

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HIDRÁULICA
DOBLADORA DE TUBERÍA REDONDA**

**ANDRÉS ARIAS DUQUE
ANA MARÍA MENA MEJÍA**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN
MEDELLÍN
2009**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA HIDRÁULICA
DOBLADORA DE TUBERÍA REDONDA**

**ANDRÉS ARIAS DUQUE
ANA MARÍA MENA MEJÍA**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico e Ingeniero de Producción**

**Asesor
David Cock Botero
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN
MEDELLÍN
2009**

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Medellín, 23 de Abril de 2009

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias que nos apoyaron durante todo el proceso de diseño y fabricación de la máquina, sin su ayuda este proyecto no hubiera sido posible.

Al Ingeniero David Cock Botero, por su gran disposición a ayudarnos en todo momento y por sus buenas recomendaciones.

A todas las personas que de un modo u otro intervinieron en el proceso de fabricación de la máquina.

RESUMEN

El siguiente trabajo contiene el desarrollo del diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda que realiza dobleces entre 0° y 180°.

Se tomó la decisión de construir la máquina dobladora para así aplicar los diferentes conocimientos adquiridos al cursar las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería de Producción.

El proyecto incluye un marco teórico que orienta al lector acerca del tema de doblez de tubería, y sobre los métodos y máquinas de doblado que existen en el mercado. También contiene el diseño y la verificación de las principales partes de la máquina, los planos de todas las piezas, fotos del ensamble de las partes reales y un manual de operación y mantenimiento de la máquina.

Finalmente se incluyen recomendaciones y conclusiones basadas en los resultados obtenidos en cuanto al proceso de fabricación de la máquina y su desempeño, que pueden ser de gran ayuda para quien decida retomar este proyecto o construir una dobladora de este tipo.

Palabras clave: MÁQUINA DOBLADORA, TUBERÍA REDONDA, DOBLEZ DE TUBERÍA.

GLOSARIO

ACERÍA: Planta industrial dedicada exclusivamente a la producción y elaboración de acero partiendo de otro acero o de hierro

CABEZAL: Dispositivo, generalmente móvil, de algunos aparatos que sirve para poner en él la pieza que realiza la función principal.

DADO FORMADOR: Parte de la máquina dobladora con un espacio especialmente diseñado para proveer el volumen necesario para recibir y darle forma curva al tubo.

DEFORMACIÓN ELÁSTICA: Capacidad del material para recuperarse después de una fuerza aplicada y volver al estado normal.

DEFORMACIÓN PLÁSTICA: Alteración permanente de un material al aplicársele una carga y después quitarla (no se recupera la forma inicial).

DUCTILIDAD: Capacidad del material a deformarse de manera permanente sin romperse, cuando se le aplica una fuerza.

ESFUERZO DE CEDENCIA: Esfuerzo aplicado a un material que apenas comienza a crear una deformación plástica permanente.

EXTRUSIÓN: Técnica de procesamiento por deformación mediante la cual un material es empujado a través de la abertura de un dado o boquilla.

LEVA: pieza de una máquina empleada para imprimir un movimiento repetitivo lineal o alternativo a una segunda pieza, denominada seguidor.

LÍMITE ELÁSTICO: Es la tensión máxima que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

MÓDULO DE ELASTICIDAD: También llamado Módulo de Young, es la pendiente de la curva esfuerzo – deformación en su región elástica.

MORDAZA: Mecanismo usado en máquinas herramientas para la sujeción de piezas.

SCHEDULE: También llamada catálogo o cédula, es un índice que relaciona el diámetro, el espesor de pared y la máxima presión que puede soportar una tubería. El ANSI (American National Standards Institute) establece el sistema de schedule para tuberías y acoples según la siguiente fórmula: número de schedule=(1000)(P/S), donde P es la presión de trabajo en psi y S es el estrés permisible del material de la tubería en condiciones de operación en psi. Existen 11 números de schedule: 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140 y 160.

SIDERÚRGIA: Planta industrial dedicada al proceso completo de producir acero a partir del mineral de hierro o de la transformación del acero a partir de la chatarra, para obtener materia prima de acero para la industria y la construcción.

SOLDABILIDAD: Capacidad de un material para ser soldado bajo ciertas condiciones impuestas en una estructura específica y apropiada, la cual funciona eficientemente para el uso que se le destina.

SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA (ELECTRIC RESISTANCE WELDING ERW): Es un tipo de soldadura que se produce al aprovechar el calor generado por la resistencia al flujo de la corriente eléctrica inducida que se tiene en las piezas a unir.

RESISTENCIA A LA TENSIÓN: Esfuerzo que corresponde a la carga máxima en un ensayo de tensión.

RESISTENCIA MECÁNICA: Capacidad de los materiales de soportar tensiones.

TRABAJO: Es el producto de una fuerza aplicada sobre un cuerpo y del desplazamiento del cuerpo en la dirección de esta fuerza.

PLASTICIDAD: la capacidad para deformarse permanentemente sin agrietarse ni partirse.

PORCENTAJE DE ELONGACIÓN: Incremento porcentual total en la longitud de una probeta durante un ensayo de tensión.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
1. MARCO TEÓRICO.....	9
1.1 TUBOS DE ACERO.....	11
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TUBERÍA ESTRUCTURAL.....	11
1.2.1 Proceso de producción.....	12
1.2.2 Especificaciones de la tubería circular.....	12
1.3 FUNDAMENTOS DEL DOBLADO DE METALES.....	15
1.4 DOBLADO DE TUBOS.....	17
1.5 RADIO DE CURVATURA MÍNIMO.....	18
1.6 TÉCNICAS DE DOBLADO DE TUBOS.....	19
1.6.1 Doblado por estiramiento.....	19
1.6.2 Doblado a tracción.....	20
1.6.3 Doblado por compresión.....	21
1.6.4 Doblado en prensa o por flexión pura.....	22
1.6.5 Doblado a rodillos.....	23
1.6.6 Extrusión por rodillos.....	24
1.7 DOBLADORAS DISPONIBLES EN EL MERCADO.....	25
1.7.1 Dobladoras manuales.....	25

1.7.2	Dobladoras hidráulicas.....	26
1.7.3	Dobladoras de Mandril	29
1.7.4	Dobladora a rodillos.....	30
2.	DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE ALGUNAS PARTES DE LA MÁQUINA.....	31
2.1	ESQUEMA DE LA DOBLADORA A FABRICAR	31
2.2	CÁLCULO DE LA FUERZA NECESARIA PARA DOBLAR UN TUBO....	31
2.3	CÁLCULO DE FUERZAS EN EL MECANISMO.....	35
2.4	VERIFICACIÓN DE ALGUNAS PARTES DE LA MÁQUINA.....	38
2.4.1	Verificación del eje principal	38
2.4.2	Verificación del sistema horquillas, eslabón y pasador de los cilindros.....	39
2.4.3	Verificación del sujetador del tubo en c.....	42
2.5	SISTEMA HIDRÁULICO DE LA MÁQUINA DOBLADORA	43
3.	MATERIALES	43
3.1	COSTOS DE FABRICACIÓN.....	46
4.	ENSAMBLE Y PRODUCTO FINAL	47
5.	RECOMENDACIONES.....	52
6.	CONCLUSIONES.....	56
	BIBLIOGRAFÍA.....	58
	ANEXOS.....	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Contenidos máximos en su composición química de la tubería estructural	11
Tabla 2. Propiedades mecánicas de perfiles circulares en acero estructural según la norma ASTM A513 o NTC 2842	13
Tabla 3. Tubería negra laminada en caliente.....	14
Tabla 4. Radio mínimo de curvatura para tubos de diferentes diámetros y espesores con $F_c = 3$	19
Tabla 5. Características de un tubo circular comercial de 1 pulgada de diámetro espesor 2.5mm en acero estructural.....	34
Tabla 6. Fuerza requerida para doblar.....	34
Tabla 7. Valores y unidades de las variables del sistema horquilla, eslabón y pasador.....	40
Tabla 8. Lista de partes y materiales	45
Tabla 9. Costos de fabricación de la máquina dobladora	46
Tabla 10. Fotos y descripción del ensamble de la máquina dobladora.....	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. La naturaleza de un doblado metálico	15
Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el acero	16
Figura 3. Términos en el doblado de un tubo	17
Figura 4. Doblar por estiramiento.....	20
Figura 5. Doblar a tracción.....	21
Figura 6. Doblar por compresión.....	22
Figura 7. Doblar en prensa o por flexión pura.....	23
Figura 8. Curvado a tres rodillos.....	23
Figura 9. Extrusión por rodillos	24
Figura 10. Dobladora Baileigh Bender: RDB-100	25
Figura 11. Dobladora manual JD2 Model 3 Tubing Bender	26
Figura 12. Dobladora hidráulica JD2 Model 4 Tubing Bender	27
Figura 13. Dobladora hidráulica JMR Air / Hydraulic Tube Bender.....	27
Figura 14. Dobladora hidráulica Pro-tools HB 302 - 15 Ton	28
Figura 15. Dobladora hidráulica Huth Heavy Duty Tube & Pipe Bender.....	29
Figura 16. Dobladora para tubo electro hidráulica UNI 80	29
Figura 17. Dobladora a rodillos Ercolina CMR3.....	30
Figura 18. Doblar por estiramiento.....	31
Figura 19. Diagrama de cuerpo libre.....	32
Figura 20. Diagrama de fuerza cortante	32

Figura 21. Diagrama de momento flexionante	32
Figura 22. Mecanismo de la máquina hidráulica dobladora	35
Figura 23. Diagrama de fuerzas de la barra 6	36
Figura 24. Diagrama de fuerzas del dado formador (barra 4)	37
Figura 25. Esfuerzos cortantes en el eje principal	38
Figura 26. Área de la sección transversal del eje principal	39
Figura 27. Horquillas, eslabón y pasador	40
Figura 28. Sujetador del tubo en C	42
Figura 29. Plano hidráulico	44
Figura 30. Foto 25: Máquina dobladora totalmente ensamblada (vista superior) ..	52
Figura 31. Foto 26: Máquina dobladora totalmente ensamblada vista lateral (prueba de funcionamiento de los cilindros hidráulicos)	53
Figura 32. Foto 27: Máquina dobladora totalmente ensamblada y en funcionamiento	54

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PLANO DE LOS CILINDROS HIDRÁULICOS.....	60
ANEXO B. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA DOBLADORA	61
ANEXO C. LISTA DE PARTES DE LA MÁQUINA DOBLADORA	64
ANEXO D. PLANOS DE LA MÁQUINA DOBLADORA.....	65

INTRODUCCIÓN

La industria de la metalmecánica en el mundo está en continuo desarrollo. Día a día se da la creación y el mejoramiento de las máquinas y herramientas que se utilizan en una gran variedad de procesos de manufactura de metales.

Los profesionales egresados de las carreras de Ingeniería Mecánica y de Ingeniería de Producción de la Universidad EAFIT, deben contar con los conocimientos necesarios para realizar el diseño y la construcción de diferentes máquinas que se utilizan en la industria metalmecánica de Colombia y el mundo.

Un profesional de este tipo debe estar en la capacidad de construir máquinas funcionales que permitan manufacturar productos de buena calidad. Específicamente, debe ser capaz de diseñar y construir una máquina hidráulica dobladora de tubería de sección circular de una pulgada de diámetro y de 2.5 milímetros de espesor, que permita realizar curvas entre 0° y 180° , ofrezca confiabilidad en el proceso y tenga un mantenimiento sencillo.

Para el diseño de la máquina se realizó un sondeo de las diferentes dobladoras hidráulicas existentes en el mercado y se procedió a esbozar una máquina dobladora de tubería de sección circular, con base a la cual se calcularon los esfuerzos mecánicos necesarios para doblar tubería estructural de una pulgada de diámetro y un espesor de pared de 2.5mm.

Tomando los bocetos iniciales, se procedió a hacer el cálculo, diseño y fabricación de la máquina, para lo cual se visitaron diferentes talleres mecanizado en la ciudad, así como también empresas especializadas en sistemas hidráulicos.

Durante todo el proceso se realizaron ajustes a la máquina, para finalmente obtener una máquina hidráulica dobladora de tubería que realiza curvas entre 0° y 180° de buena calidad.

1. OBJETIVOS

1.1 GENERAL

Diseñar y construir una máquina hidráulica dobladora de tubería de sección circular de una pulgada de diámetro, que permita realizar curvas entre 0° y 180° en diferentes direcciones en el mismo tubo, que ofrezca confiabilidad en el proceso y tenga un mantenimiento sencillo.

1.2 ESPECÍFICOS

1. Aplicar los diferentes conocimientos adquiridos en materiales y diseño de máquinas para esbozar una máquina dobladora de tubería de sección circular de una pulgada de diámetro que permita realizar curvas en un mismo tubo en diferentes direcciones.
2. Utilizar la mayor cantidad de partes comerciales para el ensamble de la máquina, haciendo más sencillo el mantenimiento y adquisición de los repuestos.
3. Calcular los esfuerzos mecánicos necesarios para doblar tubería estructural de una pulgada de diámetro, y un espesor de pared máximo de 2.5mm.

4. Diseñar la dobladora con base en los cálculos obtenidos y los materiales disponibles en el mercado.
5. Construir una máquina hidráulica dobladora de tubería de sección circular de una pulgada de diámetro, diseñada para realizar curvas entre 0° y 180° .
6. Concluir sobre los resultados obtenidos en cuanto al funcionamiento de la máquina y la calidad del doblado realizado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 TUBOS DE ACERO

Los tubos de acero son una materia prima elemental en la industria manufacturera; se usan para ensamblar una gran cantidad de productos como redes para la conducción de fluidos, energía y telecomunicaciones, transporte de materiales industriales, fabricación de maquinaria y aplicaciones en el medio urbano como estructuras de techos, escaleras, pasamanos y carrocerías, entre otros usos.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TUBERÍA ESTRUCTURAL

Los perfiles de tubería estructural se fabrican con acero laminado en caliente (HR) de bajo contenido de carbono, alta soldabilidad y ductilidad, según normas ASTM A513 o cualquier otro acero equivalente¹. Los contenidos máximos en su composición química y los espesores de lámina con los que se fabrica la tubería se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Contenidos máximos en su composición química de la tubería estructural

OBSERVACIONES: El material solicitado debe ser suministrado bajo las anteriores normas o en cualquier otro acero equivalente dentro de los siguientes contenidos de composición química:			
COMPOSICIÓN QUÍMICA		ESPESOR DE LA LAMINA	
COMPONENTE	REQUISITO (%)	ESPECIFICACIÓN (mm)	TOLERANCIAS (mm)
Carbono (C)	0,08-0,26	1.5	± 0,17
Manganeso (Mn)	0,30-0,60	1.8	± 0,17
Fósforo (P)	0,040 máximo	2.0	± 0,17
Azufre (S)	0,050 máximo	2,5	± 0,18

¹ FERRASA. Tuberías. Tubería estructural [Online]. Medellín, 2005 (Citada: 10 junio 2008) <http://www.ferrasa.com/content.aspx?cid=16>

Fuente: (EXCO COLOMBIANA, 2007)

2.2.1 Proceso de producción. Los perfiles estructurales se fabrican partiendo de bandas de acero laminado en caliente, que al pasar por una serie de rodillos sufren un proceso de formado en frío dando la geometría de cada perfil (circular, cuadrado o rectangular). Para el caso de los perfiles tubulares, el cerrado se hace mediante soldadura por resistencia eléctrica (ERW)².

2.2.2 Especificaciones de la tubería circular. Las propiedades mecánicas de los materiales como el módulo de elasticidad, la resistencia máxima a la tensión y el porcentaje de elongación, entre otras, son determinantes al momento de elegir entre un material u otro. Los valores de las propiedades mecánicas para perfiles circulares en acero estructural que se consiguen comercialmente en la ciudad de Medellín se encuentran en la tabla 2.

² FERRASA, Op. Cit.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de perfiles circulares en acero estructural según la norma ASTM A513 o NTC 2842

**TABLE S5.1
HARDNESS LIMITS AND TENSILE PROPERTIES FOR ROUND TUBING**

	Yield Strength, ksi (MPa), Min.	Ultimate Strength, ksi (MPa), Min.	Elongation in 2 in. or 50 mm, %, Min.	RB Min.	RB Max.
As-Welded Tubing					
1008	30 (207)	42 (290)	15	50	
1010	32 (221)	45 (310)	15	55	
1015	35 (241)	48 (331)	15	58	
1020	38 (262)	52 (359)	12	62	
1021	40 (276)	54 (372)	12	62	
1025	40 (276)	56 (386)	12	65	
1026	45 (310)	62 (427)	12	68	
1030	45 (310)	62 (427)	10	70	
1035	50 (345)	66 (455)	10	75	
1040	50 (345)	66 (445)	10	75	
1340	55 (379)	72 (496)	10	80	
1524	50 (345)	66 (455)	10	75	
4130	55 (379)	72 (496)	10	80	
4140	70 (485)	90 (621)	10	85	
Normalized Tubing					
1008	23 (159)	38 (262)	30		65
1010	25 (172)	40 (276)	30		65
1015	30 (207)	45 (310)	30		70
1020	35 (241)	50 (345)	25		75
1021	35 (241)	50 (345)	25		78
1025	37 (255)	55 (379)	25		80
1026	40 (276)	60 (414)	25		85
1030	40 (276)	60 (414)	25		85
1035	45 (310)	65 (448)	20		88
1040	45 (310)	65 (448)	20		90
1340	50 (345)	70 (483)	20		100
1524	45 (310)	65 (448)	20		88
4130	50 (345)	70 (483)	20		100
4140	65 (448)	90 (621)	20		105

NOTE 1 — These values are based on normal mill stress relieving temperatures. For particular applications, properties may be adjusted by negotiation between purchaser and producer.

NOTE 2 — For longitudinal strip tests, the width of the gage section shall be 1 in. (25.4 mm) and a deduction of 0.5 percentage points from the basic minimum elongation for each $\frac{1}{32}$ in. (0.8 mm) decrease in wall thickness under $\frac{5}{16}$ in. (7.9 mm) in wall thickness shall be permitted.

Fuente: (Norma ASTM A513, p. 972)

El diámetro y el espesor también son características de gran importancia a la hora de seleccionar un tubo. Este tipo de tubería se fabrica según normas ASTM A 513,

NTC 2842 u otra equivalente³. Algunas de las tuberías ofrecidas en el mercado y sus dimensiones se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Tubería negra laminada en caliente

TUBERIA HOT ROLLED			
NEGRA			
Diámetro		Espesor de pared (mm)	
Nominal	Real (mm)	2.0	2.5
1/2 R	20.63	✓	✓
3/4 R	26.05	✓	✓
1 R	32.64	✓	✓
1 1/4R	42.16	✓	✓
1 1/2 R	48.26	✓	✓
2 R	59.94	✓	✓
2 1/2R	76.20	✓	✓
30X30	30x30	✓	✓
40X40	38.1x38.1	✓	✓
50X50	50.8x50.8	✓	✓
DECAPADA Y ACEITADA			
Diámetro Real		2.0	2.5
3/4 R		✓	✓
7/8 R		✓	✓
1.90 R		✓	✓
2 R		✓	✓
1 1/2 C		✓	✓
20x40 mm		✓	✓
30x40 mm		✓	✓
40x60 mm		✓	✓
1x2		✓	✓
3x1 1/2		✓	✓

Fuente: (EXCO COLOMBIANA, 2007)

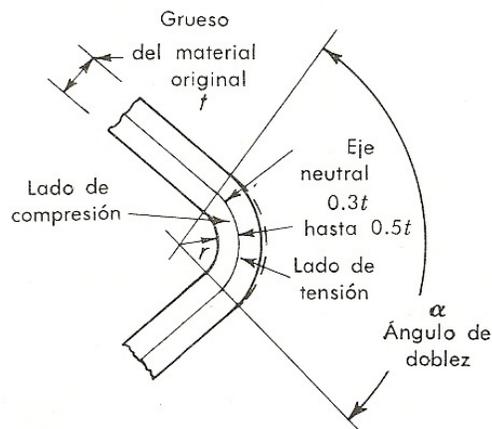
³ EXCO COLOMBIANA S.A. Nuestros procesos. Formado de tubos [Online]. Bogotá, 2007 (Citada: 23 septiembre 2008) <http://www.exco.com.co/procesos.php?idprocesos=2>

Estos perfiles se encuentran fácilmente en siderurgias, acerías o perfiladores locales en longitudes de 6 y 12 metros, o en otras longitudes sobre pedido por los diferentes usuarios.

2.3 FUNDAMENTOS DEL DOBLADO DE METALES

El doblado de metales es un proceso que ocurre al aplicarle a un metal de superficie recta esfuerzos superiores al límite elástico o punto de cedencia, en una dirección diferente al eje neutral del material, así se consigue una deformación plástica permanente en forma de curva. Ver figura 1.

Figura 1. La naturaleza de un doblado metálico



Fuente: (DOYLE, 1980, p. 336)

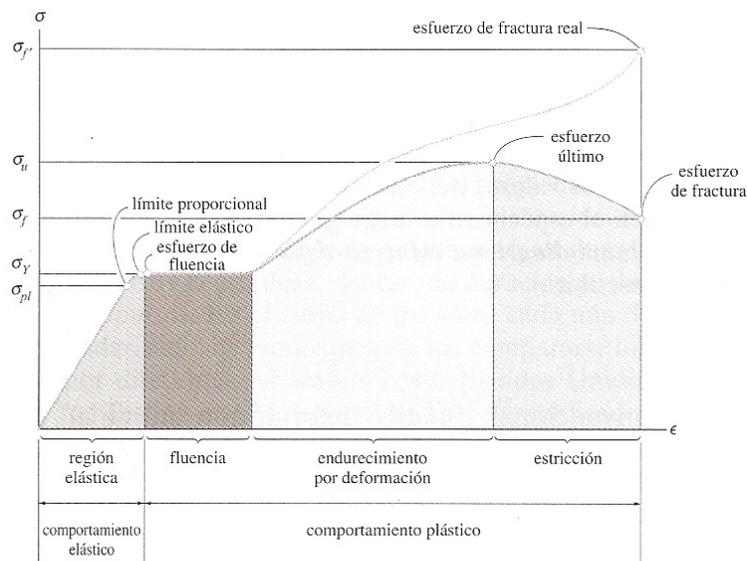
A pesar de esto, el metal al cual se le haya aplicado un esfuerzo más allá del límite elástico es capaz de manifestar cierta cantidad de recuperación elástica. Si se hace un doblado hasta cierto ángulo puede esperarse que regrese hasta un ángulo un poco menor cuando se deja libre el material. Este retroceso es mayor

para radios más pequeños, materiales más gruesos, ángulos de doblez más grandes y materiales endurecidos. Por lo general se devuelven entre 2º y 4º.

Al realizar dobleces en los metales es recomendable realizar el trabajo en frío, a temperatura ambiente evitando calentar el material, ya que aunque esto puede incrementar su plasticidad, al aumentar la temperatura se afecta la estructura interna del elemento, cristalizándolo, lo que causa una disminución de la resistencia mecánica de éste.

Al deformar un metal en frío a medida que aumenta el trabajo se requiere más fuerza y la dureza del material se incrementa, sin embargo se debe tener especial cuidado en no sobrepasar el esfuerzo de ruptura del material porque a partir de este esfuerzo el metal se rompe. Ver figura 2.

Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el acero



Diagramas esfuerzo-deformación unitaria, convencional y real, para un material dúctil (acero) (no de escala)

Fuente: (HIBBELER, 1997, p. 88)

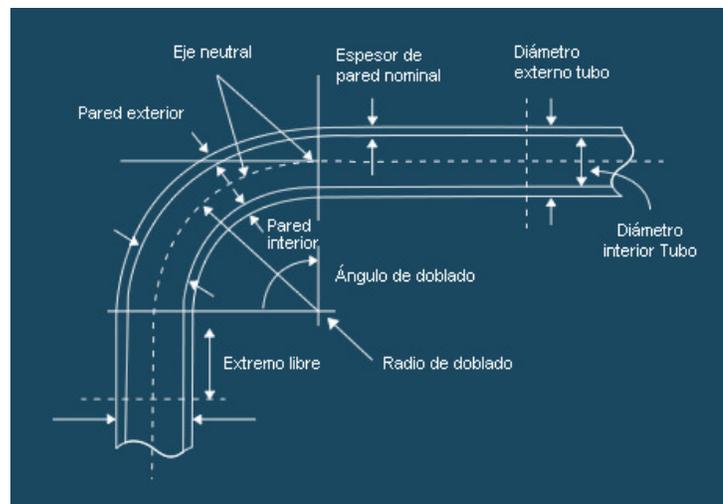
2.4 DOBLADO DE TUBOS

Los materiales de formas y paredes delgadas como la tubería podrían unirse en sus esquinas por medio de uniones comerciales como codos o por soldadura, pero resulta más económico y confiable el proceso de doblado. Los tubos se doblan por métodos que buscan no aplastarlos ni deformarlos en la sección de la curvatura.

El radio de doblado se define como el radio de curvatura del eje neutral del tubo. Hace referencia al los grados existentes entre el eje neutral de cada uno de los extremos libres de la curva de tubería.

El diámetro interior y exterior del tubo, el espesor de pared nominal y el eje neutral son características del tubo seleccionado como materia prima. El ángulo y radio de doblado dependen de los requerimientos de lo que se está fabricando. La pared interior y exterior en el área de la curva dependen del ángulo y radio generados, además, del proceso y máquina de doblado utilizada. Ver figura 3.

Figura 3. Términos en el doblado de un tubo



Fuente: (DOBLATUBOS, 2008)

2.5 RADIO DE CURVATURA MÍNIMO

La calidad de las curvas obtenidas al doblar un tubo depende en gran parte de la relación que existe entre el diámetro exterior del tubo a doblar, (ϕ_e), y el radio de curvatura obtenido después de doblar el tubo, (R_c). Esta relación se conoce como factor de curvatura (F_c).

$$F_c = \frac{R_c}{\phi_e}$$

Por medio del factor de curvatura es posible determinar el radio mínimo de curvatura que se le puede dar al tubo con el fin de que este no presente achataduras, arrugas ni grietas.

Valores de F_c entre 1 y 2, indican que el doblado es de alta dificultad, por lo tanto es necesario calentar el tubo o utilizar elementos de relleno como mandriles, resina, alquitrán o arena seca para evitar que se produzcan defectos de calidad.

El valor recomendado del factor de curvatura está en un rango de 2.5 a 3.5, en el cual el doblado se considera simple.

En la tabla 4 se muestran diferentes diámetros de tubería, con sus respectivos espesores y radios de curvatura para un factor de curvatura 3.

Tabla 4. Radio mínimo de curvatura para tubos de diferentes diámetros y espesores con $F_c = 3$

Ø Nominal Tubo (in)	Ø Real Tubo (mm)	Espesor de pared (mm)	Radio mínimo de curvatura (mm)	Radio mínimo de curvatura (in)
0.5	20,63	2,5	61,9	2,4
0.75	25,05	2,5	75,2	3,0
1	32,64	2,5	97,9	3,9
1.25	42,16	2,5	126,5	5,0
1.5	48,26	2,5	144,8	5,7
2	59,24	2,5	177,7	7,0

Fuente: (Elaboración propia)

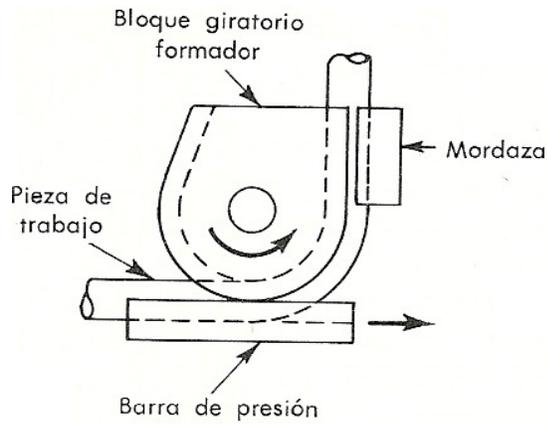
2.6 TÉCNICAS DE DOBLADO DE TUBOS

Las técnicas usadas comúnmente para doblar tubos son: doblado por estiramiento, doblado a tracción, doblado por compresión, doblado en prensa, doblado por rodillos y extrusión por rodillos.

2.6.1 Doblado por estiramiento. Se fija el tubo con mordazas contra un bloque o dado formador que gira y tira del metal amoldándolo contra el doblado. La pieza de trabajo que entra en el doblador recibe apoyo mediante una barra de presión. Este método es muy utilizado para trabajo con tubos de pared delgada y para radios de doblados pequeños⁴. Este proceso se muestra en la figura 4.

⁴ DOYLE, Lawrence. Proceso de manufactura y materiales para ingenieros. México D.F.: Diana, 1980. p. 338.

Figura 4. Doblado por estiramiento



Fuente: (DOYLE, 1980, p. 339)

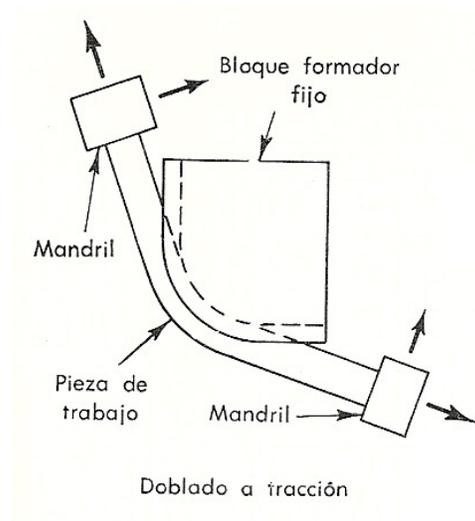
En algunas ocasiones se inserta un mandril, herramienta usada para apoyar el interior del tubo y así mejorar la calidad de la curva, reduciendo al mínimo cualquier aplanado, y para ayudar a controlar el arrugado durante el ciclo de doblado. Los mandriles utilizados comúnmente son esferas, cable, laminadoras o arena.

El radio de curvatura máximo utilizando este método es de 180 grados.

2.6.2 Doblado a tracción. El tubo se tracciona desde ambos extremos mientras se dobla sobre un bloque formador, esta técnica está limitada a dobleces de radio grandes pero es apropiado para curvas que no son circulares⁵. En la figura 5 se muestra un esquema del doblado a tracción.

⁵ DOYLE, Op. Cit., p. 338

Figura 5. Doblado a tracción

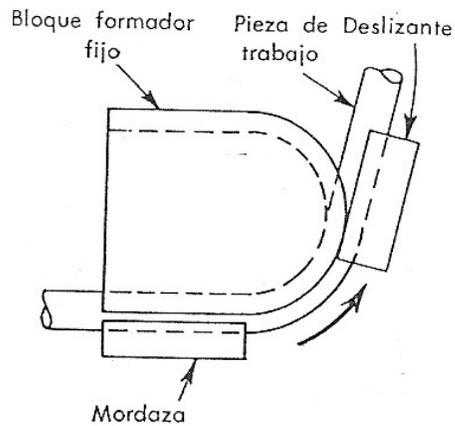


Fuente: (DOYLE, 1990, p. 339)

2.6.3 Doblado por compresión. El tubo de trabajo se fija con una mordaza y se le obliga envolverse en torno a un dado formador fijo usando una mordaza deslizante. Esta técnica permite hacer series de dobleces que casi no dejan espacios libres entre ellos⁶. Ver figura 6.

⁶ DOYLE, Op. Cit., p. 338

Figura 6. Doblado por compresión



Doblado por compresión

Fuente: (DOYLE, 1980, p. 339)

2.6.4 Doblado en prensa o por flexión pura. Se crea una curva presionando un dado formador sobre el tubo en un movimiento. El tubo es soportado por un par de dados separados, que rotan a medida que el conformador se mueve hacia el centro empujando el tubo.

Este movimiento envuelve el tubo alrededor del conformador, permitiendo que los dados de los extremos apoyen el tubo en cada lado. Este proceso es muy rápido y es excelente para altas producciones. Sin embargo se deben cambiar los dados o la distribución de los mismos para generar diferentes variedades de curvas.

El radio de curva máximo es 110 grados. Ver figura 7.

Figura 7. Doblado en prensa o por flexión pura



Fuente: (DOBLATUBOS, 2008)

2.6.5 Doblado a rodillos. Esta técnica utiliza tres dados cilíndricos para formar la curva. Este estilo de doblado se utiliza típicamente para desarrollar curvas grandes de radio y para enrollar tubería (serpentes).

La curva se crea cuando el dado de centro superior de la curva se mueve ajustándose al tubo, mientras que los dos dados, izquierdo y derecho, más bajos de la curva, rotan al mismo tiempo en una dirección y posteriormente en la dirección contraria al momento requerido. Ver figura 8.

Figura 8. Curvado a tres rodillos



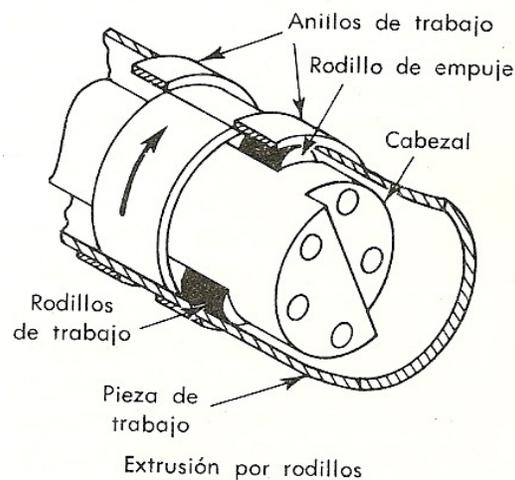
Fuente: (DOBLATUBOS, 2008)

2.6.6 Extrusión por rodillos. Se hace girar dentro del tubo un cabezal con rodillos de empuje anchos situados por un lado y un rodillo de trabajo angosto por el otro lado.

El tubo se rodea con anillos de trabajo en el exterior del cabezal. El rodillo de trabajo es desplazado hacia adentro y afuera por medio de levas mientras gira el cabezal con el fin de aplicar presión para extruir metal en la pared del tubo lateralmente, para obligarlo a doblarse. A medida que se trabaja el material se hace avanzar el tubo pasando por el cabezal.

Esta técnica se utiliza principalmente para doblar tubos mayores a 5 pulgadas (127mm) de diámetro exterior y con espesores mayores a 5/8 de pulgada (15.8mm)⁷. Un esquema de este proceso se muestra en la figura 9.

Figura 9. Extrusión por rodillos



Fuente: (DOYLE, 1980, p. 339)

⁷ DOYLE, Op. Cit., p. 339

2.7 DOBLADORAS DISPONIBLES EN EL MERCADO

2.7.1 Dobladoras manuales.

- **Dobladora manual marca Baileigh.** Esta dobladora cuenta con un mecanismo de dado único que permite doblar fácilmente al halar una palanca y con cada movimiento entrega 10 grados de curvatura. Posee una capacidad máxima para doblar tubos de 1 pulgada - schedule 40, y tubos rectangulares de 1 pulgada y de 1-¾ pulgadas. Está diseñada para doblar tubo redondo o cuadrado, tubería, ángulo perfilado en acero de bajo carbono y varilla maciza⁸. Ver figura 10.

Figura 10. Dobladora Baileigh Bender: RDB-100



Fuente: (FABRICATING EQUIPMENT COMPANY, 2008)

- **Dobladora manual JD2 modelo 3.** La dobladora posee una capacidad máxima para doblar tubos de 2 pulgadas y puede funcionar hidráulica o

⁸FABRICATING EQUIPMENT COMPANY. Baileigh Bender: RDB-100. Standard Features [Online]. Houston, TX., 2008 (Citada: 10 Junio 2008)
http://www.fabequip.com/equipment/benders/baileigh/baileigh_rmd-100.htm

mecánicamente. Dobla con precisión tubos redondos y cuadrados hasta los 180°. Es de fácil operación⁹. Ver figura 11.

Figura 11. Dobladora manual JD2 Model 3 Tubing Bender



Fuente: (VAN SANT ENTERPRISES, 2008)

2.7.2 Dobladoras hidráulicas.

- **Dobladora hidráulica JD2 modelo 4.** La dobladora JD2 modelo 4 es una máquina hidráulica de fácil montaje y operación, que cuenta con un fusible antibloqueo que previene que el material se devuelva. Los cambios de dados se realizan de una forma rápida.

La capacidad de doblado para tubo redondo hasta de 2-½ pulgadas (0.120 pulgadas de pared), para tubo cuadrado hasta de 1-½ pulgadas y para tubería de hasta 2 pulgadas - schedule 40 y de 1-½ pulgadas – schedule 80¹⁰. Ver figura 12.

⁹ VAN SANT ENTERPRISES. JD2 Model 3 Tubing Bender [Online]. Iowa, 2008 (citada: 16 Junio 2008) http://vansantent.com/model_3_bender.htm

¹⁰ IBID

Figura 12. Dobladora hidráulica JD2 Model 4 Tubing Bender



Fuente: (VAN SANT ENTERPRISES, 2008)

- **Dobladora JMR hidráulica.** La dobladora viene con dados disponibles para dobleces de 120° y 240°. Cuenta con bujes de aluminio y bronce en los puntos de giro, y su acabado superficial es negro. Ha sido construida para trabajo industrial y es económica. Tiene garantía de por vida contra rupturas en dados. Su capacidad de doblado de tubo redondo es de hasta 2-½ pulgadas, tubo cuadrado de hasta 2 pulgadas y tubería de hasta 2 pulgadas - schedule 40¹¹. Ver figura 13.

Figura 13. Dobladora hidráulica JMR Air / Hydraulic Tube Bender

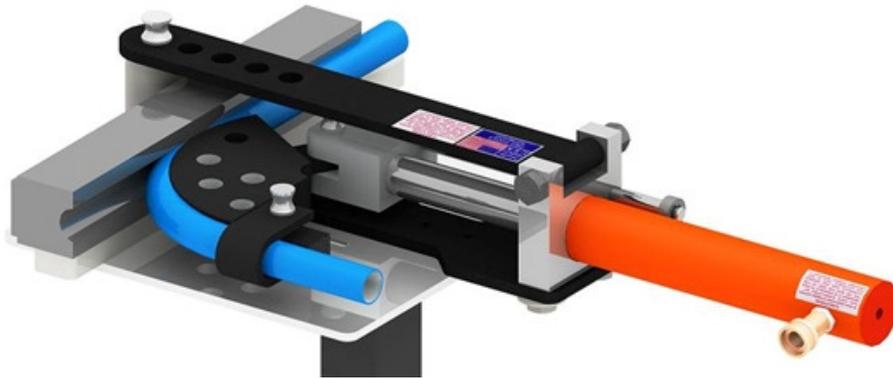


Fuente: (VAN SANT ENTERPRISES, 2008)

¹¹ VAN SANT ENTERPRISES, Op. Cit.

- **Dobladora hidráulica Pro-Tools HB 302.** El diseño de la máquina es especial para facilitar el cambio de los dados y los tubos. Ha sido construida para que dure de por vida. Su capacidad máxima para tubos es de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Posee auto bloqueo para posibilitar dobleces repetitivos¹². Ver figura 14.

Figura 14. Dobladora hidráulica Pro-tools HB 302 - 15 Ton



Fuente: (PRO-TOOLS, 2008)

- **Dobladora hidráulica Huth Heavy Duty Tube & Pipe Bender.** La máquina está diseñada doblar tubería de trabajo pesado, para lo cual utiliza cilindros hidráulicos industriales. Dobra tubo redondo de hasta 3 pulgadas, y cuenta con una máxima capacidad para tubería de 2 pulgadas – schedule 80 y para tubería cuadrada de hasta 2 $\frac{1}{2}$ pulgadas. Posee la opción de auto parada¹³. Ver figura 15.

¹² PRO-TOOLS. Hydraulic Tube & Pipe Benders. HB 302 - 15 Ton One Shot Hydraulic Bender Info/Spec [Online]. Florida, 2008 (Citada: junio 16 2008) <http://www.pro-tools.com/302.htm>

¹³ VAN SANT ENTERPRISES, Op. Cit.

Figura 15. Dobladora hidráulica Huth Heavy Duty Tube & Pipe Bender



Fuente: (VAN SANT ENTERPRISES, 2008)

2.7.3 Dobladoras de Mandril

- **Dobladora para tubo electro hidráulica para utilizarse con mandril, UNI 80.** Máquina dobladora de tubo precisa y poderosa, capaz de doblar tubos de diámetros grandes así como delgados y delicados, con radio de doblez constante y sin deformaciones. Tubos de 76mm de diámetro máximo¹⁴. Ver figura 16.

Figura 16. Dobladora para tubo electro hidráulica UNI 80



Fuente: (DOBLADORAS PARA TUBO, 2008)

¹⁴ DOBLADORAS PARA TUBO. División maquinaria. Dobladoras [Online]. Zúñiga, 2008 (Citada: 16 Junio 2008) http://dobladorasparatubo.com/dobladoras_para_tubo.html

2.7.4 Dobladora a rodillos

- **Dobladora a rodillos Ercolina CE40MR3.** Esta máquina es capaz de doblar un amplio rango de tubos, tuberías y perfiles hasta un radio de línea central tan pequeño como cuatro veces el diámetro de la pieza de trabajo. La capacidad de ángulo de rolado es de tubería de 2 pulgadas – schedule 40 o ángulo de hierro de 2 pulgadas¹⁵. Ver figura 17.

Figura 17. Dobladora a rodillos Ercolina CMR3



Fuente: (PIPE BENDING, 2008)

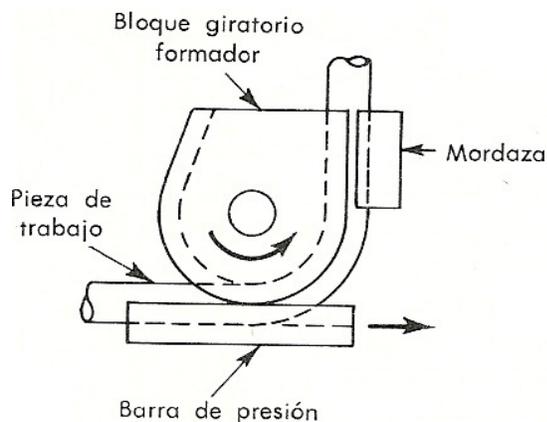
¹⁵ PIPE bending -- Equipment & supplies. EQUIPMENT: Pipe, angle-iron roll bender. En: Welding Magazine [Online]. 2008, Vol. 81, No. 5, (Citada: marzo, 2008) http://weldingmag.com/equipment-automation/products/pipe_angleironed_roll_bender_0501/

3. DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE ALGUNAS PARTES DE LA MÁQUINA

3.1 ESQUEMA DE LA DOBLADORA A FABRICAR

Luego de analizar los diferentes métodos de doblado y las distintas máquinas dobladoras hidráulicas disponibles en el mercado, se define que el método de doblado a utilizar es el de doblado por estiramiento, tal como se muestra en la figura 18, pues brinda la posibilidad de realizar curvas de hasta 180°.

Figura 18. Doblado por estiramiento

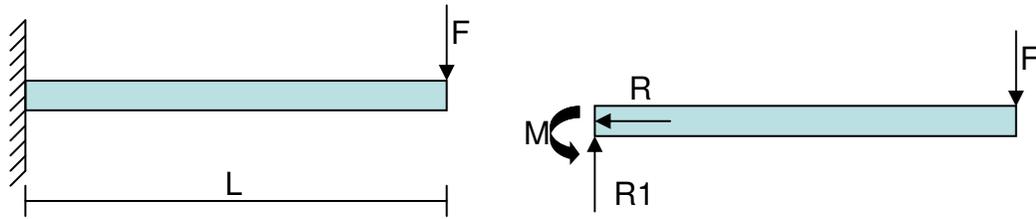


Fuente: (DOYLE, 1980, p. 339)

3.2 CÁLCULO DE LA FUERZA NECESARIA PARA DOBLAR UN TUBO

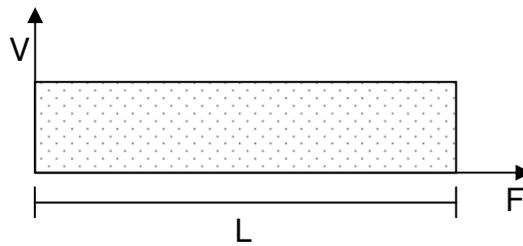
Para calcular la fuerza necesaria para doblar un tubo, teniendo en cuenta las partes de la máquina que tienen contacto directo con éste, se modela como una viga empotrada en uno de sus extremos, tal como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Diagrama de cuerpo libre



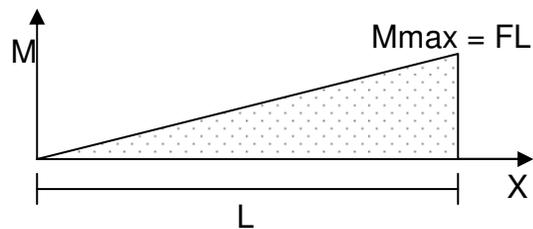
Fuente: (Elaboración propia)

Figura 20. Diagrama de fuerza cortante



Fuente: (Elaboración propia)

Figura 21. Diagrama de momento flexionante



Fuente: (Elaboración propia)

Al analizar los diagramas de cuerpo libre y momento flexionante, figuras 20 y 21, puede verse como el tubo experimenta esfuerzos de flexión en la sección transversal a lo largo de toda la longitud, además puede observarse que el esfuerzo de flexión tiene un valor máximo en el extremo derecho, donde es aplicada la fuerza F , pues allí el valor del momento flexionante es máximo.

Para doblar el tubo es necesario aplicarle a éste una fuerza tal que genere un esfuerzo mayor que el esfuerzo de fluencia del material, para que haya deformación plástica.

La ecuación para calcular el esfuerzo de flexión es la siguiente:

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

Donde:

- M : Momento interno resultante.
- C : Distancia desde el eje neutro hasta el punto donde se calculará el esfuerzo.
Para este caso $c = R_e$.
- I : momento de inercia de la sección transversal para el tubo.

$$I = \frac{\pi}{4}(R_e^4 - R_i^4)$$

Teniendo en cuenta que para este caso $\sigma > \sigma_y$, y que $M = FL$, reemplazamos y obtenemos:

$$F > \frac{\sigma_y \times \pi \times (R_e^4 - R_i^4)}{4 \times L \times c}$$

Para el cálculo de la fuerza necesaria para doblar un tubo de 1 pulgada de diámetro, se utilizan las variables mostradas en la tabla 5.

Tabla 5. Características de un tubo circular comercial de 1 pulgada de diámetro espesor 2.5mm en acero estructural

Ø Exterior (In)	Re (mm)	Ri (mm)	Espesor de pared (mm)	σ_y (MPa)
1	16.32	13.82	2.5	345

Fuente: (Elaboración propia)

$$F > \frac{345 \text{ Mpa} \times \pi \times [(16.32 \text{ mm})^4 - (13.82 \text{ mm})^4]}{4 \times 140 \text{ mm} \times 16.32 \text{ mm}} = 4087 \text{ N}$$

La fuerza necesaria para doblar un tubo con estas especificaciones es F=4087N

En la tabla 6 se muestra la fuerza necesaria para doblar tubos de diferentes diámetros y espesores.

Tabla 6. Fuerza requerida para doblar tubos de diferentes diámetros y espesores

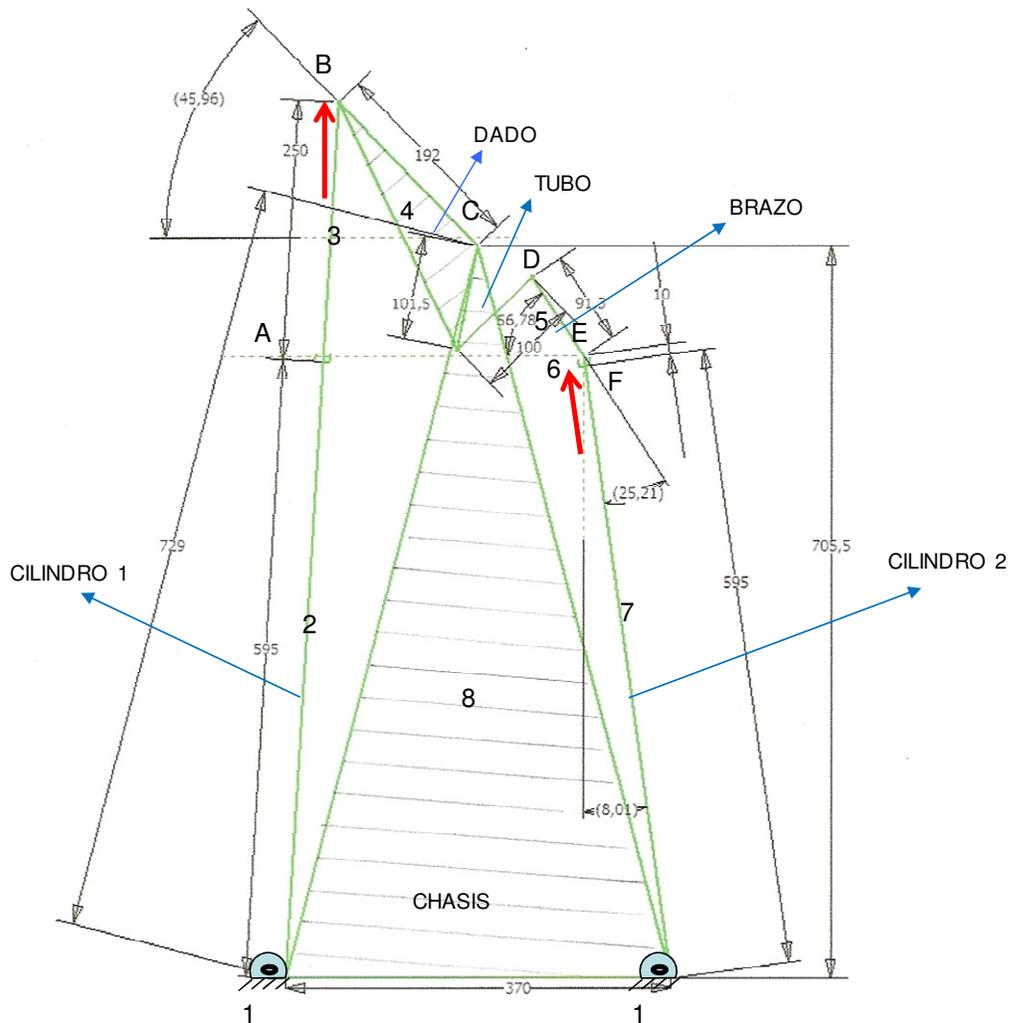
Ø Exterior (in)	Re (mm)	Ri (mm)	Espesor (mm)	σ_y (Mpa)	F(N)
0,5	10,315	7,815	2,5	345	1424,28
0,75	12,525	10,025	2,5	345	2242,12
1	16,32	13,82	2,5	345	4086,75
1,25	21,08	18,58	2,5	345	7187,88
1,5	24,13	21,63	2,5	345	9635,76
2	29,62	27,12	2,5	345	14949,14

Fuente: (Elaboración propia)

3.3 CÁLCULO DE FUERZAS EN EL MECANISMO

Para calcular las fuerzas que fluyen por la máquina y que permiten doblar el tubo, es necesario dibujar cada uno de los elementos que componen la dobladora, para lo cual se ésta como un mecanismo de barras. Ver figura 22.

Figura 22. Mecanismo de la máquina hidráulica dobladora

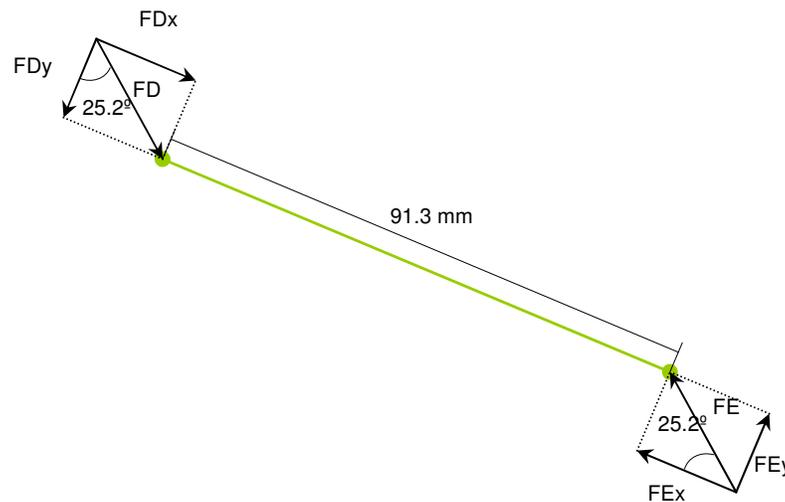


Fuente: (Elaboración propia)

Para analizar las fuerzas que fluyen por el sistema, las partes de la máquina serán analizadas como barras.

- Brazo (barra 6). En la figura 23 se muestra el diagrama de cuerpo libre del brazo.

Figura 23. Diagrama de fuerzas de la barra 6



Fuente: (Elaboración propia)

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_x = 4333N \cos(25.2^\circ) - F_{Dx} = 0$$

$$F_{Dx} = 3921N$$

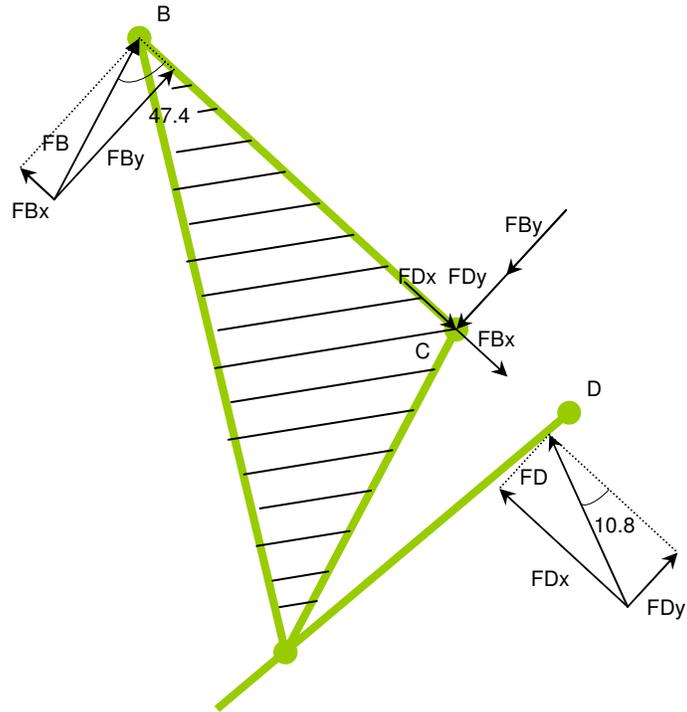
$$\sum F_y = 0$$

$$\sum F_y = 4333N \sin(25.2^\circ) - F_{Dy} = 0$$

$$F_{Dy} = 1845N$$

- Dado (barra 4). En la figura 24 se muestra el diagrama de cuerpo libre del dado formador.

Figura 24. Diagrama de fuerzas del dado formador (barra 4)



Fuente: (Elaboración propia)

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_x = 4333N \cos(10.82^\circ) + FB_x = 0$$

$$FB_x = -4256.3N$$

$$\sum F_y = 0$$

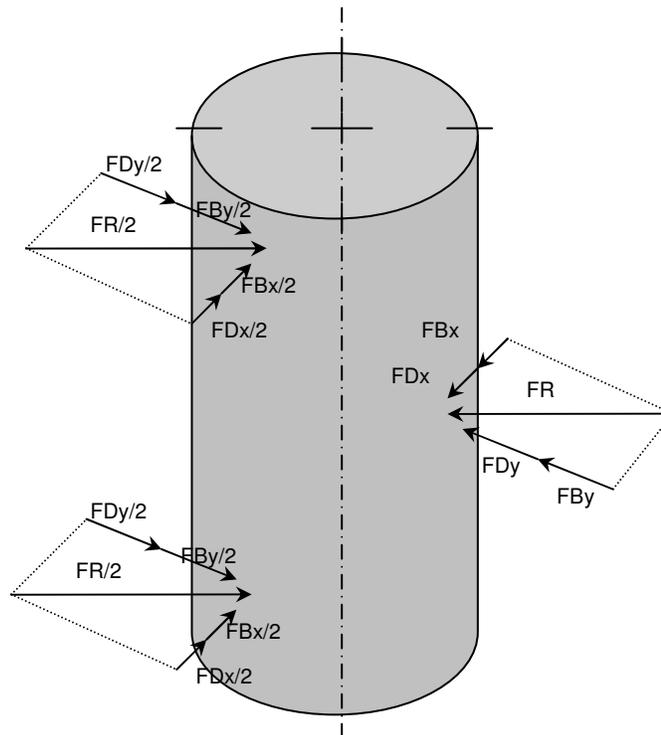
$$\sum F_y = 4333N \sin(10.82^\circ) + FB_y = 0$$

$$FB_y = -813.4N$$

3.4 VERIFICACIÓN DE ALGUNAS PARTES DE LA MÁQUINA

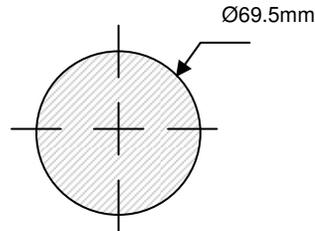
3.4.1 Verificación del eje principal. Tomando como base el diagrama de fuerzas del dado formador podemos observar que el eje principal de la máquina dobladora se encuentra sometido a fuerzas cortantes, tal como se muestra en la figura 25. En la figura 26 se muestra el área de la sección transversal del eje principal.

Figura 25. Esfuerzos cortantes en el eje principal



Fuente: (Elaboración propia)

Figura 26. Área de la sección transversal del eje principal



Fuente: (Elaboración propia)

$$A = \frac{\pi\phi^2}{4} = 3793.7\text{mm}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{4333\text{N}}{3793.7\text{mm}^2} = 1.14\text{MPa}$$

Asumiendo que el factor por falla de fatiga es 2, el esfuerzo máximo por fatiga sería $\tau_{\text{MAX}} = 2.28 \text{ MPa}$. El límite elástico del eje principal (acero AISI 4140) es 421 MPa, por lo tanto el factor de seguridad del eje es:

$$N = \frac{S_y}{\tau_{\text{MAX}}} = 184.6$$

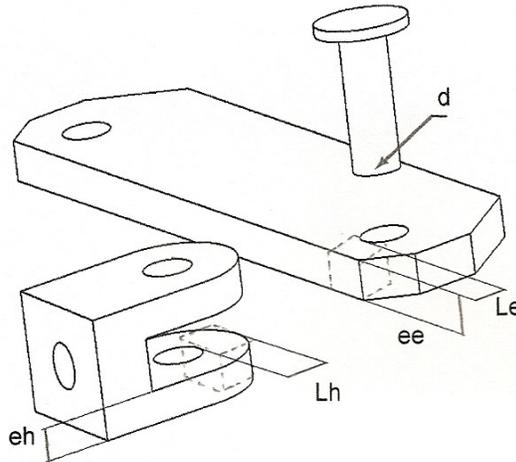
Como se puede observar el factor de seguridad es alto, por lo que se pensaría que la parte está sobredimensionada, sin embargo se debe tener en cuenta que esta pieza ha sido diseñada para ser utilizada con dados que permitan doblar tubos de mayores diámetros y espesores, lo que hará que el eje se encuentre sometido a mayores esfuerzos cortantes.

3.4.2 Verificación del sistema horquillas, eslabón y pasador de los cilindros.

Al analizar el sistema horquillas - eslabón se puede observar que la falla más

común que puede presentar este mecanismo es por desgarramiento, mientras que el pasador puede presentar falla por cortante¹⁶, ver figura 27.

Figura 27. Horquillas, eslabón y pasador



Fuente: (Elaboración propia)

La fuerza aplicada será la máxima desarrollada por los cilindros ($F=4333\text{N}$). El material de las horquillas y del eslabón es acero SA-36 y el del pasador es acero 1020. Los valores de las dimensiones del sistema horquilla, eslabón y pasador se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Valores y unidades de las variables del sistema horquilla, eslabón y pasador

Variable	Valor	Unidades
L_h	18.55	mm
e_h	19.05	mm
L_e	12.7	mm
e_e	12.7	mm
d	25	mm

Fuente: (Elaboración propia)

¹⁶ NORTON, Robert L., Diseño de máquinas, México: Prentice Hall, 1999, p. 191-192

- Esfuerzo de desgarro en las horquillas:

$$\tau_{DESGARRO} = \frac{F}{A_{DESGARRO}} \quad \text{Donde:} \quad A_{DESGARRO} = 4 \times Lh \times eh = 645.16 \text{mm}^2$$

$$\tau_{DESGARRO \text{ HORQUILLAS}} = 6.72 \text{MPa}$$

Asumiendo que el factor por falla de fatiga es 2, el esfuerzo máximo por fatiga en las horquillas sería $\tau_{MAX} = 13.44$ MPa. El límite elástico de las horquillas (acero SA-36) es 250 MPa, por lo tanto el factor de seguridad del eje es:

$$N = \frac{Sy}{\tau_{MAX}} = 18.6$$

- Esfuerzo de desgarro en el eslabón:

$$\tau_{DESGARRO} = \frac{F}{A_{DESGARRO}} \quad \text{Donde:} \quad A_{DESGARRO} = 4 \times Le \times ee = 706.76 \text{mm}^2$$

$$\tau_{DESGARRO \text{ ESLABÓN}} = 6.13 \text{MPa}$$

Asumiendo que el factor por falla de fatiga es 2, el esfuerzo máximo por fatiga en el eslabón sería $\tau_{MAX} = 12.26$ MPa. El límite elástico del eslabón (acero SA-36) es 250 MPa, por lo tanto el factor de seguridad del eje es:

$$N = \frac{Sy}{\tau_{MAX}} = 20.4$$

- Esfuerzo cortante en el pasador:

$$\tau_{CORTANTE} = \frac{F}{A_{CORTANTE}} \quad \text{Donde:} \quad A_{CORTANTE} = \frac{2\pi\phi^2}{4} = 981.75\text{mm}^2$$

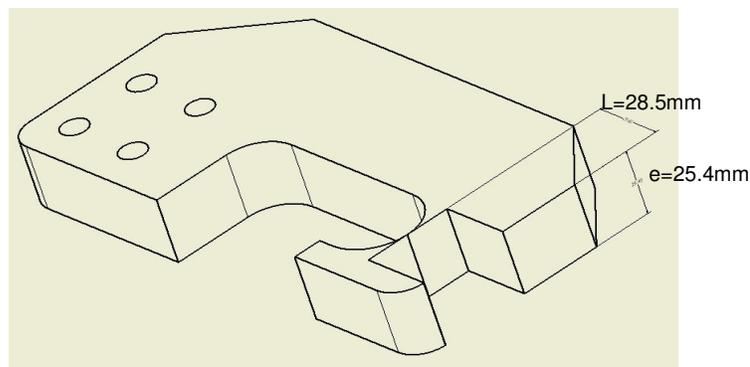
$$\tau_{CORTANTE \text{ PASADOR}} = 4.41\text{MPa}$$

Asumiendo que el factor por falla de fatiga es 2, el esfuerzo máximo por fatiga en el pasador sería $\tau_{MAX} = 8.82 \text{ MPa}$. El límite elástico del pasador (acero AISI 1020) es 207 MPa, por lo tanto el factor de seguridad del eje es:

$$N = \frac{S_y}{\tau_{MAX}} = 23$$

3.4.3 Verificación del sujetador del tubo en c. En la figura 28 se puede observar que sujetador del tubo en C podría fallar por desgarre.

Figura 28. Sujetador del tubo en C



Fuente: (Elaboración propia)

La fuerza aplicada será la máxima desarrolla por los cilindros ($F=4333\text{N}$). El material de del sujetador del tubo en C es acero SA-36.

$$\tau_{DESGARRO} = \frac{F}{A_{DESGARRO}}$$

Donde: $A_{DESGARRO} = 2 \times L \times e = 1310.6 \text{mm}^2$

$$\tau_{DESGARRO \text{ SUJETADOR}} = 3.3 \text{MPa}$$

Asumiendo que el factor por falla de fatiga es 2, el esfuerzo máximo por fatiga en el sujetador del tubo en C sería $\tau_{MAX} = 6.6 \text{MPa}$. El límite elástico del sujetador (acero SA-36) es 250 MPa, por lo tanto el factor de seguridad del eje es:

$$N = \frac{S_y}{\tau_{MAX}} = 37.8$$

Los factores de seguridad de las horquillas, eslabón y pasador, para los cuatro puntos donde existe este tipo de sistema en la máquina dobladora, así como para el sujetador del tubo en C, son los suficientemente altos para afirmar que estas piezas no presentan riesgo de falla, incluso si se doblara tubería de mayores diámetros y espesores.

3.5 SISTEMA HIDRÁULICO DE LA MÁQUINA DOBLADORA

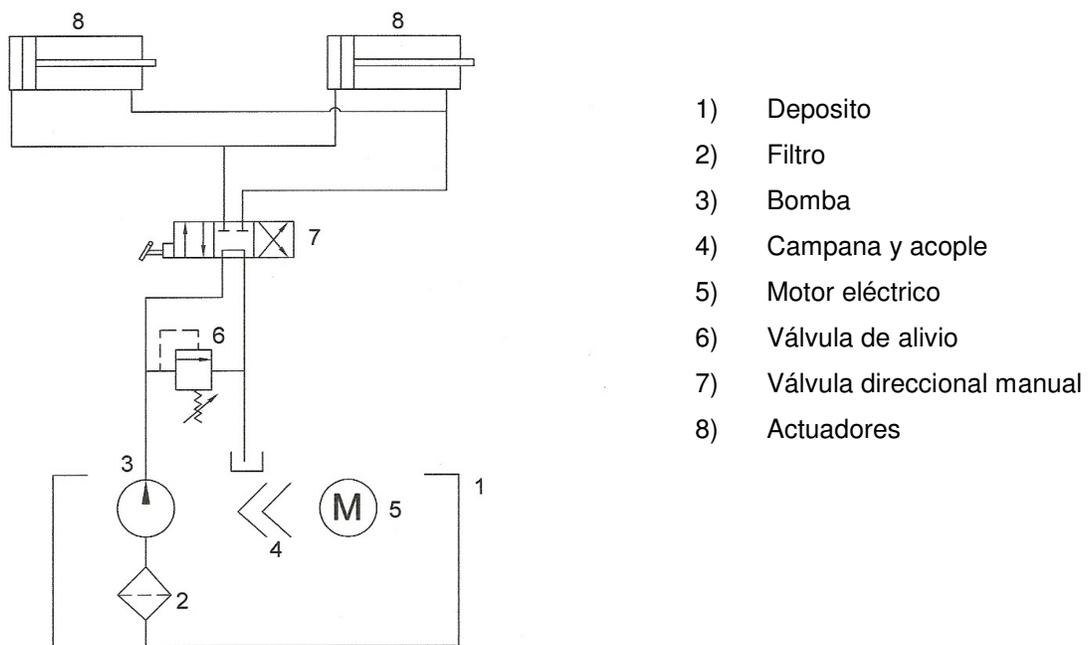
Para la consecución del sistema hidráulico de la máquina dobladora se visitaron cuatro empresas de la ciudad dedicadas a la fabricación de este tipo de equipos, de las cuales se seleccionó la más conveniente en cuanto a la correcta satisfacción de los requerimientos de la máquina y los costos del equipo.

El proveedor del sistema hidráulico se encargó de proporcionar los siguientes componentes:

- Unidad hidráulica con motor eléctrico trifásico a 220 Voltios de 1 HP, 1800 RPM.; bomba de 1 GPM, campana, acople, tanque de aceite y mando hidráulico 3/8" con palanca.
- Dos cilindros hidráulicos con diámetro interior de la camisa de 40mm, diámetro del vástago de 25mm y carrera de 331mm. Ver anexo A.

El plano hidráulico del sistema adquirido se muestra en la figura 29.

Figura 29. Plano hidráulico



Fuente: (Elaboración propia)

4. MATERIALES

La selección de los materiales con los que se construye cada una de las partes de la máquina, se definen a continuación según la función que desempeñen.

La parte estructural de la máquina, o sea la mesa que contiene la bomba y el tanque de aceite, y que sostiene el mecanismo de la dobladora se construyó en acero estructural, ya que es un material resistente y comercial, y que satisface los requerimientos de soporte al resto de la máquina. El marco de la estructura se ensambló en perfil de ángulo de 2" x 2" x 1/4", y las tapas laterales y frontales en láminas de acero SA-36 de 3/16" de espesor.

Las zapatas deslizantes se fabricaron en bronce y nylon por ser materiales antiadherentes, propiedad indispensable para permitir el deslizamiento del tubo durante su doblado sin afectar el acabado superficial de la curva. La razón por la cual no se utiliza sólo nylon, a pesar que es más antiadherente y económico que el bronce, es debido a que su resistencia de carga es bastante baja (30MPa aproximadamente) entonces el tubo podría aplastarlo o deformarlo rápidamente. Por esta razón se instaló una pequeña pieza de bronce que también es buen deslizante pero con mayor resistencia a la carga (90MPa aproximadamente).

En el eje principal se usan bujes en forma de casquillos de bronce fosforado entre las piezas que tienen movimiento entre sí, para reducir la fricción y disminuir el desgaste abrasivo que se genera en las partes por el contacto entre dos piezas de acero.

A pesar de que el bronce y el nylon tienen cualidades de antifricción, mejoran su funcionamiento y aumentan su durabilidad si adicionalmente se agregan grasas o lubricantes en spray.

El dado formador se maquinó a partir de un disco de platina de acero SA 516^º70 de espesor 2 ½” debido a que se contaba con un retal de esta lámina y en este espesor; y las propiedades de este material son bastante buenas (350MPa aproximadamente) inclusive mayores a las del AISI 1040 que sería el material en forma de eje a utilizar sino se contara con la lámina utilizada.

Para los ejes pasadores conectores de los cilindros hidráulicos con las piezas a las que se les transmite la fuerza hidráulica, se utilizó eje redondo AISI 1020 de 1” de diámetro por ser un material que ofrece seguridad debido a su buena resistencia a los esfuerzos cortantes.

El eje principal es el que soporta la combinación de las diferentes cargas, pues este funciona como pasador principal del mecanismo y se encarga de unir los dos submecanismos de cada uno de los cilindros hidráulicos; por su trabajo fue fabricado en acero AISI 4140 por su alta resistencia debido a su porcentaje de carbono y aprovechando su porcentaje de aleación de Cromo que mejora la ductilidad y resistencia al desgaste.

Los bujes separadores de los brazos y demás piezas cilíndricas fueron fabricadas en ejes de acero AISI 1020 debido a su buena relación costo beneficio, pues es más económico que otros aceros con mayor porcentaje de carbono como el AISI 4140 o el AISI 1040, pero conserva una buena resistencia para soportar las cargas de la máquina y es de fácil mecanizado.

Para el resto de las partes es suficiente utilizar acero estructural SA-36 que por sus propiedades mecánicas garantizan la resistencia de toda la máquina. Por disponibilidad en el momento de la fabricación de la dobladora se utilizó acero SA-516^º70 (370MPa aproximadamente) que posee una resistencia mucho mayor al SA-36 (200MPa aproximadamente).

Las tuercas y tornillos utilizados fueron seleccionados de la oferta comercial, todos UNS (Unified National Standard) grado 5 y rosca ordinaria (UNC), verificando en sus propiedades la resistencia según su diámetro.

En la tabla 8 se muestran las diferentes partes de la máquina dobladora y los respectivos materiales utilizados en la fabricación de las mismas.

Tabla 8. Lista de partes y materiales

NOMBRE PLANO	PLANO Nº	MATERIAL BASE
Soporte de base 1	A-1	Acero SA-516 ⁹ 70
Eje de base 1	A-2	Acero AISI 1020
Platina superior soporte	B-1	Acero SA-516 ⁹ 70
Platina inferior soporte	B-2	Acero SA-516 ⁹ 70
Eje soporte nylon y bronce	B-3	Acero AISI 1020
Brazo superior	C-1	Acero SA-516 ⁹ 70
Separadores de brazo	C-2	Acero AISI 1020
Brazo inferior	C-3	Acero SA-516 ⁹ 70
Platina separadora de brazos	C-4	Acero SA-516 ⁹ 70
Eje gato brazos	C-5	Acero AISI 1040
Eje excéntrico	D	Acero AISI 1020
Eje principal	E-1	Acero AISI 4140
Acoples eje principal con Dado	E-2	Acero AISI 1020
Dado	F-1	Acero SA-516 ⁹ 70
Sujetador del tubo en C	F-2	Acero SA-516 ⁹ 70
Superior pasador	G-1	Acero AISI 1020
Eje pasador	G-2	Acero AISI 1020
Tope	n/a	Arandela comercial de 3/4"
Platina frontal soporte	H-1	Acero SA-516 ⁹ 71
Platina trasera soporte	H-2	Acero SA-516 ⁹ 71
Tubo cuadrado	H-3	Acero SA 36
Platina soporte izquierdo	I-1	Acero SA-516 ⁹ 71
Buje soporte izquierdo	I-2	Acero AISI 1020
Nylon	J-1	Nylon
Bronce	J-2	Bronce fosforado
Base nylon y bronce	J-3	n/a
Eje dado	K	Acero AISI 1020
Buje de bronce	L	Bronce fosforado
Separadores de eje gato	M	Acero AISI 1020
Estructura	n/a	Acero SA-36

Fuente: (Elaboración propia)

4.1 COSTOS DE FABRICACIÓN

Durante el diseño y la construcción de la máquina dobladora se incurrieron en diferentes costos, tales como compra del sistema hidráulico, mano de obra de mecanizados y soldadura, compra de materiales, entre otros.

Los costos se especifican en la tabla 9.

Tabla 9. Costos de fabricación de la máquina dobladora

Descripción	Costo
Platinas de acero, ejes de acero, tornillería, bloque de bronce, bloque de nylon y llantas	\$ 600.000
Mano de obra de soldadura y mecanizado	\$ 600.000
Sistema hidráulico	\$ 2.827.922
Acoples y mangueras del sistema hidráulico	\$ 107.000
Aceite hidráulico Shell Tellus S 68	\$ 137.000
Pintura	\$ 80.000
Cables y accesorios para conexiones eléctricas	\$ 120.000
Tubería para ensayos de dobléz	\$ 50.000
TOTAL	\$ 4.521.922

Fuente: (Elaboración propia)

5. ENSAMBLE Y PRODUCTO FINAL

Las piezas que componen la máquina dobladora se maquinaron en un taller de mecanizado de la ciudad, que fue seleccionado por su gran variedad de máquinas y por el bajo costo de la mano de obra, a partir de la lista de partes proporcionada y los planos realizados en Autodesk Inventor 2009, ver anexo C y anexo D.

En este lugar también se realizó el ensamble de la máquina y los ensayos de doblado de tubos, a partir de lo cual se redactó el manual de operación y mantenimiento de la máquina que se encuentra disponible en el anexo B.

En la tabla 10 se muestran las imágenes tomadas durante el proceso de ensamble, y en las figuras 30, 31 y 32 se muestran imágenes de la máquina dobladora totalmente ensamblada.

Tabla 10. Fotos y descripción del ensamble de la máquina dobladora

<p>FOTO 1. Estructura que contiene la bomba y el tanque de aceite, y que sostiene el mecanismo de la dobladora</p>	<p>FOTO 2. Conexión eléctrica del motor de la bomba a 220Volios trifásicos</p>	<p>FOTO 3. Conexión eléctrica del guardamotor de 4 – 6 Amperios</p>
		
<p>FOTO 4. Instalación del mando hidráulico a la compuerta frontal</p>	<p>FOTO 5. Instalación de las mangueras hidráulicas al sistema hidráulico</p>	<p>FOTO 6. Ubicación de los bujes de bronce en el soporte con tubo cuadrado</p>
		

FOTO 7. Ubicación del soporte gato izquierdo



FOTO 8. Ensamble del eje principal con acoples



FOTO 9. Posicionamiento de los brazos principales



FOTO 10. Ubicación del eje principal



FOTO 11. Ensamble dado con el eje principal



FOTO 12. Posicionamiento del eje del dado



FOTO 13. Ubicación del eje principal



FOTO 14. Ensamble del sujetador del tubo en C con el dado



FOTO 15. Ensamble de los sistemas horquillas, eslabón, pasador



FOTO 16. Ensamble de los sistemas horquillas, eslabón, pasador



FOTO 17. Ubicación de los cilindros hidráulicos



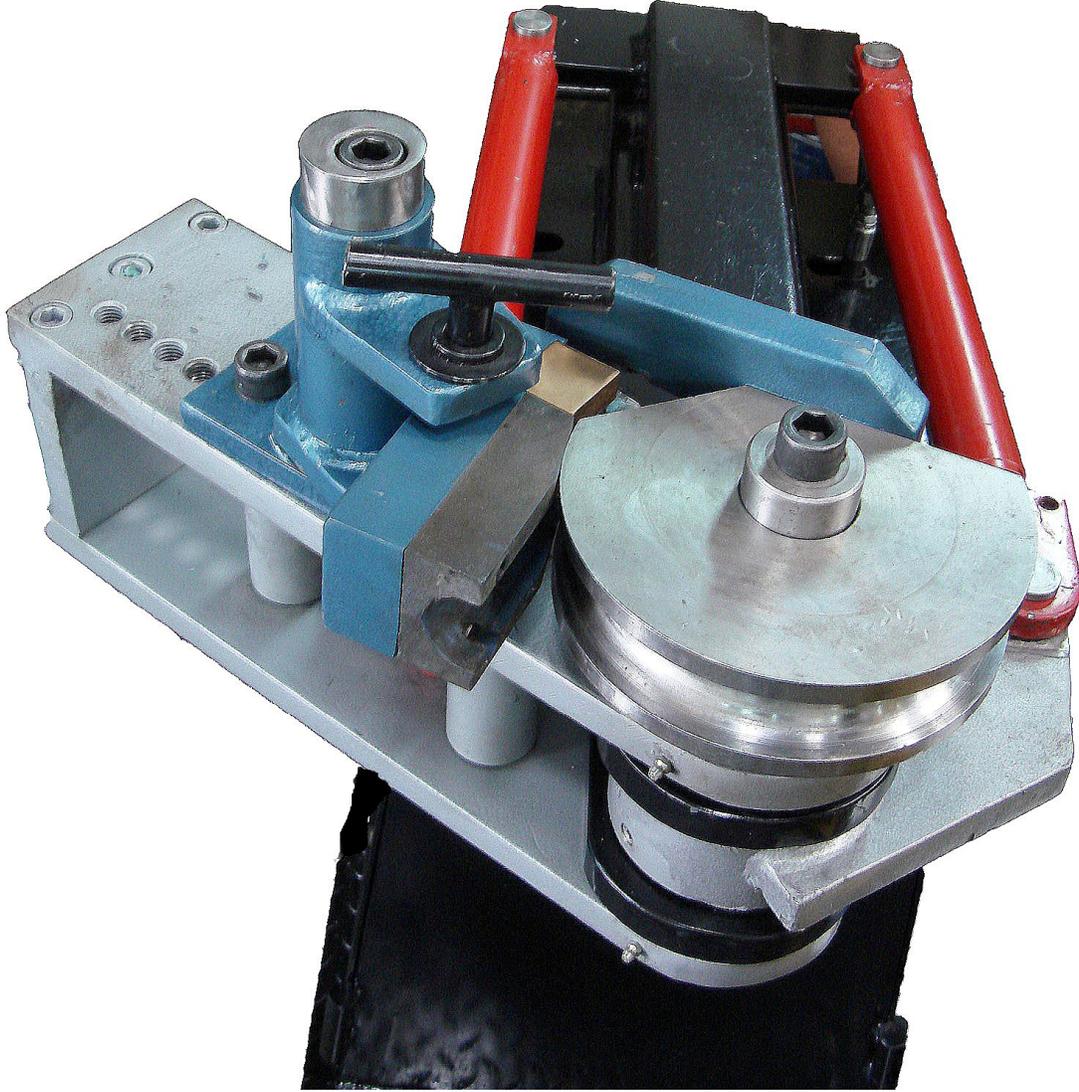
FOTO 18. Ubicación de los cilindros hidráulicos en las horquillas e instalación de las mangueras hidráulicas



<p>FOTO 19. Ubicación de la base 1, que varía según el diámetro de tubo a doblar, para esto el brazo tiene diferentes perforaciones que permiten mover su ubicación</p>	<p>FOTO 20. Ubicación de la base del soporte nylon y bronce</p>	<p>FOTO 21. Ensamble del eje excéntrico con base del soporte nylon y bronce y base 1</p>
		
<p>FOTO 22. Ensamble del soporte nylon y bronce mediante pasador.</p>	<p>FOTO 23. Llenado del tanque de aceite</p>	<p>FOTO 24. Máquina completamente ensamblada y en proceso de doblado</p>
		

Fuente: (Elaboración propia)

Figura 30. Foto 25: Máquina dobladora totalmente ensamblada (vista superior)



Fuente: (Fotografía propia)

Figura 31. Foto 26: Máquina dobladora totalmente ensamblada vista lateral (prueba de funcionamiento de los cilindros hidráulicos)



Fuente: (Fotografía propia)

Figura 32. Foto 27: Máquina dobladora totalmente ensamblada y en funcionamiento



Fuente: (Fotografía propia)

6. RECOMENDACIONES

La máquina, fue construida específicamente para doblar tubería circular de una pulgada de diámetro y de 2.5mm de espesor, sin embargo se podría construir un juego de piezas, dado conformador y zapatas deslizantes de nylon y bronce, para doblar tubería de diámetros y espesores diferentes e incluso tubería rectangular u otros perfiles estructurales; ya que las partes restantes de la máquina han sido diseñadas para adaptarse fácilmente a diferentes dados y zapatas deslizantes.

La dobladora podría automatizarse de tal manera que se le introduzca el ángulo de doblez deseado y ella misma realice la carrera necesaria de los vástagos de los cilindros y los retorne nuevamente a su posición inicial. Para tal fin sería necesario reemplazar el mando hidráulico manual por una válvula solenoide eléctrica y un sistema de control simple controlado por micro suiches u otro tipo de sensores.

Para altos volúmenes de producción de curvas se le podría instalar a la maquina un sistema de auto lubricación en las áreas del dado y las zapatas de nylon y bronce que tienen contacto deslizante con el tubo en el momento de doblar, incluyendo una pequeña bomba y recipiente para la recirculación del lubricante.

7. CONCLUSIONES

Con el diseño realizado para la máquina dobladora de tubería redonda, las curvas fabricadas cumplen con las expectativas iniciales, dado que con este mecanismo se pueden realizar varias curvas, de 0° a 180°, en un mismo tubo en diferentes direcciones, disminuyendo la cantidad de empates en la fabricación de una estructura deseada.

El sistema eléctrico, el sistema hidráulico y la tornillería de la máquina dobladora están compuestos totalmente por partes comerciales, permitiendo que en posibles fallas o mantenimientos de la máquina se puedan realizar cambios de repuestos de una manera ágil, aumentando la mantenibilidad de la misma.

Los pasadores y ejes de la máquina fueron diseñados y mecanizados en materiales y dimensiones de fácil consecución en el mercado, por si se necesitara el reemplazo de alguno de éstos durante la vida útil de la dobladora.

La máquina fue construida con piezas en materiales más resistentes a los necesarios para soportar los esfuerzos mecánicos calculados para doblar tubería estructural de una pulgada de diámetro, y un espesor de 2.5mm; con el fin de permitir su adaptación para doblados de tuberías y perfiles con mayores resistencias mecánicas.

La fuerza producida por el sistema hidráulico, con motor eléctrico de 1HP y con las dimensiones de los cilindros utilizados, genera la fuerza suficiente para el doblado de la tubería seleccionado. Además en las pruebas realizadas se observó que este sistema fue exigido en un tan sólo en 25% de su capacidad máxima; lo que permite que en una posible adaptación, el sistema hidráulico genere la potencia requerida.

Las curvas fabricadas en la máquina dobladora de tubería tienen una buena calidad, no presentan arrugas, grietas ni achataduras significativas; por lo cual satisfacen las necesidades para sus principales usos como estructuras de techo, escaleras, pasamanos, muebles entre otras aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing and Materials. Specification for electric – resistance welded carbon and alloy steel mechanical tubing. ASTM A513, Pennsylvania: ASTM International. P. 949–974.

BEER, Ferdinand P., JOHNSTON, E. Russell y DEWOLF, John T., Mecánica de materiales, 3 ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2001, 790 p.

DOBLADORAS PARA TUBO. División maquinaria. Dobladoras CBC [Online]. Zúñiga, 2008 (Citada: 16 junio 2008).

http://dobladorasparatubo.com/dobladoras_para_tubo.html

DOBLATUBOS. Esquema de medidas para un tubo doblado. Técnicas de doblado de tubos [Online]. Buenos Aires, 2008 (Citada: 16 junio 2008)

<http://www.doblatubos.com.ar/emtd.html>

DOYLE, Lawrance. Proceso de manufactura y materiales para ingenieros. México D.F.: Diana, 1980, 1007 p.

ERDMAN, Arthur G. y SANDOR George N., Diseño de mecanismos: análisis y síntesis, 3 ed. México: Prentice Hall, 1998, 664 p.

EXCO COLOMBIANA. Nuestros procesos. Formado de tubos [Online]. Bogotá, 2007 (Citada: 23 septiembre 2008)

<http://www.exco.com.co/procesos.php?idprocesos=2>

FABRICATING EQUIPMENT COMPANY. Baileigh Bender: RDB-100. Standard Features [Online]. Houston, TX., 2008 (Citada: 10 junio 2008) http://www.fabequip.com/equipment/benders/baileigh/baileigh_rmd-100.htm

FERRASA. Tuberías. Tubería estructural [Documento electrónico]. Medellín, 2005 (Citada: 10 junio 2008) <http://www.ferrasa.com/content.aspx?cid=16>

HIBBELER, R. C., Mecánica de materiales. 3 ed. México D.F.: Pearson, 1997, 854 p.

NORTON, Robert L., Diseño de máquinas, México: Prentice Hall, 1999, 1080 p.

PIPE bending -- Equipment & supplies. EQUIPMENT: Pipe, angle-iron roll bender. En: Welding Magazine. Vol. 81, no 5 (Citada: 25 marzo 2008). http://weldingmag.com/equipment-automation/products/pipe_angleironed_roll_bender_0501/

ORBERG, Eric, JONES, Franklin D. y HORTON, Holbrook L, Manual universal de la técnica mecánica, 2 ed. Barcelona: Labor, 1984. 2446 p.

PRO-TOOLS. Hydraulic Tube & Pipe Benders. HB 302 - 15 Ton One Shot Hydraulic Bender Info / Spec [Online]. Florida, 2008 (Citada: 16 junio 2008) <http://www.pro-tools.com/302.htm>

VAN SANT ENTERPRISES. JD2 Model 3 Tubing Bender. JD2 Model 4 Tubing Bender. JMR Air / Hydraulic Tube Bender. Baileigh RDB-150 Tubing Bender [Online]. Iowa, 2008 (Citada: 16 junio 2008) <http://vansantent.com>

ANEXO B. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA DOBLADORA

 **ANTES DE COMENZAR:** Antes de empezar a utilizar la máquina dobladora de tubería redonda es importante cerciorarse de:

- 1.** El área de ubicación de la máquina debe ser la apropiada para este tipo de trabajo. Es elemental trabajar en un lugar bien iluminado, nunca a la intemperie, así como tampoco en presencia de líquidos o gases inflamables.
- 2.** Contar con los elementos de seguridad industrial necesarios como gafas, guantes y zapatos cubiertos. No utilice ningún tipo de joyería o ropa suelta que pueda quedar enredada en la máquina. Para personas con cabello largo se recomienda llevarlo recogido.
- 3.** Evitar contacto con las partes que estén en movimiento para evadir posibles lesiones personales.
- 4.** Desconectar la máquina de la conexión eléctrica antes de realizar cualquier tipo de movimiento de partes o mantenimiento. El suiche del guarda motor y la palanca del comando hidráulico deben estar en la posición de apagado al momento de reconectar la máquina a la conexión eléctrica.
- 5.** Cuando conecte la máquina asegúrese de que todas las partes que entrarán en movimiento estén libres de obstrucciones.
- 6.** Nunca deje la máquina funcionando desatendida. No se retire hasta que ésta pare por completo.

7. Al trabajar con tubería muy larga sopórtela en su extremo libre.
8. No doble tubería con características diferentes de la especificada para ésta máquina.
9. Tener cuidado al mover cualquier parte de la máquina, ya que algunas, como el dado formador, pueden ser extremadamente pesadas.
10. Al apagar la máquina guarde por completo los vástagos de los cilindros para evitar desgaste en los mismos y no afectar el sello con los empaques.

⚠️ SUMINISTRO DE ELECTRICIDAD: La máquina dobladora está diseñada para funcionar a 220 voltios trifásico, operar la máquina a voltajes diferentes puede incrementar el riesgo de daños, incendios y lesiones personales.

⚠️ INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN:

1. Verificar que los accesorios de doblado estén en la posición correcta, tales como el dado formador y las zapatas deslizantes.
2. Chequear el apriete de todas las partes y la ausencia de objetos sueltos que puedan afectar el correcto funcionamiento de la máquina.
3. Poner el suiche del guardamotor en la posición de encendido “ON”.
4. Rociar el dado formador y las zapatas de nylon y bronce con lubricante en spray.
5. Insertar la tubería a doblar entre el dado y el sujetador del tubo en C.

6. Para comenzar a doblar es necesario accionar la palanca de control del sistema hidráulico en la posición de avance (hacia abajo) hasta alcanzar el ángulo de doblado deseado, teniendo en cuenta la recuperación que puede tener el material de la tubería.
7. Al soltar la palanca de control el doblado se detendrá.
8. Para devolver los brazos, suba la palanca de control, sosteniéndola hasta que se devuelvan los brazos por completo.
9. Al terminar el doblado se debe retirar la tubería del dado formador.

 **MANTENIMIENTO:** Cada vez que utilice la máquina verifique primero que todas las partes del sistema hidráulico de la misma estén en perfecto estado. Si encuentra piezas dañadas, tales como mangueras con fisuras o acoples o tapones con fugas reemplácelas inmediatamente.

De igual manera las partes de la máquina que se encuentren en mal estado, o con señales de desgaste excesivo deben ser reemplazadas antes de comenzar a doblar.

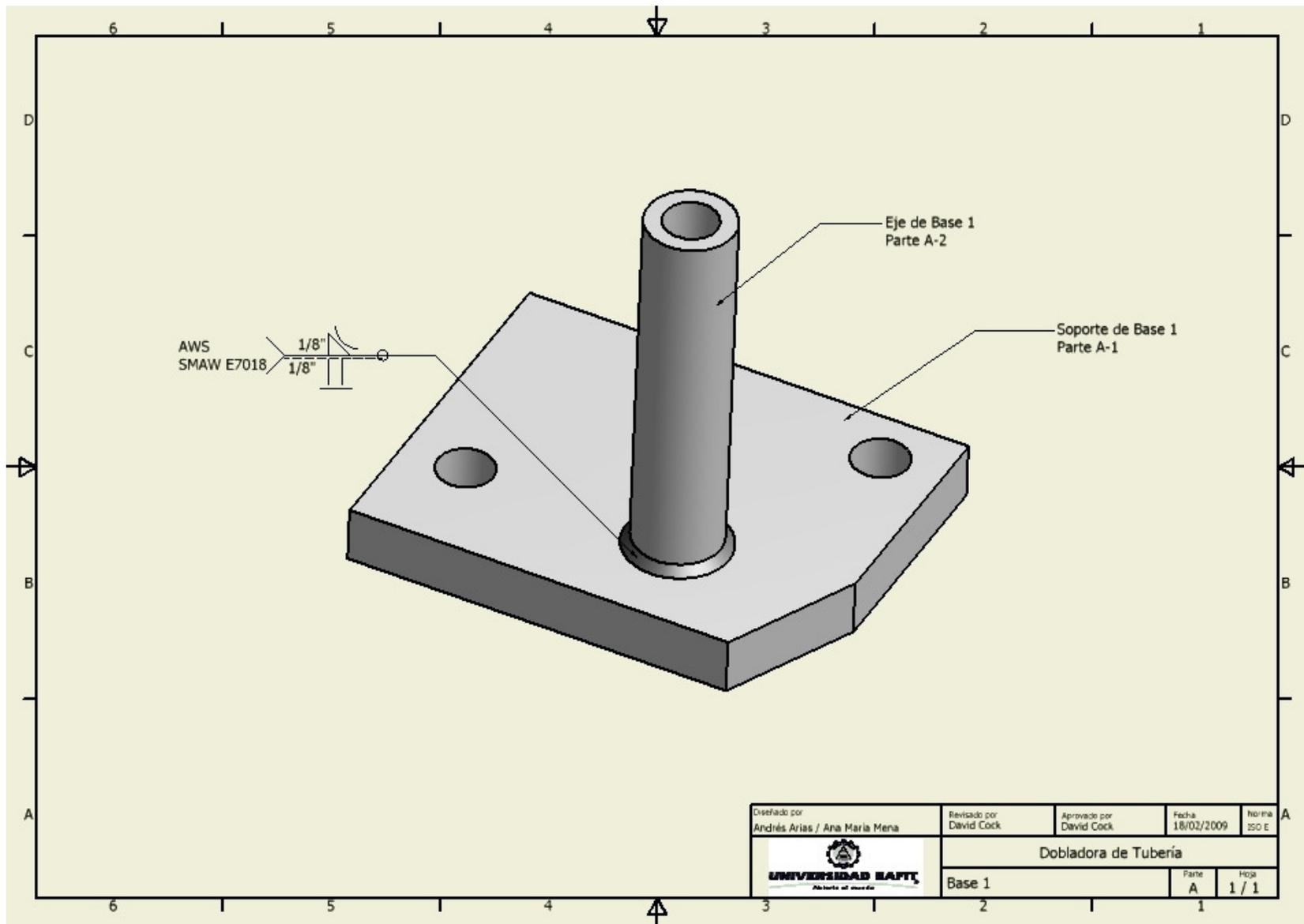
Cada mes se debe lubricar el ensamble del eje principal a través de las graseras.

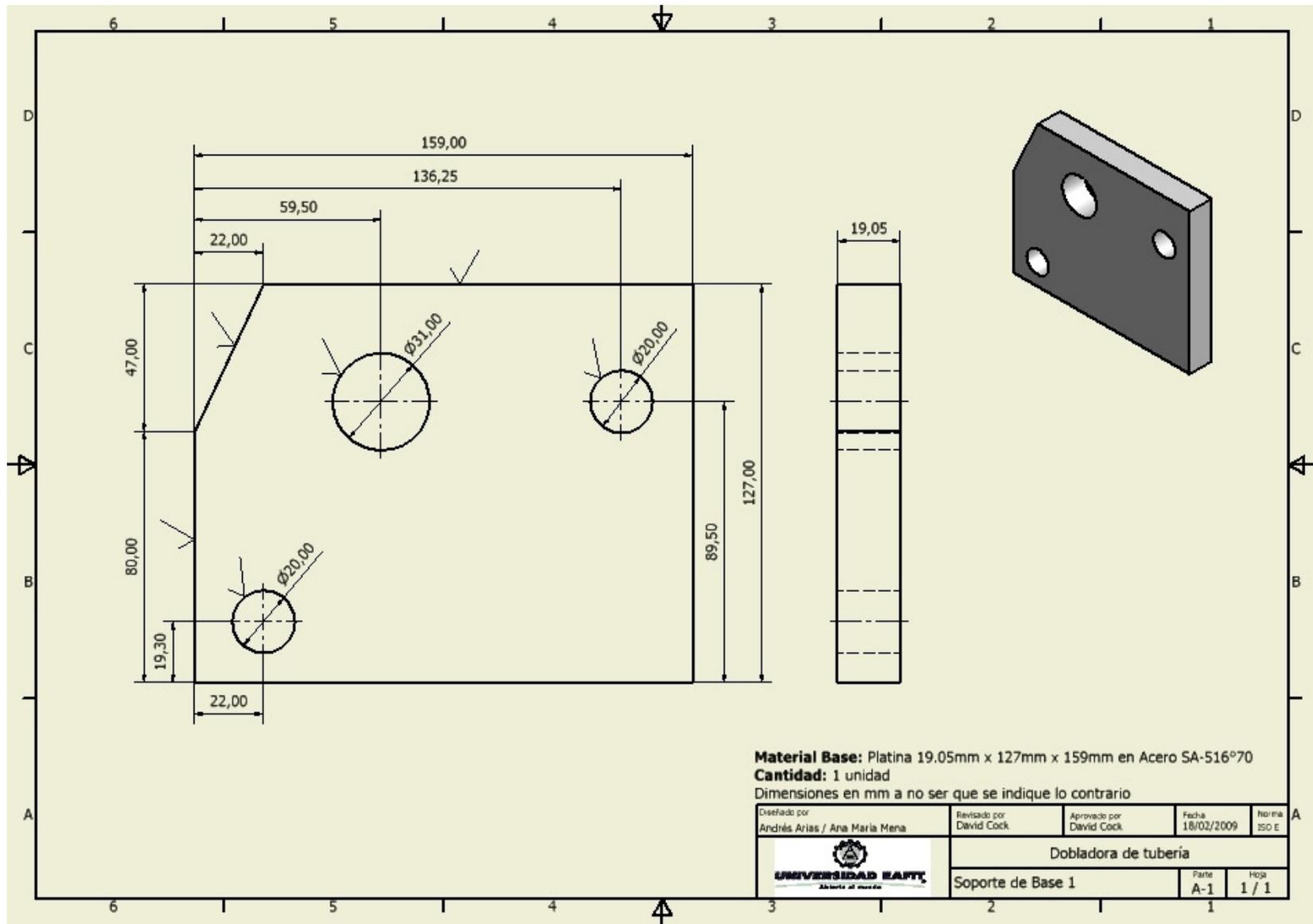
El aceite hidráulico debe ser drenado y reemplazado cada año. Utilice aceite Shell Tellus S 68 u otro equivalente.

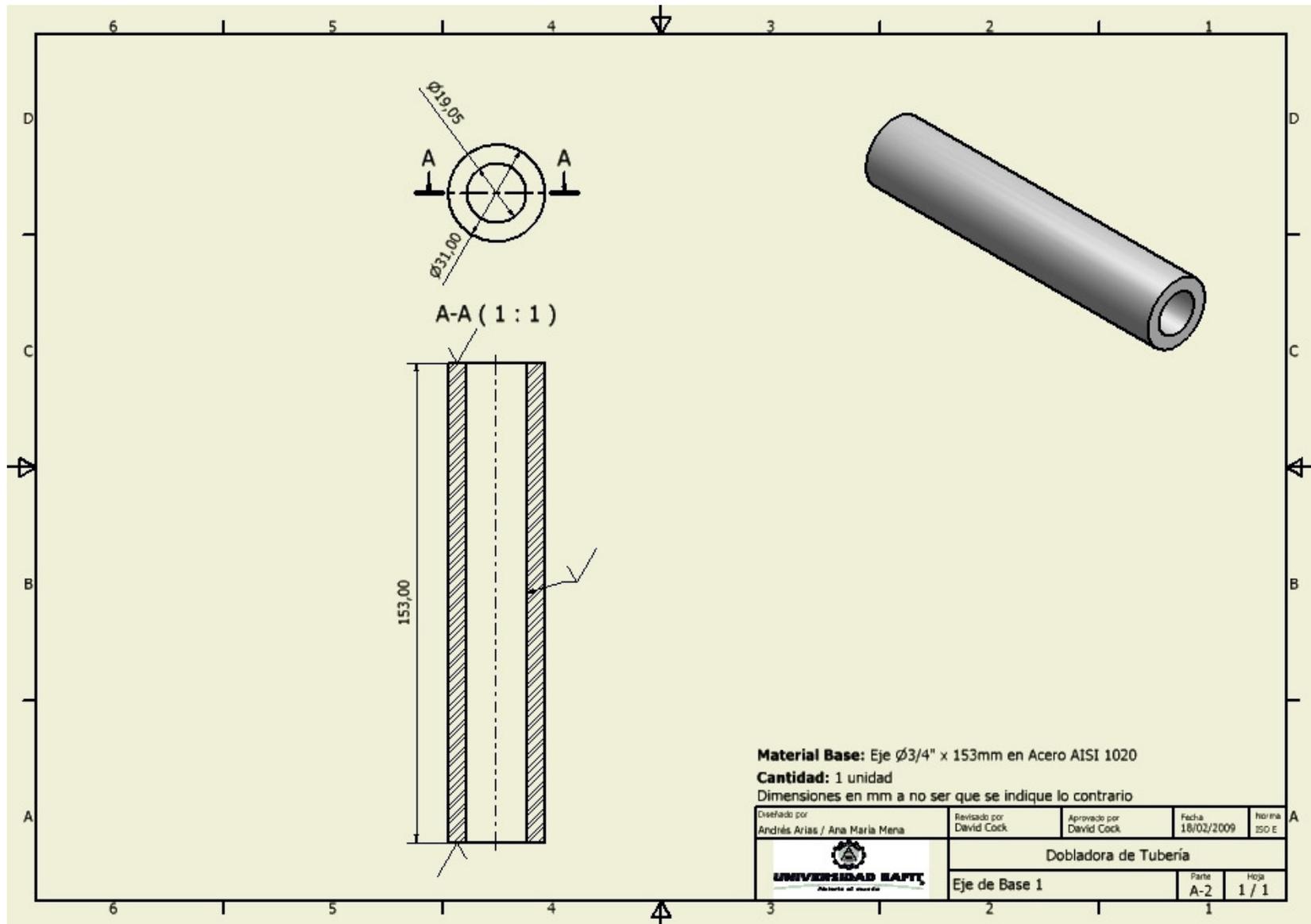
ANEXO C. LISTA DE PARTES DE LA MÁQUINA DOBLADORA

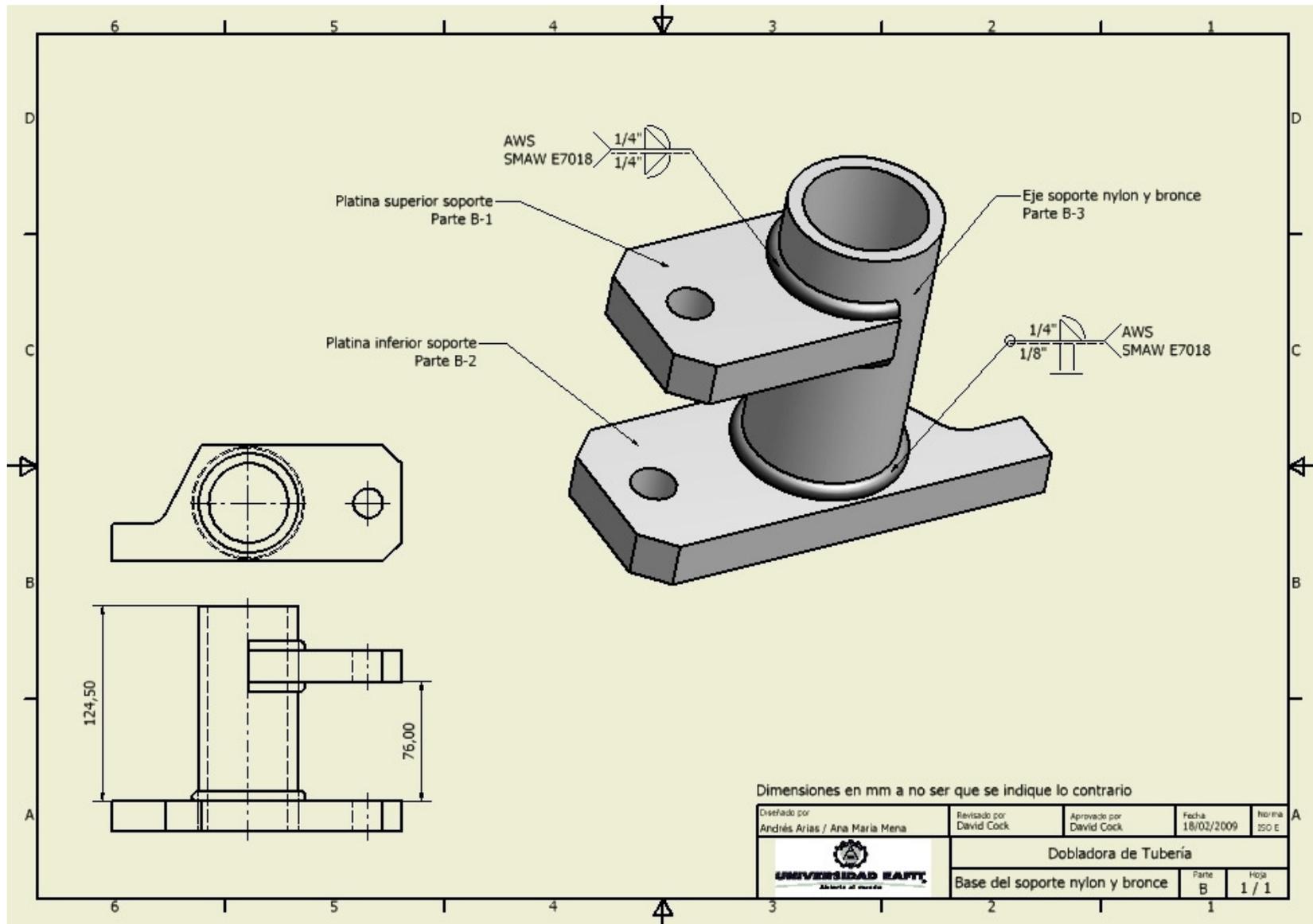
ITEM	NOMBRE PLANO	PARTE
1	Base 1	A
2	Soporte de base 1	A-1
3	Eje de base 1	A-2
4	Base del soporte nylon y bronce	B
5	Platina superior soporte	B-1
6	Platina inferior soporte	B-2
7	Eje soporte nylon y bronce	B-3
8	Brazos principales	C
9	Brazo superior	C-1
10	Separadores de brazo	C-2
11	Brazo inferior	C-3
12	Platina separadora de brazos	C-4
13	Eje gato brazos	C-5
14	Eje excéntrico	D
15	Eje principal con acoples	E
16	Eje principal	E-1
17	Acoples eje principal con Dado	E-2
18	Dado con sujetador	F
19	Dado	F-1
20	Sujetador del tubo en C	F-2
21	Pasador	G
22	Superior pasador	G-1
23	Eje pasador	G-2
24	Tope	n/a
25	Soporte con tubo cuadrado	H
26	Platina frontal soporte	H-1
27	Platina trasera soporte	H-2
28	Tubo cuadrado	H-3
29	Soporte gato izquierdo	I
30	Platina soporte izquierdo	I-1
31	Buje soporte izquierdo	I-2
32	Soporte nylon y bronce	J
33	Nylon	J-1
34	Bronce	J-2
35	Base nylon y bronce	J-3
36	Eje dado	K
37	Buje de bronce	L
38	Separadores de eje gato	M
39	Ensamble final	N

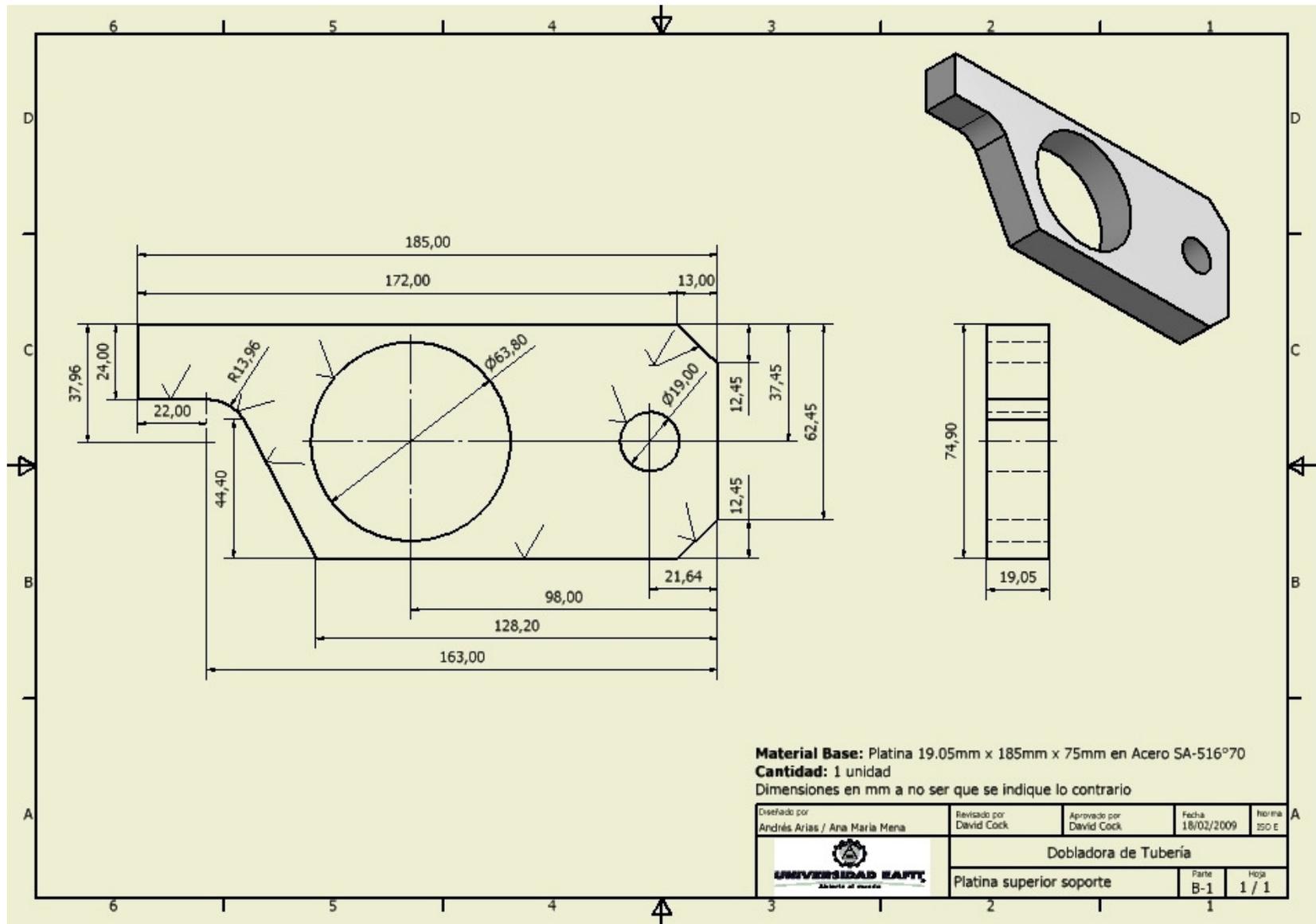
ANEXO D. PLANOS DE LA MÁQUINA DOBLADORA

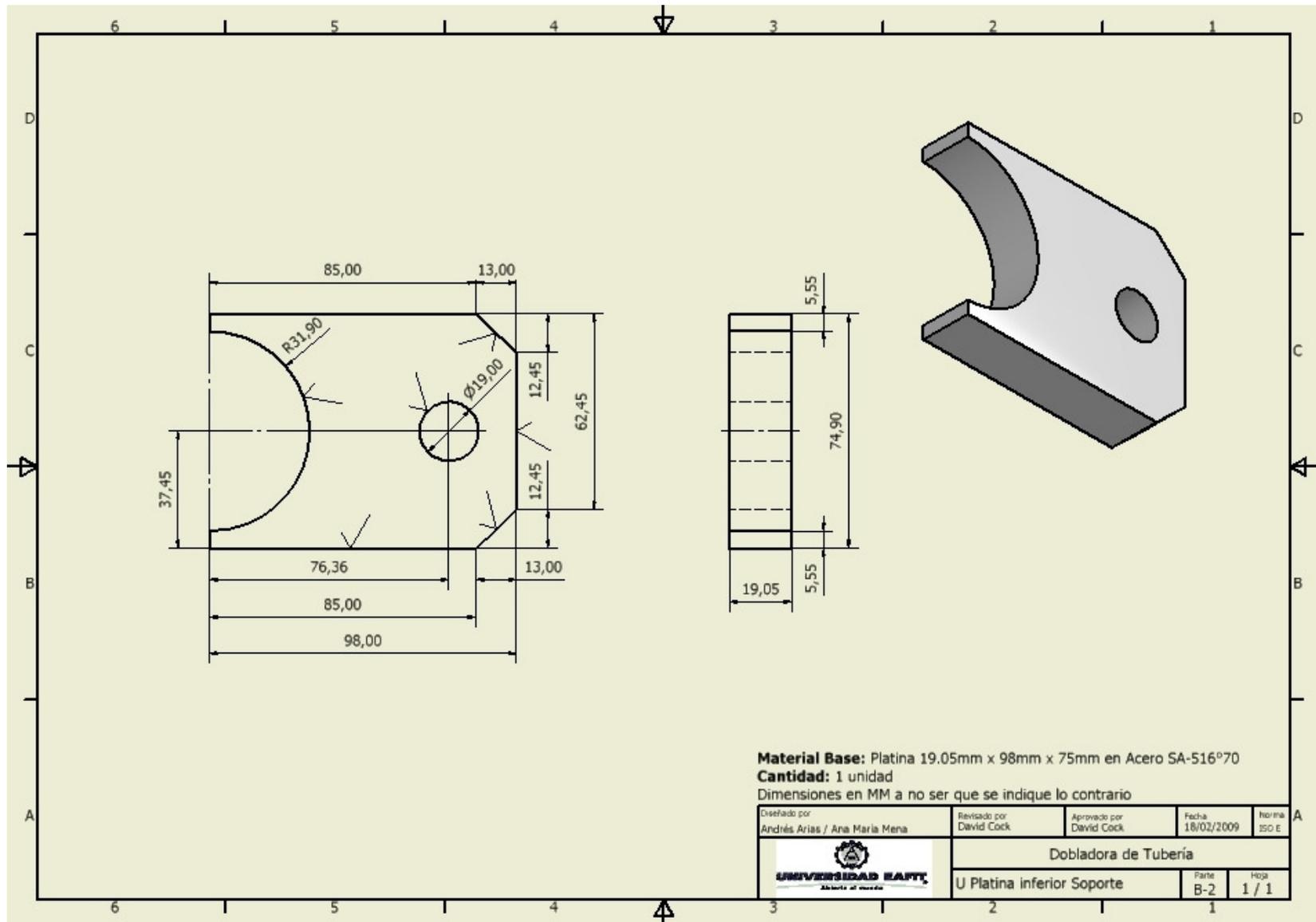


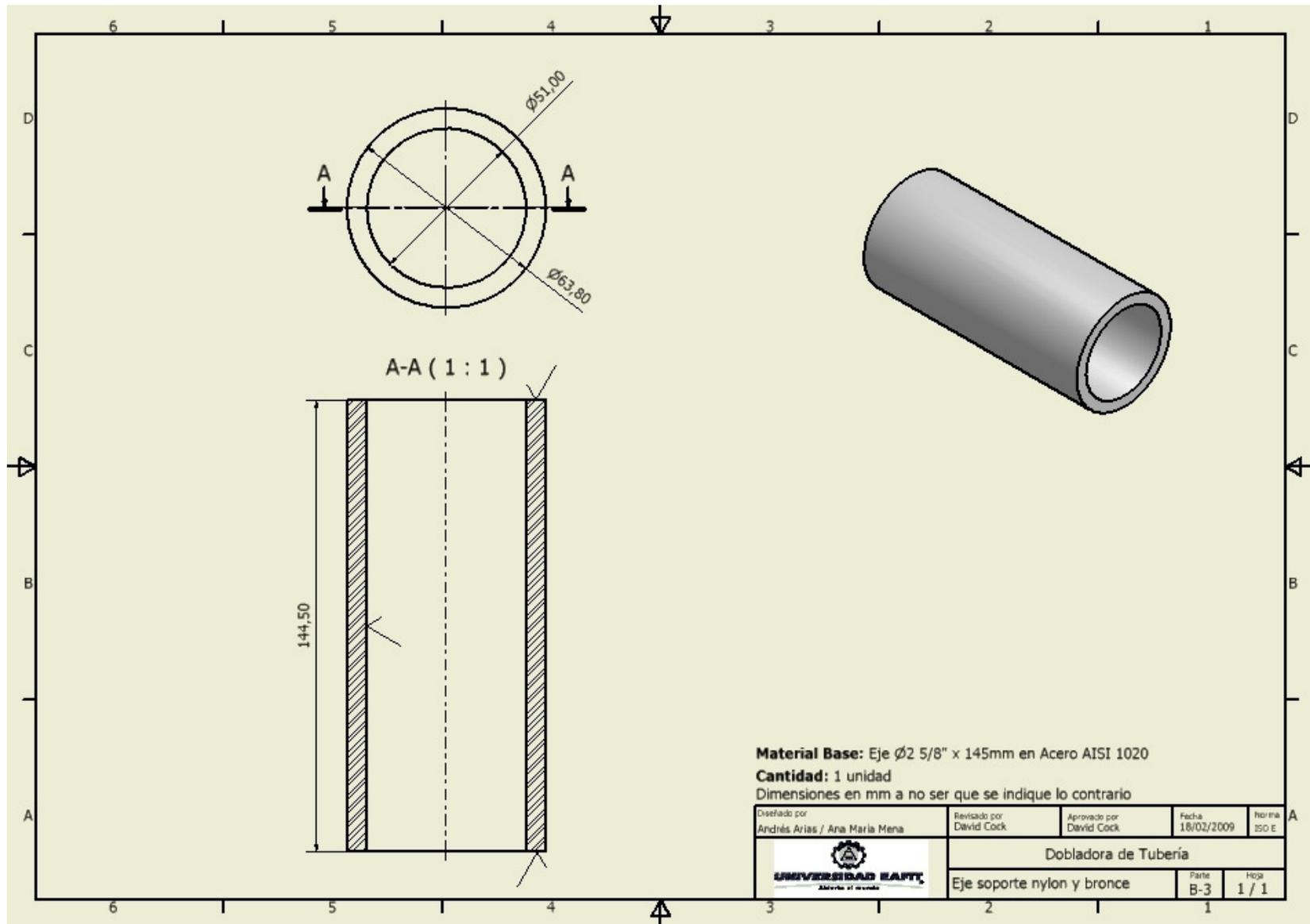


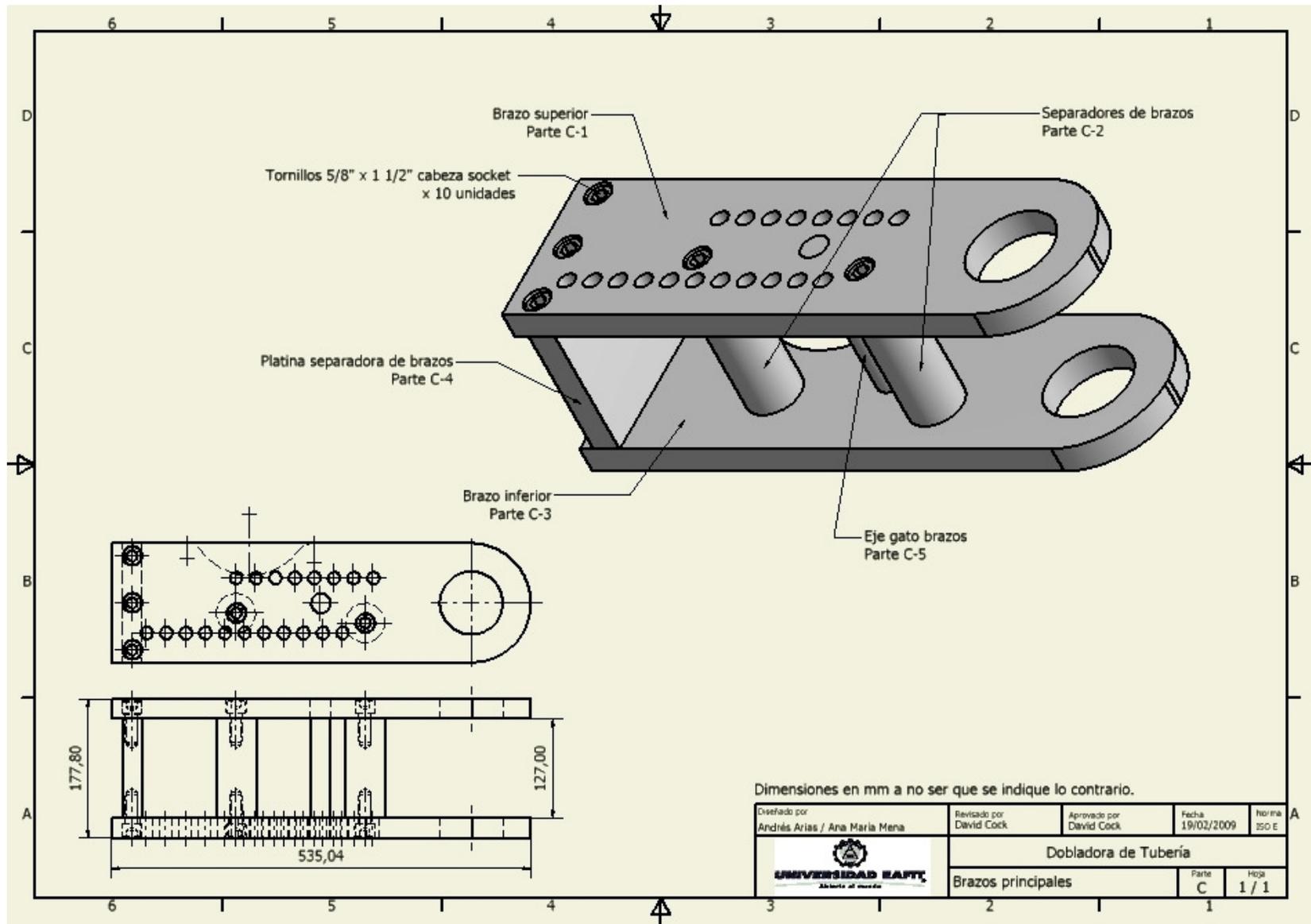


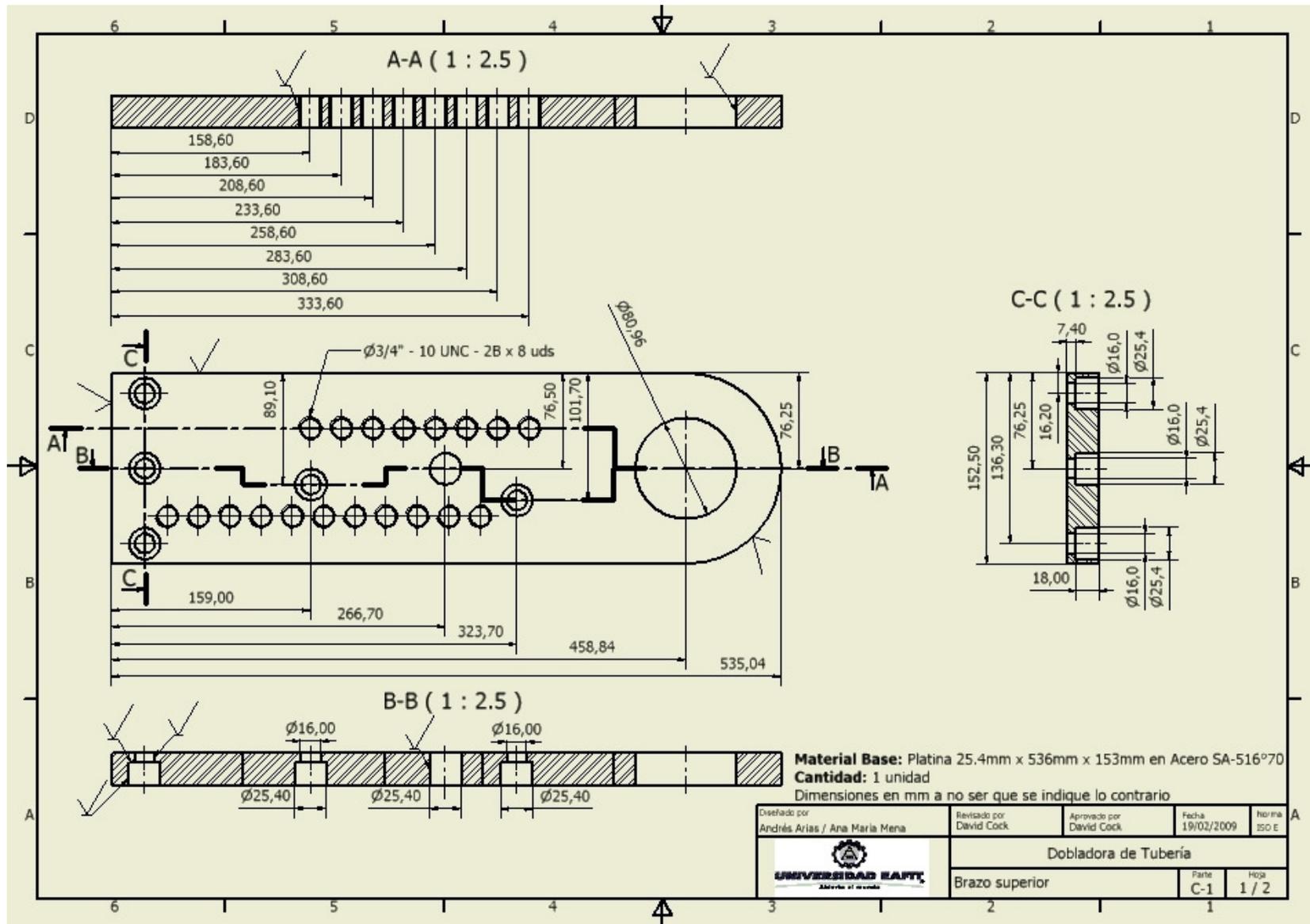


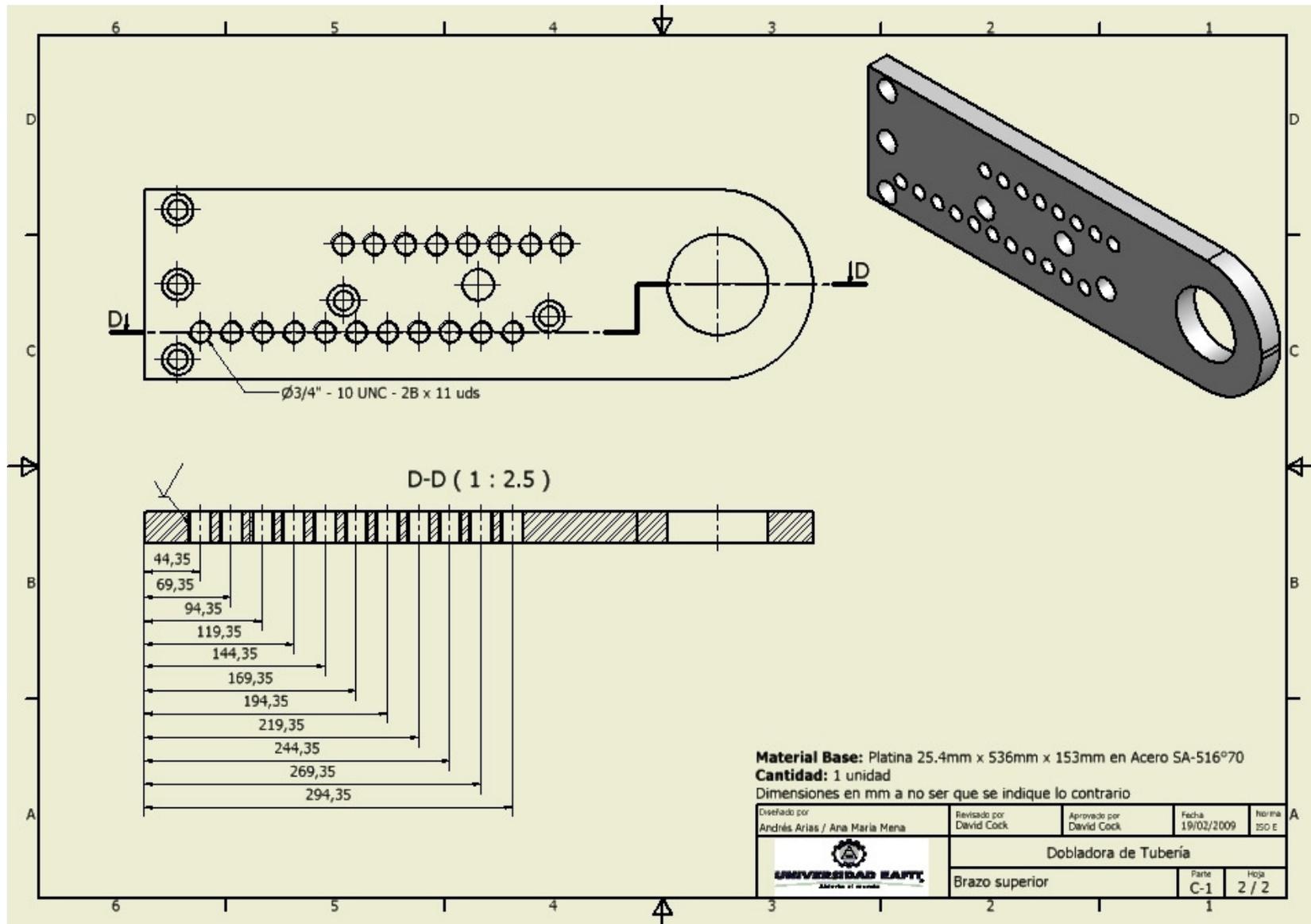


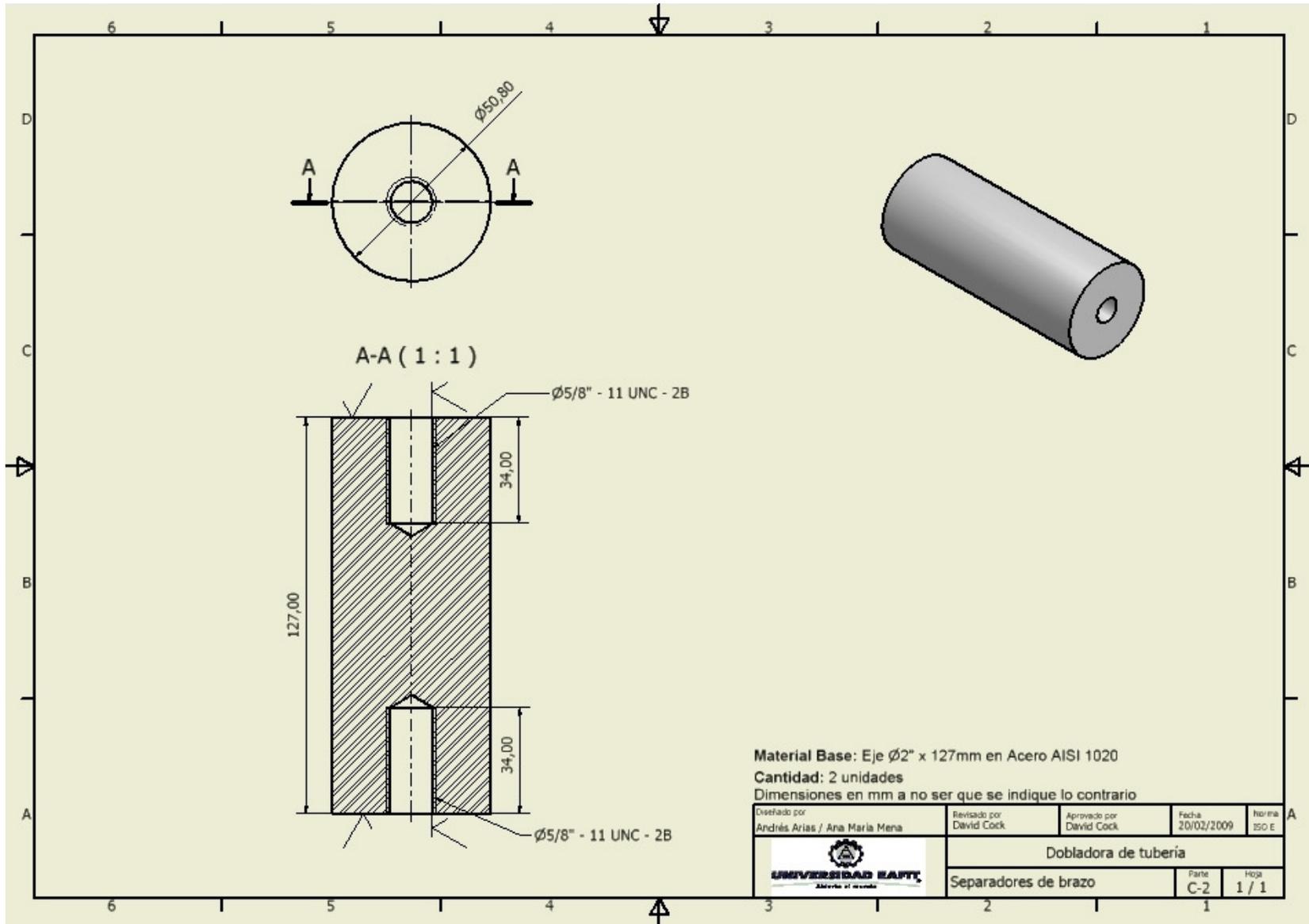


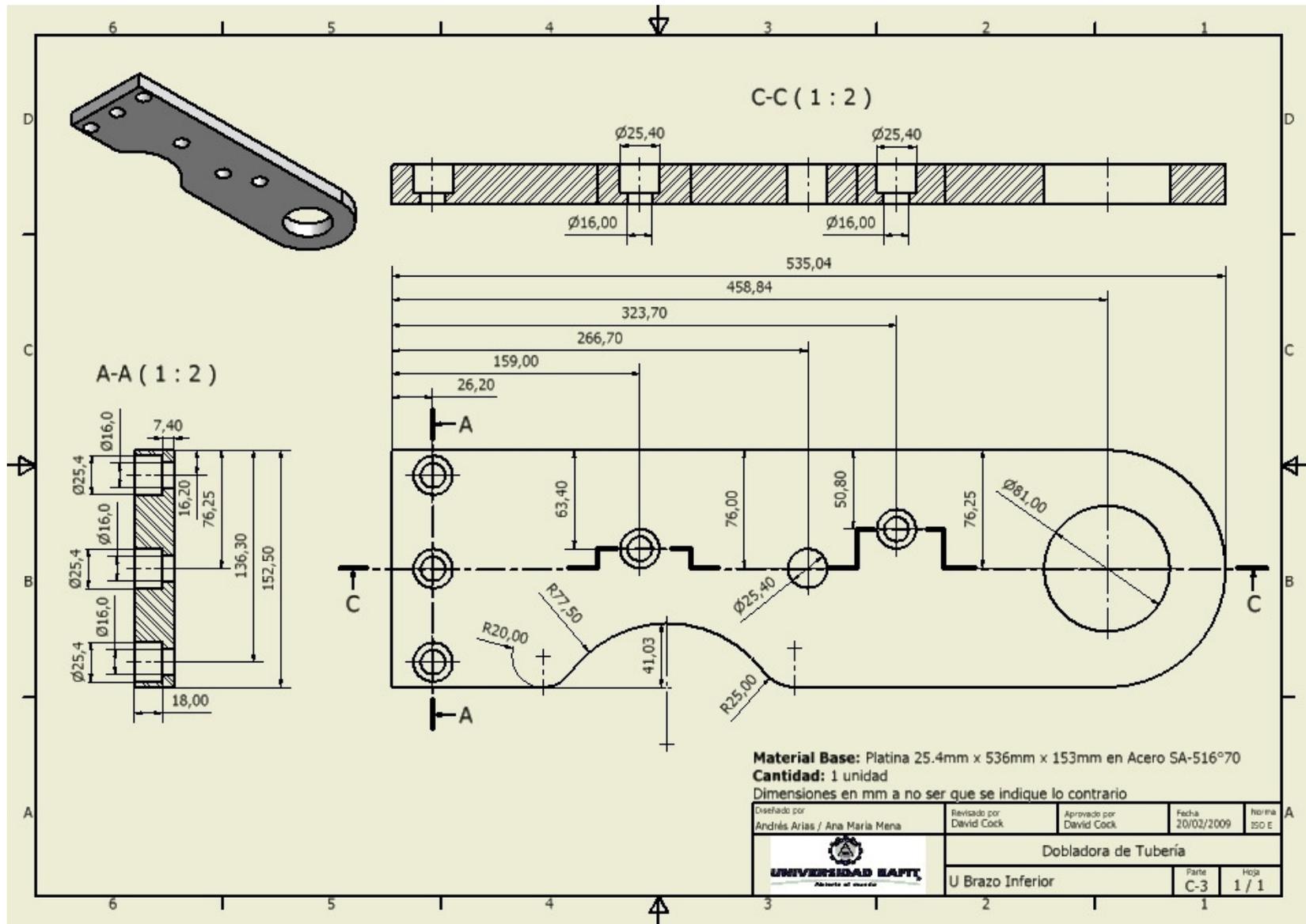


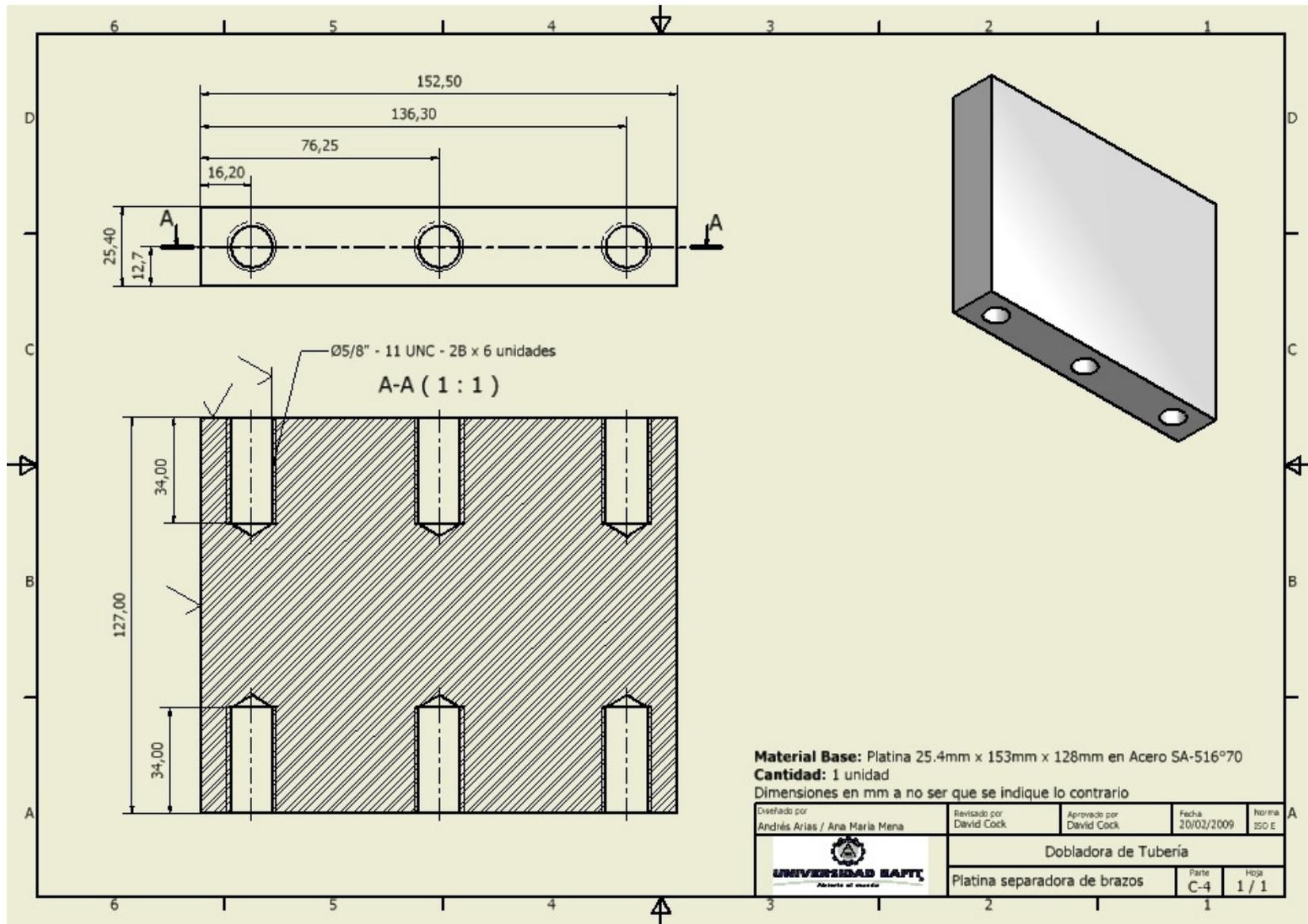


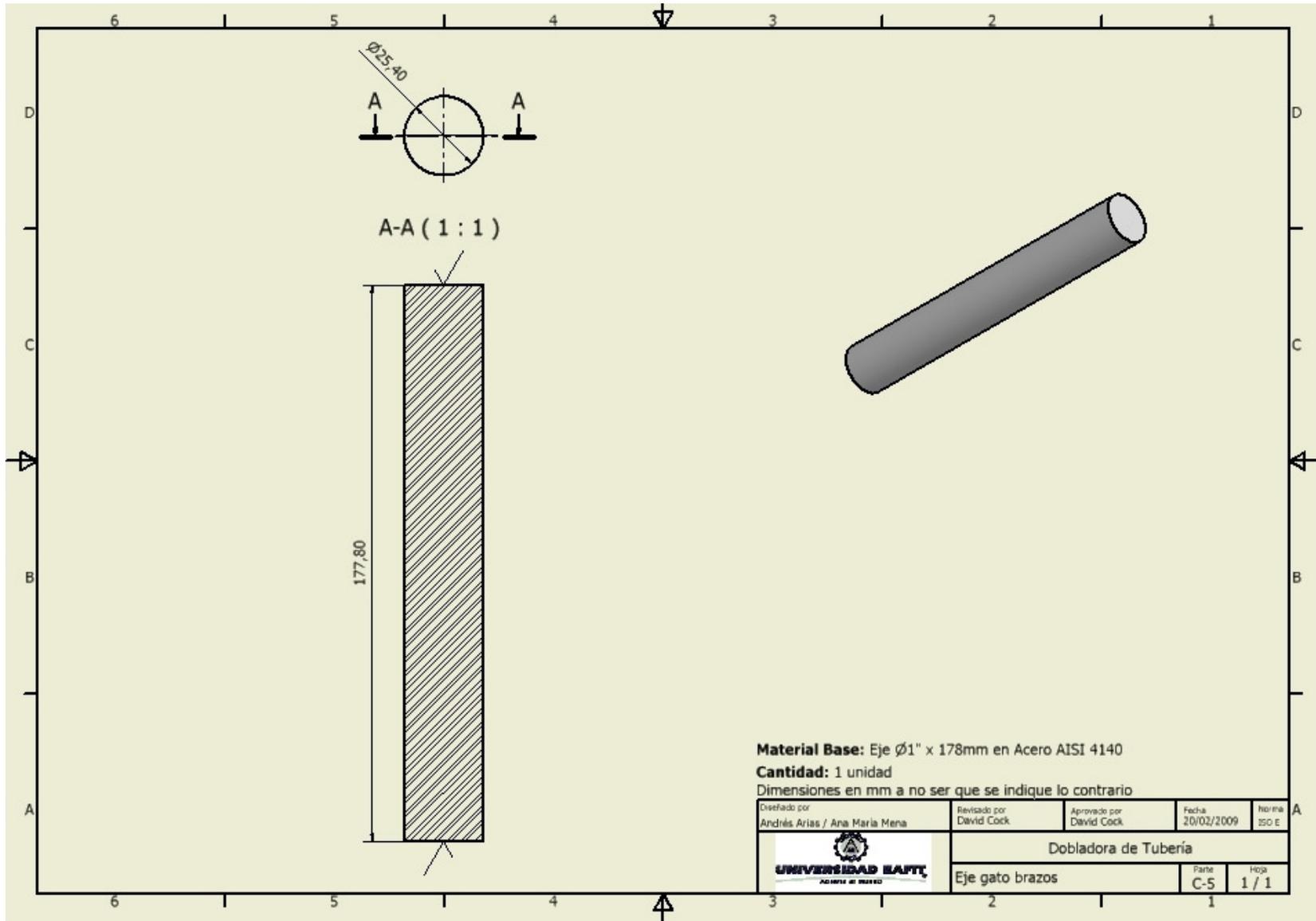


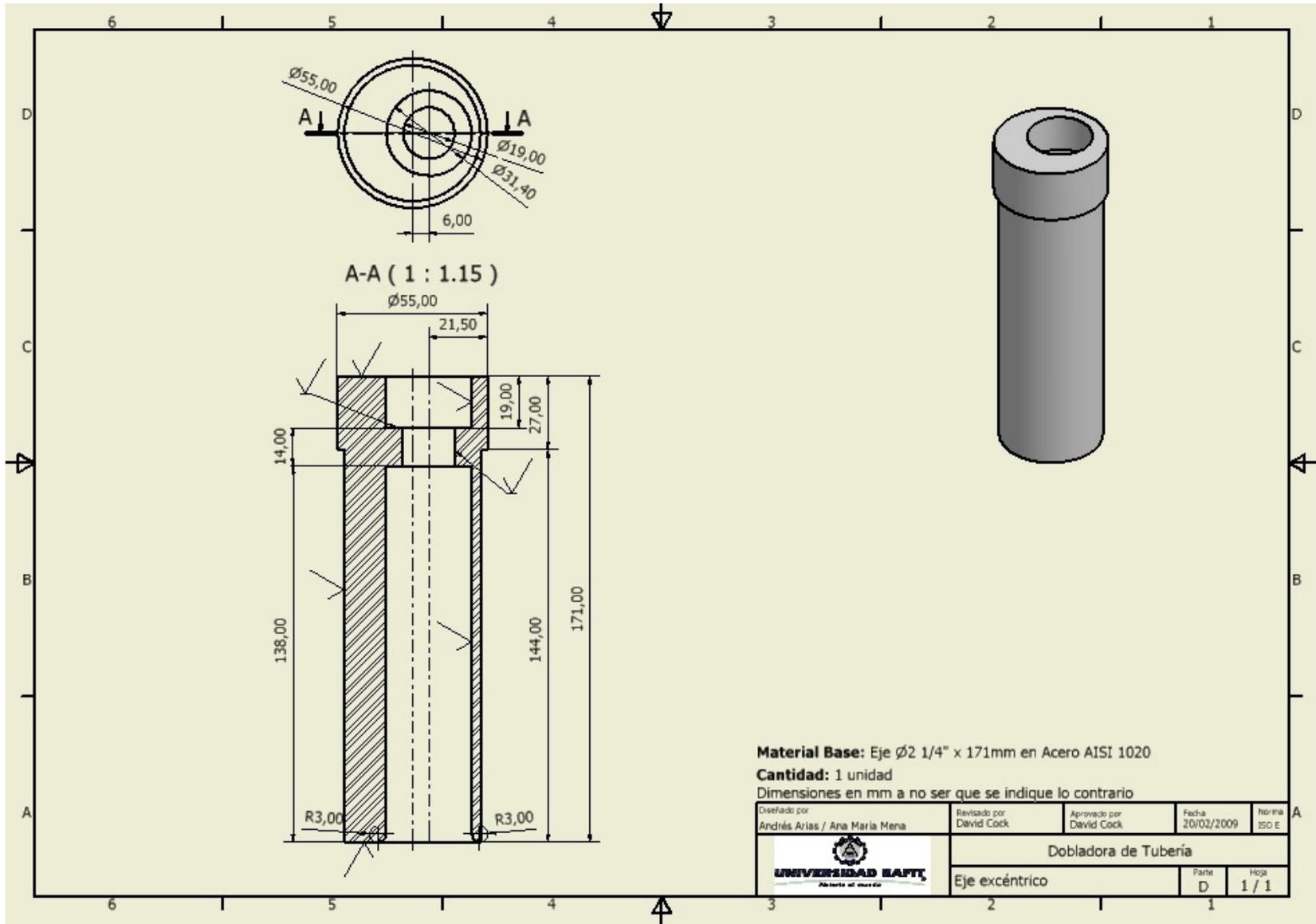


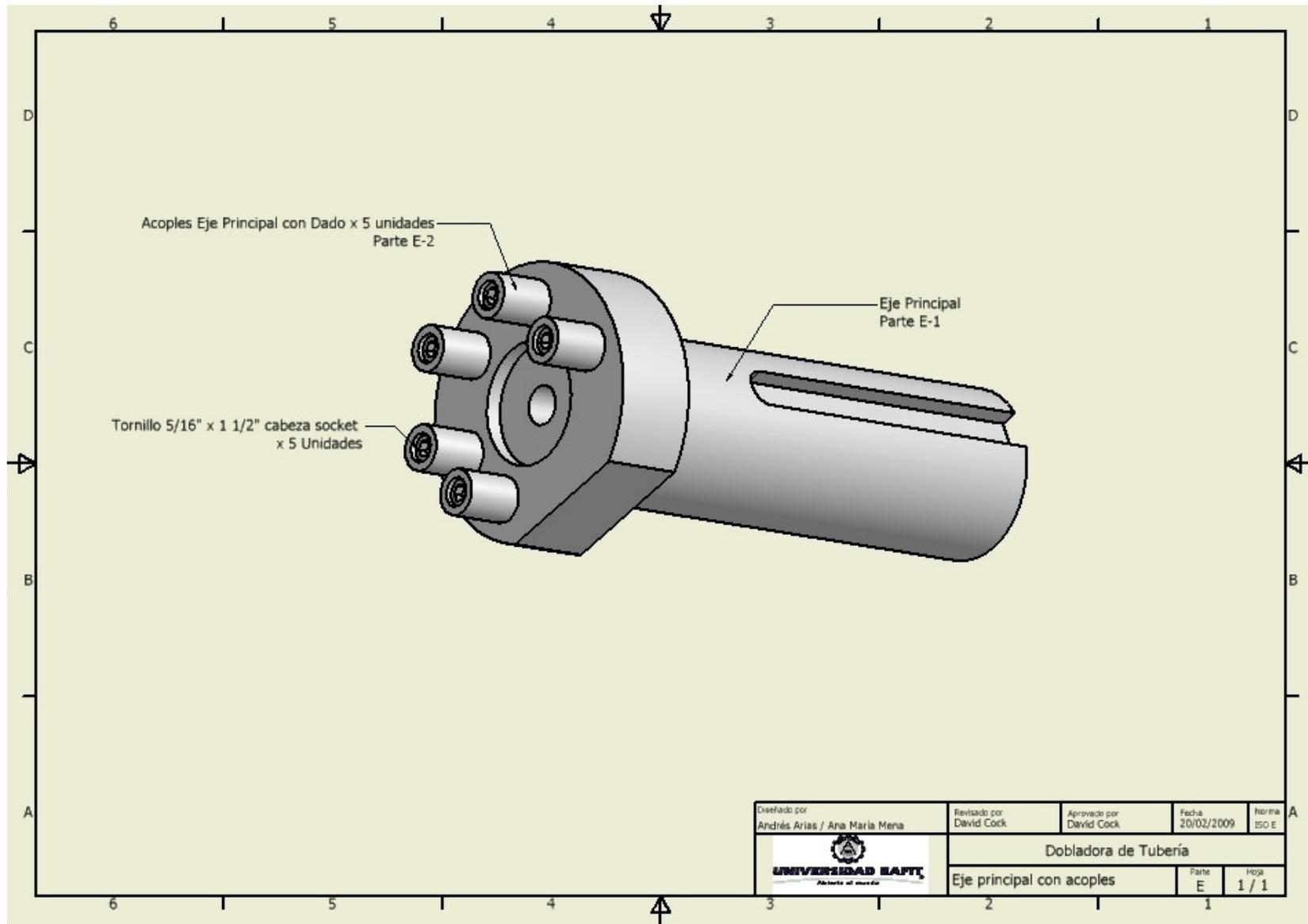


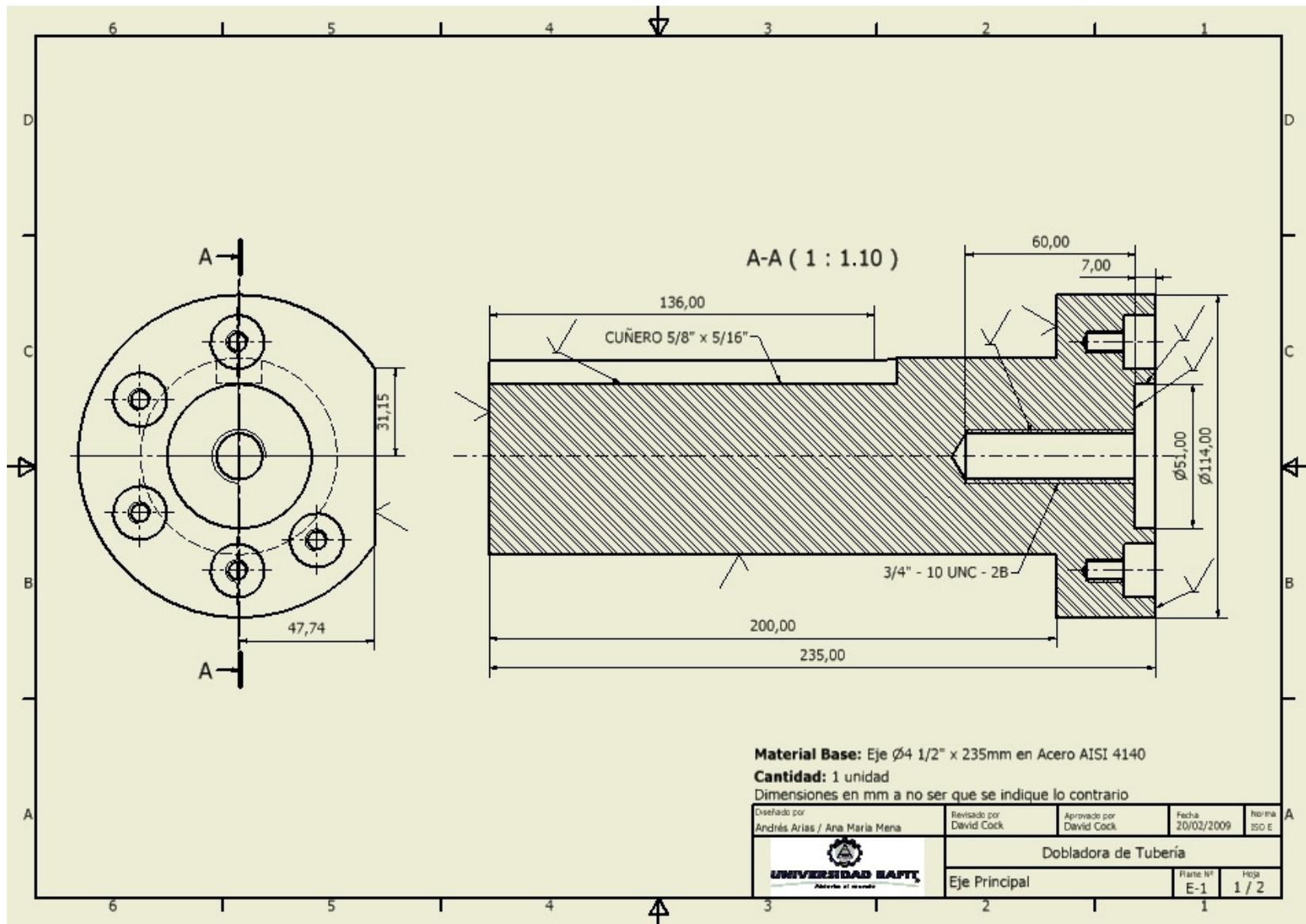


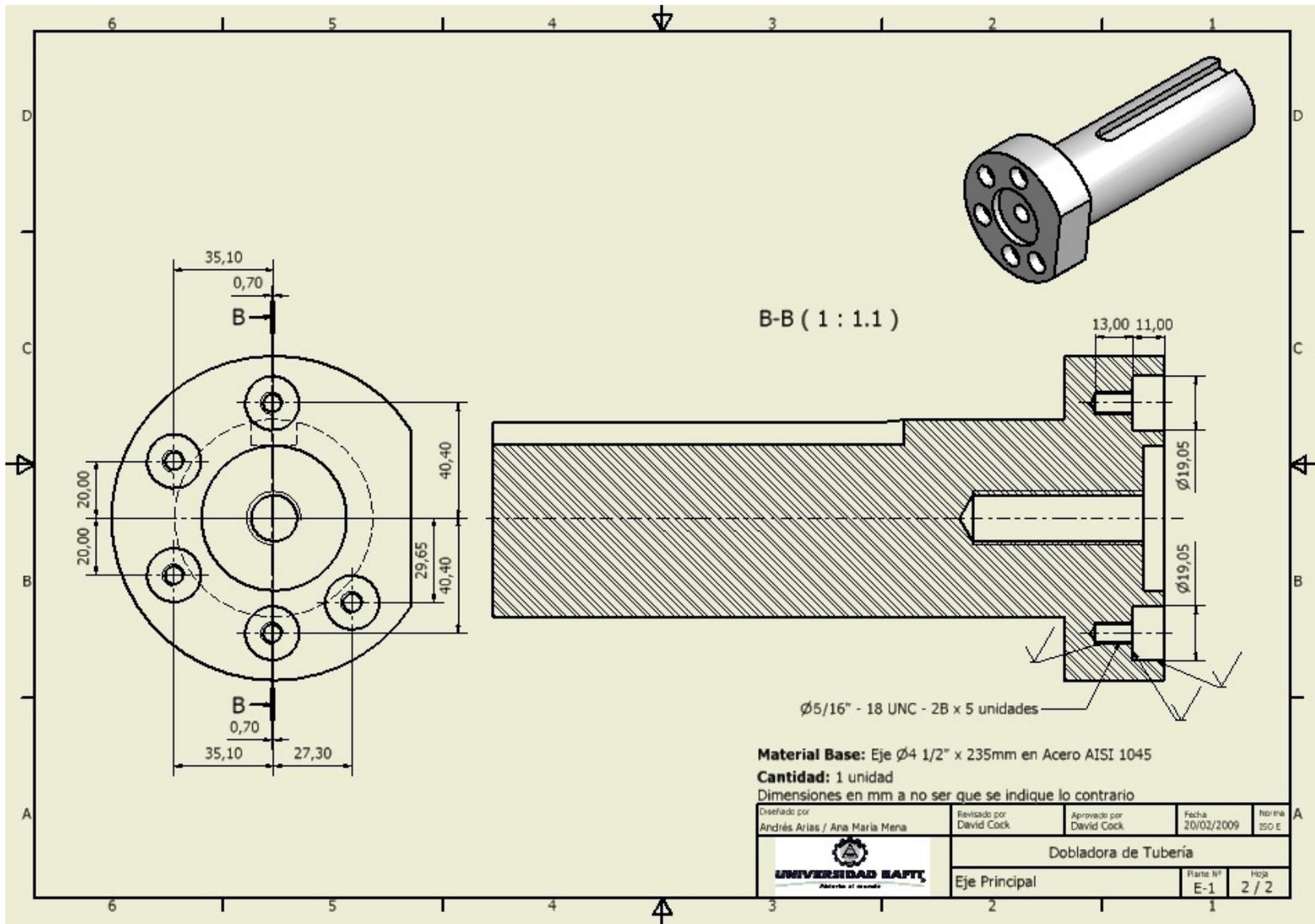


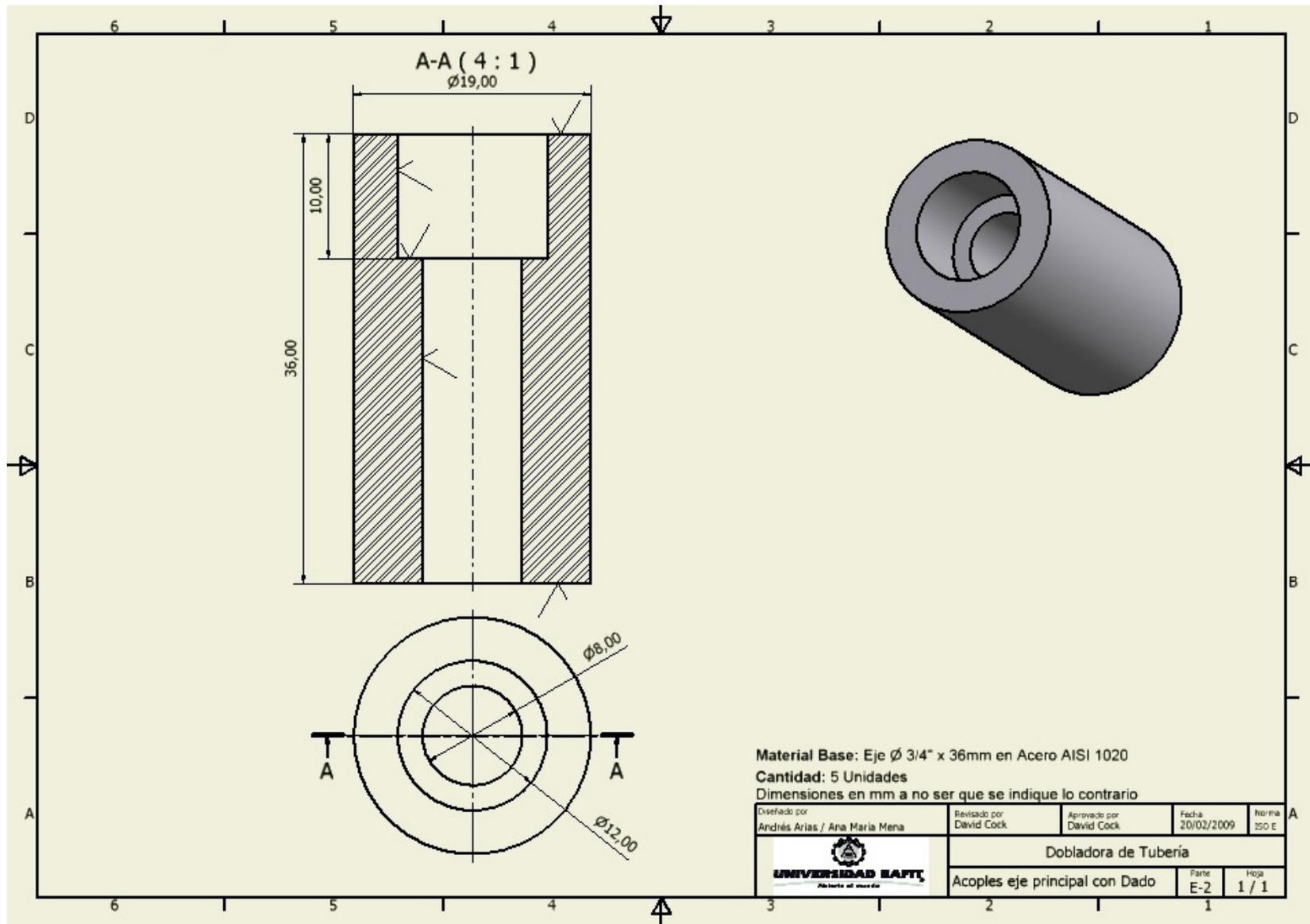


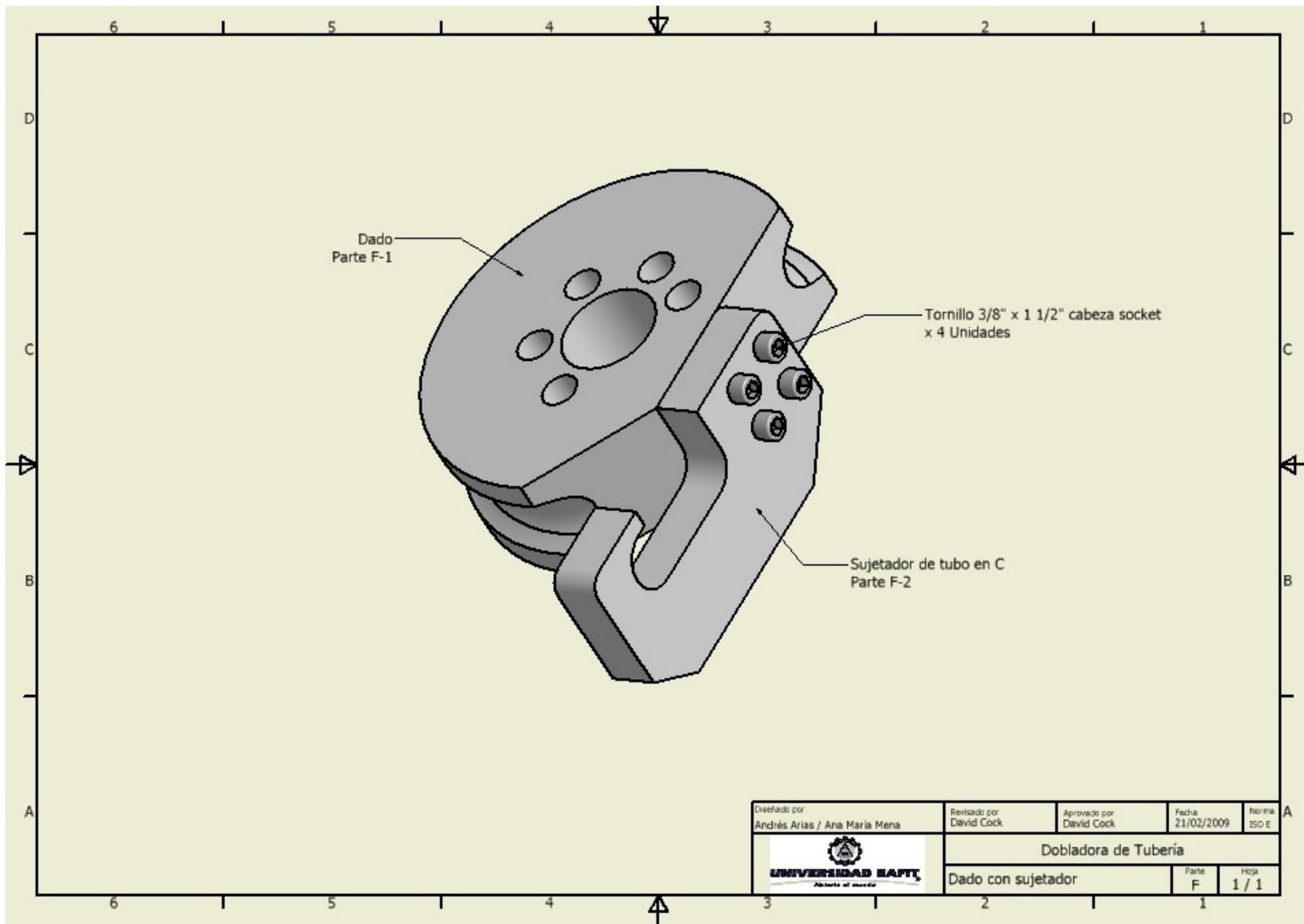












Diseñado por Andrés Arias / Ana María Mena	Revisado por David Cock	Aprobado por David Cock	Fecha 21/02/2009	Norma ISO E
UNIVERSIDAD EAFIT <i>Mejora al mundo</i>				
Dobladora de Tubería			Parte F	Hoja 1 / 1
Dado con sujetador				

