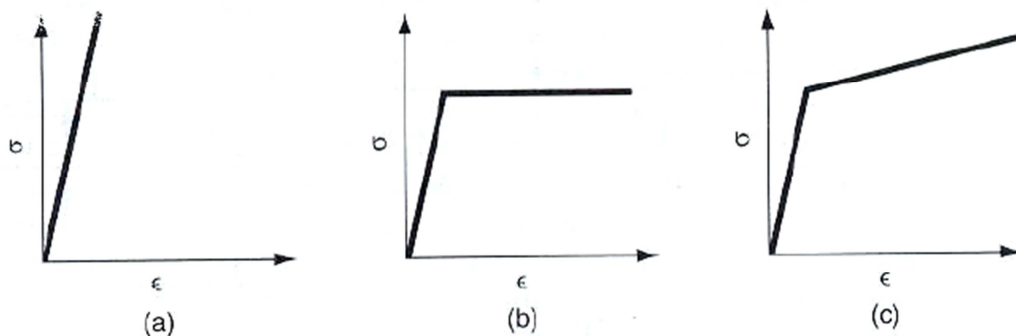


Figura 2.26 Tres categorías de relaciones esfuerzo contra deformación²⁶

(a) Perfectamente elástica, (b) elástica y perfectamente plástica,
y (c) elástica y endurecimiento por deformación.

²⁶Fuente: *Propiedades Mecánicas de los Materiales*, Federico Grossmann

2.9.2 ELÁSTICA Y PERFECTAMENTE PLÁSTICA

Este material tiene una rigidez definida por E . Una vez que alcanza el punto de fluencia Y , el material se deforma plásticamente al mismo nivel de esfuerzo. La curva de fluencia está dada por $K = Y$ y $n = 0$ (Figura 2.26b). Los metales se comportan de esta manera cuando han sido calentados a temperaturas lo suficientemente altas para recristalizar, más que endurecerse por trabajo durante la deformación. El plomo exhibe este comportamiento a la temperatura ambiente, porque esta temperatura queda abajo del punto de recristalización del plomo.

2.9.3 ELÁSTICA Y ENDURECIBLE POR DEFORMACIÓN

Estos materiales obedecen a la ley de Hooke en la región elástica, y comienzan a ceder en su punto de fluencia Y . Su deformación continua requiere esfuerzos siempre crecientes (Figura 2.26c), dados por una curva de fluencia cuyo coeficiente de resistencia K es mayor que Y , cuyo exponente de endurecimiento por deformación n es mayor que cero. La curva de fluencia se representa generalmente como una función lineal en una gráfica logarítmica natural. La mayoría de los metales dúctiles se comportan de esta manera cuando se trabajan en frío.

2.10 MATERIALES UTILIZADOS PARA EXTRUSIÓN EN FRÍO

En principio, se pueden extrusionar todos los materiales y aleaciones, siempre que posean una buena capacidad de deformación.

Estos son los materiales más utilizados:

- Estaño, Berilio, Zinc, Cobre, Vanadio, Plomo, Circonio, Molibdeno.
- Latones 1º título (p.e 15% y 30% de Zn).
- Aluminio y sus aleaciones: (Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Mg 3). El aluminio es uno de los materiales de mayor aceptación en la extrusión, tanto en frío como en caliente. Se suele utilizar para fabricar armaduras, marcos, barras y disipadores de calor.

- Acero al carbono hasta $C < 0,4\%$ calmados y ligeramente aleados con Mn, Si, Cr, Ni, Mo. Los aceros de bajo carbono y aceros inoxidable han tenido una gran aceptación en la industria.

2.11 LUBRICACIÓN EN LA EXTRUSIÓN

La presión de extrusión disminuye considerablemente con el uso de lubricantes apropiados. Algunas aleaciones de aluminio son posibles extruir sin utilizar lubricación en el punzón, porta matriz 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 inoxidable 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 poca o ninguna protección a la matriz cuando se extruyen aleaciones de titanio y acero.

Antes de que el punzón sea introducido 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.

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 el punzón caliente y la herramienta por la fundición parcial de los lubricantes y formación de vapor. A temperaturas sobre 1000°C 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 1000°C: Grasas lubricantes como grasas, grafito, asfalto, mica, bentonita, bisulfato de molibdeno y plásticos (polímeros a altas temperaturas).

- Sobre 1000°C: Vidrios lubricantes como vidrio, basalto y polvos cristalinos.

Para la extrusión en frío se puede emplear BNSP-W Suspensión Acuosa de Nitruro de Boro, suspensión acuosa de nitruro de boro especialmente formulada para su aplicación en el proceso de extrusión del aluminio.

La aplicación de la suspensión acuosa de nitruro de boro (BNSP-W) evita el pegado del lingote de aluminio con la cabeza de extrusión de la prensa y con la matriz perfiladora.

El uso del BNSP-W consigue un aumento del rendimiento del proceso en base a los siguientes puntos:

1. Evita el pegado lingote-prensa de extrusión
2. Por su color blanco, se evita la aparición de puntos negros en los perfiles producidos
3. Reducción de costes de mantenimiento debido a la característica de aislante eléctrico del nitruro de boro
4. Gran estabilidad térmica del nitruro de boro: hasta 850°C en atmósfera oxidante

Un lubricante comúnmente usado y fácil de conseguir en el mercado es jabón de bajo PH o lanolina como se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Lubricantes comunes para algunos materiales

Material de la pieza de trabajo	Trabajo	Forjado		Lubricante para extrusión †	Estirado de alambre		Laminado		Trabajo de lámina de metálica	
		Lubricante	μ		Lubricante	μ	Lubricante	μ	Lubricante	μ
Aleaciones de Sn, Pb, Zn		FO-MO	0.05	FO o jabón	FO	0.05	FA-MO o MO-EM	0.05	FO-MO	0.05
Aleaciones de Mg	Caliente o tibio	GR y/o MoS ₂	0.1-0.2	Ninguno			MO-FA-EM	0.2	GR en MO o jabón seco	0.1-0.2
Aleaciones de Al	Caliente	GR o MoS ₂	0.1-0.2	Ninguno			MO-FA-EM	0.2		
	Frío	FA-MO o jabón seco	0.1	Lanolina o jabón sobre PH	FA-MO-EM, FA-MO	0.1 0.03	1-5% FA en MO(1-3)	0.03	FO, lanolina, o FA-MO-EM	0.05-0.1
Aleaciones de Cu	Caliente	GR	0.1-0.2	Ninguno (o GR)			MO-EM	0.2		
	Frío	Jabón seco, cera o sebo	0.1	Jabón seco, cera o sebo	FO-jabón-EM, MO	0.1 0.03	MO-EM	0.1	FO-jabón-EM o FO-jabón	0.05-0.1
Aceros	Caliente	GR	0.1-0.2	GL (100-300), GR			Ninguno o GR-EM	ST ‡ 0.2	GR	0.2
	Frío	EP-MO o jabón sobre PH	0.1 0.05	Jabón sobre PH	Jabón seco o jabón sobre PH	0.05 0.03	10% FO-EM	0.05	EP-MO, EM, jabón, o polímero	0.05-0.1
Acero inoxidable, Ni y aleaciones	Caliente	GR	0.1-0.2	GL (100-300)			Ninguno	ST ‡	GR	0.2
	Frío	CL-MO o jabón sobre PH	0.1 0.05	CL-MO o jabón sobre PH	Jabón sobre PH o CL-MO	0.03 0.05	FO-CL-EM o CL-MO	0.1 0.05	CL-MO, jabón, o polímero	0.1
Aleaciones de Ti	Caliente	GL o GR	0.2	GL (100-300)					GR, GL,	0.2
	Frío	Jabón o MO	0.1	Jabón sobre PH	Polímero	0.1	MO	0.1	Jabón, o polímero	0.1

*Algunos lubricantes usados con frecuencia (los guiones indican que se emplean varios componentes en el lubricante):

CL = parafina clorada.

EM = emulsión; los ingredientes listados del lubricante se distribuyen finamente en agua.

EP = compuestos de "extrema presión" (conteniendo S, Cl y P).

FA = ácidos y alcoholes grasos, por ejemplo, ácido oleico, ácido esteárico, alcohol estearílico.

FO = aceites grasos, por ejemplo, aceite de palma y aceite sintético de palma.

GL = vidrio (viscosidad a temperatura de trabajo en unidades de poise).

GR = grafito; usualmente en un fluido portador con base de agua.

MO = aceite mineral (la viscosidad en paréntesis, en unidades de centipoises a 40°C).

PH = conversión superficial fosfatada (o similar), proporcionando modulación del lubricante.

† Los coeficientes de fricción son confusos para la extrusión, y por lo tanto aquí no se citan.

‡ El símbolo ST indica fricción adherida.

Fuente: datos extraídos de J.A. Schey: *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983.

Fuente: *Procesos de Manufactura*, John A. Schey, 3ed

2.12 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El tratamiento térmico es el proceso donde el acero se somete a temperaturas elevadas para modificar sus propiedades (figura 2.27). Los tratamientos más utilizados para los aceros de máquinas y herramientas son los siguientes:

- Recocido
- Normalizado
- Templado (enfriado por inmersión en agua o en aceite)
- Revenido
- Nitruración
- Cementación

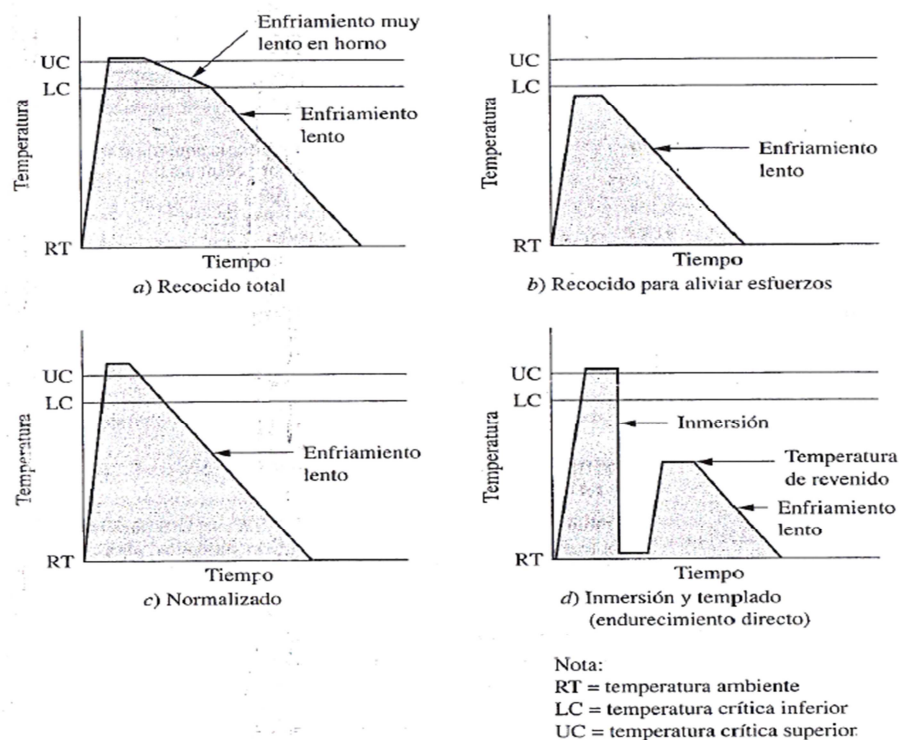


Figura 2.27 Ciclos de temperatura-tiempo para los diferentes tratamientos térmicos²⁷

En donde RT es la temperatura ambiente, LC indica la temperatura crítica donde comienza la transformación de ferrita a austenita durante el calentamiento del acero y UC representa la temperatura de transformación completa.

²⁷ Fuente: *Diseño de elementos y maquinas*, Robert L. Mott, 4ed.

2.12.1 RECOCIDO

El recocido (Figura 2.27a) se aplica al calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior para mantenerlo así hasta que la composición sea uniforme, después se enfría el acero en el horno muy lentamente, a menos de la temperatura crítica inferior. El enfriamiento hasta la temperatura ambiente se lo realiza fuera del horno. Este tratamiento térmico produce un material suave y de baja resistencia, sin esfuerzos internos importantes, este tratamiento sirve para maquinar piezas y para aliviar esfuerzos de los aceros después de procesos como la soldadura o el conformado en frío.

2.12.2 NORMALIZADO

El normalizado (figura 2.27c) se produce de forma parecida al recocido, pero a mayor temperatura. El resultado es una estructura interna uniforme en el acero y una resistencia algo mayor a la que produce el recocido, en términos generales mejora la maquinabilidad y la tenacidad respecto al recocido.

2.12.3 TEMPLADO

El endurecimiento directo (figura 2.27d) se produce al calentar el acero por arriba del intervalo de transformación donde se forma la austenita y se enfría rápidamente puede ser con agua o con aceite, este templado produce en el acero la disminución de la resistencia a la tensión y la resistencia a la fluencia, mientras mejora la ductilidad, ya que aumenta la elongación porcentual del

2.12.4 REVENIDO

Es un tratamiento complementario del temple, que regularmente sigue a éste. A la unión de los dos tratamientos también se le llama “bonificado”. El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero seguido del normalizado o templado, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se deseen resultados elevados en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones

térmicas que puedan formar deformaciones. los fines por los que se realiza el revenido principalmente son:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un punto de mínima fragilidad.
- Reducir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple.
- Cambiar las características mecánicas, en las piezas templadas generando los siguientes efectos:
 - Reducir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza.
 - Elevar las características de ductilidad; alargamiento estiración y las de tenacidad; resiliencia.

2.12.5 NITRURACIÓN

La nitruración es un tratamiento termoquímico que se le da al acero. El proceso modifica su composición añadiendo nitrógeno mientras es calentado. El resultado es un incremento de la dureza superficial de las piezas. También aumenta la resistencia a la corrosión y a la fatiga

La pieza se introduce en un horno en el que se llena la atmósfera con amoníaco y luego se calienta a temperaturas de aproximadamente 500°C. Esto hace que el amoníaco se descomponga en nitrógeno e hidrógeno; el hidrógeno se separa del nitrógeno por diferencia de densidad y el nitrógeno, al entrar en contacto con la superficie de la pieza, forma un recubrimiento de nitruro de hierro.

2.12.6 CEMENTACIÓN

La cementación tiene por objeto endurecer la superficie de una pieza sin modificar su núcleo, originando una pieza formada por dos materiales: la del núcleo de acero (con bajo índice de carbono) tenaz y resistente a la fatiga, y la parte de la superficie (de acero con mayor concentración de carbono) 0,2% de carbono. Consiste en recubrir las partes a cementar de una materia rica en carbono, llamada cementante, y someter la pieza durante varias horas a altas temperaturas (típicamente, 900 °C). En estas condiciones, el carbono penetra en la superficie que recubre a razón de 0,1 a 0,2 mm por hora de tratamiento.

CAPÍTULO 3

ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

3.1 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONALIDAD

3.1.1 MATRIZ DE EXTRUSIÓN DIRECTA

En el proceso de extrusión directa se realizarán dos formas, la primera es un perfil en “I” de plomo (figura 3.1), cabe recalcar que las dimensiones de este perfil no son normalizadas puesto que se realiza con fines didácticos. Adicional a esto se va a realizar la extrusión de un eje circular de plomo y aluminio (figura 3.2) de tal manera que también se pueda demostrar de forma práctica la deformación plástica de los metales no ferrosos.

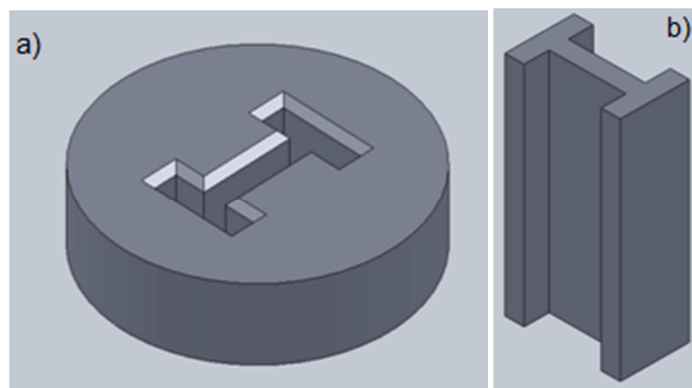


Figura 3.1 a) Dado I para extrusión directa, b) Perfil I extruido²⁸

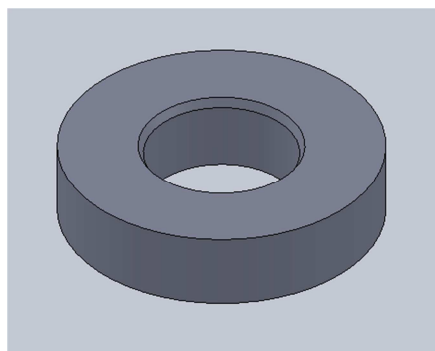


Figura 3.2 Dado para extrusión directa²⁹

²⁸ Fuente: Diseño de matriz de extrusión directa - Dado y Perfil I

²⁹ Fuente: Diseño de matriz de extrusión directa - Dado circular

La selección de las formas a ser extruidas es una muestra de la amplia variedad de elementos que se pueden obtener mediante la extrusión directa, lo cual se puede encontrar principalmente en la producción de perfiles de aluminio como son marcos de ventanas y puertas.

El propósito de obtener como producto un perfil en I (Figura 3.1b), es mostrar el cambio brusco de sección que se puede dar, en este caso, a un eje macizo, sea de plomo o aluminio, donde se observa que sin importar la forma, pero con un cálculo adecuado, se pueden obtener un sin número formas y tamaños.

La mejor forma de observar los cambios producidos durante la extrusión directa es hacer pasar un eje macizo por un dado que tenga la misma forma original pero que únicamente disminuya su diámetro (Figura 3.2)

3.1.2 MATRIZ DE EXTRUSIÓN INVERSA

En el proceso de extrusión inversa se dará forma a un tubo con agujero hexagonal (figura3.3), plomo. La forma seleccionada es precisa para observar la deformación plástica del material y el flujo del mismo, contrario a la dirección del punzón. De igual manera mediante este tipo de extrusión se pueden obtener perfiles que son utilizados en puertas ventanas y otras aplicaciones según sean las necesidades así como se muestra en la figura 3.3b.

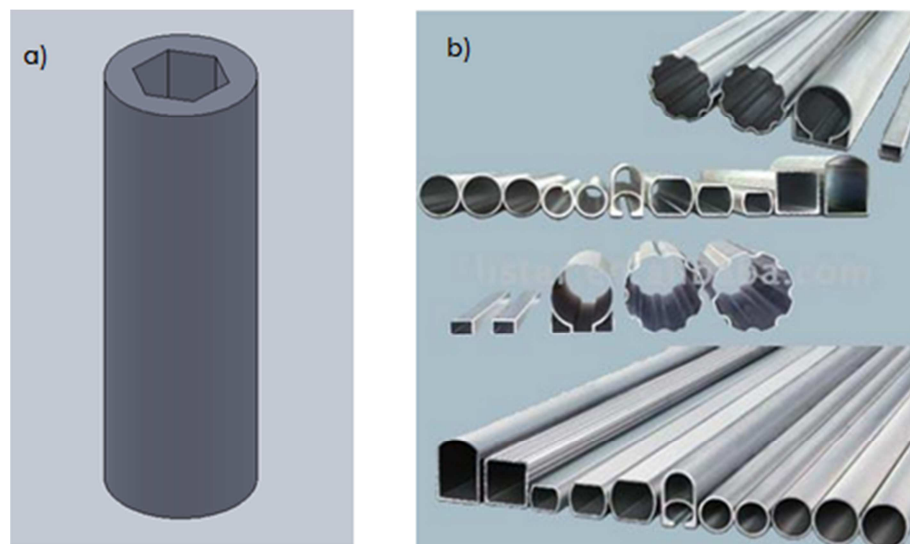
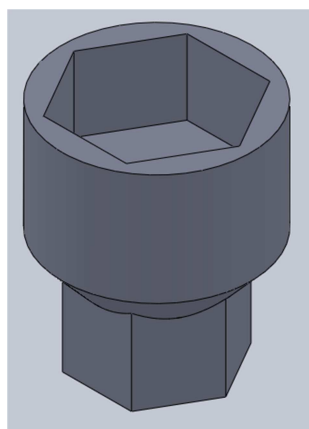


Figura 3.3 a) Tubo con agujero hexagonal – b) Perfiles de extrusión inversa³⁰

³⁰ Fuente: Diseño de matriz de extrusión inversa.

3.1.3 MATRIZ DE EXTRUSIÓN MIXTA

En el proceso de extrusión mixta se realizará un dado de reducción (figura 3.4a) de aluminio o plomo, que de igual forma es útil para observar el flujo de material en ambos sentidos, en la misma dirección que el punzón al extruir la parte hexagonal inferior y flujo en sentido contrario al del punzón en la parte superior. Un dado de reducción se lo puede encontrar ya sea al momento de sacar las tuercas de una rueda (Figura 3.4b) o como acoplamiento de un destornillador (Figura3.4c)



a)



b)



c)

Figura 3.4 a) Dado de reducción hexagonal – b) acoplamiento para sacar la rueda de un vehículo – c) Acoplamiento de un destornillador³¹

³¹ Fuente: Diseño de matriz de extrusión mixta.

3.1.4 ACOPLAMIENTO A PRENSA HIDRÁULICA DEL DECEM

La prensa Hidráulica que se dispone en el laboratorio de máquinas y herramientas del DECEM (figura 3.5) es de 60 toneladas, y la carrera máxima que tiene dicha prensa es de 460mm por lo que el equipo extrusor no tiene que sobrepasar dichas condiciones de diseño, el material a ser extruido tampoco debe sobrepasar la fuerza máxima que se dispone en la prensa.

El equipo extrusor va a estar sujeto a la prensa por pernos tipo allen ya existentes, que facilitan el acoplamiento a la misma.

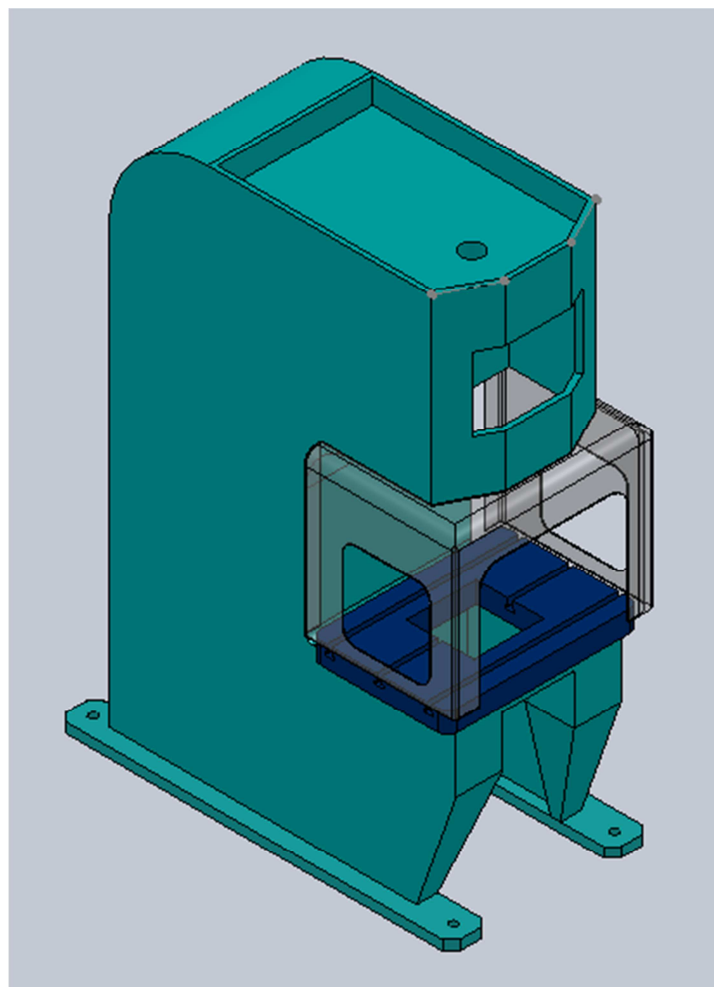


Figura 3.5 Prensa hidráulica de 60 toneladas del DECEM³²

³²Fuente: Prensa hidráulica del DECEM.

3.2 SELECCIÓN DE MATERIALES ESTANDARIZADOS

3.2.1 PUNZÓN, DADOS Y MATRICES

Para realizar la selección de materiales en la construcción del equipo extrusor se toman en cuenta 3 aspectos importantes que son:

- Propiedades tecnológicas: refiere a las propiedades físicas y mecánicas de los aceros, así como también a sus componentes aleantes.
- Propiedades constructivas: refiere a las características de los aceros para poder trabajar en ellos, es decir la facilidad para poder maquinarlos y darles la forma que se necesite en la construcción del equipo extrusor.
- Propiedades económicas: refiere al costo de estos materiales en el mercado y que tan accesibles pueden llegar a ser, es decir que tan fácil es conseguirlos, aquí se toma en cuenta el tiempo en el que estos materiales estaría disponibles para la construcción.

Para la selección de los materiales que se especifican en las siguientes tablas se toman en cuenta factores ponderativos, los mismos que son subjetivos en base a las características de los aceros para trabajo en frío, componentes aleantes, ductilidad, maquinabilidad, etc.

(Ver anexos A, B y C)

Tabla 3.1 Selección de materiales para punzones, dados y matrices

DF2			
PARÁMETROS DE SELECCIÓN	CALIFICACIÓN EVALUATORIA	FACTOR DE PRIORIDAD	CALIFICACIÓN TOTAL
Resistencia Mecánica	10	10	100
Resistencia al Desgaste	6	10	60
Tenacidad	5	8	40
Utilidad en el proceso de extrusión	7	10	70
Disponibilidad	10	10	100
Costo	5	5	25
		Total	395,00

Promedio factor de prioridad	8,83
Puntuación máxima	530,00
Porcentaje (%)	74,53

XW-5			
PARÁMETROS DE SELECCIÓN	CALIFICACIÓN EVALUATORIA	FACTOR DE PRIORIDAD	CALIFICACIÓN TOTAL
Resistencia Mecánica	10	10	100
Resistencia al Desgaste	9	10	90
Tenacidad	3	8	24
Utilidad en el proceso de extrusión	8	10	80
Disponibilidad	3	10	30
Costo	4	5	20
Total			344,00

Promedio factor de prioridad	8,83
Puntuación máxima	530,00
Porcentaje (%)	64,91

XW-41			
PARÁMETROS DE SELECCIÓN	CALIFICACIÓN EVALUATORIA	FACTOR DE PRIORIDAD	CALIFICACIÓN TOTAL
Resistencia Mecánica	10	10	100
Resistencia al Desgaste	8	10	80
Tenacidad	4	8	32
Utilidad en el proceso de extrusión	9	10	90
Disponibilidad	2	10	20
Costo	4	5	20
Total			342,00

Promedio factor de prioridad	8,83
Puntuación máxima	530,00
Porcentaje (%)	64,53

Fuente: Propia

Después de realizar un análisis exhaustivo entre tres tipos de aceros para trabajo en frío se llegó a la conclusión que el acero más conveniente y óptimo para construir los punzones, dados y matrices es el acero DF-2.

(Ver Anexo A)

Tabla 3.2 Propiedades de acero para trabajo en frío DF2

PROPIEDADES ACERO DF2	Unidades	VALOR
Sy	N/mm ²	2200
Sut	N/mm ²	3000
Densidad	Kg/m ³	7800
Modulo de Elasticidad	N/mm ²	190000

Fuente: Catálogo de aceros de IvanBohman

3.2.2 PORTA MATRICES Y PORTA PUNZONES

Tabla 3.3 Selección de materiales para porta matrices y porta punzones

ASTM A36			
PARÁMETROS DE SELECCIÓN	CALIFICACIÓN EVALUATORIA	FACTOR DE PRIORIDAD	CALIFICACIÓN TOTAL
Resistencia Mecánica	10	10	100
Resistencia al Desgaste	5	7	35
Tenacidad	4	7	28
Utilidad en el proceso de extrusión	6	8	48
Disponibilidad	10	10	100
Costo	5	5	25
Total			336,00

Promedio factor de prioridad	7,83
Puntuación máxima	470,00
Porcentaje (%)	71,49

DF2			
PARÁMETROS DE SELECCIÓN	CALIFICACIÓN EVALUATORIA	FACTOR DE PRIORIDAD	CALIFICACIÓN TOTAL
Resistencia Mecánica	10	10	100
Resistencia al Desgaste	6	7	42
Tenacidad	6	7	42
Utilidad en el proceso de extrusión	6	8	48
Disponibilidad	4	10	40
Costo	2	5	10
Total			282,00

Promedio factor de prioridad	7,83
Puntuación máxima	470,00
Porcentaje (%)	60,00

Fuente: Propia

Después de realizar un análisis exhaustivo entre dos tipos de aceros se llegó a la conclusión que el acero más conveniente y óptimo para construir los porta matrices, porta punzones y guías es el acero ASTM A36 en especial por disponibilidad y por estar bajo requerimientos de trabajo.

Tabla 3.4 Propiedades de acero ASTM A36

PROPIEDADES ACERO ASTM A36	Unidades	VALOR
Sy	ksi	36
Sut	ksi	58
Densidad	Kg/m ³	7850
Modulo de Elasticidad	N/mm ²	190000

Fuente: Catálogo de aceros de IvanBohman

3.2.3 MATERIALES PARA EXTRUSIÓN DIRECTA INVERSA Y MIXTA

Para realizar los tres tipos de extrusión se ha seleccionado dos materiales dúctiles no ferrosos que permitan su deformación sin realizar ningún tipo de precalentamiento, es decir con los que se pueda trabajar a temperatura ambiente, por lo tanto los materiales son aluminio y plomo, cuyas propiedades principales se muestran en las tablas 3.5 y 3.6

Tabla 3.5 Propiedades del Aluminio

PROPIEDADES ALUMINIO	Unidades	VALOR
Sy	Mpa	35
Su	Mpa	90
Densidad	Kg/m ³	2700
% Elongación		35
Dureza Brinell	HB	27

Fuente: Catálogo de aceros de IvanBohman

Tabla 3.6 Propiedades del Plomo

PROPIEDADES PLOMO	Unidades	VALOR
Su	Kg/cm ²	123 A 133
Densidad	Kg/m ³	11340
% Elongación		55
Dureza Brinell	HB	4

Fuente: Catálogo de aceros de IvanBohman

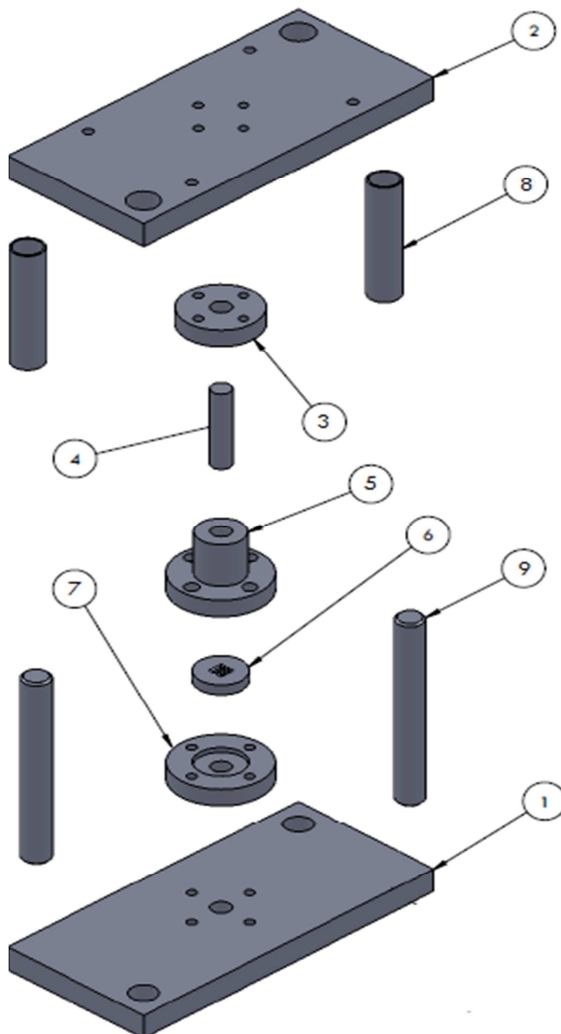
CAPÍTULO 4

CÁLCULO Y DISEÑO

4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Para el diseño del equipo extrusor se tiene que considerar varios aspectos importantes que permitirán saber el equipo está en capacidad de ser sometido a las fuerzas necesarias para deformar plásticamente al material a extrusionar los cuales son:

Tabla 4.1 Esfuerzos en equipo extrusor



#	
1	Análisis a compresión Análisis a cortante
2	Análisis a compresión
3	DIRECTA, INVERSA Y MIXTA: No existen esfuerzos al momento de la extrusión
4	DIRECTA Y MIXTA: Análisis a compresión, pandeo y fatiga INVERSA: Análisis a compresión, a cortante, pandeo y fatiga
5	DIRECTA: Análisis a la tracción - Espesor de pared INVERSA Y MIXTA: Análisis a la tracción - Espesor de pared y análisis a compresión y a cortante
6	DIRECTA: Análisis a compresión y a cortante
7	DIRECTA: Análisis a compresión y a cortante
8 y 9	No existen esfuerzos al momento de la extrusión

Fuente: Propia

Figura 4.1 Elementos a ser diseñados para la extrusión³³

³³Fuente: Propia.

4.1.1 ESFUERZO A COMPRESIÓN

La ecuación para calcular el esfuerzo a compresión es la siguiente:

$$\sigma_C = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec 4.1})$$

donde:

F es la fuerza ejercida sobre el elemento analizado

A es el área de compresión en donde esta aplicada la fuerza

4.1.2 ESFUERZO A CORTANTE

La ecuación para calcular el esfuerzo cortante es la siguiente:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec 4.2})$$

donde:

F es la fuerza ejercida sobre el elemento analizado

A es el área de corte

4.1.3 FALLA AL PANDEO

Para analizar si un elemento falla al pandeo se utilizan las siguientes fórmulas:

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

$$S_r = \frac{L_{ff}}{r} \quad (\text{Ec 4.3})$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (\text{Ec 4.4})$$

donde:

r es el radio de giro del elemento analizado

I es la inercia

A es el área de la sección transversal del elemento analizado

L_{ff} es la longitud efectiva del punzón

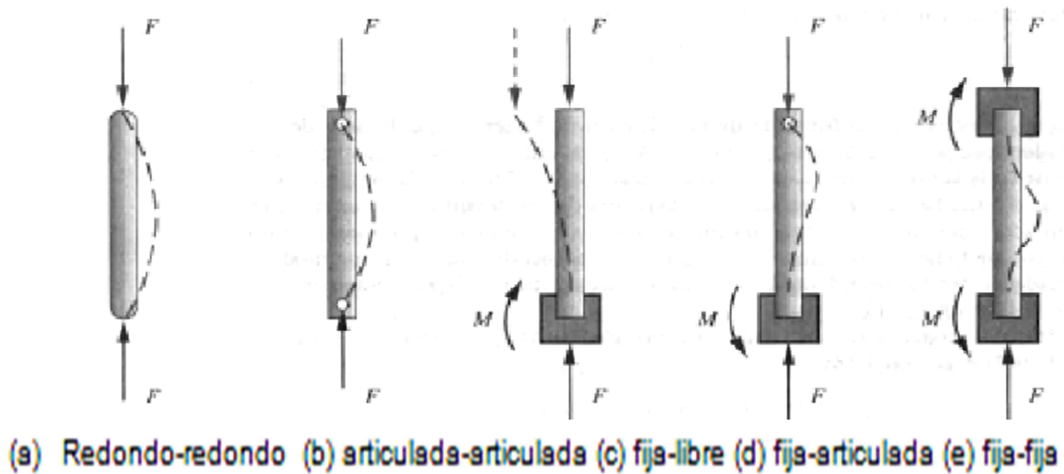


Figura 4.2 Condiciones terminales de columnas - curvas de deflexión resultantes.³⁴

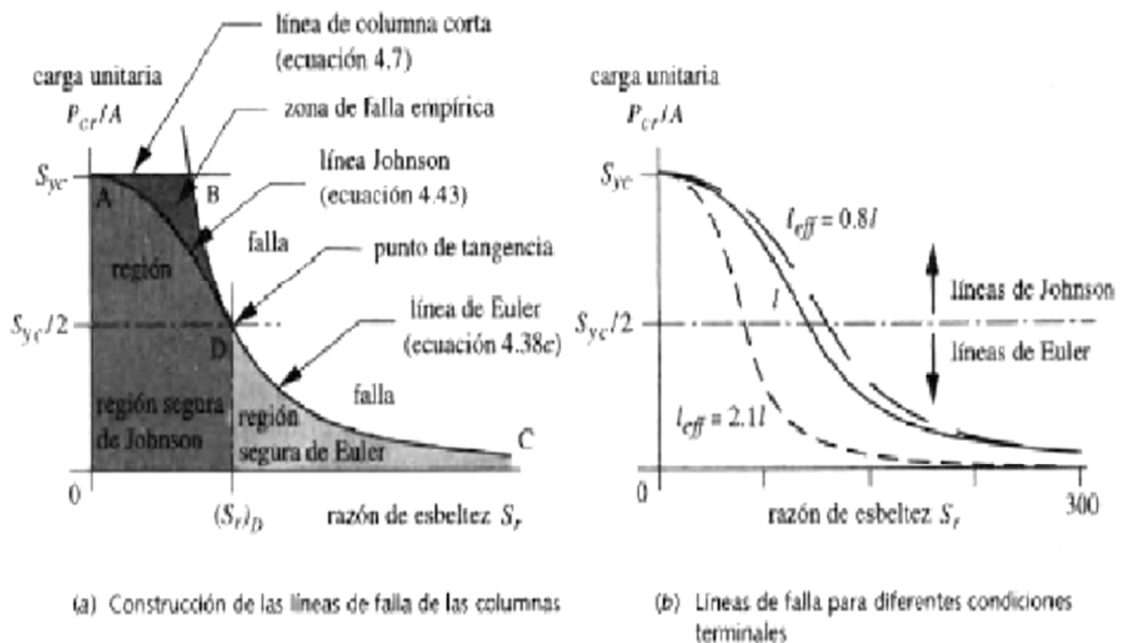


Figura 4.3 Línea de fallas de columnas Euler Johnson y columnas cortas³⁵

Para hallar el punto de tangencia de la figura 4.3a se utiliza la siguiente fórmula:

$$S_{rd} = \pi \sqrt{\frac{2E}{S_y}} \quad \text{(Ec 4.5)}$$

³⁴Fuente, ³³Fuente: Estampado en frío de la chapa Mario Rossi, 8va edición.

donde:

E es el módulo de elasticidad del punzón

Si el S_r se encuentra a la izquierda del S_{rd} en la figura 4.2a, La carga crítica de pandeo se calcula mediante la fórmula:

$$F_{cr} = A \left(S_y - \frac{1}{E} * \frac{S_y S_r^2}{2\pi} \right) \quad (\text{Ec 4.6})$$

4.1.4 FALLA POR FATIGA

4.1.4.1 Límite de resistencia a la fatiga

Existen estimaciones con las cuales se puede trabajar a partir de ensayos a la fatiga, pero dichas estimaciones pueden alejarse de los resultados obtenidos en los laboratorios, para lo cual debe realizarse una compensación mediante el empleo de factores de diseño más grandes que podría usarse para el diseño estático.

Se estimará el límite de resistencia a la fatiga como:

$$S_e' = \left\{ \begin{array}{ll} 0.5 * S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 Mpa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ Mpa} & S_{ut} > 1400 \text{ kpsi} \end{array} \right\}$$

donde:

S_{ut} es la resistencia última a la tensión

S_e' muestra de viga rotativa

4.1.4.2 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un componente mecánico real en función al número de ciclos está dada por:

$$S_f = a * N^b \quad (\text{Ec 4.7})$$

donde:

S_f resistencia a la fatiga

a y b están definidas por los puntos 10^3 y 10^6

N número de ciclos para vida finita o vida infinita

Para a y b:

$$a = \frac{(f * S_{ut})^2}{S_e} \quad (\text{Ec 4.8})$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log \left(\frac{f * S_{ut}}{S_e} \right) \quad (\text{Ec 4.9})$$

donde:

f fracción de resistencia a la fatiga

4.1.4.3 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

No es posible esperar que el límite de resistencia a la fatiga de un elemento mecánico o estructural iguale los valores que se obtuvieron en el laboratorio, debido a lo cual se deben considerar varios factores que se reflejan en la ecuación de Marín

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S_e' \quad (\text{Ec 4.10})$$

donde:

k_a factor de modificación de la condición superficial

k_b factor de modificación del tamaño

k_c factor de modificación de carga

k_d factor de modificación de la temperatura

k_e factor de confiabilidad

k_f factor de modificación de efectos varios

S_e' límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

S_e límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso

Una vez obtenidos estos valores se podrá encontrar la resistencia a la fatiga S_e y compararla con el esfuerzo analizado previamente sea este a flexión, axial y torsión, del elemento, para obtener un factor de seguridad n , mediante la ecuación:

$$n = \frac{S_f}{\sigma} \quad (\text{Ec 4.11})$$

4.2 CÁLCULO DE FUERZAS PARA EXTRUSIÓN

4.2.1 DIRECTA

4.2.1.1 Fuerza para eje de aluminio

Fuerza Real

$do := 25$ mm **Diámetro de tocho**

$$Ao := \frac{(\pi \cdot do^2)}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$$

$d := 18$ mm **Diámetro después de la extrusión**

$$Arealfinal := \frac{(\pi \cdot d^2)}{4} = 254.469 \text{ mm}^2$$

Deformación ideal ε

$$\varepsilon := \ln\left(\frac{Ao}{Arealfinal}\right) = 0.657 \quad \text{Ec 2.7}$$

Constantes empíricas de Johnson

$a := 0.8$ $b := 1.2$

Deformación Real ε_x

$$\varepsilon_x := (a + b \cdot \varepsilon) = 1.588 \quad \text{Ec 2.9}$$

De tabla 2.4

$k := 140$ MPa **Coefficiente de resistencia del material extruido**

$n := 0.25$ MPa **Exponente de endurecimiento por deformación**

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Y_f

$$Y_f := \frac{k \cdot (\varepsilon^{n+1})}{\varepsilon \cdot (n + 1)} = 100.835 \text{ MPa} \quad \text{Ec 2.11}$$

Longitud del tocho a extruir

$Lo := 30$ mm

Presión de Extrusión

$$P := Y_f \left(\varepsilon_x + \frac{2 \cdot Lo}{do} \right) = 402.171 \text{ MPa} \quad \text{Ec 2.19}$$

Fuerza de Extrusión

$$FAI := P \cdot A_o = 1.974 \times 10^5 \quad \text{N}$$

$$FAI := \frac{FAI}{9.81} = 2.012 \times 10^4 \quad \text{Kgf}$$

Fuerza ingenieril necesaria para realizar la extrusión

Presión unitaria de tabla 2.3

$$P := 40 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$$

$$F_i := P \cdot A_o \quad \text{Ec 2.16}$$

$$F_i = 1.963 \times 10^4 \quad \text{Kgf}$$

4.2.1.2 Fuerza para eje de plomo

Fuerza Real

$$d_o := 25 \quad \text{mm} \quad \text{Diámetro de tocho}$$

$$A_o := \frac{(\pi \cdot d_o^2)}{4} = 490.874 \quad \text{mm}^2$$

$$d := 18 \quad \text{mm} \quad \text{Diámetro después de la extrusión}$$

$$A_{\text{efinal}} := \frac{(\pi \cdot d^2)}{4} = 254.469 \quad \text{mm}^2$$

Deformación Ideal ϵ

$$\epsilon := \ln\left(\frac{A_o}{A_{\text{efinal}}}\right) = 0.657 \quad \text{Ec 2.7}$$

Constantes empíricas de Johnson

$$a := 0.8 \quad b := 1.2$$

Deformación Real ϵ_x

$$\epsilon_x := (a + b \cdot \epsilon) = 1.588 \quad \text{Ec 2.9}$$

$k := 55$ MPa **Coefficiente de resistencia del material extruido**

$n := 0$ MPa **Exponente de endurecimiento por deformación**

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Y_f

$$Y_f := \frac{k \cdot (\epsilon^{n+1})}{\epsilon \cdot (n + 1)} = 55 \text{ MPa} \quad \text{Ec 2.11}$$

Longitud del tocho a extruir

$L_o := 30$ mm

Presión de Extrusión

$$P := Y_f \left(\epsilon_x + \frac{2 \cdot L_o}{d_o} \right) = 219.363 \text{ MPa} \quad \text{Ec 2.19}$$

Fuerza de Extrusión

$$FP_b := P \cdot A_o = 1.077 \times 10^5 \text{ N}$$

$$FP_b := \frac{FP_b}{9.81} = 1.098 \times 10^4 \text{ Kgf}$$

4.2.1.3 Fuerza para perfil I de plomo

Fuerza Real

$d_o := 25$ mm **Diámetro de tocho**

$$A_o := \frac{(\pi \cdot d_o^2)}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$$

$A_I := 148$ mm² **Área de perfil I deseado**

$$d_e := \sqrt{\frac{4A_I}{\pi}} = 13.727 \text{ mm} \quad \text{Diámetro equivalente del perfil I}$$

Deformación Ideal ϵ

$$\epsilon := \ln\left(\frac{A_o}{A_I}\right) = 1.199 \quad \text{Ec 2.7}$$

Constantes empíricas de Johnson

$a := 0.8$ $b := 1.2$

Deformación Real ϵ_x

$$\epsilon_x := (a + b \cdot \epsilon) = 2.239 \quad \text{Ec 2.9}$$

$$k := 55 \quad \text{MPa} \quad \text{Coeficiente de resistencia del material extruido}$$

$$n := 0 \quad \text{MPa} \quad \text{Exponente de endurecimiento por deformación}$$

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Y_f

$$Y_f := \frac{k \cdot (\epsilon^{n+1})}{\epsilon \cdot (n + 1)} = 55 \quad \text{MPa} \quad \text{Ec 2.11}$$

Longitud del tocho a extruir

$$L := 30 \quad \text{mm}$$

Factor de Forma K_x

$$C_x := 82 \quad \text{mm} \quad \text{Perímetro de la sección de la forma a extruirse (Perfil I)}$$

$$C_c := \pi \cdot d_e = 43.126 \quad \text{mm} \quad \text{Perímetro de un círculo cuya área equivale al área seccional de la forma a extruirse (Perfil I)}$$

$$K_x := 0.98 + 0.02 \cdot \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25} = 1.065 \quad \text{Ec 2.17}$$

Presión de Extrusión

$$P := K_x \cdot Y_f \cdot \left(\epsilon_x + \frac{2 \cdot L}{d_o} \right) = 271.693 \quad \text{MPa} \quad \text{Ec 2.19}$$

Fuerza de Extrusión

$$FP_b := P \cdot A_o = 1.334 \times 10^5 \quad \text{N}$$

$$FP_b := \frac{FP_b}{9.81} = 1.359 \times 10^4 \quad \text{Kgf}$$

Tabla 4.2 Resumen de fuerzas para la extrusión directa.

Extrusión Directa	
	Fuerza para extrusión (Kg)
Eje de Al	20120
Eje de Pb	10980
Perfil "I" Pb	13590
Fuerza ingenieril	19630

Fuente: Propia

Tomando en cuenta la tabla 4.2 la mayor fuerza para realizar la extrusión directa es de 20120 Kg.

4.2.2 INVERSA

Fuerza Real

$do := 25 \text{ mm}$ **Diámetro de tocho**

$$Ao := \frac{(\pi \cdot do^2)}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$$

$Ahex := 263.995 \text{ mm}^2$ **Área Hexagonal Deseada**

$$de := \sqrt{\frac{4 \cdot Ahex}{\pi}} = 18.334 \text{ mm} \text{ **Diámetro equivalente del punzón hexagonal**}$$

Deformación Ideal ε

$$\varepsilon := \ln\left(\frac{do}{do - de}\right) - 0.19 = 1.132 \quad \text{Eq 2.7}$$

Constantes empíricas de Johnson

$a := 0.8$ $b := 1.2$

Deformación Real ε_x

$$\varepsilon_x := (a + b \cdot \varepsilon) = 2.158 \quad \text{Eq 2.9}$$

$k := 55 \text{ MPa}$ **Coefficiente de resistencia del material extruido**

$n := 0 \text{ MPa}$ **Exponente de endurecimiento por deformación**

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Y_f

$$Y_f := \frac{k \cdot (\epsilon^{n+1})}{\epsilon \cdot (n + 1)} = 55 \text{ MPa} \quad \text{Eq 2.11}$$

Longitud del tocho a extruir

$$L := 25 \text{ mm}$$

Factor de Forma K_x

$$C_x := 60.5 \text{ mm}$$

Perímetro de la sección de la forma a extruirse (Hexágono)

$$C_c := \pi \cdot d_e = 57.597 \text{ mm}$$

Perímetro de un círculo cuya área equivale al área seccional de la forma a extruirse (Hexágono)

$$K_x := 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25} = 1.002 \quad \text{Eq 2.17}$$

Presión de Extrusión

$$P := K_x Y_f \left(\epsilon_x + \frac{2L}{d_o} \right) = 229.236 \text{ MPa} \quad \text{Eq 2.19}$$

Fuerza de Extrusión

$$FP_b := P \cdot A_o = 1.125 \times 10^5 \text{ N}$$

$$FP_b := \frac{FP_b}{9.81} = 1.147 \times 10^4 \text{ Kgf}$$

4.2.3 MIXTA

Dentro de la extrusión mixta existen dos fuerzas necesarias para realizar este proceso, para realizar la extrusión directa y la inversa, las cuales se detallan a continuación:

4.2.3.1 Fuerza para dado de reducción de Aluminio

EXTRUSIÓN INVERSA

$do := 25$ mm **Diámetro de tocho**

$$Ao := \frac{(\pi \cdot do^2)}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$$

$Ahex := 314.32$ mm² **Área de la sección hexagonal deseada**

$$de := \sqrt{\frac{4 \cdot Ahex}{\pi}} = 20.005 \text{ mm} \quad \text{Diámetro equivalente del punzón hexagonal}$$

Deformación Ideal ϵ

$$\epsilon := \ln\left(\frac{do}{do - de}\right) - 0.19 = 1.42 \quad \text{Ec 2.7}$$

Constantes empíricas de Johnson

$a := 0.8$ $b := 1.2$

Deformación Real ϵ_x

$$\epsilon_x := (a + b \cdot \epsilon) = 2.505 \quad \text{Ec 2.9}$$

$k := 140$ MPa **Coefficiente de resistencia del material extruido**

$n := 0.25$ MPa **Exponente de endurecimiento por deformación**

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Yf

$$Yf := \frac{k \cdot (\epsilon_x^{n+1})}{\epsilon_x \cdot (n + 1)} = 122.272 \text{ MPa} \quad \text{Ec 2.11}$$

Longitud del tocho a extruir

$L := 15$ mm

Factor de Forma Kx

$$C_x := 66 \text{ mm}^2$$

Perímetro de la sección de la forma a extruirse (hexágono)

$$C_c := \pi \cdot d_e = 62.848 \text{ mm}^2$$

Perímetro de un círculo cuya área equivale al área seccional de la forma a extruirse (hexágono)

$$K_x := 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25} = 1.002 \quad \text{Ec 2.17}$$

Presión de Extrusión

$$P := K_x Y_f \left(\epsilon_x + \frac{2 \cdot L}{d_o} \right) = 454.016 \text{ MPa} \quad \text{Ec 2.19}$$

Fuerza necesaria para realizar la extrusión inversa

$$F_{AI} := P \cdot A_o = 2.229 \times 10^5 \text{ N}$$

$$F_{AI} := \frac{F_{AI}}{9.81} = 2.272 \times 10^4 \text{ Kgf}$$

EXTRUSIÓN DIRECTA

$$A_{hex2} := 218.054 \text{ mm}^2$$

Área de la sección hexagonal deseada

$$d_{ed} := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{hex2}}{\pi}} = 16.662 \text{ mm}^2$$

Diámetro equivalente de sección hexagonal en matriz

Deformación ideal ϵ

$$\epsilon_d := \ln \left(\frac{A_o}{A_{hex2}} \right) = 0.811$$

Deformación Real ϵ_x

$$\epsilon_{xd} := (a + b \cdot \epsilon_d) = 1.774$$

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Yf

$$Y_{fd} := \frac{k \cdot (\epsilon_d^{n+1})}{\epsilon_d \cdot (n+1)} = 106.3 \text{ MPa}$$

Longitud del tocho a extruir

$$L_d := 7 \text{ mm}$$

Factor de Forma Kx

$$C_{xd} := 55 \text{ mm}^2$$

Perímetro de la sección de la forma a extruirse (hexágono)

$$C_{cd} := \pi \cdot d_{ed} = 52.346 \text{ mm}^2$$

Perímetro de un círculo cuya área equivale al área seccional de la forma a extruirse (hexágono)

$$K_{xd} := 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_{xd}}{C_{cd}} \right)^{2.25} = 1.002$$

Presión de Extrusión

$$P_d := K_{xd} \cdot Y_{fd} \left(\epsilon_{xd} + \frac{2 \cdot L_d}{d_o} \right) = 248.65 \text{ MPa}$$

Fuerza de Extrusión

$$F_{Ald} := P_d \cdot A_o = 1.221 \times 10^5 \text{ N}$$

$$F_{Ald} := \frac{F_{Ald}}{9.81} = 1.244 \times 10^4 \text{ Kgf}$$

4.2.3.2 Fuerza para dado de reducción de Plomo

EXTRUSIÓN INVERSA

$$d_o := 25 \text{ mm} \quad \text{Diámetro de tocho}$$

$$A_o := \frac{(\pi \cdot d_o^2)}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$$

$$A_{hex} := 314.32 \text{ mm}^2$$

Área de la sección hexagonal deseada

$$d_e := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{hex}}{\pi}} = 20.005 \text{ mm}$$

Diámetro equivalente del punzón hexagonal

Deformación Ideal ϵ

$$\epsilon := \ln \left(\frac{d_o}{d_o - d_e} \right) - 0.19 = 1.42 \quad \text{Ec 2.7}$$

Constantes empíricas de Johnson

$$a := 0.8 \quad b := 1.2$$

Deformación Real ϵ_x

$$\epsilon_x := (a + 1.2\epsilon) = 2.505 \quad \text{Ec 2.9}$$

$$k := 55 \quad \text{MPa} \quad \text{Coeficiente de resistencia del material extruido}$$

$$n := 0 \quad \text{MPa} \quad \text{Exponente de endurecimiento por deformación}$$

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Y_f

$$Y_f := \frac{k \cdot (\epsilon^{n+1})}{\epsilon \cdot (n + 1)} = 55 \quad \text{MPa} \quad \text{Ec 2.11}$$

Longitud del tocho a extruir

$$L := 15 \quad \text{mm}$$

Factor de Forma K_x

$$C_x := 66 \quad \text{mm}^2 \quad \text{Perímetro de la sección de la forma a extruirse (hexágono)}$$

$$C_c := \pi \cdot d_e = 62.848 \quad \text{mm}^2 \quad \text{Perímetro de un círculo cuya área equivale al área seccional de la forma a extruirse (hexágono)}$$

$$K_x := 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25} = 1.002$$

Presión de Extrusión

$$P := K_x Y_f \left(\epsilon_x + \frac{2 \cdot L}{d_o} \right) = 204.225 \quad \text{MPa} \quad \text{Ec 2.12}$$

Fuerza necesaria para realizar la extrusión inversa

$$FP_b := P \cdot A_o = 1.002 \times 10^5 \quad \text{N} \quad \text{Ec 2.13}$$

$$FP_b := \frac{FP_b}{9.81} = 1.022 \times 10^4 \quad \text{Kgf}$$

EXTRUSIÓN DIRECTA

$$A_{hex2} := 218.054 \text{ mm}^2$$

Área de la sección hexagonal deseada

$$ded := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{hex2}}{\pi}} = 16.662 \text{ mm}$$

Diámetro equivalente de sección hexagonal en matriz

Deformación Ideal ε

$$\varepsilon_d := \ln\left(\frac{A_o}{A_{hex2}}\right) = 0.811$$

Ec 2.7

Deformación Real ε_x

$$\varepsilon_{xd} := (a + b \cdot \varepsilon_d) = 1.774$$

Ec 2.9

Esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación Y_f

$$Y_{fd} := \frac{k \cdot (\varepsilon_d^{n+1})}{\varepsilon_d \cdot (n+1)} = 55 \text{ MPa}$$

Ec 2.11

Longitud del tocho a extruir

$$L_d := 7 \text{ mm}$$

Factor de Forma K_x

$$C_{xd} := 55 \text{ mm}^2$$

Perímetro de la sección de la forma a extruirse (hexágono)

$$C_{cd} := \pi \cdot ded = 52.346 \text{ mm}^2$$

Perímetro de un círculo cuya área equivale al área seccional de la forma a extruirse (hexágono)

$$K_{xd} := 0.98 + 0.02 \left(\frac{C_{xd}}{C_{cd}} \right)^{2.25} = 1.002$$

Presión de Extrusión

$$P_d := K_{xd} \cdot Y_{fd} \cdot \left(\varepsilon_{xd} + \frac{2 \cdot L_d}{d_o} \right) = 128.65 \text{ MPa}$$

Ec 2.12

Fuerza de Extrusión

$$FP_{bd} := P_d \cdot A_o = 6.315 \times 10^4 \text{ N}$$

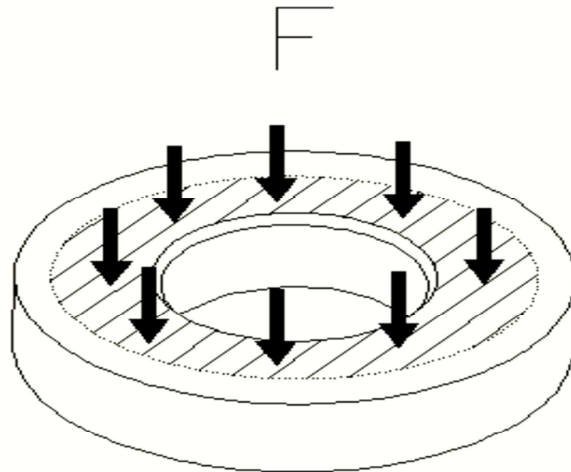
Ec 2.13

$$FP_{bd} := \frac{FP_{bd}}{9.81} = 6.438 \times 10^3 \text{ Kgf}$$

4.3 CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL EQUIPO

4.3.1 DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN DIRECTA

4.3.1.1 Ejemplo de cálculo del dado de extrusión directa



Material DF-2

$$S_y := 2200 \text{ MPa}$$

Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 20120 \text{ Kgf}$$

Análisis a Compresión

$$d := 18 \text{ mm} \quad \text{Diámetro final extruido}$$

$$D := 25 \text{ mm} \quad \text{Diámetro inicial del tocho}$$

$$A := \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \quad \text{Área de aplastamiento}$$

$$A = 236.405 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 85.108 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

$$\sigma_c := \sigma_c \cdot 9.81 \text{ MPa} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

Factor de Seguridad

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 2.635 \quad \text{No falla}$$

Análisis a Cortante

$$h := 15 \quad \text{mm} \quad \text{Espesor del dado}$$

$$D_c := 25 \quad \text{mm} \quad \text{Diámetro de corte}$$

$$A_c := \pi \cdot D_c \cdot h = 1.178 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\tau_{co} := \frac{F}{A_c}$$

$$\tau_{co} = 17.078 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$$

$$\tau_{co} := \tau_{co} \cdot 9.81 \quad \text{MPa} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$$

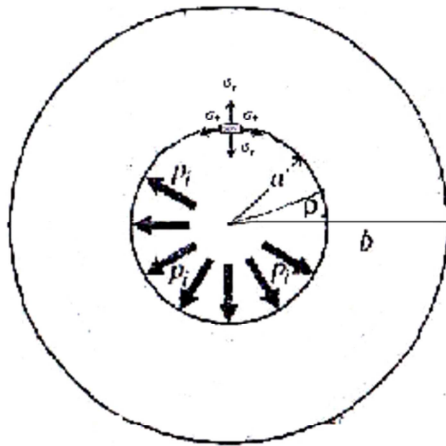
Factor de Seguridad

$$S_{sy} := 0.5 \cdot S_y \quad \text{Esfuerzo cortante máximo}$$

$$n_c := \frac{S_{sy}}{\tau_{co}}$$

$$n_c = 6.566 \quad \text{No falla}$$

4.3.1.2 Cálculo para matriz superior



Material DF-2

$$S_y := 2200 \quad \text{MPa}$$

Verificación si es cilindro de pared delgada o gruesa

si $e/d > 0.1$ cilindro de pared gruesa

$$\text{espesor} := 35 \quad \text{mm}$$

$$d := 25 \quad \text{mm}$$

$$\frac{\text{espesor}}{d} = 1.4 \quad \text{por lo tanto se usan las formulas de cilindro de pared gruesa}$$

Presión interna en el cilindro

$$P_i := 60 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Presión Interna Tabla 2.3}$$

$$a := 12.5 \quad \text{mm}$$

$$b := 30 \quad \text{mm}$$

$$\rho := 12.5 \quad \text{mm}$$

$$\sigma_t := \frac{a^2 \cdot P_i}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{\rho^2} \right)$$

$$\sigma_t = 85.21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_r := \frac{a^2 \cdot \pi}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{\rho^2} \right)$$

$$\sigma_r = -60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_1 := \sigma_t$$

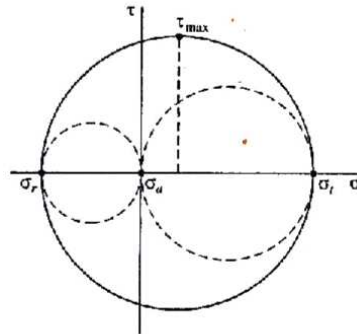
$$\sigma_2 := \sigma_r$$

$$\sigma_3 := 0$$

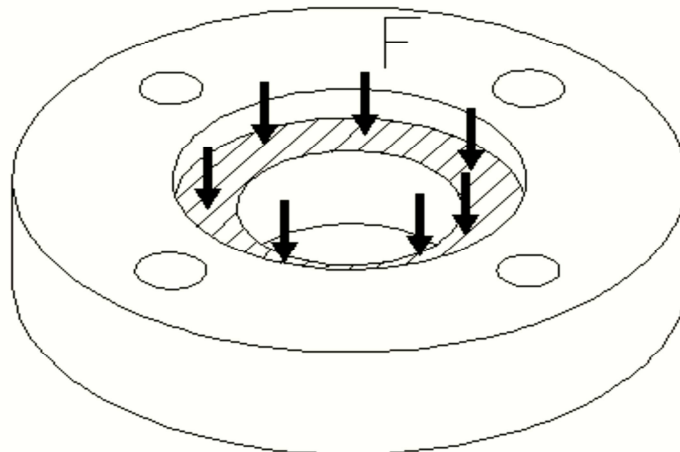
$$\tau_{\max} := \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 72.605 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\tau_{\text{fluencia}} := \frac{S_y}{2} = 1.1 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$n := \frac{\tau_{\text{fluencia}}}{\tau_{\max}} = 15.15$$



4.3.1.3 Cálculos para matriz inferior



Material DF-2

$$S_y := 2200 \text{ MPa}$$

Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 20120 \text{ Kgf}$$

Análisis a Compresión

$d := 25$ mm **Diámetro para salida de material**

$D := 63$ mm **Diámetro del dado**

$$A := \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \quad \text{Área de aplastamiento}$$

$$A = 2.626 \times 10^3 \quad (\text{mm}^2)$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 7.661 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

Factor de Seguridad

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 287.178 \quad \text{Factor de seguridad muy alto por tanto no falla}$$

Análisis a Cortante

$h := 18$ mm **Altura de corte**

$$A_c := \pi \cdot d \cdot h = 1.414 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\tau_{co} := \frac{F}{A_c}$$

$$\tau_{co} = 14.232 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^2} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$$

$$\tau_{co} := \tau_{co} \cdot 9.81 \quad \text{MPa} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$$

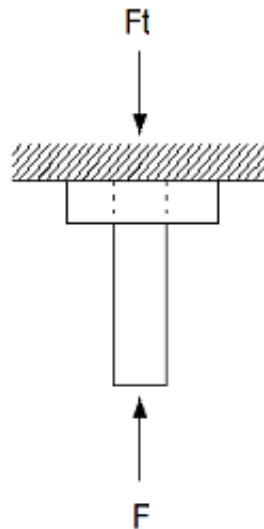
Factor de Seguridad

$$S_{sy} := 0.5 \cdot S_y \quad \text{Esfuerzo cortante máximo}$$

$$n_c := \frac{S_{sy}}{\tau_{co}}$$

$$n_c = 7.879 \quad \text{Factor de seguridad alto por tanto no falla}$$

4.3.1.4 Cálculo del punzón



Material DF-2

$$S_y := 2200 \text{ MPa}$$

Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 20120 \text{ Kgf}$$

Análisis a Compresión

$d := 25 \text{ mm}$ Diámetro del punzón

$$A := \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{Área del punzón perpendicular a la fuerza}$$

$$A = 490.874 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 40.988 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

$$\sigma_c := \sigma_c \cdot 9.81 \text{ MPa} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

Factor de Seguridad

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 5.471 \quad \text{Factor de seguridad muy alto por tanto no falla}$$

Análisis al Pandeo

$L := 65 \text{ mm}$ Longitud del punzón

Inercia del punzón

Análisis punzón corto o largo

$$E := 190000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Módulo de Elasticidad}$$

$$Eu := Sy \cdot \left[1 - \frac{4Sy}{\pi^2 \cdot E} \left(\frac{L}{d} \right)^2 \right] = 2.13 \times 10^3 \quad \text{MPa}$$

$$P := \frac{F \cdot 9.81}{A} = 402.094 \quad \text{MPa}$$

$$\text{Si } P < Sy \cdot \left[1 - \frac{4Sy}{\pi^2 \cdot E} \left(\frac{L}{d} \right)^2 \right] \quad \text{Punzón Largo}$$

$$I := \frac{\pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^4}{4}$$

$$I = 1.917 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

Longitud efectiva

$L_{ff} := 2.1L$ sujeción fija - libre

$$L_{ff} = 136.5 \text{ mm}$$

Radio de giro r

$$r := \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r = 6.25 \text{ mm}$$

$$Sr := \frac{L_{ff}}{r} = 21.84$$

Línea de fallo de columnas de Euler Srd

$$Srd := \pi \sqrt{\frac{2 \cdot E}{Sy}} = 41.289$$

como el Sr se encuentra a la izquierda del Srd en la figura 4.3 se aplica la siguiente fórmula para calcular la fuerza de pandeo

$$Fcr := A \cdot \left[Sy - \frac{1}{E} \cdot \left(Sy \cdot \frac{Sr}{2\pi} \right)^2 \right] = 9.288 \times 10^5 \quad \text{N}$$

$$F_{cr} := \frac{F_{cr}}{9.81} \quad \text{Kgf}$$

comprando con la fuerza que aplicamos para la extrusión se tiene un factor de seguridad

$$n_p := \frac{F_{cr}}{F} = 4.706 \quad \text{por lo tanto el punzón no pandeo}$$

Análisis de Falla por Fatiga

Resistencia a la tensión del material Sut

$$S_{ut} := 3000 \quad \text{Mpa}$$

Fracción de resistencia a la fatiga f

$$f := 0.72 \quad \text{prolongando la curva de fracción de resistencia a la fatiga}$$

donde a y b están definidos por los puntos 10^3 y 10^6 :

$$a := \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

$$b := \frac{-1}{3} \cdot \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right)$$

Resistencia a la fatiga Sf

$$S_f := a \cdot N^b$$

Límite a de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condiciones de uso Se

$$S_e := k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_e'$$

Factor de modificación de condición de superficial ka

$$k_a := a \cdot S_{ut}^b$$

$$a := 4.51 \quad \text{Mpa} \quad \text{por que el material es maquinado en frío}$$

$$b := -0.265 \quad \text{Mpa}$$

$$k_a := a \cdot S_{ut}^b$$

$$k_a = 0.54$$

Factor de modificación del tamaño kb

$$k_b := 1 \quad \text{para carga axial no hay efecto de tamaño}$$

Factor de modificación de carga kc

$$k_c := 0.85 \quad \text{para carga axial}$$

Factor de modificación de la temperatura kd

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}}$$

donde:

ST = resistencia a la tensión a la temperatura de operación

SRT = resistencia a la tensión a temperatura ambiente

$$k_d := 1 \quad \text{temperatura ambiente}$$

Factor de confiabilidad ke

$$k_e := 1 - 0.08 \cdot Z_a$$

donde:

Za = Variación de transformación

$$Z_a := 1.288 \quad \text{para una confiabilidad del 90\%}$$

$$k_e := 1 - 0.08 \cdot Z_a$$

$$k_e = 0.897$$

Factor de modificación de efectos varios kf

$$k_f := 1 \quad \text{no existe factor de modificación por ningún efecto}$$

Límite de resistencia la fatiga en viga rotatoria Se'

$$Se' := 700 \quad \text{Mpa} \quad \text{porque } S_{ut} > 1400 \text{ Mpa}$$

por lo tanto

$$Se := k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot Se'$$

$$Se = 288.423 \quad \text{Mpa}$$

reemplazando

$$a_2 := \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{Se}$$

$$a_2 = 1.618 \times 10^4 \quad \text{Mpa}$$

$$b_2 := \frac{-1}{3} \cdot \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{Se}\right)$$

$$b_2 = -0.291$$

por lo tanto y para una vida finita de:

$$N_f := 10^4$$

Tomando en cuenta que se realizan
72 prácticas por semestre para 4
cursos del DECEM: el punzón falla en
70 años

$$S_f := a_2 \cdot N_f^{b_2}$$

$$S_f = 1.104 \times 10^3 \quad \text{Mpa}$$

Factor de seguridad para el punzón n en función al esfuerzo de compresión σ_c

$$\sigma_c = 40.988 \quad \text{Mpa}$$

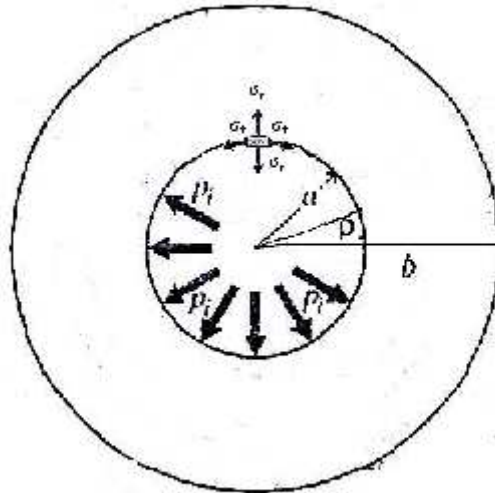
$$S_f = 1.104 \times 10^3$$

$$n_f := \frac{S_f}{\sigma_c}$$

$$n_f = 26.935$$

4.3.2 DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN INVERSA

4.3.2.1 Matriz de extrusión inversa



Material DF-2

$$S_y := 2200 \quad \text{Mpa}$$

Verificación si es cilindro de pared delgada o gruesa

si $e/d > 0.1$ cilindro de pared gruesa

$$\text{espesor} := 20 \quad \text{mm}$$

$$d := 25 \quad \text{mm}$$

$\frac{\text{espesor}}{d} = 0.8$ por lo tanto se usan las formulas de cilindro de pared gruesa

Presión interna en el cilindro

$P_i := 60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ **Presión Interna Tabla 2.3**

$a := 25 \text{ mm}$

$b := 45 \text{ mm}$

$\rho := 25 \text{ mm}$

$$\sigma_t := \frac{a^2 \cdot P_i}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{\rho^2} \right)$$

$\sigma_t = 113.571 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$$\sigma_r := \frac{a^2 \cdot P_i}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{\rho^2} \right)$$

$\sigma_r = -60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$\sigma_1 := \sigma_t$

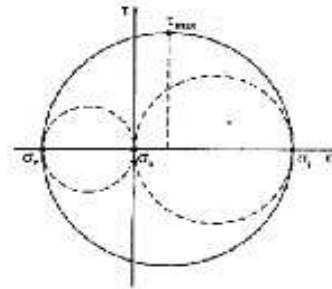
$\sigma_2 := \sigma_r$

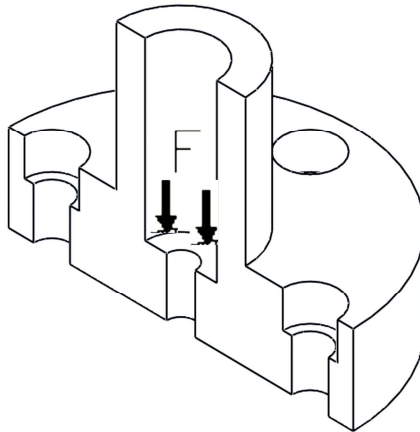
$\sigma_3 := 0$

$\tau_{\max} := \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 86.786 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$\tau_{\text{fluencia}} := \frac{S_y}{2} = 1.1 \times 10^3 \text{ MPa}$

$n := \frac{\tau_{\text{fluencia}}}{\tau_{\max}} = 12.675$





Fuerza necesaria para extruir el material F

$F := 11470 \quad \text{Kgf}$

Análisis a Compresión

$A1 := 412.33 \quad \text{mm}^2 \quad \text{Área de aplastamiento}$

$\sigma_c := \frac{F}{A1}$

$\sigma_c = 27.818 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$

$\sigma_c := (\sigma_c \cdot 9.81) \quad \text{MPa} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$

Factor de Seguridad

$n1 := \frac{Sy}{\sigma_c}$

$n1 = 8.062 \quad \text{Factor de seguridad muy alto por tanto no falla}$

Análisis a Cortante

$h := 20 \quad \text{mm}$

$Ac := \pi \cdot d \cdot h = 1.571 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$

$\sigma_{co} := \frac{F}{Ac}$

$\sigma_{co} = 7.302 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$

Factor de Seguridad

$$S_{sy} := 0.5 \cdot S_y \quad \text{Esfuerzo cortante máximo}$$

$$n_c := \frac{S_{sy}}{\sigma_{co} \cdot 9.81}$$

$$n_c = 15.356 \quad \text{Factor de seguridad muy alto por tanto no falla}$$

4.3.2.2 Expulsor para extrusión inversa



Material DF-2

$$S_y := 2200 \quad \text{MPa}$$

Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 11470 \quad \text{Kgf}$$

Análisis a Compresión

$$d_e := 25 \quad \text{mm} \quad \text{Diámetro del expulsor}$$

$$A_I := \frac{\pi}{4} \cdot d_e^2 \quad \text{mm}^2 \quad \text{Área de aplastamiento}$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A_I}$$

$$\sigma_c = 23.366 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

$$\sigma_c := \sigma_c \cdot 9.81 \quad \text{MPa} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

Factor de Seguridad

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 9.598 \quad \text{Factor de seguridad muy alto por tanto no falla}$$

Análisis a Cortante

$h := 15$ mm **Altura de expulsor**

$d := 10$ mm **Diámetro de corte**

$$A_c := \pi \cdot d \cdot h = 471.239 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{co} := \frac{F}{A_c}$$

$$\tau_{co} = 24.34 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \text{ Esfuerzo Cortante}$$

$$\tau_{co} := \tau_{co} \cdot 9.81 \text{ Mpa} \text{ Esfuerzo Cortante}$$

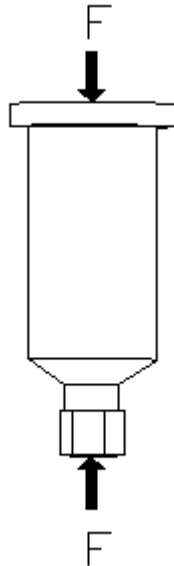
Factor de Seguridad

$S_{sy} := 0.5 \cdot S_y$ **Esfuerzo cortante máximo**

$$n_c := \frac{S_{sy}}{\tau_{co}}$$

$n_c = 4.607$ **No falla**

4.3.2.3 Punzón para extrusión inversa



Material DF-2

$S_y := 2200$ MPa

Fuerza necesaria para extruir el material F

$F := 11470$ Kgf

Análisis a Compresión en la sección circular del punzón

$$d := 17 \quad \text{m} \quad \text{Diámetro del punzón}$$

$$A := \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{Área del punzón perpendicular a la fuerza}$$

$$A = 226.98 \quad \text{mm}^2$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 50.533 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

Factor de Seguridad

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c \cdot 9.81}$$

$$n = 4.438 \quad \text{No falla}$$

Análisis en la sección hexagonal del punzón

Análisis a Compresión

$$A_1 := 314.32 \quad \text{mm}^2 \quad \text{Área sección exagonal}$$

$$\sigma_{ch} := \frac{F}{A_1} = 36.491 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$$

$$n_1 := \frac{S_y}{\sigma_{ch}} = 60.288 \quad \text{No falla}$$

Análisis a Cortante

$$h := 14 \quad \text{mm} \quad \text{Altura de la sección hexagonal}$$

$$A_c := \pi \cdot d \cdot h = 747.699 \quad \text{mm}^2$$

$$\tau_{co} := \frac{F}{A_c}$$

$$\tau_{co} = 15.34 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$$

$$S_{sy} := 0.5 \cdot S_y \quad \text{Esfuerzo cortante máximo}$$

$$n_c := \frac{S_{sy}}{\tau_{co} \cdot 9.81}$$

$$n_c = 7.309 \quad \text{No falla}$$

Análisis al Pandeo

L := 55 mm **Longitud del punzón**

Df := 40 mm **Diametro del punzón**

$$A2 := \frac{\pi \cdot Df^2}{4}$$

Análisis punzón corto o largo

$$E1 := 190000 \frac{N}{mm^2} \quad \text{Módulo de Elasticidad}$$

$$Eu := Sy \cdot \left[1 - \frac{4Sy}{\pi^2 \cdot E1} \left(\frac{L}{Df} \right)^2 \right] = 2.18 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$P := \frac{F \cdot 9.81}{A2} = 89.541 \text{ MPa}$$

$$\text{Si } P < Sy \cdot \left[1 - \frac{4Sy}{\pi^2 \cdot E1} \left(\frac{L}{d} \right)^2 \right] \quad \text{Punzón Largo}$$

Inercia del punzón

$$I := \frac{\pi \cdot \left(\frac{Df}{2} \right)^4}{4}$$

$$I = 1.257 \times 10^5 \text{ mm}^4$$

Longitud efectiva

Lff := 2 · L sujeción fija libre

Lff = 115.5 mm

Radio de giro r

$$r := \sqrt{\frac{I}{A2}}$$

r = 10 mm

$$Sr := \frac{Lff}{r} = 11.55$$

Línea de fallo de columnas de Euler Srd

$$Srd := \pi \sqrt{\frac{2 \cdot E1}{Sy}} = 41.289$$

como nuestro Sr se encuentra a la izquierda del Srd en la grafica 4.3 se aplica la siguiente fórmula para calcular la fuerza de pandeo

$$Fcr := A \cdot \left[Sy - \frac{1}{E1} \cdot \left(Sy \cdot \frac{Sr}{2\pi} \right)^2 \right] = 4.798 \times 10^5 \quad N$$

comprando con la fuerza que aplicamos para la extrusión se tiene un factor de seguridad

$$np := \frac{Fcr}{F} = 41.832 \quad \text{por lo tanto el punzón no pandea}$$

Análisis de Falla por Fatiga

Resistencia a la tensión del material Sut

$$Sut := 3000 \quad \text{Mpa}$$

Resistencia a la fatiga Sf

$$Sf := a \cdot N^b$$

donde a y b están definidos por los puntos 10^3 y 10^6 :

$$\text{donde: } a := \frac{(f \cdot Sut)^2}{Se}$$

$$b := \frac{-1}{3} \cdot \log\left(\frac{f \cdot Sut}{Se}\right)$$

Fracción de resistencia a la fatiga f

$$f := 0.72 \quad \text{prolongando la curva de fracción de resistencia a la fatiga}$$

Límite a de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condiciones de uso Se

$$Se := ka \cdot kb \cdot kc \cdot kd \cdot ke \cdot kf \cdot Se'$$

Factor de modificación de condición de superficial ka

$$ka := a \cdot Sut^b$$

$$a := 4.51 \quad \text{Mpa} \quad \text{por que el material es laminado en frío}$$

$$b := -0.265 \quad \text{Mpa}$$

$$ka := a \cdot Sut^b$$

$$ka = 0.54$$

Factor de modificación del tamaño kb

$k_b := 1$ para carga axial no hay efecto de tamaño

Factor de modificación de carga kc

$k_c := 0.85$ para carga axial

Factor de modificación de la temperatura kd

$$k_d = \frac{ST}{SRT}$$

donde:

ST = resistencia a la tensión a la temperatura de operación

SRT = resistencia a la tensión a temperatura ambiente

$k_d := 1$ Temperatura ambiente

Factor de confiabilidad ke

$k_e := 1 - 0.08Z_a$

donde:

Za = Variación de transformación

$Z_a := 1.288$ para una confiabilidad del 90%

$k_e := 1 - 0.08Z_a$

$k_e = 0.897$

Factor de modificación de efectos varios kf

$k_f := 1$ no existe factor de modificación por ningún efecto

Límite de resistencia la fatiga en viga rotatoria Se'

$Se' := 700$ Mpa porque $S_{ut} > 1400$ Mpa

por lo tanto

$Se := k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot Se'$

$Se = 288.423$ Mpa

reemplazando

donde:
 $a_2 := \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{Se}$

$$a_2 = 1.618 \times 10^4 \text{ Mpa}$$

$$b_2 := \frac{-1}{3} \cdot \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right)$$

$$b_2 = -0.291$$

por lo tanto y para una vida finita de:

$$N_f := 10^4$$

$$S_f := a_2 \cdot N_f^{b_2}$$

$$S_f = 1.104 \times 10^3 \text{ Mpa}$$

**Tomando en cuenta que se realizan
72 prácticas por semestre para 4
cursos del DECEM: el punzón falla en
70 años**

Factor de seguridad para el punzón n en función al esfuerzo de compresión σ_c

$$\sigma_c = 50.533 \text{ Mpa}$$

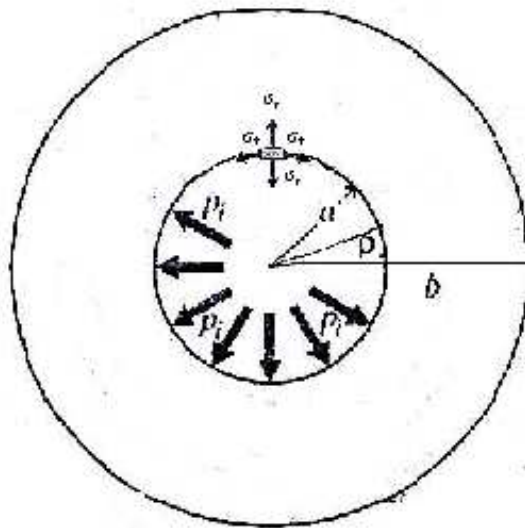
$$S_f = 1.104 \times 10^3$$

$$n_f := \frac{S_f}{\sigma_c}$$

$$n_f = 21.848$$

4.3.3 DISEÑO DEL EQUIPO DE EXTRUSIÓN MIXTA

4.3.3.1 Matriz de extrusión mixta



Material DF-2

$$S_y := 2200 \quad \text{MPa}$$

Verificación si es cilindro de pared delgada o gruesa

si $e/d > 0.1$ cilindro de pared gruesa

$$\text{espesor} := 20 \quad \text{mm}$$

$$d := 25 \quad \text{mm}$$

$$\frac{\text{espesor}}{d} = 0.8 \quad \text{por lo tanto se usan las formulas de cilindro de pared gruesa}$$

Presión interna en el cilindro

$$P_i := 60 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Presión Interna Tabla 2.3}$$

$$a := 12.5 \quad \text{mm}$$

$$b := 22.5 \quad \text{mm}$$

$$\rho := 12.5 \quad \text{mm}$$

$$\sigma_t := \frac{a^2 \cdot P_i}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 + \frac{b^2}{\rho^2} \right)$$

$$\sigma_t = 113.571 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_r := \frac{a^2 \cdot \text{Pi}}{b^2 - a^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{\rho^2} \right)$$

$$\sigma_r = -60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_1 := \sigma_t$$

$$\sigma_2 := \sigma_r$$

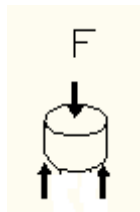
$$\sigma_3 := 0$$

$$\tau_{\max} := \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = 86.786 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{\text{fluencia}} := \frac{S_y}{2} = 1.1 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$n := \frac{\tau_{\text{fluencia}}}{\tau_{\max}} = 12.675$$

4.3.3.2 Expulsor para extrusión mixta



Material DF-2

$$S_y := 2200 \text{ MPa}$$

Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 22720 \text{ Kgf}$$

Análisis a Compresión

$$D_e := 15 \text{ mm} \text{ Diámetro del expulsor}$$

$$A := \frac{\pi \cdot (D_e^2)}{4} = 176.715 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 128.569 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

$$\sigma_c := \sigma_c \cdot 9.81 \quad \text{MPa} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

Factor de Seguridad

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 1.744 \quad \text{No falla}$$

Análisis a Cortante

$$h := 15 \quad \text{mm} \quad \text{Altura de expulsor}$$

$$d := 10 \quad \text{mm} \quad \text{Diámetro de corte}$$

$$A_c := \pi \cdot d \cdot h = 471.239 \quad \text{mm}^2$$

$$\tau_{co} := \frac{F}{A_c}$$

$$\tau_{co} = 48.213 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$$

$$\tau_{co} := \tau_{co} \cdot (9.8) = 472.491 \quad \text{MPa}$$

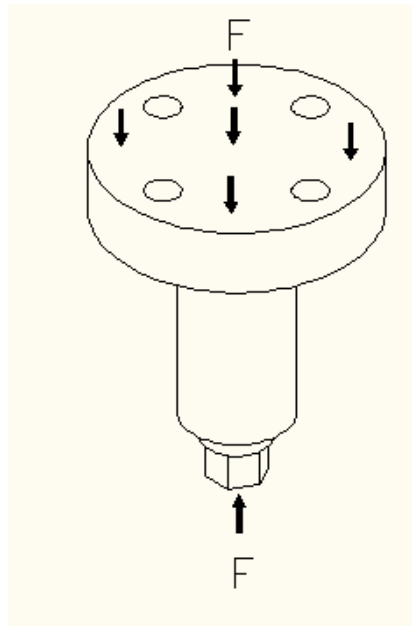
Factor de Seguridad

$$S_{sy} := 0.5 \cdot S_y \quad \text{Esfuerzo cortante máximo}$$

$$n_c := \frac{S_{sy}}{\tau_{co}}$$

$$n_c = 2.328 \quad \text{No falla}$$

4.3.3.3 Punzón para extrusión mixta



Material DF-2

$$S_y := 2200 \text{ MPa}$$

Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 22720 \text{ Kgf}$$

Análisis a Compresión en la sección circular del punzón

$$d := 25 \text{ mm} \quad \text{Diámetro del punzón}$$

$$A := \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{Área del punzón perpendicular a la fuerza}$$

$$A = 490.874 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 46.285 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

$$\sigma_c := \sigma_c \cdot (9.8) = 453.591 \text{ MPa}$$

Factor de Seguridad

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 4.85 \quad \text{No falla}$$

Análisis en la sección hexagonal del punzón

Análisis a Compresión

$$A1 := 218.054 \quad \text{mm}^2 \quad \text{Área sección hexagonal}$$

$$\sigma_{ch} := \frac{F}{A1} = 104.194 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{ch} := \sigma_{ch} \cdot (9.810) = 1.022 \times 10^3 \quad \text{MPa}$$

$$n1 := \frac{Sy}{\sigma_{ch}} = 2.152 \quad \text{No falla}$$

Análisis al Pandeo

$$L := 80 \quad \text{mm} \quad \text{Longitud del punzón}$$

Análisis punzón corto o largo

$$E1 := 190000 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Módulo de Elasticidad}$$

$$Eu := Sy \cdot \left[1 - \frac{4Sy}{\pi^2 \cdot E1} \left(\frac{L}{d} \right)^2 \right] = 2.094 \times 10^3 \quad \text{MPa}$$

$$P := \frac{F \cdot 9.81}{A} = 454.054 \quad \text{MPa}$$

$$\text{Si } P < Sy \cdot \left[1 - \frac{4Sy}{\pi^2 \cdot E} \left(\frac{L}{d} \right)^2 \right] \quad \text{Punzón Largo}$$

Inercia del punzón

$$I := \frac{\pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^4}{4}$$

$$I = 1.917 \times 10^4 \quad \text{mm}^4$$

Longitud efectiva

$$L_{ff} := 2 \cdot L \quad \text{sujeción fija libre}$$

$$L_{ff} = 168 \quad \text{mm}$$

Radio de giro r

$$r := \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$r = 6.25$$

$$S_r := \frac{L_{ff}}{r} = 26.88$$

Línea de fallo de columnas de Euler Srd

$$S_{rd} := \pi \sqrt{\frac{2 \cdot E I}{S_y}} = 41.289$$

como nuestro S_r se encuentra a la izquierda del S_{rd} en la grafica 4.3 se aplica la siguiente fórmula para calcular la fuerza de pandeo

$$F_{cr} := A \cdot \left[S_y - \frac{1}{E I} \cdot \left(S_y \cdot \frac{S_r}{2\pi} \right)^2 \right] = 8.511 \times 10^5 \quad \text{N}$$

comprando con la fuerza que aplicamos para la extrusión se tiene un factor de seguridad

$$n_p := \frac{F_{cr}}{F \cdot 9.81} = 3.818 \quad \text{por lo tanto el punzón no pandea}$$

Análisis de Falla por Fatiga

Resistencia a la tensión del material S_{ut}

$$S_{ut} := 3000 \quad \text{Mpa}$$

Resistencia a la fatiga S_f

$$S_f := a \cdot N^b$$

donde a y b están definidos por los puntos 10^3 y 10^6 :

$$a := \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e}$$

$$b := \frac{-1}{3} \cdot \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right)$$

Fracción de resistencia a la fatiga f

$$f := 0.72 \quad \text{prolongando la curva de fracción de resistencia a la fatiga}$$

Límite a de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condiciones de uso S_e

$$S_e := k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_e'$$

Factor de modificación de condición de superficial k_a

$$k_a := a \cdot S_{ut}^b$$

$$a := 4.51 \quad \text{Mpa} \quad \text{por que el material es laminado en frío}$$

$$b := -0.265 \quad \text{Mpa}$$

$$k_a := a \cdot S_{ut}^b$$

$$k_a = 0.54$$

Factor de modificación del tamaño kb

$k_b := 1$ para carga axial no hay efecto de tamaño

Factor de modificación de carga kc

$k_c := 0.85$ para carga axial

Factor de modificación de la temperatura kd

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}}$$

donde:

ST = resistencia a la tensión a la temperatura de operación

SRT = resistencia a la tensión a temperatura ambiente

$k_d := 1$ Temperatura ambiente

Factor de confiabilidad ke

$k_e := 1 - 0.08 Z_a$

donde:

Za = Variación de transformación

$Z_a := 1.288$ para una confiabilidad del 90%

$k_e := 1 - 0.08 Z_a$

$k_e = 0.897$

Factor de modificación de efectos varios kf

$k_f := 1$ no existe factor de modificación por ningún efecto

Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria Se'

$Se' := 700$ Mpa porque $S_{ut} > 1400$ Mpa

por lo tanto

$Se := k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot Se'$

$Se = 288.423$ Mpa

reemplazando

donde:

$$a_2 := \frac{(\hat{f} \cdot S_{ut})^2}{Se}$$

$a_2 = 1.618 \times 10^4$ Mpa

$$b2 := \frac{-1}{3} \cdot \log\left(\frac{f \cdot Sut}{Se}\right)$$

$$b2 = -0.291$$

por lo tanto y para una vida finita de:

$$Nf := 10^4$$

$$Sf := a2 \cdot Nf^{b2}$$

$$Sf = 1.104 \times 10^3 \text{ Mpa}$$

Tomando en cuenta que se realizan
72 prácticas por semestre para 4
cursos del DECEM: el punzón falla en
70 años

Factor de seguridad para el punzón n en función al esfuerzo de compresión σ_c

$$\sigma_c = 453.591 \text{ Mpa}$$

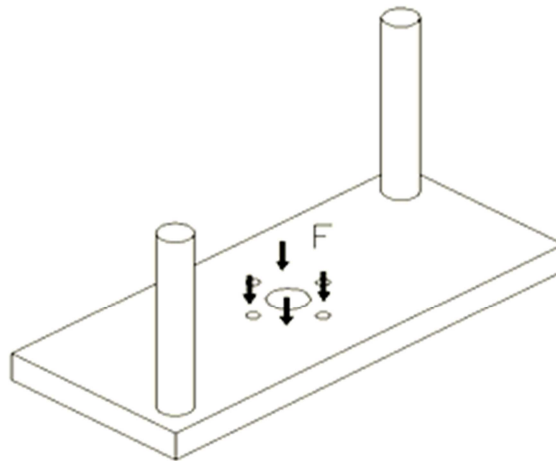
$$Sf = 1.104 \times 10^3$$

$$nf := \frac{Sf}{\sigma_c}$$

$$nf = 2.434$$

4.3.4 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL EQUIPO

4.3.4.1 Porta matrices



Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 22720 \text{ Kgf}$$

Análisis a Compresión

$$A := 10366.5 \text{ mm}^2 \text{ Área de aplastamiento}$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 2.192 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

$$\sigma_c := \sigma_c \cdot (9.8) = 21.478 \quad \text{MPa}$$

Factor de Seguridad

$$S_y := 248.2 \quad \text{MPa} \quad \text{Límite de fluencia ASTM A36}$$

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 11.556 \quad \text{no falla}$$

Análisis a Cortante

$$A_c := 42560 \quad \text{mm}^2$$

$$\tau_{co} := \frac{F}{A_c}$$

$$\tau_{co} = 0.534 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo Cortante}$$

$$\tau_{co} := \tau_{co} \cdot 9.8 = 5.232 \quad \text{MPa}$$

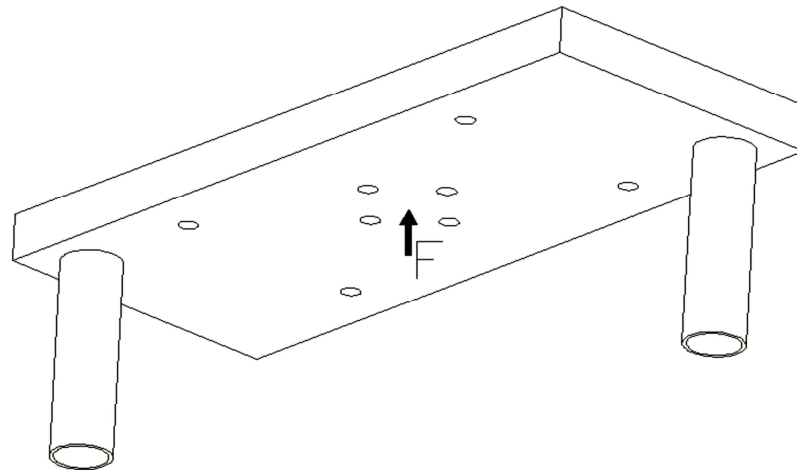
Factor de Seguridad

$$S_{sy} := 0.5 \cdot S_y \quad \text{Esfuerzo cortante máximo}$$

$$n_c := \frac{S_{sy}}{\tau_{co}}$$

$$n_c = 23.721 \quad \text{Factor de seguridad muy alto por tanto no falla}$$

4.3.4.2 Porta punzones



Fuerza necesaria para extruir el material F

$$F := 22720 \quad \text{Kgf}$$

Análisis a Compresión

$$D := 100 \quad \text{mm} \quad \text{Diámetro de base de punzón}$$

$$A := \frac{\pi \cdot (D^2)}{4} = 7.854 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\sigma_c := \frac{F}{A}$$

$$\sigma_c = 2.893 \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \quad \text{Esfuerzo a Compresión}$$

$$\sigma_c := \sigma_c \cdot (9.8) = 28.349 \quad \text{MPa}$$

Factor de Seguridad

$$S_y := 248.2 \quad \text{MPa} \quad \text{Límite de fluencia ASTM A36}$$

$$n := \frac{S_y}{\sigma_c}$$

$$n = 8.755 \quad \text{Factor de seguridad muy alto por tanto no falla}$$

4.4 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EN SOLIDWORKS

Para el análisis computacional se introducen las propiedades mecánicas de los materiales en Solidworks, como se indica en la figura 4.4, posteriormente dichos materiales son asignados a los elementos del equipo extrusor para la simulación.

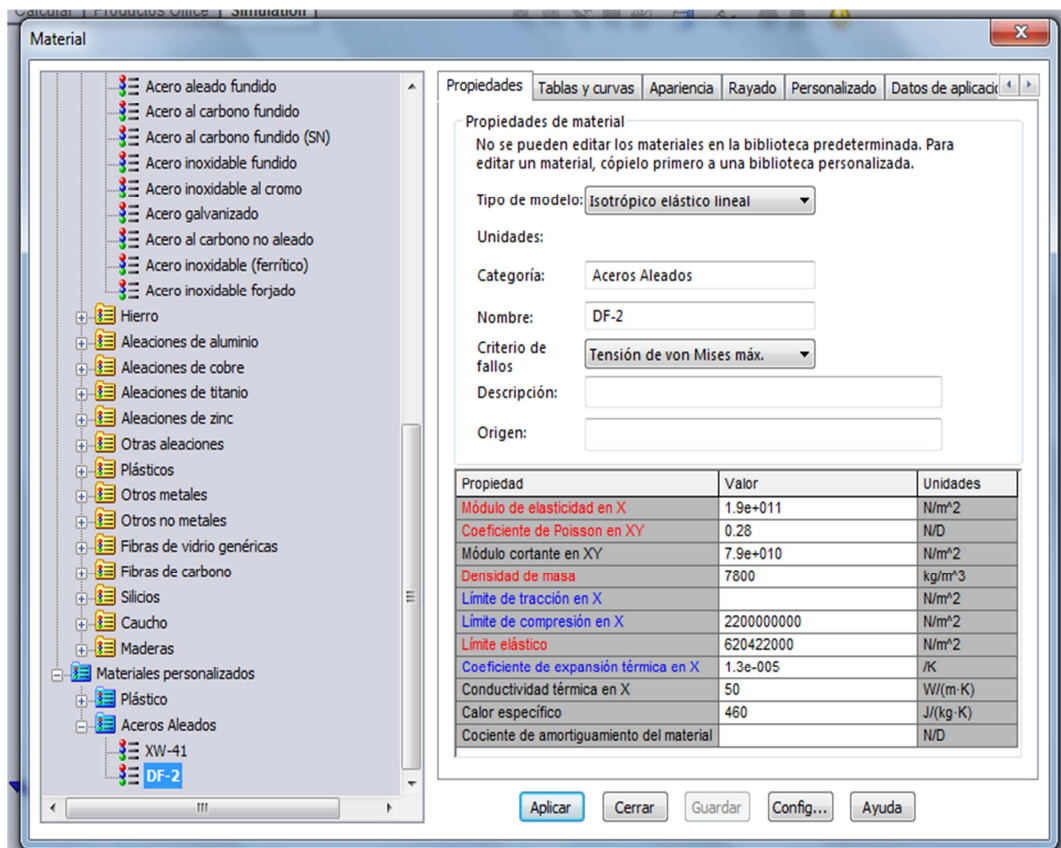


Figura 4.4 Ingreso de propiedades de materiales para simulaciones computacionales³⁶

Posteriormente se asignan los puntos que van a estar sujetos el momento de la extrusión (Figura 4.5), esta sujeción es fija tal y como sucede en la realidad, las flechas verdes indican los puntos fijos.

³⁶ Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS.

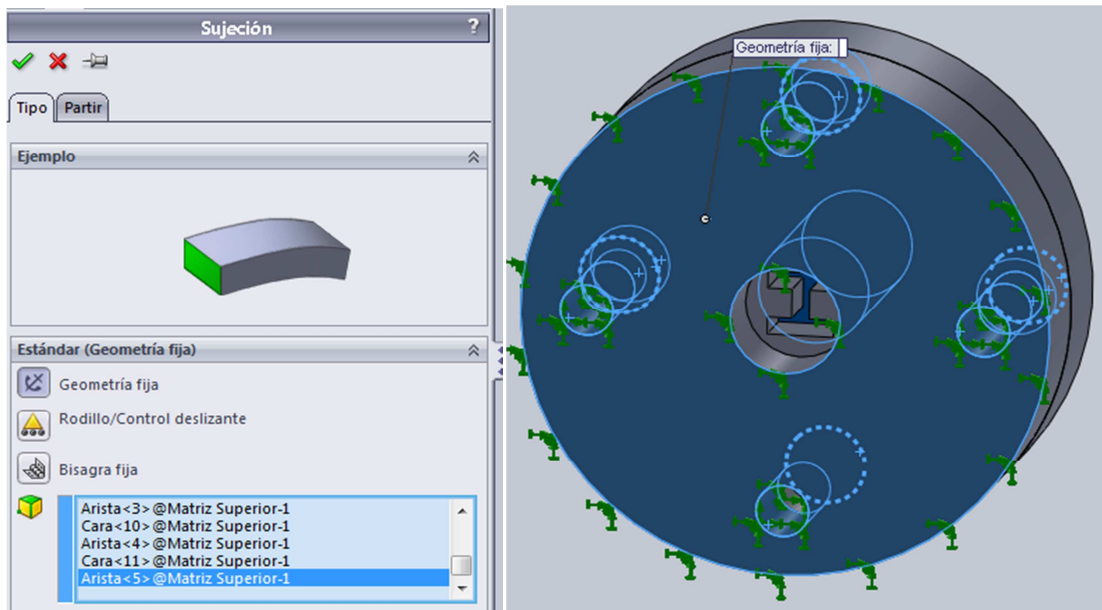


Figura 4.5 Selección de puntos fijos Solidworks ³⁷

Finalmente se introducen los valores de las fuerzas que son aplicadas y se selecciona la dirección y lugar en donde son ejercidas.

Con estos datos se procede a la simulación computacional.

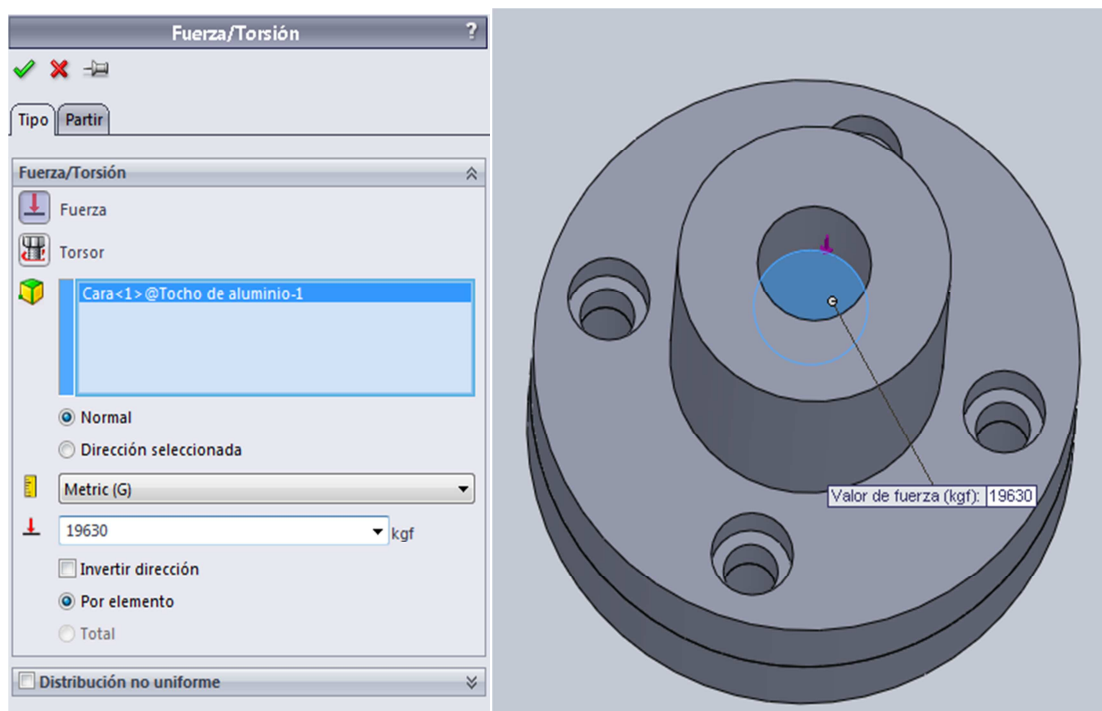


Figura 4.6 Introducción de Fuerzas Solidworks ³⁸

³⁷ Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Puntos Fijos.

³⁸ Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Fuerzas.

En este programa se analiza los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad que se tiene al momento de extruir, en este caso se analizó los factores de seguridad, los mismos que son comprobados con los cálculos realizados.

En las siguientes simulaciones el color rojo indica el lugar en donde el factor de seguridad es más bajo.

4.4.1 EXTRUSIÓN DIRECTA (FACTORES DE SEGURIDAD)

4.4.1.1 Dado

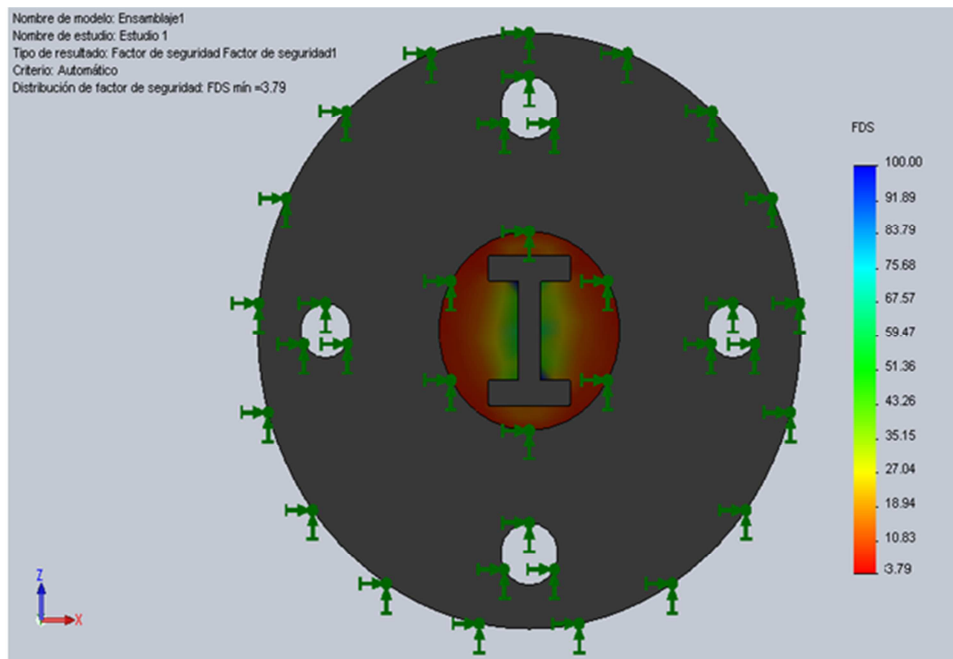


Figura 4.7 Factor de seguridad en dado de extrusión directa mediante simulación computacional³⁹

³⁹ Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Factor de seguridad dado I.

4.4.1.2 Porta Matriz Inferior

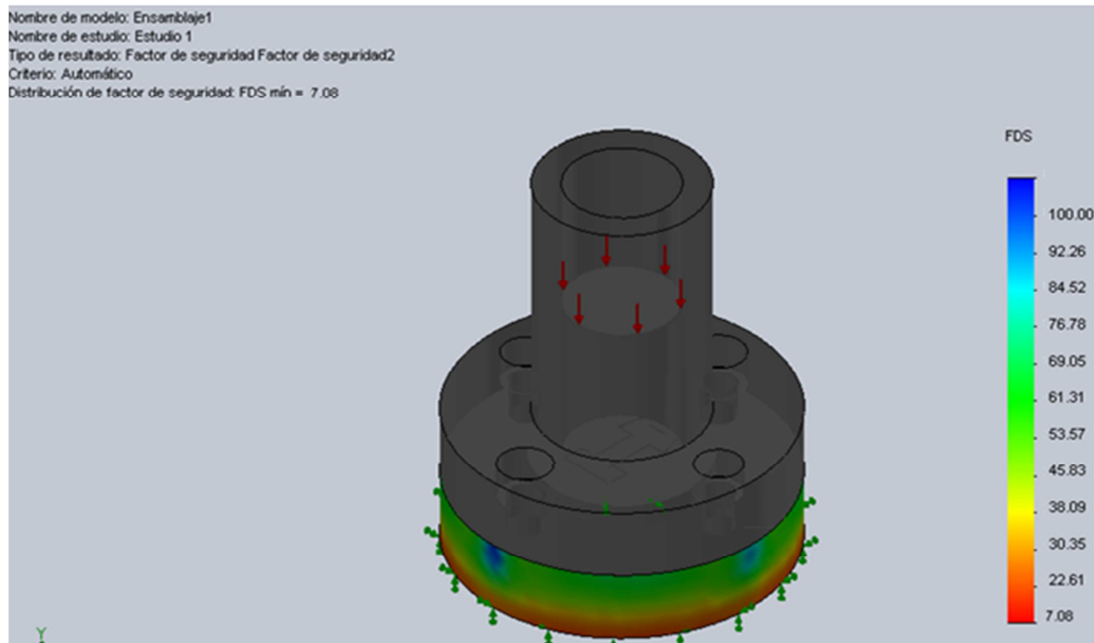


Figura 4.8 Factor de seguridad en matriz inferior de extrusión directa mediante simulación computacional⁴⁰

4.4.1.3 Porta Matriz Superior

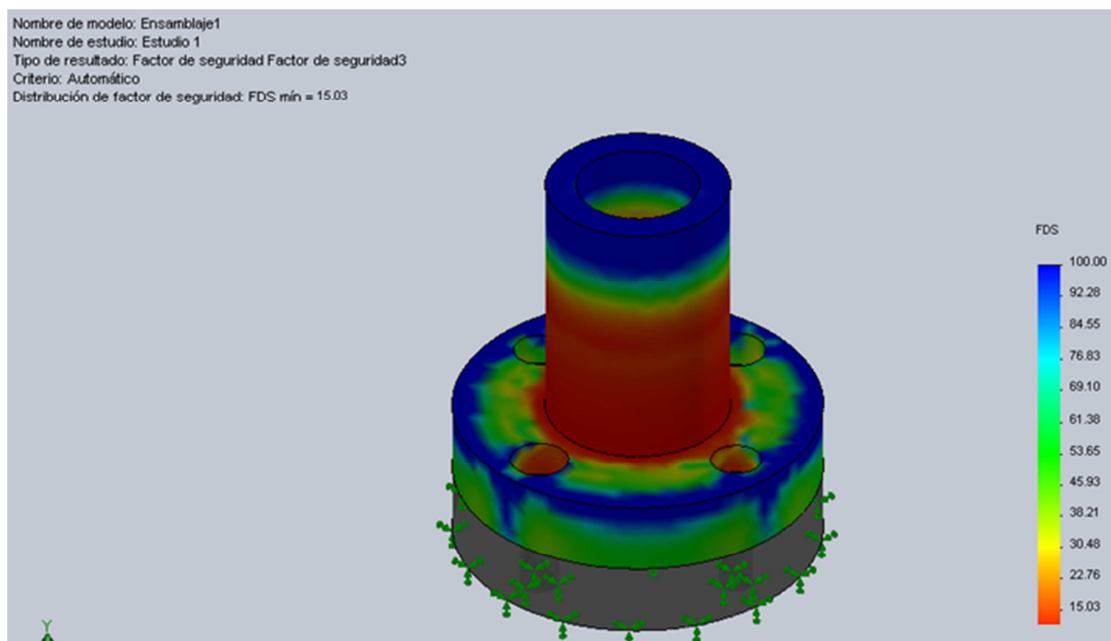


Figura 4.9 Factor de seguridad en matriz superior para extrusión directa mediante simulación computacional⁴¹

⁴⁰Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Matriz Inferior.

⁴¹Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Matriz Superior.

4.4.1.4 Punzón

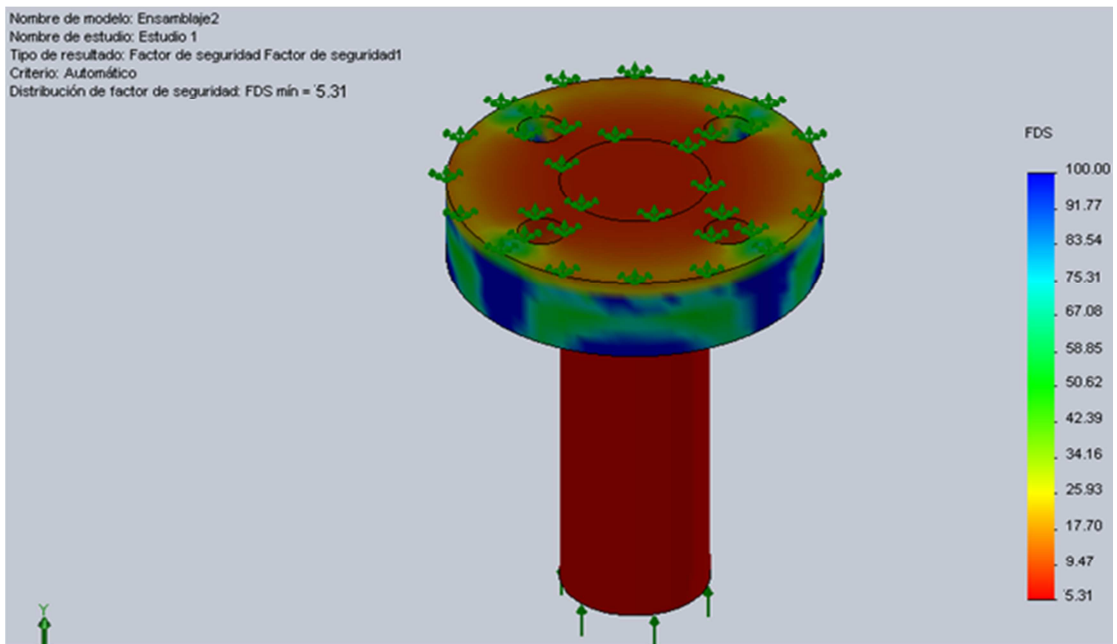


Figura 4.10 Factor de seguridad en punzón de extrusión directa mediante simulación computacional⁴²

4.4.2 EXTRUSIÓN INVERSA (FACTORES DE SEGURIDAD)

4.4.2.1 Matriz

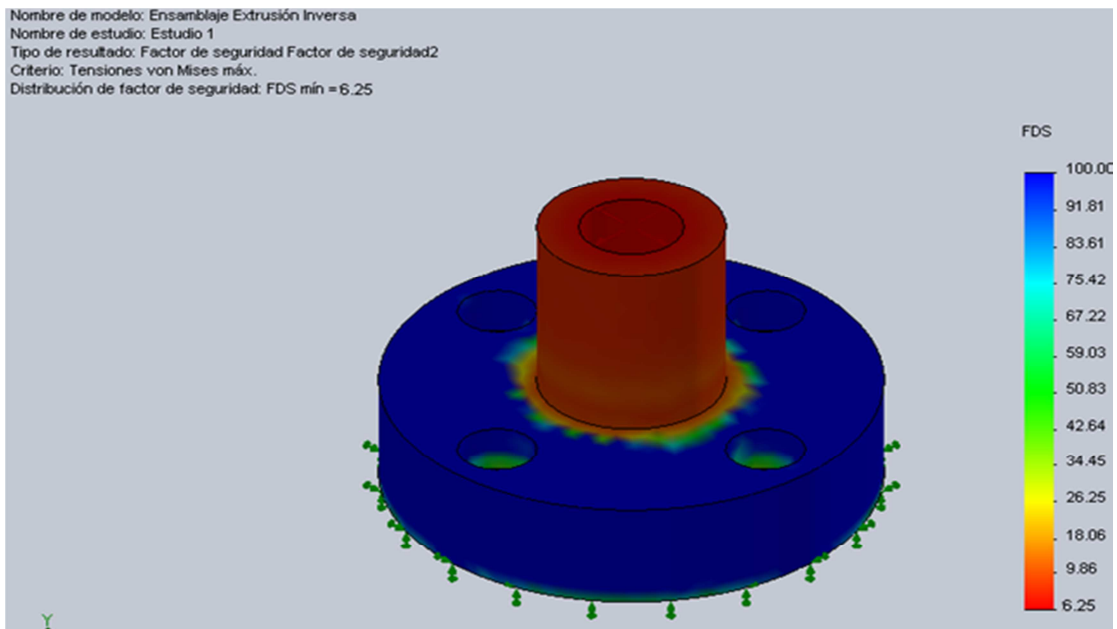


Figura 4.11 Factor de seguridad en matriz para extrusión inversa mediante simulación computacional⁴³

⁴²Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Punzón de extrusión directa.

⁴³Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Matriz de extrusión inversa.

4.4.2.2 Expulsor

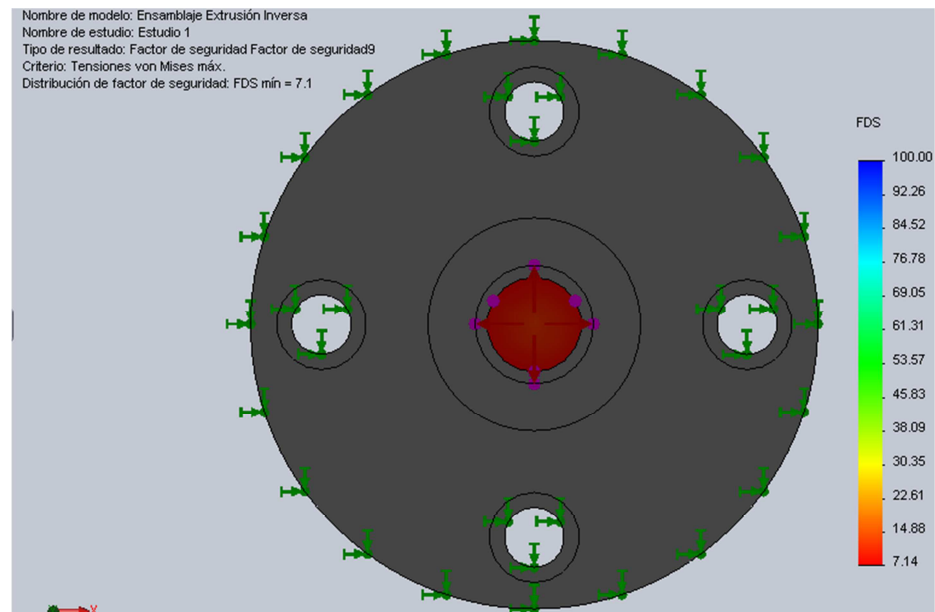


Figura 4.12 Factor de seguridad en expulsor de extrusión inversa mediante simulación computacional⁴⁴

4.4.2.3 Punzón

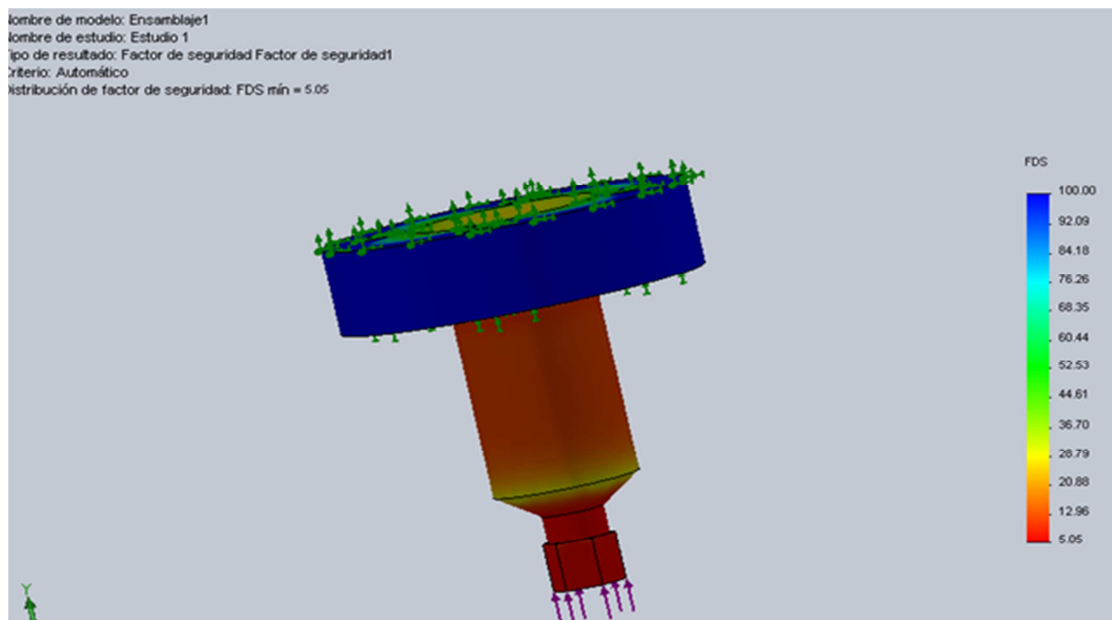


Figura 4.13 Factor de seguridad en punzón de extrusión inversa mediante simulación computacional⁴⁵

⁴⁴Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Expulsor de extrusión inversa.

⁴⁵Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Punzón de extrusión inversa.

4.4.3 EXTRUSIÓN MIXTA (FACTORES DE SEGURIDAD)

4.4.3.1 Punzón

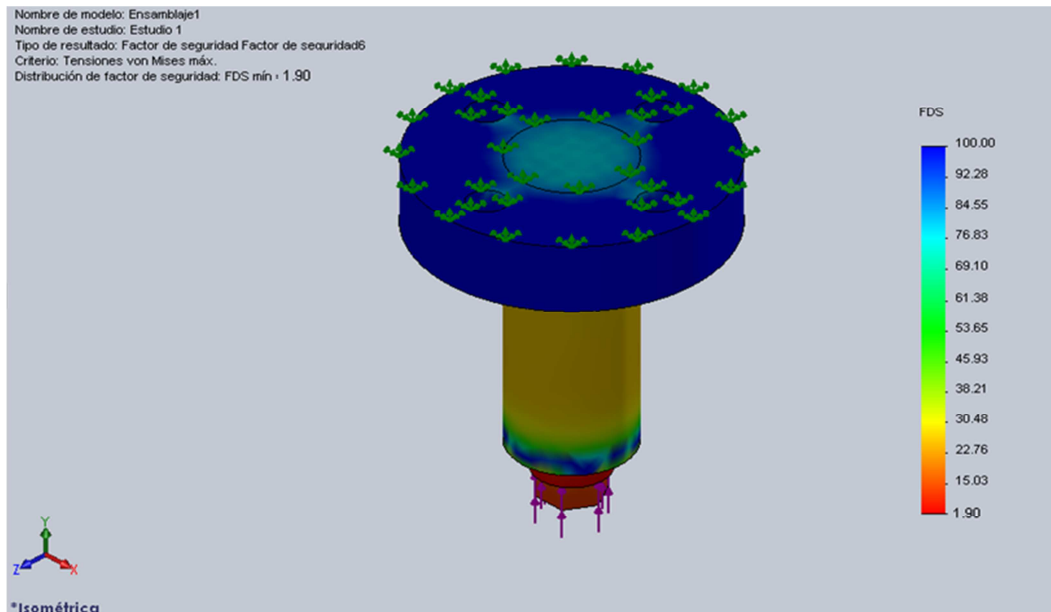


Figura 4.14 Factor de seguridad en punzón de extrusión mixta mediante simulación computacional⁴⁶

4.4.3.2 Matriz

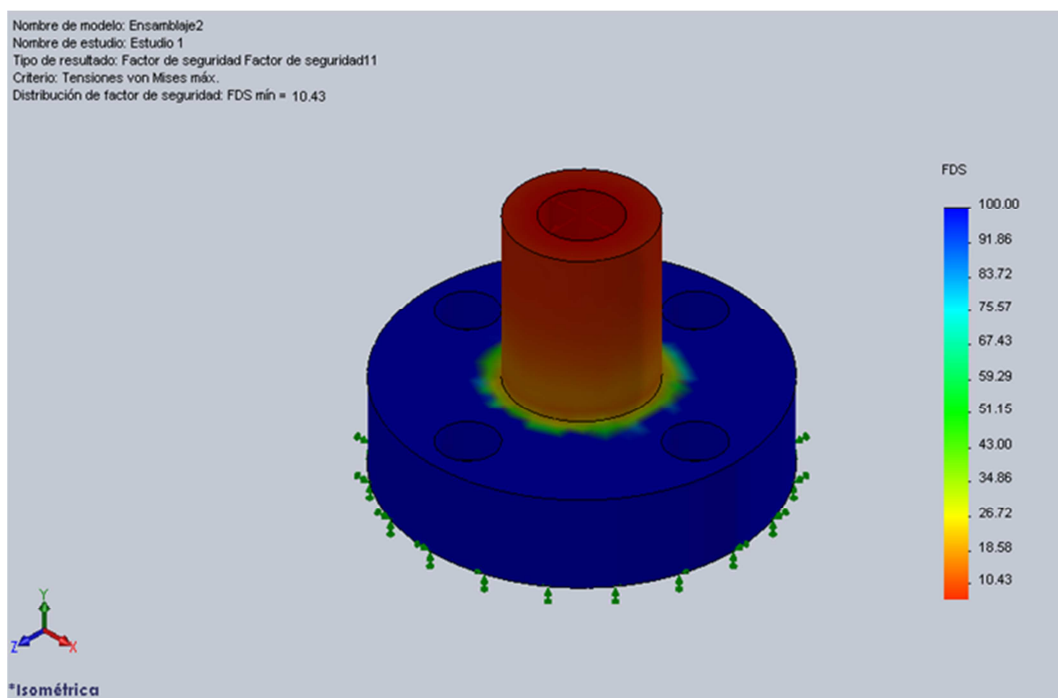


Figura 4.15 Factor de seguridad en matriz para extrusión mixta mediante simulación computacional⁴⁷

⁴⁶Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Punzón de extrusión mixta.

⁴⁷Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Matriz de extrusión mixta.

4.4.3.3 Expulsor

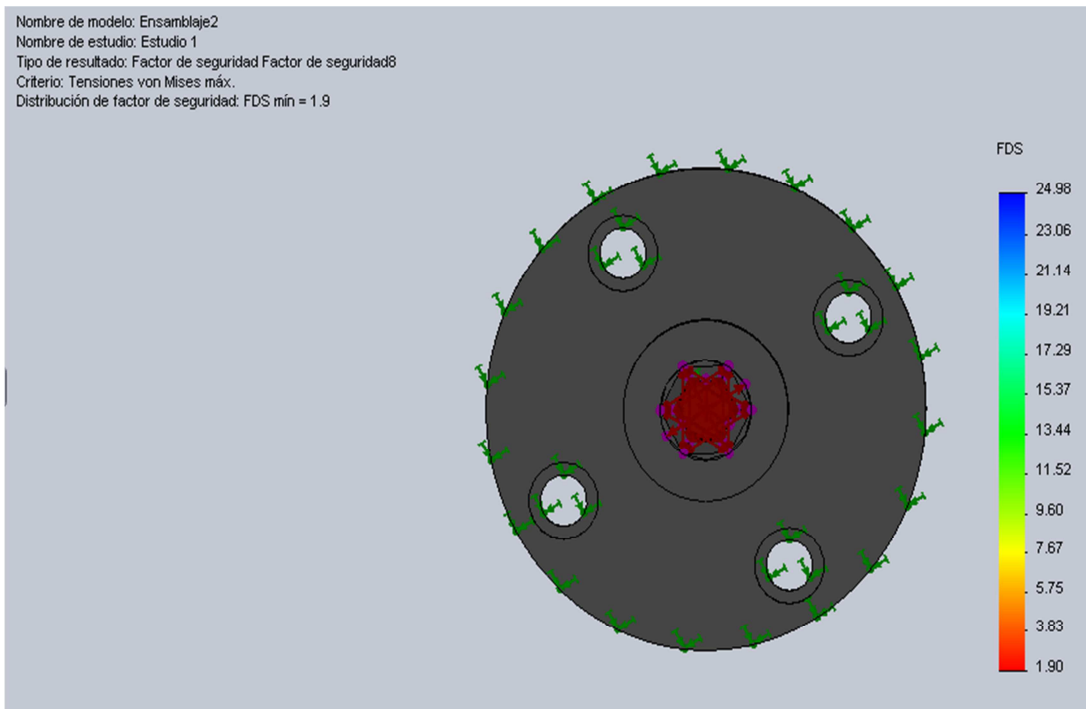


Figura 4.16 Factor de seguridad en eyector de extrusión mixta mediante simulación computacional⁴⁸

⁴⁸Fuente: Plataforma de diseño SOLIDWORKS - Eyector de extrusión mixta.

4.5 RESUMEN DE FACTORES DE SEGURIDAD

Después de los cálculos respectivos para todos los elementos del equipo extrusor se presentan los resultados en la tabla 4.3, la cual indica los factores de seguridad más bajos en cada elemento.

Tabla 4.3 Resumen factores de seguridad equipo extrusor

Elemento Tipo de Extrusión	Punzón	Dados	Matriz Superior	Matriz Inferior	Expulsor
Directa	<i>Compresión</i> 5,47 <i>Pandeo</i> 4,70 <i>Fatiga</i> 26,94	Dado Circular <i>Compresión</i> 2,64 <i>Cortante</i> 6,57	<i>Tracción</i> 15,15	<i>Cortante</i> 7,88	NA
		Dado I <i>Compresión</i> 3,82 <i>Cortante</i> 6,57			
Inversa	<i>Compresión</i> Hex. – 60,30 <i>Compresión</i> Circ. – 4,44 <i>Pandeo</i> 41,83 <i>Fatiga</i> 21,85	NA	<i>Tracción</i> 12,68 <i>Compresión</i> 8,06 <i>Cortante</i> 15,36	NA	<i>Compresión</i> 9,60 <i>Cortante</i> 4,61
Mixta	<i>Compresión</i> Hex. – 2,15 <i>Compresión</i> Circ. – 4,85 <i>Pandeo</i> 3,82 <i>Fatiga</i> 2,43	NA	<i>Tracción</i> 12,68	NA	<i>Compresión</i> 1,74 <i>Cortante</i> 2,33

Porta Matrices	<i>Compresión</i> 11,56 <i>Cortante</i> 23,72
Porta Punzones	<i>Compresión</i> 8,76

Fuente: Propia

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

5.1 PLANOS DE CONSTRUCCIÓN

5.1.1 EXTRUSIÓN DIRECTA

5.1.1.1 Dado sección “I”

(Ver Anexo I).

5.1.1.2 Dado sección circular de 25mm a 18mm

(Ver Anexo I).

5.1.1.3 Punzón

(Ver Anexo I).

5.1.1.4 Porta matriz superior

(Ver Anexo I).

5.1.1.5 Porta matriz inferior

(Ver Anexo I).

5.1.1.6 Montaje del equipo

(Ver Anexo I).

5.1.2 EXTRUSIÓN INVERSA

5.1.2.1 Punzón

(Ver Anexo I).

5.1.2.2 Matriz y eyector

(Ver Anexo I).

5.1.2.3 Montaje del equipo

(Ver Anexo I).

5.1.3 EXTRUSIÓN MIXTA

5.1.3.1 Punzón

(Ver Anexo I).

5.1.3.2 Matriz y eyector

(Ver Anexo I).

5.1.3.3 Montaje del equipo

(Ver Anexo I).

5.1.4 PLACAS PORTA MATRIZ Y PORTA PUNZÓN

5.1.4.1 Placa porta matriz

(Ver Anexo I).

5.1.4.2 Placa porta punzón

(Ver Anexo I).

5.2 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

5.2.1 DIAGRAMAS DE PROCESO DE LOS ELEMENTOS A FABRICARSE

5.2.1.1 Porta Matrices y Porta Punzones

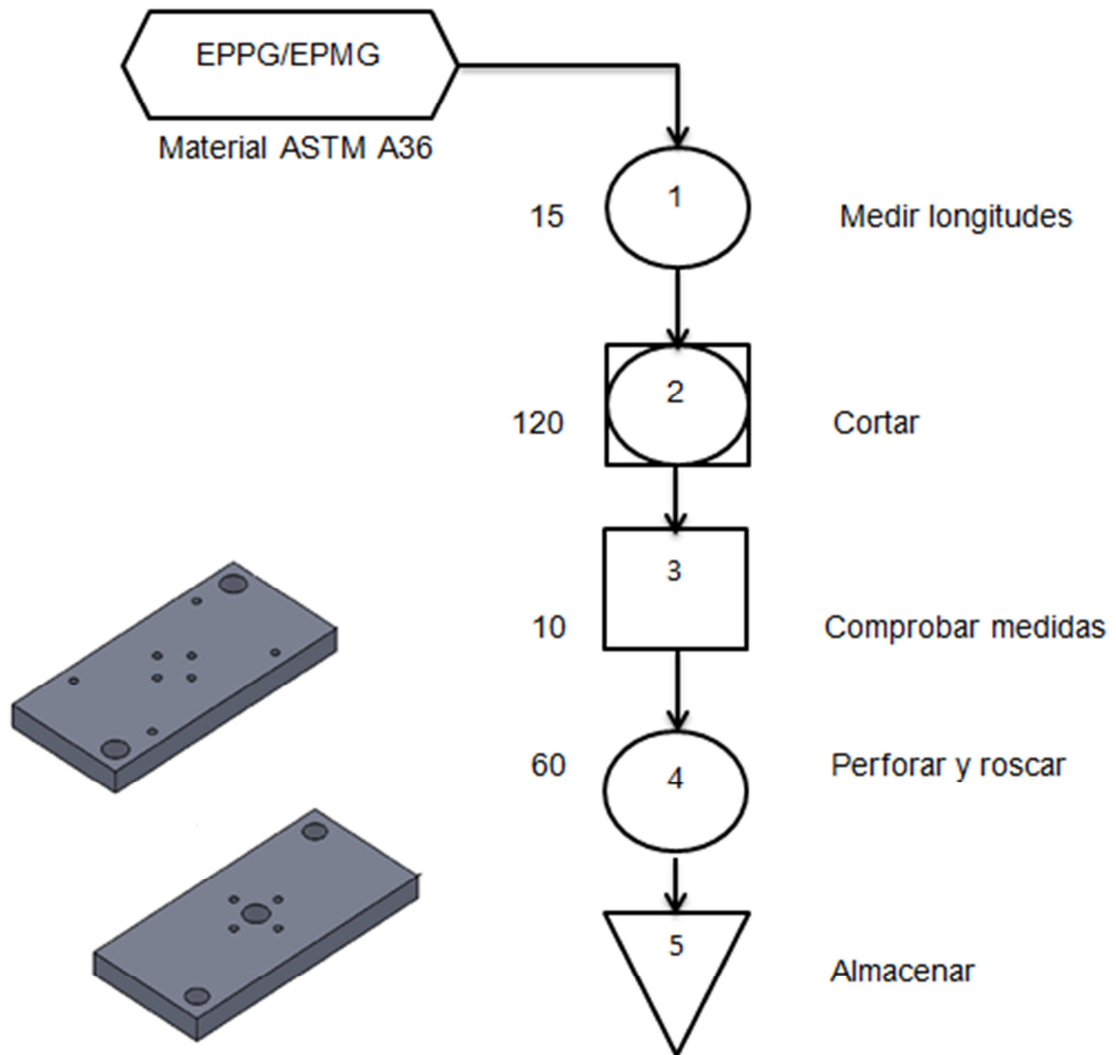


Figura 5.1 Diagrama de procesos: porta matriz y porta punzón⁴⁹.

⁴⁹Fuente: Propia

5.2.1.2 Guías Porta Matrices y Guías Porta Punzones

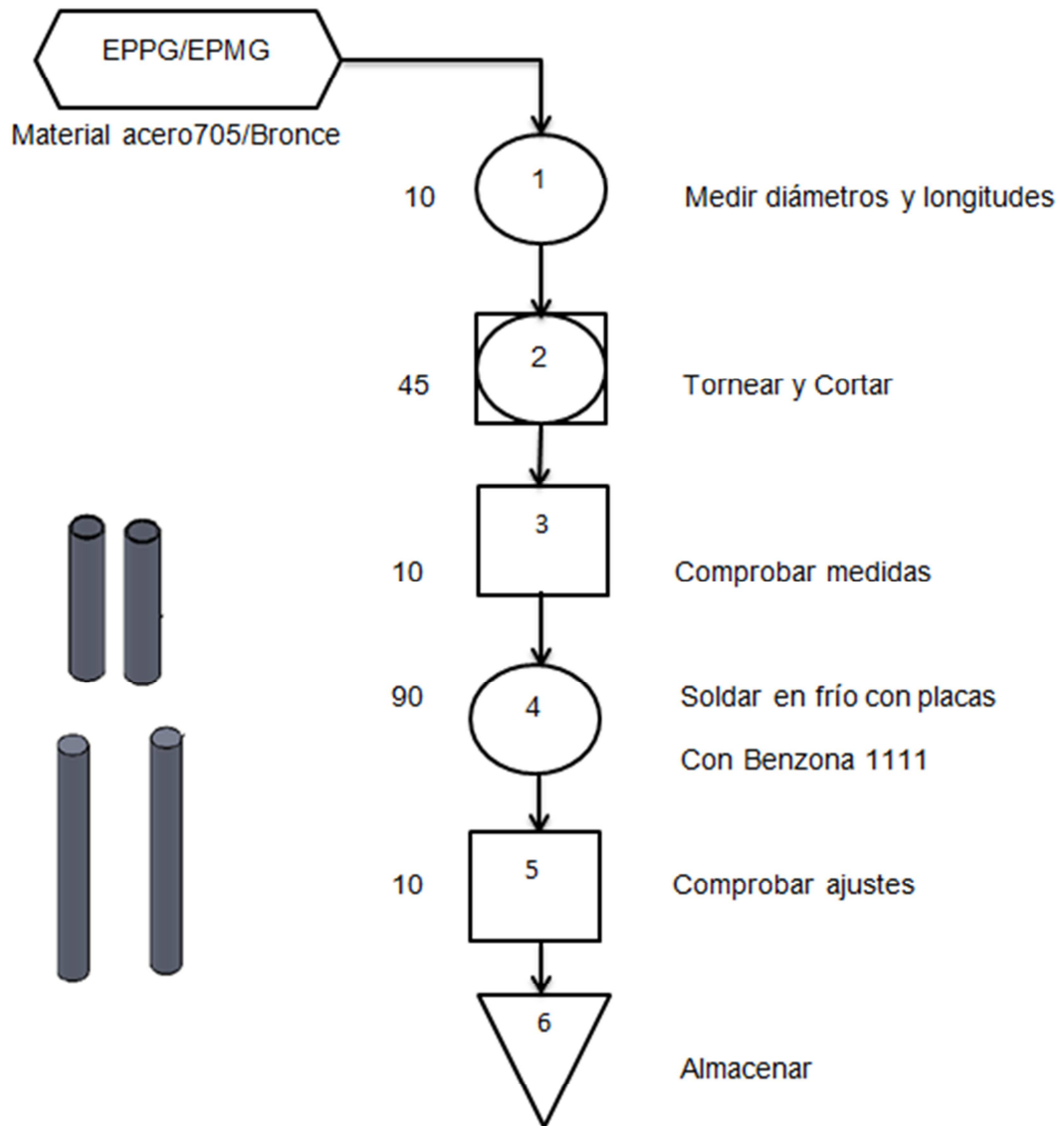


Figura 5.2 Diagrama de procesos: guías porta matrices y porta punzones⁵⁰.

⁵⁰ Fuente: Propia

5.2.1.3 Extrusión Directa – Punzón

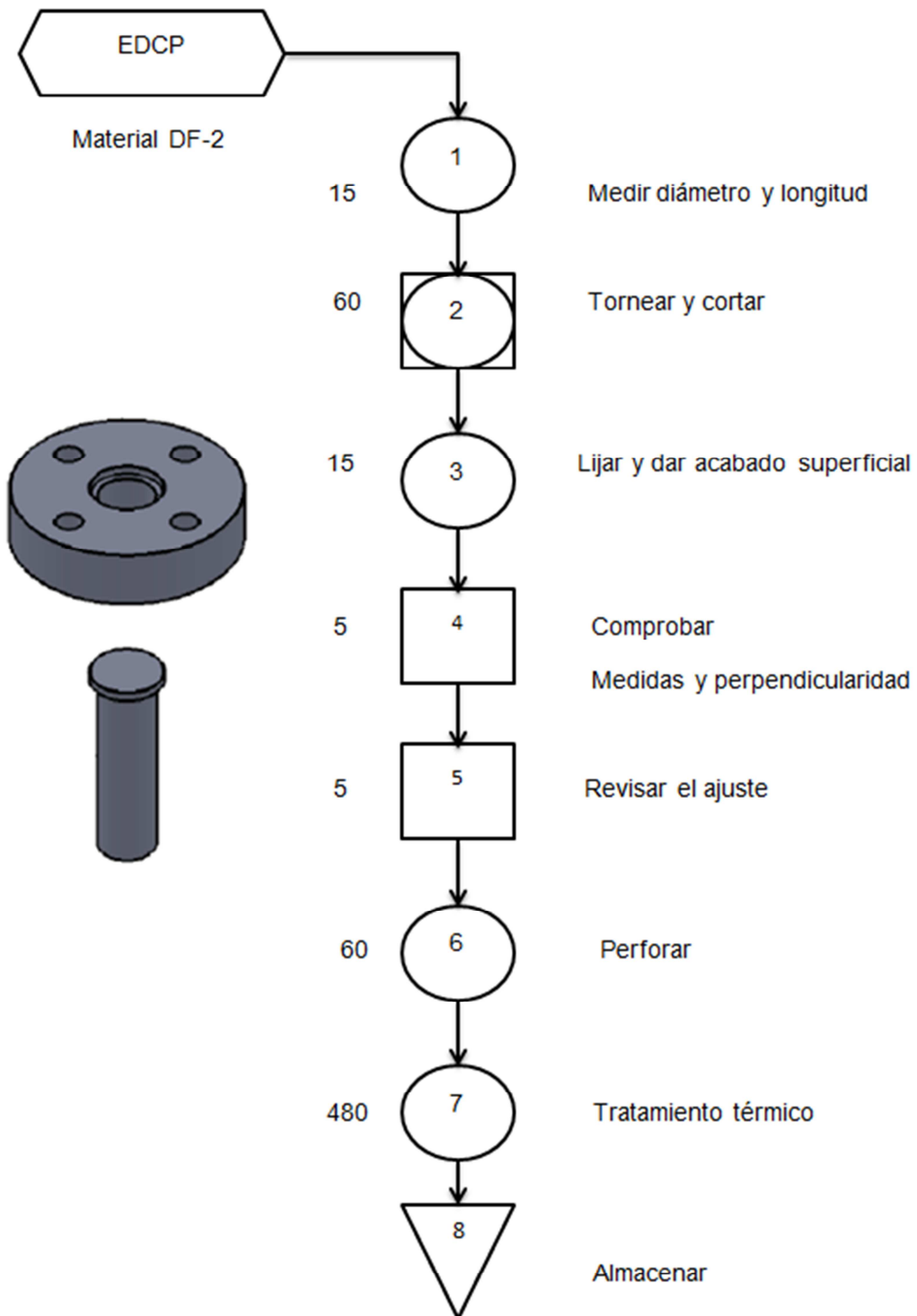


Figura 5.3 Diagrama de procesos: punzón extrusión directa⁵¹.

⁵¹ Fuente: Propia

5.2.1.4 Extrusión Directa – Dados

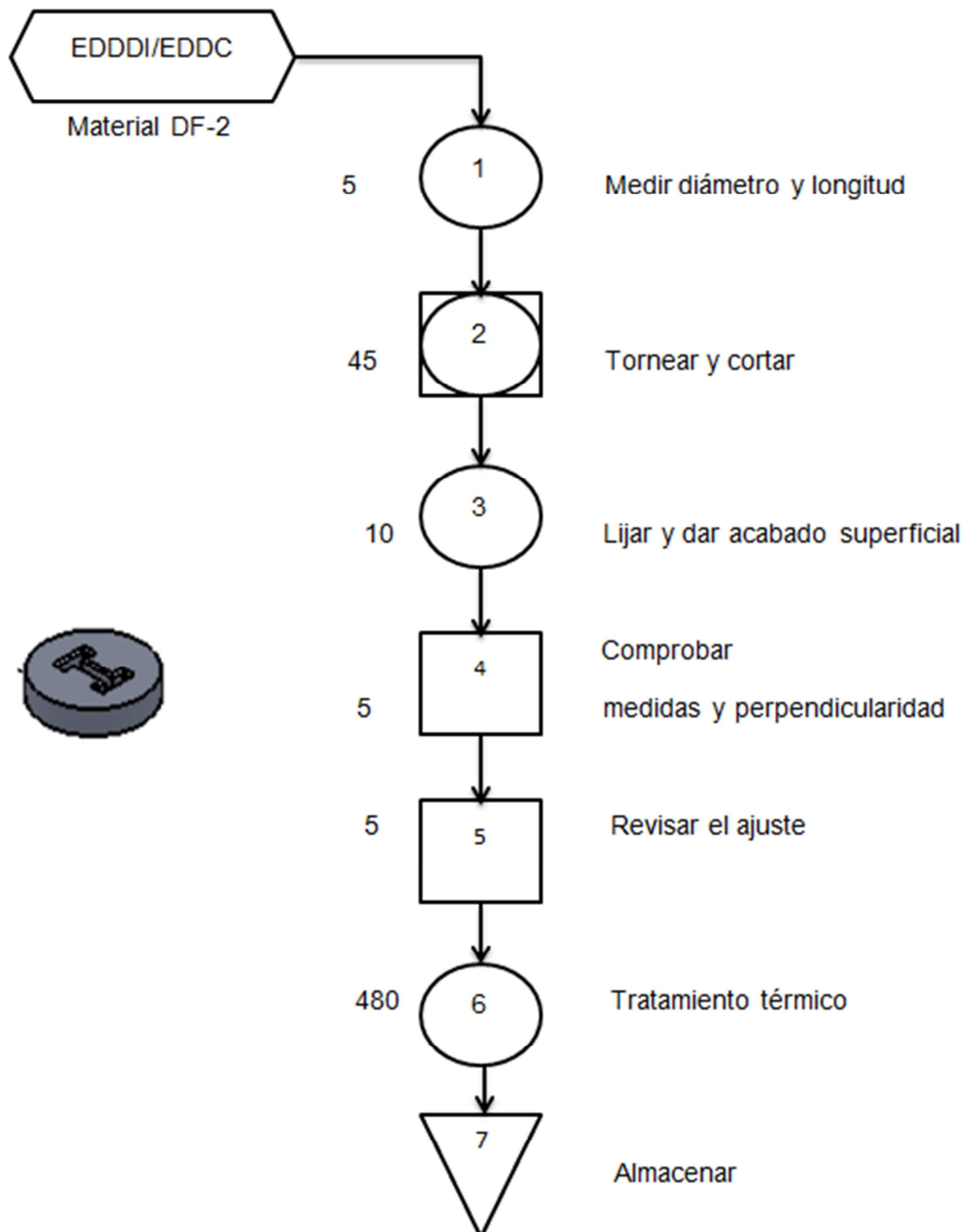


Figura 5.4 Diagrama de procesos: dados extrusión directa⁵².

⁵²Fuente: Propia

5.2.1.5 Extrusión Directa – Matriz Superior

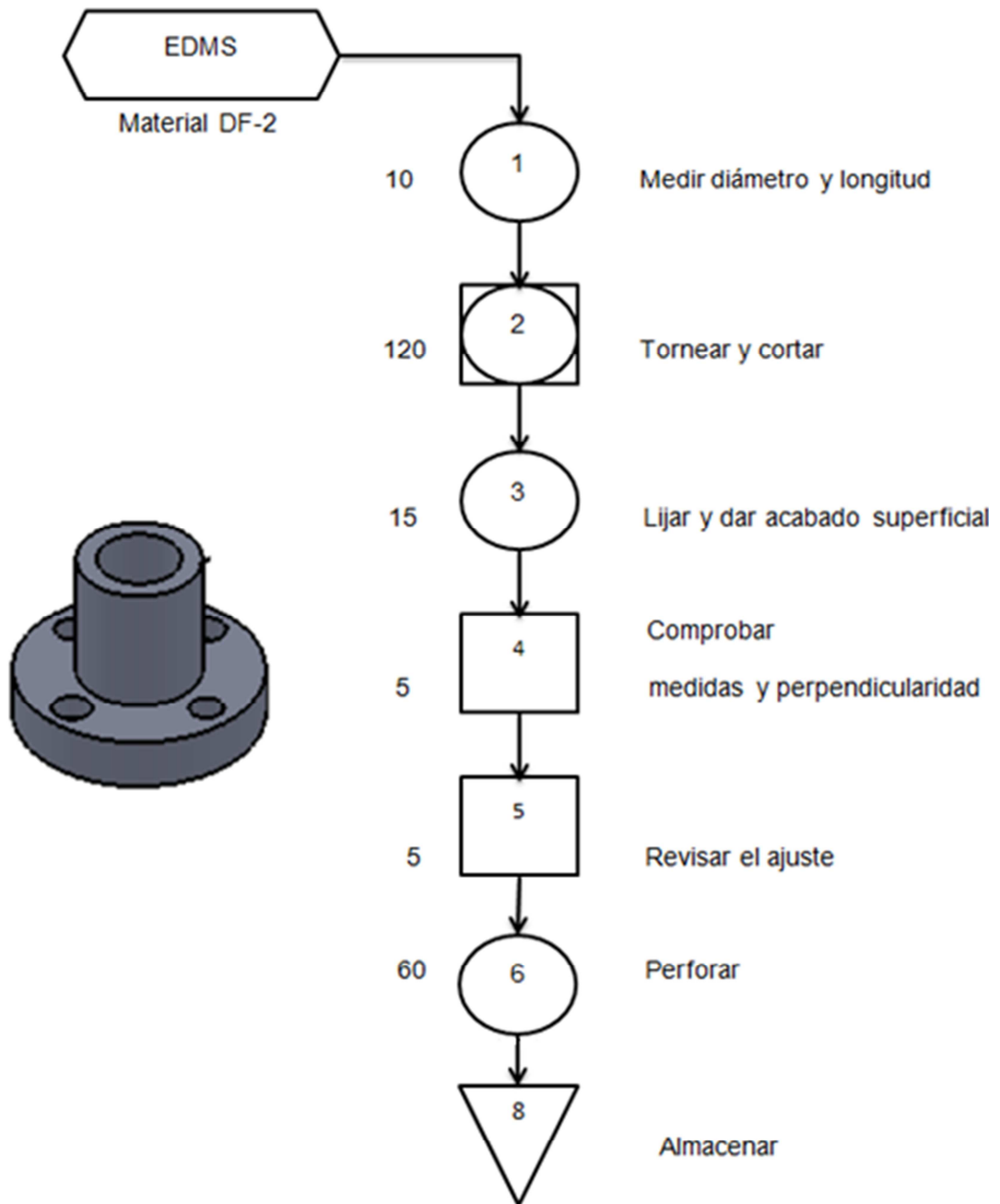


Figura 5.5 Diagrama de procesos: matriz superior extrusión directa⁵³.

⁵³Fuente: Propia

5.2.1.6 Extrusión Directa – Matriz Inferior

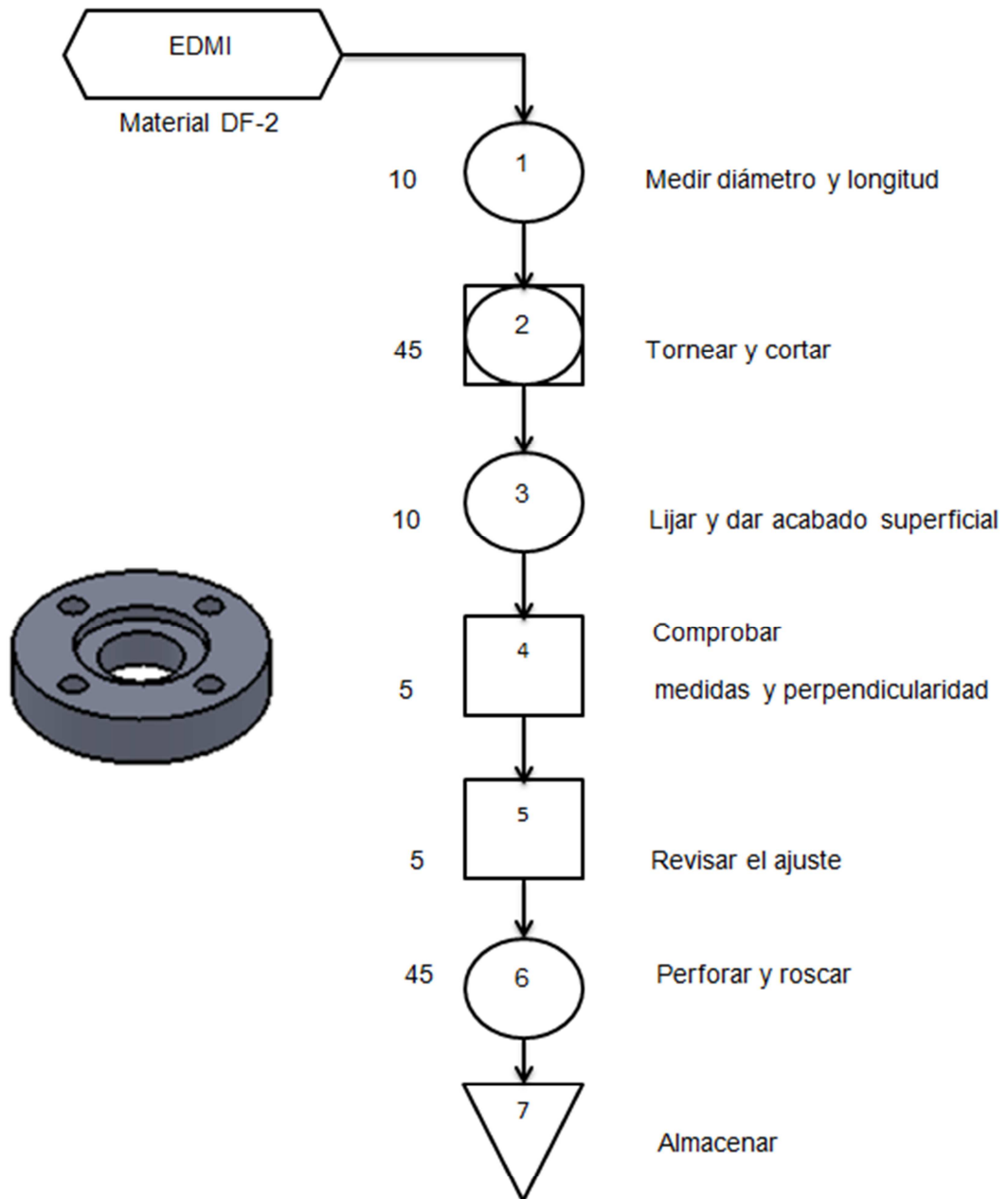


Figura 5.6 Diagrama de procesos: matriz inferior extrusión directa⁵⁴.

⁵⁴Fuente: Propia

5.2.1.7 Extrusión Inversa – Punzón

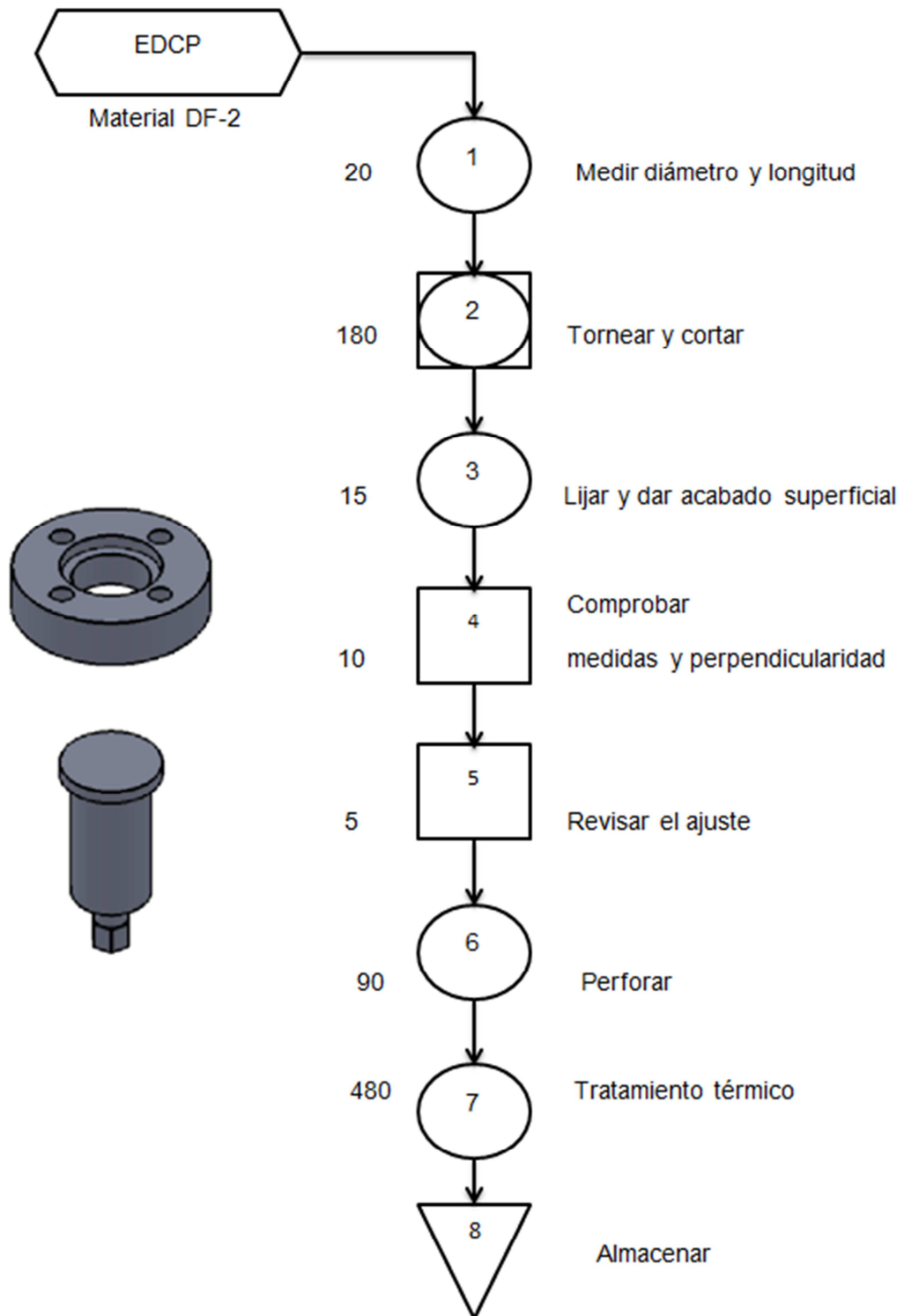


Figura 5.7 Diagrama de procesos: punzón extrusión inversa⁵⁵.

⁵⁵ Fuente: Propia

5.2.1.8 Extrusión Inversa – Matriz

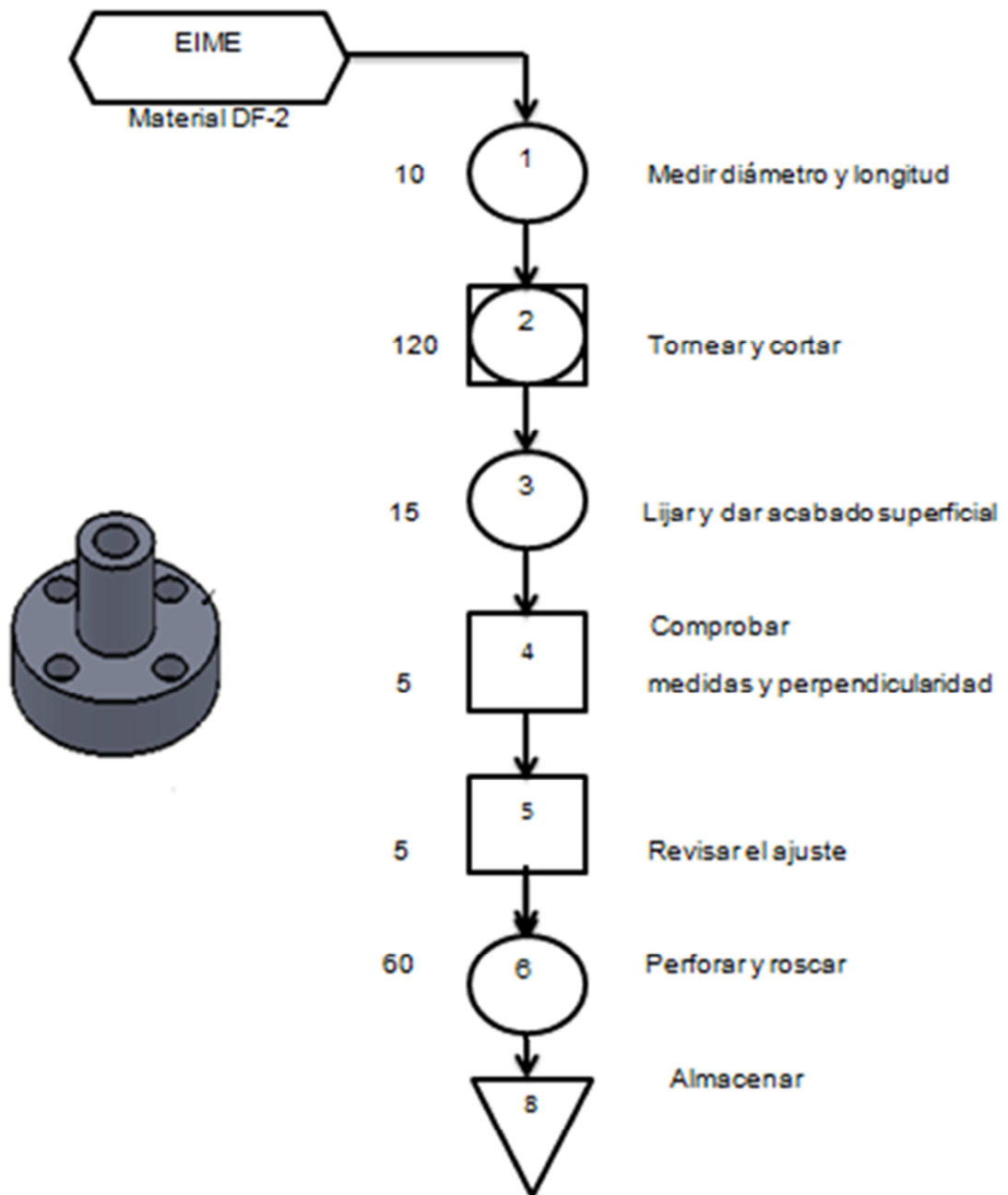


Figura 5.8 Diagrama de procesos: matriz extrusión inversa⁵⁶.

⁵⁶ Fuente: Propia

5.2.1.9 Extrusión Inversa – Eyector

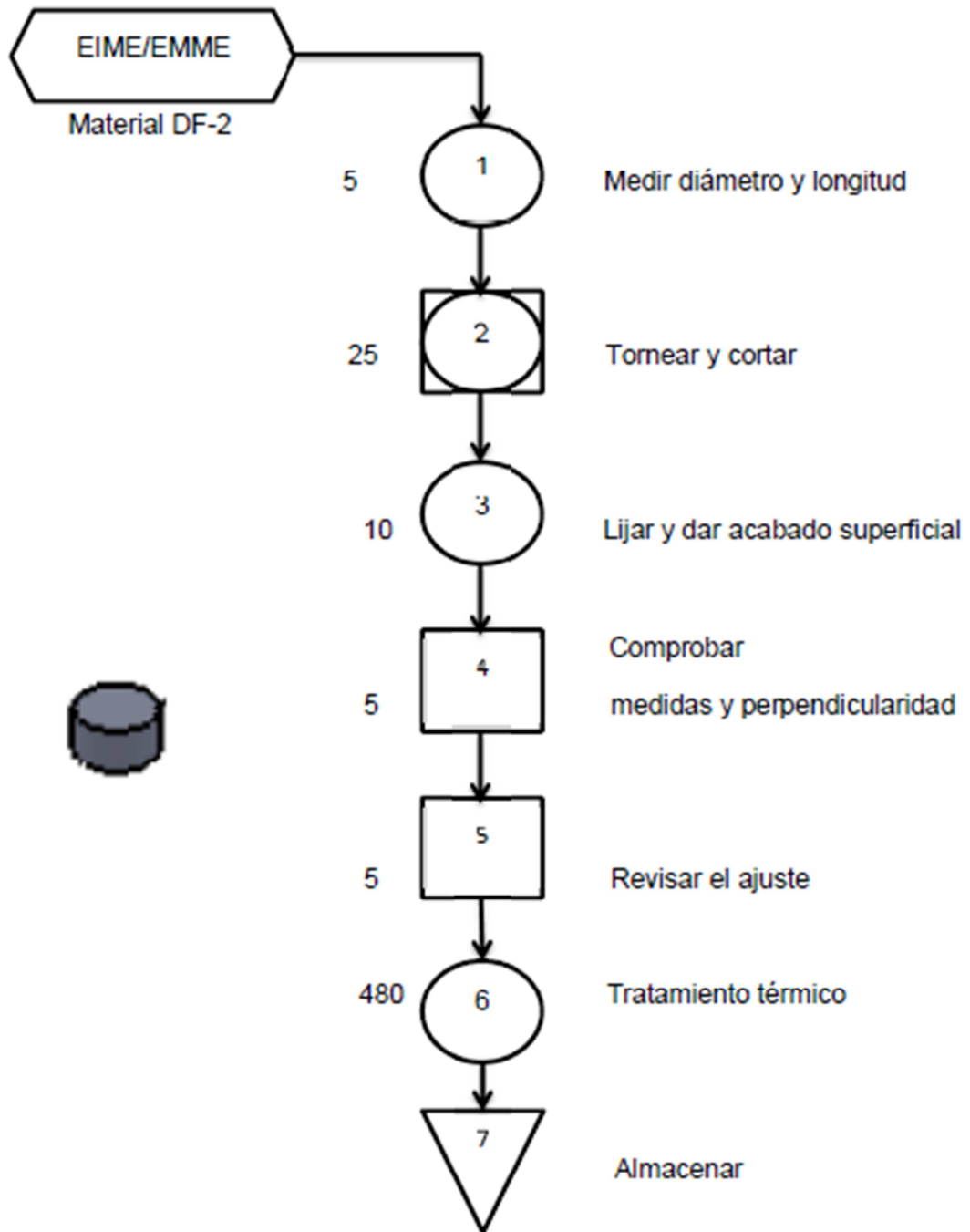


Figura 5.9 Diagrama de procesos: eyector extrusión inversa⁵⁷.

⁵⁷Fuente: Propia

5.2.1.10 Extrusión Mixta – Punzón

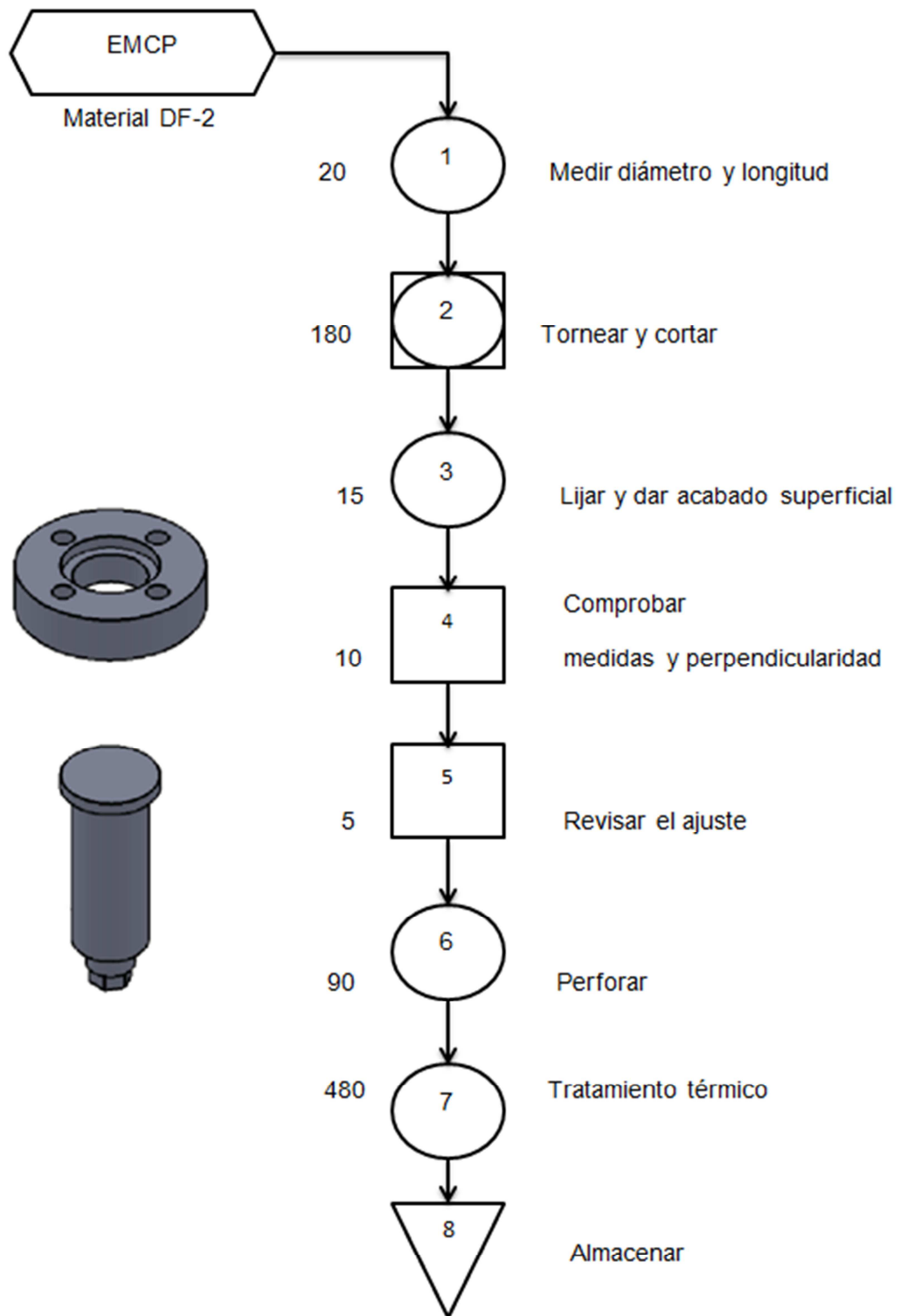


Figura 5.10 Diagrama de procesos: punzón extrusión mixta⁵⁸.

⁵⁸ Fuente: Propia

5.2.1.11 Extrusión Mixta – Matriz

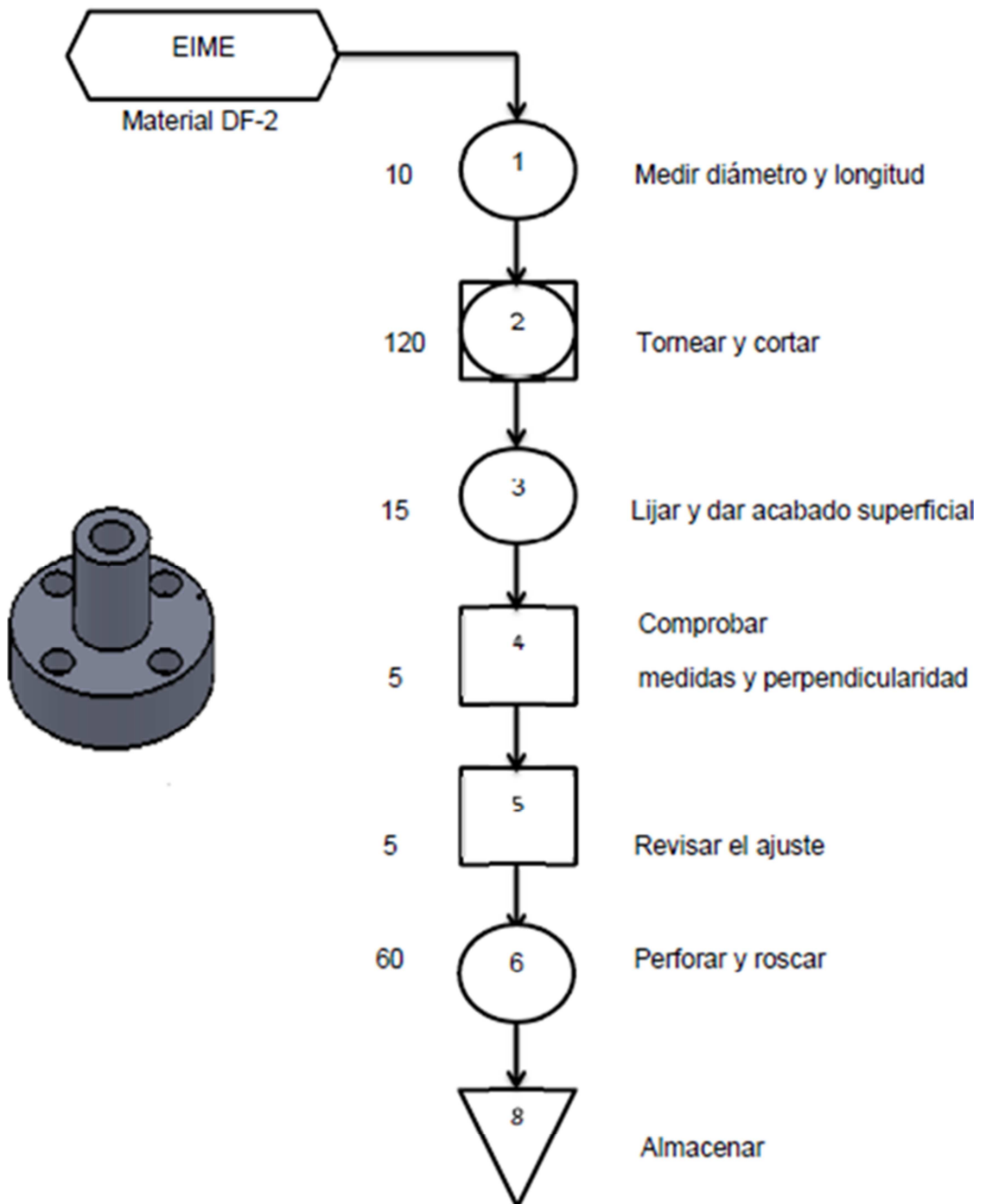


Figura 5.11 Diagrama de procesos: matriz extrusión mixta⁵⁹.

⁵⁹ Fuente: Propia

5.2.1.12 Extrusión Mixta – Ejector

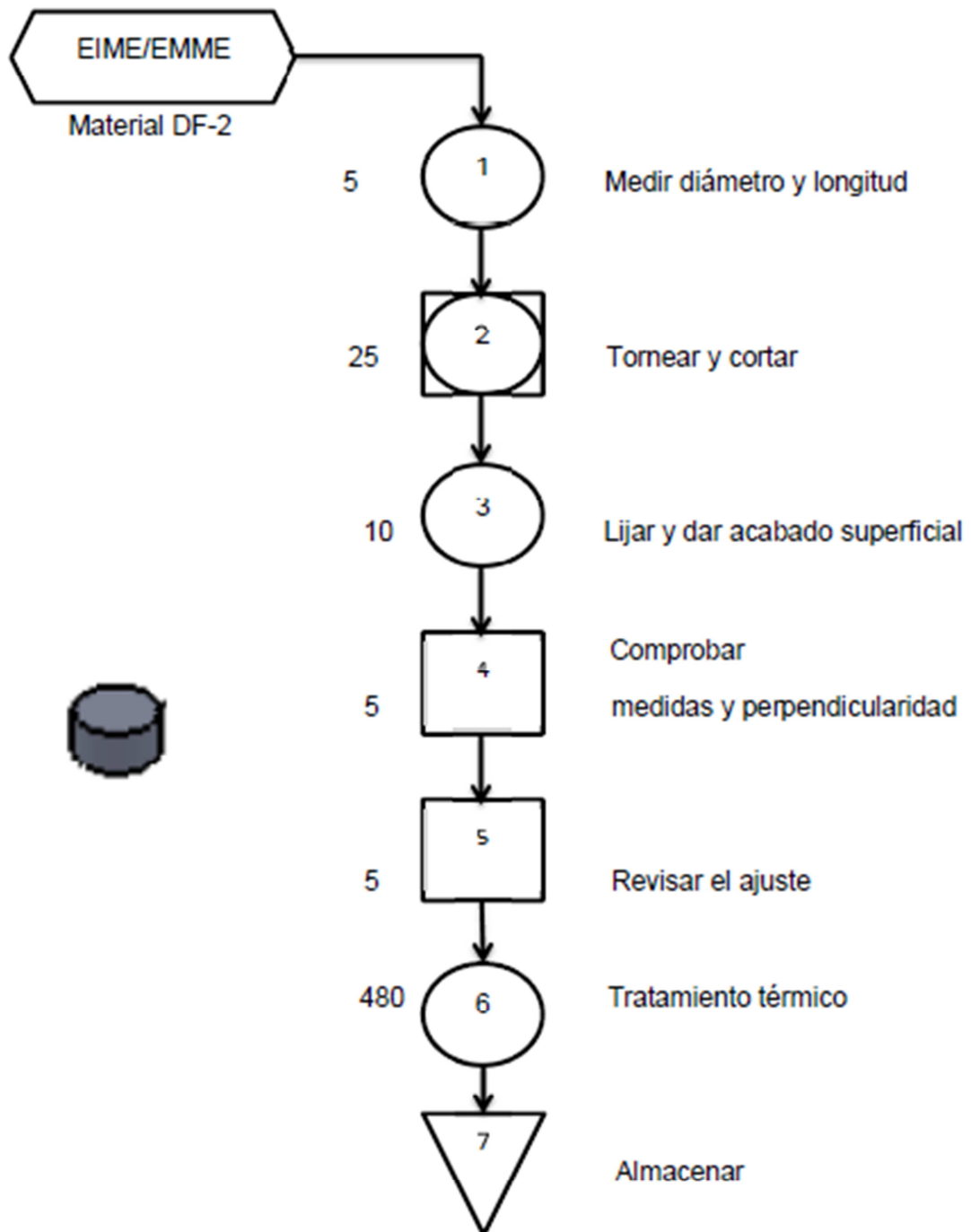


Figura 5.12 Diagrama de procesos: eje extrusión mixta⁶⁰.

⁶⁰Fuente: Propia

CAPÍTULO 6

PRUEBAS Y VALIDACIÓN DE DISEÑO

6.1 PRUEBAS Y REPORTES DE FUNCIONAMIENTO



Figura 6.1 Pruebas de funcionamiento⁶¹.

Al momento de realizar las pruebas de funcionamiento el principal objetivo es verificar que el cálculo teórico de las fuerzas, se encuentren dentro de un pequeño margen de error con respecto a las fuerzas que fueron necesarias al instante de llevar a cabo cada una de las extrusiones.

Para ello fue muy importante poner énfasis en cada uno de los pasos previos a la aplicación de la fuerza, es decir en el ensamblaje del equipo extrusor, como es la ubicación correcta de matrices y punzones con respecto a las señales que se encuentra en las placas porta matrices y porta punzones, el uso de los pernos adecuados para cada uno de los elementos, ya de lo contrario el equipo puede quedar descentrado impidiendo su buen funcionamiento y finalmente la lubricación de cada uno de los elementos que participan en el proceso de extrusión (figura 6.2), es decir matrices, punzones, eyectores y material a ser extruido, siendo este último aspecto de mucha importancia para impedir que se genere excesivo rozamiento tanto en las paredes de las

⁶¹ Fuente: Propia

matrices como en los punzones y además para facilitar el flujo del material, en la extrusión directa para que el material circule sin ningún problema a través de los dados y en la inversa y mixta, a más de que adquiera la forma deseada, para que el producto final pueda ser eyectado de sus matrices.



Figura 6.2 Correcta lubricación de cada elemento antes de realizar la extrusión⁶².

6.1.1 EXTRUSIÓN DIRECTA

6.1.1.1 Eje de Aluminio

En este proceso se redujo la sección de un tocho de $\text{Ø}25$ mm a un $\text{Ø}18$ (figura 6.3) tomando en cuenta la relación que debe existir entre el diámetro inicial con el diámetro final que es — , con el fin de que las fuerzas necesarias no sean altas, y para este caso se trabajó con una relación de 1.4.

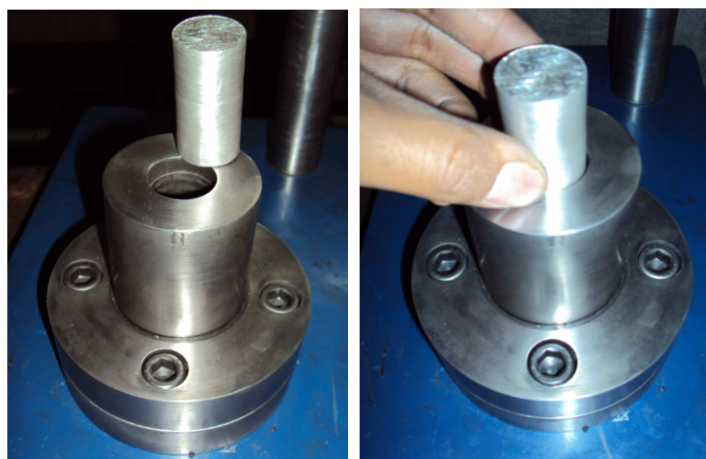


Figura 6.3 Extrusión directa de un tocho de aluminio $\text{Ø}25$ mm a un $\text{Ø}18$ ⁶³.

⁶²Fuente, ⁶³Fuente: Propia

Para la fuerza teórica se toma en cuenta parte real y parte ingenieril y la fuerza experimental será la que demuestra si estas se encuentran correctamente calculas, de tal manera se tiene:

Tabla 6.1 Fuerzas para extrusión directa – eje de aluminio

	Fuerza Real (kgf)	Fuerza Ingenieril (kgf)	Fuerza Experimental (kgf)
Eje de Aluminio	20120	19630	22000

Fuente: Propia

Para la extracción del eje de aluminio fue indispensable cortar en un extremo y así poder observar el producto obtenido, pero a nivel industrial esto no es necesario ya que únicamente se debe seguir alimentando de tochos a la matriz, figura 6.4.

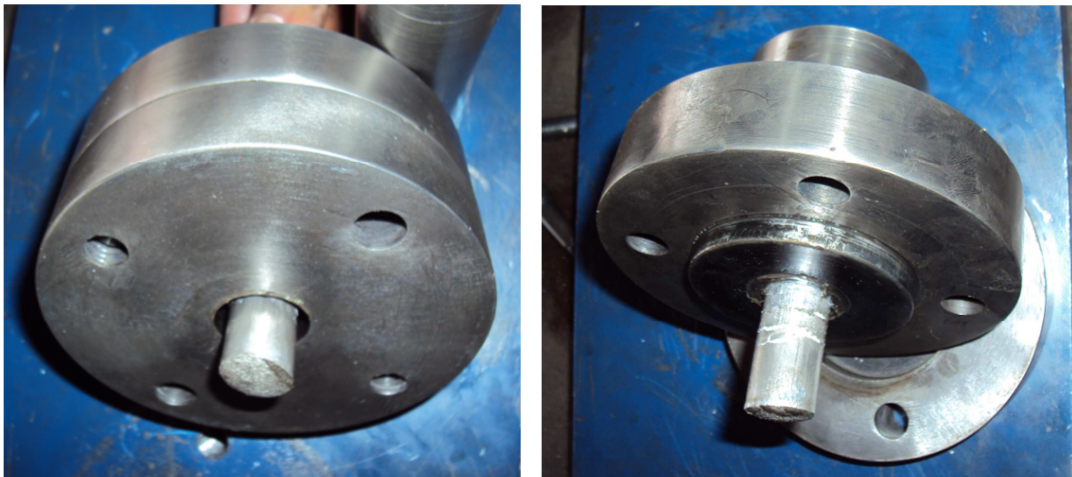


Figura 6.4 Eje de aluminio extruido en matrices⁶⁴.

⁶⁴Fuente: Propia

6.1.1.1.1 Porcentaje de error

El cálculo del porcentaje de error es importante ya que se puede determinar el rango en el que se está trabajando entre los valores obtenidos experimentalmente y los cálculos previos al diseño del equipo. El porcentaje de error se lo calcula de la siguiente manera:

Porcentaje de error entre Fuerza Real – Fuerza Experimental

Porcentaje de error entre Fuerza Real – Fuerza Ingenieril



El producto obtenido fue el esperado, y se trabajó dentro de los parámetros propuestos

6.1.1.2 Eje de Plomo

Para la extrusión de plomo fue necesario obtener experimentalmente las fuerzas de extrusión y así poder determinar un coeficiente de resistencia K y conociendo n , el exponente de endurecimiento por deformación, encontrar el esfuerzo de fluencia promedio durante la extrusión $Y_f = 55 \text{ Mpa}$, valor con los cuales se trabajó para cada caso de extrusión en plomo.

Tabla 6.2 Fuerzas para extrusión directa – eje de plomo

	Fuerza Real (kgf)	Fuerza Experimental (kgf)
Eje de Plomo	10980	12000

Fuente: Propia



Figura 6.5 Extrusión Directa – Eje de Plomo⁶⁵.

Existe buen acabado superficial en el eje de plomo una vez que sale de la matriz como se observa en la figura 6.6, eliminando desperfectos que pudieron existir debido a que se producen dislocaciones internas.

⁶⁵ Fuente: Propia

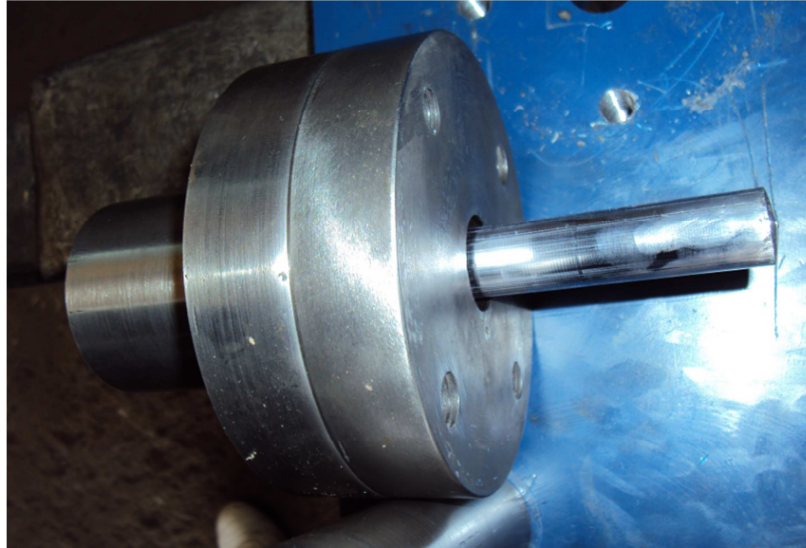


Figura 6.6 Eje de plomo en matriz directa, con buen acabado superficial⁶⁶.

Como se puede observar en la figura 6.7, a medida que el material es extruido se produce una pequeña desviación, es decir el eje no es perfectamente recto, siendo un motivo para esto que en el tocho inicial de plomo y debido a que es una fundición, existan pequeñas cavidades que al momento de aplicar presión estas cavidades se van llenando internamente impidiendo que la salida del material extruido sea completamente recto.

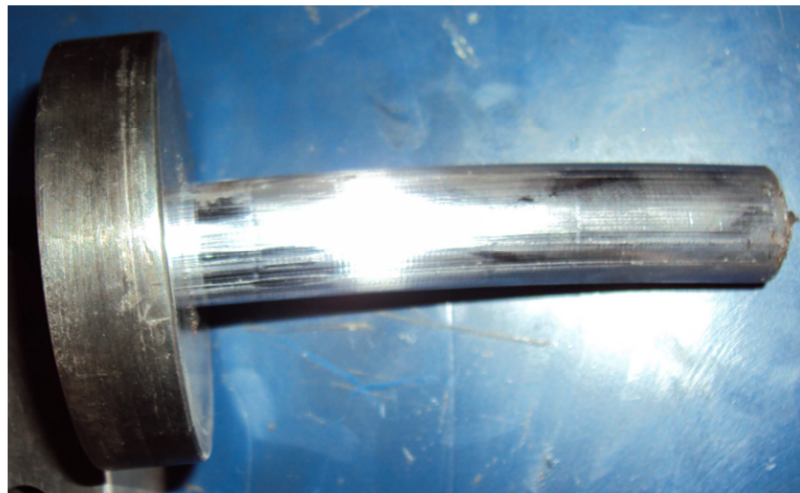


Figura 6.7 Eje de plomo en dado circula de matriz directa, con una ligera desviación⁶⁷.

⁶⁶ Fuente, ⁶⁷ Fuente: Propia

6.1.1.2.1 Porcentaje de error

Porcentaje de error entre Fuerza Real – Fuerza Experimental

Al momento de determinar el esfuerzo de fluencia promedio también se tomó en cuenta el intervalo de error con el que se trabajó con el aluminio, es decir del 15%.

6.1.1.3 Perfil I

Trabajando con un esfuerzo de fluencia promedio igual al encontrado al extruir un eje macizo de plomo se pudo determinar la fuerza teóricamente, dando como resultado:

Tabla 6.3 Fuerzas para extrusión directa – perfil I

	Fuerza Real (kgf)	Fuerza Experimental (kgf)
Perfil I Plomo	13590	14000

Fuente: Propia

Con la extrusión del perfil I (figura 6.8) se puede observar de una manera clara la deformación plástica que puede tener un material dúctil, como es el plomo, sin necesidad de incrementar de su temperatura, trabajando a niveles inferiores de su temperatura de recristalización.



Figura 6.8 Extrusión directa de perfil I⁶⁸.

⁶⁸ Fuente: Propia

Contraria a la extrusión del eje macizo de plomo, en esta extrusión se produce un perfil completamente recto como se observa en la figura 6.9, y esto es debido a que la sección I se compone de varias aristas que facilitan el flujo del material, impidiendo desviaciones prominentes al momento de llenar las pequeñas imperfecciones interiores del material.

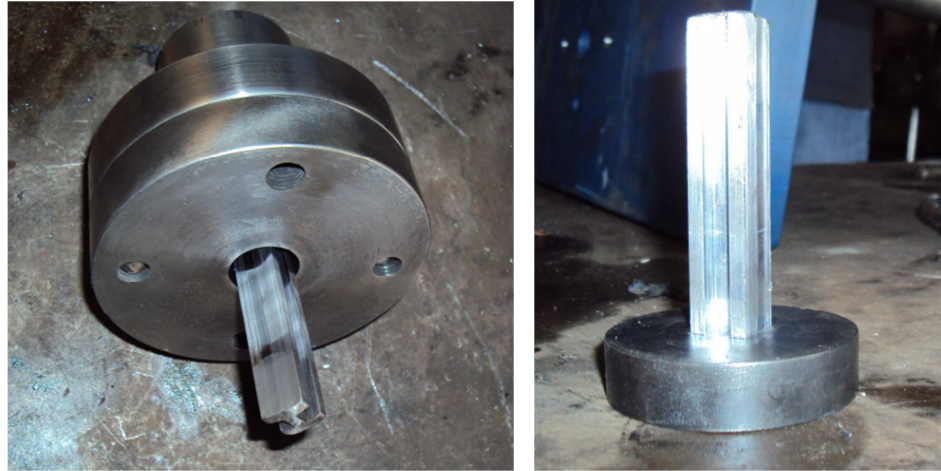


Figura 6.9 Extrusión de perfil I completamente recto⁶⁹.

En el plano industrial no es necesaria la extracción del material que se encuentra en los dados de extrusión como en el caso de la figura 6.10, ya que así como en los casos anteriores la introducción de tochos en matrices debe ser continua, generando un perfil más largo sin necesidad de variar la longitud del tocho inicial (figura 6.11), misma que actúa directamente en sobre el cálculo de la fuerza necesaria para la extrusión, ya que el área de fricción será mayor.



Figura 6.10 Extracción de material en dado I⁷⁰.

⁶⁹Fuente, ⁷⁰Fuente : Propia

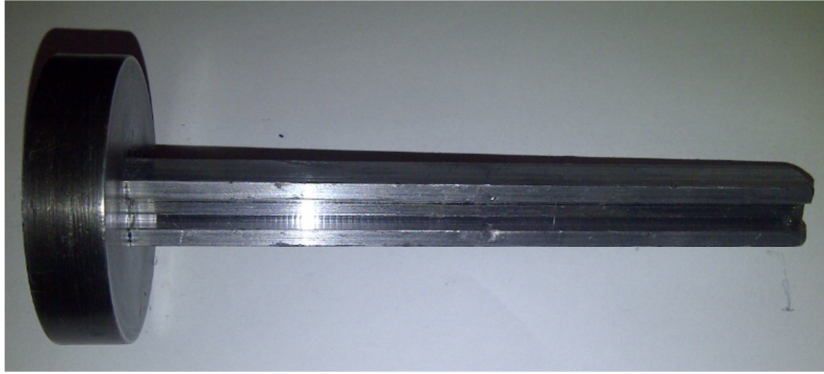


Figura 6.11 Extrusión continua de perfil I⁷¹.

6.1.1.3.1 Porcentaje de error

Porcentaje de error entre Fuerza Real – Fuerza Experimental



Porcentaje de error bajo por lo tanto los resultados de la extrusión fueron los esperados.

⁷¹ Fuente: Propia

6.1.2 EXTRUSIÓN INVERSA – TUBO HUECO HEXAGONAL

Para la extrusión inversa se dio forma de un hexágono interior a un tocho de plomo (figura 6.12) y la fuerza experimental comparada con la fuerza teórica fue la siguiente:

Tabla 6.4 Fuerzas para extrusión inversa – tubo hueco hexagonal

	Fuerza Real (kgf)	Fuerza Experimental (kgf)
Tubo hueco hexagonal – Plomo	11470	12000

Fuente: Propia



Figura 6.12 Extrusión Inversa – Tubo Hueco Hexagonal⁷².

En función del esfuerzo de fluencia promedio obtenido experimentalmente la fuerza teórica es muy parecida a la necesitada para realizar la extrusión, nuevamente demostrando que los cálculos realizados con este dato se encuentran correctos y vas acorde a la realidad del caso.

⁷²Fuente: Propia

Para extraer el producto final, la matriz cuenta con un expulsor interno que facilitó esta tarea (figura 6.13), no fue necesario mayor esfuerzo, debido a la precisión con la que se encuentra construida tanto la matriz como el eyector y adicional a esto la ayuda la debida lubricación que deben tener cada elemento.

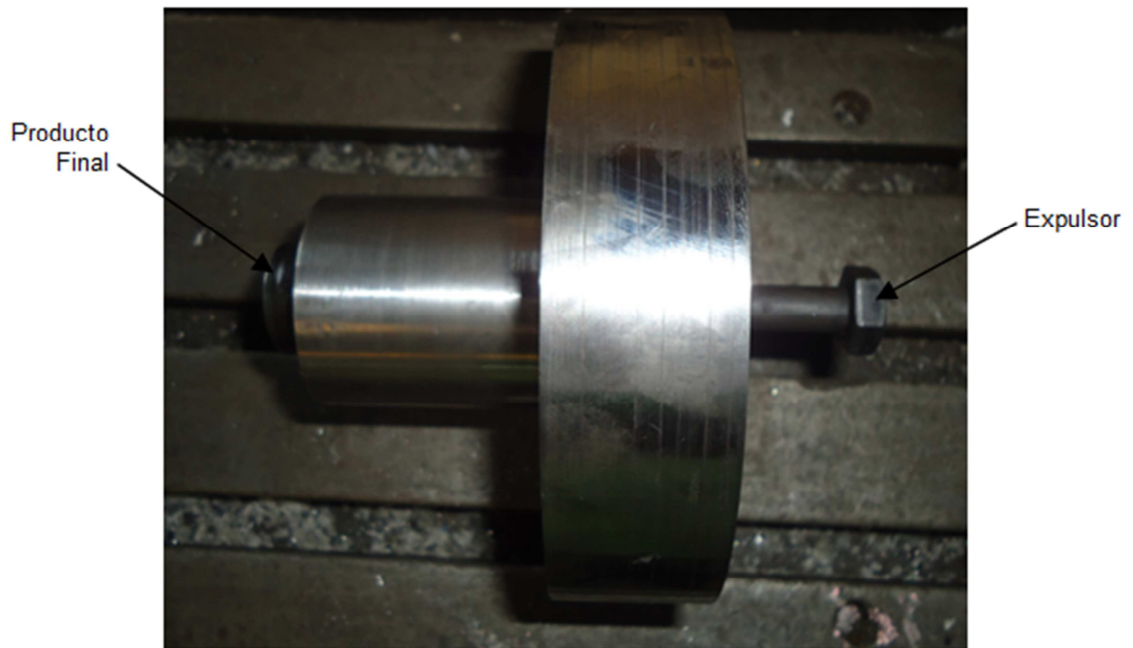


Figura 6.13 Extracción del producto obtenido mediante extrusión inversa de plomo⁷³.

6.1.2.1 Porcentaje de error

Porcentaje de error entre Fuerza Real – Fuerza Experimental

⁷³Fuente: Propia

6.1.3 EXTRUSIÓN MIXTA

6.1.3.1 Dado de reducción – Aluminio

El producto obtenido en la extrusión mixta es un dado de reducción con el que se puede observar los dos procesos de deformación plástica en frío, figura 6.14. Para el cálculo de las fuerzas se debe realizar los análisis por separado, y la fuerza que registrará el proceso será la mayor, en este caso la fuerza para la extrusión inversa, esto debido principalmente a que el área de deformación es mucho mayor que a la de la extrusión directa, por lo tanto:

Tabla 6.5 Fuerzas para extrusión mixta – dado de reducción aluminio

	Fuerza Real (kgf)	Fuerza Experimental (kgf)
Extrusión Directa	12440	25000
Extrusión Inversa	22720	

Fuente: Propia



Figura 6.14 Extrusión Mixta – Dado de Reducción Aluminio⁷⁴.

⁷⁴Fuente: Propia

6.1.3.1.1 Porcentaje de error

Porcentaje de error entre Fuerza Real – Fuerza Experimental

$$\% \text{ error} = \frac{25000 - 22720}{22720} * 100$$

$$\% \text{ error} = 10,04 \%$$

El error con el que se trabajó se encuentra dentro de los parámetros planteados debido a los factores antes mencionados, por lo que se ha trabajado de manera correcta con resultados óptimos.

6.1.3.2 Dado de reducción – Plomo

Al igual que en la extrusión mixta de aluminio los cálculos de las fuerzas se realizan por separado, nuevamente siendo mayor la fuerza para la extrusión inversa, ya que su cálculo se determina en función de áreas de trabajo, y la de esta es mayor que la de la directa.

Tabla 6.6 Fuerzas para extrusión mixta – dado de reducción plomo

	Fuerza Real (kgf)	Fuerza Experimental (kgf)
Extrusión Directa	6438	11000
Extrusión Inversa	10220	

Fuente: Propia

El dado de reducción obtenido posee buenos acabados que están definidos por el tipo de construcción tanto de la matriz como del punzón, pero si existe algún tipo de impureza al momento de la extrusión, esta se reflejará en el producto final, tal y como se aprecia en la figura 6.15a.

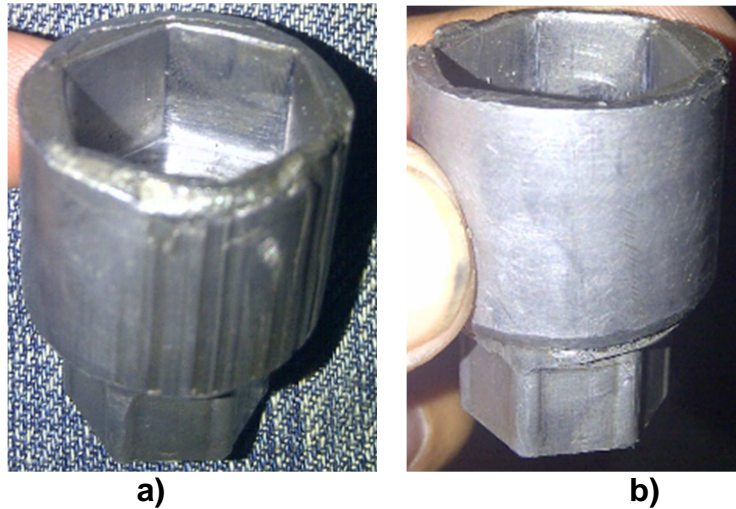


Figura 6.15 Extrusión Mixta – Dado de Reducción Plomo⁷⁵.

- a) con presencia de impurezas dentro de la matriz al momento de la extrusión,
 b) sin ningún tipo de impureza

La matriz de extrusión mixta al igual que la inversa cuenta de un eyector para extraer el dado de reducción deseado (figura 6.16), que para el caso del aluminio fue necesario el uso de prensa, y esto se debe a que la compresión que se produce internamente en la matriz hace que el material tienda a fijarse en las paredes interiores de la misma.

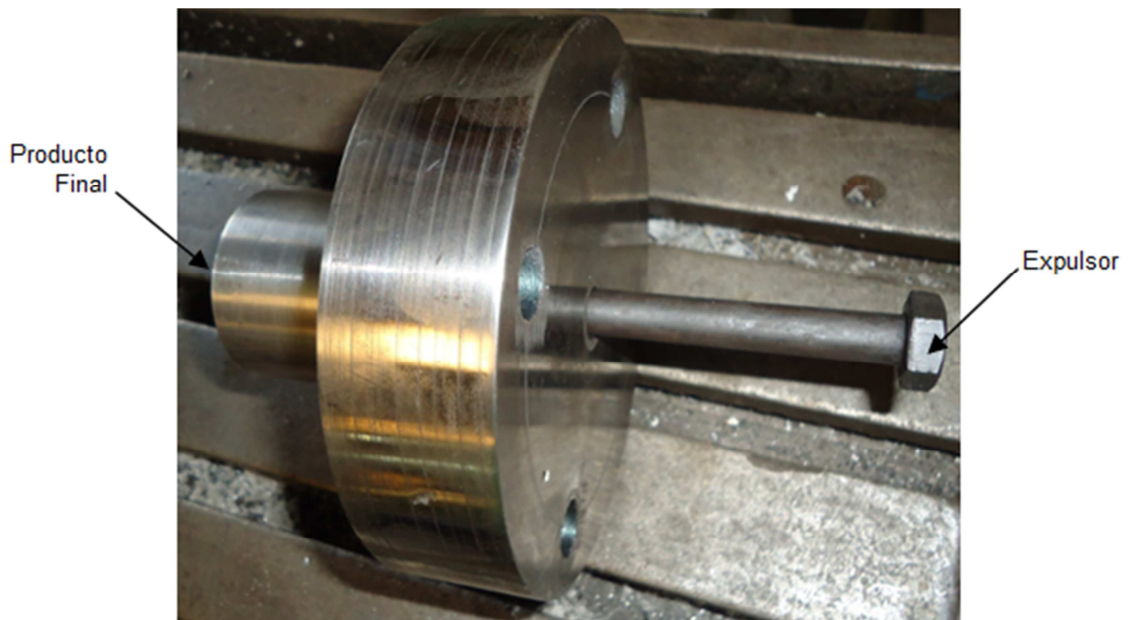


Figura 6.16 Extracción del producto obtenido mediante extrusión mixta⁷⁶.

⁷⁵Fuente, ⁷⁶Fuente: Propia

6.1.3.2.1 Porcentaje de error

Porcentaje de error entre Fuerza Real – Fuerza Experimental

$$\% \text{ error} = \frac{11000 - 10220}{10220} * 100$$

$$\% \text{ error} = 7,63 \%$$

Porcentaje con el cual se puede trabajar bajo las condiciones iniciales, tomando en cuenta que no siempre se obtendrán los mismos valores de las fuerzas, debido a que para cada ocasión puede darse el caso de que un factor de trabajos influya más que otro, referente a la correcta lubricación, las paredes interiores de la matriz no se encuentre totalmente limpias, el material a extruirse pose contornos ásperos, etc.

6.2 ANÁLISIS DE METALES NO FERROSOS

6.2.1 ANÁLISIS A LA COMPRESIÓN DE ALUMINO

Se realizaron pruebas a compresión de aluminio con el fin de determinar la fuerza necesaria para su deformación, generando los siguientes resultados:

Tocho 1 de diámetro = 49.90mm; altura = 44.66mm

Se obtuvo los siguientes resultados

Tabla 6.7 Fuerza vs. Desplazamiento Tocho 1

Desplazamiento (mm)	Fuerza (Ton)
0,05	5
0,14	10
0,36	15
0,78	20
1,45	25
2,5	30
4,23	35
6,38	40
8,61	45
10,64	50
12,65	55
14,28	60
15,87	65
17,28	70
18,48	75

Fuente: Propia

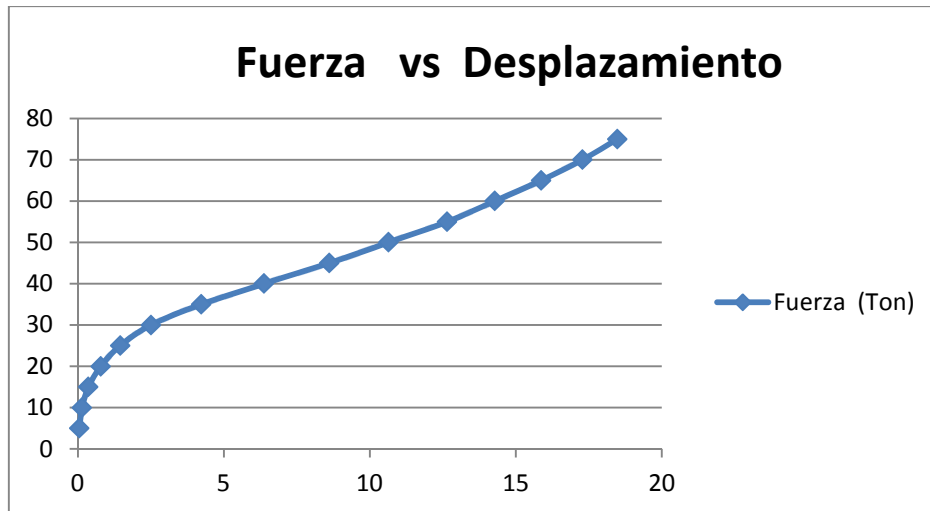


Figura 6.17 Diagrama Fuerza vs Desplazamiento tocho 1 de aluminio⁷⁷.

Para el primer caso se observa que la deformación se da en el rango de las 20 toneladas, punto en el cual se encontraría el punto de fluencia para este aluminio, es decir al aplicar dicha fuerza se produce la deformación plástica.

Tocho 2 de diámetro = 49.20mm; altura = 45.18mm

Tabla 6.8 Fuerza vs. Desplazamiento Tocho 2

Desplazamiento (mm)	Fuerza (Ton)
0,02	5
0,2	10
0,42	15
0,85	20
1,2	25
3,2	30
5,25	35
7,12	40
9,14	45
11,02	50
13,45	55
15,28	60
16,02	65
17,35	70
19,03	75

Fuente: Propia

⁷⁷Fuente: Propia

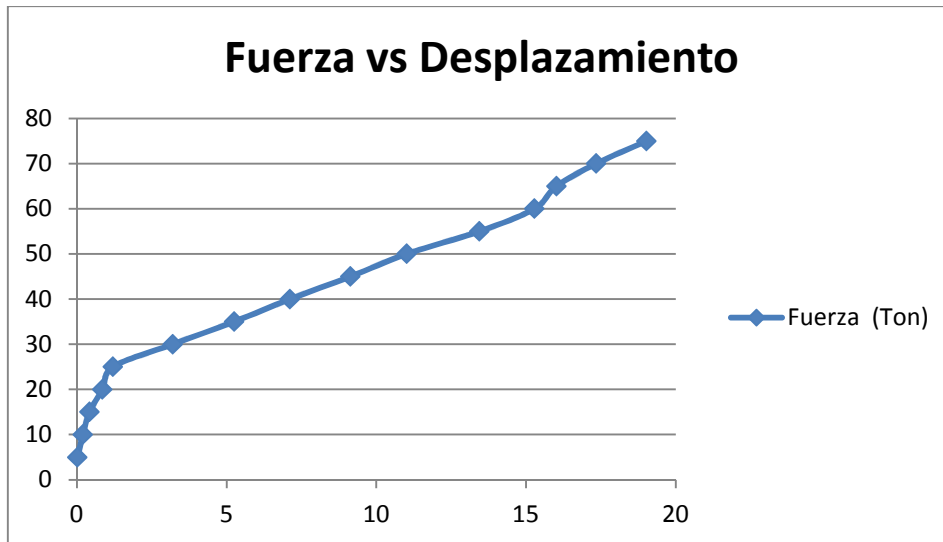


Figura 6.18 Diagrama Fuerza vs Desplazamiento tocho 2 de aluminio⁷⁸.

En el segundo caso se observa que la deformación plástica empieza a partir de las 25 toneladas ejercidas en el tocho por lo que se puede concluir que este es el esfuerzo de fluencia, fuerza que se encuentra en el mismo rango de deformación del tocho 1.

Tocho 3 de diámetro = 50.0mm; altura = 44.20mm

Tabla 6.9 Fuerza vs. Desplazamiento Tocho 3

Desplazamiento (mm)	Fuerza (Ton)
0,08	5
0,15	10
0,29	15
0,82	20
1,46	25
2,36	30
4,63	35
7	40
8,55	45
10,25	50
13	55
14,25	60
15,94	65
17,46	70
18,25	75

Fuente: Propia

⁷⁸Fuente: Propia

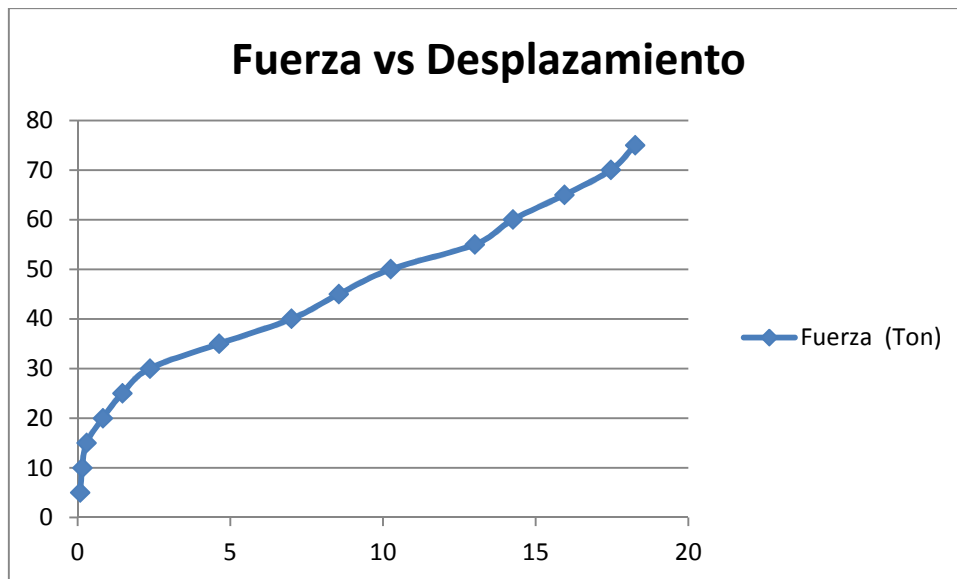


Figura 6.19 Diagrama Fuerza vs Desplazamiento tocho 3 de aluminio⁷⁹.

En el tercer y último caso se observa que la deformación plástica empieza a partir de las 25 toneladas, es decir resultados similares a los del tocho dos.

Es curioso observar que pese a que las probetas fueron cortadas del mismo pedazo de aluminio se comportan de diferente manera el momento de ser sometidas a un ensayo de compresión pura, y esto se debe a que la composición del material puede variar entre secciones haciendo unas más resistentes que otras.

6.3 PROPUESTA PARA PRACTICA DE LABORATORIO

(Ver anexo H)

⁷⁹Fuente: Propia

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ECONÓMICO, FINANCIERO Y AMBIENTAL

7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

7.1.1 COSTOS DE MATERIA PRIMA DIRECTA

Se considera como materia prima directa aquella que interviene directamente con el producto final, es decir con el equipo extrusor.

Este material está disponible en el mercado nacional y cotizado por valor unitario.

Tabla 7.1 Costos de Materia prima directa para la construcción del equipo extrusor

Materia Prima Directa				
COMPONENTE	MATERIAL	CANTIDAD (Kg)	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO (\$)
Porta Punzón	Acero Transmisión	6,2	3,3	20,46
Guías	Acero ASTM A-36	3,25	13,69	44,49
Planchas	Acero ASTM A-36	9,6	10,69	102,62
Porta Punzones	Acero ASTM A-36	6,3	13,69	86,24
Porta Punzones	Acero ASTM A-36	8,8	13,69	120,47
Porta Punzones	Acero ASTM A-36	1,3	8,41	10,92
Punzones	Acero DF-2	1,5	11,16	16,74
Punzones	Acero DF-2	0,5	8,621	4,31
Expulsores	Acero DF-2	0,15	8,621	1,29
Dados	Acero DF-2	0,5	10,16	5,08
Expulsor	Acero DF-2	0,2	10,45	2,09
Matrices	Acero DF-2	57,9	2,97	171,96
Porta Punzón Y Porta Matrices	Plancha Acero ASTM A-36	5,12	5,08	26,02
Bujes	Bronce	3,5	25,41	88,93
Extrusión	Aluminio	0,304	45,53	13,84
Extrusión	Plomo	6	15	90
				805,50

Fuente: Propia

7.1.2 COSTOS DE MANO DE OBRA DIRECTA

La obra de mano directa es aquella que interviene en la fabricación del equipo extrusor, es el trabajo realizado en el taller.

El costo por hora es estándar para trabajos de metal mecánica.

Tabla 7.2 Costos de mano de obra directa para la construcción del equipo extrusor

MANO DE OBRA DIRECTA				
COMPONENTE	TRABAJO	HORAS	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO (\$)
Guías	Torno	1,5	10	15
Planchas	Fresa	1	10	30
Porta Punzones	Torno, Fresa	2	10	20
Porta Punzones	Torno, Fresa	2	10	20
Porta Punzones	Torno, Fresa	2	10	20
Punzón	Torno, Fresa,TT	2	10	20
Punzón	Torno, Fresa,TT	4	10	40
Punzón	Torno, Fresa,TT	4	10	40
Dados	Torno, Fresa,TT	2	50	100
Expulsores	Torno, Fresa,TT	5	10	50
Matrices	Torno, Fresa,TT	7,5	10	75
Matriz Superior y Matriz Inferior	Torno, Fresa,TT	3	10	30
Bujes	Torno	1	10	10
Material Extrusión	Torno	1,5	10	15
Material Extrusión	Torno	1,5	10	15
				500

Fuente: Propia

7.1.3 COSTOS DE MATERIA PRIMA INDIRECTA

Son los costos de insumos y suministros que no son palpables en el equipo extrusor una vez terminado.

Tabla 7.3 Costos de la materia prima indirecta para la construcción del equipo extrusor

Materia Prima Indirecta				
MATERIAL INDIRECTO	CANTIDAD	UNIDADES	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO (\$)
Lijas	10	Unidades	1	10
Cuchillas	5	Unidades	5,6	28
Refrigerante	3	Litros	2,5	7,5
Franelas	4	Unidades	0,25	1
Energía Eléctrica	150	Kw/h	0,05	7,5
Transporte	60	horas	5	100
				154

Fuente: Propia

7.1.4 COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN

Incluye las sumas anteriores, y se anticipa el valor de posibles eventualidades, aumentando así un 10% del valor parcial final.

Tabla 7.4 costos totales de producción para la construcción del equipo extrusor

COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN	
Descripción	Costo (\$)
Materia Prima Directa	805,50
Mano de Obra Directa	300
Materia Prima Indirecta	354
Valor Parcial	1459,50
Imprevistos 10%	145,50
Total	1605,45

Fuente: Propia

7.1.5 DEPRECIACIÓN

El equipo extrusor tiene una vida útil de 20 años, intervalo durante el cual el valor inicial del mismo va a presentar un incremento en su valor, para el cálculo de esta tasa se tiene las siguientes expresiones:

$$V_o := 1606$$

$$V_f := 400$$

$$n := 20$$

$$\Phi := 1 - \sqrt[n]{\frac{V_f}{V_o}} = 0.067$$

(Ec 7.1)

donde:

V_o es el valor inicial de la maquina

V_f Valor final después de los 20 años

N es el número de años en el que se deprecia

Φ es el índice de depreciación

Tabla 7.5 Depreciación del equipo extrusor

No Años	Índice	Ai	Vi
1			1606
2	0,067	107,6	1498,398
3	0,067	100,39	1398,005
4	0,067	93,666	1304,339
5	0,067	87,391	1216,948
6	0,067	81,536	1135,413
7	0,067	76,073	1059,34
8	0,067	70,976	988,3643
9	0,067	66,22	922,1439
10	0,067	61,784	860,3602
11	0,067	57,644	802,7161
12	0,067	53,782	748,9341
13	0,067	50,179	698,7555
14	0,067	46,817	651,9389
15	0,067	43,68	608,259
16	0,067	40,753	567,5057
17	0,067	38,023	529,4828
18	0,067	35,475	494,0074
19	0,067	33,098	460,9089
20	0,067	30,881	430,028
			399,1471

Fuente: Propia

7.2 ANÁLISIS FINANCIERO

7.2.1 INGRESOS

Suponiendo que se puede comercializar el servicio que presta el equipo extrusor, de acuerdo con el costo normal de este tipo de servicios, se realiza la siguiente tabla en función con el 9.53% de interés anual que es lo que establece el Banco Central del Ecuador, el costo referencial del producto se lo obtuvo del costo actual en el mercado Ecuatoriano por un servicio de extrusión de perfiles metálicos.

Tabla 7.6 Ingresos netos del proyecto

Ingresos			
Periodo	Inversión (\$)	Servicio (\$)	Total (\$)
0	1605,45	0	1605,45
1	0	800	800,00
2	0	876,2	876,24
3	0	959,7	959,75
4	0	1051,2	1051,21
5	0	1151,4	1151,39
6	0	1261,1	1261,12
7	0	1381,3	1381,30
8	0	1512,9	1512,94
9	0	1657,1	1657,12
10	0	1815,0	1815,05
11	0	1988,0	1988,02
12	0	2177,5	2177,48
13	0	2385,0	2384,99
14	0	2612,3	2612,28
15	0	2861,2	2861,23
16	0	3133,9	3133,91
17	0	3432,6	3432,57
18	0	3759,7	3759,69
19	0	4118,0	4117,99
20	0	4510,4	4510,44

Fuente: Propia

7.2.2 EGRESOS

Estimando los futuros gastos para que el equipo preste sus servicios durante un periodo de 20 años se tiene.

Tabla 7.7 Egresos netos del proyecto

Egresos				
Periodo	Recuperación de la inversión (\$)	Mantenimiento (\$)	Insumos(\$)	Total (\$)
0	161	0	0	161
1	161	30	50	241
2	161	32,86	50	243,86
3	161	35,99	50	246,99
4	161	39,42	50	250,42
5	161	43,18	50	254,18
6	161	47,29	50	258,29
7	161	51,80	50	262,80
8	161	56,74	50	267,74
9	161	62,14	50	273,14
10	161	68,06	50	279,06
11	161	74,55	50	285,55
12	161	81,66	50	292,66
13	161	89,44	50	300,44
14	161	97,96	50	308,96
15	161	107,30	50	318,30
16	161	117,52	50	328,52
17	161	128,72	50	339,72
18	161	140,99	50	351,99
19	161	154,42	50	365,42
20	161	169,14	50	380,14

Fuente: Propia

7.2.3 FLUJO DE CAJA NETO

Haciendo una evaluación de ingresos y egresos obtenemos el FCN que es un indicador financiero importante que nos permite determinar la rentabilidad de este proyecto, se tiene:

Tabla 7.8 Flujo de caja neto

FCN			
Periodo	Ingresos (\$)	Egresos (\$)	FCN (\$)
0	1605,4	161	1444,45
1	800,0	241	559,00
2	876,2	243,9	632,38
3	959,7	247,0	712,76
4	1051,2	250,4	800,79
5	1151,4	254,2	897,21
6	1261,1	258,3	1002,83
7	1381,3	262,8	1118,50
8	1512,9	267,7	1245,20
9	1657,1	273,1	1383,98
10	1815,0	279,1	1535,98
11	1988,0	285,6	1702,47
12	2177,5	292,7	1884,82
13	2385,0	300,4	2084,56
14	2612,3	309,0	2303,32
15	2861,2	318,3	2542,94
16	3133,9	328,5	2805,39
17	3432,6	339,7	3092,85
18	3759,7	352,0	3407,71
19	4118,0	365,4	3752,57
20	4510,4	380,1	4130,30

Fuente: Propia

7.2.4 TASA INTERNA DE RETORNO

Analizando la tabla anterior en el programa Excel se obtiene la tasa interna de retorno con la función TIR.

Tabla 7.9 Tasa interna de retorno

FCN	
Periodo	FCN (\$)
0	-1766,45
1	559,00
2	632,38
3	712,76
4	800,79
5	897,21
6	1002,83
7	1118,50
8	1245,20
9	1383,98
10	1535,98
11	1702,47
12	1884,82
13	2084,56
14	2303,32
15	2542,94
16	2805,39
17	3092,85
18	3407,71
19	3752,57
20	4130,30
TIR	
44%	

Fuente: Propia

El valor de la tasa interna de retorno es generalmente un valor aproximado al 10% en la banca Ecuatoriana, en este proyecto se obtiene un TIR del 44%, lo cual nos indica que la inversión se puede recuperar en un periodo no mayor al de la vida útil del equipo extrusor, asumiendo que el servicio es remunerado.

Además un TIR del 44% indica que es un negocio rentable, se debe recalcar que se debería hacer producir al equipo extrusor un valor de 800 dólares anuales para obtener dicho TIR.

7.2.5 VALOR ACTUAL NETO

De la tabla se tienen los valores del flujo de caja utilizando una tasa real efectiva de la banca Ecuatoriana del 15.8% y utilizando la función VNA en el programa Excel se tiene el siguiente resultado.

Tabla 7.10 Valor actual neto

FCN	
Periodo	FCN (\$)
0	-1766,45
1	559,00
2	632,38
3	712,76
4	800,79
5	897,21
6	1002,83
7	1118,50
8	1245,20
9	1383,98
10	1535,98
11	1702,47
12	1884,82
13	2084,56
14	2303,32
15	2542,94
16	2805,39
17	3092,85
18	3407,71
19	3752,57
20	4130,30
VAN	
\$ 4.504,36	

Fuente: Propia

El resultado del VAN es mayor que la inversión por lo que es económicamente rentable, con esta información del VAN y del TIR se puede realizar este proyecto puesto que los dos valores son positivos, pero hay que tener en cuenta que este equipo no está hecho con la finalidad de recuperar la inversión inicial.

7.3 ANÁLISIS AMBIENTAL

Como es conocido la extrusión es un proceso de deformación sin arranque de viruta y por tal motivo no existen desechos tales como limallas o desperdicio de material tal como sucede en otros procesos de producción.

Se puede hablar de contaminación al momento de limpiar la pieza extruida del lubricante que es utilizado para el proceso.

La contaminación auditiva es mínima puesto que la prensa no produce ruidos excesivos y están por debajo de los 65 dB, límite que permite la organización mundial de la salud para que no haya molestias psicológicas en las personas.

Debido a que la construcción del equipo es con fines didácticos, las piezas extruidas por los estudiantes pueden ser reutilizadas aplicando un proceso de fundición, y de esta manera evitar en lo más mínimo la contaminación ambiental por uso de material para extruir.

El plomo es un material contaminante para la sangre de los seres vivos, pero esto se produce debido a su uso excesivo, por lo que no existirá problema alguno el hecho de que se haya tomado al plomo como uno de los materiales de estudio para este proceso.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos al momento de poner en funcionamiento el equipo extrusor fueron los esperados, los productos obtenidos poseen buen acabado superficial, la forma con los cuales fueron diseñados, el consumo de materia prima es mínimo, y los gastos de producción son reducidos.
- El proceso de extrusión en frío es una forma muy clara mediante la cual se puede observar la deformación plástica de un material, trabajando en conjunto con la parte teórica en la obtención de fuerzas tomando en cuenta todos aquellos factores que harán que esta aumente o disminuya, se puede obtener como resultado un sin número de formas, y en cada una de ellas se podrá observar la deformación sufrida debido al flujo del material, sin necesidad de realizar un precalentamiento.
- El error producido al comparar las fuerzas obtenidas en los cálculos y las pruebas se deben a distintos factores como son: el material con el que se trabaja puede no poseer las mismas características de composición, comparadas con las que se requiere en el cálculo teórico, las matrices tienen que ser construidas con un proceso tecnológico moderno y preciso además deben poseer el mejor acabado superficial, pudiendo mencionar un proceso de cromado duro, que para este proyecto fue imposible realizarlo porque los costos son demasiado elevados.
- El equipo cuenta con un factor de seguridad mínimo de 1.74 para trabajar con los materiales establecidos y a la temperatura ambiente, lo que garantiza que el equipo extrusor no fallará siempre y cuando se trabaje dentro del límite de fuerzas con los cuales fueron realizados los respectivos cálculos

- Existen varias aleaciones de aluminio y plomo en el mercado por lo que hay que tener muchísimo cuidado el momento de realizar las prácticas, de no sobrepasar los límites con las cuales está diseñado el equipo extrusor, puesto que de no acatar esta medida el equipo puede llegar a fallar, para lo cual se disponen de tablas que permiten conocer los distintos factores que intervienen en el cálculo de fuerzas de acuerdo a su composición, concluyendo que, a mayor pureza de los materiales, menor es la fuerza necesaria para su deformación plástica.
- La lubricación es un factor muy importante al momento de realizar la extrusión, reduciendo la fricción hasta un 60%, debido a lo cual es indispensable una correcta lubricación de cada uno de los elementos que participan en el proceso.
- El costo total del proyecto se encuentra dentro del presupuesto planeado antes de poner en marcha su construcción, el mismo que es de 1600 USD, obteniendo resultados satisfactorios tanto económicos como experimentales.

8.2 RECOMENDACIONES

- Antes de usar el equipo extrusor es necesario leer la práctica de laboratorio propuesta, en la cual se enumeran los pasos a seguir para el ensamblaje del equipo y su posterior utilización.
- No se debe sobrepasar las fuerzas establecidas en los cálculos, ya que caso contrario el equipo puede fallar, y si se desea realizar las prácticas con otros metales no ferrosos, que no sean específicamente plomo o aluminio, se debe tener en cuenta el factor de seguridad con el que están fabricados estos elementos, y trabajar dentro de estos rangos al momento de hallar nuevas fuerzas de extrusión.

- Es necesario realizar más estudios de materiales no ferrosos, como es el plomo y el aluminio, esencialmente ensayos de tracción y compresión para determinar límites de fluencia y límites de tracción, puesto que no existe información suficiente sobre este tema.
- En el laboratorio de Procesos de Manufactura del DECEM se puede apreciar el mal estado en el que se encuentra algunas máquinas, por lo que es recomendable dar un mantenimiento constante para su correcto funcionamiento, en este caso la prensa hidráulica de 60 toneladas no se encuentra habilitada para trabajar a su totalidad, por lo que no se pudo realizar la adaptación del equipo extrusor como se hubiese deseado.
- Las matrices de extrusión deben poseer un excelente acabado superficial, y debido al desgaste que se producirá tras el permanente uso de las mismas, es recomendable realizar un proceso de cromado duro, ya que de esta manera el desgaste no se producirá directamente en las paredes interiores de las matrices, y al momento de ser necesario se puede obtener el acabado requerido aplicando nuevamente este proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Schey, John, PROCESOS DE MANUFACTURA, Editorial Mc Graw Hill, Tercera ed., México, 2000
- Rossi, Mario, ESTAMPADO EN FRÍO DE LA CHAPA, Editorial HOELPI, Octava ed., Barcelona, 1971
- StanilawErber, KazimierzKuczynski, CONFORMACIÓN PLÁSTICA EN FRÍO
- Avallone, Baumeister, MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO, Tomo I, Editorial McGraw-Hill, Novena ed., Nueva York, 1995
- Catálogo de aceros para trabajo en frío Ivan Bohman
- Askeland, Donald, CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES, Editorial Paraninfo, Cuarta ed., Madrid 2001
- Craig, Roy, MECÁNICA DE MATERIALES, Editorial CECSA, Segunda ed., México, 2004
- Robert L. Mott, DISEÑO DE ELEMENTOS Y MAQUINAS, Cuarta ed.
- Richard G. Budynas & J. Keith Nisbett, DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY, Editorial Mc Graw Hill, Octava ed.

Direcciones de internet:

- www.wikipedia.org, Imágenes, Español, 2011.
- www.ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/ingenieria-grafica/material-de-clase-1/2.1%20Procesos%20de%20Fabricacion.pdf, Extrusión, Español, 2012.
- www.materias.fcyt.umss.edu, Extrusión, Español, 2011.

Software utilizado:

- Microsoft Office Excel y Word.
- Solidworks 2010
- Autocad 2010
- Mathcad 14