



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

AUTORES: NOVOA SALGADO, ANDRÉS ALEJANDRO

VILLANUEVA VELARDE, VICTOR ALFONSO

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO SEMIAUTOMÁTICO
PARA RECALCADO EN CALIENTE PARA EL LABORATORIO DE
PROCESOS DE MANUFACTURA II DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL
EJÉRCITO**

DIECTOR: ING. HERNÁN LARA

CODIRECTOR: ING. SANTIAGO CASTELLANOS

SANGOLQUÍ, NOVIEMBRE 2013

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO SEMIAUTOMÁTICO PARA RECALCADO EN CALIENTE PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA II DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO”** fue realizado en su totalidad por Andrés Alejandro Novoa Salgado y Victor Alfonso Villanueva Velarde, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Hernán Lara

DIRECTOR

Ing. Santiago Castellanos

CODIRECTOR

Sangolquí, 2013-08-05

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

**Nosotros, Andrés Alejandro Novoa Salgado y Victor Alfonso
Villanueva Velarde**

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO SEMIAUTOMÁTICO PARA RECALCADO EN CALIENTE PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA II DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO”** , ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi/nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 05 de agosto del 2013

Andrés A. Novoa Salgado

Victor A. Villanueva Velarde

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

A U T O R I Z A C I Ó N

**Nosotros, Andrés Alejandro Novoa Salgado y Victor Alfonso
Villanueva Velarde**

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 SEMIAUTOMÁTICO PARA RECALCADO EN CALIENTE PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA II DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 05 de agosto del 2013

Andrés A. Novoa Salgado

Victor A. Villanueva Velarde

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO SEMIAUTOMÁTICO PARA RECALCADO EN CALIENTE PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA II DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO”

ELABORADO POR:

Andrés A. Novoa Salgado

Victor A. Villanueva Velarde

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Ángelo Villavicencio

DIRECTOR DE CARRERA

Sangolquí, 2013-08

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a las personas que hicieron todo lo posible para que tuviera las herramientas necesarias para la vida, mi familia.

A mis padres, por su amor y dedicación hacia mí, por sus consejos, su motivación, por inculcarme valores éticos y morales, por enseñarme con el ejemplo, por anteponer mis necesidades a las suyas, por no permitir que me rindiera, por corregirme cuando me equivoco, por eso y por tantas cosas más este logro no es mío, es suyo.

A mis hermanos, por ser un ejemplo de vida, por demostrarme que con trabajo duro todo se puede lograr, por siempre estar pendientes de mí sin importar la distancia, por influenciar en mi desarrollo como persona, por ser los mejores. Pusieron una meta muy alta y a partir de ahora trabajaré hasta alcanzarla.

A las parejas de mis hermanos, porque a pesar de no tener ninguna obligación conmigo siempre que he necesitado algo, han estado ahí para ayudarme, porque sin ustedes no tendría esos siete maravillosos sobrinos, en quienes espero en un futuro poder retribuir en algo lo que me han dado.

Recalcando una vez más, a mi familia, con todo el amor: GRACIAS.

ANDRÉS NOVOA

DEDICATORIA

Las palabras no pueden expresar lo que quisiera, sensaciones que llenan mi cabeza de alegría y tenacidad sensaciones que se las debo a mis padres, Gilberto Villanueva y Gregoria Velarde, seres que día a día me demuestran que el trabajo constante es la mejor manera de vivir, esta y muchas razones más me permiten con gran gratitud dedicar esta tesis a mis padres.

VICTOR VILLANUEVA

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este proyecto constituye un punto de cambio dentro de mi vida, por lo tanto me veo en la obligación de agradecer a todas las personas que hicieron posible que llegara a este momento.

A mi familia que hizo un gran esfuerzo para que no me faltara nada y tuviera una buena educación.

A mis amigos que a lo largo de la vida estudiantil fueron de gran ayuda, algunas veces como fuente de consulta para entender diversos conceptos, otras para liberar tensiones y reír, e inclusive como apoyo.

A todos los docentes y laboratoristas de la Carrera de Ingeniería mecánica, encargados de impartir el conocimiento necesario para formar profesionales que contribuyan al desarrollo del país. Especialmente al Director y Codirector de esta tesis, el Ing. Hernán Lara y el Ing. Santiago Castellanos.

A todas las personas e instituciones que contribuyeron en el desarrollo de este proyecto de manera.

Tomando las palabras de Gustavo Cerati solo quiero decirles que: No sólo no hubiera sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo; algunos siguen hasta hoy. ¡Gracias totales!

ANDRÉS NOVOA

AGRADECIMIENTOS

Fueron muchas las vicisitudes que afrontamos en el desarrollo del proyecto, a cada problema siempre hubo gente que nos supo extender la mano para brindar su ayuda, motivo por el cual existe muchas personas por agradecer, pero como no me quiero olvidar de ninguna solo quiero expresar que en mi quedan esos pensamientos de gratitud. Pero sin dudar dentro del grupo de personas que colaboraron se destacan dos personas en especial, personas que siempre estuvieron ahí en momentos complicados soportando todo sin queja alguna, razón por la cual solo quiero expresar mis agradecimientos más profundos a mis padres.

VICTOR VILLANUEVA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	II
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	III
A U T O R I Z A C I Ó N	IV
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.I
ÍNDICE DE CONTENIDOS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XIVV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVIII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XXIVV
NOMENCLATURA	XXVV
RESUMEN.....	XXIXX
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.1.1. PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN EL TRABAJO DE METALES	1
1.1.2. FORJADO DE METALES	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. GENERAL	3
1.3.2. ESPECÍFICOS	4
1.4. ALCANCE.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. FORJA EN DADO CERRADO	6
2.2. RECALCADO Y ENCABEZAMIENTO.....	7
2.2.1. DIVISIÓN	9
2.2.2. TIPOS DE MÁQUINAS PARA EL RECALCADO DE CABEZAS	10
2.3. FUNDAMENTOS DEL RECALCADO	12
2.3.1. RELACIONES DE DEFORMACIÓN EN EL RECALCADO	13
2.3.2. FUERZA NECESARIA PARA EL RECALCADO	21
2.4. PRENSAS	24
2.4.1. PRENSAS MECÁNICAS	26
2.4.2. PRENSAS HIDRÁULICAS	27

2.5. HORNOS DE CALENTAMIENTO	38
2.5.1. GENERALIDADES.....	38
2.5.2. HORNOS DE RESISTENCIAS.....	40
2.5.3. HORNOS CON COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y GASEOSOS.....	50
2.6. METALES NO FERROSOS	53
2.6.1. DEFORMACIÓN EN CALIENTE DE METALES.....	55
2.6.2. EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.....	58
2.6.3. EL COBRE Y SUS ALEACIONES.....	75
2.7. SISTEMAS AUTOMÁTICOS EN PROCESOS DE MANUFACTURA	85
2.7.1. INTRODUCCIÓN	85
2.7.2. PARTES DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO.....	86
2.7.3. SISTEMAS AUTOMATIZADOS.....	88
2.7.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN.....	88
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS ÓPTIMA	92
3.1. DETERMINACIÓN PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO DE RECALCADO.....	92
3.1.1. REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO.....	92
3.1.2. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO.....	93
3.2. ANÁLISIS DE LA ALTERNATIVA MÁS ÓPTIMA.....	94
3.2.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS ÓPTIMA	98
3.2.4. RESUMEN DE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS	104
CAPÍTULO 4 DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES	105
4.1. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS.....	106
4.1.1. VOLUMEN INICIAL.....	107
4.1.2. DIÁMETRO MÁXIMO.....	107
4.1.3. ÁREA DE LA CABEZA	108
4.1.4. ÁREA MÁXIMA.....	108
4.1.5. DIÁMETRO MEDIO.....	109
4.1.6. ALTURA MEDIA DE RECALCADO.....	109
4.1.7. DIFERENCIA TEÓRICA DE ALTURA	109
4.1.8. RELACIÓN DE DEFORMACIÓN EN EL RECALCADO.....	110
4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUNZONADO	114
4.2.1. FUERZA DE PUNZONADO.....	114
4.2.2. SISTEMA HIDRÁULICO	119
4.2.3. CONTROL SISTEMA HIDRÁULICO.....	136
4.3. DISEÑO DE LA MATRIZ.....	138
4.3.1. FORMA DE LAS HERRAMIENTAS DE RECALCADO	138
4.3.2. SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	138
4.3.3. ESFUERZOS SOBRE LAS HERRAMIENTAS.....	141

4.3.4. DURACION DE LAS HERRAMIENTAS	142
4.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO	143
4.4.1. RECINTO DEL HORNO	143
4.4.2. PÉRDIDAS DE CALOR	145
4.4.3. CÁLCULO DE LA ENERGÍA ABSORBIDA POR LA CARGA	148
4.4.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO DE LA PIEZA DE TRABAJO	149
4.4.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA CALENTAR LA PIEZA DE TRABAJO	152
4.4.7. POTENCIA MEDIA REQUERIDA	153
4.4.9. SISTEMA DE CONTROL	157
4.4.10. CONEXIÓN SISTEMA DE CONTROL	162
4.5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BASTIDOR	163
4.5.1. DIMENSIONES DEL BASTIDOR	163
4.5.2. ANÁLISIS DE CARGAS DE LA ESTRUCTURA	164
CAPÍTULO 5 SIMULACIÓN DE LA PROBETA RECALCADA EN CALIENTE	170
5.1. SISTEMAS DE ANÁLISIS	170
5.2. MATERIALES	171
5.3. GEOMETRÍA	172
5.4. MODELADO	173
5.4.1. ASIGNACIÓN DE MATERIALES	173
5.4.2. CONTACTOS	174
5.4.3. MALLADO	175
5.4.4. ANÁLISIS TÉRMICO	176
5.4.5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	179
CAPÍTULO 6 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	182
6.1. CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ	182
6.1.1. LISTA DE MATERIALES	182
6.1.2. HOJA DE PROCESOS	182
6.2. CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA HIDRÁULICO	183
6.2.1. LISTA DE MATERIALES	183
6.2.2. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO	184
6.2.3. MONTAJE DEL SISTEMA HIDRÁULICO	185
6.3. CONSTRUCCIÓN DEL BASTIDOR	187
6.3.1. LISTA DE MATERIALES	187
6.3.2. DIAGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DEL BASTIDOR	187
6.3.3. DIAGRAMA DE MONTAJE DEL BASTIDOR	188
6.4. CONSTRUCCIÓN DEL HORNO	189
6.4.1. LISTA DE MATERIALES	189

6.4.2. DIAGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO.....	190
CAPÍTULO 7 PRUEBAS Y MANUALES	191
7.1. PRUEBAS DEL EQUIPO EN VACÍO.....	192
7.1.1. PRUEBAS DEL EQUIPO DE PUNZONADO.....	192
7.1.2. PRUEBAS DEL EQUIPO DE CALENTAMIENTO	195
7.2. PRUEBAS DEL EQUIPO CON LA MATERIA PRIMA.....	196
7.2.1. PRUEBAS CON LA ALEACIÓN DE ALUMINIO.....	196
7.2.2. PRUEBAS CON LA ALEACIÓN DE COBRE.....	202
7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	206
7.3.1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CALENTAMIENTO	206
7.3.2. ANÁLISIS DE LAS PUEBAS DE DEFORMACIÓN.....	207
7.3.3. ANÁLISIS VISUAL.....	210
7.3.4. ANÁLISIS METALOGRÁFICO.....	211
7.3.5. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL CORTE.....	216
7.3.6. COMPARACIÓN CON PROCESOS DE MAQUINADO	221
7.3.7. CONSUMO DE ENERGÍA.....	221
7.4. MANUAL DE OPERACIÓN, SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO	222
7.5. ELABORACIÓN DE LAS GUÍAS PARA LA PRÁCTICA DE LABORATORIO.....	222
CAPÍTULO 8 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	224
8.1. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	224
8.1.1. COSTOS DIRECTOS.....	224
8.1.2. COSTOS INDIRECTOS.....	228
8.1.3. COSTO TOTAL.....	228
CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	229
9.1. CONCLUSIONES.....	229
9.2. RECOMENDACIONES.....	230

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características generales de los procesos de forja	6
Tabla 2.2 Valores orientativos para la resistencia real a la deformación <i>Kwe</i> en el recalado.....	23
Tabla 2.3 Tipos de prensa	25
Tabla 2.4 Intervalos característicos de velocidades del equipo de forjado	25
Tabla 2.5 Hornos de calentar.....	39
Tabla 2.6 Características principales de aleaciones de base Ni-Cr.....	45
Tabla 2.7 Resistividad eléctrica de las aleaciones Ni-Cr	46
Tabla 2.8 Propiedades de las aleaciones Fe-Cr-Al.....	48
Tabla 2.9 Resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al	49
Tabla 2.10 Metales comunes no ferrosos	54
Tabla 2.11 Clasificación de los metales por forjabilidad decreciente	56
Tabla 2.12 Sistema de designación para las aleaciones de aluminio para forjar.....	61
Tabla 2.13 Sistema de designación para las aleaciones de aluminio para colar	61
Tabla 2.14 Propiedades físicas de las aleaciones de aluminio representativas, no tratables térmicamente.	64
Tabla 2.15 Propiedades físicas de las aleaciones de aluminio representativas, tratables térmicamente	65
Tabla 2.16 Rangos de Temperatura de Forjado recomendados para Aleaciones de Aluminio.....	71

Tabla 2.17 Rangos de temperatura del troquel para el forjado de aleaciones de aluminio.....	74
Tabla 2.18 Propiedades mecánicas del cobre	76
Tabla 2.19 Propiedades físicas del cobre	76
Tabla 2.20 Rangos de forjabilidad relativa de las aleaciones de cobre comúnmente forjadas.	81
Tabla 3.1 Criterio de Valoración para la Prensa.....	99
Tabla 3.2 Matriz de Selección de la Máquina	99
Tabla 3.3 Criterio de Valoración del Sistema de Calentamiento.....	101
Tabla 3.4 Matriz de Selección del Sistema de Calentamiento	101
Tabla 3.5 Propiedades de las aleaciones aluminio.....	102
Tabla 3.6 Propiedades de las aleaciones cobre	102
Tabla 3.7 Criterio de Valoración de material para recalado	102
Tabla 3.8 Matriz de selección del material para recalcar (Aluminio)	103
Tabla 3.9 Matriz de selección del material para recalcar (Cobre).....	103
Tabla 3.10 Partes del Equipo de Recalado.....	104
Tabla 4.1 Relación de deformación de recalado de la cabeza.....	113
Tabla 4.2 Valores orientativos para la resistencia a la deformación kwe.	114
Tabla 4.3 Resistencia a la deformación para distintos tipos de aleaciones de cobre.....	117
Tabla 4.4 Características motor eléctrico.....	128
Tabla 4.5 Características de la Bomba	129
Tabla 4.6 Selección de manguera	130
Tabla 4.7 Características Válvula direccional 4/3 centro tándem.....	131

Tabla 4.8	Características Válvula de alivio	132
Tabla 4.9	Características Válvula reguladora de caudal.....	132
Tabla 4.10	Selección del filtro de aspiración.....	133
Tabla 4.11	Selección del filtro de retorno.....	134
Tabla 4.12	Dimensiones del depósito.....	135
Tabla 4.13	Características indicadores de nivel	136
Tabla 4.14	Composición química y normas del acero BÖHLER W302	139
Tabla 4.15	Propiedades físicas acero BÖHLER W302.....	140
Tabla 4.16	Aceros y durezas recomendadas para la fabricación de herramientas	140
Tabla 4.17	Magnitudes de influencia sobre la duración de las herramientas de recalcar y prensar.	142
Tabla 4.18	Conductividad Térmica	146
Tabla 4.19	Propiedades distintas para la resistencia Nikrothal 80.....	155
Tabla 4.20	Tipos de termopares	157
Tabla 6.1	Lista de materiales matriz.....	182
Tabla 6.2	Lista de materiales sistema hidráulico	183
Tabla 6.3	Lista de materiales bastidor	187
Tabla 6.4	Lista de materiales horno.....	189
Tabla 7.1	Verificación de pruebas en vacío sistema de punzonado.....	192
Tabla 7.2	Verificación de pruebas en vacío sistema de calentamiento....	196
Tabla 7.3	Tiempo de calentamiento aleación aluminio a 600 °C.	206
Tabla 7.4	Tiempo de calentamiento aleación aluminio a 800 °C.	206
Tabla 7.5	Tiempo de calentamiento aleación de cobre a 800 °C.....	207

Tabla 7.6	Pruebas de deformación aleación aluminio	208
Tabla 7.7	Pruebas de deformación aleación cobre.....	209
Tabla 7.8	Resumen de los resultados obtenidos	220
Tabla 8.1	Costos Directos de la Prensa Hidráulica.....	224
Tabla 8.2	Costos Directos de la Matriz	226
Tabla 8.3	Costos Directos del Horno	227
Tabla 8.4	Costos Materia Prima.....	228
Tabla 8.5	Costos Indirectos	228
Tabla 8.6	Costo Total del proyecto	228

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ejemplos de piezas con recalcos de cabezas	8
Figura 2.2 Esquema explicativo de la velocidad de deformación (ϕh)	13
Figura 2.3 Dimensiones de deformación de formas de recalcado	16
Figura 2.4 Relación entre el recalcado y el grado de recalcado.	18
Figura 2.5 Relación entre la relación de recalcado, el recalcado o bien la deformación logarítmica o bien relación de secciones y relación de las dimensiones de acabado.....	19
Figura 2.6 Componentes de una prensa troqueladora típica por transmisión mecánica	24
Figura 2.7 Esquema de los principios de diversas máquinas de forjado. (a) Prensa mecánica con accionamiento excéntrico. (b) Prensa de junta articulada. (c) Prensa	26
Figura 2.8 Diagrama de las instalaciones hidráulicas	30
Figura 2.9 Bomba rotativa de engranajes	30
Figura 2.10 Esquema depósito	31
Figura 2.11 Filtración total	32
Figura 2.12 Manómetro Bourdon	33
Figura 2.13 Manguera flexible.....	33
Figura 2.14 Válvula 4/3 centro tándem	34
Figura 2.15 Válvula antirretorno.....	34
Figura 2.16 Válvula reductora de presión	35
Figura 2.17 Cilindro de simple efecto retorno por muelle.....	36
Figura 2.18 Cilindro de doble efecto	36

Figura 2.19 Motor eléctrico asíncrono te corriente alterna.....	38
Figura 2.20 Horno de resistencias.	40
Figura 2.21 Equipos de calentamiento directo, intermitente y continuo	42
Figura 2.22 Disposición típica de resistencias de calentamiento indirecto ..	43
Figura 2.23 Tubo radiante con resistencia de alambre en espiral sobre soporte cerámico	44
Figura 2.24 Resistencias blindadas de comercio.....	44
Figura 2.25 Horno giratorio para cantar pernos	52
Figura 2.26 Flujo de esfuerzos de aleaciones de aluminio forjadas y del acero 1025 a temperaturas de forjado y niveles de deformación total	67
Figura 2.27 Forjabilidad y temperaturas de forjado de distintas aleaciones de aluminio.....	68
Figura 2.28 Flujo de esfuerzos versus tasa de deformación para la aleación 6061 a tres temperaturas y una tasa de deformación 10 s-1	69
Figura 2.29 Flujo de esfuerzos vs. tasa de deformación para aleaciones de aluminio 2014 y 6061 a 370 °C (700 °F) y a dos diferentes tasas de deformación.....	72
Figura 2.30 Regiones de fase a temperaturas de forjado: 1. Latón; 2. Latón zinc (C99400, C99500); 3. Latón Forjado (C37700) ...	84
Figura 3.1 Medidas del producto recalado. Medidas en milímetros	93
Figura 3.2 Esquema cinemático de una prensa de recalcar de matriz única y doble efecto. Herramientas principales: 1, cuchilla redonda; 2,	

	cuchilla plana; 3, matriz; 4, punzón recalcado previo; 5, punzón de recalcado final.....	94
Figura 3.3	Esquema del sistema de prensa hidráulica	95
Figura 3.4	(a) Horno de mufla de ranura; (b) Esquema resistencia ondulada sobre gancho	97
Figura 4.1	Equipo de recalcado en caliente	105
Figura 4.2	Parámetros iniciales para el recalcado	106
Figura 4.3	Resistencia a la deformación para distintos tipos de aleaciones de aluminio.....	116
Figura 4.4	Esquema circuito hidráulico	120
Figura 4.5	Representación del cilindro hidráulico	121
Figura 4.6	Características cilindro hidráulico	122
Figura 4.7	Motor de inducción monofásico – Rotor de jaula	128
Figura 4.8	Curva de caudal $Q = f(n)$	129
Figura 4.9	Selección de tamaño de mangueras hidráulicas	130
Figura 4.10	Válvula direccional 4/3 centro tándem	131
Figura 4.11	Válvula de alivio	132
Figura 4.12	Válvula reguladora de caudal	133
Figura 4.13	Filtro de retorno	134
Figura 4.14	Forma del depósito Horizontal "Non-JIC"	135
Figura 4.15	Control de la prensa.....	136
Figura 4.16	Características breaker	137
Figura 4.17	Características del contactor	137
Figura 4.18	Características relé térmico	137

Figura 4.19 Modelo de la matriz. Medidas en milímetros.....	138
Figura 4.20 Factor de Seguridad dela Matriz.	141
Figura 4.21 Dimensiones internas del horno.	143
Figura 4.22 Espesor y material de las paredes del horno.....	143
Figura 4.23 Espesor y material parte frontal del horno.....	144
Figura 4.24 Espesor y material parte posterior del horno.....	144
Figura 4.25 Conducción unidimensional a través de una pared plana.....	145
Figura 4.26 Potencia específica máxima en hornos.....	153
Figura 4.27 Carga específica máxima de resistencias.....	154
Figura 4.28 Esquema del sistema de control.....	157
Figura 4. 29 Curvas de medición.....	161
Figura 4.30 Conexión del sistema de control.....	162
Figura 4.31 Esquema del bastidor con sus elementos.	163
Figura 4.32 Dimensiones del Bastidor.....	163
Figura 4.33 Dimensiones del Perfil IPE 160.	164
Figura 4.34 Análisis de carga en la viga superior.	165
Figura 4.35 Análisis de carga en la viga inferior.	167
Figura 4.36 Unión Soldada de los perfiles.....	168
Figura 5.1 Sistemas de análisis térmico y estructural.....	171
Figura 5.2 Propiedades mecánicas de la Aleación de Aluminio.....	172
Figura 5.3 Importación de la geometría desde Autodesk Inventor 2012..	172
Figura 5.4 Modelado.....	173
Figura 5.5 Materiales asignados de acuerdo a la geometría.....	174
Figura 5.6 Contacto friccional entre probeta y matriz.....	174

Figura 5.7	Mallado de punzón, matriz y probeta	175
Figura 5.8	Cambio del tamaño de malla de la probeta	175
Figura 5.9	Configuración del análisis térmico	177
Figura 5.10	Cambio de temperatura en la probeta de aleación de cobre ..	178
Figura 5.11	Cambio de temperatura en la probeta de aleación de aluminio	178
Figura 5.12	Configuración del análisis estructural	179
Figura 5.13	Deformación en probetas.....	180
Figura 5.14	Recalcado de cabeza hexagonal.....	181
Figura 6.1	Esquema del Depósito.....	185
Figura 6.2	Diagrama de flujo de montaje del Sistema Hidráulico.....	186
Figura 6.3	Unidad Hidráulica.....	186
Figura 6.4	Diagrama de flujo construcción del Bastidor.....	187
Figura 6.5	Bastidor Prensa Hidráulica	188
Figura 6.6	Diagrama de flujo montaje del Bastidor	188
Figura 6.7	Bastidor y Cilindro Hidráulico.....	188
Figura 6.8	Diagrama de flujo construcción del horno.....	190
Figura 6.9	Horno de resistencia	190
Figura 7.1	Pirómetro infrarrojo	197
Figura 7.2	Probeta aleación aluminio cortada a la mitad y pulida con alúmina.....	200
Figura 7.3	Probetas aleación de aluminio. a. Maquinada en frío. b. Deformada en caliente.....	201
Figura 7.4	Esquema máquina universal de ensayos	201

Figura 7.5	Probetas aleación de aluminio después de la prueba de resistencia al corte	202
Figura 7.6	Probeta aleación de cobre cortada a la mitad y pulida con alúmina	204
Figura 7.7	Probetas aleación de cobre. a. Maquinada en frío. b. Deformada en caliente	205
Figura 7.8	Probetas aleación de cobre después de la prueba de resistencia al corte	205
Figura 7.9	a) Grieta longitudinal, b) Grieta en la cabeza.....	210
Figura 7.10	Grietas internas. a) Posición de grietas internas. b) Piezas recalcadas cortadas a la mitad	211
Figura 7.11	Metalografía de la probeta de la aleación de aluminio 2011-T3 deformada	212
Figura 7.12	Metalografía de la probeta de la aleación de aluminio 2011-T3	213
Figura 7.13	Metalografía de la probeta de la aleación de cobre C37700 sin tratamiento térmico	214
Figura 7.14	Metalografía de la probeta de la aleación de cobre C37700 después de someterlo a la temperatura de recristalización	215

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo 1.** Catálogo Cilindro Hidráulico
- Anexo 2.** Catálogo Motor Eléctrico
- Anexo 3.** Aceite Hidráulico
- Anexo 4.** Catálogo Bomba Engranajes
- Anexo 5.** Catálogo Manguera Hidráulica
- Anexo 6.** Catálogo Válvula Direccional
- Anexo 7.** Catálogo Válvula Reguladora de Caudal
- Anexo 8.** Catálogo Válvula Reguladora de Presión
- Anexo 9.** Catálogo Filtro
- Anexo 10.** Catálogo Reservorio Unidad Hidráulica
- Anexo 11.** Catálogo Breaker
- Anexo 12.** Catálogo Contactor y Relé
- Anexo 13.** Especificaciones Acero AISI H13
- Anexo 14.** Conductividad Térmica Materiales Refractarios
- Anexo 15.** Catálogo Alambre Nicrom
- Anexo 16.** Catálogo Perfil IPE
- Anexo 17.** Especificaciones Controlador PID
- Anexo 18.** Hojas de Procesos Matricería
- Anexo 19.** Manual de Operación, Seguridad y Mantenimiento Prensa Hidráulica y Hornos de Resistencia
- Anexo 20.** Planos Equipo de Recalcado
- Anexo 21.** Guías de Laboratorio Procesos de Manufactura II

NOMENCLATURA

K_f	Resistencia a la Deformación.
φ_h	Velocidad de Deformación
h_s	Longitud del espárrago [mm]
h_{tot}	Longitud total probeta [mm]
D_o	Diámetro inicial [mm]
H_o	Longitud de recalado o altura inicial [mm]
d_l	Diámetro de la cabeza (medio) [mm]
h_l	Altura media de recalado [mm]
h_k	Altura de la cabeza [mm]
D_{max}	Diámetro total [mm]
Δh	Diferencia teórica de altura [mm]
h_{kh}	Altura nuclear [mm]
h_g	Espesor de la rebaba [mm]
h_a	Recorrido de trabajo de recalado [mm]
V_o	Volumen de recalado [mm ³]
s	Relación de recalado
ϵ_h	Recalado
$\varphi_g = \varphi_h$	Grado de recalado
q	Relación de secciones
ϵ_m	Deformación media
ϵ_{max}	Deformación máxima
F_{id}	Fuerza de recalado forma sencilla

K_{wE}	Resistencia real a la deformación
μ	Coefficiente de rozamiento
r	Radio de la cabeza recalcada
h	Longitud del material a recalcar
$F_{m\acute{a}x}$	Fuerza máxima de recalcado
F_1	Fuerza salida del vástago
F_2	Fuerza retorno del vástago
p_s	Presión de servicio media
s_1	Sección pistón lado sin vástago [mm^2]
s_2	Sección pistón lado con vástago
ϕ_p	Diámetro del pistón
ϕ_v	Diámetro del vástago
p	Presión de servicio
Q	Caudal
v_1	Velocidad de salida del pistón
Q_r	Caudal requerido
η	Rendimiento volumétrico
t_v	Tiempo en salir el vástago
L	Carrera del cilindro hidráulico [mm]
P_b	Potencia de la bomba
η_v	Eficiencia volumétrica
η_m	Eficiencia mecánica
P_m	Potencia del motor
T_h	Temperatura en el interior del horno

T_a	Temperatura ambiente exterior
L_1, L_2, L_3	Espesor de la capa de aislamiento
h_i, h_e	Coefficiente de convección
k_1, k_2, k_3	Coefficientes de conducción
A	Área de las capas de aislamiento
Q_p	Pérdida de calor
E_a	Energía absorbida
M	Masa de la carga en kg
C_p	Calor específico de la carga en $\frac{Wh}{Kg K}$
ΔT_c	Incremento de la temperatura de la carga
A_r	Superficie de la carga para la radiación
A_c	Superficie de la carga para la convección
α_{rm}	Coefficiente por radiación en $\frac{W}{m^2K}$
α	Coefficiente de convección $\frac{W}{m^2K}$
T_h	Temperatura del horno °C
T_{co}	Temperatura inicial de la carga °C
δ_T	Diferencia admisible entre la temperatura de regulación del horno y temperatura final de la carga
P_{esp}	Potencia específica
Q_m	Potencia media requerida
V	Tensión
T_o	Temperatura máxima de operación
ρ_{re}	Resistividad eléctrica

C_t	Coeficiente de resistividad
p	Carga específica
R_{20}	Resistencia eléctrica
A_c	Superficie radiante de las resistencias
ϕ_{re}	Diámetro de la resistencia
L_{re}	Longitud de la resistencia
D_e	Diámetro de la espira
N	Número de espiras
L_{ec}	Longitud de las espiras cerradas
S_y	Límite de fluencia
σ_{max}	Esfuerzo máximo a flexión
h	Espesor de la soldadura
τ	Esfuerzo al cortante
M_{max}	Momento máximo
n	Factor de seguridad
T_a	Temperatura ambiente
T_f	Temperatura de la probeta
N_i	Número de granos interceptados
N_L	Números de granos por mm
G	Tamaño de grano
F_u	Fuerza última
S_u	Resistencia al corte
$\% \Delta S_u$	Porcentaje de variación de la resistencia

RESUMEN

Ante la necesidad de formar profesionales que apliquen el conocimiento científico técnico en las actividades de la industria, resulta de vital importancia la implementación de prácticas de laboratorio que ayuden al estudiante a comprender los procesos de conformación plástica de una manera didáctica. En el presente proyecto se diseñó y construyó un equipo semiautomático para recalcado en caliente, para el laboratorio de Procesos de Manufactura II de la Escuela Politécnica del Ejército. Al analizar el proceso de recalcado se determinó las condiciones de presión y temperatura que debía entregar el equipo para llevar a cabo la operación de recalcado. El desarrollo de este tema se complementó con el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de las piezas obtenidas. Como resultado se obtuvo un equipo capaz de ensanchar el extremo de probetas cilíndricas de metales no ferrosos, validando así los cálculos utilizados en la etapa de diseño.

Palabras clave:

- *conformación plástica*
- *recalcado en caliente*
- *propiedades mecánicas*
- *metales no ferrosos*
- *procesos de manufactura*

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN EL TRABAJO DE METALES

El trabajo de los procesos de deformación consiste en someter el metal a un esfuerzo suficiente para hacer que éste fluya plásticamente y tome la forma deseada. Los procesos de deformación volumétrica que refinan las formas originales, algunas veces mejoran las propiedades mecánicas y siempre adicionan un valor comercial al producto. Las formas iniciales incluyen barras, tochos cilíndricos, tochos rectangulares y planchas, así como otras formas similares elementales.

Los procesos de deformación volumétrica se realizan en operaciones de trabajo en frío, y caliente tanto por arriba como por debajo de la *temperatura de recristalización*.

1.1.1.1. Trabajo en Caliente

El trabajo en caliente ofrece varias ventajas: los esfuerzos de fluencia son bajos, de ahí que las fuerzas y requerimientos de potencia sean relativamente bajos, y se pueden deformar incluso grandes piezas de trabajo con equipos de tamaño razonable.

También existen desventajas. Se requiere de energía para calentar la pieza de trabajo hasta una temperatura elevada. La mayoría de los materiales se oxidan y los

óxidos de algunos metales (por ejemplo, cascarilla sobre el acero) pueden afectar el acabado superficial.

1.1.1.2. Trabajo en Frío

El trabajo en frío tiene varias ventajas. En ausencia de enfriamiento y oxidación se pueden obtener tolerancias más cerradas, un mejor acabado superficial y también paredes más delgadas. Las propiedades finales de la pieza de trabajo pueden controlarse con exactitud y, si se desea, retener la resistencia elevada obtenida durante el trabajo en frío; asimismo si se necesita una ductilidad elevada, es posible controlar el tamaño del grano para aprovechar el recocido. La lubricación es, en general, un poco más fácil.

También existen desventajas. Para la mayoría de los materiales tecnológicos, los esfuerzos de la fluencia son elevados, de ahí que también lo sean las presiones en la herramienta, las fuerzas de deformación y los requisitos de potencia. La ductilidad de muchos materiales es limitada, lo que restringe la complejidad de las formas que se pueden producir fácilmente.

1.1.2. FORJADO DE METALES

El forjado es un proceso en el que la pieza de trabajo se deforma plásticamente mediante la aplicación de fuerzas de compresión a través de matrices, dados o herramientas.

La mayoría de las forjas requieren una serie de matrices y equipo como prensa y martillo mecánico de forja.

Los productos más típicos que se pueden obtener a través del forjado son: tornillos, remaches, ejes de turbinas, engranajes, bielas, piezas estructurales para maquinaria, vías férreas, etc.

Para que las piezas forjadas tengan buena resistencia y tenacidad se puede controlar el flujo del metal y la estructura del grano, así se pueden usar en aplicaciones donde se requieran grandes resistencias.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el Departamento de Energía y Mecánica se imparte la asignatura de Procesos de Manufactura II, esta asignatura no posee equipamiento para aplicar los distintos procesos de deformación volumétrica tales como: el trefilado, recalado, extrusión, etc. Ante esta necesidad El Departamento de Energía y Mecánica busca implementar prácticas de laboratorio de Procesos de Manufactura II, para ello impulsa distintos proyectos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

Construir un equipo semiautomático de recalado en caliente para el Laboratorio de Procesos de Manufactura II.

1.3.2. ESPECÍFICOS

- Analizar si las aleaciones de metales no ferrosos disponibles en el mercado son útiles para el proceso de recalcado.
- Comprobar si existen alteraciones en las propiedades mecánicas luego de aplicar el proceso de recalcado en caliente.
- Generar guías de laboratorio para la aplicación de los conceptos de recalcado y materias afines a este proceso.

1.4. ALCANCE

Con este equipo se pretende realizar la práctica de recalcado en caliente que consiste en ensanchar el extremo de una barra que ha alcanzado la temperatura necesaria para que esta se deforme plásticamente tomando la forma proporcionada por la matriz. Todo este proceso debe realizarse de una manera semiautomática, facilitando el uso del equipo por parte del estudiante.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Uno de los objetivos institucionales de la Escuela Politécnica del Ejército es formar profesionales que contribuyan al desarrollo del país mediante la aplicación del conocimiento científico y técnico en las actividades de la Industria y los Sectores Productivos del país, por ello es de vital importancia implementar prácticas de laboratorio en las distintas asignaturas del Departamento de Energía y Mecánica.

Este equipo ayudará a comprender de manera didáctica los conceptos del proceso de forja por recalcado (cabeceado) mediante la realización de prácticas de laboratorio para los estudiantes de Procesos de Manufactura II. Además el estudiante de esta

asignatura podrá proponer un diseño de matriz que se encuentre dentro de los parámetros establecidos por el equipo, y si cumple con esto podrá ejecutarse una nueva forma para el proceso de recalado.

El recalado se usa ampliamente en la industria de los sujetadores para formar cabezas de clavos, pernos y productos similares de ferretería, ejes de turbina, engranajes, bielas, piezas estructurales para maquinaria, razón por la cual es de suma importancia que los estudiantes realicen prácticas de este tipo de procesos para así comprender de mejor manera todas las variables que intervienen en este proceso de fabricación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. FORJA EN DADO CERRADO

En el forjado por matriz cerrada la pieza de trabajo se atrapa por completo en la matriz y no se genera rebaba. De esta forma, el forjado es más económico, pero se deben controlar muy cuidadosamente el diseño de la matriz y las variables del proceso. Al final de la carrera, la cavidad está llena en su totalidad con un sólido incompresible y las presiones de la matriz se elevan de manera pronunciada (Schey, 2000).

Tabla 2.1 Características generales de los procesos de forja

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Matriz abierta	Matrices simples y poco costosas; amplia gama de tamaño de partes; buenas características de resistencia; por lo general para cantidades pequeñas.	Limitado a formas simples, es difícil mantener tolerancias cerradas; es necesario maquinado para dar forma final; velocidad de producción baja; utilización relativamente deficiente del material; requiere alto grado de habilidad.
Matriz cerrada	Uso de material relativamente adecuado; por lo general con mejores propiedades que los forjados de matriz abierta; buena precisión dimensional; altas velocidades de producción; buena reproducibilidad.	Alto costo de la matriz, no económico para cantidades pequeñas; con frecuencia es necesario el maquinado.
De aproximación	Costos bajos de matriz; altas velocidades de producción.	Es necesario maquinado para dar acabado final; partes con almas gruesas y filetes grandes.
Convencional	Requiere mucho menos maquinado que el tipo de aproximación; utilización adecuada del material.	Costo de la matriz más elevada que el del tipo de aproximación.
De precisión	Tolerancias dimensionales cerradas; generalmente no es necesario el maquinado; muy buena utilización del material.	Fuerzas elevadas de forjado; matrices intrincadas y previsiones para extraer la forja de las matrices.

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

Por lo general, una operación de forjado en caliente comprende la siguiente secuencia de pasos (Kalpakjian, 2008):

1. Preparar una pieza de trabajo, tocho o preforma mediante proceso como cizallado (recorte), aserrado o tronzado. De ser necesario, limpiar las superficies por medios como la limpieza con chorro de granalla.
2. Para forjado en caliente, calentar la pieza de trabajo en un horno apropiado y después, de ser necesario eliminar la cascarilla tras el calentamiento con un cepillo de alambre, chorro de agua, vapor o raspado.
3. Para forjado en caliente precalentar y lubricar las matrices; para forjado en frío, lubricar la matriz.
4. Forjar el tocho en las matrices apropiadas en la secuencia adecuada. De ser necesario eliminar cualquier exceso de material (como las rebabas) por medio de recortado, maquinado o esmerilado.
5. Limpiar la forja, verificar sus dimensiones (de ser necesario) maquinaarla hasta obtener las dimensiones finales y las tolerancias especificadas.
6. Efectuar operaciones adicionales, como enderezado y tratamiento térmico (para mejorar las propiedades mecánicas). Además, realizar las operaciones de acabado que sean necesarias, como maquinado y rectificado.

2.2. RECALCADO Y ENCABEZAMIENTO

Se llama recalcado de cabezas, para caracterizarlo dentro de los múltiples tipos de procesos que se abarcan bajo el nombre de recalcado, o el particular de recalcado parcial a aquel en el cual el fin perseguido es la acumulación de material con una forma definida en o cerca de un extremo de un semiproducto.

Esta acumulación es siempre producida por una fuerza que se ejerce a lo largo del eje principal de la pieza. En la figura 2.1 vemos varios ejemplos de productos en los cuales se emplean recalco de cabezas (Gallardo, 1996).

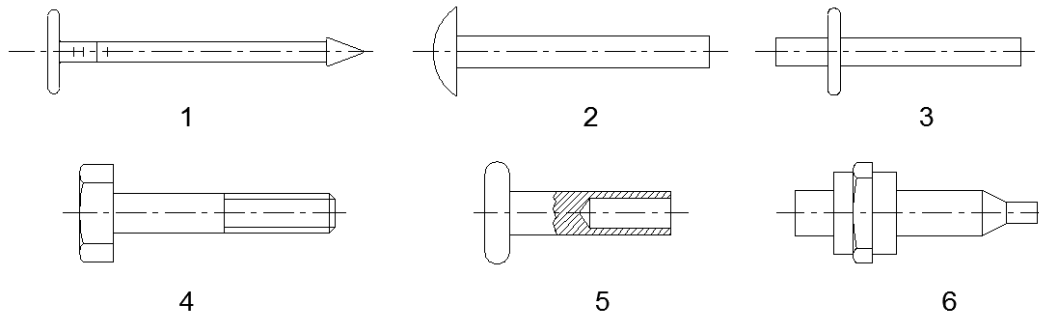


Figura 2.1 Ejemplos de piezas con recalcos de cabezas¹

El proceso se combina en muchos casos con otros varios para la obtención de piezas terminadas, siendo entre ellos los más comunes el laminado de roscas y procesos de corte y extracción.

Así, por ejemplo, la fabricación de la pieza (4) de la figura 2.1 (tornillo) implica la elaboración de una rosca, generalmente laminada con posterioridad al recalco.

Hay límites para la cantidad de deformación que se pueden alcanzar en el recalco, definidos usualmente como la longitud máxima del material a forjar. La longitud máxima que se puede recalcar en un golpe es tres veces el diámetro de la barra inicial. De otra manera, el material se dobla en lugar de comprimirse para llenar adecuadamente la matriz.

¹ Fuente: (Gallardo, 1996)

2.2.1. DIVISIÓN

La forma de división más común del proceso de recalado de cabezas es aquella basada en la temperatura a que se realiza. Se distingue fundamentalmente entre recalado en frío y en caliente, según esta temperatura esté por debajo o por encima de la temperatura de recristalización del material (Gallardo, 1996).

2.2.1.1. Recalado de cabezas en caliente

Las características del proceso de recalado de cabezas en caliente son las inherentes a todos los procesos de conformación a altas temperaturas, a saber: se requieren fuerzas menores (máquinas más pequeñas) pero, como contraparte, son imprescindibles instalaciones de calentamiento, y las tolerancias de fabricación son considerablemente mayores.

El proceso en caliente se emplea para piezas de diámetros mayores a 12mm y en casi todos los casos de semiproductos mayores de 20 mm, realizándose tanto sobre máquinas especializadas como sobre convencionales. Entre estas últimas, prensas de forja de cigüeñal y de husillo.

2.2.1.2. Recalado de cabezas en frío

El recalado de cabezas en frío es la forma más empleada, llegando hasta diámetros de los 30mm.

Como características del encabezado en frío pueden citarse todas las inherentes a los procesos de conformación a baja temperatura, es decir: mayor exactitud de las piezas, mejora de las propiedades mecánicas del material y alta productividad.

Como desventajas se pueden citar: el empleo de máquinas más potentes y, normalmente, el empleo de semiproductos más caros, en forma de barras o alambre calibrados (estirado en frío) y recocidos.

2.2.2. TIPOS DE MÁQUINAS PARA EL RECALCADO DE CABEZAS

Las máquinas que realizan los procesos de recalco de cabezas pueden ser clasificadas desde diferentes puntos de vista, siendo los más comunes (Gallardo, 1996):

a.) De acuerdo con el tipo de matriz:

- Máquinas de matriz partida o abierta y
- Máquinas de matriz entera.

b.) De acuerdo con el número de pasos necesarios para fabricar una pieza:

- Simples o de un golpe,
- De dos golpes y
- De tres golpes.

c.) De acuerdo con la cantidad de matrices (posición de la pieza durante la fabricación):

- De matriz única y
- Transferidoras.

Las *máquinas de matriz partida* son aquellas en las cuales la matriz está formada por dos o más elementos que se montan independientemente con movimiento relativo entre ellos y que al unirse determinan la cavidad necesaria para el conformado de la pieza, aplicando al mismo tiempo una fuerza que sujeta el vástago del elemento que se conforma durante la operación.

Las *máquinas de matriz cerrada* las herramientas son piezas únicas, cilíndricas, en las cuales se introduce el semiproducto por un extremo y resulta conformado luego de apoyarse en un botador encargado de su expulsión una vez concluido el ciclo de elaboración. Este tipo de máquina es el más común y difundido para la fabricación de tornillos y remaches.

Como *máquinas simples o de un solo golpe* se entienden aquellas en las cuales se elabora una pieza por carrera de la máquina y empleando sólo una pieza por carrera de la máquina y empleando sólo una matriz y un punzón. Son sólo empleadas en la fabricación de piezas sencillas con cabezas poco voluminosas.

Las *máquinas recaladoras de dos o más golpes* son aquellas en las cuales es necesaria la presencia de más de un punzón para la elaboración total de la pieza.

Las *máquinas de matriz única* son aquellas en las cuales el semiproducto sufre todos los pasos necesarios para formar su cabeza en una sola matriz, aun cuando se emplee más de un punzón, caso en el cual los mismos ocupan secuencialmente la posición de trabajo para golpear al semiproducto en la matriz única.

En las *máquinas transferidoras* el semiproducto va recorriendo durante su formación varias posiciones de trabajo formadas por matrices y punzones independientes, y cuyo número puede llegar a ser hasta del orden de siete en las más complejas. Las máquinas de este tipo se emplean habitualmente cuando son necesarias tres o más operaciones, del total de las cuales normalmente algunas no son de recalcado. Así, por ejemplo, la pieza (5) de la figura 2.1 ha sido conformada en una máquina de cuatro posiciones de las cuales dos son de extrusión y la pieza (6) de

la misma figura en una de cinco posiciones que incluye una de extrusión y una de recortado (del hexágono).

Las máquinas transferidoras son muy empleadas, por ejemplo, en la fabricación de tuercas de frío, combinando pasos de recalado, extrusión y corte.

2.3. FUNDAMENTOS DEL RECALCADO

En la conformación plástica (Billigmann, 2002), el comportamiento de los materiales metálicos depende en gran medida de la resistencia a la deformación (K_f).

En la conformación en caliente la resistencia a la deformación disminuye al subir la temperatura y aumenta con deformaciones mayores, sin embargo la zona de endurecimiento está limitada, de modo que en el caso de deformaciones mayores ya no aumenta la resistencia a la deformación.

La velocidad de deformación (φ_h) tiene un papel decisivo en la conformación en caliente, influye sobre la resistencia que el material opone a la conformación. Este tema y todos los ítems que abarca fueron tomados del libro Prensado y Estampado a Máquina de J. Billigmann, pág. 73.

La velocidad de deformación se define como:

$$\varphi_h = \frac{v_m}{h} \frac{mm}{s*mm} = s^{-1} \quad [2.1]$$

Donde v_m es la velocidad de la herramienta y h la altura de la pieza, figura 2.2, o sea la velocidad a la que se aproxima dos secciones separadas la distancia l .

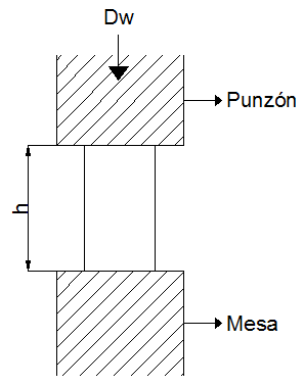


Figura 2.2 Esquema explicativo de la velocidad de deformación $(\dot{\phi}_h)^2$

La velocidad de deformación en sí no sólo depende del número de carreras o bien de la velocidad de trabajo de la máquina sino también del recorrido del punzón. Cuando más corto sea este, tanto más rápidamente puede trabajar la maquinaria sin variación de la velocidad de conformación.

2.3.1. RELACIONES DE DEFORMACIÓN EN EL RECALCADO

Para la fabricación se emplean trozos de material que además de la longitud deseada del espárrago h_s , contiene el volumen de la cabeza a recalcar, de lo cual se obtiene la longitud total h_{tot} del trozo del material (Billigmann, 2002).

Para el proceso de recalcado en si tienen importancia directa las siguientes magnitudes:

- Diámetro inicial d_o [mm]
- Longitud de recalcado o altura inicial h_o [mm]
- Diámetro de la cabeza (medio) d_l [mm]
- Altura media de recalcado h_l [mm]
- Altura de la cabeza h_k [mm]

² Fuente: (Billigmann, 2002)

- Diámetro total d_{max} [mm]
- Diferencia teórica de altura Δh [mm]
- Relación de la diferencia de alturas [mm]
- Altura nuclear h_{kh} [mm]:
- Espesor de la rebaba h_g [mm]
- Volumen de recaldado V_0 [mm³]
- Relación de recaldado s
- Recaldado ϵ_h [%]
- Grado de Recaldado φ_h
- Relación de secciones q
- Relación de dimensiones finales $\frac{d_{max}}{h_1}$
- Deformación media relativa ϵ_m [%]
- Deformación máxima relativa ϵ_{max} [%]
- Deformación media logarítmica φ_m
- Deformación máxima logarítmica φ_{max}

A continuación se explican las magnitudes descritas:

Por **altura nuclear** h_{kh} en la cabeza acabada se entiende una parte determinada del volumen de recaldado con el diámetro d_o , que teóricamente no forma parte de la conformación (desplazamiento del material).

El **espesor de la rebaba** h_g en caso de prensar con rebaba.

El **diámetro inicial** d_o es el diámetro del material y en general también el diámetro del esparrago de la pieza a recalcar, si se parte de un material de sección circular. Si el material tiene un perfil distinto, d_o significa el diámetro del material

cuya sección corresponda a la del perfil. Mediante el diámetro d_o se obtiene la sección inicial:

$$A_0 = \frac{\pi d_o^2}{4} \quad [mm^2] \quad [2.2]$$

La **longitud de recalcado** h_o es la longitud del material, que tiene el mismo volumen junto con la cabeza a recalcar. En la conformación en caliente esta longitud corresponde al valor mínimo de la longitud de calentamiento del trozo del material.

El diámetro de la cabeza d_1 es el diámetro medio de la cabeza recalcada. En caso de cabezas no redondas, por ejemplo cuadradas, éste corresponde a la dimensiones a x b, que dan la misma sección que d_1 . Mediante el diámetro de la cabeza se obtiene la sección de la cabeza:

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad [mm^2] \quad [2.3]$$

La **altura de cabeza** h_k es la altura total de la cabeza acabada, incluida el espesor de la rebaba h_g .

El **recorrido de trabajo de recalcado** h_a , es el recorrido que ha de hacer la herramienta superior respecto a la herramienta inferior y con ello contra la pieza para realizar el recalcado.

El **diámetro total** $d_{máx}$, es el diámetro máximo incluida la rebaba, que se produce en la conformación. Con él se obtiene la sección total de la cabeza recalcada:

$$A_{max} = \frac{\pi d_{max}^2}{4} \quad [mm^2] \quad [2.4]$$

Si se calcula el volumen invariable de recalcado a base de este diámetro, se obtiene una **altura media de recalcado** h_1 mediante:

$$V_o = \frac{\pi}{4} d_{max}^2 h_1 \quad [2.5]$$

Con ello se obtiene la *diferencia teórica de altura* $\Delta h = h_o - h_1$. La *relación de la diferencia de alturas* $\Delta h/h_a$ se halla en general entre 0,8 y 1,6.

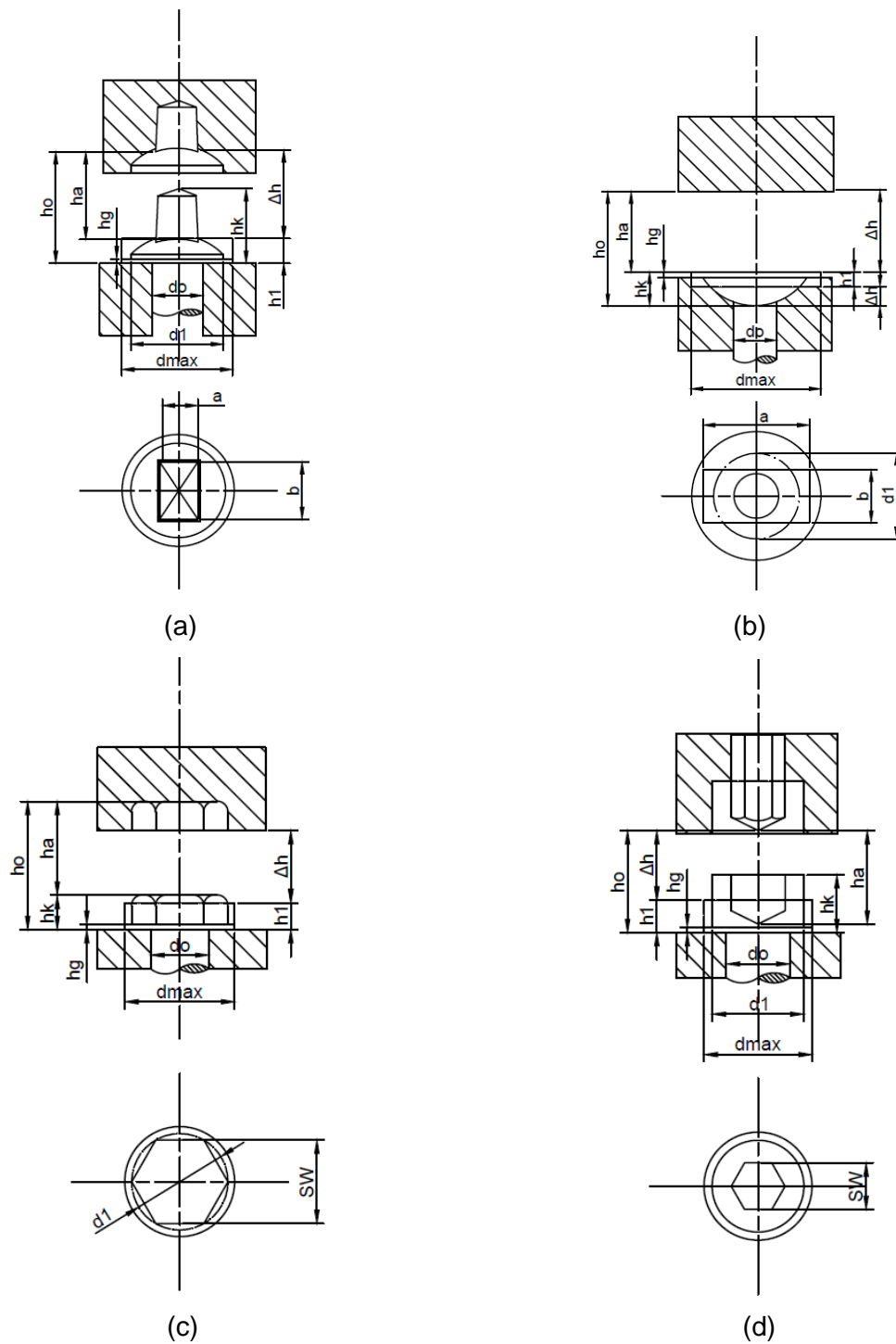


Figura 2.3 Dimensiones de deformación de formas de recalcado³

³ Fuente: (Billigmann, 2002)

El **volumen de recalado** V_o es la cantidad de material que se conforma. Se determina mediante las dimensiones del material de partida:

$$V_o = \frac{\pi d_o^2}{4} h_o \quad [mm^3] \quad [2.6]$$

Y, por otra parte, mediante las dimensiones de la cabeza acabada:

$$V_o = \frac{\pi d_{max}^2}{4} h_1 \quad [mm^3] \quad [2.7]$$

Este volumen de recalado determina decisivamente la energía necesaria para la conformación. La conformación se caracteriza además por **la relación de recalado** s :

$$s = \frac{h_o}{d_o} \quad [2.8]$$

Esta relación es de segunda importancia en la determinación de la fuerza y trabajo necesarios, sin embargo, es decisiva de la realización perfecta del recalado, lo que se tratará más adelante.

La magnitud de la conformación (**Recalado** ϵ_h) a realizar en la dirección del recalado viene dada por la variación relativa de alturas.

$$\epsilon_h = \frac{\Delta h}{h_o} = 1 - \frac{h_1}{h_o} \quad [2.9]$$

Esta magnitud multiplicándola por 100 se expresa casi siempre en %.

De manera más sencilla se calcula mediante la **deformación absoluta logarítmica** φ_g que se denomina **grado de recalado** φ_h :

$$\varphi_h = \varphi_g = \ln \frac{h_o}{h_1} = \ln \frac{h_1}{h_o} = \ln 1 - \epsilon_h \quad [2.10]$$

Por lo tanto el recalado y el grado de recalado están relacionadas, tal como indica la figura 2.4.

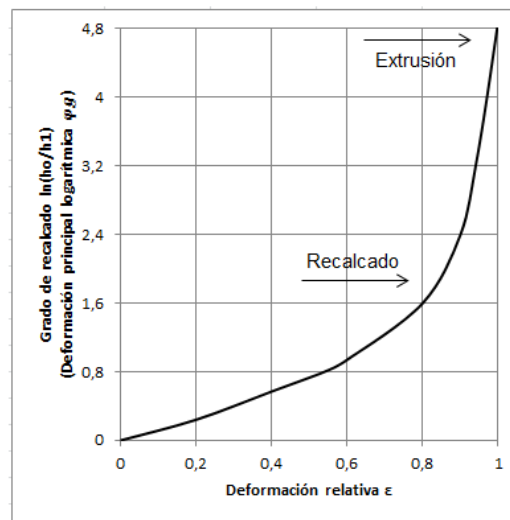


Figura 2.4 Relación entre el recalado y el grado de recalado.⁴

El recalado y el grado de recalado facilitan una medida para la deformación en la dirección del recalado. Pero importante es también la deformación en sentido transversal, caracterizada por la *relación de secciones* q .

$$q = \frac{A_{max}}{A_0} = \frac{d_{max}^2}{d_0^2} \quad [2.11]$$

En general, al avanzar el recalado ϵ_h , junto con q aumenta también la relación d/h del diámetro respecto a la altura de la cabeza que se va formando y alcanza finalmente el valor máximo (*relación de dimensiones finales*)

$$\frac{d_{max}}{h_1} = \frac{1}{\frac{h_0/d_0}{1-\epsilon_h} \frac{1}{1-\epsilon_h}} \quad [2.12]$$

En la figura 2-5 se indica la relación de estas magnitudes en un sistema logarítmico doble en forma de nomograma. Es de observar además, que en $\epsilon_h = 0,8$

⁴ Fuente: (Billigmann, 2002)

aproximadamente se da el límite de la conformabilidad. En caso de una relación de recalado de 2,5 se aproxima al límite de pandeo del material, lo que puede influir desfavorablemente sobre la realización perfecta del recalado.

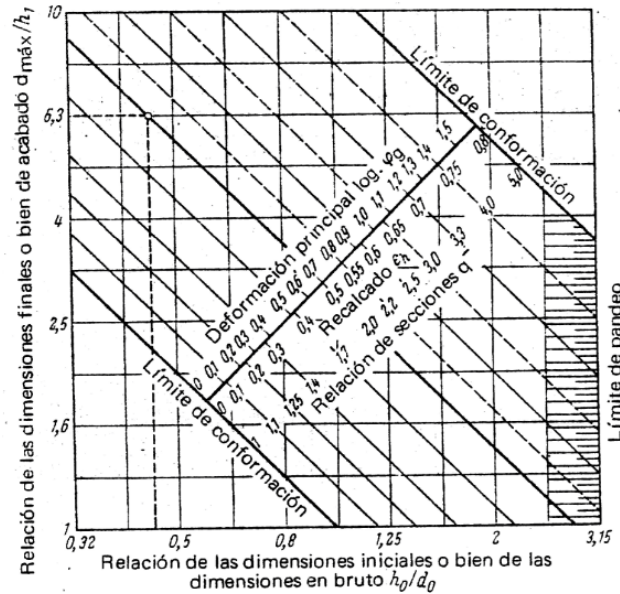


Figura 2.5 Relación entre la relación de recalado, el recalado o bien la deformación logarítmica o bien relación de secciones y relación de las dimensiones de acabado⁵.

Para explicar el proceso de recalado es también importante *la deformación relativa y la media y máxima logarítmica*. La *deformación media* ϵ_m se obtiene comparando la sección media de la cabeza con la sección inicial.

$$\epsilon_m = \frac{A_1 - A_0}{A_1} = 1 - \frac{d_0^2}{d_1^2} \quad [2.13]$$

Del mismo modo se obtiene la *deformación máxima* ϵ_{max} comparando la sección máxima de la cabeza con la sección inicial:

$$\epsilon_{max} = \frac{A_{max} - A_0}{A_{max}} = 1 - \frac{d_0^2}{d_{max}^2} \quad [2.14]$$

⁵ Fuente: (Billigmann, 2002)

Estos valores, también se expresan en % multiplicándolos por 100. La representación logarítmica en el caso de la deformación media es:

$$\varphi_m = \ln \frac{d_1^2}{d_0^2} \quad [2.15]$$

Y en caso de la deformación máxima:

$$\varphi_{max} = \ln \frac{d_{max}^2}{d_0^2} \quad [2.16]$$

De estas consideraciones se deduce que la deformación, según su magnitud, no es la misma en todas las partes de la cabeza recalada.

La deformación media es un valor medio a lo largo de todo el volumen de la cabeza, mientras que la deformación máxima se presenta solamente en alguna zona parcial muy limitada de la cabeza.

La deformación media indica hasta qué punto está solicitado el material en su totalidad por la conformación. Si el material soporta la deformación media deseada sin daños, es decir, sin grietas por cizallamiento, depende de la capacidad de deformación del material, o sea en gran parte de su estado de recocido. Ya que la deformación máxima se presenta solamente en zonas muy limitadas, esta no solicita al material en su totalidad.

2.3.2. FUERZA NECESARIA PARA EL RECALCADO

La fórmula para el cálculo de la fuerza en su forma más sencilla (Billigmann, 2002):

$$F_{id} = Ak_f$$

Donde A significa la sección en mm^2 en la pieza recalada, k_f la **resistencia ideal a la deformación**.

La resistencia a la deformación en la conformación en caliente depende principalmente de la temperatura de conformación. Para la práctica las diferencias de la resistencia ideal a la deformación de diferentes materiales no son muy grandes en la conformación en caliente, si se eligen temperaturas de conformación adecuadas.

Ya que esta fórmula sólo es válida para una conformación sin pérdidas y no tiene en cuenta las influencias de las pérdidas internas debidas a los desplazamientos de material y las pérdidas externas debidas al rozamiento existente entre la pieza y la herramienta, con ello no se obtendrá en la práctica los datos deseados sobre la presión final que realmente se necesita en las instalaciones a utilizar, por este motivo en la fórmula indica, en lugar de la resistencia ideal a la deformación se introduce la **resistencia real a la deformación** (k_w).

La resistencia ideal a la deformación se puede transformar a la resistencia real a la deformación en el recalado así:

$$k_w = k_f \left(1 + \frac{2}{3} \mu \frac{r}{h} \right) \quad [2.17]$$

Donde μ es el *coeficiente de rozamiento*, r *radio de la cabeza recalada* circular y h la *longitud del material a recalcar*.

En función del coeficiente de fricción μ , de la relación de recalado del material de partida s y de la altura de conformación ϵ , la resistencia real a la deformación puede expresarse también la siguiente ecuación:

$$k_w = k_f \left[1 + 0,333 \frac{\mu}{s} \sqrt{\frac{100}{100-\epsilon}} \right]^3 \quad [2.18]$$

En la conformación en caliente es prácticamente admisible un coeficiente de fricción $\mu = 0,5$.

Para determinar la *fuerza máxima de recalado* $F_{m\acute{a}x}$ al final del proceso de recalado es suficiente muchas veces el cálculo aproximado:

$$F_{m\acute{a}x} = A_E K_{wE} \quad [2.19]$$

En donde A_E a de calcularse a partir de la forma final de la pieza y la resistencia real a la deformación K_{wE} a de deducirse de la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores orientativos para la resistencia real a la deformación K_{we} en el recalcado

Material	Recalcado sin estampa K_{we} [Kp/mm ²]					Recalcado en estampa K_{we} [Kp/mm ²]				
	φ_g	20° C	600° C	900° C	1200° C	φ_g	20° C	600° C	900° C	1200° C
Acero al carbono hasta 0,1% C	0,6	50	40	10	8	0,4	100	80	15	10

	1,0	70	65	35	25	0,8	160	130	50	30
Acero al carbono hasta 0,3% C. Acero de cementación	0,6	80	70	12	10	0,4	160	130	15	15

	1,0	100	90	40	30	0,8	200	170	60	50
Acero al carbono 0,5% C Acero aleado	0,6	100	80	10	12	0,4	180	150	20	15

	1,0	150	130	35	40	0,8	250	210	80	60
Aluminio	0,6	10	500...							
	...	...	550° C							
	1,0	25	1...3							
Aleaciones de aluminio	0,6	20	400...							
	...	...	500° C							
	1,0	60	2...8							
Cobre	0,6	25	700...							
	...	...	800° C							
	1,0	45	3...5							
Aleaciones de cobre	0,6	60	700...							
	...	...	800° C							
	1,0	85	1...5							

Fuente: (Billigmann, 2002)

2.4. PRENSAS

La prensa es una máquina herramienta que tiene como finalidad lograr la deformación permanente o incluso cortar un determinado material, mediante la aplicación de una carga. Son empleadas prácticamente en todas las industrias, y utilizadas para actuar sobre distintos materiales ya sea en frío o en caliente, en cualquier operación que se requiera una fuerte presión, por ejemplo: forjar, estampar, extruir, laminar, etc.

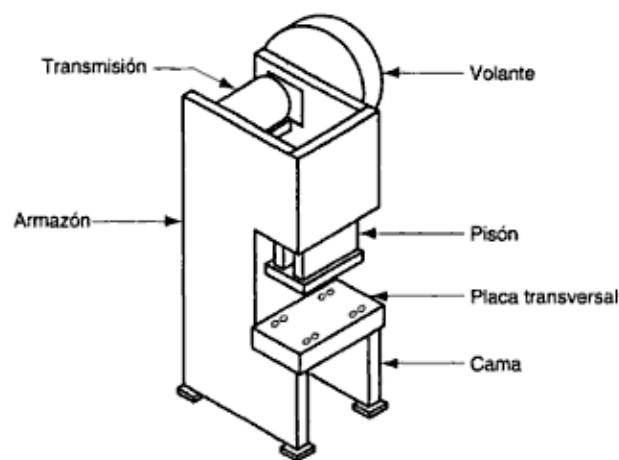


Figura 2.6 Componentes de una prensa troqueladora típica por transmisión mecánica⁶

Su gran variedad permite numerosos sistemas de clasificación, esta puede estar en relación a la fuente de energía, ya sea operada manualmente o con potencia, por el tipo de ariete, la forma del bastidor, etc., como se indican en el cuadro tabla 2.3, en el cual constan una variedad de máquinas.

⁶ Fuente: (Groover, 2007)

Tabla 2.3 Tipos de prensa

Motivo	Tipos	
Fuente de energía (El accionamiento)	-Manual -Vapor, gas, neumática -Potencia	-Hidráulica -Mecánica
Ariete (Elementos activos)	-Vertical de simple efecto -Vertical de doble efecto	-En cuatro correderas -De configuración especial
Diseño del bastidor	-De banco -Inclinable -De escote -De puente	-De costados rectos -Yunque -Columna
Métodos de aplicación al ariete	-Manivela -Leva -Excéntrica -Tornillo de potencia -Cremallera y piñón	-Junta articulada -Hidráulica -Palanca acodillada -Neumática
Propósito de la prensa	-Doblado -Punzonado -Extruido -Empalmado -Enderezado -Forzado	-Acuñado -De transferencia -Roedora -Estirado -Revólver -Forja

Fuente: (EPN, 2006)

Debido a la amplia diversidad de tipos de prensas es que, por lo general se las divide en dos grandes grupos: Prensas Mecánicas, y Prensas Hidráulicas.

Existe una gran variedad de máquinas para forjado con una gama de características de capacidad (fuerza en toneladas), velocidades y velocidad-carreras (tabla 2.4).

Tabla 2.4 Intervalos característicos de velocidades del equipo de forjado

Intervalos característicos de velocidades del equipo de forjado	
Equipo	m/s
Prensa hidráulica	0.01 - 0.30
Prensa mecánica	0.06 - 1.5
Prensa de tornillo	0.6 - 1.2
Martinete de caída por gravedad	3.6 - 4.8
Martinete de caída mecánica	3.0 - 9.0
Contramartillo	4.5 - 9.0

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

2.4.1. PRENSAS MECÁNICAS

Estas prensas son básicamente de tipo manivela o excéntrica (ver la fig. 2.7). La velocidad varía desde un máximo en el centro del recorrido, hasta cero en su parte inferior, por lo que son de carrera limitada. La energía en una prensa mecánica se genera con un gran volantín accionado por un motor eléctrico. Un embrague acopla al volantín en un eje excéntrico. Una biela traduce el movimiento giratorio en movimiento lineal alternativo (Kalpakjian, 2008).

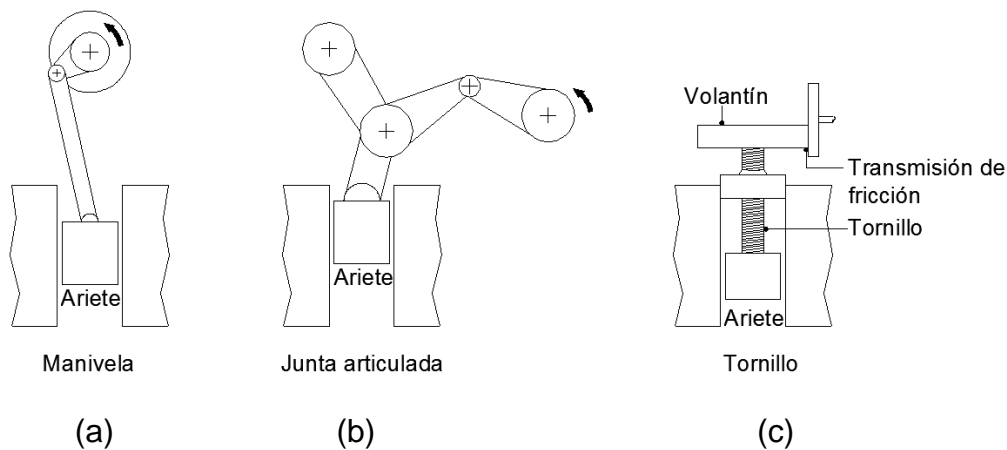


Figura 2.7 Esquema de los principios de diversas máquinas de forjado. (a) Prensa mecánica con accionamiento excéntrico. (b) Prensa de junta articulada. (c) Prensa⁷

Las prensas mecánicas tienen altas velocidades de producción, son fáciles de automatizar y requieren menos habilidad por parte del operador. Las capacidades de la prensa van de 2.7 a 107 MN (300 a 1200 Toneladas cortas). Las prensas mecánicas son preferibles para el forjado en partes de alta precisión.

Los recaladores horizontales para trabajo en caliente y en frío y los cabeceadores fríos para el trabajo en frío componen una clase especial de prensas. Para los cabeceadores fríos el material se alimenta mediante rodillos posicionadores de

⁷ Fuente: (Kalpakjian, 2008)

agarre. El extremo de la barra o del alambre se deforma en pasos sucesivos que varían desde el recalcado simple hasta la operación más compleja combinada de forjado-extrusión. Los movimientos auxiliares se sincronizan con el del ariete principal y se emplean para abrir y cerrar las matrices, accionar punzones y transferir la pieza de trabajo de una cavidad de la matriz a otra. El material de la pieza de trabajo se corta de la barra o del alambre ya sea al inicio o al final de la secuencia. La construcción y mecanización de estas máquinas con frecuencia son muy ingeniosas, pero su rapidez de producción es difícil de igualar con otras técnicas.

2.4.2. PRENSAS HIDRÁULICAS

Las prensas hidráulicas funcionan a velocidades constantes y son de carga limitada. Una prensa hidráulica se detiene si la carga requerida excede su capacidad. Se pueden transmitir grandes cantidades de energía a una pieza de trabajo por medio de una carga constante a través de un recorrido, cuya velocidad se puede controlar. En comparación con las prensas mecánicas, las prensas hidráulicas son más lentas y tienen costos iniciales más altos, pero requieren menor mantenimiento (Kalpakjian, 2008).

Por lo general una prensa hidráulica consiste en un bastidor marco de forja con 2 o 4 columnas, pistones, cilindros, arietes, y bombas hidráulicas accionadas por motores eléctricos. Las capacidades de prensado van de 125 MN (14000 Toneladas cortas) para forjado de matriz abierta, hasta 450 MN (50000 Toneladas cortas).

Las prensas hidráulicas se utilizan tanto para dado abierto como para dado cerrado en el forjado. El pistón de una prensa hidráulica es accionado por cilindros hidráulicos, que son parte de un sistema de alta presión hidráulica o

hidroneumática. Después de una velocidad de aproximación rápida, el pistón (con la matriz superior adjunta) se mueve a una velocidad lenta, mientras que ejercen una fuerza de compresión sobre la pieza de trabajo. La velocidad de presión puede ser controlada con precisión para permitir el control de las velocidades de flujo del metal, lo que es particularmente ventajoso en la producción de tolerancias cerradas de forjado. Algunas prensas están equipadas con un circuito de control hidráulico diseñado específicamente para la forja de precisión.

2.4.2.1. Ventajas y limitaciones

Las Prensas hidráulicas son esencialmente máquinas de carga restringida, es decir, su capacidad para llevar a cabo una operación de conformación está limitada principalmente por la carga máxima disponible. Las siguientes ventajas de las prensas hidráulicas son (ASM, 2005):

- En impulsión directa de prensas hidráulicas, la carga máxima de la prensa está disponible en cualquier momento durante la carrera del pistón. En el acumulador de prensas con accionamiento, la carga disponible disminuye ligeramente en función de la longitud de la carrera y las características de desplazamiento de carga del proceso de conformación.
- Debido a que la carga máxima se encuentra disponible durante toda la carrera, las energías relativamente grandes están disponibles para la deformación. Esta es la razón por lo que la prensa hidráulica es ideal para las operaciones de conformado como la extrusión que requieren una carga casi constante durante un largo recorrido.
- Dentro de la capacidad de una prensa hidráulica, la carga máxima puede limitarse a proteger el utillaje. No es posible superar la carga conjunta porque

una válvula de liberación de presión limita la presión de fluido que actúa sobre el pistón.

- Dentro de los límites de la máquina, la velocidad del pistón puede ser variado a voluntad continuamente durante el recorrido completo. Los sistemas adecuados de control puede regular la velocidad del pistón con respecto a la presión de conformación o la temperatura del producto.
- La presión puede ser cambiado según se desee en cualquier punto de la carrera mediante el ajuste de la válvula de control de presión.
- La velocidad de deformación puede ser controlada o variada durante la carrera si es necesario. Esto es especialmente importante cuando se forja metales que son susceptibles a romperse a velocidades altas de deformación.
- Cuando la excesiva transferencia de calor de la pieza de trabajo en caliente a los troqueles no es un problema o pueden ser eliminados, la acción suave de aplastamiento de una prensa hidráulico resulta en menores costos de mantenimiento y el aumento de la vida del troquel debido al menor choque en comparación con otros tipos equipos de forja.

Algunas de las desventajas de las prensas hidráulicas son:

- El costo inicial de una prensa hidráulica puede ser mayor que el de una prensa mecánica equivalente, especialmente en rangos de tonelajes inferiores.
- La acción de una prensa hidráulica es más lento que el de una prensa mecánica.

2.4.2.2. Elementos de las instalaciones hidráulicas

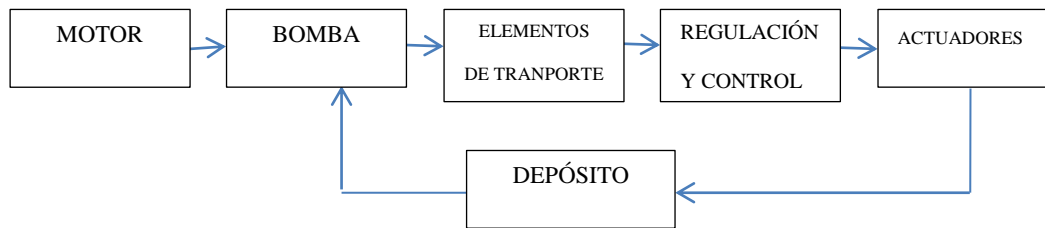


Figura 2.8 Diagrama de las instalaciones hidráulicas⁸

2.4.2.2.1. Bombas

Proporcionan una presión y caudal adecuado del fluido a la instalación.

Datos necesarios de las bombas:

- Caudal que proporciona.
- Presión de trabajo.

Tipos de bombas:

- Bomba de engranajes
- Bombas de paletas
- Bombas combinadas
- Bombas de pistones

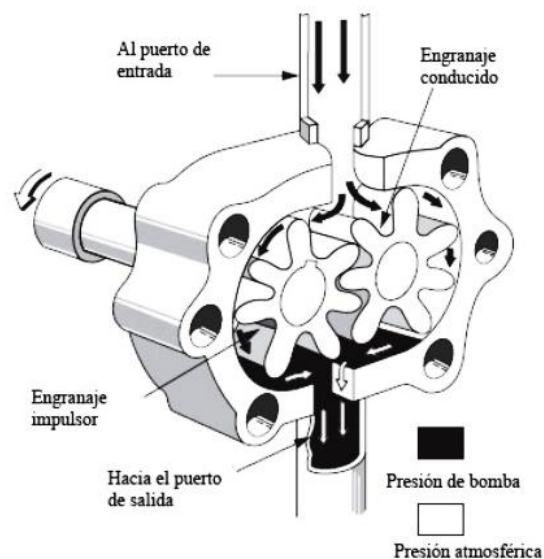


Figura 2.9 Bomba rotativa de engranajes⁹

2.4.2.2.2. Depósito

Su misión es recuperar el fluido después de usarlo y mantener un nivel adecuado al uso de la instalación. Es siempre deseable un tanque grande para facilitar el enfriamiento y la separación de los contaminantes. Como mínimo, el tanque debe

⁸ Fuente: (ASM, 2005)

⁹ Fuente: (Bombas Hidrostáticas. Atmosferis, 2012)

contener todo el fluido que requiere el sistema y mantener un nivel lo suficientemente alto para que no haya un efecto de torbellino en la línea de aspiración de la bomba.

En los equipos industriales se acostumbra a emplear un depósito cuya capacidad sea por lo menos dos o tres veces la capacidad de la bomba en litros por minuto.

En la figura 2.10 se muestra los elementos que debe tener el depósito del sistema hidráulico.

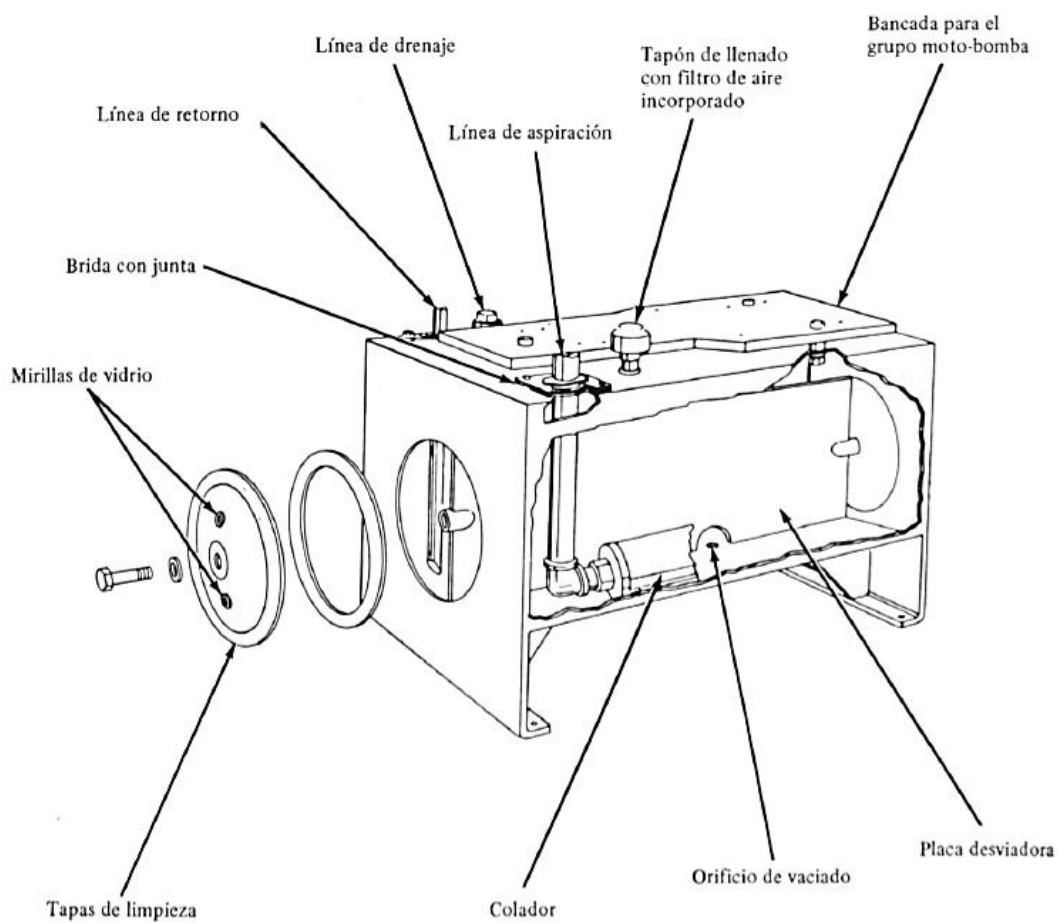


Figura 2.10 Esquema depósito¹⁰

¹⁰ Fuente: (Vickers, 1995)

2.4.2.2.3. Acondicionadores del aceite

Son dispositivos que nos permiten mantener el aceite en unas condiciones de limpieza adecuadas al uso de los elementos de la instalación, de tal manera, que alarga la vida de ésta. Estos elementos son:

a.) Filtro

Es el encargado de retirar del aceite las partículas sólidas en suspensión (trozos de metal, plásticos, etc.)

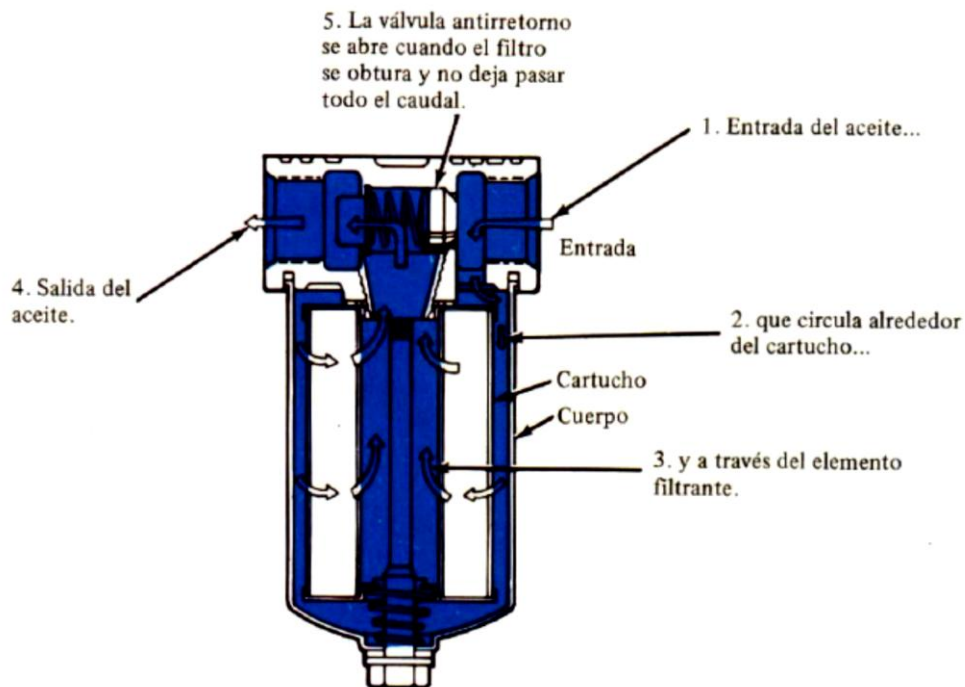


Figura 2.11 Filtración total¹⁰

b.) Manómetro

Los manómetros son necesarios para ajustar las válvulas de control de presión y para determinar las fuerzas ejercidas por un cilindro o el par desarrollado por un motor hidráulico. Los dos tipos principales de manómetro son el tubo de Bourdon y los tipos Schrader.

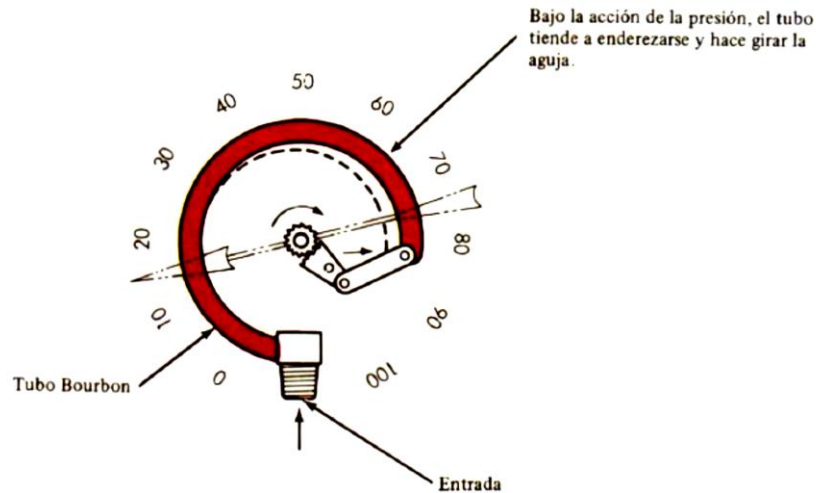


Figura 2.12 Manómetro Bourdon¹⁰

c.) Red de distribución

Debe garantizar la presión y velocidad del aceite en todos los puntos de uso. En las instalaciones oleo-hidráulicas, al contrario de las neumáticas, es necesario un circuito de retorno de fluido, ya que este se vuelve a utilizar una y otra vez. Los sistemas hidráulicos utilizan principalmente, hoy en día, tres tipos de líneas de conducción: tubos gas, tubos milimétricos y mangueras flexibles. Actualmente los tubos gas son los menos costosos de los tres, mientras que los tubos milimétricos y las mangueras flexibles son más convenientes para hacer conexiones y para el mantenimiento de las instalaciones.

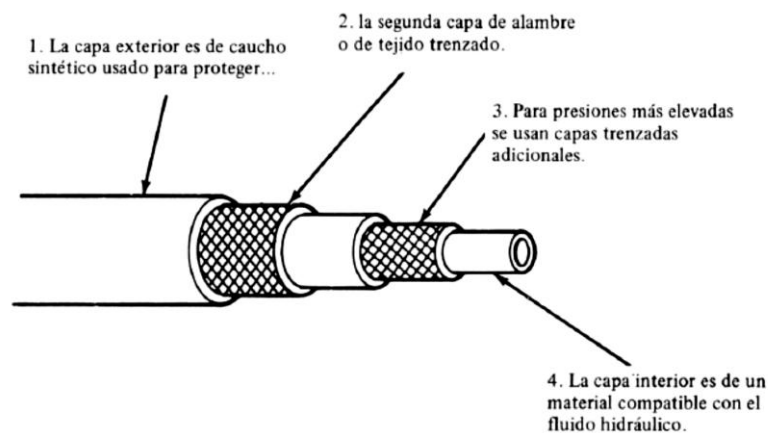


Figura 2.13 Manguera flexible¹⁰

2.4.2.2.4. Elementos de regulación y control

Son los encargados de regular el paso del aceite desde las bombas a los elementos actuadores. Estos elementos, que se denominan válvulas, pueden ser activados de diversas formas: manualmente, por circuitos eléctricos, neumáticos, hidráulicos o mecánicos. La clasificación de estas válvulas se puede hacer en tres grandes grupos:

a.) Válvulas de dirección o distribuidores

Estos elementos se definen por el número de orificios (vías) y las posiciones posibles, así como por su forma de activación y desactivación.

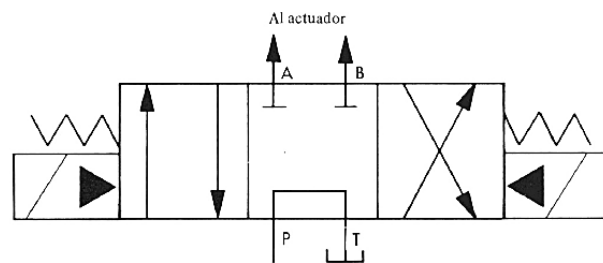


Figura 2. 14 Válvula 4/3 centro tándem¹⁰

b.) Válvulas antirretorno

Permiten el paso del aceite en un determinado sentido, quedando bloqueado en sentido contrario.

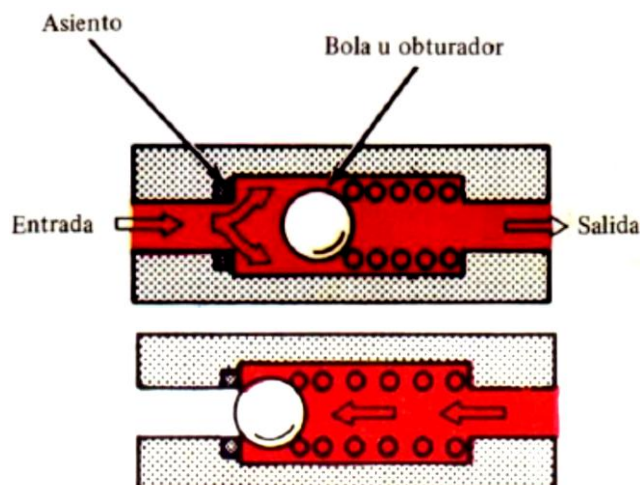


Figura 2.15 Válvula antirretorno¹⁰

c.) Válvulas de regulación de presión y caudal

Son elementos que, en una misma instalación hidráulica, nos permiten disponer de diferentes presiones y caudales. Pueden ser estranguladoras, temporizadoras, etc. y se utilizan para modificar la velocidad de los elementos actuadores, también llamados de trabajo.

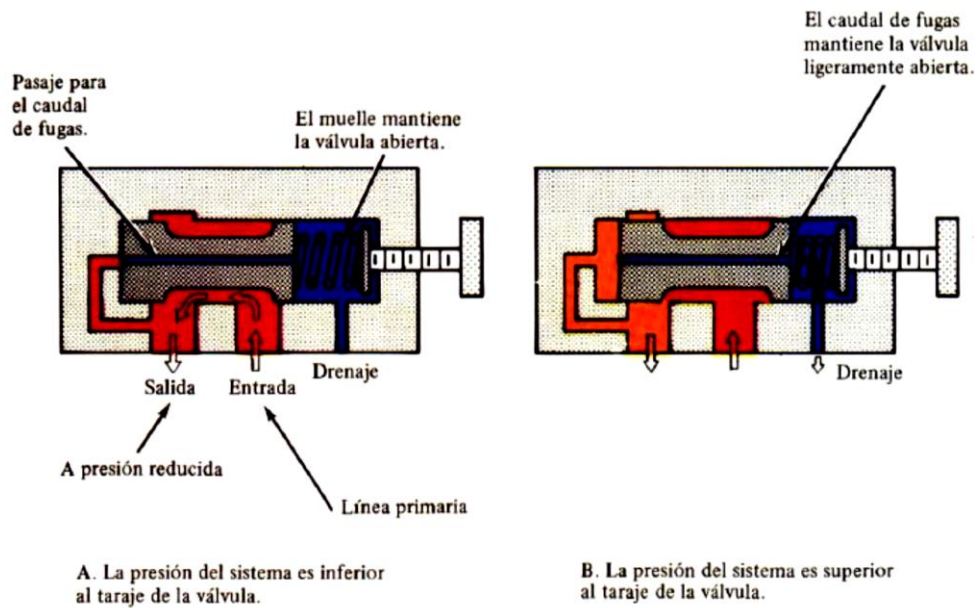


Figura 2.16 Válvula reductora de presión¹⁰

2.4.2.2.5. Elementos actuadores o de trabajo

Son los encargados de transformar la energía oleo-hidráulica en otra energía, generalmente de tipo mecánico. Los podemos clasificar en dos grandes grupos:

a.) Cilindros

Transforman la energía oleo-hidráulica en energía mecánica con un movimiento rectilíneo alternativo. Los hay de dos tipos:

- Cilindros de simple efecto
- Cilindros de doble efecto

Los *cilindros de simple efecto* sólo realizan trabajo útil en un sentido de desplazamiento del vástago. Para que el émbolo recupere la posición de reposo se dota al cilindro de un muelle. Normalmente este muelle está diseñado para almacenar el 6 % de la fuerza de empuje, o bien, como es el caso de los elevadores hidráulicos, aprovechan la acción de la gravedad.

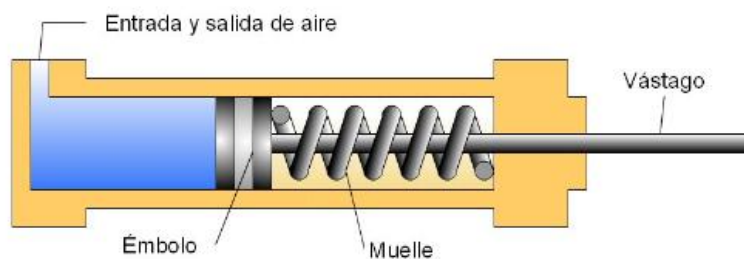


Figura 2.17 Cilindro de simple efecto retorno por muelle¹¹

Los *cilindros de doble efecto* pueden realizar trabajo en ambos sentidos de desplazamiento. Hay que tener en cuenta que la fuerza de avance y retroceso son diferentes.

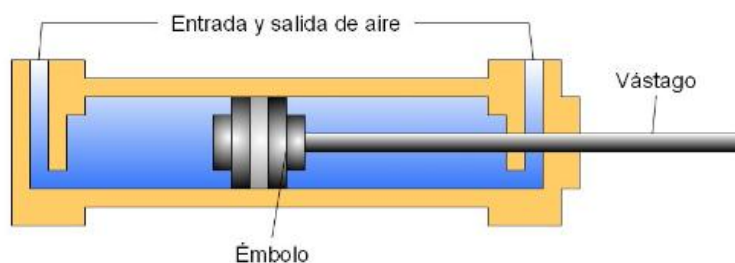


Figura 2.18 Cilindro de doble efecto¹¹

b.) Motor eléctrico

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas que transforman en energía mecánica la eléctrica que absorben por sus bornes. Atendiendo al tipo de corriente utilizada para su alimentación, se clasifican en:

¹¹ Fuente: (Bueno, 2007)

- Motores de corriente continua
 - De excitación independiente
 - De excitación serie.
 - De excitación (shunt) o derivación.
 - De excitación compuesta (compoud).
- Motores de corriente alterna
 - Motores síncronos.
 - Motores asíncronos:
 - Monofásicos.
 - De bobinado auxiliar.
 - De espira en contocircuito.
 - Universal
 - Trifásicos
 - De rotor bobinado
 - De rotor en cortocircuito (jaula de ardilla).

Todos los motores de corriente continua así como los síncronos de corriente alterna incluidos en la clasificación anterior tienen una utilización y aplicaciones muy específicas.

En los motores de corriente alterna asíncronos, tanto monofásicos como trifásicos, tienen una aplicación más generalizada gracias a su facilidad de utilización, poco mantenimiento y bajo coste de fabricación.

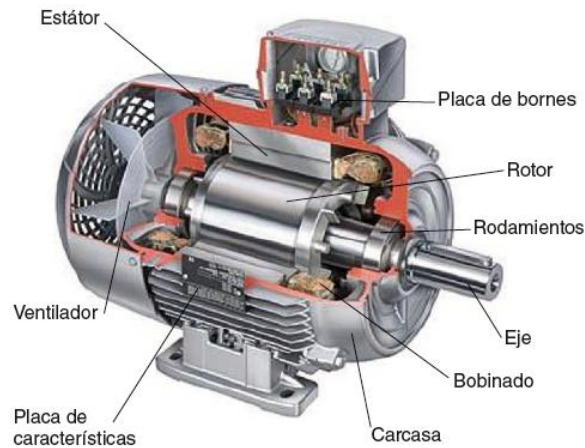


Figura 2.19 Motor eléctrico asíncrono de corriente alterna¹²

2.5. HORNOS DE CALENTAMIENTO

Para el desarrollo de este tema se utilizará como fuente bibliográfica el libro de (Astigarraga, 1999).

2.5.1. GENERALIDADES

Estos hornos tienen como objetivo fundamental el calentamiento de piezas para procesos tales como forja, extrusión, estampación, y conformado. Se mantiene el estado sólido de las piezas durante todo el proceso de calentamiento y pretenden ablandar térmicamente el material, para que sea más fácilmente maleable en la operación posterior.

Por esta naturaleza de este último proceso las piezas no están mecanizadas y el calentamiento y mantenimiento a temperatura en el interior del horno se realiza al aire (hornos de calentamiento eléctrico) o en contacto con las llamas (hornos que queman combustibles líquidos o gaseosos). Por ello las piezas de acero se oxidan y

¹² Fuente: (McGraw-Hill, 2010)

descarburan o, simplemente, se oxidan los metales no férricos. Únicamente en casos muy aislados se utilizan hornos que operan en atmósfera controlada.

En la elección del horno más adecuado en cada caso intervienen fundamentalmente: la forma de las piezas y el metal o aleación de que se trate, lo que define, por un lado, el método de manipulación de la piezas en el horno y, por otro, la temperatura final de calentamiento.

La clasificación de los hornos de calentar se presenta en la tabla 2.5

Tabla 2.5 Hornos de calentar

APLICACIÓN	TIPO	
HORNOS PARA ACERO DE 1000 a 1300 °C	-De fosa -De empujadora -De vigas galopantes o largueros. -De solera giratoria	-De rampa inclinada -De carro continuo o de vagonetas -De carro discontinuo -De mufla
HORNOS PARA COBRE Y ALEACIONES DE 800 a 1100 °C	-De empujadora -De vigas galopantes	-De solera giratoria -De inducción
HORNOS PARA ALUMINIO Y ALEACIONES DE 500 a 600 °C	-De fosa -De empujadora -De solera giratoria	-De cadenas transportadoras -De solera de rodillos -De inducción

Fuente: (Astigarraga, 1999)

En los hornos para acero el calentamiento se realiza casi exclusivamente por llamas procedentes de la combustión fuelóleo o gas natural. En algunos casos podría utilizarse gasóleo o propano y en contadas ocasiones energía eléctrica por resistencias (calentamiento indirecto).

Como alternativa a los hornos anteriores de calentamiento por radiación se citará:

- Calentadores de inducción
- Calentadores de resistencia directa

Los hornos para cobre y aleaciones pueden estar calentados por llamas directas, por resistencias (calentamiento indirecto) o por inducción. Por la temperatura de calentamiento este se realiza principalmente por radiación excepto en los calentadores de inducción, evidentemente.

En los hornos para aluminio y aleaciones el calentamiento se realiza por llamas directas de gas natural, resistencias eléctricas o inducción.

2.5.2. HORNOS DE RESISTENCIAS

Los hornos industriales de resistencias son aquellos donde la energía requerida para su calentamiento es de tipo eléctrico y procede de la resistencia óhmica directa de las piezas o de las resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor (Fig. 2.20).

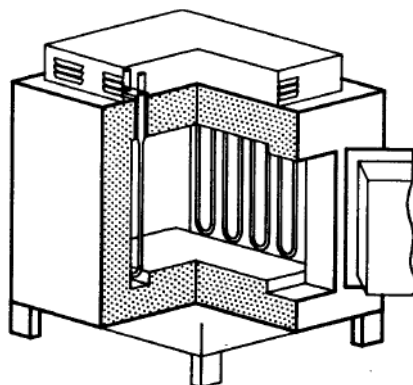


Figura 2.20 Horno de resistencias¹³

¹³ Fuente: (Astigarraga, 1999)

Si en un conductor circula electricidad, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido al choque que sufren los electrones con las moléculas del conductor por el que circulan elevando la temperatura del mismo; este efecto es conocido como efecto Joule en honor a su descubridor el físico británico James Prescott Joule. El efecto de Joule fue definido de la siguiente manera:

"La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente". Matemáticamente:

$$Q = I^2 R t \quad [2.20]$$

Donde:

Q = Energía calorífica producida por la corriente expresada en Julios

I = Intensidad de la corriente que circula

R = Resistencia eléctrica del conductor

t = Tiempo

Así, la potencia disipada por efecto Joule será:

$$P = RI^2 = \frac{V^2}{R} \quad [2.11]$$

Donde V es la diferencia de potencial entre los extremos del conductor.

2.5.2.1. Resistencias de Calentamiento

El calentamiento de piezas por resistencias eléctricas puede ser directo, cuando la corriente eléctrica pasa por las piezas, o indirecto, cuando las piezas se calientan por

radiación, convección o una combinación de ambas, procedente de las resistencias propiamente dichas ubicadas en las proximidades de las piezas.

En la figura 2.21 se muestran dos tipos de equipos de calentamiento por resistencia directa. El calentamiento por resistencia directa es adecuado para piezas metálicas de gran longitud y sección pequeña y uniforme, tales como barras, palanquillas, varillas, alambres y pletinas. Como se obtienen tiempos de calentamiento muy cortos, pueden acoplarse los equipos a la cadencia de laminación, forja o conformado en caliente.

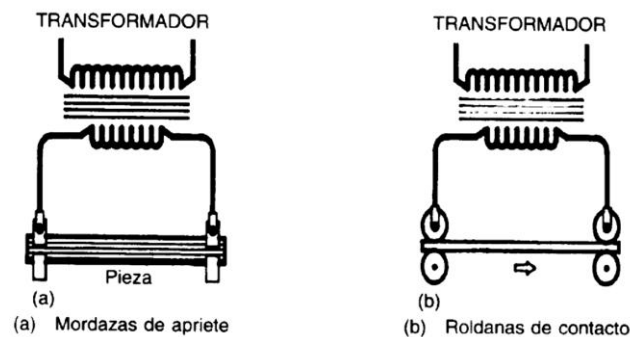


Figura 2.21 Equipos de calentamiento directo, intermitente y continuo¹³

En la industria es mucho más frecuente el calentamiento indirecto por resistencias eléctricas. Dichas resistencias pueden ser:

- Barras, varillas, alambres o pletinas, dispuestos en las paredes de la cámara de calentamiento del horno, transmitiendo calor a las piezas por radiación.
- Paquetes de resistencias de los mismos materiales que transmiten el calor por convección al aire o gases, y de éstos, también por convección, a las piezas.
- Los mismos materiales, dispuestos en el interior de tubos radiantes, cuando la atmósfera interior del horno sea perjudicial para una vida razonable de las resistencias expuestas directamente.

- Resistencias blindadas, dispuestas en el interior de fundas metálicas de pequeño diámetro con un material cerámico de llenado de las fundas metálicas. Se adquieren de fabricantes especializados y, normalmente, se aplican a temperaturas inferiores a las de las anteriores.

En la figura 2.22 se muestra una disposición típica de resistencias de alambre o pletina en las paredes laterales de un horno de carro para tratamientos térmicos hasta una temperatura máxima de 1100 °C. Las resistencias van dispuestas en las paredes laterales y están construidas con varillas gruesas plegadas y colgadas de ganchos.

Dimensiones interiores 3.200 × 1.000 × 1.000 mm.
Potencia 200 kW. Temp. 1.100 °C. Tensión 380 V.

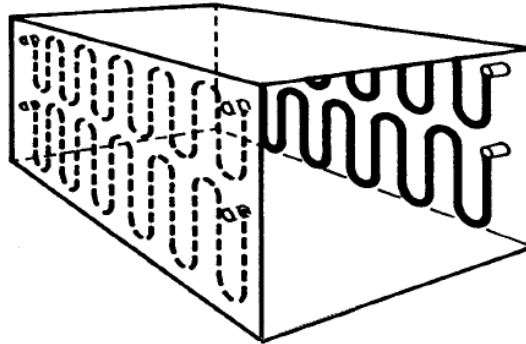


Figura 2.22 Disposición típica de resistencias de calentamiento indirecto¹³

2.5.2.2. Clasificación de las resistencias

Las resistencias de calentamiento indirecto se clasifican del siguiente modo:

- Metálicas,
- No metálicas,
- Tubos radiantes (Fig. 2.23), van colocados en la bóveda del horno
- Resistencias blindadas (Fig. 2.24), típicas para calentamiento de líquidos en baños, tanques de temple, precalentadores de combustión, etc., que en el caso de calentamiento de gases van provistos, normalmente, de aletas para aumentar la superficie de intercambio.

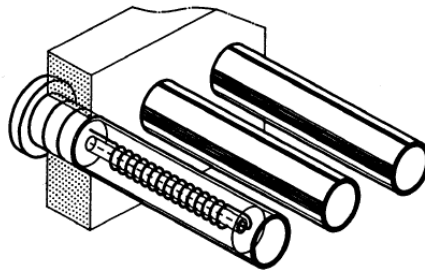


Figura 2.23 Tubo radiante con resistencia de alambre en espiral sobre soporte cerámico¹³

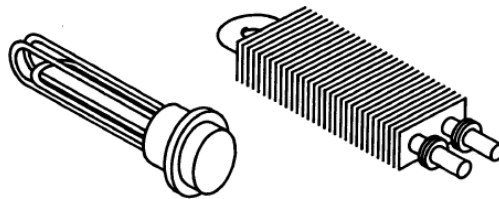


Figura 2.24 Resistencias blindadas de comercio¹³

A. Resistencias metálicas

Los materiales en la fabricación de las resistencias metálicas en hornos industriales se pueden clasificar en tres grandes grupos:

A1. Aleaciones de base Ni-Cr, cuyas características principales se recogen en la tabla 2.6. De todas ellas la más utilizada en resistencias de hornos eléctricos es la primera, 80 Ni-20 Cr. La última aleación, 20 Ni-25 Cr, se utiliza muy frecuentemente en la fabricación de elementos mecánicos en el interior de los hornos, tanto a base de materiales laminados como de piezas fundidas.

La temperatura máxima de utilización se refiere a la temperatura de las resistencias y no a la del interior del horno.

La característica más importante de una aleación para resistencias es la resistividad eléctrica que varía sensiblemente con la temperatura (Tabla 2.7).

Tabla 2.6 Características principales de aleaciones de base Ni-Cr

Aleación Ni-Cr	80-20	70-30	60-15	40-20	30-20	20-25
Composición Aproximada						
Ni %	80	70	60	37	30	20
Cr %	20	30	15	18	20	25
Fe %	<1	<1	20	40	45	50
Densidad Kg/m³	8.300	8.100	8.200	7.900	7.900	7.800
Temperatura de Fusión °C	1.400	1.380	1.390	1.390	1.390	1.380
Temperatura máxima de utilización °C	1.200	1.250	1.390	1.390	1.390	1.380
Calor específico a 20 °C KJ/kg.K	0,45	0,45	0,45	0,46	0,50	0,50
Conductividad térmica W/mk a 20 °C	15	14	13	13	13	13
Coefficiente dilatación lineal 20-1.000 °C/°C⁻¹	18	18	17	19	19	19
Resistencia a la rotura						
20°C N/mm ²	700	800	700	700	700	700
900 °C N/mm ²	100	100	100	120	120	120
Resistencia al creep						
800°C N/mm ²	15	15	15	20	20	20
1.000 °C N/mm ²	4	4	4	4	4	4

Fuente: (Astigarraga, 1999)

Tabla 2.7 Resistividad eléctrica de las aleaciones Ni-Cr

Alineación Ni-Cr	80-20	70-30	60-15	40-20	30-20	20-25
Resistividad eléctrica $\mu\Omega\text{cm}$						
20 °C	112	119	113	105	104	95
100 °C	113	120	114	108	107	99
200 °C	113	122	116	111	111	103
300 °C	114	123	118	114	114	107
400 °C	115	124	120	117	117	111
500 °C	116	125	122	120	120	115
600 °C	115	124	121	122	122	118
700 °C	114	124	121	124	124	120
800 °C	114	124	122	126	126	122
900 °C	114	124	123	128	128	124
1.000 °C	115	124	124	130	130	126
1.100 °C	116	125	125	132	132	126
1.200 °C	117	126	-	-	-	-
Coefficiente de resistividad (C_t)						
20 °C	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,009	1,009	1,009	1,028	1,029	1,042
200 °C	1,009	1,025	1,027	1,057	1,067	1,084
300 °C	1,018	1,034	1,044	1,086	1,096	1,126
400 °C	1,027	1,042	1,062	1,114	1,125	1,168
500 °C	1,036	1,050	1,080	1,143	1,154	1,210
600 °C	1,027	1,042	1,071	1,162	1,173	1,242
700 °C	1,018	1,042	1,071	1,181	1,192	1,263
800 °C	1,018	1,042	1,080	1,200	1,211	1,284
900 °C	1,018	1,042	1,089	1,219	1,231	1,305
1.000 °C	1,027	1,042	1,097	1,238	1,250	1,326
1.100 °C	1,036	1,050	1,115	1,1257	1,269	-
1.200 °C	1,045	1,050	-	-	-	-

Fuente: (Astigarraga, 1999)

El coeficiente de resistividad (factor multiplicador de la resistividad a 20 °C) es útil para obtener la resistividad a diferentes temperaturas. La potencia absorbida por las resistencias, cuando se les aplica una tensión constante, será muy superior a 20°C que a 1000 °C para dicha aleación, y prácticamente constante para las dos primeras.

A2. Aleaciones Fe-Cr-Al, con posible adición de elementos de las tierras raras, obtenidas por fusión o por pulvimetalurgia.

La variación entre los diversos fabricantes es mayor que en las aleaciones Ni-Cr. Las más representativas son:

Grupo 1.- 22/25 Cr-6 Al-70 Fe.

Grupo 2.- 20/22 Cr-5 Al-72 Fe.

Grupo3.- 120/22 Cr-4,5 Al-73 Fe.

Grupo 4.- 114 Cr-4 Al-80 Fe.

En el grupo 1 se ha introducido una variante obtenida por pulvimetalurgia que denominamos PM. A muchas de estas aleaciones se les adiciona Ytrio lo que aumenta considerablemente la ductilidad después de un funcionamiento prolongado a alta temperatura. Sus características principales se recogen en la tabla 2.8.

En relación con las resistencias de las aleaciones Ni-Cr se tiene:

- La densidad es netamente inferior.
- La temperatura de fusión es más elevada.
- La temperatura máxima de utilización es más alta.
- El calor específico y la conductividad térmica son similares.
- La dilatación lineal es más baja.

- La resistencia a la rotura en caliente y la resistencia al creep son más bajas, lo que exige el uso de aleaciones Ni-Cr cuando se requieren buenas propiedades mecánicas en caliente.

Tabla 2.8 Propiedades de las aleaciones Fe-Cr-Al

Aleación	22-6PM	22-6	22-5	22-4	14-4	
Composición química aproximada						
Cr %	22	22	22	22	30	
Al %	5,8	5,8	5,3	4,8	4	
Fe %	70	70	72	73	80	
Densidad Kg/m³	7.100	7.100	7.150	7.250	7.300	
Temperatura de Fusión °C	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	
Temperatura máxima de utilización °C	1.400	1.400	1.400	1.300	1.100	
Calor específico a 20 °C KJ/kg.K	0,46	0,46	0,46	0,46	0,48	
Calor específico medio a 0-1.000 °C KJ/kg.K	0,54	0,54	0,54	0,54	0,56	
Conductividad térmica a 20 °C W/mk	13	13	13	13	15	
Coefficiente dilatación lineal 20-1.000 °C/°C⁻¹	15	15	15	15	15	
Resistencia a la rotura	20°C N/mm ²	750	800	800	800	700
	900 °C N/mm ²	40	34	37	34	35
Resistencia al creep	800°C N/mm ²	14	6	8	6	4
	1.000 °C N/mm ²	1,8	1	1,5	1	0,8

Fuente: (Astigarraga, 1999)

La tabla 2.9 muestra la resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al. Es notablemente más elevada que en las aleaciones Ni-Cr lo que resulta favorable en el cálculo de las resistencias en hornos eléctricos.

Tabla 2.9 Resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al

Alineación	22-6 PM	22-6	22-5	22-4	22-4
Resistividad eléctrica $\mu\Omega\text{cm}$.					
Coficiente de resistividad:					
20 °C	145	145	139	135	125
20 °C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100 °C	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
200 °C	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02
300 °C	1,00	1,00	1,01	1,01	1,03
400 °C	1,00	1,00	1,02	1,02	1,04
500 °C	1,01	1,01	1,03	1,03	1,05
600 °C	1,02	1,02	1,04	1,04	1,07
700 °C	1,02	1,02	1,04	1,05	1,09
800 °C	1,03	1,03	1,05	1,06	1,11
900 °C	1,03	1,03	1,05	1,06	1,13
1.000 °C	1,04	1,04	1,06	1,07	1,14
1.100 °C	1,04	1,04	1,06	1,07	1,15
1.200 °C	1,04	1,04	1,06	1,08	-
1.300 °C	1,04	1,04	1,06	1,08	-
1.400 °C	1,05	1,05	1,07	-	-

Fuente: (Astigarraga, 1999)

A3. Otros materiales empleados, sobre todo, en hornos de vacío de alta temperatura, como molibdeno, tántalo y tungsteno.

Se utilizan en hornos especiales de alta temperatura resistencias metálicas de molibdeno, tántalo y tungsteno.

2.5.3. HORNOS CON COMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y GASEOSOS

En los hornos con combustibles líquidos y gaseosos la energía está condicionada químicamente, se aporta junto con los gases de combustión hacia el material en el horno, mediante combustión en un quemador (Billigmann, 2002).

Los gases de la combustión entregan su calor por radiación o convección. Es importante que las pérdidas se mantengan lo más reducidas posibles. Esto se consigue hoy en día gracias a un diseño apropiado del interior del horno, a la elección de la mampostería adecuada, que tengan pérdidas muy pequeñas través de la pared y a quemadores adecuados.

Los hornos para el recalcado y prensado en caliente que han de funcionar a temperaturas altas y en los cuales ha de alcanzarse en un mínimo de tiempo una temperatura del horno y del material lo más elevada posible, requieren necesariamente un quemador que mezcle rápidamente y a fondo una llama corta y viva, para alcanzar un correcto rendimiento térmico y para que no se escapen gases no quemados del horno.

Para ello han dado buenos resultados un gran ángulo de inclinación de las corrientes de gas y de aire, elevadas velocidades de salida y chorros de gran anchura y reducida altura. Además el quemador debe ser fácilmente manejable y regulable, poco sensible a un trabajo duro y seguro contra el retroceso de la llama. De ello se deduce la distinta amplitud de los diferentes tipos de quemadores utilizados en hornos de calentamiento.

2.5.3.1. Calentamiento para la conformación en caliente

El calentamiento necesario para el recalado y prensado en caliente se utiliza hornos con calentamiento por radiación mediante gases. El paso térmico es muy intenso, de modo que, en caso de grandes cargas del horno, se alcanzan reducidos tiempos de precalentamiento y elevados rendimientos. Sin embargo existe el peligro de un sobrecalentamiento de las piezas a elaborar, debido a una acumulación de calor, de manera que no todos los materiales pueden calentarse tan rápidamente.

Es importante en todos los hornos la posibilidad de un buen control del proceso de calentamiento.

2.5.3.2. Forma y tamaño de los hornos

Para el calentamiento parcial de trozos cortados de barras se utilizan principalmente hornos giratorios (hornos para calentar pernos fig. 2.26). Cuando se trabaja con barras, se utilizan hornos de cámara y hornos de ranuras, como hornos pequeños de forjar.

El horno de ranuras consiste en una cámara que se calienta desde arriba. Las paredes laterales están provistas de ranuras o agujeros para la introducción de las barras. La cámara se apoya sobre una columna y es giratoria para que la barra calentada pueda girarse hacia la mesa de servicio y para que pueda extraerse una barra calentada e introducirse otra fría.

El gasto de combustible de estos hornos, sin embargo, es muy elevado, ya que los gases de escape no pueden utilizarse para precalentar el aire de combustión. Además,

salen por las ranuras gases de combustión. La ventaja se halla en el servicio sencillo y el transporte fácil.

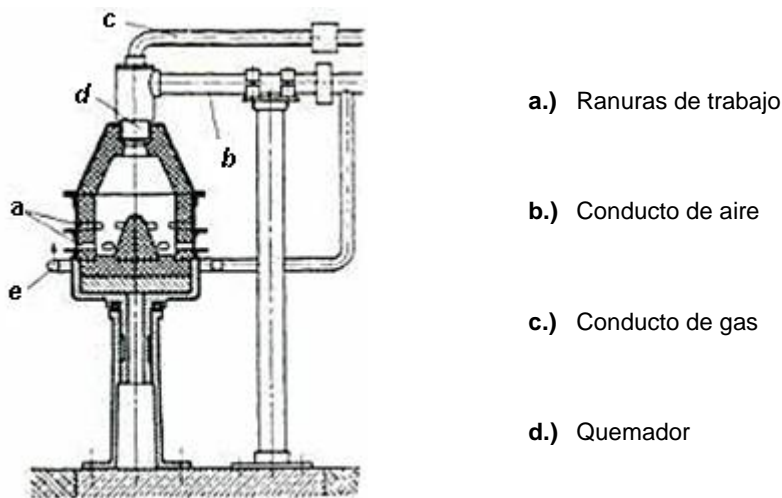


Figura 2. 25 Horno giratorio para calentar pernos¹⁴

Los tamaños de los hornos son muy distintos, según los diferentes usos. Para los campos de trabajo que entran en cuenta en el recalado y prensado en caliente puede distinguirse entre hornos para forjar pequeños y muy pequeños. Son hornos para forjar pequeños los hornos cuya superficie de la solera útil está entre 0,25 y 4,0 m². A este grupo pertenecen los hornos de cámara y los hornos de empuje pequeños para piezas prensadas grandes y barras grandes. Los hornos para forjar muy pequeños con superficies de la solera útiles están entre 0,063 hasta 0,25 m², abarcan la mayoría de los hornos para calentar barras y hornos de cámara más pequeños.

Al determinar el tamaño adecuado del horno se debe tener en cuenta sobre todo que éste ha de trabajar como mínimo tan rápidamente como la prensa o máquina de forjar. Ya que el rendimiento del horno depende del tipo, del tamaño y de la forma de los materiales de partida a calentar, no puede tomarse sin más como base el rendimiento nominal de los hornos indicado por el fabricante, sino que han de

¹⁴ Fuente: (Billigmann, 2002)

aclararse ante todo las condiciones de trabajo y de calentamiento existentes en cada uno de los casos, teniendo en cuenta las pérdidas térmicas que se presentan.

2.6. METALES NO FERROSOS

La expresión metales no ferrosos se refiere a otros treinta y ocho metales, distintos del hierro, conocidos por el hombre, los metales no ferrosos más comúnmente utilizados por los ingenieros se muestran en la tabla 2.10. Además de utilizarlos como elementos para alear, el níquel y el cromo se agregan por electroplastia a una gran variedad de metales, tanto como acabado decorativo como para darles protección contra la corrosión.

Los metales y las aleaciones no ferrosas cubren una amplia gama, desde los metales más comunes (como el aluminio, cobre y magnesio) hasta aleaciones de alta temperatura y alta resistencia (como el tungsteno, tantalio y molibdeno). Por lo general son más costosos que los metales ferrosos, los metales y aleaciones no ferrosas tienen aplicaciones importantes debido a propiedades como la resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, baja densidad y facilidad de fabricación.

Ejemplos típicos de sus aplicaciones son el aluminio para los utensilios de cocina y los fuselajes de los aviones, el alambre de cobre empleado en electricidad, la tubería de cobre utilizado para suministro de agua residencial, el zinc para láminas metálicas galvanizadas que se utilizan en carrocerías de automóviles, el titanio para álabes de turbinas de motores de propulsión e implantes ortopédicos, y el tantalio para motores de cohetes (Timings, 2002).

Tabla 2.10 Metales comunes no ferrosos

Metal	Densidad	Punto de fusión	Propiedades	Usos típicos
Aluminio	2700	660	Es el más ligero de los metales comúnmente utilizados. Elevada conductividad eléctrica y térmica. Suave, dúctil, y baja resistencia a la tensión 93MN/m^2 .	Base de muchas aleaciones usadas en ingeniería. Conductores eléctricos de poco peso.
Cobre	8900	1083	Suave, dúctil, y con baja resistencia a la tensión (o tracción), 232MN/m^2 . Sigue a la plata en conductividad; mucho más fácil de unir por soldadura que el aluminio. Resiste a la corrosión.	Como base de las aleaciones de latón y bronce. Se utiliza mucho en conductores eléctricos y cambiadores de calor, tales como los radiadores de autos.
Plomo	11300	328	Suave, dúctil, y con baja resistencia a la tensión (o tracción). Elevada resistencia a la corrosión.	Recubrimientos de canales eléctricos. Base de las aleaciones para la soldadura. Rejillas para placas de acumulador. Recubrimiento en plantas químicas. Agregados a otros materiales para hacerlos adecuados para el "corte libre".
Plata	10500	960	Suave, dúctil, y con muy baja resistencia a la tensión. Conductividad más elevada que la de cualquier otro metal.	Muy utilizado en ingeniería eléctrica y electrónica para contactos de interruptores y relevadores.
Estaño	7300	232	Resistente a la corrosión	Recubrimiento de las láminas de acero dulce para darles "estañado". Utilizado en soldaduras suaves. Una de las bases de los cojinetes de "metal blando". Elemento para la aleación de bronce.
Cinc	7100	420	Suave, dúctil, y con baja resistencia a la tensión. Resistente a la corrosión.	Muy utilizado para revestir las láminas de acero "galvanizándolas". Base de las aleaciones para fundición en matriz. Elemento aleador de latón.
Cromo	7500	1890	Resistente a la corrosión. Eleva la fuerza pero disminuye la ductilidad de los aceros. Mejora las propiedades obtenidas por los tratamientos térmicos	Utilizado como elemento liga en los aceros de alta fuerza, resistentes a la corrosión. Utilizado para la electroplastia.
Cobalto	8900	1495	Mejora la resistencia al desgaste y la dureza de los aceros rápidos.	Utilizado como elemento liga en aceros "super" rápidos y en las aleaciones para imanes permanentes.
Manganeso	7200	1260	Elevada afinidad con el oxígeno y el azufre, suave y dúctil.	Utilizado para reducir los aceros y para eliminar los defectos perjudiciales ocasionados por los azufres en impurezas. En grandes cantidades mejora la resistencia al desgaste.
Molibdeno	9550	2620	Metal pesado, resistente al calor, que se alea fácilmente con otros metales.	Utilizado como elemento liga en aceros al níquel-cromo de elevada resistencia con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas y de tratamiento por calor. Reduce el efecto de masa y fragilidad al temple.
Níquel	8900	1458	Metal fuerte, rígido, resistente a la corrosión, muy utilizado como elemento para aleaciones.	Utilizado como elemento para aleaciones con el objeto de mejorar la resistencia y propiedades mecánicas del acero. Tiende a desestabilizar al carbono durante el tratamiento térmico, y debe agregarse cromo para contrarrestar este efecto en los aceros al medio y alto carbono. Utilizado para la electroplastia.

Fuente: (Timings, 2002)

2.6.1. DEFORMACIÓN EN CALIENTE DE METALES

La elaboración de piezas por medio de deformación del material se puede realizar a temperatura ambiente (**deformación en frío**) o incrementando la temperatura del material por encima de la temperatura de recristalización (**deformación en caliente**). Es aplicada principalmente a los metales, aunque también se puede emplear en la obtención de piezas de plástico (termoconformado). Entre los metales, hay algunos (Oro, Cobre, Plata) que se deforman bien en frío, pero otros (materiales férreos) son difíciles de deformar en frío. Si se puede escoger es preferible realizar la deformación en frío ya que se obtiene propiedades mecánicas superiores y un mejor acabado de la pieza, además se ahorra energía de calentamiento del material y las herramientas a ser utilizadas no tienen que estar preparadas para soportar altas temperaturas. Por el contrario, las máquinas empleadas en la deformación en frío deberán tener una mayor potencia (Sarmiento, 2009).

Entre las propiedades más importantes de los metales está la maleabilidad, este término indica la propiedad de un metal para ser deformado mecánicamente por encima de su límite elástico, sin incremento considerable en la resistencia a la deformación. El rango de trabajado en caliente está comprendido entre la temperatura de recristalización y la de fusión del metal.

Los factores que influyen en el tamaño de grano obtenido con la deformación en caliente son:

- Tamaño inicial del grano
- Cantidad de la deformación
- Temperatura final del proceso
- Velocidad de enfriamiento

Tabla 2.11 Clasificación de los metales por forjabilidad decreciente

Metal o aleación	Temperaturas de forja en caliente °C
Aleaciones de aluminio	400-500
Aleaciones de magnesio	250-350
Aleaciones de Cobre	600-900
Acero de bajo contenido de carbono	850-1150
Acero inoxidable martensítico	1100-1250
Acero inoxidable austenítico	1100-1250
Aleaciones de titanio	700-950
Superaleaciones ferrosas	1050-1180
Superaleaciones a base de cobre	1180-1250
Aleaciones de tantalio	1050-1350
Aleaciones de molibdeno	1150-1350
Superaleaciones base níquel	1050-1200
Aleaciones de tungsteno	1200-1300

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

2.6.1.1. Ventajas y Desventajas

Debido a que el metal se encuentra a alta temperatura, los cristales reformados empiezan a crecer nuevamente, pero estos no son tan grandes e irregulares como antes. Al avanzar el trabajo en caliente y enfriarse el metal, cada deformación produce cristales más pequeños, uniformes y hasta cierto grado aplanados, lo que da al metal una condición llamada anisotropía u orientación de grano o fibra, es decir, el metal es más dúctil y deformable en la dirección de un eje que en la del otro.

Esta condición (anisotropía) ayuda a explicar las siguientes **ventajas** del trabajo en caliente:

- No aumenta la dureza o ductilidad del metal ya que los granos distorsionados deformados durante el proceso, pronto cambian a nuevos granos sin deformación, es decir, granos equiaxiales.
- El metal se hace más tenaz pues los cristales formados son más pequeños y por lo tanto más numerosos. Además disminuye el espacio entre cristales y se segregan las impurezas.
- Se necesita menor fuerza y por lo tanto menor tiempo, debido a que el material es más maleable.
- Mayor facilidad para llevar el metal a formas extremas cuando está caliente, sin roturas ni desgastes ya que los cristales son más plegables y se forman continuamente.
- Ayuda a perfeccionar la estructura granular, eliminando zonas de baja resistencia.
- Los poros son eliminados de forma considerable, como resultado de las altas presiones de trabajo.

Por el contrario, se presentan las siguientes **desventajas**:

- Se tiene una rápida oxidación o formación de escamas en la superficie y por consiguiente un mal acabado superficial.
- No se puede mantener tolerancias estrechas.
- Se requieren herramientas relativamente costosas que sean resistentes al calor.

2.6.2. EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

2.6.2.1. Propiedades del Aluminio

Una propiedad del aluminio que todo el mundo conoce es su bajo peso o, hablando técnicamente, baja densidad relativa. La densidad relativa del aluminio es apenas 2.7 veces la del agua, y aproximadamente un tercio la del acero o el cobre. Si se emplean unidades del sistema inglés, es fácil recordar que 1 pulg³ de aluminio pesa 0.1 lb; un pie³ pesa 170 lb, en comparación con las 62 lb del agua y 490 lb del acero. A continuación se analizará más propiedades del aluminio y sus aleaciones:

- **Formabilidad.** El aluminio puede ser conformado casi por cualquier proceso de los que se usan actualmente, y en más formas que cualquier Otro metal. Si bien restringe sus aplicaciones a altas temperaturas, a unos 500 o 600 °F, su punto de fusión relativamente bajo de 1.220 °F lo hace fácil de vaciar.
- **Propiedades mecánicas.** Mediante aleación el aluminio, suave por naturaleza, puede duplicar La resistencia que presenta el acero dulce.
- **Razón resistencia-peso.** Algunas aleaciones de aluminio que se usan actualmente se encuentran entre los materiales con mayor razón resistencia-peso, como los aceros al titanio y de superaleación.
- **Resistencia a la corrosión.** El aluminio posee excelente resistencia a la corrosión en ambientes naturales y en contacto con muchos alimentos y productos químicos.
- **Conductividad eléctrica y térmica elevada.** En términos de volumen, la conductividad eléctrica del aluminio puro es de alrededor del 60% de la del Patrón Cobre Recocido Internacional, pero gramo por gramo el aluminio es

mejor conductor de calor y electricidad que el cobre y es superado sólo por el sodio, un metal difícil de manejar en situaciones ordinarias.

- **Reflectividad (o reflexividad).** El aluminio puede someterse a tratamiento superficial para hacerlo un excelente reflector, que no se empaña con la oxidación normal.
- **Posibilidad de acabado.** El aluminio puede someterse a más formas de acabado que cualquier otro metal que se use en la actualidad.

Texto tomado de (Kutz, 1990)

2.6.2.2. Aleaciones de aluminio

El metal puro puede hacerse más resistente por medio de labrado en frío, un proceso que se denomina endurecimiento por deformación. Sin embargo, se obtiene mucha mayor resistencia mediante la aleación con otros metales, y las aleaciones en sí pueden hacerse más resistentes si se someten a endurecimiento por deformación o a tratamiento térmico. El proceso de aleación también mejora otras propiedades, como la capacidad de colado y la labrabilidad. Así, las aleaciones de aluminio se usan más ampliamente que el metal puro, y muchas veces, cuando se menciona el aluminio, en realidad se hace referencia a una de sus aleaciones.

Los principales elementos que se agregan al aluminio son cobre, manganeso, silicio, magnesio y cinc; para fines metalúrgicos también se añaden otros elementos en menor cantidad. En virtud de que se han elaborado literalmente cientos de aleaciones de aluminio para uso comercial, la Aluminum Association formuló sistemas especiales de designación para distinguir y clasificar las aleaciones de una manera sinóptica (Kutz, 1990).

2.6.2.3. Sistemas de designación de aleaciones

Las aleaciones de aluminio se dividen en primer lugar en dos clases, según la forma de producción, que varía según su empleo: forjadas y vaciadas o coladas. La primera de estas clases es muy amplia, ya que el aluminio se conforma casi por cualquier proceso conocido, incluyendo laminado, extrusión, embutido, forjado y otros procesos especiales. Las aleaciones coladas son las que se vierten en estado fundido en un molde de arena o acero y se dejan solidificar para reproducir la forma deseada. Ambas clases difieren mucho en composición; las de forja deben ser dúctiles, mientras que las de colado deben ser fluidas.

Cada aleación de aluminio forjado o vaciado se designa por un número para distinguirla como una u otra y para clasificarla. Las de forja reciben un número de cuatro dígitos, el primero de los cuales clasifica la aleación por serie o principal elemento de liga. El segundo dígito, si es distinto de 0, denota una modificación de la aleación básica. Los dígitos tercero y cuarto forman un número arbitrario que identifica la aleación específica en la serie*. A las aleaciones de vaciado se les asigna un número de tres dígitos seguido por un decimal. En este caso, el primer dígito también representa la serie de aleación o el principal elemento agregado; el segundo y tercer dígitos identifican la aleación específica, y el decimal indica si la composición es para el vaciado final (0.0) o para lingotes (0.1 o 0.2). Una letra mayúscula como prefijo (A, B, C, etcétera) indica una modificación de la aleación básica.

Tabla 2.12 Sistema de designación para las aleaciones de aluminio para forjar

Serie de aleación	Descripción del principal elemento de liga
1xxx	99.00% de aluminio como mínimo
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio y Silicio
7xxx	Cinc
8xxx	Otro elemento
9xxx	Serie no usada

Fuente: (Kutz, 1990)

Tabla 2.13 Sistema de designación para las aleaciones de aluminio para colar

Serie de aleación	Descripción del principal elemento de liga
1xx.x	99.00% de aluminio como mínimo
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silicio o Cobre, Magnesio o ambos
4xx.x	Silicio
5xx.x	Magnesio
6xx.x	Serie no usada
7xx.x	Cinc
8xx.x	Estaño
9xx.x	Otro elemento

Fuente: (Kutz, 1990)

*Hay una excepción para la aleación de la serie 1xxx, en que los dos últimos dígitos indican el porcentaje mínimo de aluminio; por ejemplo, la aleación 1060 contiene por lo menos 99.60 % de este metal. La especificación de una aleación de aluminio no es completa si no se menciona su condición metalúrgica o grado de temple (Kutz, 1990).

La Aluminum Association elaboró un sistema de designación del grado de temple único para las aleaciones de aluminio, y se utiliza tanto para las de forja como para las de colado. La designación de grado de temple sigue a la de la aleación, y ambas se separan con un guion. Las designaciones de los grados básicos consisten en letras;

Las subdivisiones se indican con uno o más dígitos después de la letra. Los grados básicos son:

F: Sin tratamiento ulterior. Se aplica a los productos de proceso de conformado en los cuales no se ejerce control especial sobre las condiciones térmicas ni se emplea endurecimiento por deformación. Para los productos forjados no existen límites de propiedades mecánicas.

O: Recocido. Se aplica a los productos forjados que se recuecen para obtener el grado de dureza más bajo, y a los productos vaciados que se recuecen para mejorar la ductilidad y la estabilidad dimensional. La letra O puede ir seguida de un dígito distinto de cero.

H: Endurecido por deformación. (Sólo productos forjados). Se aplica a los productos cuya dureza se ha incrementado por deformación, con o sin tratamientos térmicos complementarios que disminuyan la resistencia. La letra H siempre va seguida por dos o más dígitos.

W: Sometido a tratamiento térmico en solución. Grado inestable que se aplica sólo a aleaciones que envejecen en forma espontánea a temperatura ambiente después de tratamiento térmico con solución. Esta designación es específica sólo cuando se indica el periodo de envejecimiento natural, por ejemplo, W ½ h.

T: Sometido a tratamiento térmico para producir grados estables distintos de los F, O ó H. Se aplica a los productos tratados térmicamente, con endurecimiento por deformación complementaria o sin él, para producir grados estables. La letra T siempre va seguida por uno o más dígitos.

2.6.2.4. Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio

Las aleaciones forjadas se dividen en dos categorías: no tratables y tratables térmicamente. Las primeras son las que obtienen su resistencia mediante endurecimiento por dispersión o solución sólida y que se refuerzan con endurecimiento por deformación; entre ellas se incluyen las series 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx. Las aleaciones tratables térmicamente se hacen resistentes por envejecimiento controlado, y entre ellas se incluyen las series 2xxx, algunas de la 4xxx, 6xxx y 7xxx. Los vaciados no suelen ser endurecidos por deformación, pero muchas aleaciones coladas son tratables térmicamente.

En la tabla 2.14 se presentan propiedades mecánicas típicas de algunas aleaciones representativas no tratables térmicamente en los grados recocido, semiduro y completamente duro; se incluyen con fines de comparación valores para el aluminio de súper pureza (99.99%). Las propiedades típicas suelen ser mejores que las mínimas o de garantía, y más que con fines de diseño son útiles para establecer comparaciones. Debe hacerse notar que el aluminio puro es altamente susceptible de endurecerse por deformación, pero una aleación de apenas 1% produce una resistencia a la tensión comparable a la de un aluminio puro completamente endurecido, y aquélla tiene mucha mayor ductilidad. Además, las aleaciones pueden endurecerse por deformación para producir resistencias aún mayores, con lo que se multiplica el efecto de la aleación.

Asimismo, debe mencionarse que, si bien el endurecimiento por deformación incrementa la resistencia última como la de fluencia a la tensión, el efecto es más pronunciado sobre esta última, hasta el punto de que se aproxima a la resistencia

última a la tensión del grado completamente endurecido. Ductilidad y labrabilidad se reducen conforme el material se endurece por deformación, y la mayor parte de Las aleaciones tienen formabilidad limitada en los grados completamente endurecidos.

Tabla 2.14 Propiedades físicas de las aleaciones de aluminio representativas, no tratables térmicamente (no utilizables con fines de diseño).

Aleación	Composición nominal	Grado de dureza	Resistencia última a la tensión (kg/pulg ²)	Resistencia de fluencia a la tensión (kg/pulg ²)	Elongación (%) en 2 pulg)	Dureza (BHN)
1199	99.99+%Al	O	6.5	1.5	50	-
		H18	17	16	5	-
1100	99+%Al	O	13	5	5	23
		H14	18	17	9	32
		H18	24	22	5	44
3003	1.2%Mn	O	16	6	0	28
		H14	22	21	8	40
		H18	29	27	4	55
5005	0.8%Mg	O	18	6	5	28
		H14	23	22	6	41
		H18	29	28	4	51
3004	1.2%Mn	O	26	10	0	45
	1.0%Mg	H34	35	29	9	63
		H38	41	36	5	77
5052	2.5%Mg	O	28	13	5	47
		H34	38	31	0	68
		H38	42	37	7	77
5456	5.1%Mg	O	45	23	4	70
	0.8%Mn	H321,H 116	51	37	6	90
B443.0	5.0%Si	F ^a	19	8	8	40
		F ^b	23	9	0	45
514.0	4.0%Mg	F ^a	25	12	9	50

a. Colado en arena; b. Colado en molde permanente

Fuente: (Kutz, 1990)

En La tabla 2.15 se enumeran propiedades mecánicas típicas y composiciones nominales de algunas aleaciones de aluminio representativas tratables térmicamente.

Tabla 2.15 Propiedades físicas de las aleaciones de aluminio representativas, tratables térmicamente (no utilizables con fines de diseño).

Aleación	Composición nominal	Grado de dureza	Resistencia última a la tensión (kg/pulg ²)	Resistencia de fluencia a la tensión (kg/pulg ²)	Elongación(% en 2 pulg)	Dureza (BHN)
2024	4.4% Cu	O	27	11	20	47
	1.5% Mg 0.6% Mn	T4	68	47	20	120
		T6	69	57	10	125
		T86	75	71	6	135
6061	1.0% Mg 0.6% Si	O	18	8	25	30
		T4	35	21	22	65
		T6	45	40	12	95
7005	4.5% Zn	O	28	12	20	-
	1.4% Mg	T6	51	42	13	-
7075	5.6% Zn	O	33	15	17	60
	2.5% Mg	T6	83	73	11	150
	1.6% Cu	T73	73	63	13	-
356.0		F ^a	24	18	6	-
	7.0% Si	T6 ^a	33	24	3.5	70
	0.3% Mg	F ^b	26	18	5	-
		T6 ^b	37	27	5	80

a. Colado en arena; b. Colado en molde permanente

Fuente: (Kutz, 1990)

2.6.2.5. La forja de aleaciones de aluminio

Las piezas forjadas de aleaciones de aluminio, especialmente las forjadas en dado cerrado, son usualmente producidas a más altamente refinadas configuraciones finales de forja que los carbonos forjados en caliente y/o aleaciones de acero, lo que refleja las diferencias en el comportamiento de la oxidación a altas temperatura de aleaciones de aluminio durante la forja, los enfoques de ingeniería de forja utilizados para el aluminio, y los altos costos de material asociado con aleaciones de aluminio en comparación con los aceros al carbono.

Para una forma dada de aleación de aluminio forjado, la presión requerida en la forja varía ampliamente, dependiendo principalmente de la composición química de la aleación a ser forjada, el proceso de forjado a ser empleado, la velocidad de deformación de la forja, el tipo de forja a ser fabricado, las condiciones de lubricación, y la forja de la pieza de trabajo y la temperatura del troquel.

La figura 2.26 compara las tensiones de deformación de algunas aleaciones de aluminio forjadas comúnmente de 350 a 370 °C (660 a 700 °F) y a una tasa de deformación de 4 a 10 s para acero al carbono 1025 forjado a una idéntica tasa de deformación pero a una temperatura de forjado típicamente empleada para este acero. La tensión de deformación de la aleación a ser forjada representa el límite más bajo de presión de forjado requerida.

Para aleaciones de alta resistencia especialmente aleaciones de las series 7xxx tales como 7x75, 7010, 7040, 7x49, 7050, 7085 y otros, las tensiones de deformación y las presiones de forja, son considerablemente mayores que las de los aceros al

carbono. Finalmente, otras aleaciones de aluminio, tales como 2219, tienen tensiones de deformación bastante similares a los de aceros al carbono (ASM, 2005).

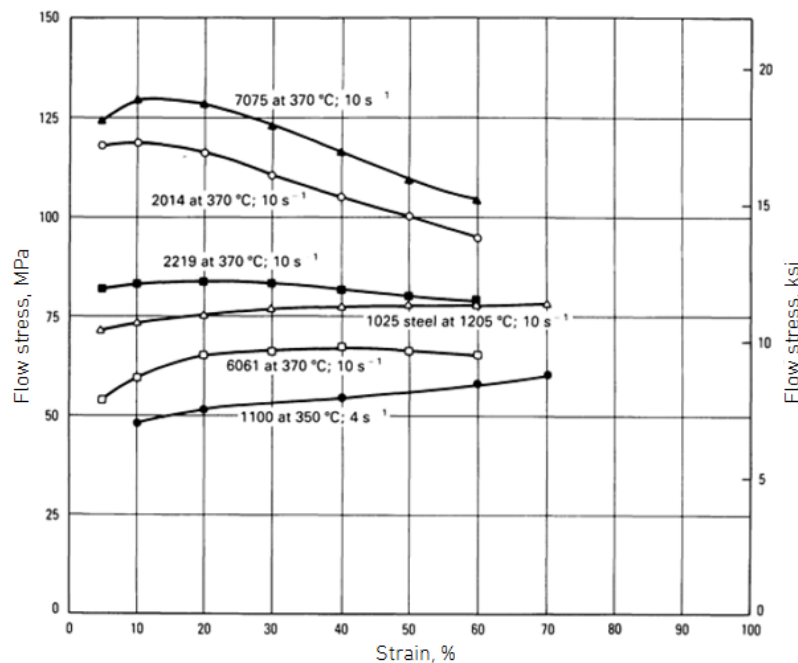


Figura 2.26 Flujo de esfuerzos de aleaciones de aluminio forjadas y del acero 1025 a temperaturas de forjado y varios niveles de deformación total.¹⁵

2.6.2.5.1. Forjabilidad

Comparando a las aleaciones basadas en níquel/cobalto y las aleaciones de titanio, las aleaciones de aluminio son considerablemente más forjables, especialmente cuando usan procesos técnicos de forjado convencionales donde los troqueles son calentados a 540 °C (1000 °F) o menos. La figura 2.27 ilustra la relativa forjabilidad de aleaciones de aluminio que constituyen la mayoría de la producción de aleaciones de aluminio forjadas.

Esta unidad arbitraria está basada principalmente en la deformación por unidad de energía absorbida en el rango de temperaturas de la pieza de trabajo forjada

¹⁵ Fuente: (ASM, 2005)

típicamente empleadas para las aleaciones en cuestión. También consideramos en este índice la dificultad de lograr los grados específicos de gravedad en la deformación, así como la tendencia al agrietamiento de la aleación bajo condiciones del proceso de forja dado (ASM, 2005).

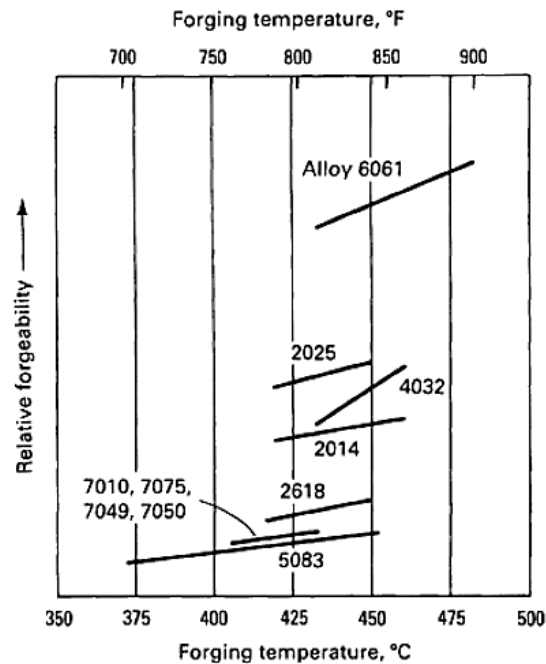


Figura 2.27 Forjabilidad y temperaturas de forjado de distintas aleaciones de aluminio¹⁵

Hay aleaciones de aluminio, tales como 1100 y 3003, cuya forjabilidad estaría clasificada significativamente superior a la de las aleaciones presentadas; sin embargo, estas aleaciones tienen una limitada aplicación en productos forjados porque ellas no pueden ser reforzadas por tratamientos térmicos.

2.6.2.5.2. Efecto de la Temperatura

Como se muestra en la Fig. 2.27, la forjabilidad de las aleaciones de aluminio mejora con el incremento de la temperatura del metal. Sin embargo, hay una considerable variación en el efecto de la temperatura para las aleaciones graficadas. Por ejemplo, la aleación con alto contenido de silicio 4032 muestra el mayor efecto

de la temperatura, mientras que la aleación de alta resistencia AL-Zn-Mg-Cu de las series 7xxx muestran un menor efecto de la temperatura.

La Fig. 2.28 presenta el efecto de la temperatura en la tensión de deformación, en una tasa de deformación de 10 s^{-1} para la aleación 6061, una altamente y ampliamente usada aleación de aluminio (ASM, 2005).

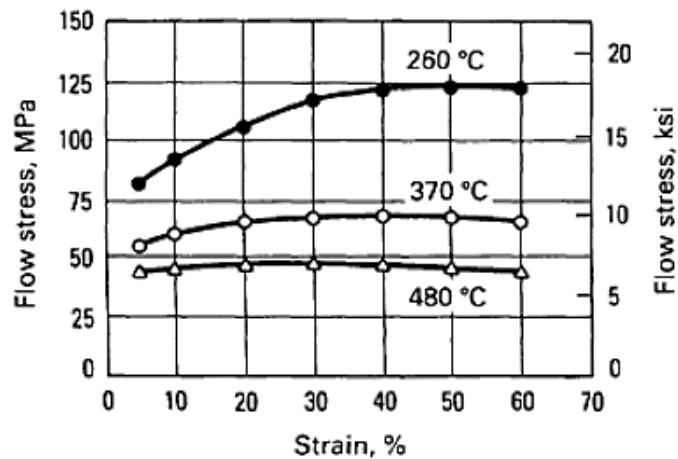


Figura 2.28 Flujo de esfuerzos versus tasa de deformación para la aleación 6061 a tres temperaturas y una tasa de deformación 10 s^{-1}

Hay una disminución cercana al 50% en la tensión de deformación para la temperatura más alta del metal graficado, 480 °C (900 °F), la más alta del rango recomendado para forjar 6061, cuando se compara con la temperatura de la pieza de trabajo de 370 °C (700 °F), la que está debajo de la temperatura mínima de forja del metal recomendada para el 6061. Para otras, más difíciles aleaciones para forjar, tales como las series 2xxx y 7xxx, el cambio en la tensión de deformación con la variación de la temperatura de la pieza de trabajo es incluso más grande, ilustrando la principal razón de por qué forjar aleaciones de aluminio requiere mantener relativamente estrecho los rangos de temperatura del metal.

Los rangos de temperatura recomendados en el forjado de metales para el aluminio, junto con las aleaciones recientemente desarrolladas, están listadas en la Tabla 2.16. Todas estas aleaciones son generalmente forjadas a la misma intensidad, incluso algunas aleaciones pueden requerir más poder de forjado y/o más operaciones de forjado que otros.

El rango de temperatura de precalentamiento para el metal forjado para la mayoría de aleaciones es relativamente estrecho, generalmente $<55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($<100\text{ }^{\circ}\text{F}$), y para ninguna aleación este rango es mayor que $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($155\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Lograr y mantener apropiadamente las temperaturas de precalentamiento del metal en el forjado de las aleaciones de aluminio es una crítica variable del proceso que es vital para el éxito del proceso de forjado. Sin embargo, las temperaturas del dado y la tasa de deformación juegan un rol clave en determinar la temperatura real del metal de la pieza de trabajo lograda durante la secuencia de deformación del forjado.

Tabla 2.16 Rangos de Temperatura de Forjado recomendados para Aleaciones de Aluminio

Aleaciones de Aluminio	Rango de Temperatura de Forjado	
	° C	° F
1100	315-370	600-700
2011	440-490	825-915
2014	420-460	785-860
2025	420-450	785-840
2219	425-470	800-880
2618	410-455	770-850
3003	315-370	600-700
4032	415-460	780-860
5083	405-460	760-860
6061	430-480	810-900
6069	440-490	825-915
6556	440-490	825-915
7010	370-445	700-830
7033	380-440	720-830
7039	380-440	720-830
7040	360-440	680-820
7049	360-440	680-820
7050	360-440	680-820
7068	360-440	720-820
7075	360-440	720-820
7175	360-440	720-820
7085	360-440	680-820

Fuente: (ASM, 2005)

2.6.2.5.3. El Efecto de la Tasa de Deformación.

Las aleaciones de aluminio forjadas son producidas en una amplia variedad de equipos de forja. La deformación o velocidad de deformación impartida al deformar metal varía considerablemente, desde muy rápido (por ejemplo, $\geq 10 \text{ s}^{-1}$ en equipos como martinets, prensas mecánicas, prensas de tornillo y las máquinas con altas tasas de energía) hasta relativamente lentas (por ejemplo, $\leq 0.1 \text{ s}^{-1}$ en equipos tales como prensas hidráulicas). Por lo tanto, la deformación o la velocidad de deformación es también un elemento crítico del proceso que debe ser controlado para un exitoso forjado de alguna aleación dada y la configuración de la forja.

En la figura 2.30 se presenta el efecto de dos velocidades de deformación, 10 y 0,1 s⁻¹ en las tensiones de deformaciones de dos aleaciones de aluminio, 6061 y 2014 en 370 °C (700 °F). Está claro que a mayores velocidades de deformación incrementa las tensiones de deformación de aleaciones de aluminio y que el incremento en la tensión de deformación con el incremento de la velocidad de deformación es más grande para aleaciones más difíciles de forjar, tales como las series 2xxx y 7xxx.

Para 6061, la más altamente aleación forjable, el incremento en la tensión de deformación con la rápida velocidad de deformación es del orden de 70%; para 2014, la más alta tasa de deformación virtualmente dobla la tensión de deformación.

Aunque las aleaciones de aluminio no se considera generalmente que es tan sensible a la tasa de deformación, como otros materiales, tales como las súper aleaciones con base de titanio y cobalto/níquel, la selección de tasas de deformación en un procesos de forja dado o las diferencias en las tasas de deformación inherentes en varios tipos de equipos afectan la presión de forja requerida, la dificultad de la deformación posible, y por lo tanto la sofisticación de la parte a forjar que puede ser producida.

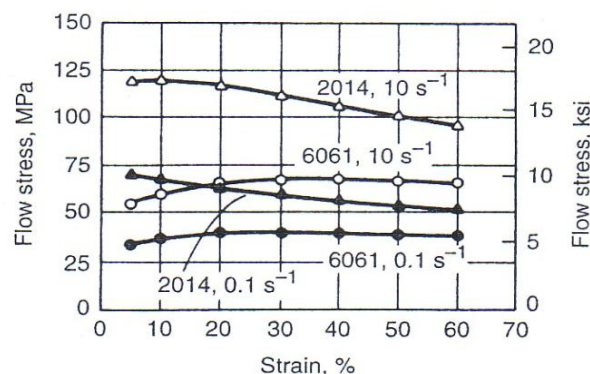


Figura 2.29 Flujo de esfuerzos vs. tasa de deformación para aleaciones de aluminio 2014 y 6061 a 370 °C (700 °F) y a dos diferentes tasas de deformación¹⁵.

Además de influir en la tensión de deformación de la aleación a ser forjada, la tasa de deformación durante el proceso de forjado también puede afectar la temperatura de la pieza de trabajo. La mayoría de aleaciones de aluminio a ser forjadas son susceptibles a deformación en caliente en procesos de forja de trabajo en caliente. El grado de deformación en caliente depende de las aleaciones específicas y de las condiciones de la tasa de deformación, con una tasa de deformación rápida, por ejemplo, mayor que 10 s^{-1} , induciendo mayores cambios (aumentos) en la temperatura de la pieza de trabajo. Algunas aleaciones de alta resistencia de la serie 7xxx son intolerantes a los cambios de temperatura posibles en tasas de deformación de forjado, y como consecuencia este tipo de equipos no son empleados en la fabricación de forjas en estas aleaciones (ASM, 2005).

2.6.2.5.4. Efectos de la Temperatura del Dado

A diferencia de algunos procesos de forjado para aceros al carbono y aleaciones, los troqueles utilizados en virtualmente todos los procesos de forja en caliente para las aleaciones de aluminio se calienta con el fin de facilitar el proceso de forjado. Por lo tanto, la temperatura del dado es otro elemento crítico del proceso que afecta la forjabilidad y la optimización del proceso de forjado en esta clase de aleación.

La Tabla 2.17 resume los rangos de la temperatura del dado normalmente utilizado para varios procesos de forja de aluminio y tipos de equipos para forjar. El factor crítico de temperatura del troquel en la optimización del proceso de forja depende del equipo de forja que se emplea, la aleación a forjar, la dificultad de la deformación, y / o la sofisticación del diseño de forja. Para procesos

de deformación más lentos, tales como la forja con prensa hidráulica, la pieza de trabajo de aleación de aluminio rápidamente asume la temperatura de los troqueles. Como consecuencia, la temperatura del dado controla la temperatura real de la pieza de trabajo durante la deformación.

De hecho, las aleaciones de aluminio forjadas en prensas hidráulicas son isotérmicamente forjadas; es decir, la pieza de trabajo y el troquel están a la misma temperatura durante la deformación. Por lo tanto, las temperaturas recomendadas de troqueles utilizados para aleaciones de aluminio forjado en prensa hidráulica son mucho mayores que los típicos de los procesos de deformación más rápida, tales como martinets y prensas mecánicas o de tornillo (ASM, 2005).

Tabla 2.17 Rangos de temperatura del troquel para el forjado de aleaciones de aluminio

Proceso de Forjado / Equipo	Temperatura del troquel	
	°C	°F
Forjado en troquel abierto		
Ring rolling	95-205	200-400
Mandrel forging	95-205	200-400
Forjado en troquel cerrado		
Hammers	95-150	200-300
Upsetters	150-260	300-500
Mechanical presses	150-260	300-500
Screw presses	150-260	300-500
Orbital (rotary) forging	150-260	300-500
Spin forging	150-315	200-600
Roll forging	95-205	200-400
Hydraulic presses	315-430	600-800

Fuente: (ASM, 2005)

2.6.3. EL COBRE Y SUS ALEACIONES

2.6.3.1. Composición del cobre comercial

Las especificaciones estándares de la ASTM para el cobre son las generalmente aceptadas por la industria. También se refieren al cobre con liga de plata.

El cobre de baja resistencia eléctrica, usado como conductor, suele refinarse por medios electrolíticos o al fuego.

La especificación ASTM B216-78, *Fire-Refined Copper for Wrought Products and Alloys*, indica el siguiente análisis: Cu + Ag, mín 99.88%; As, máx 0.012%; Sb, máx 0.003%; Se + Te, máx 0.025%; Ni, máx 0.05%; Bi, máx 0.003%; Pb, máx 0.004%.

El cobre de alta conductividad libre de oxígeno es un material sumamente dúctil, manufacturado en condiciones que impiden la entrada de oxígeno y la formación de óxido de cobre.

Se utiliza en operaciones de embutido profundo, contorneado y doblado sobre el borde, así como en soldaduras ordinaria y fuerte y otras operaciones de trabajo en caliente en las que debe evitarse la fragilización. Tiene las mismas propiedades de conductividad y tensión que el tenaz cobre electrolítico.

El cobre desoxidado que contiene plata se ha utilizado para incrementar la resistencia a la suavización del cobre, pero no modifica la concentración de oxígeno. Varios elementos que reducen el oxígeno en este metal (como Zr, Cr, B y P) también producen una cierta resistencia al suavizado. Texto tomado (Kutz, 1990).

Tabla 2.18 Propiedades mecánicas del cobre

	Recocido	Laminado o estirado en frío	Colado
Resistencia última a la tensión lb/pulg² (MPa)	30 000-40 000 210-280	50 000-70 000 350-490	20 000-30 000 140-210
Elongación en 2 pulg.	25-40%	2-35%	25-45%
Reducción de área	40-60%	2-4%	-
Dureza Rockwell F	65máx	54-100	-
Dureza Rockwell 30T	31máx	18-70	-

Fuente: (Kutz, 1990)

Tabla 2.19 Propiedades físicas del cobre

Propiedades físicas del cobre		
Densidad	0.323 lb/pulg³	8.94 g/cm³
Punto de fusión	1981 °F	1083 °C
Coeficiente de dilatación térmica lineal	0.0000094/°F (68-212 °F)	0.0000170/°C (20- 100 °C)
	0.0000097/ °F (68-392 °F)	0.0000174/°C (20- 200 °C)
	0.0000099/°F (68-572 °F)	0.0000178/°C (20- 300 °C)
Grado de contracción	¼ pulg/pie	2%
Conductividad térmica	226 Btu. Pie/pie ² /h/°F A 68 °F	398 W/m. °C A 27 °C
Resistividad eléctrica	10.3Ω CM/pie A 68 °F	1.71 μΩ/cm A 20 °C
Coeficiente térmico de resistencia eléctrica	0.023 Ω/°F A 68 °F	0.0068/°C A 20 °C
Calor específico	-	0.386 J/g. °C
Propiedad magnética		Diamagnético
Propiedad óptica		Selectivamente reflejante
Módulo de Young, de elasticidad axial	17300 000 lb/pulg ²	119 300 MPa

Fuente: (Kutz, 1990)

2.6.3.2. Endurecimiento del cobre

Existen tres métodos para endurecer el cobre: control del tamaño de grano, trabajo en frío y aleación. Cuando el cobre se endurece con estaño, silicio o aluminio, generalmente se llama bronce, cuando se endurece con cinc, se denomina latón.

2.6.3.3. Corrosión

El cobre es resistente a la acción del agua de mar y a la corrosión atmosférica. No es resistente a los ácidos comunes, ni es satisfactorio en el trabajo con amoníaco y con la mayor parte de los compuestos de azufre. Por tanto, es necesario consultar al fabricante antes de emplear cobre en condiciones corrosivas (Kutz, 1990).

2.6.3.4. Manufactura

El cobre se puede forjar, extruir o perforar en caliente, laminar en caliente o en frío, y estirar, troquelar o contornear en frío. También puede someterse a soldadura ordinaria o con plata o latón (de aporte fuerte). Para la soldadura de aporte fuerte en atmósfera reductora o para la soldadura autógena con soplete de oxiacetileno o al arco eléctrico, el cobre desoxidado producirá uniones más satisfactorias que el electrolítico o el aleado con plata. Si un cobre que contenga oxígeno se expone a altas temperaturas en una atmósfera reductora, el óxido de cobre se altera y se forma vapor, con la resultante fragilización. El cobre se recuece a temperaturas que van de 480 a 1400 °F. Las atmósferas inertes o reductoras producen la mejor calidad de las superficies; sin embargo, el recocido a altas temperaturas de cobre que contenga oxígeno, en una atmósfera reductora, puede causar fragilización (Kutz, 1990).

2.6.3.5. Aleaciones de Cobre

Las piezas de cobre y de aleaciones forjadas de cobre ofrecen un número de ventajas sobre las partes producidas por otros procesos, incluidos de alta resistencia como resultado de trabajo, tolerancias más cerradas que los competentes procesos tales como fundición en arena, y un modesto costo general. La mayoría de aleaciones de cobre forjables, latón forjado (UNS C37700), pueden ser forjadas en una forma dada con substancialmente menos fuerza que la requerida para forjar la misma forma en aceros de bajo carbono. Una aleación de cobre menos forjable, tal como el bronce de aluminio, puede ser forjada con aproximadamente la misma fuerza que la requerida para acero de bajo carbono (ASM, 2005).

2.6.3.5.1. Productos Forjados

Las piezas forjadas a base de cobre exhiben una alta resistencia como resultado de su textura fibrosa, tamaño de grano fino, y la estructura. Estos pueden ser hechos para tolerancias más cerradas y con acabados superficiales más finos que los colados en arena, mientras que las piezas forjadas son algo más caras que las coladas en arena, su costo puede ser justificado en su solidez y generalmente mejores propiedades.

Tolerancias en forjados de troquel cerrado pueden ser tan estrechas como ± 0.25 mm (± 0.01 in) a veces más cerradas para forjas de pequeños y mediano tamaño. Pequeños ángulos de salida pueden ser fácilmente acomodados dentro de estos límites de tolerancias.

Piezas de forja de latón son comúnmente utilizados en válvulas, accesorios, componentes de refrigeración y otros gases de alta y baja presión y productos de

manejo de líquidos. Forjados de alta resistencia de bronce son utilizados para productos mecánicos, tales como engranes, cojinetes y bombas hidráulicas.

2.6.3.5.2. Procesos de Forjado

La mayoría de piezas forjadas de aleaciones de cobre son producidas en troqueles cerrados. El forjado de troquel abierto es utilizado cuando:

- El producto es demasiado largo para ser producido en un troquel cerrado.
- Las propiedades mecánicas no pueden ser obtenidas con otro proceso de deformación.
- El tiempo de producción o el costo de troqueles cerrados es prohibitivo.

Un estimado del 90% de los latones forjados son producidos en caliente, en troqueles cerrados con uno o dos golpes. Formas complejas o partes largas pueden necesitar múltiples operaciones en la que la pieza de trabajo es progresivamente deformada a su configuración final.

Esta secuencia de operaciones es la misma utilizada para forjar una forma similar de acero, que es llenado, bloqueado y acabado como se requiere.

Para formas más simples producidas por uno o dos golpes, el tocho inicial es usualmente cortado de barras extruidas o tubos para eliminar las operaciones de bloqueo.

Forja de Recalcado es ampliamente aplicada a aleaciones de cobre debida a que los materiales son fácilmente extruidos. Un clavo de cobre puede ser hecho al extruir un eje de la cabeza, mientras el acero requiere recalcar la cabeza del eje. Algunos productos se benefician de las operaciones de recalcado, y dichas operaciones

pueden ser aplicadas a aleaciones de cobre. Las piezas forjadas de latón pueden ser recaladas como máximo tres veces el diámetro inicial, aunque el recalado permitido para otras aleaciones de cobre es menor.

En el recalado de aleaciones de cobre, la misma regla aplica para la máxima longitud sin soporte como la utilizada para aceros, que es, no más de tres veces el valor del diámetro. Para el forjado de latones, un golpe único recalca tanto como 3 a 1 (recalca tres veces el diámetro inicial) es considerado razonable. En la práctica, sin embargo, recalados de esta dificultad son raros. El grado de recalado permitido para otras aleaciones de cobre es menor que el de latones forjados, generalmente en proporción a la forjabilidad (Tabla 2.20).

En la mayoría de los diseños, la cantidad de recalado puede ser reducida al usar tochos cortados a partir de extrusiones de forma especial o al usar uno o más impresiones de bloqueo en la secuencia de forjado.

Tabla 2.20 Rangos de forjabilidad relativa de las aleaciones de cobre comúnmente forjadas.

Aleación	Composición Nominal	Forjabilidad Relativa, %(a)	Temperatura de Forjado	
			°C	°F
C10200	99.95 Cu min	65	730-845	1350-1550
C10400	Cu-0.027 Ag	65	730-845	1350-1550
C11000	99.99 Cu min	65	730-845	1350-1550
C11300	Cu-0.027 Ag + O	65	730-845	1350-1550
C14500	Cu-0.65 Te-0.90 Cr-0.10	65	730-845	1350-1550
C18200	Cu-0.10 Fe-0.90 Cr-0.10	80	730-845	1350-1550
C35300(b)	Cu-36Zn(Sb)	50	750-800	1380-1450
C37700(b)	Cu-38Zn-2Pb	100	650-760	1200-1380
C46400(b)	Cu-39 2Zn-0.85Sn	90	600-700	1100-1300
C48200	Cu-38Zn-0.7Pb	90	650-760	1200-1400
C48500	Cu-37.5Zn-1 8Pb-0.7Sn	90	650-760	1200-1480
C62300	Cu-10Al-3Fe	75	700-875	1300-1600
C63000	Cu-10Al-5Ni-3Fe	75	800-925	1450-1700
C63200	Cu-9Al-5Ni-4Fe	70	825-900	1500-1650
C64200	Cu-7Al-1.8Si	80	700-870	1300-1600
C65500	Cu-3Si	40	700-875	1300-1600
C67500(b)	Cu-39Zn-1.4Fe-1Si-0.1Mn	80	625-750	1150-1450
C71500(b)	Cu-30Ni-0.5Fe	60	675-800	1250-1450

(a) Se toma en consideración presión, uso del troquel, y la plasticidad en caliente. La clasificación es relativa a la aleación más forjable, latón forjado (C37700).

(b) Aleación importante comercialmente.

Fuente: (ASM, 2005)

2.6.3.6. Aleaciones de cobre para forjar

Comúnmente las aleaciones forjadas de base de cobre son mostradas en la tabla 2.20. Los designados por el pie de página “b” son el 90% de todas las aleaciones comerciales forjadas de base de cobre. El latón C37700, es la aleación de forja más común, es considerado como la norma y está dado un rango arbitrario de forjabilidad de 100; sin embargo, todas las aleaciones enlistadas en la tabla soportan apreciable deformación en caliente sin agrietarse.

Algunas aleaciones de cobre no pueden ser forjadas para ningún grado significativo, debido a que estas se agrietan. Aleaciones de cobre-zinc con plomo, tal como el bronce arquitectónico, los que pueden contener más que 2,5% Pb, son ampliamente recomendadas para forjado en caliente. Aunque el contenido de plomo mejora el flujo del metal, este promueve el agrietamiento en las áreas de forjado, particularmente en las áreas de extruido-profundo que no son completamente soportadas al ser encerradas en los troqueles. Esto no significa que las aleaciones con contenido de plomo no puedan ser forjadas, sino que el diseño del forjado puede tener que ser modificado para evitar el agrietamiento.

Cobre-níquel, bronce de silicio, y otras aleaciones son también forjados; sin embargo, estas aleaciones son más difíciles y más costosas para forjar que los latones. Aleaciones de cobre-níquel que tienen altas temperaturas para forjar deben ser calentadas en una atmósfera controlada, lo que complica el proceso.

Bronces de silicio necesitan alta temperatura de forjado y altos esfuerzos de forjado. Ellos tienden a causar más rápida deterioración del troquel que la común aleación de forjado.

Menores cantidades de elementos adicionales pueden influenciar el comportamiento del forjado. Si estos son insolubles a temperaturas de forjado, estos pueden causar un menor calentamiento. El plomo por ejemplo es soluble arriba del 2,0% en latones beta en todas las temperaturas y el contenido tan alto como 2,5% son permisibles en latones dúplex de Cu-40%Zn. Por otra parte, más que 0,10% Pb en un latón alfa Cu-30%Zn puede llevar a un agrietamiento catastrófico a alta temperatura. Como regla general, latones aplomados muestran mejor forjabilidad si sus contenidos betas son mayores que 50%.

Las temperaturas de forjado que varían con la composición de la aleación entre un rango de la temperatura de recristalización de las aleaciones y la temperatura inicial de fusión ocurre una falta de calentamiento.

Las temperaturas máximas de forjado son también limitadas por la oxidación, pérdida de componentes de la aleación a través de la sublimación, y excesivo tamaño de grano. Para latones y bronce, el rango va desde 595 a 925 °C (1100 1700 °F).

El equilibrio del cobre-zinc se muestra en la Fig. 2.31 delineados rangos de temperatura de forjado para varios latones. La fase beta mejora la forjabilidad en caliente, por lo tanto, el alto contenido de Zinc, por ejemplo, en todas las aleaciones pueden ser forjadas más fácilmente que todas las aleaciones alfa y dúplex.

Por otra parte los latones beta y dúplex puede sufrir un frágil crecimiento del grano durante el excesivo tiempo de calentamiento en la región beta. Otros elementos aleantes que pueden ser considerados en términos de su “equivalencia de zinc” por ejemplo, cuanto de esto originan la formación de beta.

Latones de bajo contenido de zinc (alfa) pueden ser forjados si estos están libres de impurezas. En adición, estos requieren más altos esfuerzos que los latones dúplex o beta para deformaciones equivalentes (ASM, 2005).

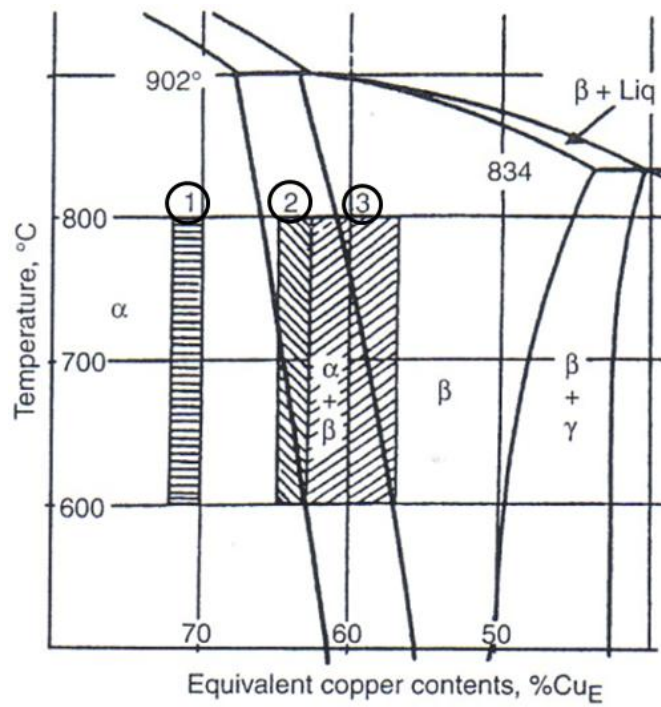


Figura 2.30 Regiones de fase a temperaturas de forjado: 1. Latón; 2. Latón zinc (C99400, C99500); 3. Latón Forjado (C37700)¹⁵

2.7. SISTEMAS AUTOMÁTICOS EN PROCESOS DE MANUFACTURA

2.7.1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los procesos de fabricación en la industria actual son automatizados. La automatización se define como el proceso de habilitación de las máquinas para seguir una secuencia predeterminada de operaciones con poca o ninguna mano de obra humana, utilizando dispositivos que realizan y controlan los procesos de manufactura.

La automatización total se logra mediante diversos dispositivos, sensores, actuadores, técnicas y equipo que tienen la capacidad de (a) supervisar todos los aspectos de la operación de manufactura; (b) tomar decisiones respecto de los cambios que deben hacerse en la operación, y (c) controlar todos sus aspectos.

La automatización en las plantas de manufactura se ha implementado sobre todo en las siguientes áreas:

- Procesos de manufactura: las operaciones de maquinado, forjado, extrusión en frío, fundición, metalurgia en polvos y rectificado.
- Manejo y movimiento de materiales: Los materiales y partes en diversas etapas de terminación se movilizan a través de una planta mediante un equipo controlado por computadora, con poca o ninguna guía humana.
- Inspección: Se inspeccionan automáticamente la precisión dimensional, el acabado superficial, la calidad y las diversas características específicas de las partes mientras se fabrican.

- **Ensamble:** Las partes manufacturadas individualmente y los componentes se ensamblan de manera automática como subensambles y ensambles para armar un producto.
- **Empaque:** Los productos se empaican automáticamente para su envío.

La combinación de la inteligencia de autómatas programables con accionadores industriales, permite que se automatice un gran número de procesos liberando al ser humano tanto de tareas de complicación intelectual como de realizar esfuerzos sustituidos por accionadores electromecánicos, neumáticos, etc.

2.7.2. PARTES DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO

Los elementos que componen una instalación automatizada son:

- a. **Máquinas:** Es donde se realiza los procesos, los traslados y las transformaciones de los productos.
- b. **Accionadores:** Están acoplados a máquinas para realizar movimientos, calentamientos. Son motores de corriente continua, de corriente alterna, cilindros neumáticos. Dentro de los accionadores tenemos:

- **Accionadores eléctricos**

Se utilizan como fuente de energía, la eléctrica y toman muy diferentes formas como son: válvulas eléctricas, motores eléctricos de velocidad variable, motores de velocidad fija, resistencias de calentamiento, cabezas de soldadura, cabeza de corte por láser.

- **Accionadores neumáticos**

Utilizan como fuente de energía el aire comprimido. Este se obtiene por medio de un grupo compresor y luego se distribuye por la fábrica a las

máquinas que lo utilizan. Los accionadores neumáticos son principalmente cilindros. Se utilizan básicamente en movimientos lineales cortos que se producen, por ejemplo, en operaciones de transferencia, ensamblajes, aprietes, marcados.

- Accionadores hidráulicos

Estos son utilizados cuando los esfuerzos a desarrollar son muy elevados (prensas de corte) o cuando velocidades lentas deben ser controladas con precisión.

c. Pre-accionadores: Son utilizados para comandar y activar los accionadores.

- Pre-accionadores eléctricos:

Contactores y variadores de velocidad

- Pre-accionadores neumáticos:

Son distribuidores asociados a los cilindros. Reciben una señal neumática o eléctrica como mando (electroválvulas).

d. Captadores: Son elementos que informan al órgano de mando del estado del sistema o de los eventos que sucedan en él. Los captadores reciben las señales necesarias para conocer el estado del proceso y decidir su desarrollo futuro. Detectan posición, presión, temperatura, caudal, velocidad, aceleración.

e. Elementos de diálogo hombre-máquina: Permiten el dialogo entre el operador y la unidad de control. Por ejemplo: pilotos, pulsadores, teclados, visualizadores.

f. Elementos de mando: Son los elementos de cálculo y control que comandan el proceso. Suelen ser autómatas programables u computadores de control industrial.

2.7.3. SISTEMAS AUTOMATIZADOS

Una forma clásica de abordar el estudio de los sistemas automatizados es la división entre parte de mando y parte operativa.

- La parte operativa es la que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación. Forman parte de ella los accionadores de las máquinas como son: motores de corriente continua, motores de corriente alterna, cilindros neumáticos, accionadores hidráulicos, compresores, bombas.
- La parte de mando es un autómata programable. En un sistema de sistema automatizado el autómata programable está en el centro del sistema. El autómata programable es capaz de comunicarse con todos los constituyentes del sistema automatizado.

El autómata elabora acciones a realizar sobre el sistema de fabricación en base al programa que sea introducido en su memoria, en base a las señales de los captadores, en base a los ordenadores que provenga del ordenador.

2.7.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN

Esta clasificación de los sistemas de automatización se divide en: sistemas de fabricación automáticos y sistemas automáticos de apoyo a la fabricación.

a. Sistemas de Fabricación Automáticos

Dentro de estos tenemos:

- *Automatización Rígida (Hardautomation)*

En la automatización rígida las máquinas están diseñadas para producir un producto estándar como un engrane o una flecha. Aunque el tamaño del producto y los parámetros de procesamiento se pueden cambiar, estas máquinas carecen de flexibilidad.

No es posible modificarlas para acomodar productos con diferentes formas y dimensiones. Por lo general, las máquinas utilizadas en aplicaciones de automatización rígida se construyen con base en el principio modular. Se conocen como máquinas de transferencia y constan de dos componentes principales: unidades de producción de cabezales de potencia y mecanismos de transferencia.

Unidades de producción de cabezales de potencia. Consta de un bastidor, motores de accionamiento eléctrico, cajas de engranes y husillos de herramienta.

Mecanismos de transferencia. Se utilizan para mover la pieza de trabajo de una estación a otra dentro de la máquina o de una máquina a otra, a fin de permitir la realización de diversas operaciones. Las piezas se transfieren mediante los siguientes métodos: (a) rieles, a lo largo de los cuales se empujan las partes, (b) mesas giratorias de indización, y (c) transportadores o bandas transportadoras aéreas.

Por lo general la transferencia de las partes de una estación a otra se controla mediante sensores y otros dispositivos.

Características generales (las de sistemas de producción “en masa”):

- Gran inversión inicial en equipos a medida.
 - Altas tasas de producción.
 - Relativamente inflexible a la hora de acomodar variaciones.
 - Su uso está justificado cuando se requieren altas tasas de producción,
 - El elevado coste inicial se distribuye en las múltiples uds. fabricadas.
- *Automatización por Programación*

También conocida como automatización flexible, esta logra mayor flexibilidad mediante el uso del control por computadora de la máquina y sus funciones; por lo tanto se pueden producir partes de formas complejas. Características generales:

- Alta inversión en equipos de propósito general.
- Tasas de producción inferiores a la Automatización Fija.
- Flexibilidad para acomodar tratar con variaciones en el diseño y la configuración del producto.
- Adecuado para los sistemas de producción por lotes.

b. Sistemas Automáticos de apoyo a la Fabricación

- Objetivo: reducir el esfuerzo humano en
 - Diseño de productos.
 - Planificación y Control de la producción.
 - Tareas de gestión del negocio.
- Computer Aided Manufacturing (CIM)
 - Engloba todas las aplicaciones que automatizan las tareas de apoyo.
 - Incluye
 - CAD: diseño del producto
 - CAM: diseño de proceso a partir del producto
 - CAD/CAM: integración de ambos en un solo programa.
 - También tiene en cuenta las funciones de gestión: ERP(Enterprise ResourcePlanning).
 - En general $CIM=CAD+CAM+(Autom. \text{ de la gestión})$.

Texto tomado de (Gómez, 2005)

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS ÓPTIMA

3.1. DETERMINACIÓN PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO Y REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO DE RECALCADO

3.1.1. REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO

Para realizar un diseño satisfactorio es necesario realizar el listado de los requerimientos que el usuario (ingeniero y estudiantes de procesos de manufactura) desea para el funcionamiento del equipo, dichos requerimientos se presentan a continuación:

- Como el equipo va a ser utilizado en el laboratorio no requiere una alta velocidad de producción.
- El calentamiento de las probetas debe ser de fácil uso y seguro.
- El equipo de punzonado y calentamiento no debe ocupar un espacio físico más de 2 m².
- Utilizar materiales para las probetas disponibles en el mercado y de baja resistencia a la deformación.
- Realizar el recalcado de elementos conocidos para la mejor comprensión del proceso.

3.1.2. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

En función a las necesidades planteadas en los requerimientos procedemos a establecer los parámetros de funcionamiento del equipo:

- Dentro del proceso de recalado una variable a tener en cuenta es la velocidad de conformación razón por la cual la prensa debe tener un sistema que permita regular la velocidad de punzonado, además de ser de fácil uso para los estudiantes de procesos de manufactura.
- El sistema de calentamiento debe tener la capacidad de controlar el rango de temperatura de trabajo ya que va a trabajar con distintos materiales por lo tanto a distintos rangos de temperatura.
- Los materiales a utilizar para las probetas serán aleaciones metálicas no ferrosas.
- Dentro de las diversas formas que nos presenta el proceso de recalado se escogerá la forma de la cabeza hexagonal, esta forma es muy común dentro del campo de la mecánica por lo tanto resulta interesante el análisis de las variables de conformación de este elemento. El semirproducto tendrá las medidas que se indican en la figura 3.1.

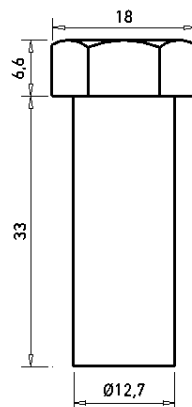


Figura 3.1 Medidas del producto recalado. Medidas en milímetros.

3.2. ANÁLISIS DE LA ALTERNATIVA MÁS ÓPTIMA

3.2.1. SISTEMAS PARA EL EQUIPO DE PUNZONADO

3.2.1.1. Sistema mecánico

Este sistema consiste básicamente en un mecanismo biela manivela como se muestra a continuación (fig.3.2).

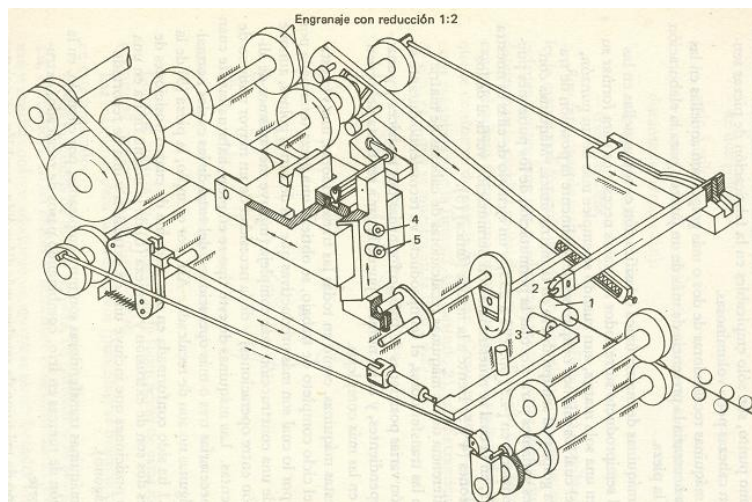


Figura 3.2 Esquema cinemático de una prensa de recalar de matriz única y doble efecto. Herramientas principales: 1, cuchilla redonda; 2, cuchilla plana; 3, matriz; 4, punzón recalcado previo; 5, punzón de recalcado final.¹⁶

Características de las prensas mecánicas:

- Las prensas mecánicas tienen altas velocidades de producción.
- Son fáciles de automatizar.
- Requieren menos habilidad por parte del operador.
- Requieren un mantenimiento periódico de la mayoría de sus elementos constitutivos.
- Producen mayor desgaste sobre las matrices.

¹⁶ Fuente: (Gallardo, 1996).

- Dificultad para controlar la velocidad de avance del punzón.
- Generan grandes presiones de punzonado. Las capacidades de la prensa van de 2.7 a 107 MN (300 a 12000 Toneladas cortas).

3.2.1.2. Sistema hidráulico

Este sistema consiste básicamente en un bastidor (marco de forja) con 2 o 4 columnas, pistones, cilindros, arietes, y bombas hidráulicas accionadas por motores eléctricos, como se muestra en la figura 3.3.

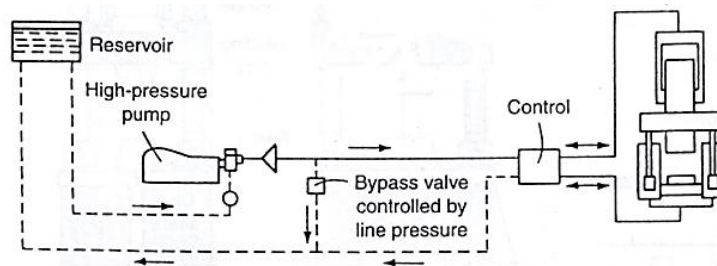


Figura 3.3 Esquema del sistema de prensa hidráulica¹⁷

El funcionamiento de este tipo de prensas es simple y se basa en el movimiento de un pistón hidráulico guiado por un cilindro.

Características prensa hidráulica:

- Las prensas hidráulicas son más lentas.
- Costos iniciales más altos.
- Requieren menor mantenimiento.
- Facilidad de montaje de todos sus elementos y de automatización sencilla.
- Las capacidades de prensado van de 125 MN (14000 Toneladas cortas) para forjado de matriz abierta, hasta 450 MN (50000 Toneladas cortas).

¹⁷ Fuente: (ASM, 2005)

- La carga máxima de la prensa está disponible en cualquier momento durante la carrera del pistón.
- La presión y la velocidad pueden ser reguladas según se desee en cualquier punto de la carrera del cilindro.
- La acción suave de aplastamiento de una prensa hidráulico resulta en menores costos de mantenimiento y el aumento de la vida del troquel debido al menor choque en comparación con otros tipos equipos de forja.

3.2.2. SISTEMAS PARA EL EQUIPO DE CALENTAMIENTO DE LA PROBETA.

3.2.2.1. Sistema de calentamiento por horno de combustión

En el sistema de calentamiento por medio de combustible líquido o gas se realiza mediante la combustión en un quemador. Los gases de la combustión entregan su calor mediante radiación o convección. El calentamiento para el recalcado en caliente se utiliza hornos con calentamiento por radiación mediante gases.

Cuando se trabaja con barras, se utilizan hornos de cámara y hornos de ranuras, como hornos pequeños de forjar. El horno de ranuras consiste en una cámara que se calienta desde arriba, figura.2.25. Las paredes laterales están provistas de ranuras o agujeros para la introducción de las barras. La cámara se apoya sobre una columna y es giratoria para que la barra calentada pueda girarse hacia la mesa de servicio y para que pueda extraerse una barra calentada e introducirse otra fría.

Características hornos de combustión:

- Alcanza altas temperaturas de calentamiento.
- Alta seguridad de operación.
- Menor tiempo de calentamiento de las probetas.
- Difícil control de calentamiento.
- Genera gases de combustión.
- Costos relativamente bajos de construcción.
- Mantenimiento periódico.

3.2.2.2. Sistema de calentamiento por horno de resistencia

Estos hornos constan en esencia de una cámara con revestimiento cerámico, su envolvente metálica, las resistencias puestas en las paredes laterales, en la puerta y en la bóveda, también tiene un mecanismo de regulación y accionamiento de la temperatura. Se utiliza en el calentamiento de piezas pequeñas.

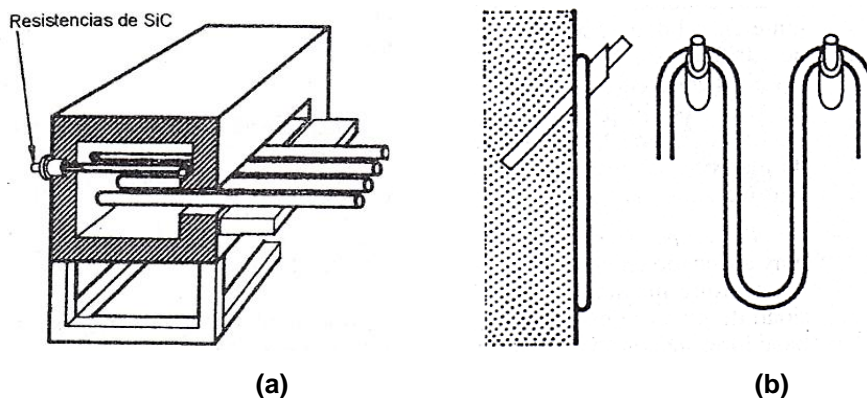


Figura 3.4 (a) Horno de mufla de ranura; (b) Esquema resistencia ondulada sobre gancho¹⁸

Características hornos de resistencias:

¹⁸ Fuente: (Astigarraga, 1999)

- Mayor tiempo de calentamiento de las probetas.
- Fácil control de rangos de temperatura.
- Costo moderado de construcción.
- Requiere menor seguridad de operación.
- Genera calentamiento libre de gases de combustión.
- No requiere mantenimiento periódico.

3.2.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS ÓPTIMA

3.2.3.1. Sistema de punzonado

La determinación del tipo de máquina a emplearse depende de la forma (y dimensiones), así como de la cantidad de piezas a ser fabricadas, parámetros en los cuales se basa la fijación de la tecnología más apropiada desde el punto de vista económico en primer lugar y técnico en otros casos.

Para obtener la Matriz de decisión (Tabla 3.2) se aplicó el siguiente procedimiento:

- Se asigna un factor de prioridad a cada uno de los parámetros de selección mediante los criterios de la Tabla 3.1, y se realiza un promedio de estos valores.
- Se asigna factores a cada una de las alternativas mediante los criterios Tabla 3.1.
- Se multiplica el factor de prioridad por el factor de cada alternativa y luego se suman estos valores (Suma Total).
- Se Calcula el Puntaje Máximo:

$$P_{j_{m\acute{a}x}} = N^{\circ}_{ps} Vfp_{m\acute{a}x} Pfp$$

Donde:

$P_{j_{m\acute{a}x}}$: Puntaje Máximo

N°_{ps} : Número de Parámetros de Selección

$Vfp_{m\acute{a}x}$: Valor Máximo del Factor de prioridad

Pfp : Promedio del Factor de prioridad

- Para determinar la alternativa seleccionada utilizaremos el valor del porcentaje más alto. El porcentaje se obtiene de la siguiente manera:

$$P(\%) = \frac{Total}{P_{j_{m\acute{a}x}}} \times 100$$

Donde:

$P(\%)$: Porcentaje de selección

Total: Suma total

$P_{j_{m\acute{a}x}}$: Puntaje Máximo

Tabla 3.1 Criterio de Valoración para la Prensa

	1	5	10
FACTOR PRIORIDAD	Baja	Media	Alta
Costo	Costoso	Aceptable	Económico
Mantenimiento	Constante	Periódico	Ocasional
Vida til	Corta	Media	Larga
Capacidad	Baja	Media	Alta
Control de presión del punzón	Complejidad Alta	Complejidad Moderada	Complejidad Baja
Control de velocidad del punzón	Complejidad Alta	Complejidad Moderada	Complejidad Baja
Vida útil de la matriz	Corta	Media	Larga
Tiempo de construcción y montaje	Largo	Medio	Corto
Facilidad de automatización	Complejidad Alta	Complejidad Moderada	Complejidad Baja
Calidad del producto	Baja	Media	Alta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2 Matriz de Selección de la Máquina

TIPO DE MÁQUINA CRITERIO DE SELECCIÓN	FACTOR PRIORIDAD (1-10)	PRENSA MECÁNICA		PRENSA HIDRÁULICA	
Costo	5	9	45	2	10
Mantenimiento	6	5	30	8	48
Vida útil	8	5	40	8	64
Capacidad	6	7	42	9	54
Control de presión del punzón	8	8	64	9	72
Control de velocidad del punzón	8	5	40	9	72
Vida útil de la matriz	9	7	63	9	81
Tiempo de construcción y montaje	7	6	42	9	63
Facilidad de automatización	7	5	35	9	63
Calidad del producto	6	5	30	8	48
Promedio	6,2	-	-	-	-
Sumatoria	-	-	431	-	575
Porcentaje	-	-	60%	-	80%

Fuente: Elaboración propia

Según el resultado de la tabla 3.2, se determinó que la alternativa óptima para el sistema de punzonado es la prensa hidráulica.

3.2.3.2. Sistema de calentamiento de la probeta

En la elección del horno más adecuado intervienen fundamentalmente: La forma de la pieza y el metal o aleación que se trate.

Para aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre pueden utilizar hornos que pueden ser calentados por llamas directas de gas natural, por resistencias (calentamiento indirecto) o por inducción.

A continuación se realiza la matriz de selección del sistema de calentamiento de la probeta para el proceso de recalcado en caliente.

Tabla 3.3 Criterio de Valoración del Sistema de Calentamiento

	1	5	10
FACTOR PRIORIDAD	Baja	Media	Alta
Costo	Costoso	Aceptable	Económico
Condición ambiental	Muy Contaminante	Contaminante	Poco Contaminante
Control de temperatura	Excelente	Medio	Bajo
Mantenimiento	Constante	Periódico	Ocasional
Elasticidad de funcionamiento	Poco Flexible	Flexible	Muy Flexible

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 Matriz de Selección del Sistema de Calentamiento

TIPO DE SISTEMA CRITERIO DE SELECCIÓN	FACTOR PRIORIDAD (1-10)	HORNO ELÉCTRICO		HORNO COMBUSTIÓN	
Control de temperatura	8	4	32	8	64
Condición ambiental	5	9	45	4	20
Costo	7	9	63	5	35
Mantenimiento	7	8	56	6	42
Elasticidad de funcionamiento	5	8	40	5	25
Promedio	6.4	-	-	-	-
Sumatoria	-	-	236	-	186
Porcentaje	-	-	74%	-	58%

Fuente: Elaboración propia

Para el proceso de calentamiento se va a diseñar y construir un horno de resistencia eléctrica, puesto que este presenta varias ventajas sobre el horno de combustión.

Dentro de los hornos de resistencia eléctrica se va a construir un horno tipo mufla el cual se utiliza para el calentamiento de piezas pequeñas o extremos de barras metálicas.

3.2.3.3. Material para el recalado

Existe un gran número de materiales para recalcar como se muestra en la tabla 2.11, de los cuales las aleaciones de aluminio, magnesio y cobre poseen una mayor forjabilidad debido a que estas presentan una menor temperatura de calentamiento (punto de recristalización) en relación a los demás materiales.

Además de presentar una baja resistencia a la fluencia, lo que los hace ideales para realizar el forjado en un equipo de bajo tonelaje. Por lo tanto considerando estas razones y la facilidad de conseguirlos en el mercado se ha seleccionado el aluminio y el cobre como los materiales para las probetas a recalcar.

Tabla 3.5 Propiedades de las aleaciones aluminio

Aleaciones de Aluminio	Composición	Temperatura de forja (°C)	Resistencia a la fluencia temp. ambiente (MPa)	Resistencia a la fluencia en caliente (MPa)
1100 Al	99% Al	315-370	117	60 (300 °C)
2011-T3	4.0Cu-06Mg 0.7Mn-0.5Si	420-460	260	12 (316 °C)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Propiedades de las aleaciones cobre

Aleaciones de Cobre	Composición	Temperatura de forja (°C)	Resistencia a la fluencia temp. ambiente (MPa)	Resistencia a la fluencia en caliente (MPa)
C10200	99.95% Cu	730-845	70	48 (600°C)
C37700	Cu-38%Zn-2%Pb	650-760	138	58 (600 °C)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Criterio de Valoración de material para recalado

FACTOR PRIORIDAD	1	3	5
	Baja	Media	Alta
Costo	Costoso	Aceptable	Económico
Forjabilidad	Baja	Media	Alta
Disponibilidad	Baja	Media	Alta

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Matriz de selección del material para recalcar (Aluminio)

MATERIAL CRITERIO DE SELECCIÓN	FACTOR PRIORIDAD (1-5)	1100 Al		2011-T3 Al	
		Costo	4	2	8	4	16
Forjabilidad	5	3	15	4	20
Disponibilidad	4	3	12	5	20
Promedio	4,33	-	-	-	-
Sumatoria	-	-	35	-	56
Porcentaje	-	-	53%	-	86%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Matriz de selección del material para recalcar (Cobre)

MATERIAL CRITERIO DE SELECCIÓN	FACTOR PRIORIDAD (1-5)	C 11000		C 37700	
		Costo	4	2	8	4	16
Forjabilidad	5	2	10	5	25
Disponibilidad	4	5	20	1	4
Promedio	4,33	-	-	-	-
Sumatoria	-	-	38	-	45
Porcentaje	-	-	58%	-	69%

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto los materiales para las probetas serán la aleación de aluminio 2011-T3 Al y la aleación de cobre C 37700, puesto que estas aleaciones presentan un alto grado de forjabilidad y se las encuentra en el mercado.

3.2.4. RESUMEN DE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS

El equipo para el recalado en caliente constará de las siguientes partes tabla 3.10.

Tabla 3.10 Partes del Equipo de Recalado

Sistema de Punzonado	Sistema de Calentamiento	Material para el recalado
Prensa hidráulica	Horno de resistencias eléctricas tipo mufla.	Dos materiales para recalcar: -Aleación de Aluminio Al 2011. -Aleación de Cobre C 37700.

Fuente: Elaboración propia

El equipo de recalado en caliente funcionará de la siguiente manera:

- Colocar la probeta de la aleación metálica no ferrosa dentro del horno de resistencia hasta que alcance la temperatura de recristalización.
- Poner la probeta calentada dentro de la matriz.
- Realizar la operación de punzonado con la prensa hidráulica.
- Extraer la pieza conformada.

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES

Una vez definido el funcionamiento del equipo y sus partes constitutivas, así como los tipos de aleaciones que se van a utilizar dentro del proceso de conformado, en el presente capítulo se procederá a diseñar el equipo, partiendo de las consideraciones geométricas iniciales y finales de la probeta, y de la resistencia a la deformación de aleación a fin de obtener la fuerza necesaria para la conformación. Esta fuerza será el punto de partida para el diseño y selección de las partes de la unidad hidráulica.

El diseño y selección de los materiales a ser utilizados en la fabricación de los útiles de matricería y del horno se fundamentará en la temperatura de trabajo de las aleaciones seleccionadas. En la figura 4.1 se observa un esquema del equipo.

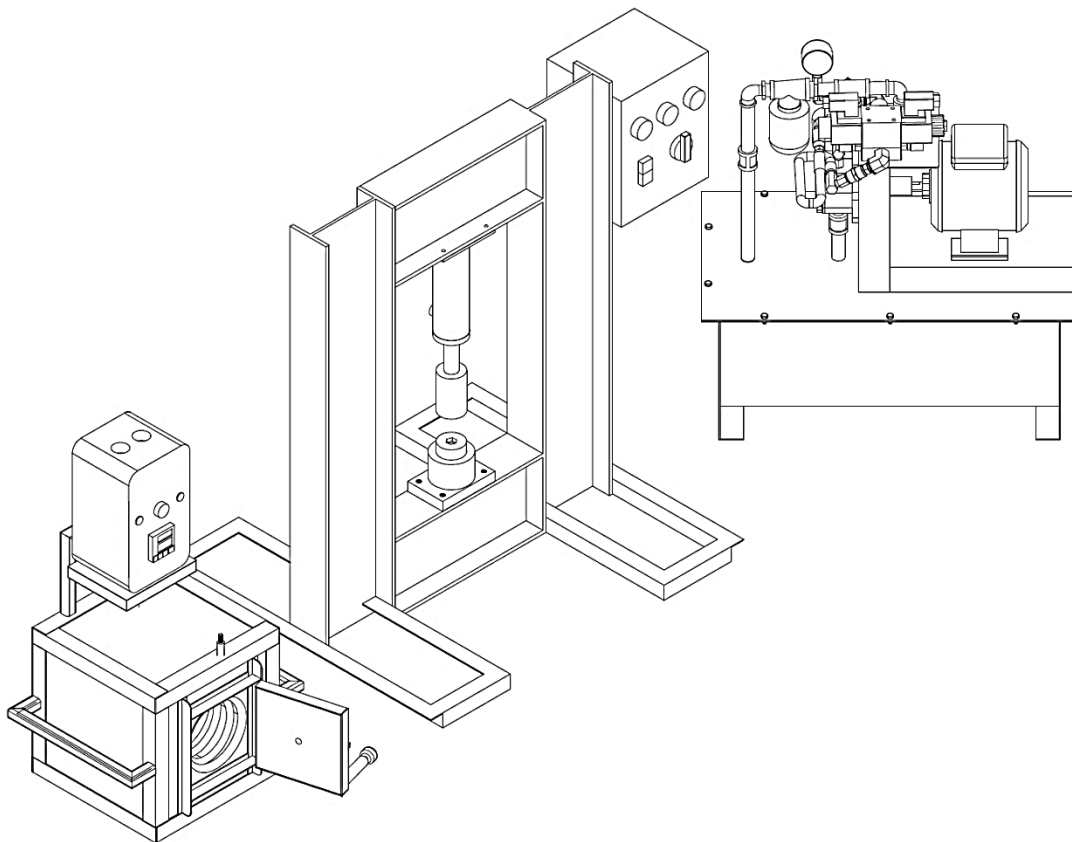


Figura 4. 1 Equipo de recalcado en caliente

4.1. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

Para el proceso de recalado se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

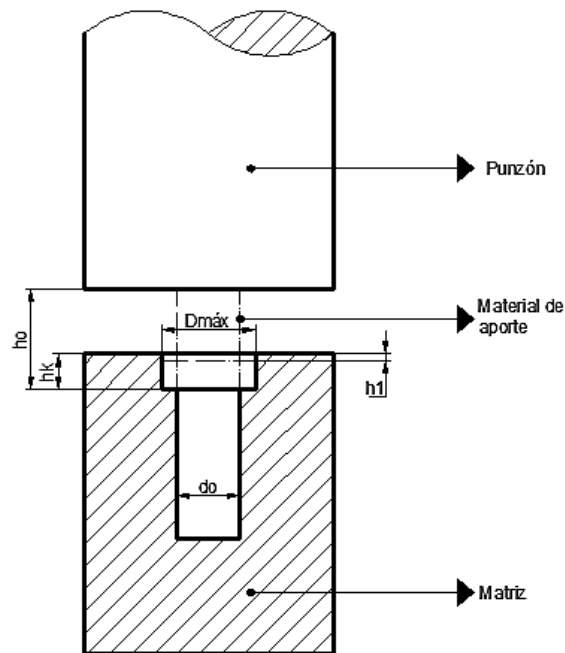


Figura 4.2 Parámetros iniciales para el recalado¹⁹

- | | | |
|---|------------|------|
| • Diámetro inicial | d_o | [mm] |
| • Longitud de recalado o altura inicial | h_o | [mm] |
| • Diámetro de la cabeza (medio) | d_l | [mm] |
| • Altura media de recalado | h_l | [mm] |
| • Altura de la cabeza | h_k | [mm] |
| • Diámetro total | d_{max} | [mm] |
| • Diferencia teórica de altura | Δh | [mm] |

¹⁹ Fuente: Elaboración Propia

4.1.1. VOLUMEN INICIAL

Datos:

$$d_0 = 12,7 \text{ mm}$$

$$h_0 = 12 \text{ mm}$$

Cálculo:

$$A_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2$$

$$A_0 = \frac{\pi}{4} 12,7^2$$

$$A_0 = 126,67 \text{ mm}^2$$

$$V_0 = A_0 h_0$$

$$V_0 = 126,67 \cdot 12$$

$$V_0 = 1520,04 \text{ mm}^3$$

4.1.2. DIÁMETRO MÁXIMO

Datos:

$$d_0 = 12,7 \text{ mm}$$

$$h_0 = 12 \text{ mm}$$

$$h_k = 6,6 \text{ mm}$$

Volumen de la cabeza: $V_k = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} R^2 h_k$

Volumen inicial de la probeta: $V_0 = \pi \frac{d_0^2}{4} h_0$

Cálculo:

Igualando los volúmenes y despejando R tenemos:

$$R = \sqrt{\frac{\pi d_0^2 h_0}{6 \sqrt{3} h k}}$$

$$R = \sqrt{\frac{\pi \cdot 12,7^2 \cdot 12}{6 \sqrt{3} \cdot 6,6}}$$

$$R = 9,43 \text{ mm}$$

$$d_{max} = 2R = 2(9,43)$$

$$d_{max} = 18,85 \text{ mm}$$

4.1.3. ÁREA DE LA CABEZA

$$A_k = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} R^2$$

$$A_k = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} 9,43^2$$

$$A_k = 231,04 \text{ mm}^2$$

4.1.4. ÁREA MÁXIMA

$$A_{max} = \pi \frac{d_{max}^2}{4}$$

$$A_{max} = \pi \frac{18,85^2}{4}$$

$$A_{max} = 279,07 \text{ mm}^2$$

4.1.5. DIÁMETRO MEDIO

Área de la cabeza hexagonal: $Ak = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} R^2$

Área de la sección media de la cabeza: $A = \pi \frac{d_1^2}{4}$

Igualando las áreas y despejando d_1 se tiene:

$$d_1 = \sqrt{6 \frac{\sqrt{3}}{\pi}} R$$

$$d_1 = \sqrt{6 \frac{\sqrt{3}}{\pi}} 9,43$$

$$d_1 = 17,15 \text{ mm}$$

4.1.6. ALTURA MEDIA DE RECALCADO

$$h_1 = \frac{d_0^2 h_0}{d_{max}^2}$$

$$h_1 = \frac{(12,7)^2 12}{(18,85)^2}$$

$$h_1 = 5,45 \text{ mm}$$

4.1.7. DIFERENCIA TEÓRICA DE ALTURA

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

$$\Delta h = 12 - 5,45$$

$$\Delta h = 6,55 \text{ mm}$$

4.1.8. RELACIÓN DE DEFORMACIÓN EN EL RECALCADO.

4.1.8.1. Relación de Recalcado

$$s = \frac{h_0}{d_0}$$

$$s = \frac{12}{12,7}$$

$$s = 0,95$$

4.1.8.2. Relación del recorrido de trabajo

$$\frac{h_a}{h_0} = \frac{h_0 - h_k}{h_0}$$

$$\frac{h_a}{h_0} = \frac{12 - 6,6}{12}$$

$$\frac{h_a}{h_0} = 0,45$$

4.1.8.3. Relación de la diferencia de alturas

$$\frac{\Delta h}{h_a} = \frac{6,55}{5,4}$$

$$\frac{\Delta h}{h_a} = 1,21$$

4.1.8.4. Recalcado

$$\epsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}$$

$$\epsilon_h = \frac{6,55}{12}$$

$$\epsilon_h = 0,55$$

4.1.8.5. Grado de recalcado

$$\varphi_g = \varphi_h = \ln(1 - \epsilon_h)$$

$$\varphi_h = \ln(1 - 0,55)$$

$$\varphi_h = 0,80$$

4.1.8.6. Velocidad de deformación

Datos:

$v = 10 \frac{mm}{s}$; Velocidad de la herramienta (ver tabla 2.4)

$h_0 = 12 \text{ mm}$

Cálculo:

$$\varphi_h = \frac{v_w}{h_0}$$

$$\varphi_h = \frac{10}{12}$$

$$\varphi_h = 0,83 \text{ s}^{-1}$$

4.1.8.7. Relación de las secciones

$$q = \frac{d_{max}^2}{d_0^2}$$

$$q = \frac{(18,85)^2}{(12,7)^2}$$

$$q = 2,20$$

4.1.8.8. Relación de las dimensiones finales

$$\frac{d_{max}}{h_1} = \frac{18,85}{5,45}$$

$$\frac{d_{max}}{h_1} = 3,45$$

4.1.8.9. Deformación media relativa

$$\epsilon_m = 1 - \frac{d_0^2}{d_1^2} = 1 - \frac{12,7^2}{17,15^2}$$

$$\epsilon_m = 0,59$$

4.1.8.10. Deformación máxima relativa

$$\epsilon_{max} = 1 - \frac{d_0^2}{d_{max}^2} = 1 - \frac{12,7^2}{18,85^2}$$

$$\epsilon_{max} = 0,55$$

4.1.8.11. Deformación media logarítmica

$$\varphi_m = \ln \frac{d_1^2}{d_0^2} = \ln \frac{17,14^2}{12,7^2}$$

$$\varphi_m = 0,60$$

4.1.8.12. Deformación máxima logarítmica

$$\varphi_{max} = \ln \frac{d_{max}^2}{d_0^2} = \ln \frac{18,85^2}{12,7^2}$$

$$\varphi_{max} = 0,80$$

Tabla 4.1 Relación de deformación de recalado de la cabeza

Nombre	Símbolo	Valor
Diámetro inicial	d_o (mm)	12,70
Longitud de recalado o altura inicial	h_o (mm)	12,00
Diámetro de la cabeza (medio)	d_1 (mm)	17,14
Altura media de recalado	h_1 (mm)	5,45
Altura de la cabeza	h_k (mm)	6,60
Diámetro total	d_{max} (mm)	18,85
Diferencia teórica de altura	Δh (mm)	6,55
Recorrido de trabajo de recalado	h_a (mm)	5,40
Volumen de recalado	V_o (mm ³)	1520,04
Área de la cabeza	A_k (mm ²)	231,04
Relación de recalado	s	0,95
Relación de recorrido de trabajo	$\frac{h_a}{h_o}$	0,45
	$\frac{\Delta h}{h_a}$	1,21
Relación de diferencia de alturas	$\frac{\Delta h}{h_a}$	1,21
Recalado	ϵ_h	0,55
Grado de recalado	φ_h	0,80
Velocidad de deformación	φ_h (s ⁻¹)	0,83
Relación de secciones	q	2,20
Relación de dimensiones finales	$\frac{d_{max}}{h_1}$	3,45
	ϵ_m	0,59
Deformación máxima relativa	ϵ_{max}	0,55
Deformación media logarítmica	φ_m	0,60
Deformación máxima logarítmica	φ_{max}	0,80

Fuente: Elaboración propia

4.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUNZONADO

4.2.1. FUERZA DE PUNZONADO

4.2.1.1. Fuerza de punzonado utilizando la resistencia a la deformación (kw)

Para determinar la fuerza máxima de recalado al final del proceso de recalado, es suficiente hacer el cálculo aproximado utilizando los valores de la siguiente tabla.

Tabla 4.2 Valores orientativos para la resistencia a la deformación k_{we}

Material	Recalado sin estampa K_{we} [Kp/mm ²]					Recalado en estampa K_{we} [Kp/mm ²]				
	φ_g	20°C	600°C	900°C	1200°C	φ_g	20°C	600°C	900°C	1200°C
Acero al carbono hasta 0,1% C	0,6	50	40	10	8	0,4	100	80	15	10

	1,0	70	65	35	25	0,8	160	130	50	30
Acero al carbono hasta 0,3% C. Acero de cementación	0,6	80	70	12	10	0,4	160	130	15	15

	1,0	100	90	40	30	0,8	200	170	60	50
Acero al carbono 0,5% C Acero aleado	0,6	100	80	10	12	0,4	180	150	20	15

	1,0	150	130	35	40	0,8	250	210	80	60
Aluminio	0,6	10	500...							
	...	...	550° C							
	1,0	25		1...3						
Aleaciones de aluminio	0,6	20	400...							
	...	...	500° C							
	1,0	60		2...8						
Cobre	0,6	25	700...							
	...	...	800° C							
	1,0	45		3...5						
Aleaciones de cobre	0,6	60	700...							
	...	...	800° C							
	1,0	85		1...5						

Fuente: (Billigmann, 2002)

4.2.1.1.1. Fuerza de punzonado para el Aluminio 2011-T3

-Datos:

$$A_E = A_k = 231,04 \text{ mm}^2$$

$$k_{WE} = 8 \frac{Kp}{\text{mm}^2} = 78,4 \frac{N}{\text{mm}^2}; (400^\circ \text{C})$$

-Cálculo:

$$F_{max} = A_E k_{WE}$$

$$F_{max} = 231,04 \cdot 78,4$$

$$F_{max} = 18113,54 \text{ N} = 1,81 \text{ Tonf}$$

4.2.1.1.2. Fuerza de punzonado para el latón C37700

-Datos:

$$A_E = A_k = 231,04 \text{ mm}^2$$

$$k_{WE} = 5 \frac{Kp}{\text{mm}^2} = 49 \frac{N}{\text{mm}^2}; (700^\circ \text{C})$$

-Cálculo:

$$F_{max} = A_E k_{WE}$$

$$F_{max} = 231,04 \cdot 49$$

$$F_{max} = 11320,96 \text{ N} = 1,13 \text{ Tonf}$$

4.2.1.2. Fuerza de punzonado utilizando la resistencia a la deformación (Kf)

4.2.1.2.1. Fuerza de punzonado para el Aluminio 2011-T3

-Datos:

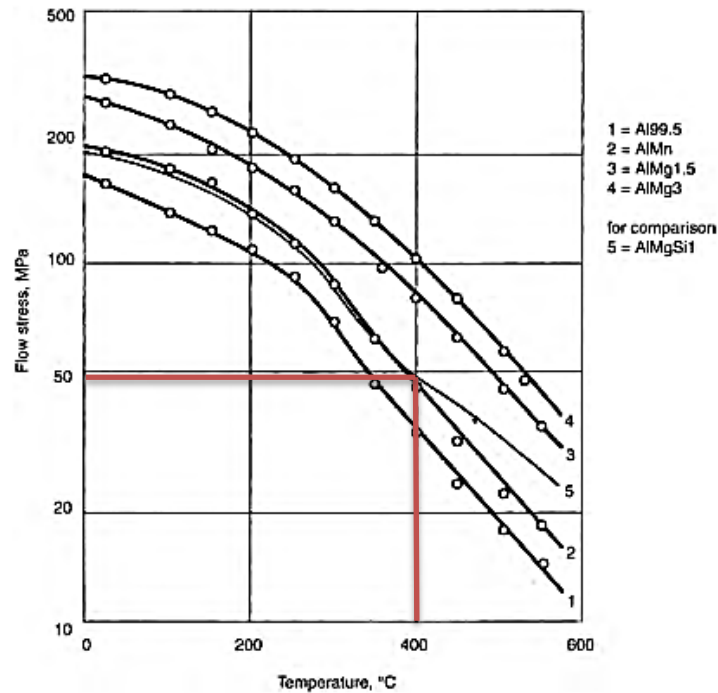


Figura 4.3 Resistencia a la deformación para distintos tipos de aleaciones de aluminio²⁰

Resistencia a la deformación tomada de la Figura 4.2: $k_f = 49 \frac{N}{mm^2} (400^\circ C)$

Coefficiente de fricción: $\mu = 0,5$

Recalcado: $\epsilon_h = 55\%$

²⁰ Fuente: (Bauser & Saver, 2006)

-Cálculo:

Resistencia real a la deformación

$$k_w = k_f \left[1 + 0,333 \frac{\mu}{s} \frac{100}{100 - \epsilon_h} \right]^3$$

$$k_w = 49 * \left[1 + 0,333 \frac{0,5}{0,95} \frac{100}{100 - 55} \right]^3$$

$$k_w = 49 \cdot 1,58$$

$$k_w = 77,45 \frac{N}{mm^2}$$

$$F_{max} = A_E k_w$$

$$F_{max} = 231,04 \cdot 77,45$$

$$F_{max} = 17893,83N = 1,79 \text{ tonf}$$

4.2.1.2.2. Fuerza de punzonado para el Latón C377000

-Datos:

Tabla 4.3 Resistencia a la deformación para distintos tipos de aleaciones de cobre.

Material	Temperatura de forja	Resistencia a la deformación (kf) para distintas velocidades de deformación (φ)		
		T (° C)	$\varphi = \textit{lento}$ (N/mm ²)	$\varphi = \textit{rápido}$ (N/mm ²)
Cobre, puro		850-750	25-50	50-100
Cu-Zn40-Pb2		750-650	10-15	20-50
Cu-Zn-aleado, sin plomo		850-750	20-70	30-120

Fuente: (Lipowsky & Arpaci, 2007)

Resistencia a la deformación tomada de la tabla 4.3: $k_f = 30 \frac{N}{mm^2}$ (700° C)

Coefficiente de fricción: $\mu = 0,5$

Recalcado: $\epsilon_h = 55\%$

-Cálculo:

Resistencia real a la deformación

$$k_w = k_f \left[1 + 0,333 \frac{\mu}{s} \sqrt{\frac{100}{100 - \epsilon_h}} \right]^3$$

$$k_w = 30 * \left[1 + 0,333 \frac{0,5}{0,95} \sqrt{\frac{100}{100 - 55}} \right]^3$$

$$k_w = 30 \cdot 1,58$$

$$k_w = 47,4 \frac{N}{mm^2}$$

$$F_{max} = A_E k_w$$

$$F_{max} = 231,0447,4$$

$$F_{max} = 10951,30N = 1,09 \text{ tonf}$$

Nota: Para el cálculo del sistema hidráulico se tomará la mayor fuerza que se necesita para deformar el material, en este caso la aleación de aluminio cuya fuerza es de 1,81 toneladas.

4.2.2. SISTEMA HIDRAÚLICO

Para diseñar un circuito, la primera consideración es sobre el trabajo que se debe realizar. Este trabajo puede ser levantar un peso, girar una herramienta o bloquear algún elemento. El trabajo determina el tipo de actuador que hay que utilizar.

Probablemente el primer paso será la selección del actuador. Si los requerimientos fuesen simplemente de levantar una carga, un cilindro hidráulico colocado bajo ella haría el trabajo. La longitud de carrera del cilindro sería, por lo menos, igual a la distancia de desplazamiento de la carga. Su superficie se determinaría mediante la fuerza requerida para elevar la carga y la presión de funcionamiento deseada.

El desplazamiento hacia arriba y hacia abajo del cilindro sería controlado mediante una válvula direccional. Si la carga debe detenerse en puntos intermedios de su trayecto, la válvula direccional deberá tener una posición neutral en la cual el caudal de aceite del lado inferior del pistón quede bloqueado, para soportar el peso sobre el cilindro. La velocidad a la cual debe desplazarse la carga determina el tamaño de la bomba.

La potencia necesaria para accionar la bomba depende de su caudal y de la presión a la cual funciona.

Para determinar el tamaño del motor eléctrico requerido se toma en cuenta la potencia de la bomba y los rendimientos mecánico y volumétrico.

Para impedir la sobrecarga del motor eléctrico y para proteger la bomba y otros componentes contra una presión excesiva, debida a sobrecargas o bloqueo, se monta

una válvula de seguridad para limitar la presión máxima del sistema en la línea, entre la salida de la bomba y la entrada de la válvula direccional.

Un depósito dimensionado para contener aproximadamente de 2 a 3 veces la capacidad de la bomba en galones por minuto y tuberías de interconexión adecuadas completarán el sistema.

En la figura 4.3 se muestra el esquema básico del sistema hidráulico que utilizará la prensa. Además el diseño y selección de cada elemento se detallan a continuación.

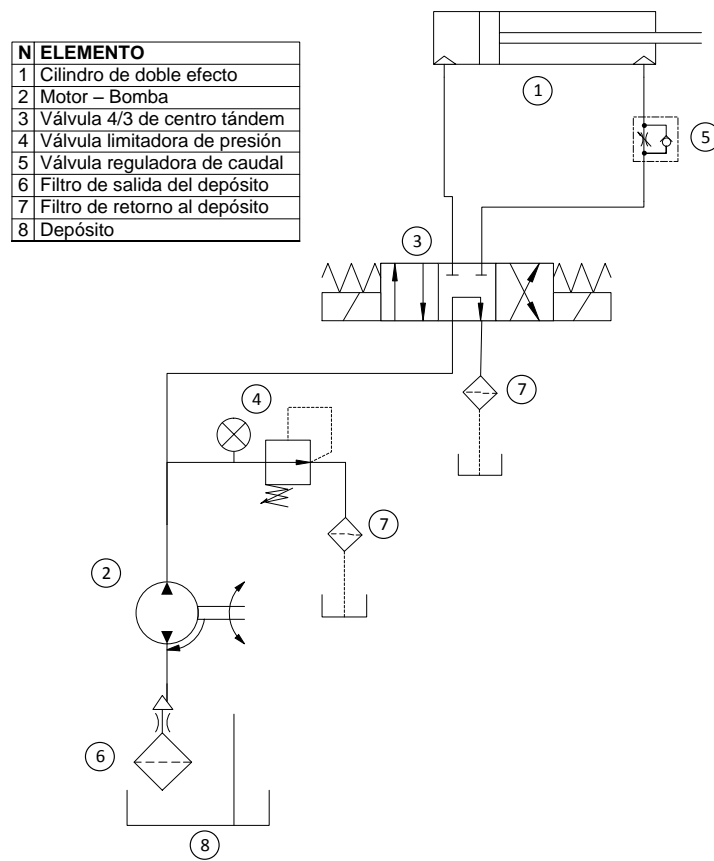


Figura 4.4 Esquema circuito hidráulico¹⁹

4.2.2.1. Cilindro hidráulico

Con los datos obtenidos en los cálculos anteriores se determina las dimensiones y fuerzas utilizadas en el cilindro. Tal como se muestra en la figura 4.4.

-Datos:

$F_1 = 18113,54 \text{ N}$ (1,81); dato obtenido del cálculo de la fuerza de punzonado.

$p_s = 10 \text{ MPa}$ (100 Bar) (1450,38 psi); Presión de servicio medio.

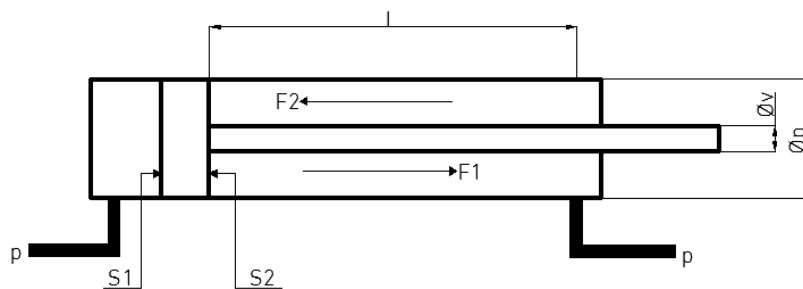


Figura 4.5 Representación del cilindro hidráulico¹⁹

Sección lado opuesto al vástago

$$s_1 = \frac{F_1}{p_s}$$

$$s_1 = \frac{18113,54}{10}$$

$$s_1 = 1811,35 \text{ mm}^2$$


Diámetros del pistón y vástago

$$\phi p = \frac{4 * s_1}{\pi}$$


$$\phi p = \frac{4 * 1811,35}{\pi}$$

$$\phi p = 48,02 \text{ mm}$$


En la figura 4.5 se presenta las características del cilindro hidráulico de este se ha seleccionado un cilindro hidráulico de $\phi p = 50 \text{ mm}$ y $\phi v = 28 \text{ mm}$.


CILINDROS HIDRAULICOS
HYDRAULIC CYLINDERS


CS
ISO 3320




XS - Ejecución Base
XS - Bore Cylinder




AS - Brida delantera
AS - Front flange mounting



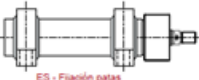
DS - Charnela trasera
DS - Eye mounting




FS - Fijación muñones
FS - Head trunion mounting



BS - Brida Trasera
BS - Rear flange mounting



ES - Fijación patas
ES - Foot mounting



GS - Charnela rólula
GS - Spherical eye mounting

• CARACTERISTICAS •										
Norma	ISO - 3320									
Tipo de construcción	Tapas y fijaciones soldadas									
Presión mínima	15 bars									
Presión nominal	210 bars									
Presión de prueba	250 bars									
Posición de montaje	s/pedido									
Temperatura ambiente	-20°C + 80°C con juntas tipo M									
Temperatura de fluido	-20°C + 80°C con juntas tipo M									
Fluido	Aceite mineral CETOP RP 91 - H									
Viscosidad	12... 90 m.m. /s									
Filtración	Grado de filtración según NAS 1638									
Tipo de estanqueidad	Ver código para pedido									
Ø Camisa - Pistón (m/m)	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
Ø Vástago	16	22/28	28/36	36/45	45/56	56/70	70/90	90/110	110/140	140/180
Velocidad max. (m/s) tipo M	0,5			0,4			0,25			
Velocidad max. (m/s) tipo T	1						0,7			
Tolerancia de carrera	Según tablas interiores • T •									

Figura 4.6 Características cilindro hidráulico²¹

Con el nuevo diámetro del pistón se vuelve a calcular la sección de lado opuesto al vástago.

$$s_1 = \pi \frac{\phi p^2}{4}$$

$$s_1 = \pi \frac{50^2}{4}$$

$$s_1 = 1963,50 \text{ mm}^2$$

²¹ Fuente: Anexo 1

Con el diámetro del vástago se calcula la sección del lado del vástago.

$$s_2 = \pi \frac{\phi_p^2 - \phi_v^2}{4}$$

$$s_2 = \pi \frac{(50^2 - 28^2)}{4}$$

$$s_2 = 1347,74 \text{ mm}^2$$

Con estos diámetros se vuelve a calcular la presión

$$p = \frac{F_1}{s_1}$$

$$p = \frac{18113,54}{1963,50}$$

$$p = 9,22 \text{ MPa}$$

Se multiplica esta Presión por un factor de seguridad ($n = 1.2$) para obtener una nueva presión de:

$$p = 11,06 \text{ MPa} = 1604,12 \text{ psi} = 11,06 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Con esta nueva presión se vuelve a definir los valores de la fuerza de avance (F_1) y de la fuerza de retroceso (F_2).

$$F_1 = p s_1$$

$$F_1 = 11,06 \cdot 1963,50$$

$$F_1 = 21716,31 \text{ N}$$

$$F_2 = p s_2$$

$$F_2 = 11,06 \cdot 1347,74$$

$$F_2 = 14906 \text{ N}$$

4.2.2.2. Caudal

-Dato:

$v_1 = 10 \text{ mm/s}$ Velocidad de salida del pistón (tabla 2.4)

$$Q = v_1 s_1$$

$$Q = 10 \cdot 1963,50$$

$$Q = 19635 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}; \left(1,18 \frac{\text{lt}}{\text{min}}\right)$$

4.2.2.3. Caudal requerido para hacer una carrera

-Dato:

$\eta = 0,95$ Rendimiento volumétrico teniendo en cuenta fugas

$$Q_r = \frac{Q}{\eta}$$

$$Q_r = \frac{19635}{0,95}$$

$$Q_r = 20668,37 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}} = 2,066837 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1,24 \frac{\text{lt}}{\text{min}} = 0,33 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

4.2.2.4. Tiempo en salir el vástago

-Dato:

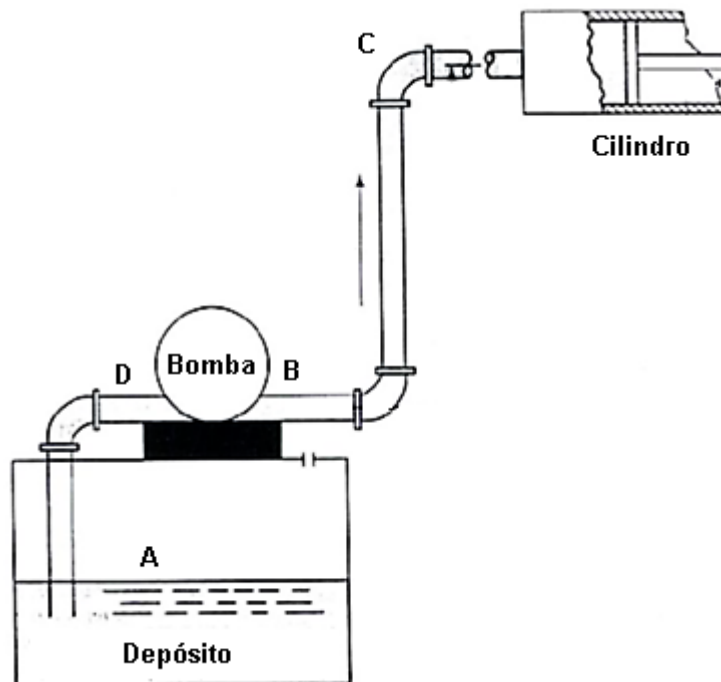
$L = 100 \text{ mm}$

$$tv = \frac{s_1 L}{Q_r}$$

$$tv = \frac{1963,50 \cdot 100}{20668,37}$$

$$tv = 9,5 \text{ s}$$

4.2.2.5. Pérdidas en el sistema



$$\gamma_o = sg\gamma_w = 0,9 \cdot 9,81 \frac{KN}{m^3} = 8,829 \frac{KN}{m^3} = 8829 \frac{N}{m^3}$$

$$\vartheta_c = \frac{L}{t} = \frac{100}{10} = 10 \frac{mm}{s} = 0,01 \frac{m}{s}$$

$$\vartheta_B = \frac{Q}{A_B} = \frac{2,066837 \times 10^{-5}}{1,960 \times 10^{-4}} = 0,106 \frac{m}{s}$$

Tubería de $\frac{1}{2}$ in. $D = 15,8 \text{ mm} = 15,8 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$\rho = 0,87 \frac{gr}{cm^3} = 870 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\nu = 32 \text{ cts} = 3,2 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\eta = \rho \nu = 3,2 \times 10^{-5} \cdot 870 = 0,02784 \frac{Kg}{m}$$

$$N_r = \frac{\vartheta D \rho}{\eta} = \frac{0,106 (15,8 \times 10^{-3}) 870}{0,02784} = 52,34$$

\therefore flujo laminar

Pérdidas primarias en línea de descarga

$$f = 0,027 \text{ Acero } \frac{1}{2} \text{ in.}$$

$$L_D = 600 \text{ mm} = 0,6 \text{ m}$$

$$h'_{LD} = f \frac{L_D}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,027 \frac{0,6}{15,8 \times 10^{-3}} \frac{0,106^2}{2 * 9,81} = 5,87 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Pérdida por válvula direccional

$$p_p - p_A = 5 \text{ psi} = 34558,02 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$h''_{LDV} = \frac{p_p - p_A}{\gamma} = \frac{34558,02}{8829} = 3,91 \text{ m}$$

Pérdida en accesorios

$$\text{Codo } 90^\circ \frac{L_e}{D} = 50$$

$$h''_{LDC} = f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,027 \cdot 50 \frac{0,106^2}{2 \cdot 9,81} = 7,73 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\text{T rama } \frac{L_e}{D} = 60$$

$$h''_{LDT} = f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,027 \cdot 60 \frac{0,106^2}{2 \cdot 9,81} = 9,28 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Pérdidas secundarias

$$h''_{LD} = h''_{LDT} + 3h''_{LDC} + h''_{LDV} = 3,91 + 9,28 \times 10^{-4} + 3 \cdot 7,73 \times 10^{-4} = 3,913 \text{ m}$$

Pérdida total en la línea de descarga

$$h_{LD} = h'_{LD} + h''_{LD} = 5,87 \times 10^{-4} + 3,913 = 3,914 \text{ m}$$

Pérdida total en línea de succión

$$f = 0,027 \text{ acero } \frac{1}{2} \text{ in.}$$

$$L_s = 260 \text{ mm} = 0,26 \text{ m}$$

$$h_{Ls} = f \frac{L_s}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,027 \frac{0,26}{15,8 \times 10^{-3}} \frac{0,106^2}{2 \cdot 9,81} = 2,54 \times 10^{-4} \text{ m}$$

4.2.2.6. Energía agregada por la bomba

$$h_A = \frac{p_c}{\gamma_o} + z_c - z_A + \frac{v_c^2}{2g} + h_{L_D} + h_{L_S}$$

$$h_A = \frac{11,06 \times 10^6}{8829} + 0,628 - 0,190 + \frac{0,010^2}{2 \cdot 9,81} + 3,914 + 2,54 \times 10^{-4}$$

$$h_A = 1257,04 \text{ m}$$

4.2.2.7. Potencia que la bomba transmite al aceite

$$P_A = h_A \gamma_o Q$$

$$P_A = 1257,04 \cdot 8829 \cdot 2,066837 \times 10^{-5}$$

$$P_A = 229,39 \frac{Nm}{s} = 0,212 \frac{Btu}{s}$$

4.2.2.8. Potencia de la bomba

$$P_b = \frac{P_A}{\eta_v} = \frac{229,39}{0,85}$$

$$P_b = 270 \frac{Nm}{s} = 0,36 \text{ HP}$$

4.2.2.9. Potencia del motor

$$P_m = \frac{P_b}{\eta_m} = \frac{270}{0,9}$$

$$P_m = 300 \frac{Nm}{s} = 0,40 \text{ HP}$$

4.2.2.10. Selección del motor

Una vez calculada la potencia necesaria para el motor (0,40HP), se procedió a seleccionar el motor monofásico de inducción tipo jaula, que presenta las siguientes características.

Tabla 4.4 Características motor eléctrico

Marca	WEG Steel motor monofásico
Potencia	0,50 HP
Frecuencia	60 Hz
Amperaje	8,40/4,20
Revoluciones por minuto	1720 rpm
Voltaje	110/220 v

Fuente: Anexo 2



Figura 4.7 Motor de inducción monofásico – Rotor de jaula²²

4.2.2.11. Selección de la bomba

Para la selección de la bomba se tomará en cuenta los siguientes parámetros:

- Tipo de aceite: ISO 32 (ANEXO 3)
- Presión de trabajo (psi): 111 bar (11,06 MPa)
- Caudal (lt/min): 1,24
- Revolución por minuto (rpm): 1720

Las bombas de engranes tienen presiones de funcionamiento de 230 bar (estándar) y hasta 310 bar (versión para altas presiones).

²² Fuente: Anexo 2

En la tabla 4.5 se muestran los distintos tipos de bombas de engranajes disponibles en el mercado.

Tabla 4.5 Características de la Bomba

TAMANO BOMBA	MEDIDA NOMINAL	CILINDRADA [cm ³ /vuelta]	CAUDAL MAX. (a 1500 vuelta/min.) [l/min.]	PRESION MAXIMA DE USO (a 1500 vuelta/min.) [bar]	PRESION MAX DE PUNTA (a 1500 vuelta/min.) [bar]	VELOCIDAD MAX. DE ROTACION [vueltas/min.]	VELOCIDAD MIN. DE ROTACION [vueltas/min.]
GP1	0013	1,3	2,0	220 (260)	260 (300)	6000	500
	0020	2,0	3,0				
	0027	2,7	4,0	210 (250)	250 (290)	4000	
	0034	3,4	5,1				
	0041	4,1	6,1				
	0051	5,1	7,6	200 (240)	240 (280)	3800	
	0061	6,1	9,1				
	0074	7,4	11,1	170	200	3200	
0091	9,1	13,6					

Fuente: Anexo 4

Se selecciona una bomba con una cilindrada de 1,3 cm³/vuelta con un caudal máximo de 2 lt/min y con una presión máxima de 220 bares para una velocidad de rotación de 1500 rpm. Además trabaja entre 500 y 6000 rpm. Por lo tanto la bomba seleccionada es la GP1-0013. Ver Anexo 4.

La bomba de acuerdo a la gráfica entrega un caudal de 2,2 lt/min (0,58 gpm).

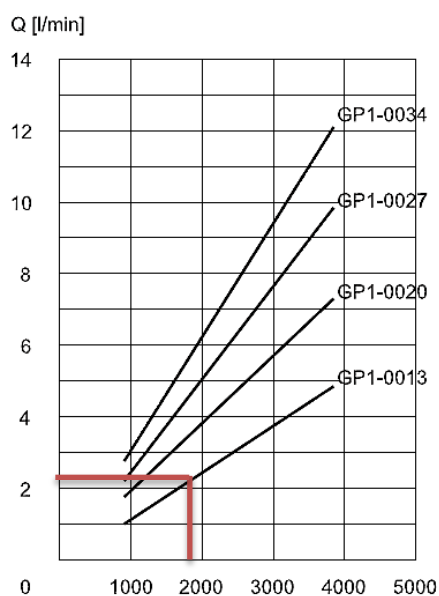


Figura 4.8 Curva de caudal $Q = f(n)$ ²³

²³ Fuente: Anexo 4

4.2.2.12. Selección de las mangueras

Se seleccionó la manguera de ¼ de diámetro de acuerdo a la figura 4.8.

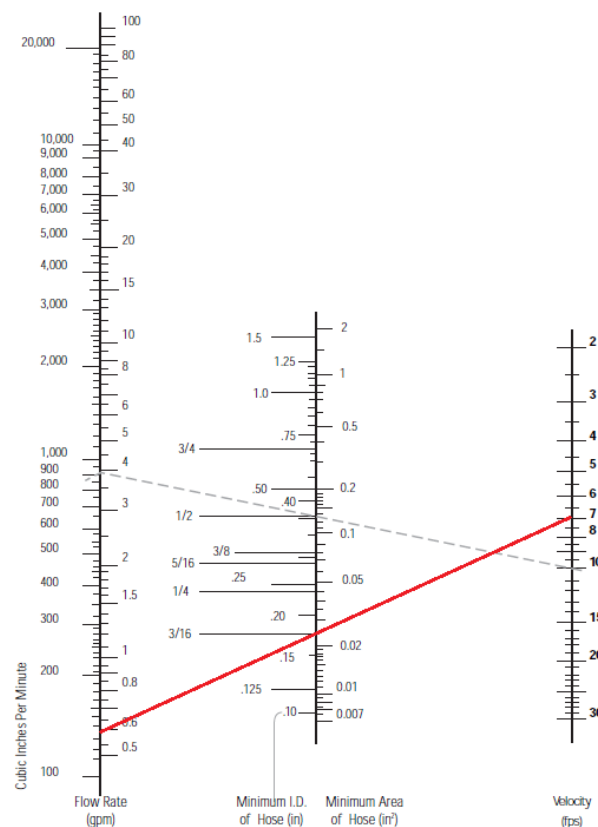


Figura 4.9 Selección de tamaño de mangueras hidráulicas²⁴

Se seleccionó la manguera SAE 100 R1AT, esta presenta las siguientes características:

- Rango de temperatura: -40°C (-104°F) TO + 120°C (+248°F)
- Aplicación: Aceites hidráulicos de alta presión, aire y agua.

Tabla 4.6 Selección de manguera

PRODUCT CODE	DASH	HOSE SIZE				Max Working Pressure		Min Burst Pressure		Min Bend Radius		
		DN	I.D.	R.O.D	O.D.	PSI	BAR	PSI	BAR	INCH	MM	
HYD-R1T-04-SF-S	-4	6	1/4	6.4	11.1	13.4	3265	225	13060	900	3.9	100
HYD-R1T-05-SF-S	-5	8	3/16	7.9	12.27	15.0	3120	215	12480	850	4.5	105
HYD-R1T-06-SF-S	-6	10	3/8	9.5	15.1	17.4	2610	180	10440	720	5.1	130
HYD-R1T-08-SF-S	-8	12	1/2	12.7	18.2	20.3	2320	160	9280	640	7.1	180

Fuente: Anexo 5

²⁴ Fuente: Anexo 5

4.2.2.13. Selección de la válvula direccional

Se seleccionó una válvula 4/3 de avance y retorno por muelles activada por solenoides con centro tándem debido a que esta tiene la posibilidad de invertir el sentido de operación del actuador sin necesidad de arrancar de nuevo el motor y en caso de bloqueo no se produce daños debido a que el fluido hidráulico es desviado al depósito. Las características de la válvula se indican en la siguiente tabla.

Tabla 4.7 Características Válvula direccional 4/3 centro tándem

hidráulicos			
Presión de servicio máxima	- conexiones A, B, P	bar [psi]	315 [4569]
	- conexión T	bar [psi]	210 [3050] Para símbolos A y B se debe usar la conexión T como conexión de fugas cuando la presión de servicio supera la presión admisible del tanque.
Caudal máximo		V_{min} [US gpm]	60 [15.8]
Sección de caudal (posición de conmutación 0)	- símbolo pistón Q	mm ²	aprox. 6 % de la sección nominal
	- símbolo pistón W	mm ²	aprox. 3 % de la sección nominal
Fluido hidráulico ¹⁾	Aceite mineral (HL, HLP) según DIN 51524 ²⁾ ; fluidos hidráulicos rápidamente biodegradables según VDMA 24568 (ver también RS 90221); HETG (aceite de colza) ²⁾ ; HEPG (poliglicoles) ³⁾ ; HEES (ésteres sintéticos) ³⁾ ; otros fluidos a pedido		
Rango de temperatura del fluido hidráulico		°C [°F]	-30 hasta +80 [-22 hasta +176] (juntas NBR) -15 hasta +80 [-4 hasta +176] (juntas FKM)
Rango de viscosidad		mm ² /s [SUS]	2,8 hasta 500 [35 hasta 2320]
Grado máximo admisible de suciedad del fluido hidráulico clase de pureza según ISO 4406 (c)	Clase 20/18/15 ⁴⁾		

Fuente: Anexo 6

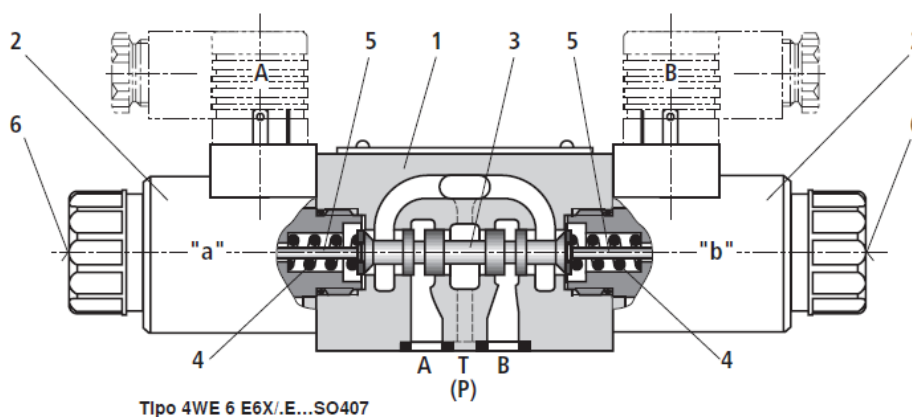


Figura 4.10 Válvula direccional 4/3 centro tándem²⁵

²⁵ Fuente: Anexo 6

4.2.2.14. Selección de la válvula de alivio

Se ha colocado un regulador de presión para que evite las sobrecargas a la vez que permite regular la máquina para que trabaje a una presión predeterminada. Las características de la válvula seleccionada se presentan a continuación en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Características Válvula de alivio

STANDARD MODELS AVAILABLE				
MODEL NUMBER	MODEL NUMBER	VALVE TYPE	RELIEF SETTING	PORT SIZE
RV-1H	DRV-1HH	ADJUSTABLE 1500-3000 PSI	2000 PSI @ 10 GPM	#12 SAE
RV-2H	DRV-2HH	ADJUSTABLE 1500-3000 PSI	2000 PSI @ 10 GPM	3/4" NPTF
RV-4H	DRV-4HH	ADJUSTABLE 1500-3000 PSI	2000 PSI @ 10 GPM	1/2" NPTF
RV-2L	DRV-2LL	ADJUSTABLE 500-1500 PSI	1000 PSI @ 10 GPM	3/4" NPTF

Fuente: Anexo 7



Figura 4.11 Válvula de alivio²⁶

4.2.2.15. Válvula reguladora de caudal

Se agregó un regulador de caudal de 3/8" a la salida del cilindro el que permite variar el caudal y por lo tanto la velocidad a la que el pistón se desplace.

Tabla 4.9 Características Válvula reguladora de caudal

Material	Steel	Brass	Stainless steel
Max. permissible operating pressure (MPa)	to 35	to 15	to 35
Cracking pressure of check valve (type DRV)	0.05 (cracking pressures available if required)		
Fluid	Mineral oil or Phosphate ester		
Fluid temperature range (°C)	-30 to +80		
Viscosity range (mm ² /s)	10 to 800		
Installation position	optional		

Fuente: Anexo 8

²⁶ Fuente: Anexo 7

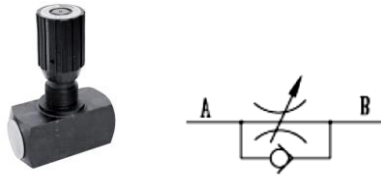


Figura 4.12 Válvula reguladora de caudal²⁷

4.2.2.16. Selección del filtro de succión

Para evitar que residuos almacenados en el depósito ingresen a la bomba, se utilizará un filtro a la entrada de la bomba. En la siguiente tabla se puede observar las características del filtro seleccionado.

Tabla 4.10 Selección del filtro de aspiración

FILTROS DE ASPIRACIÓN								
SFN	-12							
Nº DE SERIE	TAMAÑO DEL FILTRO							
SFN: HILO EN ACERO INOX. SFW: MALLA DE ACERO INOX. MF: ACERO INOX. ESTIRADO	REFERIRSE A LAS ESPECIFICACIONES							
MODELO	PT	CAUDAL (L/Min)	FILTRACIÓN MALLA	MODELO	PT	CAUDAL (L/Min)	FILTRACIÓN MALLA	
MF-02	1/4"	15	100	SFW-08	1"	100	125	
MF-03	3/8"	17		SFW-10	1 1/4"	180		
MF-04	1/2"	33		SFW-12	1 1/2"	246		
MF-06	3/4"	55		SFW-16	2"	384		
MF-08	1"	110		SFW-20	2 1/2"	700		
MF-10	1 1/4"	210		SFW-24	3"	800		
MF-12	1 1/2"	285		SFW-32	4"	1000		
MF-16	2"	395		SFN-04	1/2"	35		150
MF-20	2 1/2"	750		SFN-06	3/4"	48		
MF-24	3"	800		SFN-08	1"	90		
MF-32	4"	1000		SFN-10	1 1/4"	150		
SFW-02	1/4"	15		SFN-12	1 1/2"	205		
SFW-03	3/8"	17	SFN-16	2"	320			
SFW-04	1/2"	33	SFN-20	2 1/2"	550			
SFW-06	3/4"	50	SFN-24	3"	600			

Fuente: (Kompassspain, 2006)





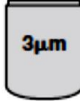

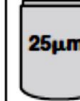

El filtro de aspiración seleccionado tiene una tasa de filtración de 100, esto quiere decir, que por cada 1000 partículas contaminantes que lleguen al filtro solo 10 de ellas pasarán.

²⁷ Fuente: Anexo 8

4.2.2.17. Selección del filtro de retorno al tanque

Para evitar que el mayor número de residuos queden atrapados en el sistema, se ha agregado un filtro al retorno al tanque. Las características del filtro seleccionado se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.11 Selección del filtro de retorno

	Filter Paper				Microglass			Water Absorbing
	SF6520	SF6521	SF6510	SF6511	SF6549	SF6505	SF6504	SF6520-W
								
Diameter	93.2 (3.67)	93.2 (3.67)	93.2 (3.67)	93.2 (3.67)	93.2 (3.67)	93.2 (3.67)	93.2 (3.67)	93.2 (36.7)
Length	147 (5.76)	204 (8.00)	147 (5.76)	204 (8.00)	147 (5.76)	147 (5.76)	147 (5.76)	133 (5.25)
Element Thread	1-12 UNF	1-12 UNF	1-12 UNF	1-12 UNF	1-12 UNF	1-12 UNF	1-12 UNF	1-12 UNF
Beta Ratio	$\beta_{10} \geq 2$	$\beta_{10} \geq 2$	$\beta_{25} \geq 2$	$\beta_{25} \geq 2$	$\beta_3 \geq 75$	$\beta_{10} \geq 75$	$\beta_{25} \geq 75$	$\beta_{10} \geq 2$
Dirt Holding Capacity ACFTD (g)	14.4	22	20.4	31.2	19	11	26	Water holding capacity 162 ml (5.5 oz)
Filtration Area	2303 cm ² (357.5 in ²)	3881 cm ² (601.7 in ²)	2212 cm ² (342.9 in ²)	3388 cm ² (525.1 in ²)	2519 cm ² (390.4 in ²)	2405 cm ² (372.7 in ²)	2405 cm ² (372.7 in ²)	1225 cm ² (190 in ²)
Maximum Working Pressure	14 bar (200 PSI)	14 bar (200 PSI)	14 bar (200 PSI)	14 bar (200 PSI)	14 bar (200 PSI)	14 bar (200 PSI)	14 bar (200 PSI)	6.9 bar (100 PSI)
Carton Quantity	12	12	12	12	12	12	12	12
Carton Weight	6.3 kg (13.9 lb)	8.4 kg (18.5 lb)	6.4 kg (14.2 lb)	8.8 kg (19.4 lb)	8.6 kg (19 lb)	8.6 kg (19 lb)	8.6 kg (19 lb)	8.6 kg (19 lb)

Fuente: Anexo 9



Figura 4.13 Filtro de retorno²⁸

²⁸ Fuente: Anexo 9

4.2.2.18. Diseño del depósito

Para el dimensionamiento del depósito se debe tener en cuenta el caudal de bomba, las dimensiones del filtro interno y las dimensiones de los componentes que van sobre el depósito principalmente motor y bomba.

Las dimensiones del motor se muestran en el anexo 2, y las dimensiones de la bomba anexo 4.

En la tabla 4.12 se muestra las dimensiones del modelo de depósito Horizontal "Non-JIC". Este modelo satisface las necesidades de espacio y volumen que se requiere para el funcionamiento de la bomba.

Tabla 4.12 Dimensiones del depósito

Part Number	Capacity Gallons	Dimensions						End Cover	Sight Gauge	Material Thickness			
		A Height	B Width	C Length	D	D1 Mounting Centers	D2 Mounting Centers			Ends	Top	Body	Baffle
STHRR1010	10	9 1/2	16	26	24	25 1/4	15	N/A	STSG05	10 Ga.	1/4	10 Ga.	12 Ga.
STHRR1020	20	15 1/2	16	26	24	25 1/4	15	N/A	STSG05	10 Ga.	1/4	10 Ga.	12 Ga.
STHRR1030	30	21 1/2	16	26	24	25 1/4	15	N/A	STSG05	10 Ga.	1/4	10 Ga.	12 Ga.
STHRR1040	40	27 1/2	16	26	24	25 1/4	15	N/A	STSG05	10 Ga.	1/4	10 Ga.	12 Ga.

Fuente: (standardtechn, 2008)

En el anexo 10 se encuentra la información complementaria de las dimensiones del depósito.

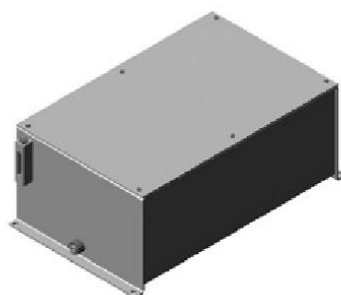


Figura 4.14 Forma del depósito Horizontal "Non-JIC"²⁹

²⁹ Fuente: Anexo 10

El indicador de nivel para el reservorio presentará las siguientes características:

Tabla 4.13 Características indicadores de nivel

INDICADORES DE NIVEL CON TERMÓMETRO					
KP	-3"				
Nº DE SERIE LS, KP, BS, LG	GRADO DE INCLINACIÓN PARA EL MONTAJE DE TORNILLOS 3", 4", 5", 500mm				
MODELO	LONGITUD (mm)	ANCHURA (mm)	GROSOR (mm)	INCLINACIÓN (mm)	TERMÓMETRO
KP-3"	101	38	17	78.2	INCLUIDO
KP-5"	151	38	18	127	INCLUIDO
LS-3"	118	42	18	78.2	INCLUIDO
LS-5"	187	47	20	127	INCLUIDO
BS-3"	104	38	20	78.2	INCLUIDO
BS-5"	155	38	20	127	INCLUIDO
LG-3"	108	25	13	75	
LG-4"	130	25	13	100	
LG-5"	158	25	13	127	
LG-200	230	28	25	200	
LG-300	330	28	25	300	
LG-400	430	28	25	400	
LG-500	530	28	25	500	

Fuente: (KompasSpain, 2006)

4.2.3. CONTROL SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema de control de la prensa queda definido como se muestra a continuación en la figura 4.14.

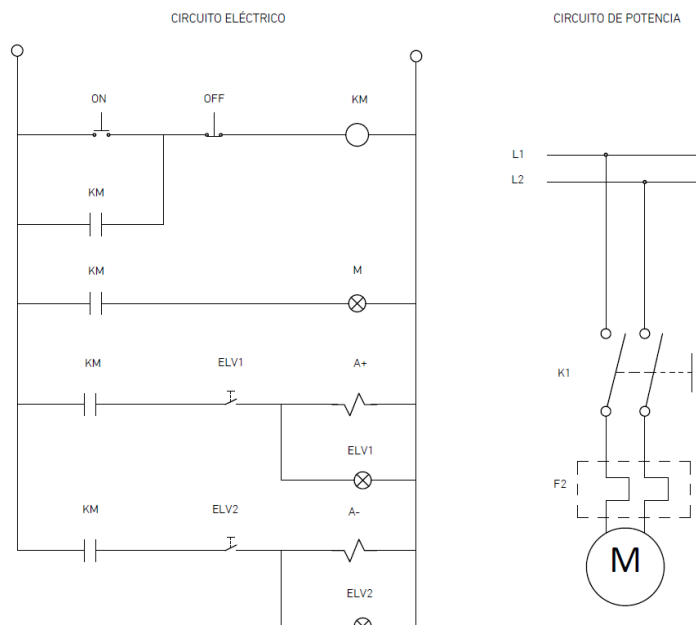


Figura 4.15 Control de la prensa³⁰

³⁰ Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 4.14 para el control se requiere:

- Un breaker de las siguientes características:



BKN 2P

Technical data

Standard	Confirming to IEC60898	
Approval	CCC, SABS, SEMKO CB, KEMA	
Protection	Against overload and short circuit	
Rated current In	1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63A	
Rated voltage	1pole 230/400VAC 50/60Hz 2, 3, 4pole 400VAC 50/60Hz	
Breaking capacity	6kA	
Characteristic	B, C, D curve	
Number of poles	1P, 1P+N, 2P, 3P, 3P+N and 4P	
Type of trip	Thermal-magnetic release	
Type of terminal	Lug type	
Terminal capacity	Cables up to 25mm ²	
Installation	Mounting on 35mm DIN rail	
Width	17.8mm per pole	
Electrical endurance		
In	1 ... 32A	40 ... 63A
Endurance	6000 cycles	6000 cycles
Max. frequency (Cycles/hour)	240	120

Figura 4.16 Características breaker³¹

- Un contactor de las siguientes características:

3-Pole Contactors								
AC3 Rating @440V	AC Coil				DC Coil			
	(W x H x D) mm	PART #	Aux. Contact	LIST PRICE	(W x H x D) mm	PART #	Aux. Contact	LIST PRICE
0A		GMC-9-AC □	1a1b	\$ 26.59		GMD-9-DC □	1a1b	\$ 27.64
12A	44 x 80 x 87	GMC-12-AC □	1a1b	\$ 29.51	44 x 80 x 113	GMD-12-DC □	1a1b	\$ 36.81
16A		GMC-16-AC □	1a1b	\$ 47.21		GMD-18-DC □	1a1b	\$ 61.06
22A		GMC-22-AC □	1a1b	\$ 49.02		GMD-22-DC □	1a1b	\$ 68.37

Figura 4.17 Características del contactor³²

- Un relé térmico de las siguientes características:

Thermal overload relays					
PART #	Standard (Trip class 10)		Setting Ranges (A)	Direct mount on	LIST PRICE
	Standard (Trip class 10)	Trip class 20			
GTK-22-□	GTK-22/L-□		0.1-0.16, 0.16-0.25, 0.25-0.4, 0.4-0.63, 0.63-1, 1-1.6, 1.6-2.5, 2.5-4, 4-6, 6-9, 7-10, 9-13, 12-18, 16-22A	GMC(D)-9~22	\$ 40.20
GTK-40-□	GTK-40/L-□		4-6, 5-8, 6-9, 7-10, 9-13, 12-18, 16-22, 18-26, 24-36, 28-40A	GMC(D)-32, 40	\$ 55.22

Figura 4.18 Características relé térmico³²

³¹ Fuente: Anexo 11

³² Fuente: Anexo 12

4.3. DISEÑO DE LA MATRIZ

4.3.1. FORMA DE LAS HERRAMIENTAS DE RECALCADO

En la matriz debe evitarse vértices vivos y cambios bruscos en las secciones. Para que el material fluya bien en el molde y que la pieza pueda sacarse fácilmente, la matriz debe tener un expulsor de no ser así la matriz deberá ser diseñada con planos inclinados en dirección de la conformación.

En la figura 4.18 se muestra un esquema de la matriz. El plano completo de la matriz y el resto de componentes de la matrickería se encuentra en el anexo 17.

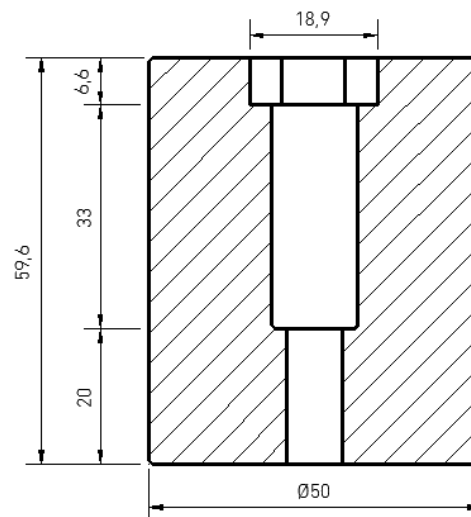


Figura 4.19 Modelo de la matriz. Medidas en milímetros³³.

4.3.2. SELECCIÓN DEL MATERIAL

La elección del acero depende en primer lugar del material de partida, en la conformación de aceros aleados las exigencias con relación a las herramientas son mayores que en los casos de fabricar aceros sin alear o metales no ferrosos.

³³ Fuente: Elaboración propia.

Además la matriz tiene que presentar ante todo una suficiente resistencia al revenido así como una resistencia al calor. El acero tampoco debe presentar grietas en caliente ocasionadas por las tensiones que se producen en caso de una reducida conductividad térmica del acero, además tiene que ser insensible al cambio continuo de temperaturas.

Para ello se utilizan casi siempre aceros de aleación múltiple que contienen tres o cuatro elementos. Una resistencia más elevada al revenido, al calor y al desgaste en caliente se obtiene mediante adición de wolframio, molibdeno, vanadio y cromo.

Para la matriz se utilizará el acero BÖHLER W302, este es un Acero para trabajar en caliente de gran resistencia en caliente y al desgaste en estado caliente, de buena tenacidad y resistencia a fisuras por recalentamiento.

La composición química y las propiedades físicas del acero que se va a utilizar se muestran en las tablas 4.14 y 4.15 respectivamente. Ver anexo 13 sobre la información del acero Bohler W302.

Tabla 4.14 Composición química y normas del acero BÖHLER W302

Composition chimique (valeurs indicatives en %)				Composición química (valores aproximados en %)	
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,39	1,10	0,40	5,20	1,40	0,95
Normes			Normas		
EN / DIN < 1.2344 > X40CrMoV5-1		AISI H13	BS BH13	SIS 2242	
UNE F5318 X40CrMoV5		GOST 4Ch5MF1S	JIS SKD61	UNI X40CrMoV5-11 KU	

Fuente: Anexo 13.

Tabla 4.15 Propiedades físicas acero BÖHLER W302

Propriétés physiques	Propiedades físicas
Densité à / Densidad a	20°C .....7,80 .....kg/dm ³ 500°C .....7,64 .....kg/dm ³ 600°C .....7,60 .....kg/dm ³
Chaleur spécifique à / Calor específico a.....	20°C .....460 .....J/(kg.K) 500°C .....550 .....J/(kg.K) 600°C .....590 .....J/(kg.K)
Résistivité à / Resistencia eléctrica específica a	20°C .....0,52 .....Ohm.mm ² /m 500°C .....0,86 .....Ohm.mm ² /m 600°C .....0,96 .....Ohm.mm ² /m
Module d' élasticité à / Módulo de elasticidad a	20°C .....215 x 10 ³ .N/mm ² 500°C .....176 x 10 ³ .N/mm ² 600°C .....165 x 10 ³ .N/mm ²

Fuente: Anexo 13

Al acero W302 se le aplicará dos tratamientos térmicos el Temple y el Revenido.

Tabla 4.16 Aceros y durezas recomendadas para la fabricación de herramientas

Acero según AISI	Dureza de Temple y Revenido (HRC)	Conformación en Caliente (°C)
T1	59-62	1000-1170
M2	59-62	1050-1150
D2	58-62	1010-1095
O1	58-60	980-1065
S1	55-59	1010-1120
H13	48-52	1040-1195

Fuente: Anexo 13

En la tabla 4.16 se pueden ver los valores de dureza que se obtienen con un tratamiento térmico correcto de la herramienta.

4.3.3. ESFUERZOS SOBRE LAS HERRAMIENTAS

Las herramientas (matriz, punzón, porta matriz) en el proceso de recalcado están expuestas a distintos esfuerzos tales como tracción, compresión, flexión y torsión. Por lo tanto, la matriz ha de ser muy tenaz y resistente. Además en las herramientas para el trabajo en caliente la sollicitación térmica adicional que se presenta depende de la temperatura de conformación en caliente, de la velocidad de trabajo, del tiempo de contacto entre la herramienta y el metal.

Para el cálculo de esfuerzos y factor de seguridad que soporta la matriz se utilizará el análisis de *elementos finitos de solidworks* ver figura. 4.19. El criterio que utiliza solidworks para el análisis del factor de seguridad es:

$$\frac{\sigma_{limit}}{\sigma_{vonMises}} > 1$$

El análisis muestra que el material (acero BÖHLER W302) tiene un valor mínimo de factor de seguridad de 30 lo cual garantiza que soporta los 21245 N (2.38Ton).

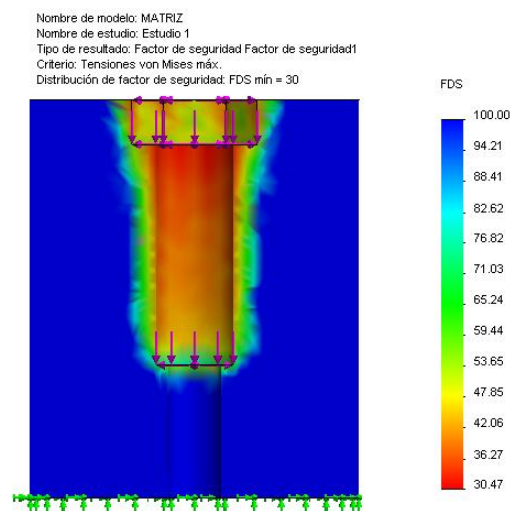


Figura 4.20 Factor de Seguridad de la Matriz.³⁴

³⁴ Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. DURACION DE LAS HERRAMIENTAS

El rendimiento de las herramientas es distinto según los diversos procedimientos de trabajo.

Los principales factores que influyen en la vida útil de las herramientas se indican en la tabla 4.17.

Tabla 4.17 Magnitudes de influencia sobre la duración de las herramientas de recalcar y prensar

Herramienta	Pieza recalcada	Material de partida	Modo de trabajo de la máquina	Otras influencias
Material utilizado para la herramienta	Forma y dimensión de la pieza	Resistencia a la deformación	Clase de conformación	Estado de la máquina
Tratamiento en caliente	Tolerancias prescritas	Exactitud de medidas	Temperatura de conformación	Montaje de la herramientas
Geometría y forma de la herramienta	Magnitud de la conformación	Estado superficial	Velocidad de trabajo	Lubricante
Calidad de fabricación			Refrigeración de la herramienta	

Fuente: (Billigmann, 2002)

4.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

4.4.1. RECINTO DEL HORNO

El recinto del horno eléctrico está formado básicamente por una cámara y el aislamiento térmico, en su interior se dispone la resistencia y la carga.

4.4.1.1. Dimensiones del Horno:

-Dimensiones internas:

$$L = 0,128 \text{ m}$$

$$H = 0,128 \text{ m}$$

$$A = 0,210 \text{ m}$$

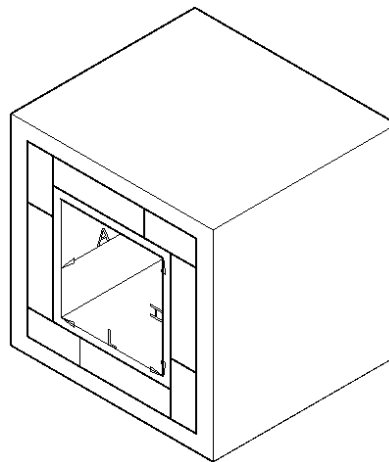


Figura 4.21 Dimensiones internas del horno.³⁵

-Espesor de las paredes laterales:

$$L1 = 0,010 \text{ m}$$

$$L2 = 0,032 \text{ m}$$

$$L3 = 0,034 \text{ m}$$

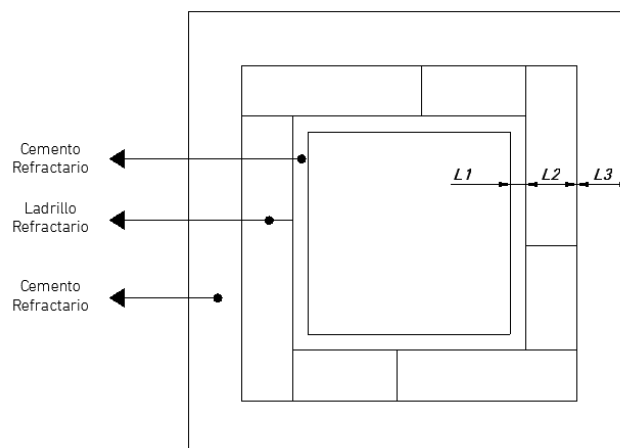


Figura 4.22 Espesor y material de las paredes del horno³⁵

³⁵ Fuente: Elaboración propia.

-Dimensiones y espesor parte frontal:

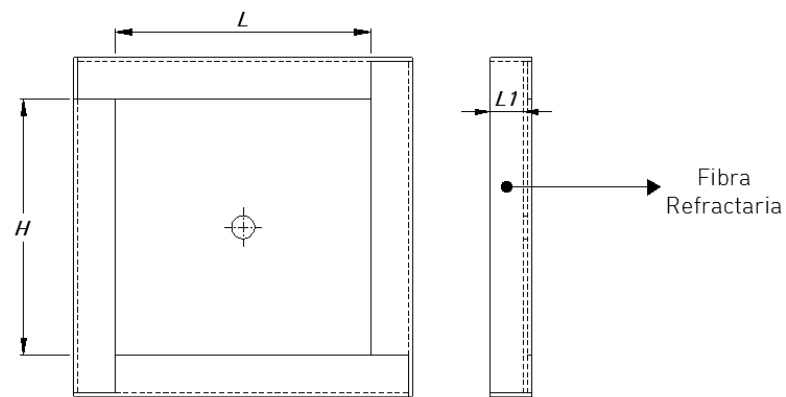


Figura 4.23 Espesor y material parte frontal del horno³⁵

$$L = 0,122 \text{ m}$$

$$L1 = 0,016 \text{ m}$$

$$H = 0,122 \text{ m}$$

-Dimensiones y espesor parte posterior:

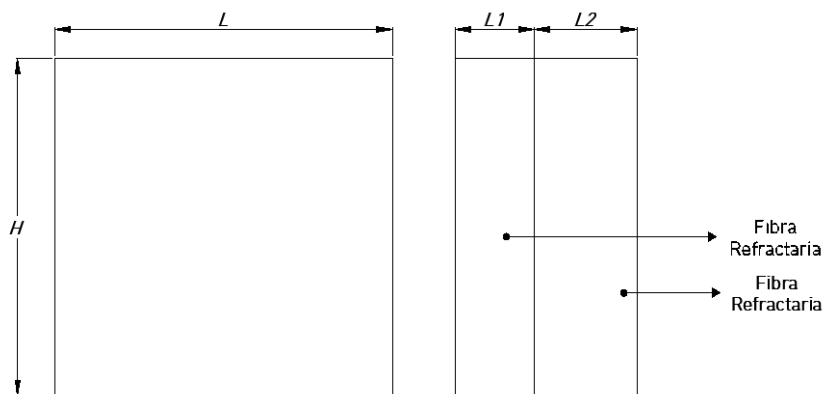


Figura 4.24 Espesor y material parte posterior del horno³⁵

$$L = 0,128 \text{ m}$$

$$H = 0,128 \text{ m}$$

$$L1 = 0,030 \text{ m}$$

$$L2 = 0,039 \text{ m}$$

4.4.2. PÉRDIDAS DE CALOR

4.4.2.1. Pérdidas de calor por paredes planas

Las pérdidas de calor dependen fundamentalmente de las características del aislamiento de los materiales, mientras que la transmisión de calor se realiza por conducción a través de la pared y por convección y radiación del exterior del horno al ambiente.

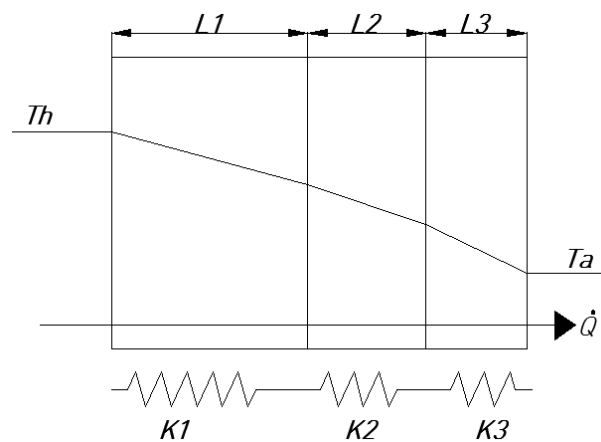


Figura 4.25 Conducción unidimensional a través de una pared plana³⁵

$$Q_p = \frac{T_h - T_a}{\frac{1}{A h_i} + \frac{L_1}{A k_1} + \frac{L_2}{A k_2} + \frac{L_3}{A k_3} + \frac{1}{A h_e}}$$

Donde:

T_h : Temperatura en el interior del horno

T_a : Temperatura ambiente exterior

L_1, L_2, L_3 : Espesor de la capa de aislamiento

h_i, h_e : Coeficiente de convección

k_1, k_2, k_3 : Coeficientes de conducción

A : Área de las capas de aislamiento

4.4.2.1.1. Cálculo de las pérdidas por paredes laterales

-Datos:

Tabla 4.18 Conductividad Térmica

Material	Conductividad Térmica λ (W/m ² *k)
Ladrillo Refractario	260 °C- 0,19
	538°C – 0,24
	816 °C – 0,30
	1093 °C – 0,38
Concreto Refractario	205 °C- 0,88
	650°C – 0,89
	870 °C – 0,91
	1095 °C – 0,95
Fibra Refractaria	316 °C- 0,07
	538°C – 0,09
	760 °C – 0,12
	1094 °C – 0,17

Fuente: Anexo 14

$T_{a1} = 800$ ° C Temperatura interna del horno

$T_{a2} = 25$ ° C Temperatura ambiente

-Cálculos:

Área pared lateral (A_{pl}):

$$A_{pl} = H A = 0,128 (0,21) = 0,027 \text{ m}^2$$

Pérdidas por paredes laterales (Q_p):

$$Q_p = 4 \frac{T_{a1} - T_{a2}}{\frac{L_1}{A_{pl} k_1} + \frac{L_2}{A_{pl} k_1} + \frac{L_3}{A_{pl} k_1}}$$

$$Q_p = 4 \frac{800 - 25}{\frac{0,010}{0,027 (0,91)} + \frac{0,032}{0,027 (0,30)} + \frac{0,034}{0,027 (0,89)}}$$

$$Q_p = 537,02 \text{ W}$$

4.4.2.1.2. Cálculo de pérdidas en la parte frontal y posterior

Área de la parte frontal (A_f).

$$A_f = HL = 0,122 (0,122) = 0,014 \text{ m}^2$$

Pérdidas por la tapa frontal (Q_f):

$$Q_f = \frac{T_{a1} - T_{a2}}{\frac{L_1}{A_f k_1}}$$

$$Q_f = \frac{800 - 25}{\frac{0,016}{0,014 (0,91)}}$$

$$Q_f = 617,09 \text{ W}$$

Área de la parte posterior (A_p).

$$A_p = HL = 0,128 (0,128) = 0,016 \text{ m}^2$$

Pérdidas por la tapa posterior (Q_p):

$$Q_p = \frac{T_{a1} - T_{a2}}{\frac{L_1}{A_p k_1} + \frac{L_2}{A_p k_2}}$$

$$Q_p = \frac{800 - 25}{\frac{0,030}{0,016 (0,12)} + \frac{0,039}{0,016 (0,09)}}$$

$$Q_p = 18,14 \text{ W}$$

4.4.3. CÁLCULO DE LA ENERGÍA ABSORBIDA POR LA CARGA

La energía E_a absorbida por la carga se emplea en elevar su temperatura. Si suponemos que la conductividad térmica es suficiente para admitir una misma temperatura en toda la masa de la carga:

$$E_a = M C_p \Delta T_c \quad Wh$$

Donde:

M : Masa de la carga en kg

C_p : Calor específico de la carga en $\frac{Wh}{Kg K}$

ΔT_c : Incremento de la temperatura de la carga

-Datos:

Calor específico del latón: $C_p = 0,38 \frac{KJ}{Kg \cdot K} = 0,11 Wh$

Conversión a Watts hora (Wh): $1 Wh = 3,6 KJ$

Densidad para el latón: $\rho = 8530 \frac{Kg}{m^3}$

Longitud de la pieza de trabajo: $L_p = 0,012 m$

Diámetro de la pieza de trabajo: $\emptyset_p = 0,0127 m$

-Cálculos:

Volumen de la pieza de trabajo:

$$V_p = \frac{\pi \emptyset_p^2}{4} L_p$$

$$V_p = \frac{\pi (0,0127)^2}{4} 0,012 = 1,52 \times 10^{-6} m^3$$

Energía absorbida por la pieza de trabajo:

$$Ea = \rho Vp Cp Ta1 - Ta2$$

$$Ea = 8530 \cdot 1,52 \times 10^{-6} \cdot 0,11 \cdot 800 - 25$$

$$Ea = 1,11 Wh$$

4.4.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO DE LA PIEZA DE TRABAJO

Para encontrar el tiempo de calentamiento se va a utilizar la siguiente fórmula sacada del libro de Hornos de Resistencia Industriales de Julio Astigarraga Urquiza:

$$t = \frac{M c_e}{A_r \alpha_{rm} + A_c \alpha} Ln \frac{T_h - T_{co}}{\delta_T}$$

Dónde:

M = masa de la carga en Kg

C_e = calor específico de la carga en $\frac{Wh}{kg \cdot K}$ o en $\frac{KJ}{kg \cdot K}$, $1 \frac{Wh}{kg \cdot K} = 3,6 \frac{KJ}{kg \cdot K}$

A_r = superficie de la carga para la radiación

A_c = superficie de la carga para la convección

α_{rm} = coeficiente por radiación en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

α = coeficiente de convección en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

T_h = Temperatura del horno

T_{co} = Temperatura inicial de la carga

δ_T = Diferencia admisible entre la temperatura de regulación del horno y temperatura final de la carga

4.4.4.1. Tiempo de calentamiento para el Aluminio

-Datos:

$$\sigma = \text{Constante de Stefan – Boltzmann } 5,67 (10^{-8}) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$F_{ch} = 0,20$$

Temperatura ambiente: $T_f = 500^\circ \text{C}$

Coefficiente por radiación:

$$\alpha_{rm} = 4 \sigma F_{ch} (T_f + 273)^3$$

$$\alpha_{rm} = 4 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot 0,2 \cdot (500 + 273)^3$$

$$\alpha_{rm} = 20,95 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Coefficiente por convección:

$$\alpha = 13,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Calor específico:

$$C_e = 1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}} \text{ a temperatura del aluminio de } 500^\circ \text{C}$$

Masa:

$$M = \rho V = 2700 \frac{\pi (12,7)^2}{4} \frac{48}{1000^3} = 0,0164 \text{ Kg}$$

Cálculo:

$$t = \frac{0,0164 \frac{1}{3,6}}{1,88 \cdot 10^{-3} \cdot 20,95 + 1,88 \cdot 10^{-3} \cdot (13,4)} \text{Ln} \frac{500 - 24}{5}$$

$$t = 0,32 \text{ h} = 19,28 \text{ min}$$

4.4.4.2. Tiempo de calentamiento para el Cobre

-Datos:

$$\sigma = \text{Constante de Stefan – Boltzmann } 5,67 (10^{-8}) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$F_{ch} = 0,15$$

Temperatura ambiente: $T_f = 700^\circ \text{C}$

Coficiente por radiación:

$$\alpha_{rm} = 4 \sigma F_{ch} (T_f + 273)^3$$

$$\alpha_{rm} = 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (0,15) \cdot (700 + 273)^3$$

$$\alpha_{rm} = 26,75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Coficiente por convección:

$$\alpha = 12,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Calor específico:

$$C_e = 0,419 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \text{ a temperatura del cobre de } 600^\circ \text{C}$$

Masa:

$$M = \rho V = 8440 \frac{\pi \cdot 12,7^2}{4} \frac{48}{1000^3} = 0,0513 \text{ Kg}$$

-Cálculo:

$$t = \frac{0,0513 \cdot \frac{0,419}{3,6}}{1,88 (10^{-3}) (26,75) + 1,88 (10^{-3}) (12,2)} \text{Ln} \frac{700 - 24}{5}$$

$$t = 0,40 \text{ h} = 24 \text{ min}$$

4.4.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA CALENTAR LA PIEZA DE TRABAJO

La probeta entra a la cámara del horno a una temperatura ambiente de 25°C aproximadamente, la temperatura de calentamiento para el latón será de 700°C y para la aleación de aluminio será de 500°C.

-Datos:

Tiempo de calentamiento: $t = 0,40$ h (24 min)

Energía absorbida por la pieza de trabajo: $E_a = 1,11$ Wh

-Cálculo:

Potencia requerida para calentar la pieza de trabajo:

$$Qa = \frac{E_a}{t}$$

$$Qa = \frac{1,11}{0,40}$$

$$Qa = 2,77 \text{ W}$$

4.4.6. CÁLCULO DE LA POTENCIA ESPECIFICA DEL HORNO

En la figura 4.25 se presentan valores de la potencia del horno en función al área de la cámara del horno, a esta potencia se le sumara las pérdidas para obtener la potencia final del horno.

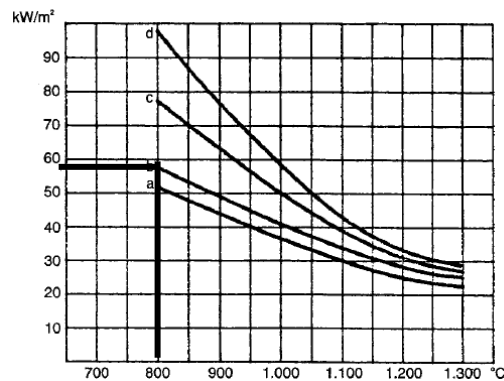


Figura 4.26 Potencia específica máxima en hornos³⁶

-Datos:

Área cámara del horno: A_{ch} : 0,10752 m²

Potencia específica: P_{esp} : 58 $\frac{Kw}{m^2}$

$$P_{esp} = 58 (0,10752)$$

$$P_{esp} = 6,23616 \text{ kw}$$

$$P_{esp} = 6236,16 \text{ W}$$

4.4.7. POTENCIA MEDIA REQUERIDA

$$Q_m = Q_p + Q_f + Q_p + Q_a + P_{esp}$$

$$Q_m = 537,02 + 617,09 + 18,14 + 2,77 + 6236,16$$

$$Q_m = 7411,18W \approx 7500W$$

³⁶ Fuente: (Astigarraga, 1999).

La potencia que se utilizará para el cálculo de la resistencia eléctrica será 7500W considerando las pérdidas por un uso intermitente del horno y por la apertura de la puerta.

4.4.8. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

-Datos:

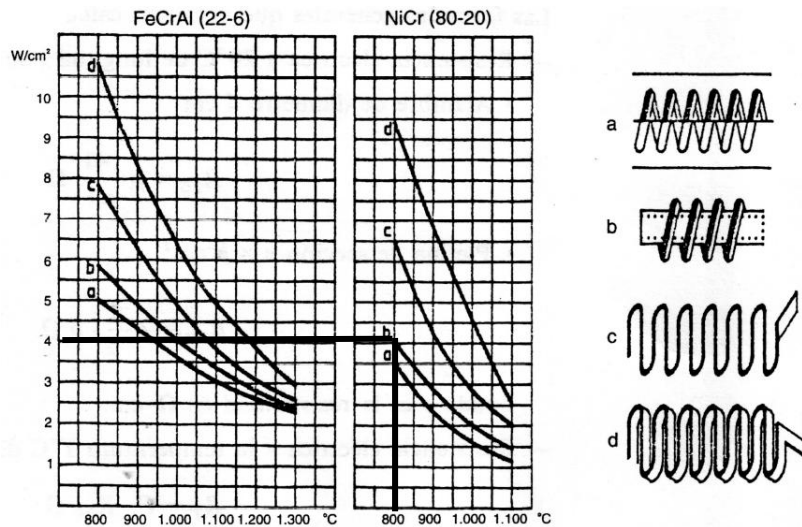


Figura 4.27 Carga específica máxima de resistencias³⁷

Potencia requerida: $P = Qm$

Tensión: $V = 220 \text{ V}$

Temperatura máxima de operación: $T_o = 800 \text{ }^\circ\text{C}$

Resistividad eléctrica: $\rho_{re} = 114 \times 10^{-6} \text{ } \Omega \text{ cm}$ (Tabla 2.7)

Coefficiente de resistividad: $Ct = 1,018$ (Tabla 2.7)

Carga específica: $p = 4 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ (Figura 4.26)

³⁷ Fuente: (Astigarraga, 1999)

-Cálculos:

Diámetro de la resistencia:

$$\frac{A_c}{R_{20}} = \frac{P^2 C_t}{V^2 \rho}$$

$$\frac{A_c}{R_{20}} = \frac{7500^2 (1,018)}{220^2 (4)}$$

$$\frac{A_c}{R_{20}} = 295,77 \frac{\text{cm}^2}{\Omega}$$

Tabla 4.19 Propiedades distintas para la resistencia Nikrothal 80

NIKROTHAL 80													
Wire and Strip. Standard stock items.													
Resistivity 1.09 $\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$. Density 8.30 g cm^{-3} . To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.													
$^{\circ}\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
C_t	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07
Wire dia mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega 20^{\circ}\text{C}$	Strip*) WxT mm	Resistance $\Omega/\text{m } 20^{\circ}\text{C}$	Weight g/m	$\text{cm}^2/\Omega 20^{\circ}\text{C}$						
1.0	1.39	6.52	22.6	15.0x1.0	0.0727	125	4404						
1.2	0.964	9.39	39.1	20.0x1.0	0.0545	166	7706						
1.3	0.821	11.0	49.7	25.0x1.0	0.0436	208	11930						
1.4	0.708	12.8	62.1	12.0x1.2	0.0757	120	3488						
1.5	0.617	14.7	76.4	15.0x1.5	0.0484	187	6812						
1.6	0.542	16.7	92.7	20.0x1.5	0.0363	249	11840						
1.8	0.428	21.1	132	25.0x1.5	0.0291	311	18230						
2.0	0.347	26.1	181	15.0x2.0	0.0363	249	9358						
2.3	0.262	34.5	275	20.0x2.0	0.0273	332	16150						
2.5	0.222	40.7	354	25.0x2.0	0.0218	415	24770						
2.6	0.205	44.1	395	30.0x2.0	0.0182	498	35230						

Fuente: Anexo 15

En la tabla 4.19 encontré que el valor más próximo es de $354 \frac{\text{cm}^2}{\Omega}$ correspondiente a un diámetro de 2,5mm, por lo tanto:

$$\phi_{re} = 2,5 \text{ mm}$$

Se comprueba mediante el siguiente cálculo alternativo.

$$\phi_{re} = 0,74 \sqrt[3]{\frac{P^2 \rho_{re} Ct}{V p}}$$

$$\phi_{re} = 0,74 \sqrt[3]{\frac{7500^2}{220} \frac{114 \times 10^{-6} \cdot 1,018}{4}}$$

$$\phi_{re} = 0,239 \text{ cm} = 2,39 \text{ mm} \approx 2,5 \text{ mm}$$

Longitud del alambre NICROM:

$$Lre = \frac{P}{\pi \phi_{re} p}$$

$$Lre = \frac{7500}{\pi(0,25)(4)}$$

$$Lre = 2387,32 \text{ cm} = 23,87 \text{ m}$$

Diámetro de la espira:

$$D = 3 \phi_{re}$$

$$D = 3 (2,5)$$

$$D = 7,5 \text{ mm}$$

Número de espiras:

$$N = \frac{Lre}{\pi (D - \phi_{re})}$$

$$N = \frac{23,87}{\pi (0,0075 - 0,0025)}$$

$$N = 1519 \text{ espiras}$$

Espiras cerradas:

$$Lec = N \phi_{re}$$

$$Lec = 1519 (0,25)$$

$$Lec = 379,75 \text{ cm} \approx 3,80 \text{ m}$$

4.4.9. SISTEMA DE CONTROL

El horno debe operar a una determinada temperatura de calentamiento, para ello se colocará un detector de temperatura y un control de temperatura. En la figura 4.27 se puede observar un esquema del sistema de control.

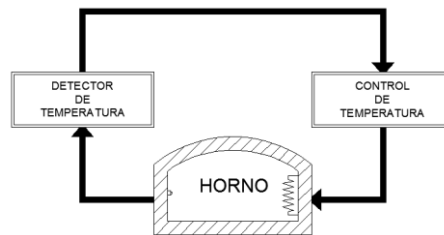


Figura 4.28 Esquema del sistema de control.³⁸

4.4.9.1. Detector de Temperatura

Se colocará un termopar que se utiliza para la detección de temperaturas comprendidas entre 200°C y 1400°C, también se utilizan para temperaturas bajas hasta -200°C. El termopar consta de la unión de dos metales distintos que producen un voltaje que es función de la diferencia de temperatura.

Tabla 4.20 Tipos de termopares

Termopar Tipo	Aleación	Rango	IEC 584
K	Níquel-Cromo Níquel-Aluminio	-150 a 1100°C	
J	Hierro Cobre-Níquel	-40 a 700°C	
T	Cobre Cobre-Níquel	-200 a 350°C	
E	Níquel-Cromo Cobre-Níquel	-150 a 800°C	
N	Níquel-Cromo Níquel-Silicio	-150 a 1100°C	
S	Platino Platino-Rodio10%	0 a 1550°C	
R	Platino Platino-Rodio13%	0 a 1600°C	
B	Platino-Rodio6% Platino-Rodio30%	0 a 1700°C	

Fuente: (Maikontrol, 2009)

³⁸ Fuente: Elaboración propia.

El termopar a utilizar en el horno será la tipo k ya que cumple con el rango de temperatura de funcionamiento del horno de acuerdo a la tabla 4.20.

4.4.9.2. Control de Temperatura

El control de temperatura se encarga de activar o desactivar la entrada de corriente a la resistencia interna del horno.

El controlador PID que se va a utilizar presenta tres acciones (proporcional, integral y derivativa).

La acción proporcional se presenta cuando hay una desviación entre el punto de consigna y el valor real, el elemento de control se modifica en una cantidad proporcional al error.

La acción integral se la puede expresar como la velocidad con que se mueve la señal de salida, y es proporcional al error existente.

La acción derivativa se opone a las desviaciones con una acción que es proporcional a la rapidez de las mismas. La diferencia entre un controlador PI y otro PID es que este último hace que la válvula pase por una posición determinada antes de lo que lo haría un PI solo. Es únicamente una ligera mejora, no existiendo mucha diferencia entre el controlador PI y el PID.

Los parámetros PID se introducirán como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 4. 21 PID y parámetros relevantes

Símbolo	Descripción	Rango	Default	Comentario
P	Banda proporcional	0.1 ~ 99.9 (%)	5.0	Nota 1
I	Tiempo de integración	2 ~ 1999 (seg)	100	Nota 2
D	Tiempo de diferenciación	0 ~ 399 (seg)	20	Nota 3
SouF	Coeficiente de supresión de sobreimpulso	0.0 ~ 1.0	0.2	Nota 4
Ot	Periodo de control	2 ~ 199 (seg)	2	Nota 5
Filt	Filtrado digital	0 ~ 3	0	Nota 6
End	Salida			

Fuente: Anexo 17

Los parámetros P, I y D controlan la exactitud y el tiempo de respuesta del controlador de temperatura.

El autoajuste se recomienda para usuarios que no están familiarizados con la teoría de control PID. P, I y D. Los valores se deben ajustar sólo por profesionales.

Nota 1

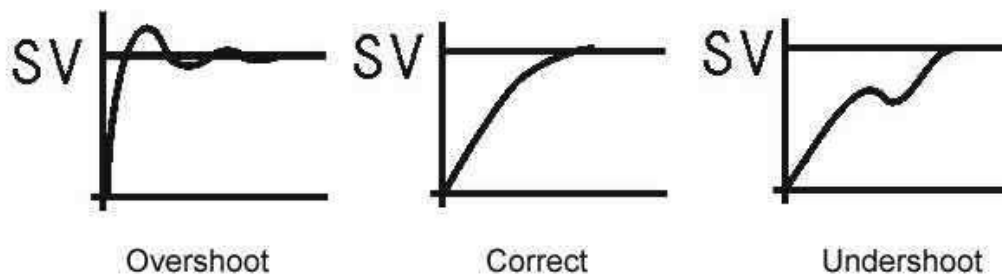
Banda Proporcional (P): Cuando P incrementa, la fluctuación del objeto a ser controlado disminuye. Cuando P disminuye, la fluctuación del objeto a ser controlado se incrementa. Cuando el valor de P es demasiado pequeño, el sistema puede volverse no convergente.

Nota 2

Tiempo de integración (I): su propósito es reducir el error estático. Cuando I disminuye, la velocidad de respuesta es más rápida pero el sistema es menos estable. Cuando I aumentar, la velocidad de respuesta es más lenta, pero el sistema es más estable.

Nota 3

El tiempo diferencial (d): su propósito es controlar de antemano y compensar retraso. Configurando el valor d demasiado pequeño o demasiado grande disminuiría la estabilidad del sistema, la oscilación o incluso no converger.

Nota 4

Coefficiente de supresión de sobreimpulso: Cuando existe exceso, aumenta $SouF$.
 Cuándo existe subimpulso, disminuye $SouF$.

Nota 5

Período de control (ot): Cuando ot se hace más pequeño, el ciclo de calefacción / refrigeración es llevado más rápido, la velocidad de respuesta del sistema es más rápida. Sin embargo, cuando se utiliza el control de contactos (relés), los contactos se desgastan más rápidamente. Cuando se utiliza el control de contacto (relé), normalmente se establece $ot = 5 \sim 15$. Cuando se utiliza el control sin contacto (SSR), normalmente se establece $ot = 2$.

Nota 6

Filtrado Digital (Filt): Filt = 0, el filtro desactivado; Filt = 1, débil efecto de filtrado; Filt = 3, el más fuerte efecto de filtrado; Mientras más fuerte el filtrado, más estable es la lectura, pero tiene más retraso en la visualización de las lecturas.

Para entrar en los parámetros de temperatura y alarma pulse siga la siguiente tabla:

Tabla 4. 22 Configuración de la temperatura y los parámetros relacionados a la alarma

Símbolo	Descripción	Rango	Default
SV	Temperatura objetivo	Con rango de prueba	80
AH1	Relé cerrado	Con rango de prueba	80
AL1	Relé abierto	Con rango de prueba	90
AH2	Relé cerrado	Con rango de prueba	80
AL2	Relé abierto	Con rango de prueba	90
End	salida		

Fuente: Anexo 17

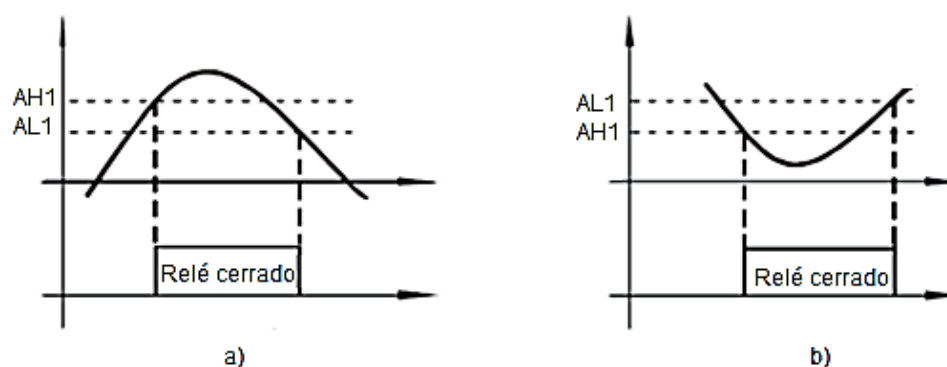


Figura 4. 29 Curvas de medición³⁹

Durante el modo de operación normal, la pantalla Mostrará SV.

- a) $AH1=AL1$, relé esta desactivado.
- b) $AH1>AL1$ (o $AH2>AL2$): Normalmente utilizado para activación de alarma de límite superior. Ver la Figura 4.28 a).
- c) $AH1<AL1$ (o $AH2<AL2$): Normalmente se utiliza para alarma de límite inferior gatillo. Ver la Figura 4.28 b).

³⁹ Fuente: Anexo 17

4.4.10. CONEXIÓN SISTEMA DE CONTROL

La conexión del sistema de control quedó establecida como se muestra en la figura 4.29.

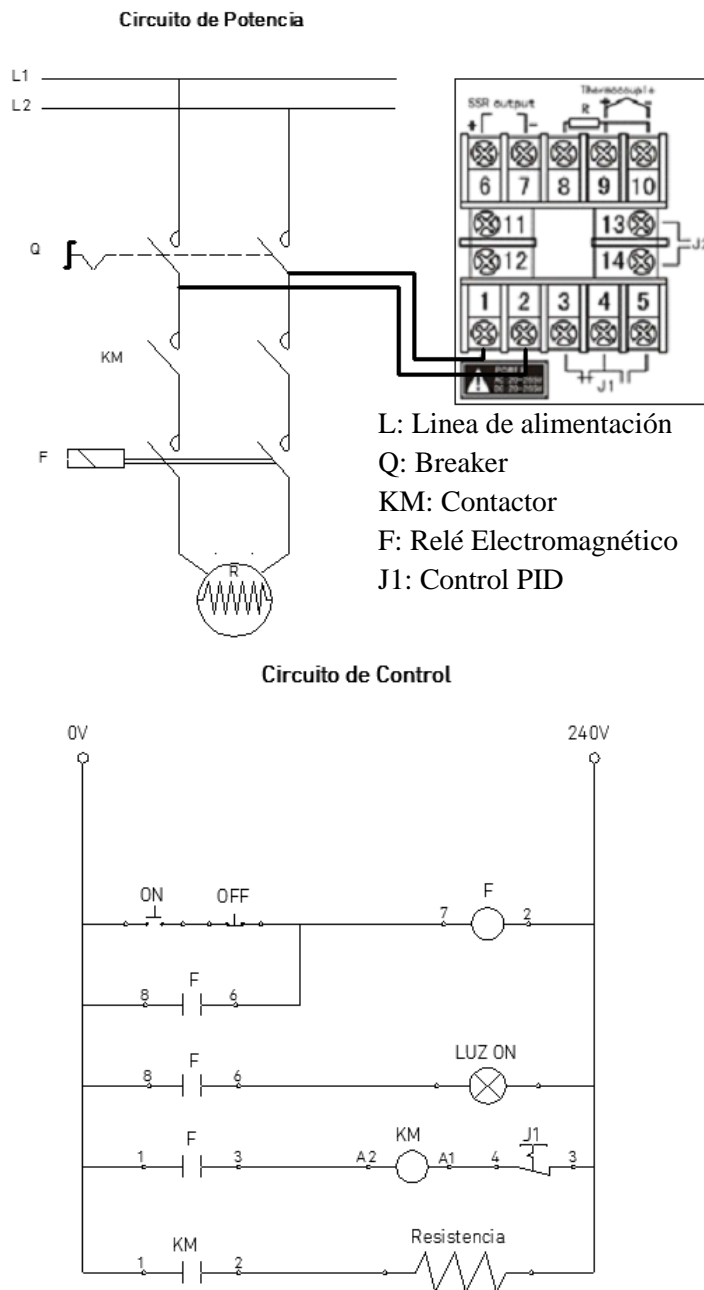


Figura 4.30 Conexión del sistema de control.⁴⁰

⁴⁰ Fuente: Elaboración propia.

4.5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BASTIDOR

La estructura debe ser capaz de soportar la fuerza del cilindro hidráulico, además de servir de base para el porta matriz y de soporte del control del sistema hidráulico.

Todos los elementos mencionados se los observa en la figura 4.30.

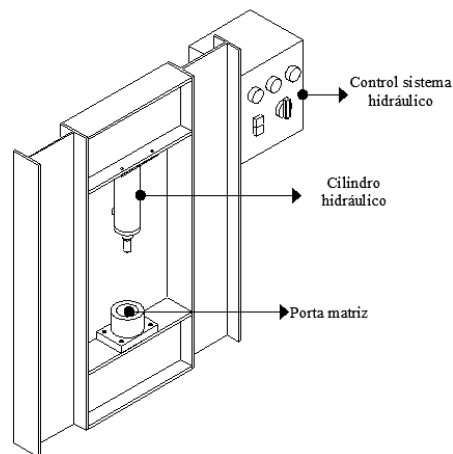


Figura 4.31 Esquema del bastidor con sus elementos.⁴¹

4.5.1. DIMENSIONES DEL BASTIDOR

El bastidor será construido con un perfil IPE 160 debido a la disponibilidad de este material, las dimensiones principales del bastidor están definidas como se muestra en la siguiente figura. Para más detalle del perfil IPE 160 ir al anexo 16.

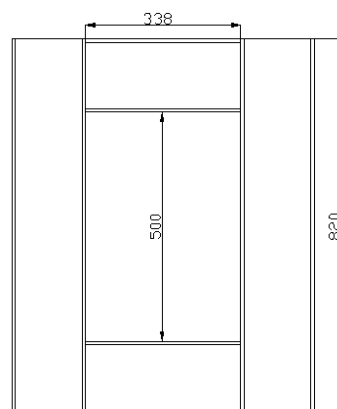


Figura 4.32 Dimensiones del Bastidor⁴¹

⁴¹ Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. ANÁLISIS DE CARGAS DE LA ESTRUCTURA

Debido a que el bastidor está sometido a cargas de flexión, compresión, se debe comprobar que este las soporte. Para lo cual se realizó el siguiente análisis.

4.5.2.1. Análisis de carga viga superior

-Datos:

PERFIL IPE 160 (ASTM A36)

IPE	Inercia (cm ⁴)		Sección (cm ²)	Peso (kg/m)	Dimensiones (mm)				
	I_x	I_y	A	P	h	s	g	t	R
160	869	68,30	20,11	15,80	160	82	5	7,4	7

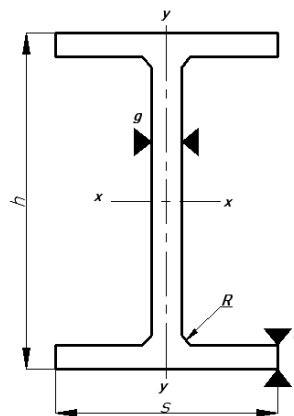


Figura 4.33 Dimensiones del Perfil IPE 160.⁴²

Límite de fluencia ASTM A36: $S_y = 250$ MPa

$$F = 7 \text{ Ton} = 62275 \text{ N}$$

$$W = 9,81 PL = 9,81 (15,80) (0,338) = 52,39 \text{ N}$$

⁴² Fuente: Anexo 16.

-Resolución:

$$F_y = 0$$

$$-R_A - R_B + F - W = 0$$

$$-R_A - R_B + 62275 - 52,39 = 0$$

$$R_A + R_B = 62222,61$$

$$M_A = 0$$

$$168 F - 169 W - 338 (R_B) = 0$$

$$169 \cdot 62222,61 - 169 \cdot 52,39 - 338 (R_B) = 0$$

$$R_B = 31085,11 \text{ N}$$

$$R_A = 31085,11 \text{ N}$$

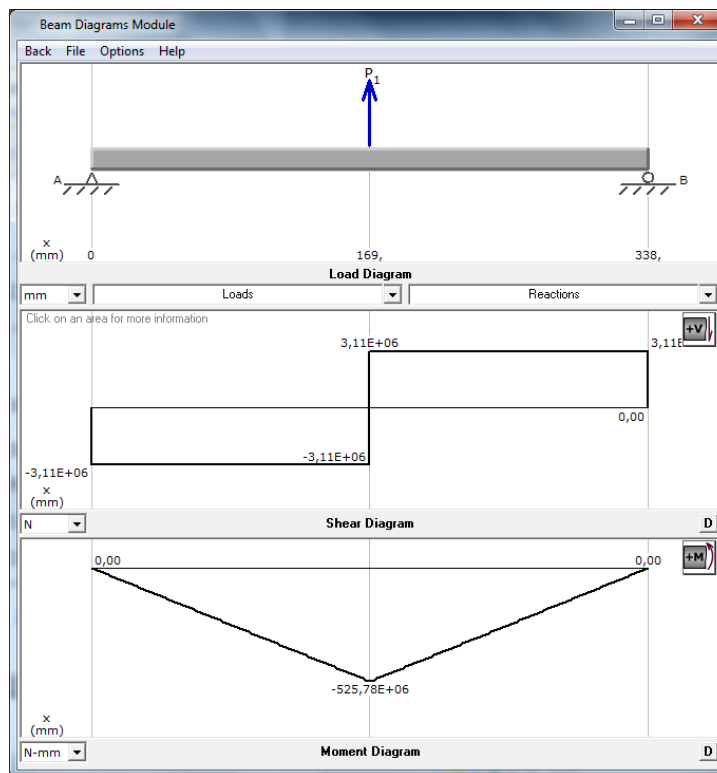


Figura 4.34 Análisis de carga en la viga superior.⁴³

⁴³ Fuente: Imagen generada en Md-Solid

$$M_{max} = M_A + AV_C^A$$

$$M_{max} = 0 + 31085,11(169)$$

$$M_{max} = 5253383,60 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{I_x} = \frac{5253383,60 (80)}{869 (10^4)}$$

$$\sigma_{max} = 48,36 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} = \frac{250}{48,36}$$

$$n = 5,17$$

4.5.2.2. Análisis de carga columna

PERFIL IPE 160 (ASTM A36)

IPE	Inercia (cm ⁴)		Sección (cm ²)	Peso (kg/m)	Dimensiones (mm)				
	I _x	I _y	A	P	h	s	g	t	R
160	869	68,30	20,11	15,80	160	82	5	7,4	7

Límite de fluencia ASTM A36: $S_y = 250 \text{ MPa}$

$$F = 31126,5 \text{ N}$$

$$W_{viga} = 9,81 PL = 9,81(15,80) (0,820) = 127,10 \text{ N}$$

-Resolución:

$$F_c = F + W_{viga}$$

$$F_c = 31126,5 + 127,10$$

$$F_c = 31253,60 \text{ N}$$

$$\sigma_c = \frac{Fc}{A}$$

$$\sigma_c = \frac{31253,60}{2011}$$

$$\sigma_c = 15,54 \text{ MPa}$$

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

$$n = \frac{250}{15,54}$$

$$n = 16,09$$

4.5.2.3. Análisis de carga viga inferior

PERFIL IPE 160 (ASTM A36)

Límite de fluencia ASTM A36: $S_y = 250 \text{ MPa}$

$W_I = 519 \text{ N/mm}$

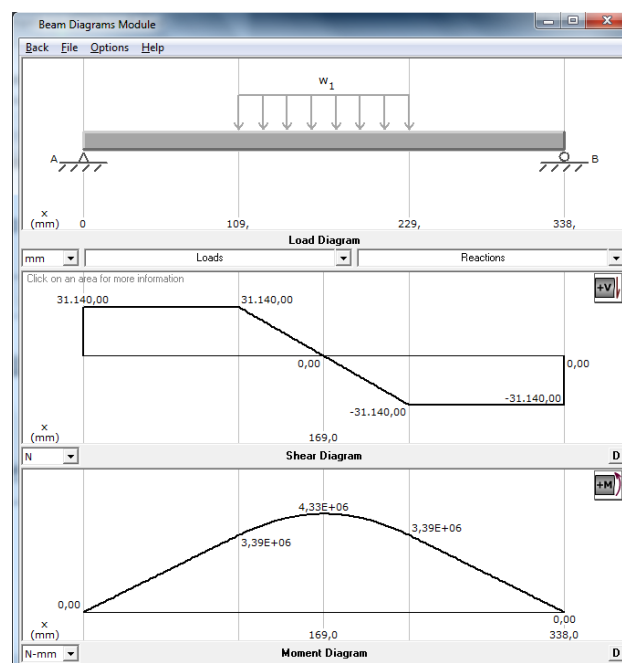


Figura 4.35 Análisis de carga en la viga inferior.⁴⁴

⁴⁴ Fuente: Imagen generada en Md-Solid.

$$M_{max} = 4328460 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{I_y} = \frac{4328460 (80)}{869 (10^4)}$$

$$\sigma_{max} = 39,85 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} = \frac{250}{39,85}$$

$$n = 6,27$$

4.5.2.4. Análisis de la soldadura

Ahora se comprobará que el tamaño de filete seleccionado para la soldadura soporte la carga a la que va a ser sometida.

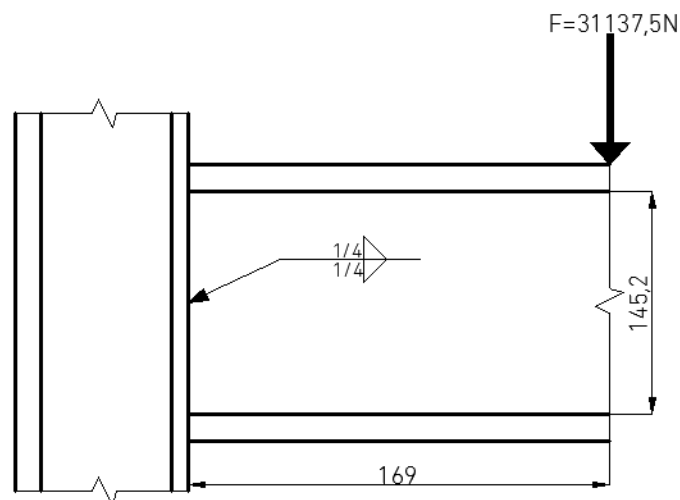


Figura 4.36 Unión Soldada de los perfiles ⁴⁵

-Datos:

Electrodo: E7018 ($S_y = 393 \text{ MPa}$)

Espesor de la soldadura $h = 1/4 \text{ in}$ ($6,35 \text{ mm}$)

⁴⁵ Fuente: Elaboración propia.

$$\tau' = \frac{F}{1,41 h d}$$

$$\tau' = \frac{31137,5}{1,41 \cdot 6,35 \cdot (145,2)}$$

$$\tau' = 23,95 \text{ MPa}$$

$$\tau'' = \frac{Mc}{0,707h \frac{d^3}{6}}$$

$$\tau'' = \frac{31137,5(169)(72,6)}{0,707(6,35) \frac{145,2^3}{6}}$$

$$\tau'' = 168,50 \text{ MPa}$$

$$\tau = \sqrt{\tau''^2 + \tau'^2}$$

$$\tau = \sqrt{23,95^2 + 168,50^2}$$

$$\tau = 168,50 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{0,577Sy}{\tau}$$

$$n = \frac{0,577 \times 393}{168,50}$$

$$n = 2,57$$

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN DE LA PROBETA RECALCADA EN CALIENTE

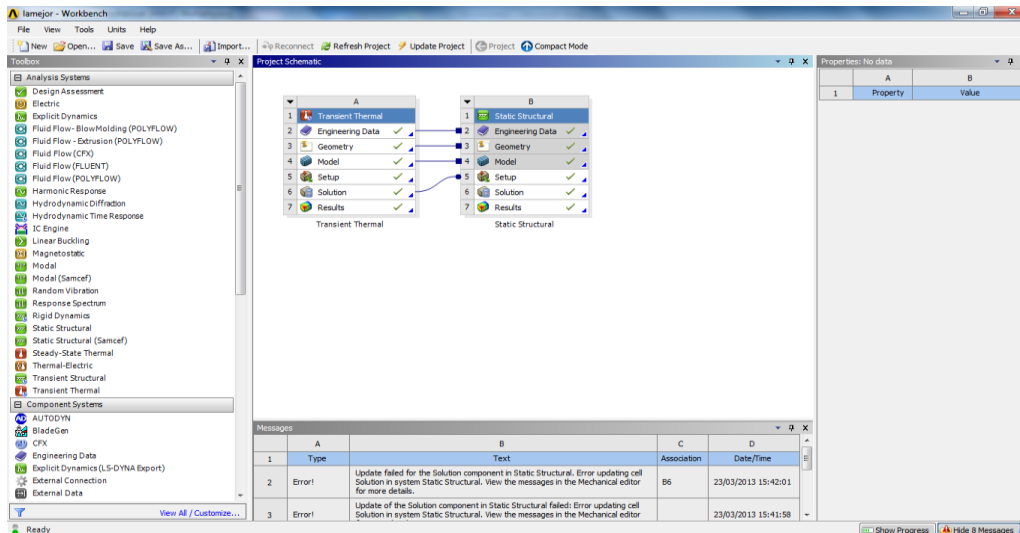
En este capítulo se va a simular los procesos de calentamiento y deformación de la probeta seleccionada con los objetivos de: optimizar los tiempos de calentamiento y encontrar las medidas exactas que debe tener la probeta previo al proceso de prensado.

Para realizar la simulación del proceso de recalcado en caliente se decidió utilizar la interfaz Workbench del software Ansys 14.0 ya que este cuenta con las herramientas necesarias para realizar la simulación y el análisis de procesos de conformación plástica como: laminación, trefilado, embutición, recalcado, etc.

5.1. SISTEMAS DE ANÁLISIS

Para realizar la simulación de los procesos de calentamiento y deformación es necesario encontrar los sistemas de análisis adecuados que permitan, recrear tanto las condiciones externas (presión, temperatura) a las que se encuentra sometida la probeta, como las condiciones internas del material (resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión, conductividad térmica, coeficiente de convección, etc.). Por este motivo dentro del software de simulación se ha resuelto utilizar el sistema de análisis Transient Thermal para simular el proceso de calentamiento, y el sistema Static Structural para simular el proceso de deformación.

En la figura 5.1 se observa la interfaz principal del programa Workbench, y se indica los sistemas de análisis antes mencionados.



5.2. MATERIALES

La selección y caracterización de los materiales es un parte fundamental dentro del proceso de simulación, estos deber asignados a cada elemento tomando en cuenta la función que van a realizar. Ya que la probeta va a deformarse plásticamente, es necesario que el material seleccionado para esta se comporte de igual manera, por otro lado tanto para el punzón, como para la matriz, se debe seleccionar un material que permita realizar el conformado de la probeta sin sufrir alteraciones.

Para esta simulación se ha seleccionado dos tipos de materiales. Un acero estructural para las piezas punzón, matriz y una aleación de aluminio con propiedades no lineales. También se le ha agregado a este material propiedades necesarias para esta simulación como el módulo tangente, la resistencia a la fluencia y la conductividad térmica como se puede observar en la Figura 5.2.

⁴⁶ Fuente: Imagen tomada de ANSYS-Worbench

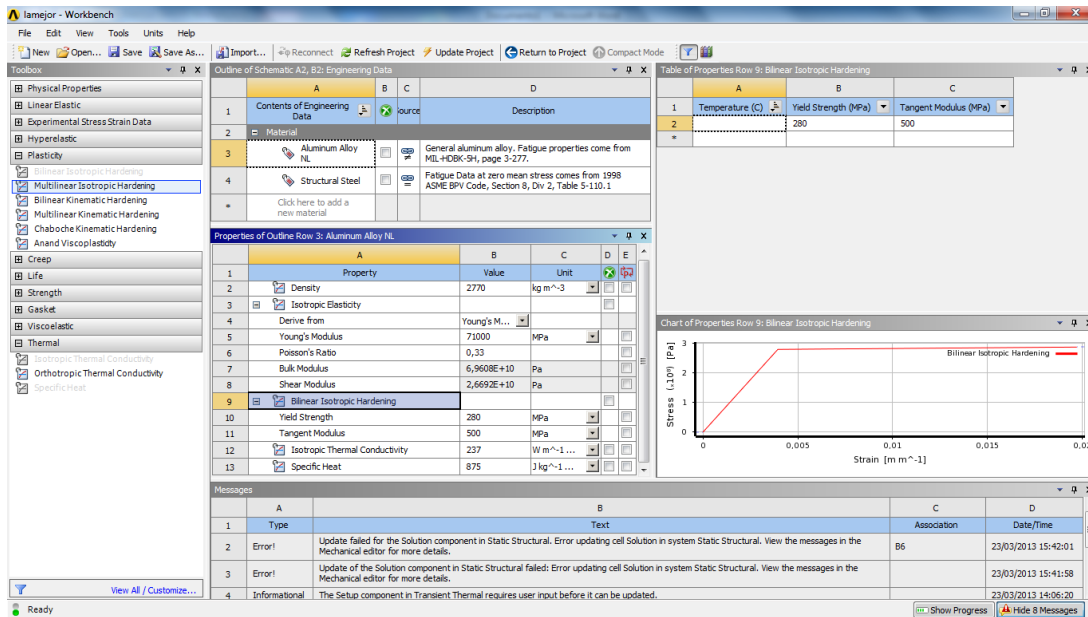


Figura 5.2 Propiedades mecánicas de la Aleación de Aluminio⁴⁶

5.3. GEOMETRÍA

En este paso se ingresa la geometría de la probeta, matriz y punzón de acuerdo a las dimensiones proporcionadas en el capítulo anterior. Para esto el Workbench permite dibujar la geometría o importarla desde otros softwares de dibujo CAD como por ejemplo Solidworks, Pro Engineer, Catia, Autodesk Inventor, Etc. En esta simulación se escogió importarlo como ensamblajes desde Autodesk Inventor como se observa en la Figura 5.3.

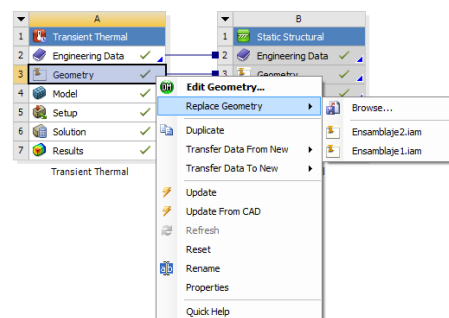


Figura 5.3 Importación de la geometría desde Autodesk Inventor 2012⁴⁶

5.4. MODELADO

En el modelado es donde se coloca todas las condiciones a las que va a estar sometido el conjunto matriz, específicamente la probeta, tanto internas (propiedades mecánicas del material) como externas (condiciones de temperatura, cargas aplicadas, relaciones de contactos entre las piezas). Para poder definir estas condiciones en la ventana principal de Workbench en la pestaña model se debe dar click izquierdo y seleccionar la opción Edit como en la figura 5.4. Esto abrirá una nueva ventana.

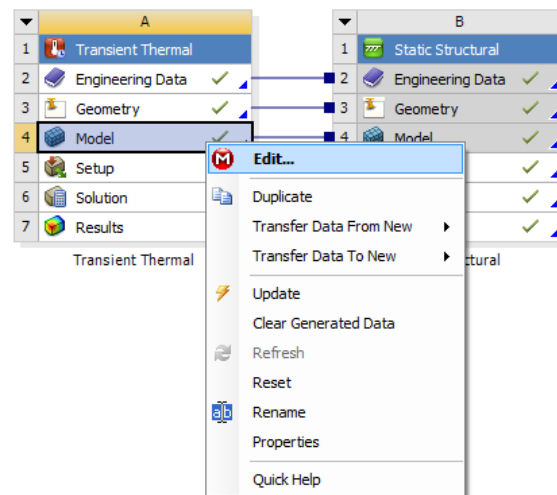


Figura 5.4 Modelado⁴⁶

5.4.1. ASIGNACIÓN DE MATERIALES

Al abrir la interfaz de modelado, lo primero que se debe hacer es asignar los materiales previamente definidos a las diferentes piezas de la geometría. Como se muestra en la figura 5.5. Al tocho o probeta se le asigna la aleación de aluminio, mientras que a los otros dos componentes se les asignará el acero estructural.

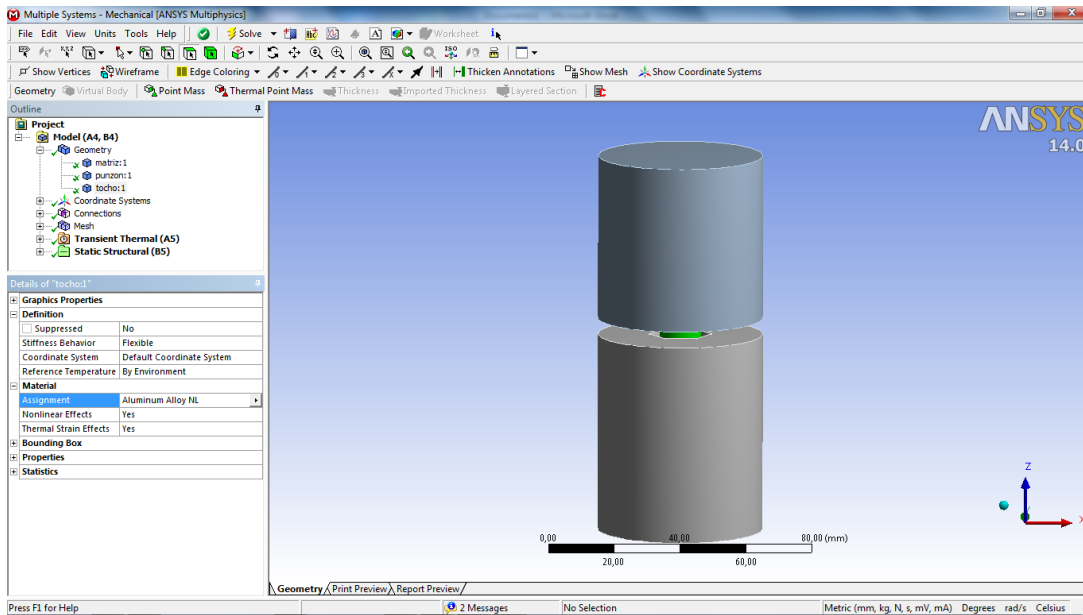


Figura 5.5 Materiales asignados de acuerdo a la geometría⁴⁶

5.4.2. CONTACTOS

Las condiciones de contacto son algo muy importante que afectará al resultado de no escogerse bien, Workbench ofrece distintos tipos de contacto entre piezas. En la figura 5.6 se ha escogido un contacto con fricción entre la probeta y la matriz con un coeficiente friccional de 0,1. También se debe activar la opción de predicción de impacto.

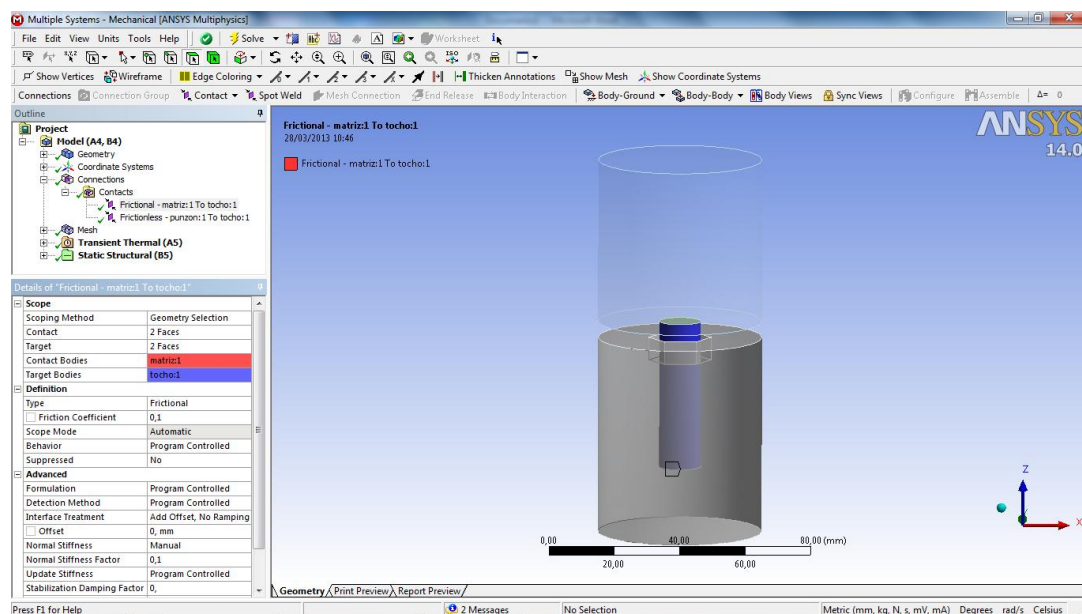


Figura 5.6 Contacto friccional entre probeta y matriz⁴⁶

5.4.3. MALLADO

En esta etapa del proceso de modelado se debe escoger adecuadamente el tipo de mallado a realizarse, pudiendo ser este de tipo tetraedrons o hex dominant dependiendo principalmente del tipo de elemento que va a ser mallado.

El tamaño del mallado es otra variable que se debe controlar, ya que de realizar un mallado muy grande la simulación no se realizaría de manera correcta o inclusive no se realizaría, en cambio sí se selecciona un tamaño de malla muy pequeño, los resultados obtenidos serán mucho más confiables pero el tiempo en realizarse será muy largo, esto también depende de los recursos del ordenador en el que se trabaje.

En la figura 5.7 se observa que para las piezas punzón y probeta se ha realizado un mallado tetrahedrons, mientras que por la forma de la matriz, en esta se ha realizado un mallado hex dominant.

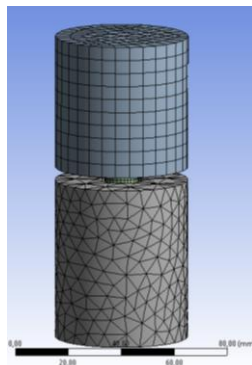


Figura 5.7 Mallado de punzón, matriz y probeta⁴⁶

Para una mayor confiabilidad en los resultados, se malló nuevamente la probeta independientemente de las otras piezas con un tamaño de malla de 1.5mm. El mallado de la probeta se puede observar en la figura 5.8.

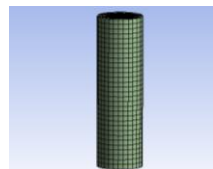


Figura 5.8 Cambio del tamaño de malla de la probeta⁴⁶

Una vez acabado esto, se procede a definir los distintos tipos de análisis a los que va a estar sometida la probeta.

5.4.4. ANÁLISIS TÉRMICO

En esta parte se colocará las condiciones iniciales de temperatura de la probeta, así como el tiempo de calentamiento, las cargas térmicas (convección, radiación) y se analizará el resultado luego de ejecutarse la resolución.

5.4.4.1. Condiciones

Las variables de los procesos de transferencia de calor, como convección y radiación son establecidas dependiendo del material a ser analizado y a la temperatura de ambiente a la que van a estar sometidos. Para la aleación de aluminio la temperatura ambiente del horno es de 600 °C, mientras que para la aleación de cobre esta temperatura ambiente se ubica en los 800 °C.

Dentro de la configuración del análisis se ingresa el tiempo de calentamiento, en el caso de la aleación de aluminio se coloca un tiempo de 20 minutos o lo que vendría a ser 1200 segundos separados en 20 pasos de 60 segundos cada uno, en cambio para la aleación de cobre se ingresa un tiempo de 25 minutos o 1500 segundos que es lo mismo, separados en 25 pasos de 60 segundos cada uno.

En la figura 5.9 se observa las variables ingresadas para el análisis, y específicamente la configuración del tiempo de calentamiento dentro del programa.

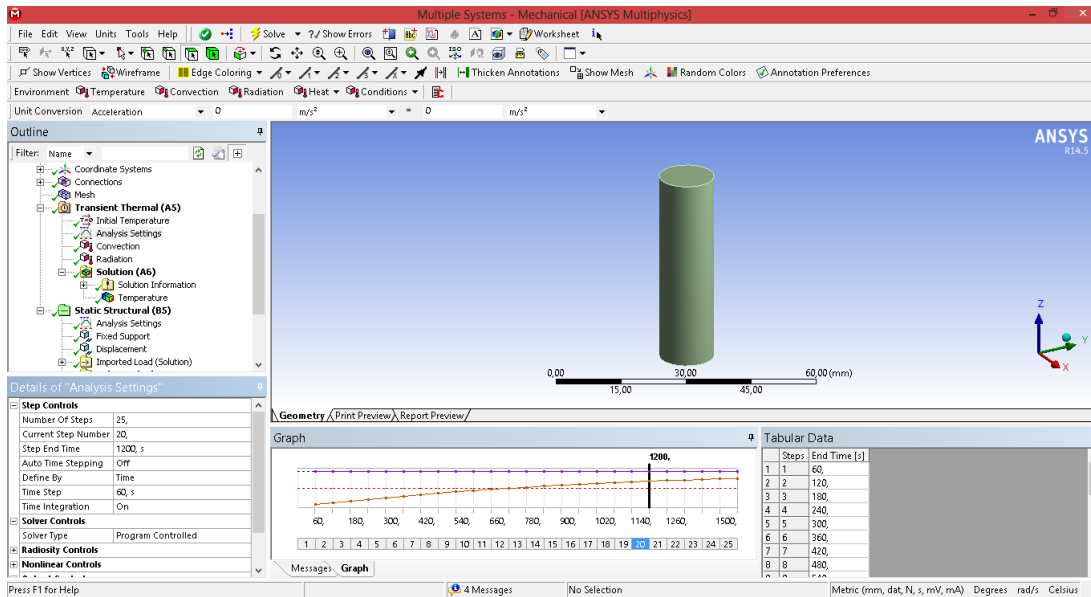


Figura 5.9 Configuración del análisis térmico⁴⁶

El análisis de temperatura solicitado al programa, permitirá ver el incremento de temperatura de la probeta en relación al tiempo de calentamiento establecido, a fin de determinar el tiempo de calentamiento óptimo para llegar a la temperatura deseada.

5.4.4.2. Resultados

En la figura 5.10 se puede observar el incremento de la temperatura de la probeta en relación al tiempo de calentamiento. El color rojo de la probeta indica que esta ha alcanzado una temperatura uniforme en toda su longitud, llegando a una temperatura máxima de calentamiento de 700° C en un tiempo de calentamiento de 25 minutos a una temperatura interna del horno de 800 °C en el caso de la aleación de cobre.

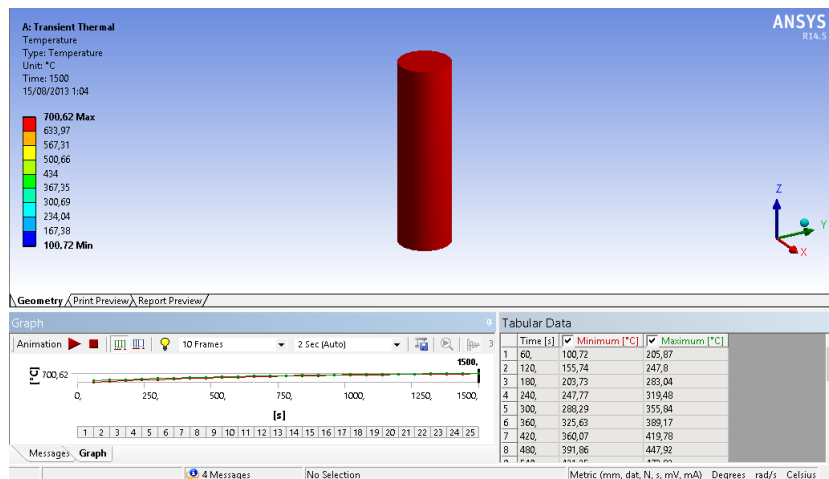


Figura 5.10 Cambio de temperatura en la probeta de la aleación de cobre⁴⁶

Para el caso de la aleación de aluminio, se encontró que esta alcanza una temperatura de $487,41^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de calentamiento de 20 minutos a una temperatura ambiente de 600°C . Esto se observa en la siguiente figura.

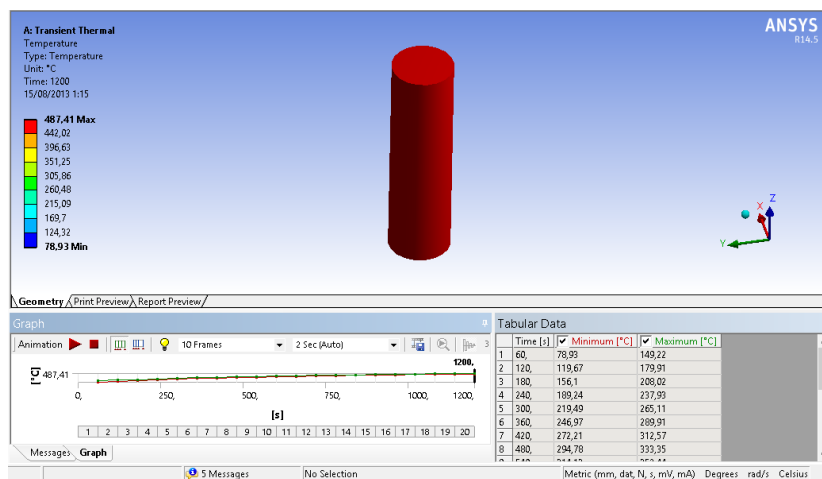


Figura 5.11 Cambio de temperatura en la probeta de la aleación de aluminio⁴⁶

De esta manera se ha llegado a la parte final del análisis térmico, encontrando los tiempos de calentamiento para que las probetas alcancen la temperatura de recristalización necesaria para el proceso de deformación.

A continuación con los datos resultantes de esta parte y conjuntamente con las condiciones que se van a colocar, se procederá a la simulación de la deformación de la probeta.

5.4.5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Ahora se agregarán condiciones como: el desplazamiento del punzón, el tiempo y la distancia que le tomará a este realizar su recorrido hasta que complete la operación de recalado, las restricciones de movimiento en la matriz y el tipo de resultado que se quiere obtener una vez concluida la simulación.

5.4.5.1. Condiciones

En la configuración del análisis estructural, al igual que el análisis térmico anterior se debe configurar el número de pasos y el tiempo de cada paso. Para este proceso se ha colocado 2 pasos. El primer paso consiste en el descenso del punzón hasta llegar a topar la cara superior de la matriz, este lo realizará en un tiempo de 1 segundo, mientras que el segundo paso es el retroceso del punzón hasta llegar a la posición de salida, este paso se lo realiza en 0.5 segundos.

Además de lo antes expuesto, también se deben colocar variables como el desplazamiento del punzón y una condición de soporte fijo en la base de la matriz.

En la figura 5.12 se ve lo que se acaba de explicar.

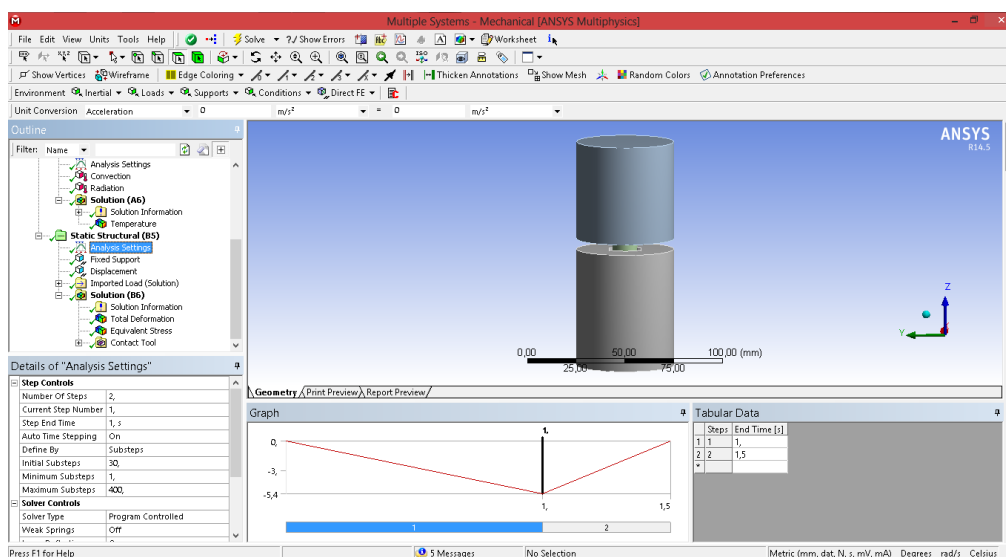
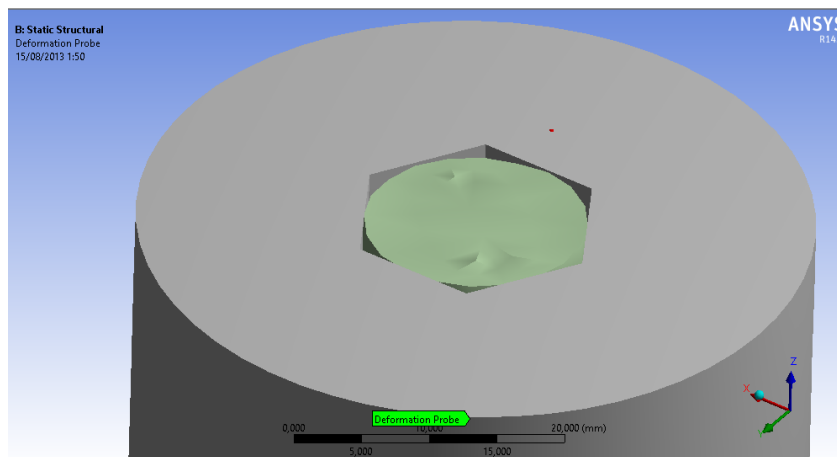


Figura 5.12 Configuración del análisis estructural⁴⁶

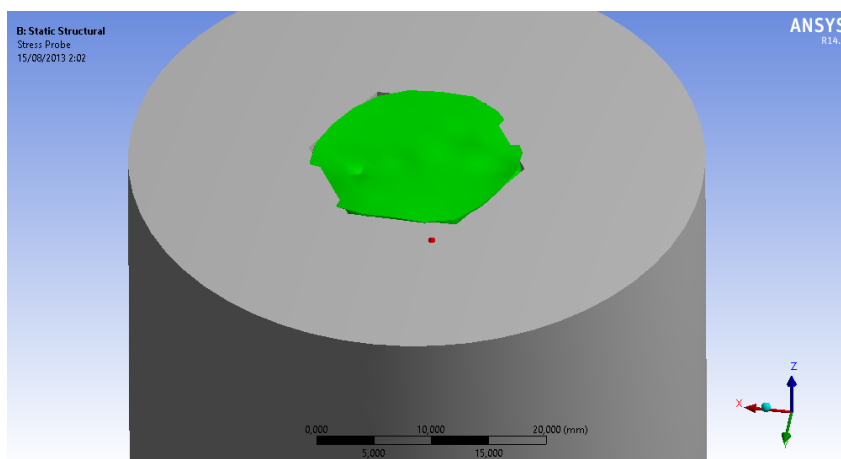
5.4.5.2. Resultados

Después de realizar varias simulaciones, se logró determinar que el tamaño óptimo que debe tener la probeta para que tome la forma deseada, es de 47 mm, tanto en la aleación de aluminio como en la aleación de cobre.

Al comparar las figuras 5.13a y 5.13b, se puede visualizar que, en el caso de la figura 5.13a la probeta de 45 mm no alcanza a llenar el espacio de la matriz en su totalidad, en cambio en la figura 5.13b, claramente se ve que la probeta de 47 mm si lo ha hecho, tomando la forma de cabeza hexagonal deseada.



a.) Probeta de 45 mm



b.) probeta de 47 mm

Figura 5.13 Deformación en probetas⁴⁶

En la figura 5.14 se aprecia de mejor manera la deformación que ha sufrido la probeta.

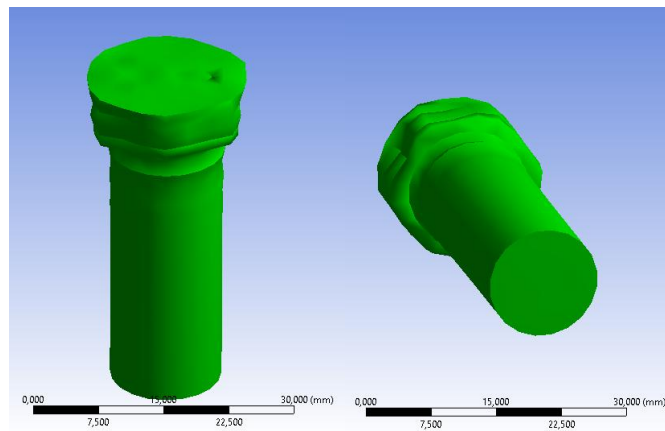


Figura 5.14 Recalcado de cabeza hexagonal⁴⁶

De esta manera, se ha llegado satisfactoriamente al final de la simulación del proceso de deformación, cumpliendo con el objetivo de hallar el tamaño que debería tener una probeta, para que tome las dimensiones de la cabeza hexagonal deseadas. Se determinó que el tamaño es de 47mm, 2 mm más de lo que estaba calculado en la parte de diseño.

El siguiente paso sería comprobar los datos obtenidos realizando pruebas en el equipo de recalcado, esto se verá más adelante dentro del capítulo de pruebas.

CAPÍTULO 6

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

En el capítulo anterior se diseñó y seleccionó todas las partes necesarias para la construcción del equipo de recalado. En este capítulo se procederá a realizar la lista de materiales, hojas de procesos, planos y diagramas de flujo a fin de realizar la construcción y montaje del equipo.

6.1. CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ

En la construcción de los elementos de matricería intervienen procesos por arranque de viruta estos son torno y taladrado. Para el maquinado de la forma hexagonal en la matriz se ocupa el proceso por electroerosión, este proceso es el mejor para estas formas ya que las aristas quedan rectas y no curvas facilitando así la formación del producto a recalcar.

Los tipos de materiales y sus dimensiones que se van a utilizar en la construcción de los elementos de matricería se detallan en la lista de materiales. También los procesos y las fases de construcción se describen en las hojas de procesos.

6.1.1. LISTA DE MATERIALES

En la tabla 6.1 se indican los materiales utilizados en la construcción de la matriz.

Tabla 6.1 Lista de materiales matriz

N.º	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Acero AISI-H13	Ø=2plg-long:65mm	1
2	Acero A36	Ø=3plg-long:50.8mm	1
3	Acero A36	Ø=2plg-long:85mm	1
4	Acero A36	Placa: 125x85x20mm	1

Fuente: Elaboración Propia

6.1.2. HOJA DE PROCESOS

En las hojas de procesos se detallan las operaciones de manufactura necesarias para obtener cada uno de los útiles de matricería, dentro de estas operaciones constan velocidades de corte, avance, tiempos de maquinado, así también se especifican los tratamientos térmicos necesarios. En el anexo 18 se encuentran detalladas todas las hojas de procesos para los útiles de matricería.

6.2. CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA HIDRÁULICO

La única parte a ser construida dentro del sistema hidráulico es el depósito, el resto del sistema lo componen elementos estándar que se detallan dentro de la lista de materiales y su montaje consta en el diagrama de flujo.

6.2.1. LISTA DE MATERIALES

Los elementos utilizados en el ensamblaje del sistema hidráulico se indican en la tabla 6.2

Tabla 6.2 Lista de materiales sistema hidráulico

N.º	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Depósito	5 Galones	1
2	Motor eléctrico	½ HP 1720RPM	1
3	Acople Motor	Acople tipo C	1
4	Bomba de engranes	½ HP	1
5	Filtro	Stauff 19-1610	1
6	Válvula reguladora de presión	Presión máxima 3000 psi	1
7	Válvula 4x3 centro tándem	Kompass	1
8	Tubería con finales roscados Schedule 40S	Long:1m	1
9	Acoplamiento de fundición - Clase 150	½	2
10	Codo de reducción macho y hembra A4	1/2 x 3/8 in	2
11	Reductor roscado N4 I	1/2 x 3/8 in	1
12	Reductor roscado N4 I	3/4 x ½ in	1

Continuación Tabla 6.2 Lista de materiales sistema hidráulico

13	Acople Filtro	Stauff 19-1610	1
14	Tubo en T - Clase 150	½ in	1
15	Boquilla roscada	½ in	2
16	Codo A1	½ in	1
17	Reductor roscado 209P	8-4	1
18	Reductor roscado 209P	6-4	2
19	Codo macho 149F	6-8	1
20	Codo macho 149F	4-4	3
21	Codo de rosca de 90° 1202P	6-4	1
22	Rosca cónica macho - Codo de 90°	1/4 x 1/4	2
23	Rosca cónica macho	1/4 x 1/4	4
24	Rosca cónica hembra Rótula	1/4 x 1/4	2
25	Acoplamiento 207P	6	1
26	Boquilla hexagonal 216P	6	1
27	Tubo en T de unión 1203P	8	1
28	Conector macho 48F	4-6	1
29	Manómetro	2000 psi	1
30	Manguera hidráulica	¼ in	1
31	Cilindro hidráulico	Ø 50 mm	1

CONTROL SISTEMA HIDRÁULICO**CIRCUITO DE POTENCIA**

N.º	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Breaker	2 Entradas-400V~	1
2	Contacto electromagnético	3 Entradas	1
3	Relé térmico	8A	1
4	Bornera	6 Terminales	1

CIRCUITO DE CONTROL

N.º	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Focos	Indicadores de señal	3
2	Pulsador	Contacto normalmente abierto	1
3	Pulsador	Contacto normalmente cerrado	1
4	Interruptor	Selector	1

Fuente: Elaboración Propia

6.2.2. CONSTRUCCIÓN DEL DEPÓSITO

Para la construcción del depósito se utilizaron operaciones de corte, doblado y soldadura. En la figura 6.1 se observa las partes que componen el depósito, para más información ver planos anexo 19.

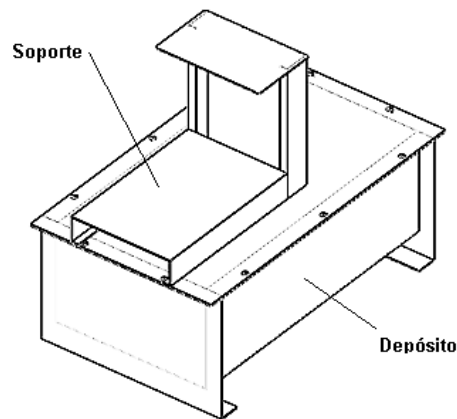


Figura 6.1 Esquema del Depósito⁴⁷

6.2.3. MONTAJE DEL SISTEMA HIDRÁULICO

En el siguiente diagrama se presenta las distintas piezas a ser montadas. El número entre paréntesis es el elemento a montarse, cuyo nombre y ubicación se muestran en el anexo 19.

⁴⁷ Fuente: Elaboración propia

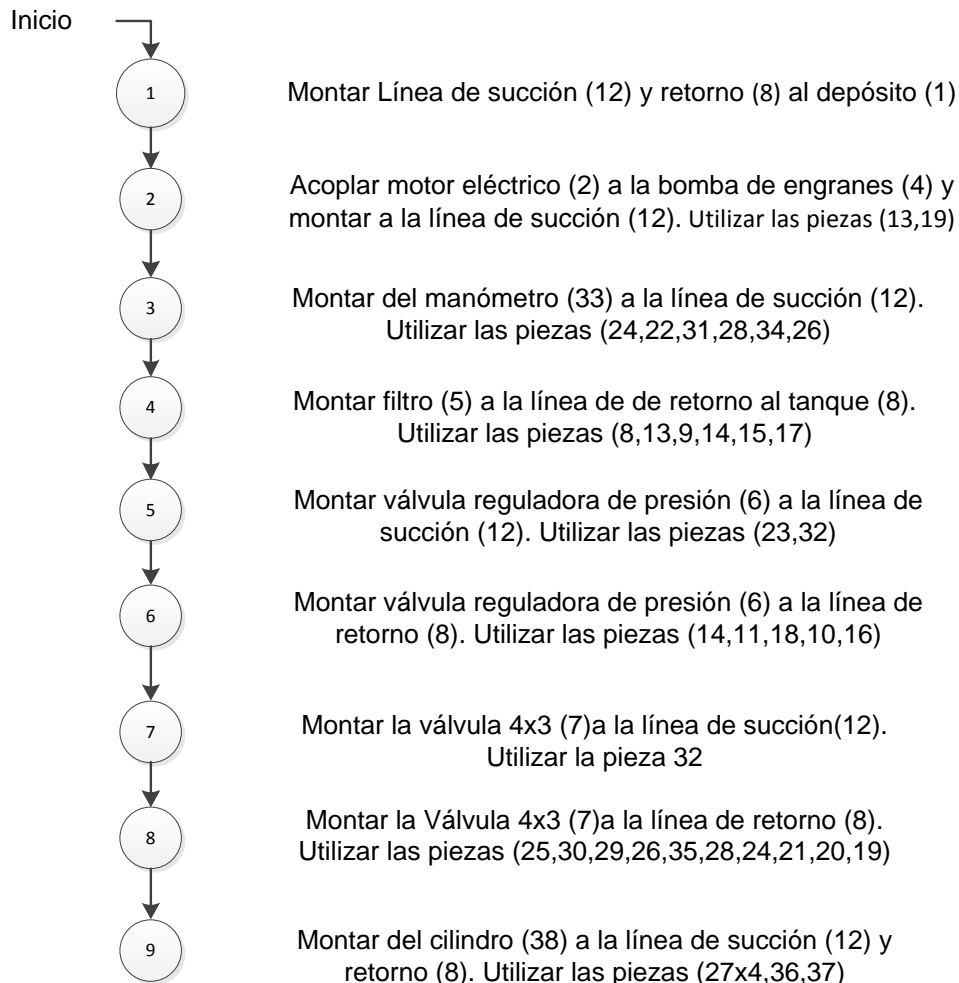


Figura 6.2 Diagrama de flujo de montaje del Sistema Hidráulico⁴⁷

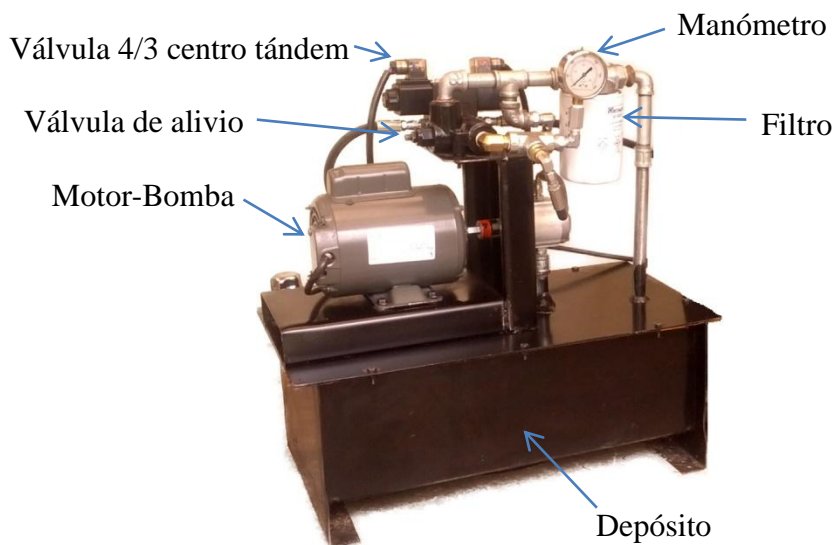


Figura 6.3 Unidad Hidráulica⁴⁷

6.3. CONSTRUCCIÓN DEL BASTIDOR

Para la construcción del bastidor se van a utilizar procesos de corte, perforado y soldadura. Las piezas y los procesos a realizarse se muestran a continuación en los subsiguientes ítems.

6.3.1. LISTA DE MATERIALES

A continuación se muestra la lista de materiales que se utilizó en la construcción del bastidor.

Tabla 6.3 Lista de materiales bastidor

N.º	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	IPE160	Longitud: 6m	1
2	Electrodos	E7018	6
3	Lijas	Grano medio 120	2
4	Pintura	½ gl	1
5	Thinner	½ gl	1

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. DIAGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DEL BASTIDOR

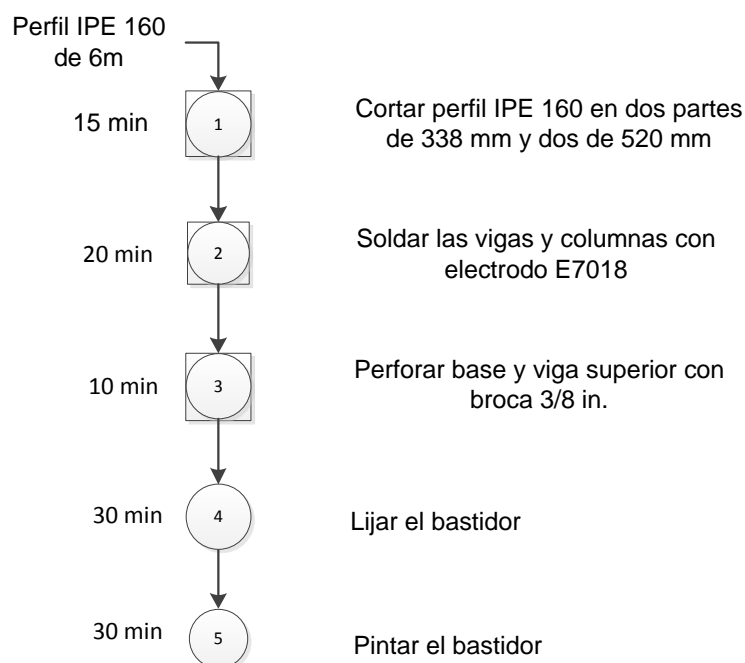


Figura 6.4 Diagrama de flujo construcción del Bastidor⁴⁷

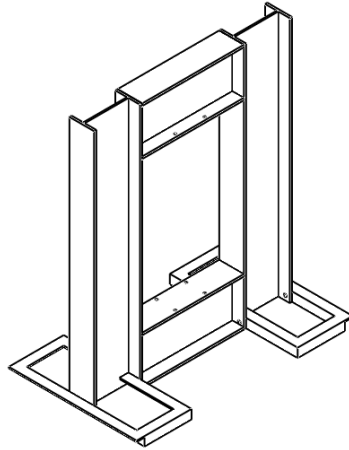


Figura 6.5 Bastidor Prensa Hidráulica⁴⁷

6.3.3. DIAGRAMA DE MONTAJE DEL BASTIDOR

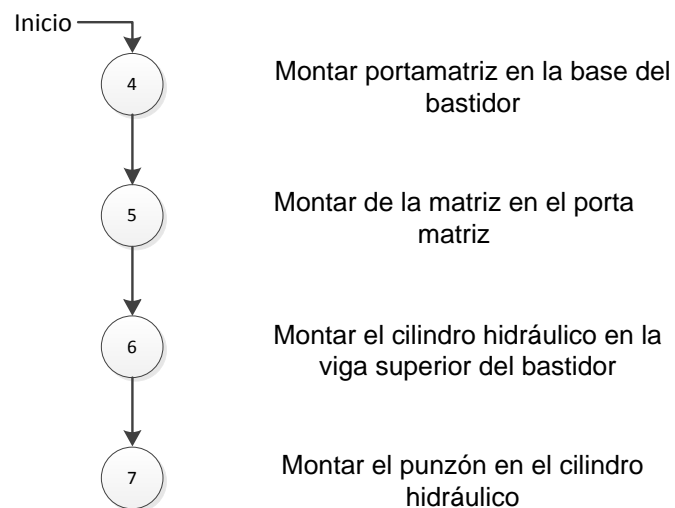


Figura 6.6 Diagrama de flujo montaje del Bastidor⁴⁷

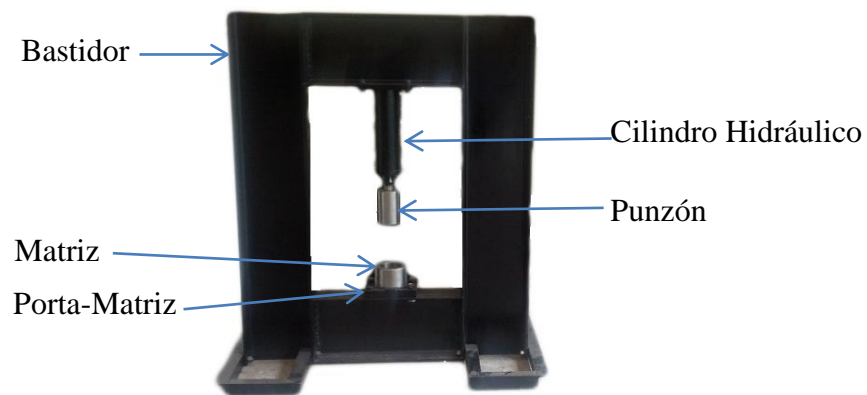


Figura 6.7 Bastidor y Cilindro Hidráulico⁴⁷

6.4. CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

Para la construcción del horno se ocupará operaciones de corte, suelda, pegado y recubrimiento; para el corte de los ladrillos se lo hará con un disco de punta de diamante; para el recubrimiento y pegado se utilizará cemento refractario y mortero, estos productos vienen listos para ser ocupados; una vez formada las paredes se procederá a la construcción y montaje de la estructura metálica, esta servirá de bastidor. La conexión del circuito de control se lo ejecutará al final de la construcción del horno.

Todos los pasos de construcción, dimensiones, materiales y montaje se detallan a continuación.

6.4.1. LISTA DE MATERIALES

Tabla 6.4 Lista de materiales horno

Nº	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Ladrillo Refractario	230x114x64mm – 1600°C	5
2	Concreto Refractario	Cercast 2900 –25Kg – 1594°C	1
3	Mortero Húmedo	Súper 3000 25Kg - 1650°C	1
4	Fibra Refractaria	900x310x35mm	1
5	Alambre Nicrom	Longitud: 11m $\varnothing_{re}=1\text{mm}$	1
6	Tubo Incoloy	Longitud:3.5m $\varnothing=1/2\text{plg}$	1
7	Perfil L	30x30x2 Longitud:3500mm	1
8	Perfil L	20x20x2 Longitud:650mm	1
9	Perfil T	20x20x2 Longitud:800mm	1
10	Tubo cuadrado	20x20x2 Longitud:800mm	1
11	Plancha	Acero A36:450x150x2mm	1
12	Control de temperatura	Pid controller JLD612	1
13	Termocupla	Tipo K	1
14	Relé SSR	Estado sólido	1
15	Switch on/off	220v-tres fases	1
16	Cable flexible 10 AWG	Longitud: 10m	1

Fuente: Elaboración propia.

6.4.2. DIAGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

En el siguiente diagrama los números entre paréntesis representan la ubicación que tienen dentro del plano ubicado en el anexo 20.

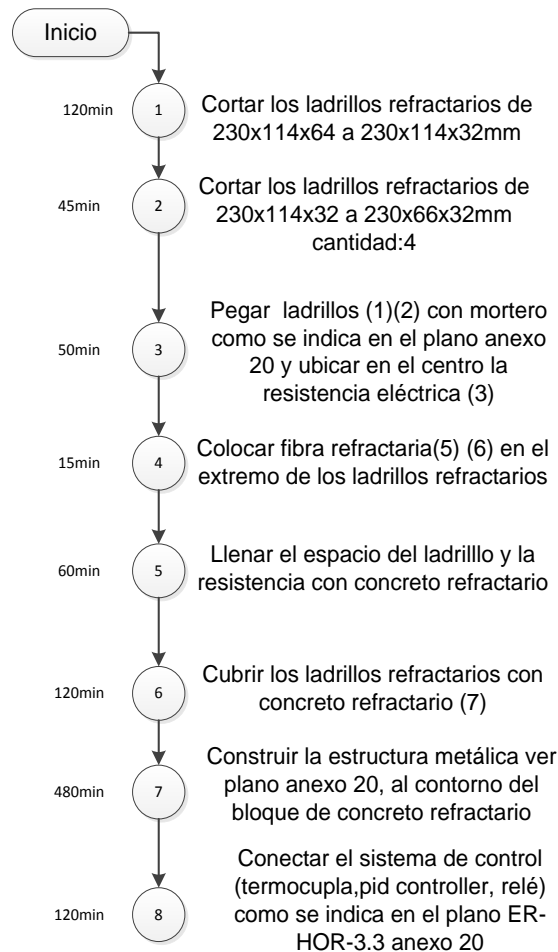


Figura 6.8 Diagrama de flujo construcción del horno⁴⁷

En la figura 6.9 se muestra la forma final del horno de resistencia que se describe en el diagrama de la figura 6.8.

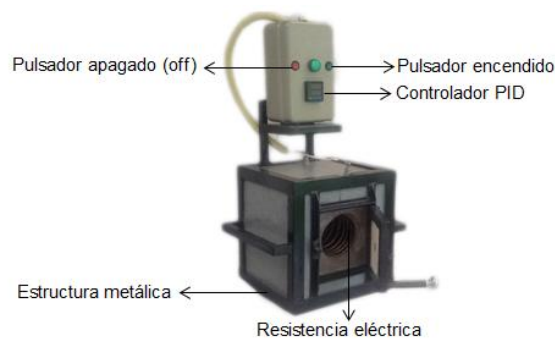


Figura 6.9 Horno de resistencia⁴⁷

CAPÍTULO 7

PRUEBAS Y MANUALES

El apartado correspondiente a las pruebas está compuesto por dos partes. La primera parte se enfoca en el correcto funcionamiento del equipo de recalcado, tanto en vacío como con la materia prima; la segunda parte está orientada al análisis de las características que presenta la probeta deformada.

Para el análisis de las propiedades mecánicas y de los defectos (grietas internas y externas, rugosidades, poros, rechupes, etc.) de los productos forjados, se utilizan ensayos destructivos y no destructivos respectivamente. Dentro de los ensayos destructivos no se ha ideado una prueba estándar de fojabilidad⁴⁸, sin embargo se utilizan todas las pruebas mecánicas convencionales, entre las que tenemos: comprensión, tensión, torsión, doblado e impacto, además se utiliza las pruebas metalográficas. En el análisis de los productos forjados los métodos de ensayos no destructivos⁴⁹ más usados son: inspección visual, partículas magnéticas, tintas penetrantes, ultrasonido, corriente de Foucault e inspección radiográfica.

Los principales factores que influyen en la selección de un método de ensayo para la forja incluye: composición del material, costo, tamaño y forma del producto, etc. Cuando se requiere una superficie de alta calidad es verificada por tinta penetrante,

⁴⁸ La referencia de los ensayos destructivos es parte del ASM Handbook Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation.

⁴⁹ La referencia de los ensayos no destructivos es parte del ASM Handbook Volume 17, Non Destructive Evaluation and Quality Control.

corriente de Foucault, mientras que para aplicaciones aeroespaciales son frecuentemente inspeccionadas por técnicas de inspección de ultrasonido para garantizar la calidad interna.

7.1. PRUEBAS DEL EQUIPO EN VACÍO

Las pruebas en vacío sirven para verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del equipo de punzonado y del equipo de calentamiento.

Estas pruebas se las realizarán mediante el encendido de cada equipo y así poder detectar posibles fallas, una vez detectado algún tipo de falla se ejecutará las soluciones correspondientes, las posibles fallas y soluciones las encontramos en el manual de mantenimiento de la unidad hidráulica y del horno (ver anexo 19).

7.1.1. PRUEBAS DEL EQUIPO DE PUNZONADO

La acción a verificar en el equipo de punzonado es el desplazamiento del vástago del cilindro hidráulico, el movimiento del vástago depende de dos variables la presión y la velocidad de avance, por lo tanto verificaremos el funcionamiento correcto de los elementos encargados de realizar dichas acciones.

Para realizar las pruebas en el equipo de punzonado se utilizará los siguientes pasos:

1. Arranque del motor eléctrico, se lo realiza mediante la activación del pulsador ON que se encuentra en el panel de control figura 7.1.

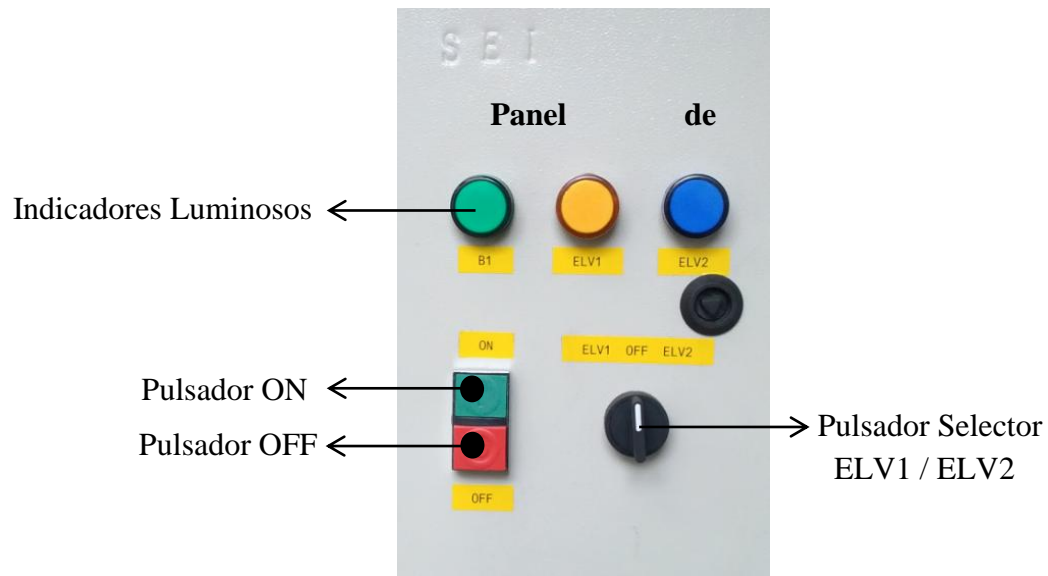


Figura 7.1 Panel de control prensa hidráulica⁵⁰

2. Inspección visual, (después del arranque de la unidad hidráulica), esto sirve para verificar posibles fugas en la unidad.
3. Comprobar el rango máximo (2200 PSI) de la presión de trabajo, la variación de la presión se realiza por medio de la válvula de alivio.



Figura 7.2 Válvula de alivio unidad hidráulica⁵⁰

⁵⁰ Fuente: Imagen propia.

4. Determinar las velocidades de avance del vástago (10 a 20 mm/s). Este parámetro se obtiene mediante la variación de la válvula reguladora de caudal antirretorno.

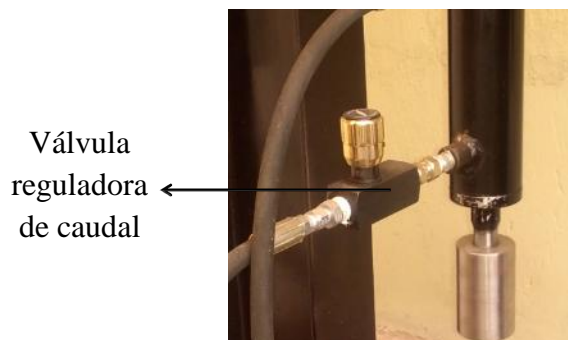


Figura 7.3 Válvula reguladora de caudal unidad hidráulica⁵⁰

5. Verificar el desplazamiento del vástago (abajo/arriba). El movimiento descendente del vástago se realiza a través de la activación del interruptor selector en posición ELV1, esta activa la válvula 4/3 que da paso al fluido hacia el cilindro para así empezar el movimiento del vástago. Para el retorno del vástago la posición del selector se coloca en ELV2 (ver figura 7.1).

En la tabla 7.1 se muestra el resultado de las pruebas de funcionamiento de los componentes del sistema hidráulico.

Tabla 7.1 Verificación de pruebas en vacío sistema de punzonado

Pasos	Acción	Resultado	
		Correcto	Incorrecto
Activación pulsador On.	Arranque del motor eléctrico.	x	-
Inspección visual	Verificar posibles fugas del fluido hidráulico.	x	-

Continuación Tabla7.1.

Activación del selector (ELV1, ELV2)	Desplazamiento del vástago.	x	-
Regular la válvula de alivio.	Variación de la presión.	x	-
Graduar la válvula reguladora de caudal.	Variación de velocidad de avance del vástago.	x	-

Fuente: Elaboración propia

7.1.2. PRUEBAS DEL EQUIPO DE CALENTAMIENTO

A continuación se va a comprobar que el equipo de calentamiento trabaje dentro de los límites establecidos en el diseño.

Para realizar las pruebas en el equipo de calentamiento se realizará los siguientes pasos:

1. Establecer los valores máximos de temperatura (límites SV: 800, AH1: 770, AL1: 750) de encendido y apagado de la resistencia en el Control PID.

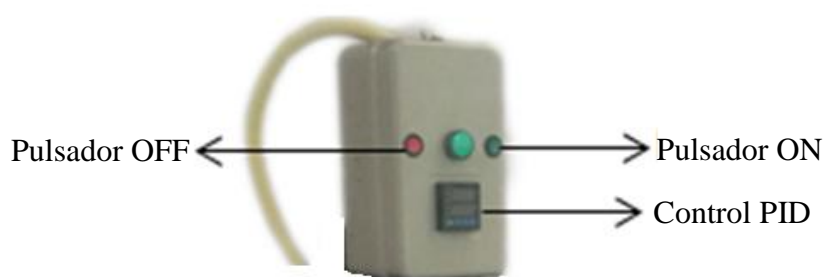


Figura 7.4 Panel de control horno⁵¹

2. Pulsación del botón On para permitir el paso de corriente a la resistencia.

⁵¹ Fuente: Elaboración Propia.

3. Verificar la variación de temperatura, esto se observa a través del display del Control PID.

En la tabla 7.2 se muestra el resultado de las pruebas de funcionamiento del equipo de calentamiento.

Tabla 7.2 Verificación de pruebas en vacío sistema de calentamiento

Pasos	Acción	Resultado	
		Correcto	Incorrecto
Programar Control PID	Establecer límites superior e inferior de la temperatura de trabajo	x	-
Activación del pulsador On	Paso de corriente a la resistencia.	x	-
Visualizar el display del Control PID	Observar cambios de temperatura dentro de los límites establecidos.	x	-

Fuente: Elaboración propia

7.2. PRUEBAS DEL EQUIPO CON LA MATERIA PRIMA

Una vez comprobado que el equipo trabaja adecuadamente, se realiza las pruebas de calentamiento y deformación de las probetas. Además en este apartado se incluyen los ensayos no destructivos y destructivos del producto. Dentro de los ensayos no destructivos se realizará una inspección visual, ya que el resto de este tipo de ensayos no se los puede llevar a cabo por falta de implementos y/o equipos. Para los ensayos destructivos se utilizará la metalografía y la resistencia al corte, no se pudo realizar la prueba de tracción para pernos que consta en la norma INEN 1272 por falta de implementos en el laboratorio de Mecánica de Materiales.

7.2.1. PRUEBAS CON LA ALEACIÓN DE ALUMINIO

7.2.1.1. Pruebas de Calentamiento

Se realizó esta prueba con el objetivo de encontrar el tiempo de calentamiento óptimo para que la probeta de la aleación de aluminio 2011-T3 llegue a la temperatura de recristalización, misma que se encuentra dentro de un rango de 440 a 490 ° C. La figura 7.5 muestra el pirómetro infrarrojo con el que se tomó las medidas de temperatura de la probeta.



Figura 7.5 Pirómetro infrarrojo⁵²

La configuración del ingreso de valores de temperatura se puede ver en el anexo 17 manual del Control PID.

Los valores para un ambiente de 600 ° C son los siguientes:

- SV: 650
- AH1: 630
- AL1: 610

⁵² Fuente: Elaboración propia

Para el ingreso del ambiente de 800 °C los parámetros son los siguientes:

- SV: 800
- AH1: 770
- AL1: 750

7.2.1.2. Pruebas de Deformación

Una vez determinado el tiempo de calentamiento y la temperatura óptima para el proceso de deformación a realizar en la prensa hidráulica por medio de los útiles de matricería, se procede a realizar la deformación utilizando los datos obtenidos en el capítulo de diseño a fin de validarlos.

Las pruebas de deformación consisten en realizar la operación de recalcado, variando la longitud de la probeta y presión en la prensa para así obtener la pieza con las medidas establecidas.

Los resultados de esta prueba se indican dentro del punto 7.3.2.

7.2.1.3. Prueba de Ensayo No Destructivo.

Este ensayo nos permite observar los defectos que presentaron las piezas recaladas, dentro de estos se pueden ver la presencia de: estrías, grietas y rajaduras en la cabeza y/o cuerpo.

7.2.1.4. Pruebas de Ensayos Destructivos.

Estas pruebas permiten analizar si hubo cambio o no en las propiedades mecánicas de las probetas después del proceso de recalcado.

7.2.1.4.1. Prueba Metalográfica

Esta prueba se realizó con el fin de conocer que ha ocurrido internamente en la probeta de la aleación de aluminio, luego de ser afectada por el calor y haberse realizado la operación de recalcado.

Este ensayo se realizó en los laboratorios de Metalurgia de la Escuela Politécnica del Ejército bajo los parámetros descritos a continuación.

7.2.1.4.1.1. Equipo Utilizado

- Sierra
- Lijas 120, 250, 800, 1200
- Alúmina
- Paño
- Ácido Clorhídrico (HCl)
- Agua Oxigenada (H₂O)
- Pipeta de 1ml
- Plato Petri
- Microscopio
- Torundas de algodón

7.2.1.4.1.2. Procedimiento

Utilizando una sierra se cortó la probeta de aluminio longitudinalmente, luego se aplicó un desbaste de las zonas irregulares de la cara que se va a analizar utilizando las lijas 120, 250, 800, 1200 seguido de un pulido metalográfico mediante la

alúmina y el paño hasta dejar un acabado tipo espejo. En la figura 7.2 se presenta la probeta luego del pulido y listo para el ataque químico.



Figura 7.6 Probeta aleación aluminio cortada a la mitad y pulida con alúmina⁴⁸

Se preparó el reactivo necesario para esta prueba que consiste en: 1ml de HCL en 200 ml de H₂O. Una vez hecho esto por medio de una torunda de algodón empapada con el reactivo se procedió a realizar el ataque químico durante un tiempo de 15 segundos según lo indica la norma ASTM E407.

Finalmente se colocó la probeta después del ataque en el microscopio y por medio de un software se capturó las imágenes a ser analizadas en el punto 7.3.4.

7.2.1.4.2. Prueba de Resistencia al Corte

Esta prueba sirve para comparar la resistencia al corte entre una probeta conformada en caliente y otra maquinada en frío. En la figura 7.7 se muestran las probetas utilizadas para en esta prueba.



Figura 7.7 Probetas aleación de aluminio. a. Maquinada en frío. b. Deformada en caliente⁴⁸

La prueba al cortante se realizó en la máquina de ensayos universal del laboratorio de Mecánica de materiales de la Escuela Politécnica del ejército. La figura 7.8 muestra el esquema de la máquina de ensayos y la forma en que las probetas fueron colocadas en la máquina.

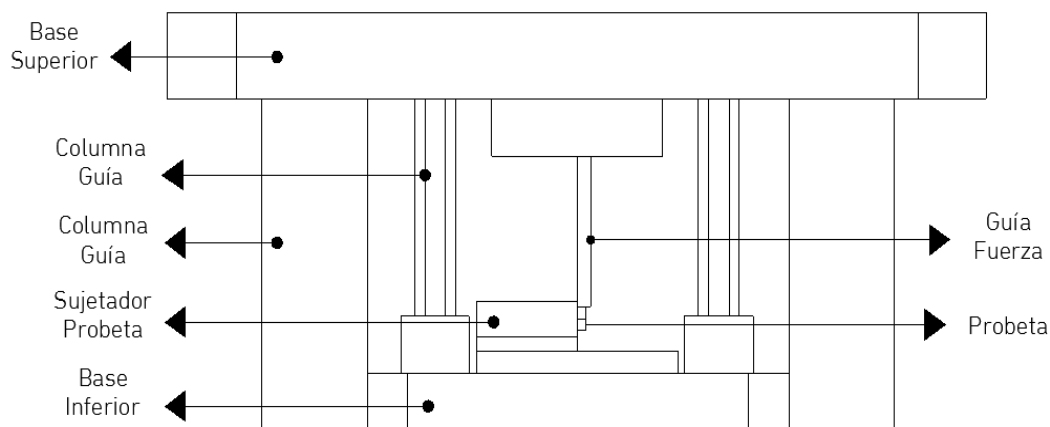


Figura 7.8 Esquema máquina universal de ensayos⁴⁸

En la figura 7.9 constan las probetas luego de la prueba de ensayo. En esta prueba se obtuvo el siguiente resultado de carga que soporta cada elemento:

- Probeta maquinada en frío: 2900 kg.
- Probeta deformada en caliente: 2650 kg.



Figura 7.9 Probetas aleación de aluminio después de la prueba de resistencia al corte.
a. Maquina al frío. **b.** Deformada en caliente⁴⁸

7.2.2. PRUEBAS CON LA ALEACIÓN DE COBRE

7.2.2.1. Pruebas de Calentamiento

Las pruebas de calentamiento de la aleación de cobre se realizaron de la misma manera que las de la aleación de aluminio, la probeta debe alcanzar una temperatura entre 650 a 770° C.

Las pruebas de calentamiento de la aleación de cobre se la realizó en un ambiente de 800 para ello se ingresaron los siguientes parámetros en el Control PID:

- SV: 800
- AH1: 770
- AL1: 750

7.2.2.2. Pruebas de Deformación

La pruebas de deformación con la aleación de cobre al igual que la aleación de aluminio sirve para ver las fuerza de diseño y la cantidad de material utilizados en la deformación. El resultado de cada una de las pruebas de deformación se presenta en el apartado 7.3.2.

7.2.2.3. Prueba de Ensayo No Destructivo.

A diferencia de la aleación de aluminio, la aleación de cobre C37700 no presentó mayores defectos superficiales visibles.

7.2.2.4. Pruebas de Ensayos Destructivos.

Al igual que en la aleación de aluminio para verificar si cambió o no en las propiedades mecánicas de las probetas de la aleación de cobre, después del proceso de recalado se realizó las mismas pruebas. Estas consisten en una prueba metalográfica y una prueba de resistencia al corte.

7.2.2.4.1. Prueba Metalográfica

El procedimiento para realizar la prueba metalográfica de la aleación de cobre C37700 es el mismo que el utilizado en el apartado 7.2.1.4.1 para la aleación de aluminio, con la diferencia que los reactivos químicos y el ataque químico cambia.

El reactivo químico necesario para este tipo de material de acuerdo a la norma ASTM E407, consiste en disolver 1 gr de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en 50 ml de agua (H_2O) y agregar 4 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4). El otro reactivo es el ácido clorhídrico (HCl).

Para realizar el ataque químico a la probeta, unos segundos antes de utilizar el reactivo se debe agregar dos gotas del HCl en el otro reactivo y con mucho cuidado mediante torundas de algodón aplicarlos sobre la probeta por unos pocos segundos hasta máximo 1 minuto.

Ya finalizado el ataque se procede a llevar la probeta al microscopio para tomar las imágenes de la microestructura de la probeta, para ser analizadas más adelante en el apartado 7.3.3.

En la figura se muestra la probeta lista para el ataque químico, para después obtener las imágenes de su microestructura en el microscopio.



Figura 7.10 Probeta aleación de cobre cortada a la mitad y pulida con alúmina⁴⁸

7.2.2.4.2. Prueba de resistencia al corte

Al igual que para la aleación de aluminio, para la aleación de cobre C37700 se realizó un ensayo al cortante en la máquina de ensayos universales en los laboratorios de mecánica de materiales de la Escuela Politécnica del Ejército.

En la figura 7.11 se muestran las probetas de la aleación de cobre a ser utilizadas en el ensayo al corte.



a.



b.

Figura 7.11 Probetas aleación de cobre. a. Maquinada en frío. b. Deformada en caliente⁴⁸

En la figura 7.12 se presenta las probetas después del ensayo al corte, en esta prueba se obtuvieron los siguientes datos de carga que soportaron cada uno de los elementos:

- Probeta maquinada en frío: 3500 kg.
- Probeta deformada en caliente: 3300 kg.



a.



b.

Figura 7.12 Probetas aleación de cobre después de la prueba de resistencia al corte. a. Maquina al frío. b. Deformada en caliente⁴⁸

7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este análisis permitirá determinar si los resultados obtenidos de los cálculos del capítulo de diseño y materiales utilizados, son válidos para el proceso de recalcado en caliente.

7.3.1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CALENTAMIENTO

Los datos obtenidos de las pruebas de calentamiento (ver tabla 7.3) nos garantiza que el horno permite calentar las probetas hasta su temperatura de recristalización.

Tabla 7.3 Tiempo de calentamiento aleación aluminio a 600 °C.

Tiempo de Calentamiento t (min)	Temperatura de la Probeta Tf (° C) @ Ta 600° C)
5	287
10	347
15	452
20	510

Fuente: Elaboración propia.

Además se realizó pruebas de calentamiento en un ambiente a mayor temperatura lo que nos permite acortar el tiempo de calentamiento pero dado que es muy fuerte el ambiente la probeta de aluminio puede fundirse al pasar de uno a dos minutos más de calentamiento, por lo tanto se recomienda trabajar con un ambiente de 600 ° C.

Tabla 7.4 Tiempo de calentamiento aleación aluminio a 800 °C.

Tiempo de Calentamiento t (min)	Temperatura de la Probeta Tf (° C) @ Ta 800° C)
5	430

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7.5 se presenta el tiempo óptimo de calentamiento para la probeta de 45 a 48 mm de longitud y de 12,7 mm de diámetro, esto es 25 min. Con esta probeta no se puede probar a un ambiente mayor de temperatura puesto que el horno no puede trabajar a una temperatura mayor.

Tabla 7.5 Tiempo de calentamiento aleación de cobre a 800 °C

Tiempo de Calentamiento t (min)	Temperatura de la Probeta Tf (° C) @ Ta 800° C)
5	165
10	420
15	525
20	623
25	690




Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. ANÁLISIS DE LAS PUEBAS DE DEFORMACIÓN

En la tabla 7.6 se presenta las probetas después de la deformación. De las pruebas realizadas se observa que para el aluminio la mejor configuración es la probeta de longitud 47mm y diámetro 12,7mm. El otro análisis que se puede realizar de las pruebas de deformación es que este tipo de aleación tiene una baja conformabilidad, es decir su deformación no alcanza para tomar la forma deseada.

Otro dato que se obtuvo de las pruebas de deformación es que mientras se aumenta la longitud de la probeta a ser deformada, la presión a utilizar en la deformación también incrementa.





Tabla 7.6 Pruebas de deformación aleación aluminio

Dimensión (mm)	Tiempo de calentamiento (min)	Presión (Psi)	Resultado
Long: 45 Ø: 12,7	20 @ Ta 600° C	1400	
Long: 46 Ø: 12,7	20 @ Ta 600° C	1800	
Long: 47 Ø: 12,7	20 @ Ta 600° C	1900	
Long: 48 Ø: 12,7	20 @ Ta 600° C	2100	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7.7 se presenta los resultados de las pruebas de deformación de la aleación de cobre. Esta aleación muestra un alto grado de conformabilidad como lo indica la tabla 2.20.

Tabla 7.7 Pruebas de deformación aleación cobre

Dimensión (mm)	Tiempo de calentamiento (min)	Presión (Psi)	Resultado
Long: 45 Ø: 12,7	25 @ Ta 800° C	850	
Long: 46 Ø: 12,7	25 @ Ta 800° C	1100	
Long: 47 Ø: 12,7	25 @ Ta 800° C	1200	
Long: 48 Ø: 12,7	25 @ Ta 800° C	1300	

Fuente: Elaboración propia

7.3.3. ANÁLISIS VISUAL

En el conformado de piezas el defecto más notable son las grietas, estas pueden formarse como resultado de diversos factores, por ejemplo: mala calidad del material, sobreesfuerzos en la probeta, sobrepasar temperaturas de conformación, o simplemente un proceso inadecuado de recalado.

En la figura 7.9a, se observa grietas longitudinales paralelas a la dirección de recalado que pueden ser resultado, tanto de una mala calidad superficial (presencia de defectos en la superficie de la probeta), como a una mala capacidad de deformación, es decir, se ha sobrepasado el valor admisible del material. Esto también puede dar lugar a la formación de grietas en la cabeza como se observa en la figura 7.9b.



a.



b.

Figura 7.13 a) Grieta longitudinal⁴⁸, b) Grieta en la cabeza⁴⁸

Otro tipo de grietas que a menudo suelen aparecer en el recalado de cabezas, son las grietas internas (figura 7.10a), estas grietas se presentan al sobrepasar la capacidad de deformación del material en la zona de máxima conformación (centro) de la cabeza. Si esta grieta se encuentra cerca de la altura del encuellamiento, puede provocar que en el caso de los pernos al someterlos a torsión, estos se rompan en esa zona.

En la pieza recalcada se procedió a partirla por la mitad para buscar este tipo de fallas, como se observa en la figura 7.10b no se encontraron grietas.

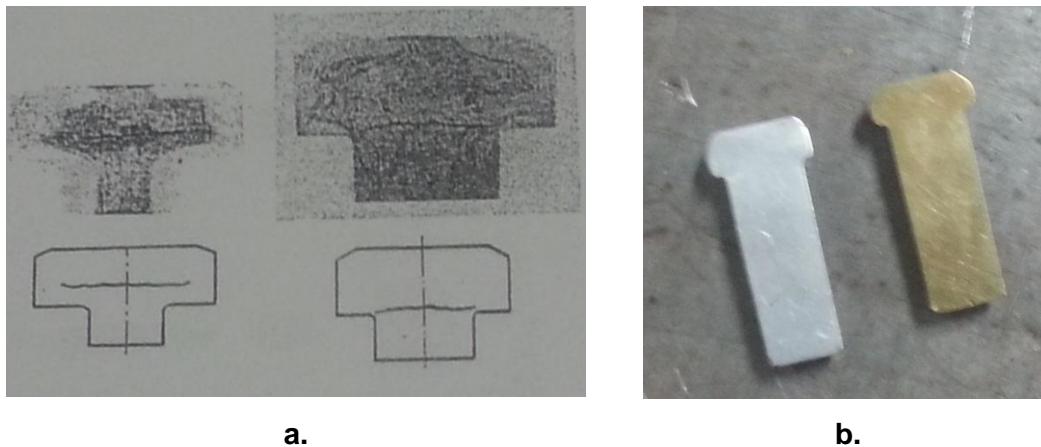


Figura 7.14 Grietas internas. a) Posición de grietas internas⁵³. b) Piezas recalçadas cortadas a la mitad⁴⁸

Finalmente hay que indicar que la aleación de cobre C37700 no presentó grietas durante todo el proceso de pruebas, en cambio se observaba un polvillo sobre estas, producto de la oxidación, mientras que en la aleación de aluminio 2011-T3 si hubo grietas, como ya se indicó en este análisis.

7.3.4. ANÁLISIS METALOGRAFICO

Para realizar el análisis metalográfico se sometió tanto a las probetas deformadas, como sin deformar a un pulido metalográfico seguido por un ataque químico.

A continuación se indica los resultados de este análisis para cada aleación.

⁵³ Fuente: (Billigmann, 2002)

a.) Aluminio 2011-T3

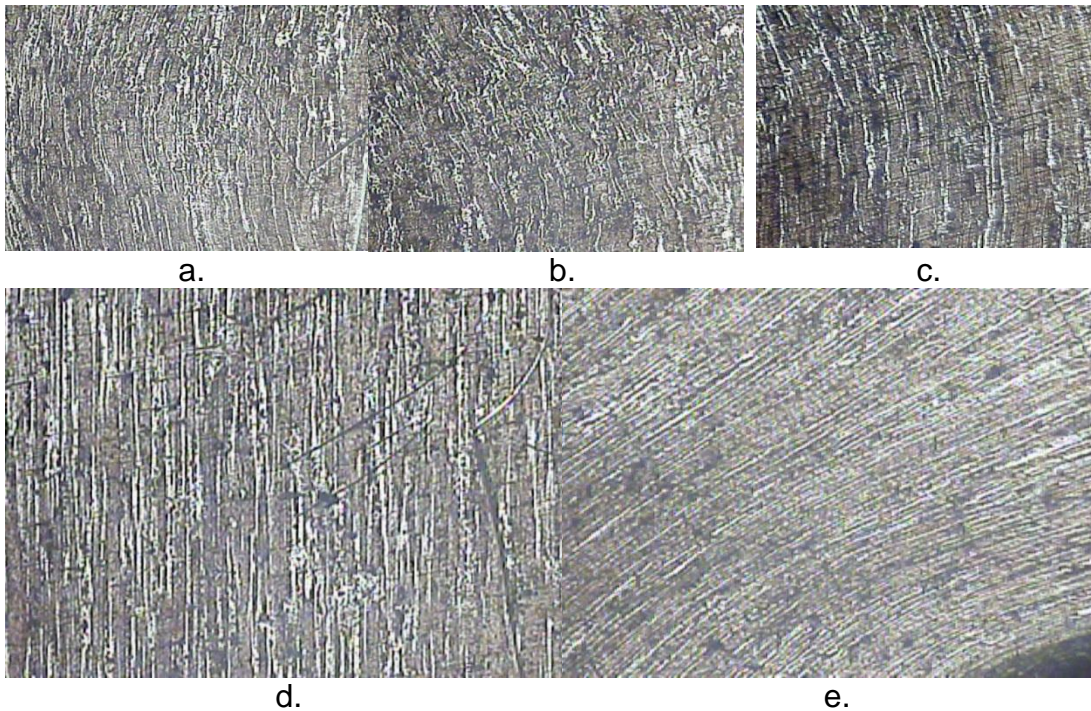


Figura 7.15 Metalografía de la probeta de la aleación de aluminio 2011-T3 deformada⁵⁴. a. Borde izquierdo de la cabeza 100x, b. Centro de la cabeza 100x, c. Borde derecho de la cabeza 100x, d. Cuerpo de la probeta 100x, e. Cuello de la probeta 50x.

Si se compara todos los cuadros de la figura 7.11, se observa un comportamiento anisotrópico de la pieza deformada, eso se debe a que por lo general la matriz está a una temperatura menor que la pieza a ser deformada y por lo tanto la superficie de la pieza se enfría más rápidamente que el centro de la misma.

También se ve que la zona del centro de la cabeza (figura 7.11b), donde se dieron las máximas deformaciones presenta una estructura irregular, mientras en las figuras 7.11a), 7.11c) y 7.11e), se puede observar una estructura fibrosa que se debe al alargamiento de las inclusiones y de las partículas de la segunda fase en la dirección

⁵⁴ Fuente: Capturas de pantalla

del trabajo realizado. En la zona del cuerpo de la pieza deformada (figura 7.11d) no se observa cambio en la dirección de las fibras, más sin embargo se observa un crecimiento de los granos debido a la temperatura de recristalización a la que fue sometida la pieza de trabajo. Esto último se lo puede ver en la figura 7.12.



Figura 7.16 Metalografía de la probeta de la aleación de aluminio 2011-T3 a $100\times^{50}$. a.) Sin tratamiento térmico b.) Después del tratamiento térmico (temperatura de recristalización)

No se pudo medir el tamaño de grano de esta aleación debido a que estos no están muy bien definidos.

b.) Cobre C37700

El cobre se comporta de manera similar a la aleación aluminio, por lo que no se va a repetir lo que anteriormente se dijo para esa aleación.

A diferencia del aluminio 2011-T3, en esta aleación de cobre, los granos están bien definidos, razón por la cual se procede a realizar la determinación del tamaño de grano por el método de las intercepciones recomendado por la norma ASTM E112.

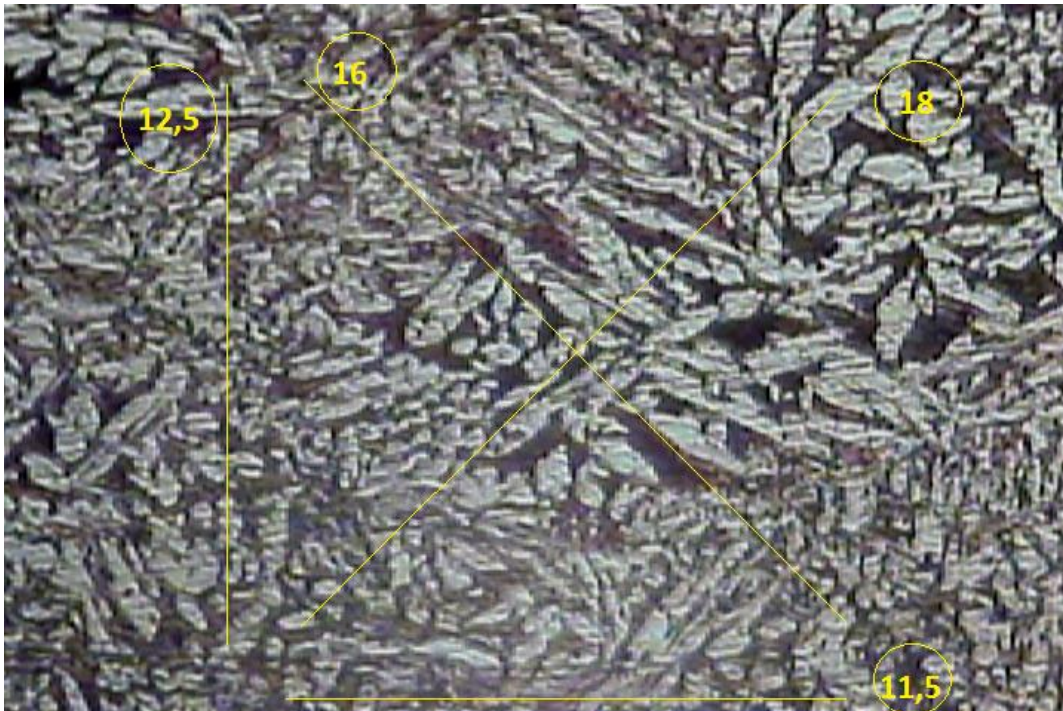


Figura 7.17 Metalografía de la probeta de la aleación de cobre C37700 sin tratamiento térmico a $100\times^{50}$

$$Ni = 12,5 + 11,5 + 18 + 16$$

$$Ni = 58 \text{ (granos interceptados)}$$

$$N_L = \frac{Ni}{L/M} = \frac{58}{\frac{500}{100}}$$

$$N_L = 11,6 \text{ (Número de granos por mm)}$$

$$G = 6,643856 * \text{Log}_{10} N_L - 3,288$$

$$G = 3,78 \approx 4 \text{ tamaño de grano}$$

A continuación se determina el tamaño de grano después de haberse realizado el proceso de conformación en caliente. La foto de la figura 7.14 fue tomada del centro de la cabeza de la pieza.

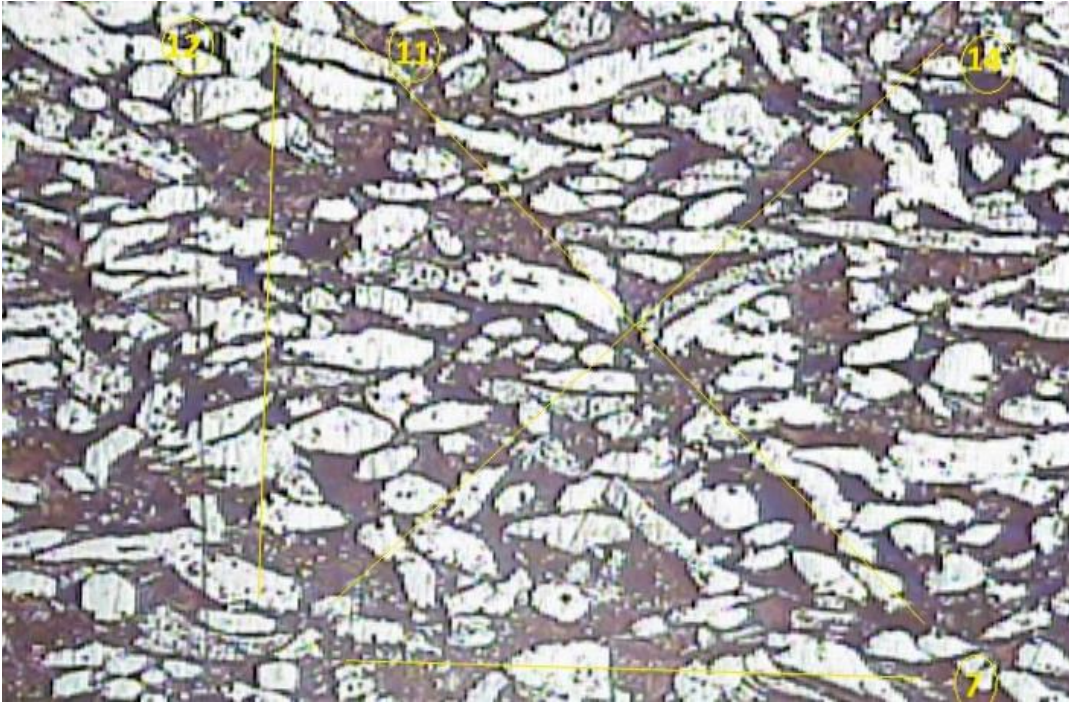


Figura 7.18 Metalografía de la probeta de la aleación de cobre C37700 después de someterlo a la temperatura de recristalización a 100x⁵⁰

$$Ni = 7 + 11 + 14 + 12$$

$$Ni = 44 \text{ (granos interceptados)}$$

$$N_L = \frac{Ni}{L/M} = \frac{44}{\frac{500}{100}}$$

$$N_L = 8,8 \text{ (Número de granos por mm)}$$

$$G = 6,643856 * \text{Log}_{10} N_L - 3,288$$

$$G = 2,95 \approx 3 \text{ tamaño de grano}$$

Luego de realizar los cálculos se observa un crecimiento en el tamaño de grano, y por lo tanto una disminución del número de granos por mm. Al igual que en la aleación de aluminio 2011-T3, se observa un cambio orientación de los granos en dirección del trabajo realizado.

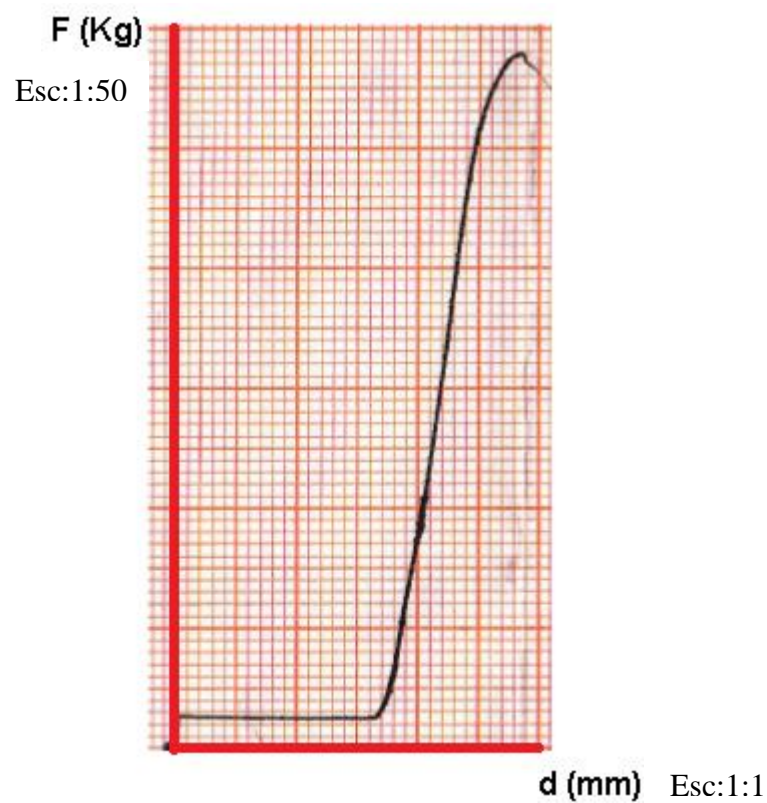
7.3.5. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA AL CORTE

7.3.3.1. Resistencia al Corte para la Aleación de Aluminio

- Probeta maquinada

Datos:

$$\phi = 12,7 \text{ mm}$$



$$F_u = F_{\text{última}} - \text{Peso del cabezal}$$

$$F_u = 2900 - 135$$

$$F_u = 2765 \text{ Kg}$$

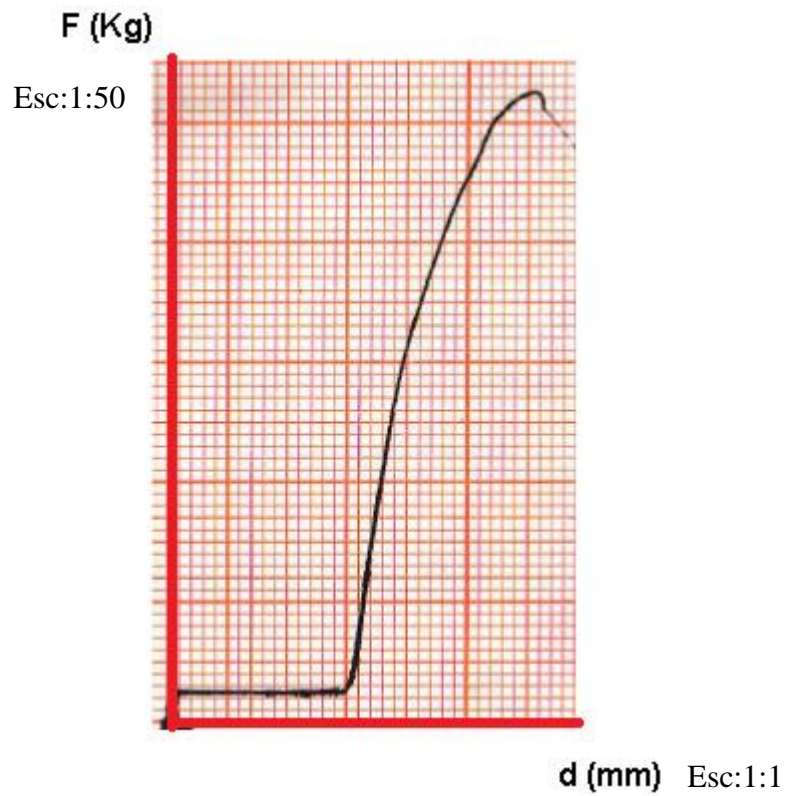
$$S_u = \frac{F_u}{A} = \frac{2765(9,81)}{\frac{\pi 12,7^2}{4}}$$

$$S_u = 214,13 \text{ MPa}$$

- Probeta recalcada

Datos:

$$\varnothing = 12,7 \text{ mm}$$



$$F_u = F_{\text{última}} - \text{Peso del cabezal}$$

$$F_u = 2650 - 135$$

$$F_u = 2515 \text{ Kg}$$

$$S_u = \frac{F_u}{A} = \frac{2515(9,81)}{\frac{\pi 12,7^2}{4}}$$

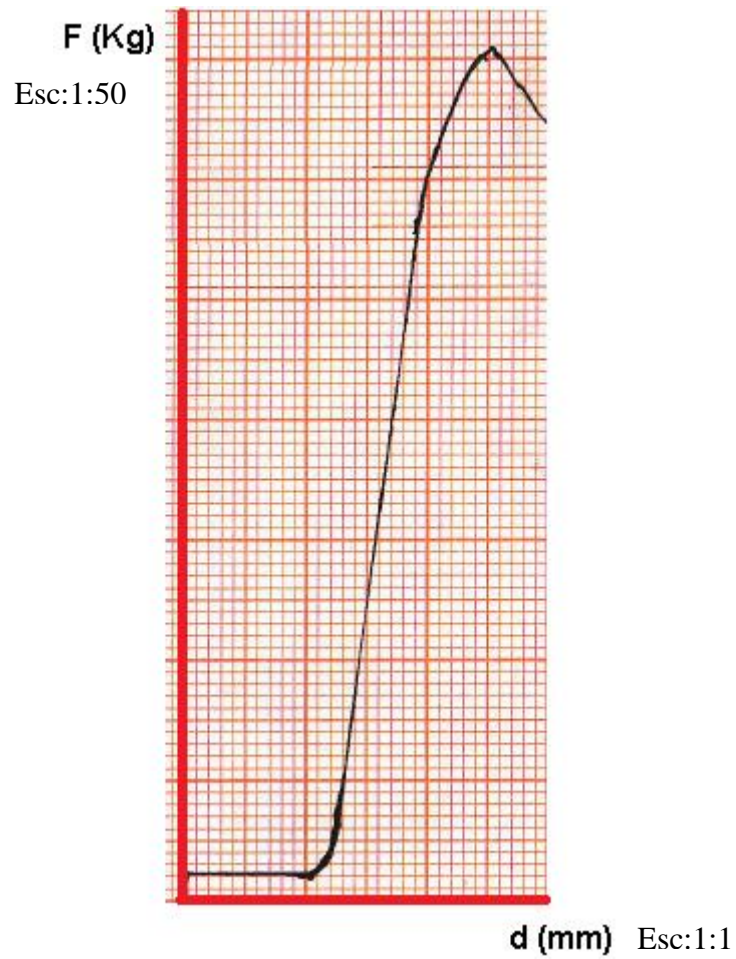
$$S_u = 194,76 \text{ MPa}$$

7.3.3.2. Resistencia al corte para la aleación de cobre

- Probeta maquinada

Datos:

$$\phi = 12,7 \text{ mm}$$



$$F_u = F_{\text{última}} - \text{Peso del cabezal}$$

$$F_u = 3500 - 135$$

$$F_u = 3365 \text{ Kg}$$

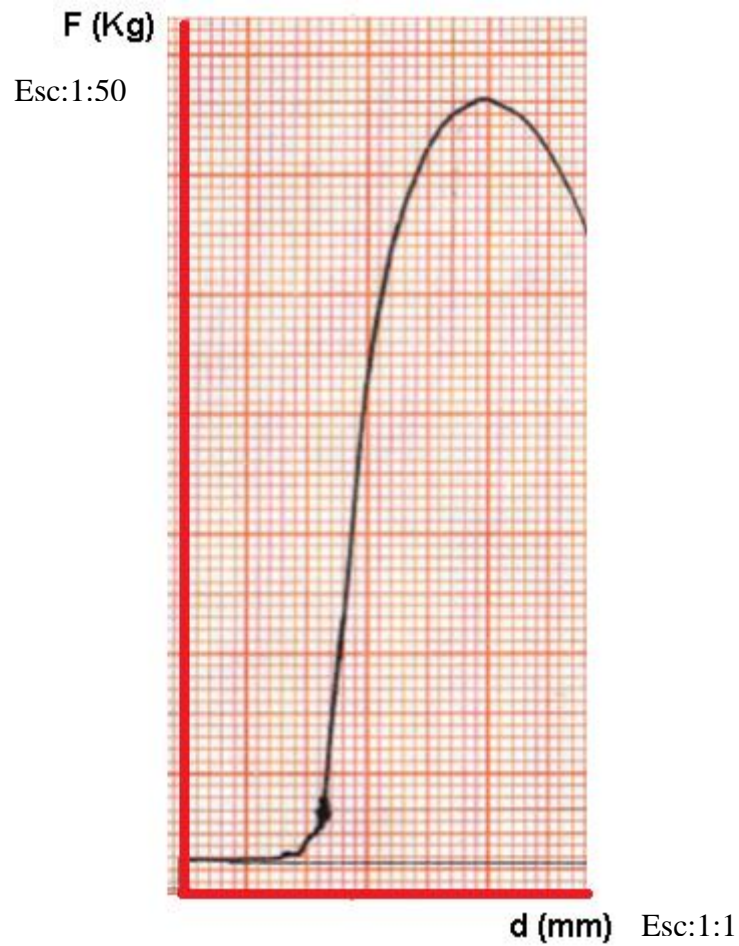
$$S_u = \frac{F_u}{A} = \frac{3365(9,81)}{\frac{\pi 12,7^2}{4}}$$

$$S_u = 260,59 \text{ MPa}$$

- Probeta recalcada

Datos:

$$\varnothing = 12,7 \text{ mm}$$



$$F_u = F_{\text{última}} - \text{Peso del cabezal}$$

$$F_u = 3300 - 135$$

$$F_u = 3165 \text{ Kg}$$

$$S_u = \frac{F_u}{A} = \frac{3165(9,81)}{\frac{\pi 12,7^2}{4}}$$

$$S_u = 245,10 \text{ MPa}$$

7.3.3.3. Análisis de los Valores Obtenidos

En la tabla 7.8 se muestra un resumen de los valores obtenidos de la prueba de resistencia al cortante para ambas aleaciones.

Tabla 7.8 Resumen de los resultados obtenidos

Material	Probeta Maquinada		Probeta Recalcada	
	Fuerza (Kg)	Resistencia al corte (MPa)	Fuerza (Kg)	Resistencia al corte (MPa)
Aleación de Aluminio	2765	214,13	2515	194,76
Aleación de Cobre	3365	260,59	3165	245,10

Fuente: Elaboración propia.

Ahora se procede a analizar el porcentaje de variación de la resistencia utilizando la siguiente fórmula.

$$\% \Delta S_u = \frac{V_m - V_r}{V_m} 100$$

Dónde:

$\% \Delta S_u$: Porcentaje de variación de la resistencia al corte

V_m : Resistencia al corte de la probeta maquinada

V_r : Resistencia al corte de la probeta recalcada

Porcentaje de variación de la resistencia al corte para la aleación de aluminio 2011-T3

$$\% \Delta S_u = \frac{214,13 - 194,76}{214,13} 100$$

$$\% \Delta S_u = 9,05$$

Porcentaje de variación de la resistencia al corte para la aleación de cobre C37700

$$\% \Delta S_u = \frac{260,59 - 245,10}{260,59} 100$$

$$\% \Delta S_u = 5,94$$

Se observa que las piezas recaladas en caliente tienen una menor resistencia al corte en comparación con las piezas maquinadas. Este detalle se debe tener en cuenta al momento del diseño con elementos que han sido sometidos algún tipo de deformación en caliente.

7.3.6. COMPARACIÓN CON PROCESOS DE MAQUINADO

Con el recalcado en caliente es posible realizar una serie de distintos elementos, es por eso que a continuación, en la tabla 7.9, se realiza una comparativa entre los aspectos más importantes que ofrece este proceso.

Tabla 7.9 Comparación con procesos de maquinado

RECALCADO EN CALIENTE	MAQUINADO
Acabado superficial más pobre debido a la formación de óxidos por la reacción del metal de la superficie con el oxígeno del aire.	Excelentes acabados superficiales.
Profundidad de rugosidad ($R_t = 20$ a $60\mu\text{m}$) Profundidad de alisado ($R_p = 5$ a $30\mu\text{m}$)	
Dificultad en controlar la exactitud dimensional debido a factores como formación de cascarilla y expansión y contracción del material al calentarse/enfriarse.	Excelentes tolerancias dimensionales.
Casi no existe desperdicios de material por lo que esto significa un ahorro en materia prima.	Existe desperdicio de material, lo que significa pérdida de dinero.
Se altera las propiedades mecánicas del metal. Baja la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión, pero aumenta la ductilidad.	No se altera propiedades como la ductilidad, resistencia a la corrosión, y la conductividad eléctrica.

Fuente: Elaboración propia

7.3.7. CONSUMO DE ENERGÍA

En la siguiente tabla se muestra el valor a pagar por el consumo eléctrico del equipo de recalcado, si se considera que el equipo trabaje durante cuatro horas diarias, 20 días al mes, a una tarifa de consumo de 0,093 USD/KWh.

Tabla 7.10 Consumo de energía del equipo de recalado

	Potencia W	Horas de trabajo h/día	Consumo diario Wh/día	Consumo mensual Wh/mes	Valor a pagar USD
Prensa Hidráulica	367	4	1468	29360	2,73
Horno eléctrico	7000	4	28000	560000	52,08
Valor total					54,81

Fuente: Elaboración propia

7.4. MANUAL DE OPERACIÓN, SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO

La creación de los manuales permite conocer el uso, las precauciones y los problemas que se pueden presentar, tanto en la prensa hidráulica como en el horno de resistencia eléctrica.

Antes de iniciar el uso de cualquiera de los equipos se recomienda la lectura de los manuales de operación y de seguridad. En caso de presentar algún tipo de problema antes o durante del uso de los equipos, se debe revisar el manual de mantenimiento.

Las medidas de seguridad que se muestran en el manual de seguridad se las debe cumplir para evitar daños a la salud del operador del equipo, en el caso del horno se debe tener mucho cuidado en la manipulación de los objetos que están a una temperatura superior a la ambiental.

Los manuales de operación, seguridad y mantenimiento de la unidad hidráulica y el horno de resistencia eléctrica se presentan en el Anexo 19.

7.5. ELABORACIÓN DE LAS GUÍAS PARA LA PRÁCTICA DE LABORATORIO.

Una vez realizada las pruebas de recalcado y obtenido datos que sirven para generar información, se realiza la elaboración de prácticas de laboratorio. Con las prácticas se analiza las variables que intervienen en el proceso de recalcado, análisis de otros metales no ferrosos y además nos permite vincular materias como metalurgia y mecánica de materiales para el análisis de las probetas después del proceso de deformación en caliente.

Las guías para la realización de la práctica de recalcado en caliente de Procesos de Manufactura II se muestran en el Anexo 21.

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico del equipo no es necesario realizar el análisis del VAN, TIR, ya que este equipo no es para brindar un servicio pagado por lo tanto no genera ningún ingreso, más bien es enfocado a la utilización en el laboratorio motivo por el cual solo consta los gastos que intervinieron en la construcción del equipo.

8.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

Dentro de este análisis económico constará todos los gastos que intervinieron en la construcción del equipo para el recalcado entre estos gastos tenemos los costos directos, costos indirectos e imprevistos.

8.1.1. COSTOS DIRECTOS

Estos costos abarcan todo aquello que están relacionados con la obtención del equipo final (prensa hidráulica, matriz, horno), entre estos costos están los materiales manufacturados, las partes normalizadas y la mano de obra.

8.1.1.1. COSTOS DE LA PRENSA HIDRÁULICA

Tabla 8.1 Costos Directos de la Prensa Hidráulica

PRENSA HIDRÁULICA		
MATERIALES MANUFACTURADOS		
Nombre de la pieza	Descripción	Costo \$
Depósito	Dimensiones: 1220x2440mm Espesor: 3mm	81,50

Continuación tabla 8.1.

Bastidor	Perfil IPE 160 Long: 6m	135,50
SUBTOTAL		217
PARTES NORMALIZADAS		
Nombre de la pieza	Descripción	Costo \$
Motor eléctrico	½ HP, 1720RPM, 110V	160
Bomba de engranes	½ HP, 2 l/min, 1,3 cm ³ /vuelta	250
Cilindro hidráulico	Øp = 50 mm	200
	Øv = 28 mm	
	Carrera: 100 mm	
Válvula 4/3	Centro tándem, Presión máx. 315 bar	215
Válvula de alivio	Regulador de presión ½" Presión máxima 3000 psi	85
Válvula reguladora de caudal	Válvula de 3/8" un solo sentido	58
Filtro de retorno	25µm celulosa	45
Filtro de succión	Malla 100	15
	papel genérico	
Manómetro	Tipo bourdon	25
	Presión máxima 3000psi	
Mangueras hidráulicas	SAE 100 R1AT,	60
	Presión máxima de trabajo: 225 Bar	
Conjunto de racores	Uniones de tuberías y accesorios	55
Tubería galvanizada	Øp = 1/2"	10
	Long: 1.5 m	
Indicador de nivel	Tipo Kp	23
Acople motor-bomba	Acople tipo C	10
Cables eléctricos	AWG 10	14
Aceite hidráulico	ISO 32, 5galones	95
	Breaker mini 110v	25
Sistema de control	Contactor	45
	Relé térmico	35
	Indicadores	10
	Pulsadores	15
	Bornera	5
	Cables	8
	Caja metálica	25
	SUBTOTAL	1488

Continuación tabla 8.1.

MANO DE OBRA			
Descripción	Horas	\$/Horas	Costo \$
Construcción Depósito	12	5	60
Construcción Bastidor	16	5	80
Ensamblaje Unidad Hidráulica	11	5	55
SUBTOTAL	195		
TOTAL	1900		

Fuente: Elaboración propia.

8.1.1.2. COSTOS DE LA MATRIZ

Tabla 8.2 Costos Directos de la Matriz

MATRIZ			
MATERIALES MANUFACTURADOS			
Nombre de la pieza	Descripción	Costo \$	
Matriz	Acero AISI-H13 Ø=2plg- long:65mm	40	
Base Circular Porta Matriz	Acero A36 Ø=3plg- long:55mm	7	
Punzón	Acero A36 Ø=2plg- long:85mm	5	
Base Rectangular Porta Matriz	Acero A36 Placa: 125x85x20mm	6	
SUBTOTAL		58	
PARTES NORMALIZADAS			
Nombre de la pieza	Descripción	Costo \$	
Pernos	Ø3/8-UNC Cant.4	2	
SUBTOTAL		2	
MANO DE OBRA			
Descripción	Horas	\$/Horas	Costo \$
Maquinado Matriz	13	7,70	100
Maquinado Porta Matriz	2,80	2,5	7
Maquinado Punzón	1,25	2,5	3,13
SUBTOTAL		110,13	
TOTAL		170,13	

Fuente: Elaboración propia

8.1.1.3. COSTOS DEL HORNO

Tabla 8.3 Costos Directos del Horno

HORNO			
MATERIALES MANUFACTURADOS			
Nombre de la pieza	Descripción		Costo \$
Estructura Metálica	Perfil L: 30x30x2 Longitud: 3500mm		10
	Perfil L: 20x20x2 Longitud:650mm		12
	Perfil T: 20x20x2 Longitud:800mm		8
	SUBTOTAL		30
PARTES NORMALIZADAS			
Nombre de la pieza	Descripción		Costo \$
Ladrillo Refractario	230x114x64mm – 1600°C- cant.6		38,96
Concreto Refractario	Cercast 2900 – 25Kg – 1594°C		49,32
Mortero Húmedo	Súper 3000 – 25Kg - 1650°C		61,43
Fibra Refractaria	900x310x35mm		30
Resistencia Eléctrica	Longitud: 3.5m $\varnothing_{re}=1\text{mm}$		255
Control de temperatura	Pid Controller JLD612		80
Termocupla	Tipo K		20
Relé	Contacto abierto		25
Contactador	220v-tres fases		30
Breaker	Mini breaker-tres fases		25
Switch on/off	220v-tres fases		6
Cable flexible 10 AWG	Longitud: 10m		10
Terminales para los cables	16 terminales		4
SUBTOTAL			634,71
MANO DE OBRA			
Descripción	Horas	\$/Horas	Costo \$
Construcción Estructura Metálica	6	2.5	15
Montaje Horno	6	2.5	15
SUBTOTAL			30
TOTAL			694,71

Fuente: Elaboración propia.

8.1.1.4. COSTOS MATERIA PRIMA

Tabla 8.4 Costos Materia Prima

Materia Prima		
Nombre de la pieza	MATERIALES MANUFACTURADOS	
	Descripción	Costo \$
Barra aluminio	Ø=2plg-long: 2mts.	24
Barra cobre	Ø=3plg-long: 1mt.	55
TOTAL		79

Fuente: Elaboración propia

8.1.2. COSTOS INDIRECTOS

En estos costos se incluyen los valores que afectan a todo el proyecto y no pueden ser incluidos en uno en específico. En la tabla 8.5 se presentan todos los costos indirectos.

Tabla 8.5 Costos Indirectos

Descripción	Costo \$
Costos de Ingeniería	5400
Internet	25
Impresiones	100
Transporte	150
Servicios Básicos	120
Otros Suministros	40
TOTAL	5835

Fuente: Elaboración propia

8.1.3. COSTO TOTAL

El costo total de este proyecto se obtiene mediante la suma de los totales cada uno de los valores de los costos directos e indirectos. Ver tabla 8.6.

Tabla 8.6 Costo Total del proyecto

Descripción	Costo \$
Prensa Hidráulica	1900
Matriz	170,13
Horno	694,71
Costos Materia Prima	79
Costos Indirectos	5835
Total	8678,84

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

- Las barras de aluminio y cobre que se encuentran en el mercado, no se recomiendan utilizar para el proceso de recalado, ya que no presentan un alto grado de deformación volumétrica.
- Para obtener piezas de medidas exactas los cálculos geométricos no bastan, se deben tomar en cuenta las propiedades mecánicas del material y la temperatura de trabajo de este. Por lo que, en la práctica, como en la simulación se demostró que la longitud inicial de la probeta debe ser un 4,44% más largo que la longitud inicial calculada.
- Como resultado del punto anterior, también se concluye, que al aumentar la longitud de la probeta inicial, también se debe aumentar la presión para recalcar. De lo contrario no se obtendrá un recalado completo.
- A través de las pruebas mecánicas y metalográficas se comprobó que las propiedades en el interior de una pieza recalada cambian anisotrópicamente, es decir, propiedades como la resistencia a la fluencia, tracción y ductilidad dependerán de la zona donde se analice. Igualmente existirá una mayor concentración de esfuerzos en el centro de la pieza que en los bordes.
- Después de aplicado el proceso de recalado las probetas presentaron variación en sus propiedades mecánicas. En las metalúrgicas se determinó un crecimiento de grano, y en las pruebas mecánicas se determinó una

reducción del 9,05% en la aleación de aluminio y 5,94% en la aleación de cobre en la resistencia al corte.

- Mediante el desarrollo de este tema de tesis se generó la información necesaria para la elaboración y resolución de las prácticas de laboratorio.
- Los valores de la temperatura de calentamiento obtenidos en la simulación son válidos para optimizar el tiempo de calentamiento de la probeta dentro del horno, para el aluminio se tiene un error del 4,43% entre la temperatura de calentamiento de la simulación y la obtenida en las pruebas; para el cobre se tiene un error del 1,42%.
- Con la implementación de nuevos útiles de matricería (punzón, matriz, porta matriz), el equipo de recalcado puede utilizarse para otras aplicaciones entre ellas tenemos: extrusión, embutición, estampado, troquelado; además el horno sirve para fundir metales no ferrosos con un bajo punto de fusión por ejemplo aluminio, plomo, estaño; con esto se puede realizar piezas por colado.

9.2. RECOMENDACIONES

- Para moldear piezas grandes es muy recomendable utilizar este tipo de procesos de conformación en caliente debido a la baja resistencia a la fluencia y la gran ductilidad que presentan los metales a temperaturas elevadas.
- Con el fin de obtener una buena pieza recalcada, se recomienda calentar la matriz, para evitar que la probeta se pierda temperatura y se endurezca antes de tiempo.

- Las fórmulas utilizadas para obtener la pieza recalada no son suficientes para obtener una gran exactitud dimensional, al menos en lo que se refiere a recalado en caliente. Por lo que se recomienda continuar con temas afines de tesis y desarrollar nuevos modelos matemáticos basados en teorías de elementos finitos.
- Se recomienda vincular las prácticas del laboratorio del proceso de recalado con los laboratorios de Mecánica de Materiales, Metalurgia y CAD CAM, y así obtener el estudio completo de un elemento manufacturado.

BIBLIOGRAFÍA

Bombas Hidrostáticas. Atmosferis. (23 de Febrero de 2012). Obtenido de Atmosferis:

<http://www.atmosferis.com/bombas-hidrostaticas/>

ASM, I. (2005). *Metalworking: Bulk Forming vol.14A*. Ohio: Material Park.

Astigarraga, J. (1999). *Horno Industriales de Resistencias*. Bogotá: Antonio García Brage.

Bauser, M., & Saver, G. (2006). *ASM EXTRUSION*. Ohio: Materials Park.

Billigmann, J. (2002). *Estampado y Prensado a Máquina*. Barcelona: Reverté S.A.

Bueno, A. (4 de Mayo de 2007). *Unidad didáctica "Neumática e Hidráulica": Portaleso*.

Obtenido de Portaleso:

http://www.portaleso.com/usuarios/Toni/web_neumatica/neumatica_indice.html

EPN, B. (1 de Junio de 2006). *Biblioteca. EPN*. Obtenido de EPN:

<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1540/1/CD-0844.pdf>

Gallardo, M. M. (1996). *Herramientas para Conformar*. México: McGraw-Hill.

Gómez, F. (2005). *Automatización de Sistemas de Producción*. Sevilla: SE.

Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de la Manufactura Moderna*. México: McGraw-Hill.

Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura ingeniería y tecnología*. México DF: Parson Eduation.

Kompasspain. (2006). *Accesorios: Kompasspain*. Obtenido de Kompasspain:

<http://www.kompasspain.com/htm/Filtracion%20y%20Accesorios.htm>

Kutz, M. (1990). *Enciclopedia de la Mecánica Ingeniería y Técnica*. Barcelona: Océano.

Lipowsky, H., & Arpaci, E. (2007). *Copper in the automotive industry*. Germany: Darmstadt.

Maikontrol. (2009). *Termocuplas: Maikontrol*. Obtenido de Maikontrol:
<http://www.maikontrol.com/temperatura/sondas-de-temperatura>

McGraw-Hill. (5 de junio de 2010). *Unidad 11 Motores eléctricos McGraw-Hill*. Obtenido de
Mcgraw-Hill: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>

Sarmiento, M. (25 de Febrero de 2009). *Deformación en caliente: Wikispaces*. Obtenido de
Wikispaces:
<http://materiales.wikispaces.com/file/view/Deformaci%C3%B3n+en+caliente+de+metales.doc>

Schey, J. A. (2000). *Procesos de Manufactura*. México: McGraw-Hill.

standardtechn. (2008). *epósito: standardtechn*. Obtenido de standardtechn:
<http://www.standardtechn.com>

Timings, R. (2002). *Tecnología de la Fabricación: Procesos y Materiales de Taller*. México
DF: Alfa-Omega.

Vickers. (1995). *Manual de Oleohidráulica Industrial*. Barcelona: Blume.