UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN EL DOBLADO CON DADO BASCULANTE Y DOBLADO EN V, PARA LÁMINAS DE ACERO AL CARBONO AISI 1008

FRANCISCO G. VALBUENA V.
LEONARDO J. URBANO P.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN EL DOBLADO CON DADO BASCULANTE Y DOBLADO EN V, PARA LÁMINAS DE ACERO AL CARBONO AISI 1008

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad de Carabobo como requisito para optar por el título de Ingeniero Mecánico

FRANCISCO G. VALBUENA V.
LEONARDO J. URBANO P.

BARBULA, ABRIL 2008

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado designado para evaluar el trabajo especial de grado titulado "*Determinación experimental de la recuperación elástica en el doblado con dado basculante y doblado en v, para láminas de acero al carbono AISI 1008"*, realizado por los bachilleres: **Francisco G. Valbuena V.**, cédula de identidad: **V-14.247.961**, **Leonardo J. Urbano P.**, cédula de identidad: **V-15.528.271**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Juan Carlos Pereira
Tutor

Ing. Luis Sidorova
Jurado

Ing. Sandra Cabello
Jurado

BARBULA, ABRIL 2008

DEDICATORIA

Dedico mi triunfo muy especialmente:

A Dios por darme salud e iluminarme para alcanzar tan preciada meta en mi vida.

A Eleggua por haberme dado la estabilidad, firmeza y claridad en el transcurrir de este largo camino. Maferefum Eleggua

A mi adorada madre Ilse, con acendrada devoción y justo orgullo dedico este esfuerzo a su inolvidable memoria.

A mí querido padre Santiago, por su comprensión, confianza y apoyo en todo momento. Te quiero mucho viejo.

A mis hermanos Santiago (tito), Andreina y Naileth por haberme brindado cada uno de ellos de distintas manera todo el apoyo y respaldo incondicional y nunca dejarme solo a lo largo de la carrera, siguiendo siempre de cerca mi desempeño. Gracias los quiero.

A Carolina por estar conmigo en todo momento y apoyarme cuando más lo necesite. Gracias por ese amor tan sincero que hacen de mis días una razón mas para seguir luchando.

A todos aquellos amigos que contribuyeron en la culminación de este trabajo y siempre estuvieron pendientes de este logro, gracias a: Orlando Ramos, Frank Pulgarin, Alberto Valera, Wladimir Navas, Jesús Ducroc y Eduardo Ruiz.

Francisco G. Valbuena V.

DEDICATORIA

Este Logro se lo dedico especialmente:

A mis padres pilares fundamentales en mi vida, hermanos y demás familiares por ese apoyo incondicional en las buenas y en las malas los quiero infinitamente.

A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería desde el inicio hasta el final de la carrera de verdad mucho aprecio y cariño especial.

A todos mis compañeros de clase y amigos que siempre estuvieron en todo momento pendiente de mi desempeño académico, brindándome sus buenos consejos y deseos.

A todas aquellas personas que puedan aprovechar este trabajo para futuras investigaciones.

Leonardo J. Urbano. P

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos salud y claridad para lograr tan importante triunfo.

A nuestra casa de estudio la Universidad de Carabobo, por brindarnos sus espacios para formar parte de ella.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por habernos impartido conocimientos a través de sus profesores.

A nuestro tutor Ing. Juan Carlos Pereira por aceptar la responsabilidad de este trabajo y la orientación en la realización del mismo.

Al Profesor Ing. Oswaldo Urbano por su ayuda, ofreciéndonos en todo momento sus conocimientos y apoyo.

A todas las secretarias de la escuela de Ingeniería Mecánica.

Al licenciado Omar Coronel por contribuir con apoyo técnico en la construcción del dispositivo de doblado.

A todos los técnicos que laboran en el taller de procesos de fabricación de la facultad de ingeniería por su colaboración.

A todos nuestros compañeros de clases y amigos que estuvieron siempre con nosotros durante toda la carrera.

Francisco G. Valbuena V. Leonardo J. Urbano. P

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó experimentalmente la recuperación elástica para el doblado en "V" y doblado con dado basculante, en láminas de acero al carbono AISI 1008 en estado recocido. Los ensayos de doblado se realizaron en la máquina de ensayos de Tracción Universal GALDABINI que se encuentra en el laboratorio de materiales y procesos de fabricación de la Universidad de Carabobo, para los ensayos y el cumplimiento de las fases experimentales se diseño y construyó respectivamente el herramental de doblado con dado basculante, el dispositivo de doblado en "V" fue aportado por un Trabajo de Grado realizado anteriormente en la Facultad de Ingeniería, luego de lograr la adaptación independiente de los dos dispositivos mencionados a la máquina de ensayos de tracción se obtuvieron datos experimentales valiosos para el establecimiento del análisis de resultados y conclusiones.

El análisis se hizo mediante gráficas y ecuaciones donde se determinó la carga de doblado tanto experimental como teórica, obteniéndose resultados comparativos bastante notables; se pudo visualizar que la carga de doblado por dado basculante fue mayor que la carga de doblado por el método en "V", también se determinó la recuperación elástica del material, término que se expresó como el factor $Kr= \beta_f / \beta_i$ y $\Delta\beta= (\beta_i - \beta_f)$ (º) en función del ángulo final Promedio β_fº. Se determinó también que para mayores espesores de chapa en ambos procesos de doblado implica mayores valores de recuperación elástica. Se puede decir también que el momento flector requerido fue mayor para el proceso de doblado con dado basculante que para el proceso de doblado en "V"; finalmente se hace mención a propuestas para trabajos futuros.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Dedicatoria……....	IV
Agradecimiento…….	VI
Resumen……	VII
Símbolos y abreviaturas……	VIII
INTRODUCCIÓN……...	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA……	3
1.1 Título del trabajo…….	3
1.2 Planteamiento del Problema……	3
1.3 Objetivos…….	4
1.3.1 Objetivo General…….	4
1.3.2 Objetivos Específicos……..	5
1.4 Limitaciones……	5
1.5 Delimitaciones…….	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO……	7
Antecedentes de la investigación……..	7
Fundamentos teóricos……	9
2.1 Procesos de doblado mas importantes…….	9
2.1.1 Doblado en "V"……...	9
2.1.2 Doblado rotativo o basculante…….	10
2.2 Parámetros relacionados con el doblado…….	11
2.3 Recuperación o "springback"…….	31
2.4 Definiciones iniciales de recuperación……..	34
2.4.1 Variables de influencia sobre la recuperación……...	39
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO……...	41
3.1 Introducción……	41
3.2 Nivel de la investigación…….	41
3.3Diseño de la investigación……...	41
3.4 Población y muestra……	45
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos……	47
3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos……...	47
3.7 Desarrollo de la fase metodológica ……	48

3.7.1 Preparación de las probetas……. 49
3.7.1.1 Probetas para el doblado con dado basculante…… 49
3.7.1.2 Probetas para el doblado en V……... 49
3.7.1.3 Tratamientos térmicos de las probetas…….. 50
3.7.1.4 Mecanizado de las probetas para ensayo de tracción…… 50
3.8 Ensayos de tracción……... 52
3.9 Ensayos de doblez……... 53
3.10 Equipos adicionales……... 56

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADO... 58

4.1 Introducción…… 58
4.2 Cálculos de los esfuerzos de tracción máxima…… 61
4.3 Resultados de la carga de doblado en "V" experimental y la carga teórica en función de la formula de doblado……... 64
4.4 Resultados de la carga de doblado con dado basculante experimental y la carga teórica en función de la formula de la formula de doblado……. 67
4.5 Resultados del ángulo final de la pieza después del doblado en "V" para cada espesor del ángulo…… 70
4.6 Resultados del ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para cada espesor de lámina…… 71
4.7 Cálculo de los valores de recuperación expresado como Kr y Δβ para ambos procesos de doblado……. 73
4.8 Resultado del radio final y ángulo final de la pieza después del doblado en "V" para cada espesor de lámina…….. 79
4.9 Resultado del radio final y ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para cada espesor de lámina……. 80
4.10 Análisis de resultados de los ensayos experimentales…….. 82
4.11 Ensayos de tracción del material AISI 1008 en estado recocido….. 82
4.12 Carga de doblado experimental y teórica…….. 82
4.13 Recuperación elástica para el doblado en "V" y doblado con dado Basculante……. 83
4.14 Radio final de curvatura Rf de la pieza para el doblado en "V" y doblado con dado basculante…… 85
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES……. 86
5.1 Conclusiones……... 86
5.2 Recomendaciones…… 88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS…….. 89
APÉNDICES…… 100

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Esquema de doblado en "V"……..	9
Figura 2.2	a) Doblado rotativo posición inicial y b)Doblado rotativo posición final……..	10
Figura 2.3	Recuperación ó springback durante el proceso de doblado……...	16
Figura 2.4	Compensación de la recuperación a) Acuñado b)Doblado a fondo……	18
Figura 2.5	Viga simplemente apoyada con carga concentrada central…….	20
Figura 2.6	Máximo momento flector para una viga simplemente apoyada……	21
Figura 2.7	Momento del doblado, chapa apoyada en los extremos y con carga en el centro……..	22
Figura 2.8	Diagrama de fuerza de proceso-desplazamiento de punzón para el doblado al aire y doblado a fondo……...	26
Figura 2.9	Radios característicos de una chapa doblada …….	29
Figura 2.10	Longitud del arco en la chapa en la línea neutra según el estándar a)ASM o b) DIN……...	31
Figura 2.11	Definición de estados para el estudio de la recuperación....	32
Figura 2.12	Variación del ángulo $\Delta\beta$ durante la recuperación de una chapa doblada en "V"……..	36
Figura 3.1	Bosquejo básico del porta punzón y matriz para el proceso de doblado con dado basculante……	43
Figura 3.2	Dispositivo construido para el proceso de doblado con dado basculante……...	44
Figura 3.3	Flujograma del diseño experimental……...	46
Figura 3.4	Probetas cortadas para ensayos de doblez……	50
Figura 3.5	Dimensiones de la probeta de tracción según norma ASTM A-370……..	51
Figura 3.6	a) Probetas para ensayo de doblado en "V" b) Probetas para ensayos de doblado con dado basculante……	51
Figura 3.7	Equipo universal de ensayo de materiales, GALDABINI……...	53
Figura 3.8	Dispositivo para doblado en "V"……	54
Figura 3.9	Dispositivo para doblado con dado basculante……...	54
Figura 3.10	a) Dispositivo de doblado en "V" y probeta de doblez b) dispositivo con dado basculante y probeta de doblez…….	55
Figura 3.11	Limadora para mecanizado de matriz y punzón……..	56
Figura 3.12	Fresadora universal para mecanizado de matriz y punzón..	56
Figura 3.13	Torno convencional…….	56

Figura 3.14 Horno para recocido de probeta…….. 56
Figura 3.15 Goniómetro, medidor de ángulo…….. 57
Figura 3.16 Guillotina para corte de tira……. 57
Figura 3.17 Vernier……. 57
Figura 3.18 Sierra mecánica…….. 57
Figura 3.19 Sierra mecánica de cinta…….. 57
Figura 4.1 Gráfica de ensayo de tracción del material AISI 1008 recocido para espesor de lámina t = 0,9mm…… 58
Figura 4.2 Gráfica de ensayo de tracción del material AISI 1008 recocido para espesor de lámina t = 1,1mm…… 59
Figura 4.3 Gráfica de ensayo de tracción del material AISI 1008 recocido para espesor de lámina t = 2mm……... 59
Figura 4.4 Gráfica de ensayo de tracción del material AISI 1008 recocido para espesor de lámina t = 3,1mm…… 60
Figura 4.5 Gráfica de ensayo de tracción del material AISI 1008 recocido para espesor de lámina t = 4,9mm…… 60
Figura 4.6 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado en "V" del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 0,9mm……... 62
Figura 4.7 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado en "V" del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 1,1mm……... 63
Figura 4.8 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado en "V" del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 2mm…….. 63
Figura 4.9 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado en "V" del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 3,1mm……... 63
Figura 4.10 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado con dado basculante del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 0,9mm…… 65
Figura 4.11 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado con dado basculante del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 1,1mm…… 65
Figura 4.12 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado con dado basculante del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 2mm……... 66
Figura 4.13 Gráficas de los resultados experimentales para el doblado con dado basculante del acero AISI 1008 en estado recocido para espesor de lámina t = 3,1mm…… 66
Figura 4.14 Esquema del sistema de doblado con dado basculante…... 68
Figura 4.15 Carga de doblado Vs. Método de doblado para espesor de lámina t = 0,9mm…… 68

Figura 4.16 Carga de doblado Vs. Método de doblado para espesor de lámina t = 1,1mm…… 69
Figura 4.17 Carga de doblado Vs. Método de doblado para espesor de lámina t = 2mm……... 69
Figura 4.18 Carga de doblado Vs. Método de doblado para espesor de lámina t = 3,1mm…… 70
Figura 4.19 Gráfica de valores experimentales de la recuperación expresada como el factor $K_r = \beta_f / \beta_i$ en función del ángulo final para el ensayo de doblado en "V"……... 77
Figura 4.20 Gráfica de valores experimentales de la recuperación expresada como $\beta_i - \beta_f$ en función del ángulo final para el ensayo de doblado en "V"……... 77
Figura 4.21 Gráfica de valores experimentales de la recuperación expresada como el factor $K_r = \beta_f / \beta_i$ en función del ángulo final para el ensayo de doblado con dado basculante…… 78
Figura 4.22 Gráfica de valores experimentales de la recuperación expresada como $\beta_i - \beta_f$ en función del ángulo final para el ensayo de doblado con dado basculante…….. 78
Figura 4.23 Gráfica del radio final de curvatura Rf Vs. Ángulo final promedio de doblado para el proceso de doblado en "V"... 81
Figura 4.24 Gráfica del radio final de curvatura Rf Vs. Ángulo final promedio de doblado para el proceso de doblado con dado basculante……... 81

ÍNDICE DE TABLAS

		Pag.
Tabla 2.1	Radio mínimo de doblado para diferentes materiales en función del espesor de la lámina a temperatura ambiente…….	12
Tabla 2.2	Resumen de formulas para determinar la carga de doblado……...	25
Tabla 3.1	Composición química del acero AISI 1008……...	48
Tabla 3.2	Probetas para doblado con dado basculante, material AISI 1008……...	49
Tabla 3.3	Probetas para doblado en "V", material AISI 1008……...	49
Tabla 4.1	Resultados de esfuerzos de tracción máximo obtenida en los ensayos de láminas de acero AISI 1008 recocido……...	62
Tabla 4.2	Resultados de la carga de doblado en "V" experimental y la carga teórica en función de la formula de doblado…….	64
Tabla 4.3	Resultados de la carga de doblado con dado basculante experimental y la carga teórica en función de la formula de doblado……...	67
Tabla 4.4	Ángulo final de la pieza después del doblado en "V" para espesor de lámina t = 0,9mm……..	70
Tabla 4.5	Ángulo final de la pieza después del doblado en "V" para espesor de lámina t = 1,1mm……..	70
Tabla 4.6	Ángulo final de la pieza después del doblado en "V" para espesor de lámina t = 2mm…….	71
Tabla 4.7	Ángulo final de la pieza después del doblado en "V" para espesor de lámina t = 3,1mm……..	71
Tabla 4.8	Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t = 0,9mm……	71
Tabla 4.9	Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t = 1,1mm……	72
Tabla 4.10	Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t = 2mm……...	72
Tabla 4.11	Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t = 3,1mm……	72
Tabla 4.12	Valores de Kr y Δβ para doblado en "V" espesor de lámina t = 0,9mm……	74
Tabla 4.13	Valores de Kr y Δβ para doblado en "V" espesor de lámina t =1,1mm……	74

Tabla 4.14 Valores de Kr y Δβ para doblado en "V" espesor de lámina t = 2mm…….. 74
Tabla 4.15 Valores de Kr y Δβ para doblado en "V" espesor de lámina t = 3,1mm……... 75
Tabla 4.16 Valores de Kr y Δβ para doblado con dado basculante espesor de lámina t = 0,9mm…….. 75
Tabla 4.17 Valores de Kr y Δβ para doblado con dado basculante espesor de lámina t = 1,1mm…….. 75
Tabla 4.18 Valores de Kr y Δβ para doblado con dado basculante espesor de lámina t = 2mm……. 76
Tabla 4.19 Valores de Kr y Δβ para doblado con dado basculante espesor de lámina t = 3,1mm…….. 76
Tabla 4.20 Valores de radio final y ángulo final para doblado en "V"……... 79
Tabla 4.21 Valores de radio final y ángulo final para doblado con dado basculante……... 80

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS DE TÉRMINOS

Variable	Descripción	Unidad
A_f	Área de reducción transversal de la probeta de tracción	(mm^2)
A_o	Área transversal inicial de la probeta	(mm^2)
A_r	Cociente entre el área de reducción en el ensayo de tracción y el área transversal inicial de la probeta	-------
α	Angulo de doblado	(º)
B_1	Distancia del centro del dado basculante a un punto de contacto con la lámina	(mm)
b	Ancho de la lámina	(mm)
β_i	Ángulo inicial de doblado	(º)
β_F	Ángulo final de doblado	(º)
βf_p	Ángulo final promedio de doblado	(º)
C	Factor de curvatura admisible	-------
$\Delta\beta$	Valor de recuperación	(º)
E	Modulo de elasticidad del material	
ε_f	Deformación real de la fractura	------
ε_0	Deformación real	------
$\varepsilon_{0,b}$	Deformación en el radio exterior	------
I	Momento de inercia del área de la sección transversal respecto a la línea neutra	(mm^4)
K_R	Factor de recuperación	-------
L	Distancia entre apoyos	(mm)
Lo	Longitud total de la chapa desplegada	(mm)
Lm	Longitud del plano medio	(mm)
M	Momento flector interno en la sección transversal de una viga	(Kg. mm)
Mxx	Momento externo aplicado a una viga simplemente apoyada	(Kg. mm)
Pv	Carga de doblado en "V"	(Kg)
Pr	Carga de doblado rotativo	(Kg)
R_f	Radio de doblado final	(mm)
R_i	Radio de doblado bajo carga	(mm)
R_o	Radio exterior	(mm)
Rmin	Radio de doblado mínimo	(mm)
Su	Esfuerzo último nominal de tracción	(Kg/mm^2)

σ_d	Esfuerzo de flexión	(Kg/mm^2)
σ_0	Esfuerzo de fluencia	(Kg/mm^2)
σ_R	Esfuerzo de rotura	(Kg/mm^2)
TS	Resistencia última a la tensión	(Kg/mm^2)
t	Espesor de lámina	(mm)
v	Velocidad desplazamiento de punzón	(mm/min)
Y	Distancia del eje neutro de la sección transversal a la fibra mas alejada	(mm)
w	Ancho de lámina	(mm)
Wd	Distancia de abertura de la matriz	(mm)

INTRODUCCIÓN

La tecnología de conformado por deformación es tan antigua como el hombre del periodo neolítico, pero si nos acercamos más al presente, los procesos de conformación por deformación se caracterizan, generalmente por ser procesos de alta productividad, con bajos costos de producción por pieza y con bajo consumo de material.

La tecnología de deformación moderna emergió con énfasis en aspectos de precisión, control y seguridad de procesos. Se caracteriza por los siguientes criterios u objetivos además de los mencionados anteriormente: i) Producción de determinados componentes con tolerancias muy estrechas; ii) Procesos de alta calidad, tanto para la geometría como para las propiedades mecánicas de los productos iii) La deliberada disminución del consumo de energía.

Dentro de los procesos de conformación por deformación nos centramos en los de conformación de chapa, podemos apreciar que en los últimos años este tipo de proceso ha alcanzado una gran importancia en el mundo industrial, la chapa se utiliza ampliamente como material base en productos industriales a causa de su fácil maleabilidad para poder convertirla en formas complejas, los componentes de chapa se usan en varias industrias, como la aeroespacial, la electrónica, en herramientas de máquinas, en refrigeración y aire acondicionado etc. También estos componentes forman una parte importante de la actividad de fabricación y desarrollo en la industria del transporte (aeronáutica, ferrocarril, vehículos de transporte terrestre y barcos); ya que en estos medios su efectividad en el servicio prestado y vida útil dependen en gran parte de la reducción de su peso.

Dentro de los numerosos procesos de conformación en chapa, este Trabajo de Grado se centrará en la comparación de dos procesos de doblado (doblado en “V” y doblado por dado basculante) con el fin de determinar cual proceso resulta más eficiente en cuanto a carga requerida para el doblado y cuantificar la recuperación elástica del material para ambos procesos.

CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

1.1 TÍTULO DEL TRABAJO

"Determinación experimental de la recuperación elástica en el doblado con dado basculante y doblado en ¨V¨, para láminas de acero al carbono AISI 1008".

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de doblado de láminas de acero, básicamente consiste en conformar una pieza a una determinada configuración, partiendo generalmente de una chapa o lámina metálica. Se realiza mediante herramientas especiales denominadas estampas de doblar (matriz y punzón). Estas estampas, según su construcción, pueden ser también aptas para curvar, doblar entre otras.

Los equipos que se utilizan para el doblado dependen del tamaño y en mayor medida de la longitud y espesor de la pieza por doblar, son prensas mecánicas o hidráulicas. Los componentes de chapa se usan completamente en varias aplicaciones para industrias como la aeroespacial, en la electrónica, automotriz, en refrigeración y aire acondicionado, entre otras aplicaciones.

En el proceso de doblado de láminas, las características importantes que se presentan por deformación son: la tensión de las fibras externas y la compresión de las fibras internas para un espesor (t) de la lámina, las deformaciones por tensión y compresión se incrementan con la disminución del radio (R_b) del punzón. Por ejemplo, la aparición de defectos, la falta de precisión en el ángulo de doblez final (por efecto de la recuperación elástica), así como grietas y arrugas en la pieza después de efectuado el doblez; son anomalías que están en estrecha relación con distintas características del proceso de doblado; el diseño de los estampados (matriz y punzón)

y los efectos del material. La carga de doblado y el ángulo de recuperación elástica es mayor para el proceso de doblado en "V", mientras que en el proceso por dado basculante presenta valores en menor proporción de estas variables, siendo el proceso de doblado por dado basculante de cierta forma más eficiente en cuanto a estas variables, de acuerdo con investigaciones realizadas por Gary S, Vasilash [6].

En la actualidad, en el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, se realizan prácticas de laboratorio de doblado de láminas utilizando una prensa hidráulica y un troquel (punzón – matriz), pero no se cuantifica con precisión la fuerza requerida de doblado y la recuperación elástica del material ensayado, tampoco se encuentra incluido el proceso de doblado por dado basculante en estas prácticas de laboratorio, el aporte de este Trabajo de Grado sería dotar al laboratorio de un equipo de doblado por dado basculante y de esta forma, estudiantes y profesores podrían realizar prácticas de doblado por medio del equipo antes mencionado, para comparar los procesos (doblado en ¨V¨ y doblado por dado basculante) en cuanto a carga requerida y recuperación elástica del material.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar experimentalmente la recuperación elástica en el doblado con dado basculante y doblado en ¨ V ¨, para láminas de acero al carbono AISI 1008.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar la relación de la recuperación elástica que soporta la pieza (ángulo de doblez final) en el doblado con dado basculante en láminas de acero al carbono para varios espesores.
- Cuantificar la relación de la recuperación elástica que soporta la pieza (ángulo de doblez final) en el doblado en V en láminas de acero al carbono para varios espesores.
- Determinar la relación entre el ángulo de doblado final y la curvatura de la pieza final para los dos procesos de doblado de la chapa (Doblado en ¨V¨ y dado basculante).
- Determinar la influencia del grosor de la chapa sobre la recuperación elástica para ambos procesos de doblado.
- Determinar teórica y experimentalmente la carga de doblado para ambos procesos (Doblado en ¨ V ¨ y dado basculante).

1.4 LIMITACIONES

- Debe utilizarse la máquina universal de ensayo (GALDABINI) del laboratorio de materiales.
- Debe utilizarse la matriz – punzón para el doblado en ¨V¨, ubicada en el laboratorio de proceso.
- Máximo dos semestres para culminar el Trabajo de Grado.
- Las pruebas piloto se harán en el laboratorio de procesos de la Facultad de Ingeniería de la UC.

1.5 DELIMITACIONES

- Se utilizarán espesores de lámina de t=0.9mm, t=1.1mm, t=2mm, t=3.1mm para cada proceso.
- Los ensayos de doblado se harán en láminas de acero al carbono AISI 1008.
- Se construirá un troquel matriz – punzón con dado basculante.
- Las variables a estudiar serán: recuperación elástica, ángulo de doblez final de la pieza y carga de doblado, en función del espesor de la chapa.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

* **Diseño y construcción de un dispositivo para medir fuerza de doblado en láminas de aluminio**, Trabajo de Grado UC, 2002, Autores: Manuel Alfin y Henry Molina [1].

Del estudio de varias alternativas se decidió por el diseño de un dispositivo que lleva en su interior un medidor de fuerza de doblado, por lo que el margen de error sólo será según la apreciación del instrumento.

Tras la selección del material adecuado tanto para las piezas del dispositivo como para el material que se pudiera ensayar en él, teniendo en cuenta los esfuerzos de carga a los que serian sometidos, se dimensionó cada una de las partes, posteriormente se realizaron repetidos ensayos obteniendo resultados satisfactorios al lograr finamente con la fuerza experimental obtenida corroborar la ecuación empírica utilizada en los cálculos de la fuerzas teóricas.

* **Determinación de la zona de material afectada mecánicamente, según la variación de los parámetros característicos, en el proceso de doblado**. Trabajo de Grado UC, 2003, Autores: Mayhleen Castillo [2].

Con esta investigación se constató que los efectos que experimentan las propiedades de un material una vez sometidos al proceso de doblado, están estrechamente vinculados con los parámetros característicos del proceso, tales como espesor del material, radio del punzón y ángulo de doblado.

El análisis de los parámetros en variación y la magnitud de la zona afectada, permitió determinar la influencia de cada variable independiente, concluyendo que la longitud de la zona afectada se incrementa a medida que aumenta el espesor y disminuye a medida que aumenta el radio y el ángulo entre los lados del doblado.

* **Aplicación del ensayo de doblez y ensayo Varestraint para determinar la figuración en soldaduras de acero inoxidable AWS309L, AWS316L Y AWS347**. Trabajo de Grado UC, 2004, Autores: Roberto J. y Pérez Q [3].

En esta investigación se busco conocer aun más sobre las fallas que ocurren en aceros inoxidables de la serie 300, más específicamente en los materiales de aporte de soldaduras del tipo AWS309L, AWS316L Y AWS347, debido a la falta de control en la microestructura ferrita delta presente en soldaduras de este tipo; además, la relación que tiene el número de ferrita ¨ γ ¨ con la tendencia de fisuramiento o desgarramiento cuando éstos materiales de aporte en soldaduras son sometidos a trabajos o ensayos de alta flexión (Doblado) de soldaduras tanto en caliente como a temperatura ambiente.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 PROCESOS DE DOBLADO MÁS IMPORTANTES

2.1.1 Doblado en V

El doblado en V o a fondo se ejecuta en una matriz, esto significa que el fondo de la misma tiene un radio igual a la suma del radio del punzón más el espesor de la chapa; o en una matriz semicerrada, en la que el fondo tiene un radio menor que el radio del punzón más el espesor de la chapa (típicamente la matriz tiene la forma de una V). En la figura 2.1 se muestra un esquema de doblado en V.

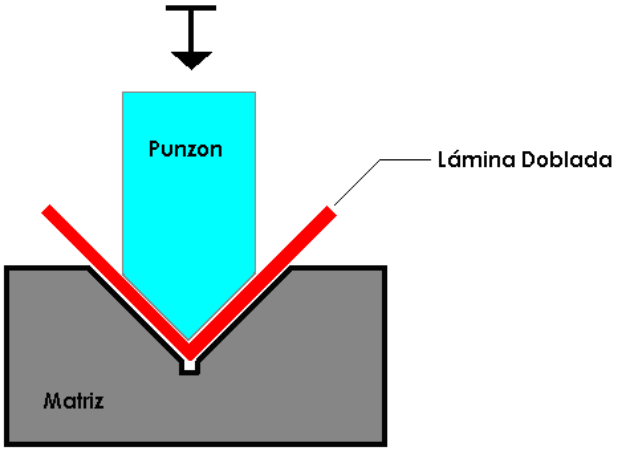


Figura 2.1. Esquema de Doblado en V. Fuente: propia, 2008

En los procesos de doblado a fondo, el punzón presiona la chapa completamente contra la matriz. Como resultado, las características del doblado (ángulo y radio) están marcadas por la combinación matriz y punzón. Cada espesor de chapa, tipo de material y ángulo de doblado requieren una combinación diferente de punzón y matriz.

2.1.2 Doblado rotativo o Basculante

El doblado Rotatorio o Dado basculante es un proceso de flexión rotatoria que se efectúa por medio de un eje de balancín, a diferencia del método comentado anteriormente donde se usa Matriz - Punzón como elementos principales de utillaje. Se diseña para producir una gama de curvas exactas en chapas de láminas por medio de un movimiento vertical efectuado por una prensa, transfiriendo la carga total en un movimiento rotatorio del elemento doblador.

Tiene grandes ventajas respecto a los otros tipos de doblado tradicionales, este tipo de doblado generalmente no necesita de una presión adicional para sujetar el material ya que el punzón cilindro retiene la chapa simultáneamente.

El punzón basculante descansa sobre el material apoyando un filo sobre la matriz y el otro en el vacío, esta presión hace girar hacia abajo la parte de la chapa que está en voladizo, pero no se detiene a los 90º sino hasta que alcanza 5º más aproximadamente para contrarrestar la recuperación elástica. El esquema básico para el doblado rotativo se muestra en la figura 2.2.a) y 2.2.b):

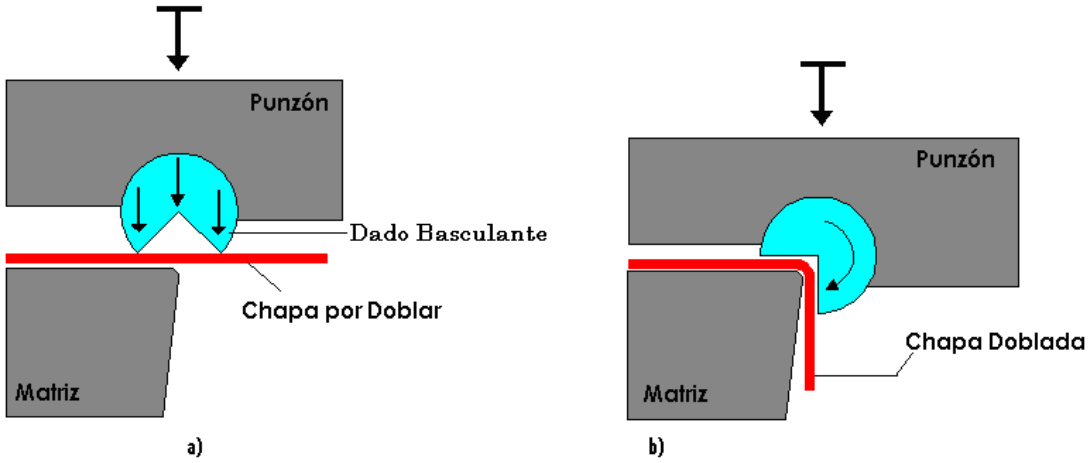


Figura 2.2. a) Doblado rotativo posición inicial y b) Doblado rotativo Posición final.

2.2 PARÁMETROS RELACIONADOS CON EL DOBLADO

Las propiedades de las piezas dobladas que principalmente se consideran son: las propiedades mecánicas, la calidad superficial, la precisión geométrica después del doblado, la recuperación y la deformación de arista.

En cuantos a los parámetros asociados al proceso, se pueden considerar tres fundamentales, relacionados al doblado pues estos relacionan propiedades mecánicas y valores de precisión. Estos tres parámetros son: el radio de doblado mínimo, el ángulo de recuperación y la fuerza de doblado.
A continuación se muestra una amplia definición de estas tres variables y de dos más las cuales son: la capacidad de doblado y la longitud de chapa desplegada.

a) Radio de doblado mínimo (ver tabla 2.1)

Se llama radio de doblado mínimo al radio en cual una grieta aparece en la superficie más exterior del doblado. El radio de doblado mínimo al que la pieza puede doblarse de manera segura se expresa habitualmente en función de su grosor, como por ejemplo 2.t, 3.t, 4t, etc. El radio de doblado mínimo se determina tradicionalmente de manera experimental y esta disponible como característica de la chapa en forma de tabla en varios manuales.

Durante el doblado el radio más exterior de la chapa está sometido a esfuerzos de tracción, mientras que el radio más interior está sometido a compresión. El radio mínimo absoluto que puede formarse esta limitado por la deformación real en el radio más exterior. Esta deformación no puede exceder la deformación de fractura de la chapa. Por ese motivo el fallo de la chapa ocurre cuando la deformación en la cara exterior alcanza la deformación de fractura ($\varepsilon_0 = \varepsilon_f$). Existen relaciones

semiempíricas que permiten determinar el radio de doblado mínimo, como se presentan en la tabla 2.1.

Para componentes de chapa se proporcionan tablas que recogen rangos de radios mínimos de doblado recomendados para diferentes condiciones de materiales, que se han elaborado a partir de datos experimentales, puede observarse el carácter experimental de ello, en los datos de la tabla 2.1, donde se identifica el material sencillamente por su condición de blando o duro.

Tabla 2.1. Radio mínimo de doblado para diferentes materiales en función del espesor de la chapa a temperatura ambiente.

Material	Blando	Duro
Aleaciones de aluminio	0	6 t
Cobre al berilio	0	4 t
Latón, bajo plomo	0	2 t
Magnesio	5 t	13 t
Acero inoxidable austenítico	0.5 t	6 t
titanio	0.7 t	0.7 t
Aceros bajo – carbono, baja aleación y alta resistencia , baja aleación (HSLA)	0.5 t	4 t
titanio	0.7 t	0.7 t
Aleaciones de Titanio	2.6 t	4t

Fuente: Maria luisa García Romeo De Luna [5]

Según la referencia bibliografica (Universidad de Girona, 2005) se han llevado a cabo estudios para establecer una relación entre el radio mínimo y el espesor (R / t) y una propiedad mecánica del material dado.

Uno de estos análisis se basa en las siguientes hipótesis:

1. La deformación real (ε_0) a la que aparece una grieta sobre el doblado de la fibra más exterior es igual a la deformación real de la fractura (ε_f) del material en un ensayo de tracción simple.

2. El material es homogéneo e isótropo.
3. La chapa se dobla en estado de tensión plana, que sucede cuando la relación entre la longitud y el grosor (l / t) toman valores pequeños.

De la primera hipótesis,

$$\varepsilon_f = Ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = Ln\left[\frac{1}{1 - A_r}\right] \qquad \text{(Universidad de Girona, 2005)} \qquad (2.1)$$

donde, $\mathbf{A_r}$ es el cociente entre el área de reducción en el ensayo de tracción y el área transversal inicial de la probeta. Admitiendo una relación exponencial entre deformaciones se puede obtener la relación:

$$\varepsilon_0 = Ln(1 + e_0) \qquad (2.2)$$

Para el doblado de momento puro de una chapa en deformación plana, la deformación real de la fibra más exterior se iguala a la deformación de fractura real de tracción simple. Con ello la deformación máxima admisible del material puede relacionarse con el radio de doblado mínimo que admite la pieza doblada cuando se asuma que la fibra neutra coincide con la fibra media tal como se muestra:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_o = Ln\left[\frac{(R_{min} + t)}{R_{min} + 0{,}5.t}\right] \qquad \text{(Universidad de Girona,2005)} \qquad (2.3)$$

donde, t es el espesor de la chapa y R_{min} es el radio de doblado mínimo.

Usando la relación entre reducción del área en el ensayo a tracción del material, ecuación (2.1) y la deformación real en la fractura, ecuación (2.3) se obtiene la siguiente expresión:

$$R_{min} = t.\left[\left(\frac{1}{2.A_r}\right) - 1\right] \quad \text{(Universidad de Girona, 2005)} \qquad (2.4)$$

Donde se observa que el radio mínimo depende del espesor (**t**) de la pieza y del área de reducción en el ensayo de tracción $\mathbf{A_r}$. Según esta expresión el radio mínimo se aproxima a cero, lo que indica una capacidad de doblado completa o el material puede doblarse sobre si mismo, cuando la reducción del área a tracción es del 50%.

La principal hipótesis detrás de la ecuación (2.4) es que el eje neutro permanece en la mitad del espesor durante la operación de doblado, lo que sólo es justificable para materiales con una reducción de área en fallo mayor a un 20%. Por lo tanto, la relación anterior tiende a ser válida para reducciones de área menores al 20% (A_r< 0.2). Cuando la fibra neutra se desplaza desde el centro de la chapa la siguiente relación mejorada puede emplearse, para materiales dúctiles. (Universidad de Girona,2005)

$$R_{min} = t.\frac{(1 - A_r)^2}{2A_r - A_r^{\,2}} - 1 \qquad (2.5)$$

La relación entre el radio de doblado mínimo posible y la deformación en el radio exterior ($\varepsilon_{0,b}$) en una chapa a flexión se puede escribir como:

$$R_{min} = 0{,}5.t\left[\left(\frac{1}{\varepsilon_{0,b}}\right) - 1\right] = c.t \qquad (2.6)$$

Donde se puede definir el parámetro **c** como un factor de curvatura admisible.

Como se puede observar estas ecuaciones establecen el radio mínimo como función del espesor de chapa. Dada la íntima relación entre el radio de doblado mínimo y el espesor se puede redefinir este parámetro característico como la relación entre el radio mínimo de doblado y el espesor (R / t), al que llamaremos radio R/t mínimo. La definición de este radio esta estrechamente relacionada con el radio de doblado mínimo y, por lo tanto, determina del mismo modo la capacidad de doblado de una pieza.

Por eso las expresiones anteriores se pueden rescribir como:

$$\left(\frac{R}{t}\right)_{min} = \frac{1}{2.A_r} - 1 \qquad (2.7)$$

Y para reducciones de área mayores al 20% como:

$$\left(\frac{R}{t}\right)_{min} = \frac{(1 - A_r)^2}{2A_r - A_r^{\,2}} - 1 \qquad (2.8)$$

b) Recuperación (Universidad de Girona, 2005)

La recuperación es el movimiento que sufre una pieza doblada para restituir su posición y forma original una vez se ha retirado la carga que ha producido la deformación. El fenómeno de la recuperación (se le conoce también como restitución o "springback") es una de las dificultades que deben considerarse durante la operaciones de doblado especialmente. Aunque puede presentarse en otros procesos de deformación de chapa como es la embutición.

Este movimiento de recuperación es debido a que todos los materiales tienen un modulo de elasticidad finito. Consiguientemente, a la deformación plástica le sigue siempre una recuperación elástica una vez se retira la carga. Este restablecimiento o recuperación suele cuantificarse con dos variables, o bien con el ángulo de recuperación, o bien con un factor de recuperación.

Se considera estado final aquel en el que la carga se ha dejado de ejercer sobre la chapa, por lo tanto el ángulo final de doblado (β_f), después de la recuperación, es menor que el inicial (β_i) y el radio final de doblado (R_f) es mayor que le radio de doblado en el estado de carga (R_i), lo que se traduce en imprecisiones dimensionales en la pieza final (figura 2.3).

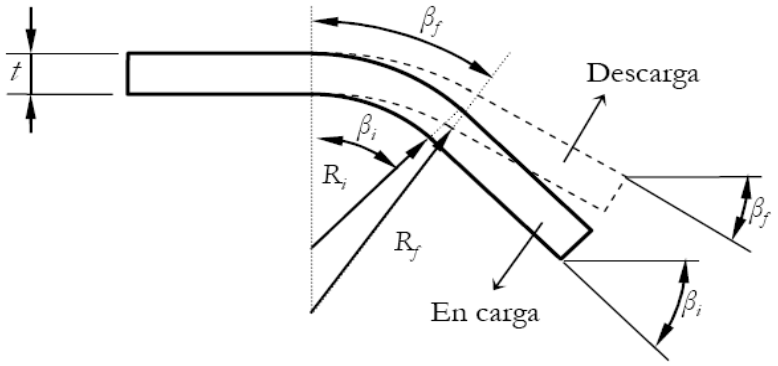


Figura 2.3. Recuperación ó Springback durante el proceso de doblado.(Universidad de Girona,2005)

Aunque se puede pretender eliminar la recuperación, resulta imposible ya que la descarga siempre provocará una mayor o menor recuperación, en la práctica, lo que se hace es compensarla usando varias técnicas. Las técnicas de compensación de la recuperación mayormente utilizadas se describen brevemente a continuación:

1. ***Sobredoblar*** (ver figura 2.2 página 10) la pieza en la matriz hasta un ángulo mayor que el deseado (aproximadamente el número de grados de recuperación) en la misma matriz en la que se realiza el doblado. El sobredoblado puede conseguirse también mediante una técnica de doblado rotatorio. La matriz superior tiene un balancín cilíndrico (Con ángulos de 90º) y esta libre para rotar, mientras se dirige hacia abajo, la chapa se sujeta y dobla por el balancín sobre la matriz más baja (yunque de matriz). Un ángulo de relieve en la matriz más baja permite sobredoblar la chapa al final de la carrera, por lo tanto compensando la recuperación.

2. ***Acuñar la región doblada por sujeción***, para que los esfuerzos de compresión queden altamente localizados entre la punta del punzón y la superficie de la matriz (asegurando una deformación plástica), usando, a veces, matrices diseñadas especialmente para ello. Esta técnica también se conoce como doblado a fondo. Si se realiza en una prensa mecánica necesita controlarse cuidadosamente pues este tipo de prensas pueden ejecutar fuerzas muy elevadas; si se realiza sobre matrices especiales se debe controlar un adelgazamiento del espesor excesivo que podría causar o el fallo de la pieza mientras se dobla o el fallo de la pieza en servicio.

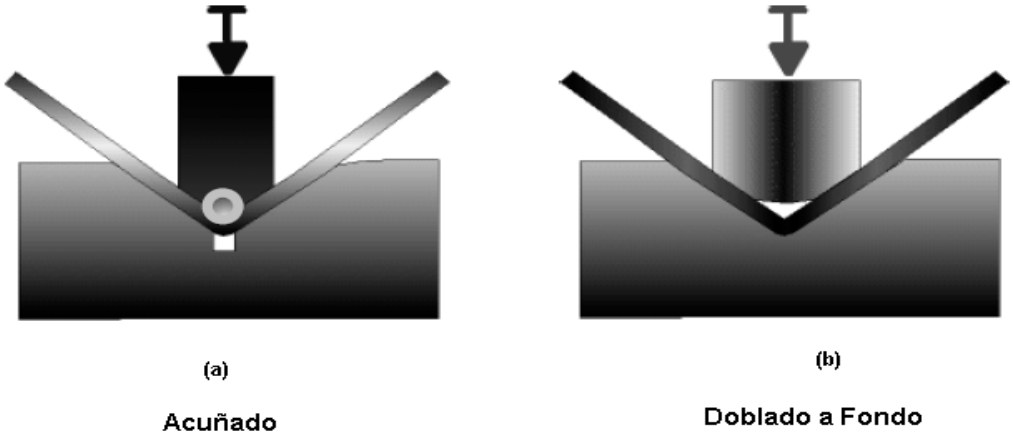


Figura 2.4. Compensación de la recuperación (a) Acuñado, donde se aplican unos esfuerzos de compresión en la zona doblada. (b) El proceso de doblado a fondo, donde se fija la posición final de la chapa de manera que el espacio entre el punzón y la matriz es menor que el espesor de la chapa.(Universidad de Girona, 2005).

3. ***Doblado por estiramiento***, en la que la pieza se sujeta traccionada mientras se dobla. El momento de doblado requerido para deformar la chapa plásticamente se reducirá mientras la tracción combinada en la chapa aumenta, debido al doblado de las fibras más exteriores y de la tracción aplicada. Por lo tanto la recuperación, que es un resultado de las tensiones no uniforme debido al doblado, también disminuirá.

4. **Regolpear,** la pieza en la matriz original o con utillajes especiales para reducir la recuperación hasta un nivel más bajo. Requiere una operación adicional pero puede llevar consigo poco o ningún equipamiento adicional, siendo una técnica igual de efectiva que el sobre doblado.

5. **Doblado en caliente**, Como la recuperación disminuye mientras disminuye la tensión de fluencia todos los demás parámetros siguen siendo los mismos, *el doblado debe ejecutarse a temperaturas elevadas* para reducir la recuperación.

6. Incluso a veces, la recuperación de un doblado puede usarse para compensar aquella que se produce en otro. Relacionada con este principio y mayormente usada para doblados en U se define lo que se conoce como técnica *de* **doblado doble** *(doubled-bend tecnique)*

b.1) Recuperación negativa

Bajo ciertas condiciones es posible que se produzca lo que se conoce como recuperación negativa o "springforwar". En ausencia del calificativo siempre consideraremos la recuperación como positiva la definida anteriormente. La recuperación negativa ocurre cuando el ángulo final de doblado es mayor una vez se ha descargado la pieza. Este fenómeno generalmente se asocia al doblado a fondo en V.

$$\beta_f > \beta_i ; R_i < R_f \qquad (2.9)$$

c) Fuerza de doblado.

c.1) Deducción de la carga de doblado según: (Rossi M, 1971).

Considerando:

Una chapa metálica puesta sobre una matriz de doblar se comporta, en algunos casos, como un sólido apoyado en los extremos y cargado en el centro (ver figura 2.5.) El esfuerzo necesario para su deformación se determinará de la siguiente forma:

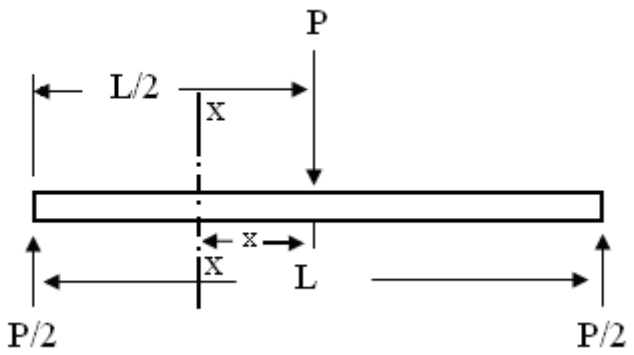


Figura 2.5. Viga simplemente apoyada con carga concentrada central.(Rossi M, 1971)

En este caso, con el objeto de obtener una sola expresión para el momento flector válido a lo largo de toda la viga, es conveniente considerar el origen para x en el centro, de este modo se tiene:

$$M_{XX} = E.I\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P}{2}\left(\frac{L}{2} - x\right) = \frac{P.L}{4} - \frac{P.x}{2} \qquad (2.10)$$

Para la condición X= 0; se tiene $M_{xx} = \frac{P.L}{4}$ (2.11)

Siendo;

M_{xx}: Momento flector aplicado a una viga simplemente apoyada en Kg . mm.

P: Carga externa en Kg.

L: Distancia entre apoyos en mm.

En la figura 2.6 se muestra la distribución de momento flector para una viga simplemente apoyada en sus extremos con carga centrada.

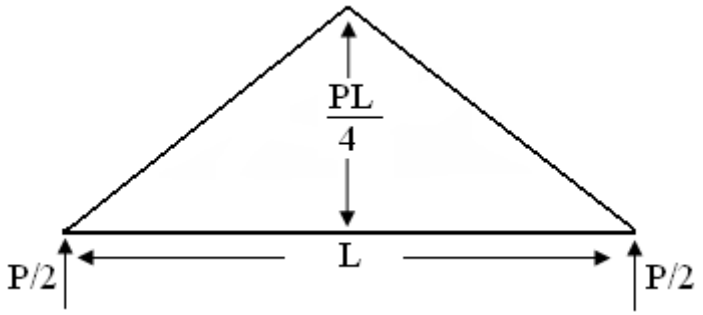


Figura 2.6. Máximo momento flector para una viga simplemente apoyada. .(Rossi M, 1971)

Las tensiones normales en un punto cualquiera de la sección transversal de la viga en la flexión se determinan por la fórmula:

$$\sigma_d = \frac{M.z}{I} \qquad (2.12)$$

Despejando M de la ecuación 2.12 se tiene:

$$M = \frac{\sigma_d.I}{z} \qquad (2.13)$$

Siendo,

M: Momento flector interno en la sección transversal en cuestión en Kg x mm.

I: Momento de inercia del área de la sección transversal respecto al eje neutro en mm^4.

z: Distancia desde el eje neutro de la sección transversal a la fibra más alejada en mm.

$\frac{I}{Y}$: Momento resistente en mm^3.

σ_d : Tensión por flexión necesario para la deformación en Kg. mm^2.

Para las secciones rectangulares, considerando el momento resistente mínimo, se tiene

$$\frac{I}{z} = \frac{b.t^2}{6} \qquad (2.14)$$

En donde;

t: Espesor de la chapa en mm.

b: Ancho de la chapa en mm.

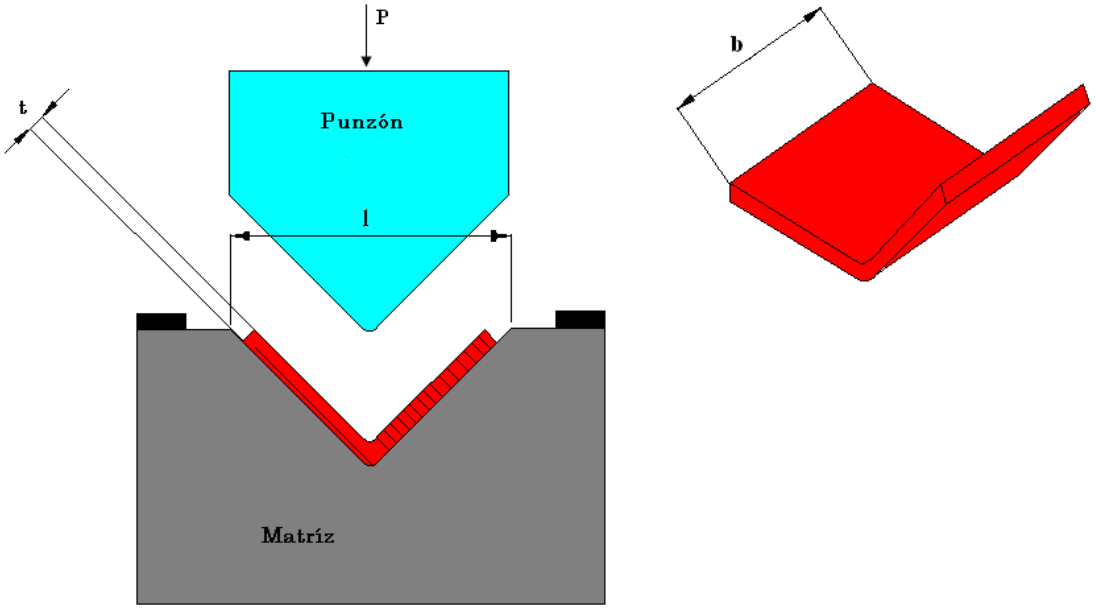


Figura 2.7. Momento del doblado, chapa apoyada en los extremos y con carga en el centro.

Igualando las dos fórmulas 2.11 y 2.13, tendremos:

$$\frac{P \times l}{4} = \sigma_d \times \frac{I}{z} \qquad (2.15)$$

Sustituyendo el momento resistente en la ecuación 2.15:

$$\frac{P \times l}{4} = \frac{\sigma_d \times b \times s^2}{6} \qquad (2.16)$$

Y simplificando:

$$\frac{P \times l}{2} = \frac{\sigma_d \times b \times s^2}{3} \qquad (2.17)$$

Obteniendo así finalmente:

$$P = \frac{2 \times \sigma_d \times b \times s^2}{3 \times l} \qquad (2.18)$$

En donde:

$\sigma_d = 2\sigma_R$ (Según Schule y Cincinnati). (2.19)

c.2) Deducción de la carga de doblado según: (García Romero, 2005).

La fuerza de doblado es la carga que se ejerce sobre la pieza a doblar mediante el punzón, y se traduce en momento de doblado. Las fuerzas de doblado pueden estimarse asumiendo que el proceso es el doblado simple (flexión pura) de una viga rectangular de espesor y ancho constante. De manera que la fuerza de doblado es función tanto de la resistencia del material, como de las condiciones geométricas de la sección rectangular (la longitud del doblado y el grosor de la pieza) y de la obertura de la matriz. Excluyendo la fricción, la expresión general para la fuerza máxima de doblado P es:

$$P = k\frac{l.t^2.S_{ut}}{W_d} \qquad (2.20)$$

donde **l** es la longitud de doblado, **t** es el espesor de la chapa, $\mathbf{W_d}$ abertura de la matriz, $\mathbf{S_{ut}}$ es el esfuerzo de tracción ultimo, y finalmente el valor **k,** un factor geométrico de la matriz. La ecuación (2.18) se ajusta bien a las situaciones en las que el radio del punzón y el espesor de la chapa son pequeños en comparación a la abertura de la matriz.

El factor **k** toma valores entre 1.2 y 1.33 para matriz en forma de V. Los valores de **k** para el doblado con dado deslizante y en matrices en U están entre 0.25 y 2 veces los valores de **k** para matriz en V. Otros estudios e investigaciones consideran un valor único de **k** para cada tipo de doblado, igual a 0.33 para el doblado en dado deslizante o un valor igual a 0.66 para el doblado en matriz en U, ambos están en el intervalo mencionado anteriormente. El efecto de varios factores sobre la fuerza de doblado, como por ejemplo la fricción, puede incluirse en el factor **k**. [5]

A continuación se muestra la ecuación (2.19) propuesta para calcular la fuerza de doblado para el método de doblado rotativo, según referencia [4].

$$P = 2.25 \times \frac{S \times b \times t^2}{L} \qquad (2.21)$$

donde:

S: Es el esfuerzo último nominal de tracción

b: Ancho de lámina.

t: Espesor de lámina.

L: Distancia de separación.

La tabla 2.2 muestra un resumen de ecuaciones para determinar la carga de doblado según diferentes referencias bibliográficas consultadas.

Tabla 2.2 Resumen de formulas para determinar la carga de doblado

Ecuación para la fuerza de Doblado	Fuente
$P_v = 1.33\dfrac{S.l.t^2}{w_d}$	Fuerza de doblado en V. [5]
$p_R = \dfrac{2.25.S.b.t^2}{L}$	Fuerza para el doblado rotativo. [4]
$P_b = \dfrac{2.\sigma_d.b.S^2}{3.L}$	Fuerza de doblado en V. [7]
$P_b = \dfrac{\sigma_0.L.h^2}{2.\left(R+\dfrac{h}{2}\right)}.Tg\left(\dfrac{\alpha}{2}\right)$	Fuerza de doblado en V.[6]
$P_b = \dfrac{W.h^2.(TS)}{W_b}$	Fuerza de doblado en V. [8]

Durante el proceso de doblado, la fuerza de doblado varía en función del desplazamiento del punzón, el desplazamiento aumenta desde cero hasta un valor máximo y debe decrecer cuando el doblado se ha completado. Mientras que en el doblado al aire, la fuerza de doblado no aumenta otra vez después de que empieza a decrecer, como se muestra en la figura 2.8. En el caso de doblado a fondo, la fuerza aumenta acusadamente mientras el punzón llega al fondo de la matriz. Tan pronto como la pieza de trabajo empieza a contactar con los lados de la matriz, la fuerza progresa sujeta a las restricciones de la matriz. Mientras los puntos de contacto entre la matriz y la chapa se mueven hacia el fondo de la matriz, el brazo de momento efectivo se reduce, lo que provoca que la fuerza crezca rápidamente.

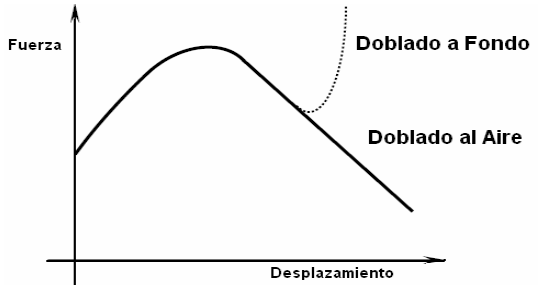


Figura 2.8. Diagrama de fuerza de proceso – desplazamiento de punzón para el doblado a aire y el doblado a fondo

Este crecimiento mientras la chapa se presiona contra el fondo de la matriz durante la acuñación, aumenta incluso en una proporción más pronunciada y se vuelve infinita. Para punzones con radio de punzón y ancho de matriz suficientemente pequeños, se alcanza un pico en la fuerza de doblado al aire. Si el radio de punzón aumenta, y el pico de fuerza en el doblado al aire aumenta en magnitud y cambia a desplazamientos de punzón mayores, la fuerza máxima en la etapa de doblado al aire de un doblado en V o a fondo al final se pierde. La finalización del proceso de doblado al aire antes de que el pico de fuerza pueda alcanzarse causa el efecto anterior. La magnitud de la fuerza de doblado aplicada durante la acuñación depende de la precisión requerida de la pieza acabada (por ejemplo el radio y el ángulo).

d) Capacidad de Doblado

Los parámetros anteriores definidos, ayudan a hacerse una idea de la capacidad de doblado o "*bendability*" de una pieza. La capacidad de doblado en un amplio rango de materiales se relaciona directamente con el porcentaje de área de reducción, A_r, obtenido en un ensayo de tracción uniaxial. De ahí que el parámetro principal, radio de doblado mínimo que se utiliza para determinar esta capacidad de doblado sea función de la variable A_r. Si el valor de A_r aumenta, o bien por la aportación de calor

o bien por la aplicación de presión hidrostática, la capacidad de doblado de un metal puede aumentarse. También se pueden emplear otras técnicas para aumentar el entorno de compresión en el doblado, tales como aplicar fuerza de compresión en el plano de la chapa durante el doblado para minimizar las tensiones de tracción en las fibras más exteriores del área de doblado.

Para valores elevados de la relación (R/t), en chapas estrechas, longitud de doblado pequeñas, se agrietan en las aristas. En cambio, en chapas más anchas se agrietan en el centro, donde la tensión biaxial que aparece es más alta.

La capacidad de doblado también depende de las condiciones de arista de la chapa que se esta doblando. Las aristas irregulares son puntos de concentración de tensión y la capacidad de doblado disminuye cuando la irregularidad de la arista aumenta. Otro factor importante que facilita el agrietamiento de aristas es la cantidad y forma de las inclusiones en la chapa metálica. Las inclusiones en forma de columna son más perjudiciales que las inclusiones en forma globular. Por ese motivo, la anisotropía de la chapa también es importante para la capacidad de doblado. También es significativo para la capacidad de doblado es la cantidad de trabajo en frío que las aristas pueden soportar durante el corte por cizalla. Además, la eliminación de las regiones trabajadas en frío, por desbardado, mecanización o tratamiento térmico, mejoran enormemente la resistencia al agrietamiento de arista durante el doblado.

e) **Longitud de desarrollo inicial de la chapa o longitud de chapa desplegada.**

* Tolerancia o corrección de longitud de doblado.

La longitud de chapa desplegada o longitud de desarrollo inicial de la chapa (L_o) es la longitud de partida (chapa plana) que debe cumplir la chapa para después de su

deformación, mediante el proceso de doblado, la pieza final cumpla las dimensiones de diseño especificadas. El punto critico de la determinación de esta longitud se halla en el cálculo, en las zonas dobladas que sufren la deformación, de la longitud de la capa que no presenta ni deformación por tracción ni por compresión. La longitud por tanto de la línea neutra.

Al principio del proceso de doblado, existe un plano neutro en la mitad del grosor de la chapa (coincide la capa neutra (R_u) con la capa media inicial (R_{mo}). La situación cambia durante el proceso de doblado. Los planos sufren un desplazamiento mientras el proceso de doblado se ejecuta. Como resultado, los planos con deformaciones iguales a cero y las tensiones iguales a cero no coincidirán nunca más en una chapa doblada.

Para reflejar la situación anterior, algunos de los radios característicos de una chapa doblada se muestran en la figura 2.9. El material entre el radio exterior (R_0) y la chapa inicial media (R_{mo}) han sido sometidos a tracción durante el doblado. El material ente R_{mo} y R_g primero, se han comprimido y posteriormente se ha fraccionado, de modo que el efecto de la deformación plástica inicial puede aparecer en esta zona. La deformación total final del plano indicado por R_u es igual a cero, se observa que se desplaza desde la situación inicial donde coincida con R_{mo} y no está en el plano medio con carga final (R_m). El material entre R_g y R_i se ha comprimido durante el proceso de doblado.

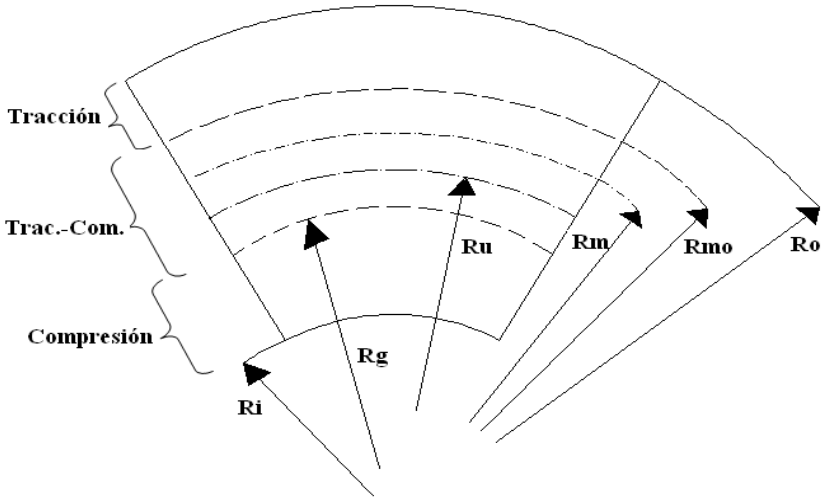


Figura 2.9. Radios característicos de una chapa doblada.(Universidad de Girona, 2005)

Suponiendo que el espesor de la chapa permanece constante, la longitud de un plano con deformación total igual a cero (por lo tanto, la longitud de la línea neutra en R_u) se puede calcular. La derivada relativa de la longitud, dL/L_m (L_m es la longitud del plano medio), aumenta mientras el radio entre el radio de doblado y el espesor de la chapa, (R_m / t), disminuye; Sin embargo el grosor de la chapa no se mantiene constante si no que disminuye cuando la chapa se endurece por deformación. Este efecto se vuelve más fuerte para aumentar el endurecimiento por deformación y disminuye el radio Rm / t. Toda esta situación hace comportar que el cálculo de la longitud neutra y en consecuencia de la longitud desplegada de la chapa sea complicado.

Finalmente, para realizar un cálculo aproximado de esta longitud se asumen hipótesis. No existen modelos analíticos para calcularla en el caso de que los radios de doblado sean pequeños, donde tales hipótesis no se cumplen, como ocurre en los productos industriales.

Así pues, su cálculo se basa en datos experimentales como los que proporcionan los estándares ASM o DIN. Ambos hacen uso de ecuaciones con las que hay que calcular un factor de corrección basado en datos experimentales.

El estándar ASM usa:

$$L_U = [t.p + R_i] \bullet 0.01745.\beta \qquad (2.20)$$

Con:

$$p = \frac{R_i}{t} \bullet 0.04 + 0.3 \qquad \text{Para } \frac{R_i}{t} < 1$$

$$p = \left[\frac{R_i}{t} - 1\right] + 0.06 + 0.34 \qquad \text{Para } \frac{R_i}{t} \geq 1 \qquad (2.21)$$

Donde β está en grados, R_i,t y L_u son los que se muestran en la figura 2.10 (a).

Para el estándar DIN se usan las siguientes ecuaciones para el acero:

$$L_o = a + b + v \qquad v = \pi.\left(\frac{180 - \alpha}{180}\right).\left(R_i + \frac{1}{2}t + k\right) - 2.(R_i + t)$$

$$k = 0.65 + 0.5.\log\left(\frac{R_i}{t}\right) \qquad R_u = R_i + \frac{k.t}{2} \qquad (2.22)$$

Con α en grados y a, *b*, R_i y t se muestran en la figura 2.10 (b). L_o es la longitud total de la chapa desplegada.

Se propone que $R_i = R_m$ cuando la relación (R_i / t) sea grande. De acuerdo al estándar DIN esto sucede cuando dicha relación es mayor a 5 o más, mientras que de acuerdo al estándar ASM el valor 3.67 es suficiente.

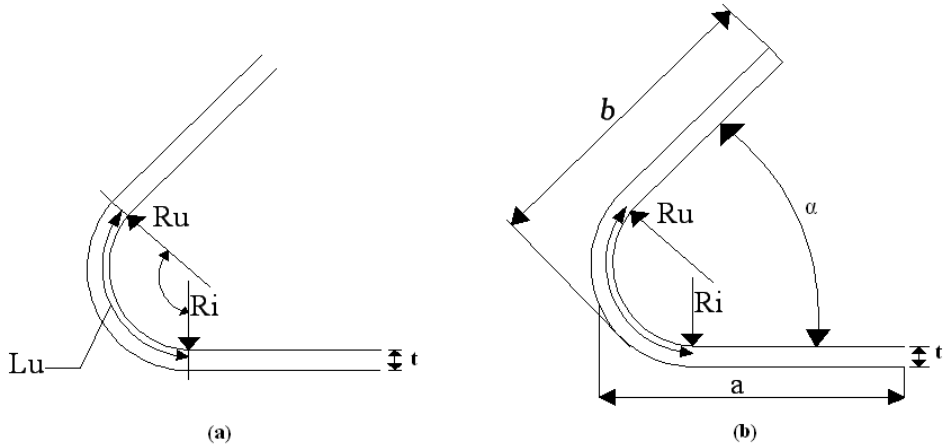


Figura 2.10. Longitud del arco en la capa neutra según el estándar (a) ASM o (b) DIN.(Universidad de Girona,2005)

Un método parecido al estándar DIN, permite calcular la longitud desplegada de la chapa, Lo, sumando a las partes rectas lo que se llama "bending allowance" o tolerancia, o corrección de longitud de doblado, que para determinados ángulos y materiales se puede encontrar tabulada en diferentes manuales, por ejemplo en (Society of Manufacturing Engineers).

2.3 Recuperación o "Springback"

En el apartado (2.2) *Parámetros relacionados con el doblado*, ya se introdujo el término recuperación o "Springback" como uno de los parámetros principales asociados al proceso de doblado y que es a la vez, uno de los factores primordiales que afectan la calidad de un componente estampado. La recuperación se define como el movimiento que se produce en una pieza para intentar restituir su posición original después de una operación de deformación, mayormente un proceso de doblado.

El doblado es una operación que se usa comúnmente en la fabricación de un número importante de piezas de chapa. Muchas operaciones de conformado por deformación implican el doblado al aire, a fondo, etc. De materiales ferrosos y no ferrosos, de chapas de diferentes espesores, de barras con cualquier tipo de sección y de alambres que se utilizan para dar forma a piezas que posteriormente se montarán. Luego el que se produzca recuperación descontrolada en los dobleces provoca dimensiones inaceptables y problemas de montaje, afectando de manera adversa a la calidad del producto final.

Adema el carácter no constante de la recuperación se añade a las dificultades para obtener productos de calidad constante.

Cuando se estudia el fenómeno de la recuperación se diferencia claramente dos estados, como es mostrado en la figura 2.11

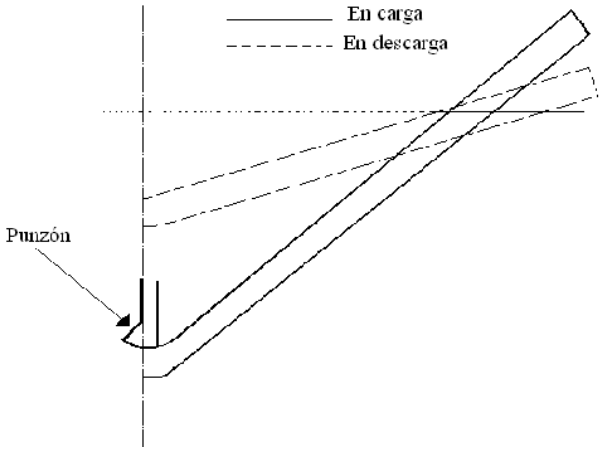


Figura 2.11 Definición de estados para el estudio de la recuperación

* *Estado inicial o en carga*. Durante esta etapa de conformado, el punzón está ejerciendo una fuerza de doblado sobre la chapa; en el caso de doblado al aire el valor de la penetración del punzón es el adecuado para que la chapa nunca llegue a tocar el fondo de la matriz completamente.

* *Estado final de descarga.* Esta etapa comienza desde el momento en el que la carga, que está aplicada por una prensa, se deja de ejercer sobre la chapa. Es durante la fase de descarga cuando una porción de la deformación se recupera causando un cambio en la forma de la pieza final.

Para reducir la recuperación durante el proceso en carga, se tiene que aplicar una tracción, durante o después del proceso de doblado, y eso reduce el momento de doblado y aumenta el nivel de deformación y la fluencia plástica. Pero entonces las condiciones del proceso ya no son las del doblado al aire. Además de la aplicación de la tracción para reducir la recuperación, se pueden aplicar fuerzas de compresión después del doblado a través de prensado de revestimiento "pad pressing", llevando a fondo o regolpeando "restriking" la chapa en el fondo, en los dados o en las aristas para causar fluencia de compresión. Otra manera de reducir la recuperación es la aplicación de otra técnica de proceso, la conocida como "doble – doblado" en la que el extremo se dobla dos veces en situaciones diferentes con un juego de matriz reducido. Por lo que al final, sobre doblar el producto a un ángulo precalculado, para obtener el ángulo requerido después de la recuperación, parece ser la técnica mas adecuada para compensar la recuperación en el doblado al aire.

Aunque existen estos métodos para salvar o compensar la recuperación, todavía es difícil para un diseñador definir procesos de deformación de chapa y que se elimine totalmente el problema de la recuperación, pues afecta tanto el diseño de la pieza /producto final, como el diseño de la matriz. Por este motivo se desarrollan

estudios relacionados con la recuperación y el diseño de la pieza y la recuperación y el diseño de la matriz.

Consecuentemente, minimizar la recuperación es también uno de los problemas más molestos en el diseño de matrices y gran preocupación de los diseñadores de herramientas de deformación de chapa, pues puede causar serios problemas en el montaje de piezas y puede llevar a caras modificaciones de las herramientas de deformación. Si la recuperación no se puede predecir exactamente, uno debe intentar repetidamente obtener parámetros de la deformación adecuados para compensar la recuperación. Luego, predecir la recuperación es también importante cuando se diseña una matriz para un proceso de doblado.

2.4 Definiciones iniciales de recuperación

Como se observa en la figura 2.12 (página 36) el ángulo final de doblado (β_f) después de la recuperación es menor que el que tenía la chapa mientras estaba sometida al esfuerzo del punzón (β_i).

$$\beta_f < \beta_i \qquad (2.23)$$

Por lo tanto, la curvatura disminuye durante la recuperación y consecuentemente el radio de doblado final (R_f) es mayor que el radio de doblado bajo carga (R_i)

$$R_f > R_i \qquad (2.24)$$

Para hablar cuantitativamente de la recuperación, es conveniente la definición de una relación adimensional que permita medirla. Es habitual cuantificar el factor de recuperación a través de relaciones entre los valores de ángulo de doblado en carga β_i y en descarga β_f , o bien mediante relaciones entre los valores de radio en carga R_i y final o en descarga R_f.

Como un posible parámetro para cuantificar la recuperación, se define el factor de recuperación K_r como coeficiente entre los ángulos de doblado:

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} \qquad (2.25)$$

Un valor de K_r igual a la unidad indicará la ausencia de recuperación, mientras que un valor iguala cero indicará una recuperación elástica completa, como en el caso de un resorte donde solamente ha aparecido deformación elástica.

Otras aproximaciones cuantifican la recuperación como la diferencia angular entre los ángulos en el estado de carga y en el de descarga (figura 2.13 , donde θ es el ángulo de doblado interior, comprendido entre alas de la pieza doblada), teniendo como parámetro valorativo el ángulo de recuperación Δβ ó Δθ, que se define como.

$$\beta_i = \beta_f + \Delta\beta \text{ ó } \theta_f = \theta_i + \Delta\theta \text{ siendo } \Delta\beta = -\Delta\theta \qquad (2.26)$$

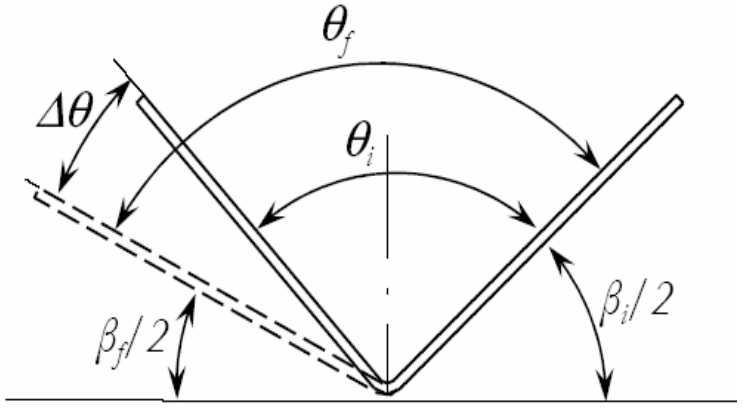


Figura 2.12 Variación del ángulo Δθ durante la recuperación de una chapa en V.(Universidad de Girona, 2005)

Relacionar el factor de recuperación y el ángulo de recuperación puede resultar fácil. Si el valor K_r se conoce, por ejemplo de forma experimental, el ángulo de recuperación se puede determinar por:

$$\Delta\beta = \left(\frac{1}{K_r} - 1\right).\beta_f$$

$$\Delta\theta = (1 - K_r).\theta_f \qquad (2.27)$$

Estas ecuaciones sólo pueden aplicarse en situaciones de doblado ideal, donde la curvatura se mantenga constante a lo largo de toda la longitud de doblado.

Para algunos casos es usado el coeficiente adimensional R_i / R_f. Aunque comúnmente R_i / R_f se le puede definir como "relación de recuperación" se le puede llamar de manera más adecuada "relación de conformidad". Es el índice de cuánto la sección doblada se ajusta a la forma de la matriz, o a la forma en carga en caso de doblado al aire, después de la descarga. Igual que el factor de recuperación K_r, se

puede determinar en términos de radios R_i y R_f . Considerando que la longitud de arco deformado es la misma antes y después de la carga la relación que se obtiene bajo condiciones de doblado ideal, como lo es un doblado de momento puro, es

$$\left(R_i + \frac{t}{2}\right).\beta_i = \left(R_f + \frac{t}{2}\right).\beta_f \qquad (2.28)$$

A partir de la relación (2.28) se obtiene una expresión para K_r como:

$$K_r = \frac{\beta_f}{\beta_i} = \frac{\left(\frac{2R_i}{t}\right)+1}{\left(\frac{2R_f}{t}\right)+1} \qquad (2.29)$$

En esta expresión se observa que el factor de recuperación depende solamente de la relación R/t.

Definimos de nuevo la cantidad de recuperación elástica, pero esta vez incluyendo las propiedades del material que gobierna su comportamiento elástico. En este caso el factor de recuperación depende del nivel de tensión o esfuerzo de fluencia del material (S_y) y del modulo de elasticidad del material (E). De este modo la recuperación elástica aumenta con el nivel de tensión y con la disminución del modulo elástico.

Basándose en esta observación, una formula aproximada se desarrolla para estimar la recuperación es la siguiente:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4.\left(\frac{R_i S_y}{Et}\right)^3 - 3\left(\frac{R_i S_y}{Et}\right) + 1$$ (Universidad de Girona, 2005) (2.30)

Esta ecuación se ha convertido en una expresión simplificada de referencia para el cálculo de la recuperación y aparece en textos básicos de procesos de fabricación.

Existe otra ecuación simplificada en función de la hipótesis de simplificación que escoge para obtener el valor de recuperación (en este caso, Δβ) en la descarga de una chapa con comportamiento elástico perfectamente plástico. Obtiene un ángulo de recuperación

$$\Delta\beta = -3\left(\frac{R}{t}\right)\left(\frac{S_y}{E`}\right)\beta \qquad (2.31)$$

Donde $E' = \frac{E}{1-v^2}$ para cumplir con las condiciones de deformación plana y $R = R_i + \frac{t}{2}$.

A parte de estas sencillas expresiones para cuantificar de manera aproximada la recuperación, se han desarrollado de manera experimental tablas y gráficos que cuantifican la recuperación para determinados metales específicos que están disponibles en manuales y libros de referencia o se realizan estudios experimentales.

2.4.1 Variables de influencia sobre la recuperación.

El efecto de influir sobre determinadas variables que aumentan la recuperación viene marcado, en un primera aproximación, por la relación (R / t) y la relación (Sy / E), tal como se ve reflejado en las formulas Nº 2.29 y 2.30. De manera que se consideran como tendencias clásicas en el aumento de la recuperación las que son consecuencia de las relaciones anteriores y más las que se enumeran a continuación:

* La disminución del espesor de la chapa (t).
* El aumento del esfuerzo de fluencia (Sy).
* La disminución del modulo de elasticidad (E).
* El aumento del módulo tangente (pendiente de la curva esfuerzo / deformación real ($d\sigma_T$/ $d\varepsilon$) cuando se ha excedido el esfuerzo de fluencia (Sy).

La recuperación también se ve influenciada de manera muy importante por el factor geométrico que viene definido por el propio ángulo que se requiere alcanzar. Así que cuanto mayor sea el ángulo de doblado que pretenda alcanzarse, mayor será la recuperación.

La cantidad de compresión en la zona de doblado y el método de doblado en función del material son factores que deberán tenerse en cuenta, pues también son factores que afectan a la recuperación.

Se considera que la fuerza del proceso tiene solo una influencia menor sobre el ángulo de recuperación. La influencia de otros factores, tal como la fricción o el coeficiente de la ley de endurecimiento por deformación, entre otros, se evalúan en

función de la conformidad de la verificación del modelo en el que son estudiados.

Las observaciones generales de en cuanto a que parámetros influyen la recuperación.

Algunos de los cuales coinciden con los enunciados anteriormente. Estos parámetros son:

* La recuperación aumenta con el esfuerzo o la resistencia de fluencia, el endurecimiento y la anisotropía, desde el momento en que estos valores son mayores, mayor es la resistencia a la fluencia plástica.

* La recuperación disminuye con el aumento del modulo elástico (E) porque la resistencia al doblado elástico aumenta con el modulo de elasticidad.

* El doblado de una chapa fina con un radio de doblado grande (R), o un relación (R / t) relativamente grande mejora la recuperación.

* El doblado de una chapa ancha bajo condiciones de deformación plana tiene una recuperación mayor que si el doblado fuera de una chapa estrecha bajo condiciones de tensión uniaxial para materiales isótropos.

Mientas el control de la dispersión de la recuperación necesita radios de doblado pequeños, se prefieren radios de doblado mas grandes en vista de las propiedades mecánicas de las piezas dobladas. Luego, es necesario establecer compromisos entre estas variables para obtener piezas a la precisión deseada.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología que fue necesaria aplicar para lograr los objetivos planteados.

3.2 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación presentado es experimental de carácter exploratorio – descriptivo; es exploratorio; ya que aún cuando se trata de un tema ampliamente estudiado, la vía utilizada en esta investigación no ha sido explorada hasta el momento, se utilizan dos procesos diferentes de doblado (en "V" y dado basculante) para cuantificar en forma comparativa los objetivos del trabajo; y el carácter descriptivo se debe fundamentalmente a que mediante el desarrollo de la investigación, se caracteriza el comportamiento de un material de acero AISI 1008 en estado recocido doblado en "V" y con dado basculante para determinar la recuperación elástica que soporta dicho material, el ángulo de doblado final y la curvatura de la pieza, la influencia del espesor de la chapa sobre la recuperación elástica, finalmente se determina comparativamente la carga de doblado en "V" y en dado basculante tanto teórica como experimentalmente.

3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En el marco de la investigación planteada, cuyo objetivo central está referido a cuantificar la recuperación elástica que soporta la chapa (ángulo de doblez final) sometida ha doblado con dado basculante y doblado en "V" en láminas de acero AISI 1008 recocido.

En miras de alcanzar los objetivos planteados es necesario establecer una serie de fases metodológicas que describen los pasos a realizar y se indican a continuación:

3.3.1 FASE I. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL AISI 1008

* Registrar la composición química (Empleando como método de análisis una espectrofotometría de absorción atómica) acero al carbono AISI 1008.

3.3.2 FASE II. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA DOBLADO Y TRACCIÓN.

* Cortar láminas para el doblado, de espesores t = 0.9mm, t = 1.1mm, t = 2mm, t =3.1mm) con un máximo de 200 mm de largo, en total 40 probetas.
* Cortar 5 láminas para probetas de tracción (una por cada espesor).
* Recocer las láminas a la temperatura de 550 ºC y 20 minutos de permanencia a la misma temperatura para homogenizar la estructura del material.
* Mecanizar las probetas de cada espesor según norma ASTM A- 370 para el respectivo ensayo de tracción.

3.3.3 Fase III. REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE TRACCIÓN.

* Realizar ensayos destructivos a un total de 5 probetas de acero 1008 (una por cada espesor), para determinar el esfuerzo de tracción máximo.

3.3.4 FASE IV. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ Y PUNZÓN PARA EL DISPOSITIVO DE DADO BASCULANTE.

* Diseño del punzón de dado basculante y matriz.

* Mecanizado del punzón y matriz.
* Pruebas pilotos de resistencia y doblado.

Nota: El dispositivo de doblado en "V" estaba construido y a la disposición para los ensayos de doblado en "V".

A continuación se muestra en las siguientes figuras 3.1 y 3.2 respectivamente el bosquejo básico del porta punzón – matriz y el dibujo del dispositivo construido para realizar el proceso de doblado con dado basculante, en el apéndice A se incluye los planos asociados y demás detalles para dicho dispositivo**.**

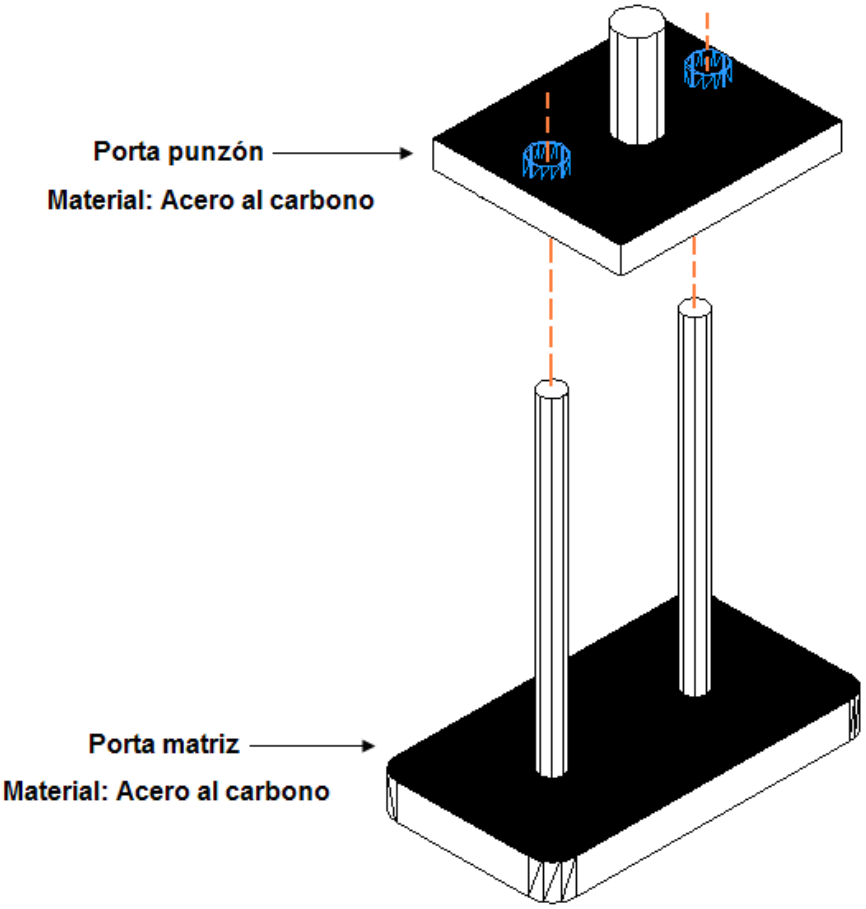


Figura 3.1 Bosquejo básico del porta punzón y matriz para el proceso de doblado con dado basculante. (Fuente propia)

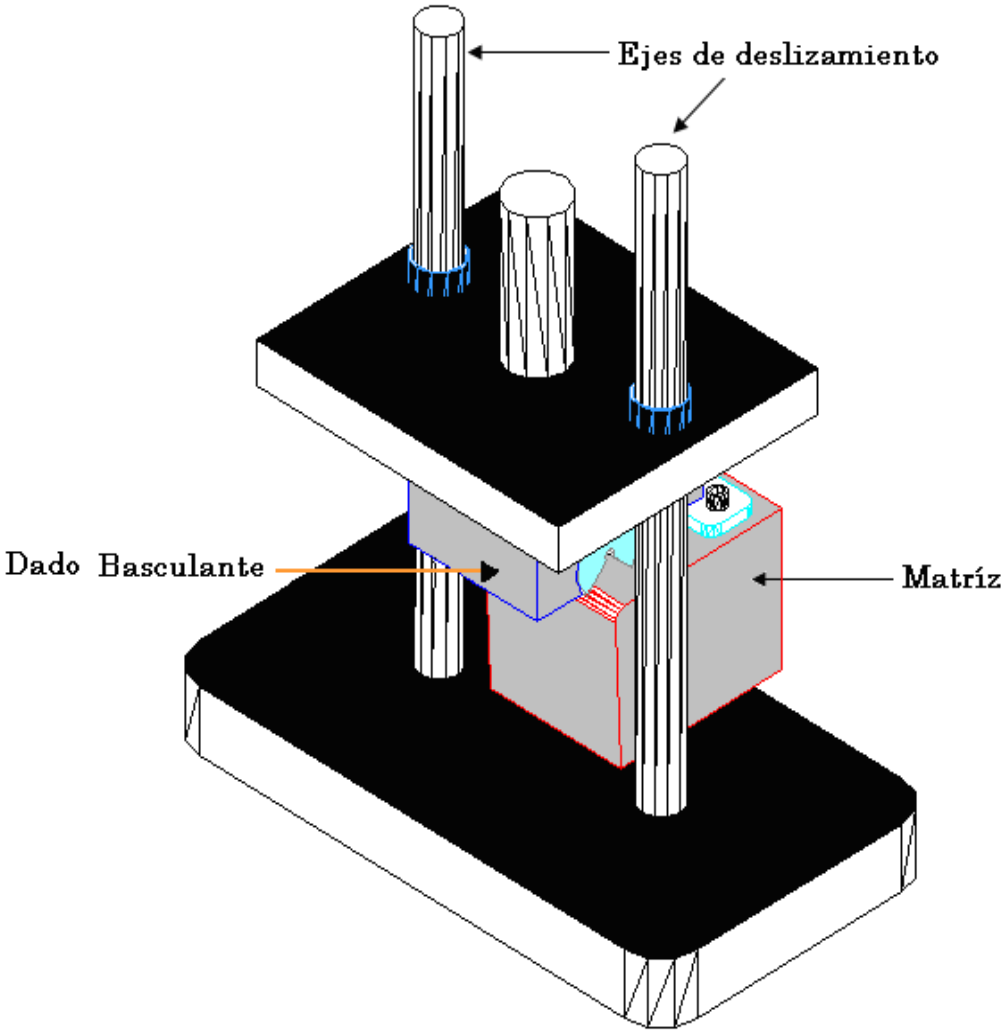


Figura 3.2. Dispositivo construido para el proceso de doblado con dado basculante. (Fuente: propia).

3.3.5 FASE V. ENSAYOS DE DOBLADO EN LÁMINA DE ACERO AL CARBONO AISI 1008.

* Ensayos de doblado en "V"
* Ensayos de doblado con dado basculante.
* Registros de gráficos en la maquina de ensayos universal "Galdabini".

3.3.6 FASE VI. EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA QUE SOPORTA LA PIEZA (ÁNGULO DE DOBLEZ FINAL) Y LA CARGA DE DOBLADO PARA AMBOS PROCESOS.

* Registrar los datos, observaciones realizadas de los ensayos de doblado y estudios establecidos, cálculos teóricos a las diferentes condiciones, luego realizar análisis de los resultados obtenidos.

* Establecer conclusiones y recomendaciones.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA.

* Debido a la repetibilidad que arrojan los resultados de los ensayos en este Trabajo Especial de Grado, la población se encuentra representada por 5 muestras por cada espesor de la làmina para un total de 20 muestas para el doblado en "V" de acero AISI 1008 y 20 muestras para el doblado con dado Basculante de acero AISI 1008.
* La población en total esta constituida por 40 probetas en para el proceso de doblado.
* 5 probetas par el ensayo de tracción de laminas en diferentes espesores de acero AISI 1008, recocido.

El flujograma de la **figura. 3.3** Representa el esquema del diseño de la investigación que se adopta como estrategia a seguir para alcanzar los objetivos planteados.

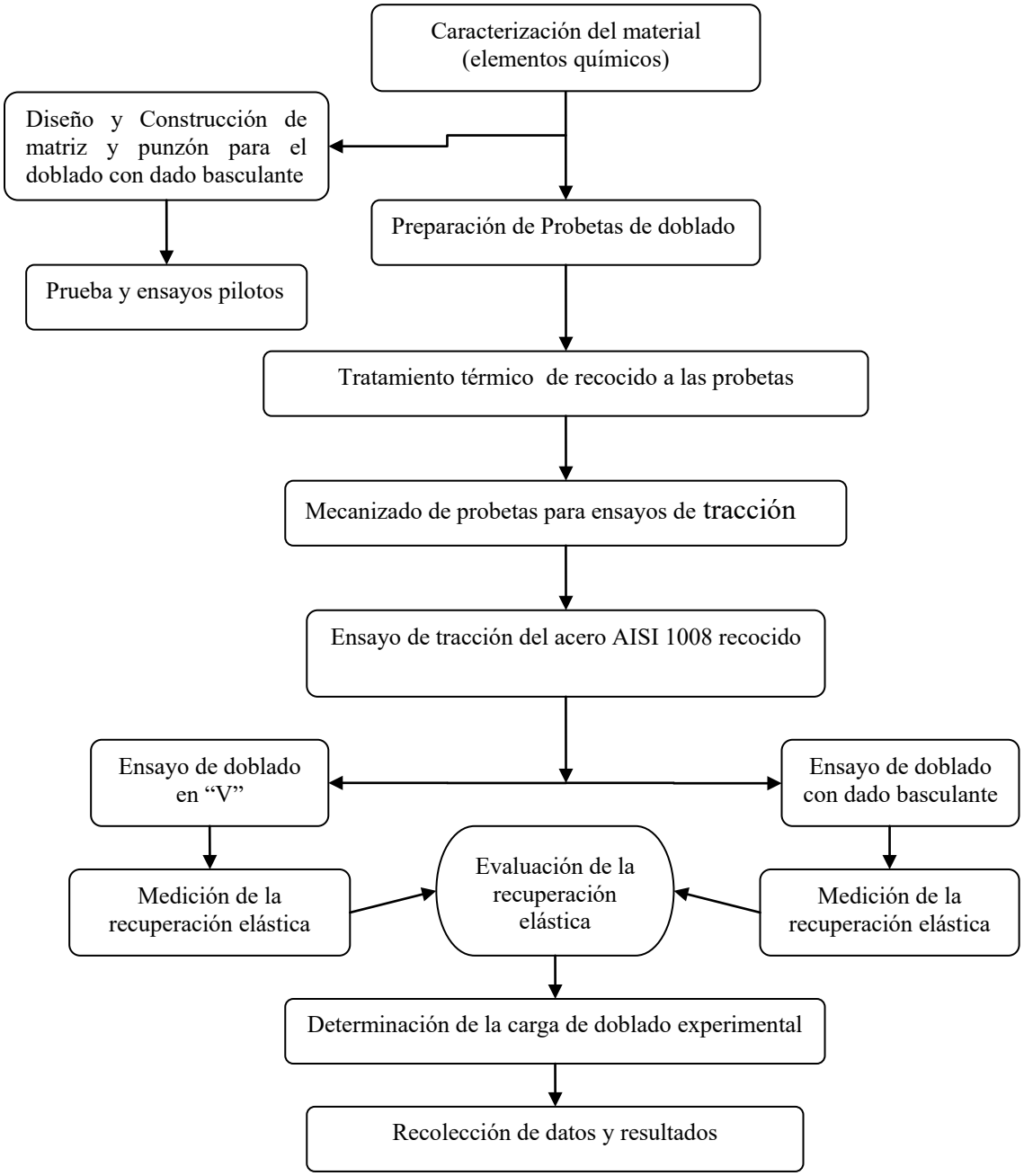


Figura. 3.3 Flujograma del diseño experimental

3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las técnicas que se emplearan para la recolección de datos son: La observación directa en los procesos de doblado en "V" y doblado con dado basculante, y la obtención de las gráficas de carga de doblado, así como la medición directa con instrumentos de la recuperación elástica.

Los instrumentos que se emplearan para la recolección de datos son: un control computarizado acoplado a un equipo universal de ensayo de materiales (GALDABINI LUTON.), el cual permitirá registrar los datos obtenidos de ensayos de tracción y ensayo de doblez, goniómetro para medir ángulo final de doblez después de la recuperación elástica, vernier para medir espesores, cámara fotográfica y un computador para recopilar la información bibliográfica.

3.6 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.

Una vez organizados los datos obtenidos de cada ensayo, se procederá a aplicar técnicas de procesamiento de datos tales como tablas y gráficos, a fin de obtener las tendencias de la información registrada, realizar comparaciones y de esta manera inferir entre las variables estudiadas.

Materiales y equipos a utilizar**:**

*Láminas de acero AISI 1008
*Máquina universal de ensayo de tracción (figura. 3.7), página 53
*Equipo de doblado en "V" (figura.3.8), página 54
*Equipo de doblado con dado basculante (figura. 3.9), página 54
*Limadora para mecanizado (figura.3.11), página 56

* Fresadora universal (figura. 3.12), página 56
* Torno convencional (figura. 3.13), página 56
* Hornos de tratamiento térmico (Figura. 3.14), página 56
* Goniómetro para medición de ángulos (figura. 3.15), página 57
* Guillotina (Figura. 3.16), página 57
* Vernier para medición de espesores (figura. 3.17), página 57
* Sierra mecánica (figura. 3.18), página 57
* Sierra mecánica de cinta (figura.3.19). página 57
* Cámara fotográfica digital.

3.7 DESARROLLOS DE LAS FASES METODOLÓGICAS.

El material que se empleó para realizar los ensayos de doblado en "V", doblado con dado basculante es un acero al carbono AISI 1008; es un material que tiene una ductilidad excelente lo que permite que se utilice en muchas operaciones de formado en frío entre otras operaciones, además de se fácil de conseguir en el mercado; el material fue presentado en láminas a diferentes espesores. Por esta razón se tomo el AISI 1008 cuya composición se refleja en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química del Acero AISI 1008

% C	**% Mn**	%Si
0.12	0.2	ND

Fuente: (Laboratorio de Investigación y Extensión Escuela de Ing. Química UC,2008) ver apéndice

ND: No se detecto

3.7.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

3.7.1.1 PROBETAS PARA DOBLADO CON DADO BASCULANTE.

Inicialmente pletinas de un metro de longitud, se obtuvieron 20 probetas de 100 mm de longitud para diferentes espesores calibrados, según tabla 3.2.

3.7.1.2 PROBETAS PARA DOBLADO EN "V".

Pletinas de un metro de longitud, se obtuvieron 20 probetas de 100 mm de longitud para diferentes espesores calibrados, según tabla 3.3.

Tabla 3.2 PROBETAS PARA DOBLADO CON DADO BASCULANTE, MATERIAL AISI 1008

CANTIDAD	ESPESOR (mm)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)
5	0.9	100	30
5	1.1	100	30
5	2	100	30
5	3.1	100	30

Tabla 3.3 PROBETAS PARA DOBLADO EN "V" MATERIAL AISI 1008

CANTIDAD	ESPESOR (mm)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)
5	0.9	100	30
5	1.1	100	30
5	2	100	30
5	3.1	100	30

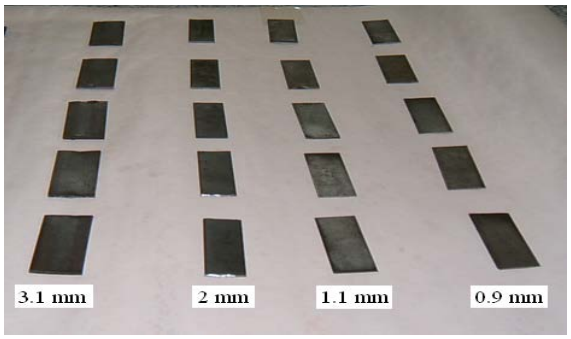


Figura 3.4. Probetas cortadas para ensayos de doblez

3.7.1.3 TRATAMIENTOS TÉRMICO DE LAS PROBETAS.

Se tomaron 5 probetas adicionales de espesores diferentes; y se le realizó un tratamiento térmico de recocido a 550 ºC y 20 minutos de permanencia en el horno a la misma temperatura para terminar de homogenizar la estructura del material.

3.7.1.4 MECANIZADO DE LAS PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCIÓN.

Las probetas para el ensayo de tracción se diseñaron según la norma ASTM A-370 (fig.3.5). Posteriormente los ensayos se realizaron utilizando la máquina GALDABINI de ensayo mecánicos, dicho ensayo consiste en someter a una probeta normalizada, a una fuerza axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta; en la figura 3.7 se observa el equipo de tracción utilizado.

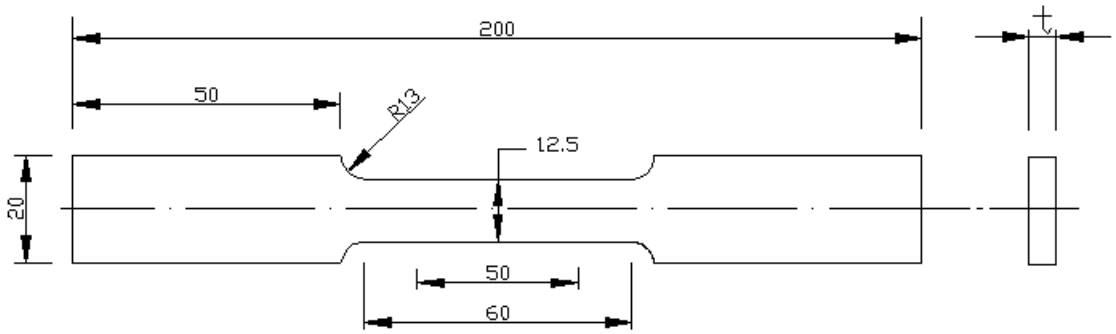


Figura 3.5. Dimensiones de la probeta de tracción según norma ASTM A-370

Todas las dimensiones en mm. *Fuente:* Norma ASTM A- 370

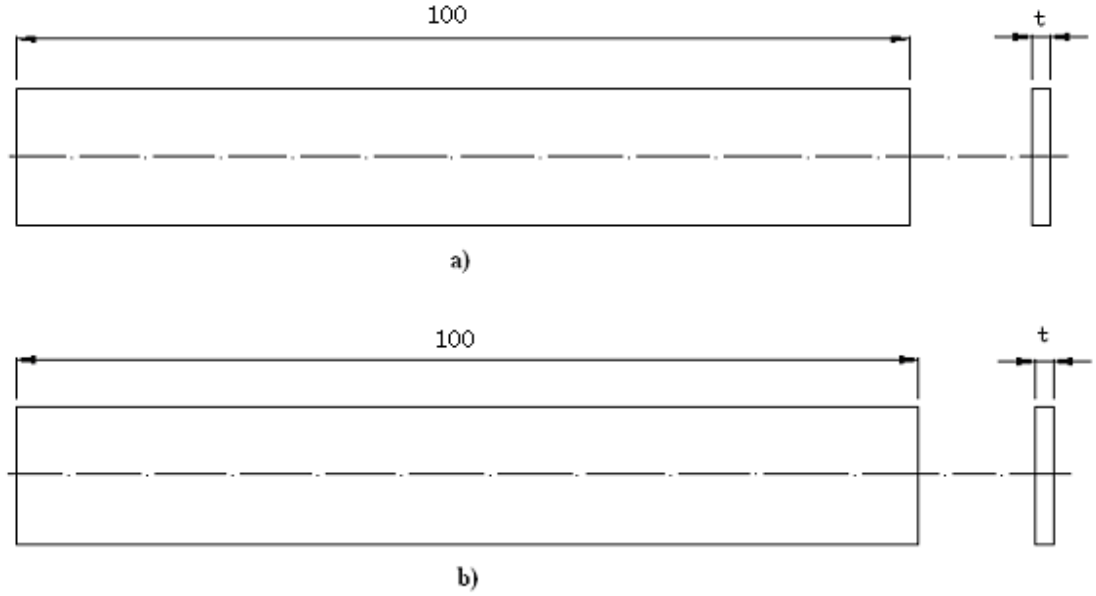


Figura 3.6 (a) Probetas para ensayo de doblado en "V".

(b) Probetas para ensayo de doblado con dado basculante.

3.8 ENSAYO DE TRACCIÓN.

El objetivo de este ensayo es determinar el esfuerzo máximo a la tracción del material AISI 1008 recocido. Dato necesario para calcular la carga teórica de doblado, la fuerza y la elongación son registrados digitalmente por un controlador automatizado conectado a la maquina de tracción. Los datos obtenidos de fuerza y elongación pueden convertirse de tal forma para generar la curva esfuerzo Vs. deformación de la manera siguiente:

*Se divide la fuerza medida entre el área transversal de la sección original de la probeta para obtener esfuerzo.

*Se divide la elongación entre la longitud original de la probeta para obtener deformación.

Con estos datos se construye la curva esfuerzo Vs. deformación para cada probeta ensayada. Esta curva proveerá información sobre el punto de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de rotura. Para cada espesor de lámina. (Ver apéndice C).

Figura 3.7. Equipo Universal de Ensayo de Materiales, marca: GALDABINI Capacidad: 20 toneladas, ubicado en el DPTO. De materiales y procesos de fabricación.

3.9 ENSAYO DE DOBLEZ.

Para este ensayo se tomaron dos dispositivos de doblado, uno para el doblado en "V" según la figura. 3.8, otro para el doblado con dado basculante según figura.3.9; respectivamente la fuerza de doblado es ejercida por el equipo universal de ensayos mecánico GALDABINI, tal como se muestra en la figura 3.10 (a), 3.10 (b). La carga de doblado es registrada digitalmente por un controlador automatizado conectado a la maquina de tracción GALDABINI.

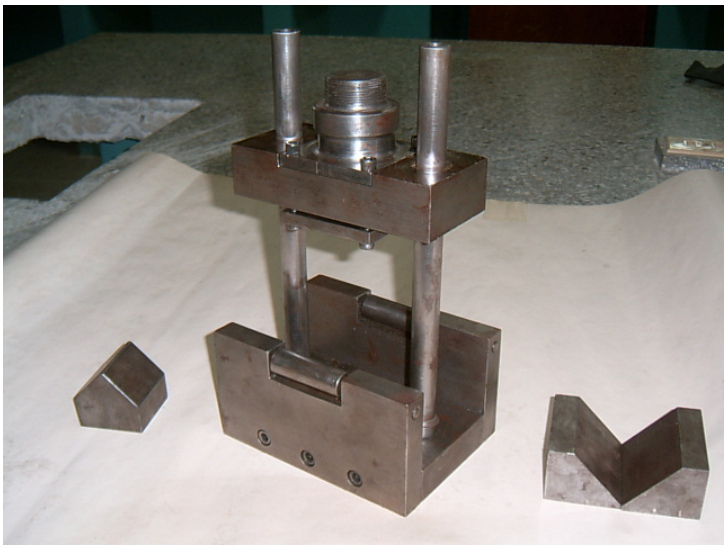


Figura 3.8. Dispositivo para doblado en "V"

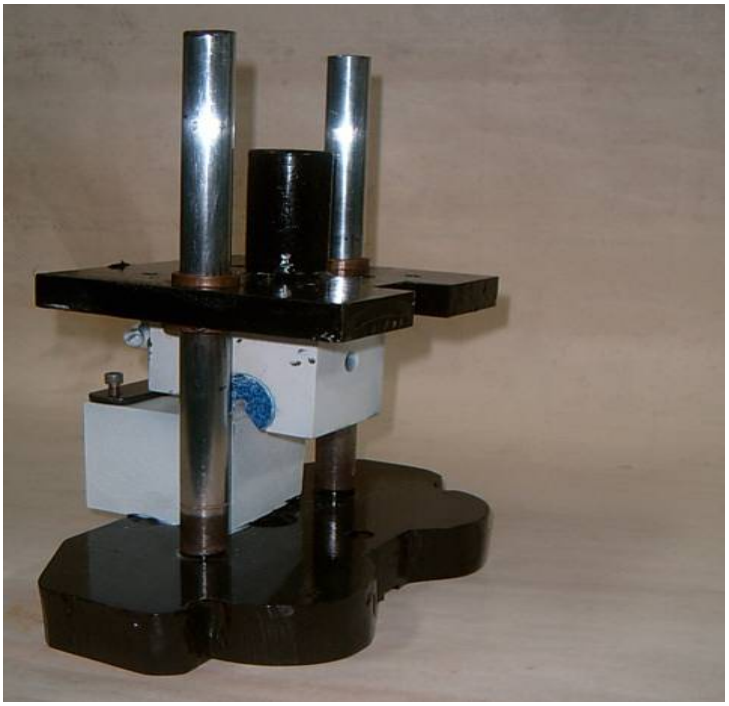


Figura 3.9. Dispositivo para Doblado con dado basculante

Figura 3.10. (a) Dispositivo de doblado en "V".

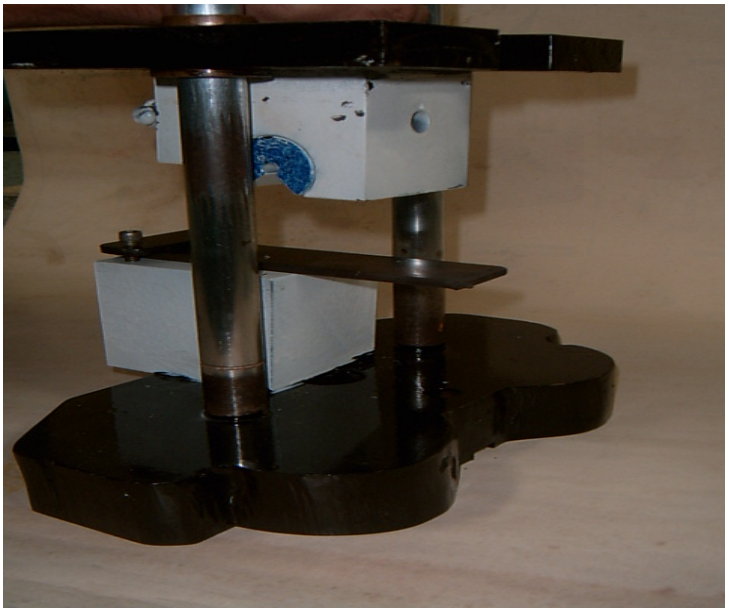


Figura 3.10 (b) Dispositivo de doblado con dado basculante y probeta para el doblez.

3.10 EQUIPOS ADICIONALES.

Para el mecanizado de la matriz y punzón con dado basculante se muestran las maquinas y herramientas en las figura. 3.11, figura.3.12, figura. 3.13, el horno de recocido para probetas figura. 3.14, el instrumento de medición de ángulo para la recuperación elástica en la figura. 3.15, entre otras.

Figura 3.11 Limadora para mecanizado de matriz y punzón.

Figura 3.12 Fresadora universal mecanizado de matriz y punzón.

Figura 3.13 Torno convencional.

Figura 3.14 Horno para recocido de probeta.

Figura 3.15 Goniómetro medidor de ángulo

Figura.3.16 Guillotina para corte de tira

Figura 3.17 Vernier.

Figura 3.18 Sierra mecánica.

Figura 3.19 Sierra mecánica de cinta.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados de ensayos de tracción de la lámina a doblar, AISI 1008 recocida a 550 ºC.

Además se muestran los resultados de los ensayos de doblado en "V" y los ensayos de doblado con dado basculante. Así como también figuras, gráficos comparativos, cálculos teóricos y observaciones que permitirán su análisis.

A continuación se muestran gráficas de los ensayos de tracción del material lámina AISI 1008 recocido, según figuras: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 (se realizaron 5 gráficos correspondiente a cada espesor), ver apéndice.

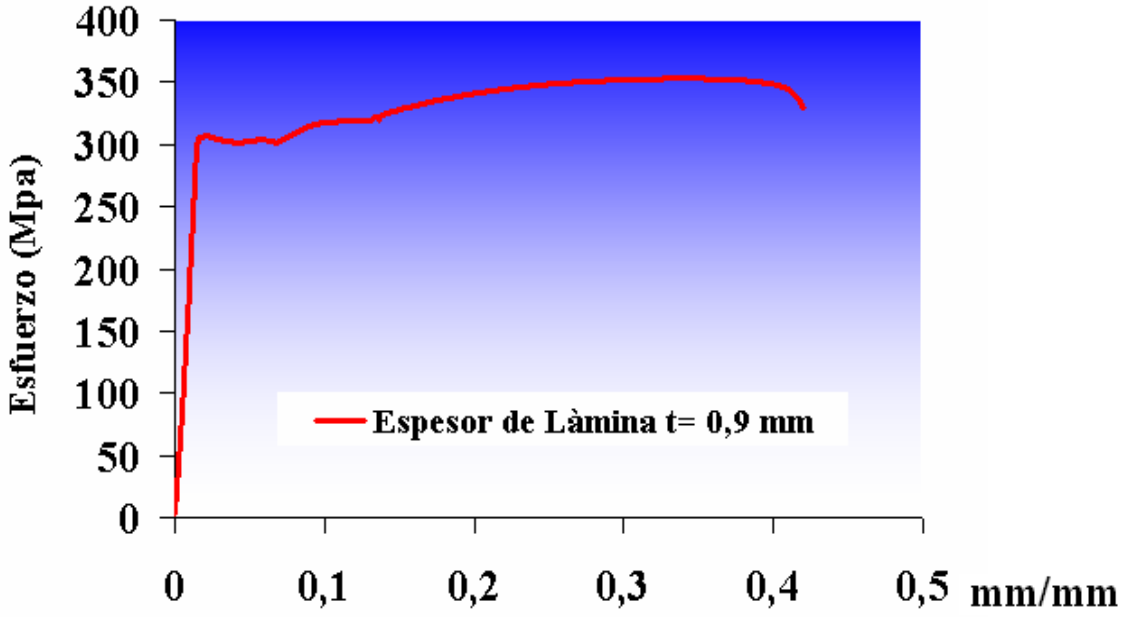


Figura 4.1 Gráfica: Esfuerzo Vs. Deformación

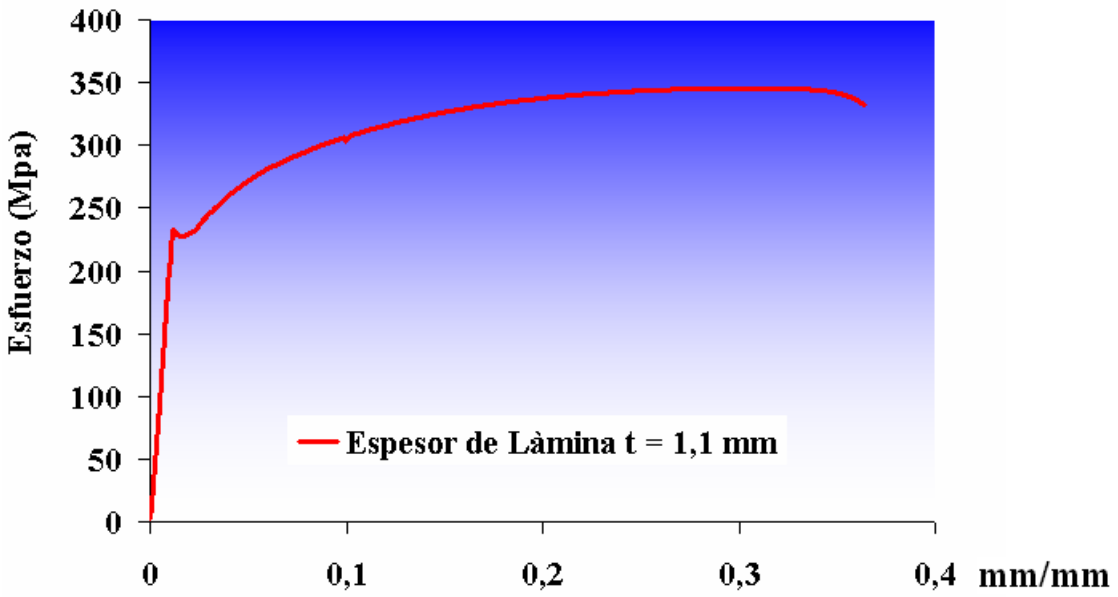


Figura 4.2 Gráfica: Esfuerzo Vs. Deformación

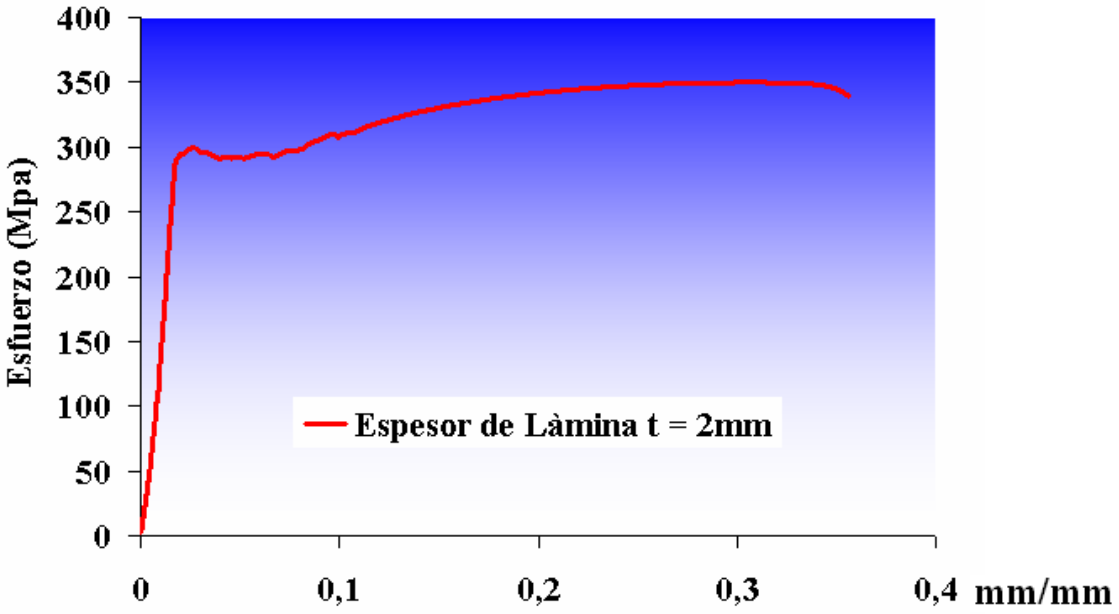


Figura 4.3 Gráfica: Esfuerzo Vs. Deformación

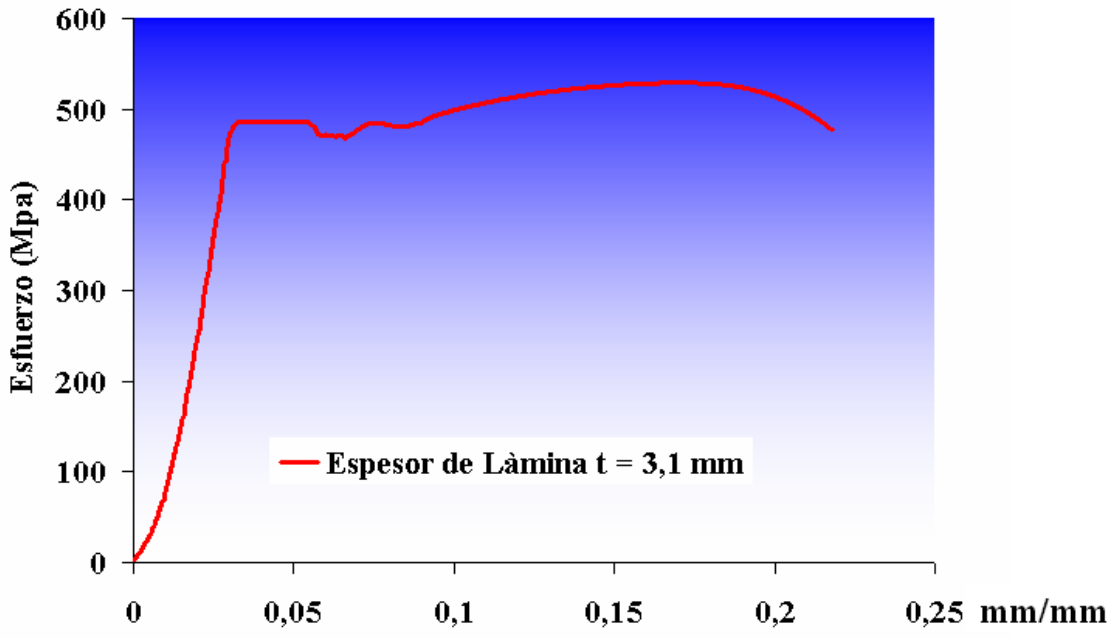


Figura 4.4 Gráfica: Esfuerzo Vs. Deformación

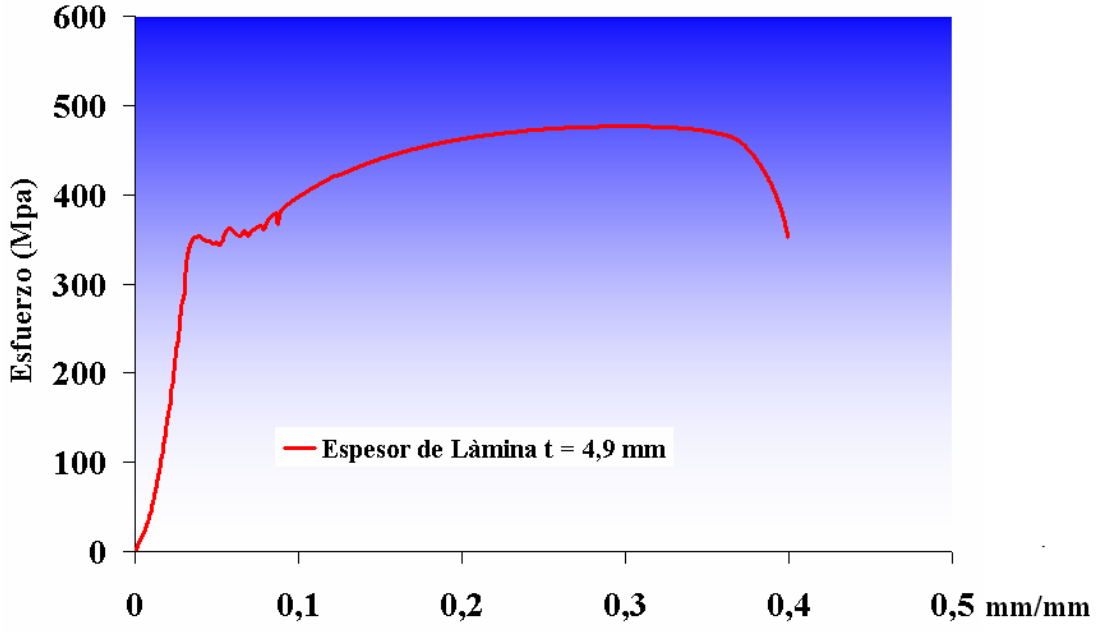


Figura 4.5 Gráfica: Esfuerzo Vs. Deformación

4.2 CÀLCULOS DE ESFUERZOS DE TRACCIÓN MÀXIMO:

En base a la ecuación:

$$\sigma = \frac{Fuerza}{Area} \qquad (4.1)$$

Donde:

Fuerza: Es la fuerza de tracción.

Área: Espesor de probeta x Ancho de la sección de rotura.

- **Probeta 1. Espesor = 0.9 mm.**

$$\sigma_1 = \frac{3972}{0.9x12.5} = 353\frac{N}{mm^2}$$

- **Probeta 2. Espesor = 1.1 mm.**

$$\sigma_2 = \frac{4751}{1.1x12.5} = 345.52\frac{N}{mm^2}$$

- **Probeta 3. Espesor = 2mm.**

$$\sigma_3 = \frac{8748}{2x12.5} = 349{,}92\frac{N}{mm^2}$$

- **Probeta 4. Espesor = 3.1 mm.**

$$\sigma_4 = \frac{20501}{3.1x12.5} = 529\frac{N}{mm^2}$$

- **Probeta 5. Espesor = 4.9 mm.**

$$\sigma_5 = \frac{29186}{4.9x12.5} = 476{,}5\frac{N}{mm^2}$$

Tabla 4.1. Resultados de esfuerzos de tracción máxima obtenidas en los ensayos del material láminas de acero AISI 1008 en estado recocido.

Probeta de espesor (mm)	Esfuerzo de fluencia Sy (N/ mm^2)	Esfuerzo de tracción Su (N/mm^2)	Esfuerzo de fluencia promedio Sy (N/mm^2)	Esfuerzo de tracción promedio Su (N/mm^2)
0,9	306	353	333.8	410,78
1,1	227	345,52		
2	297	349,92		
3,1	486	529		
4,9	353	476,5		

Graficas de los ensayos de doblado en ¨ V ¨

A continuación se muestran gráficos de los resultados experimentales para el doblado en "V" en varios espesores del acero AISI 1008 en estado recocido; (se realizaron 5 gráficas por cada espesor. v=200mm/min). Ver apéndice.

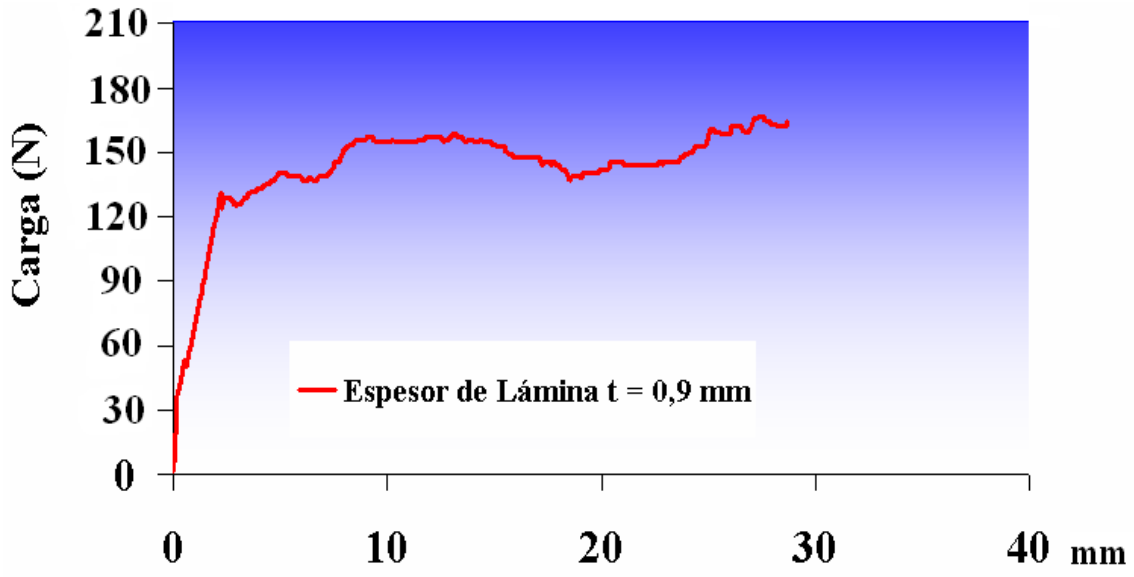


Figura 4.6 Gráfica: carga de doblado en "V" Vs. Desplazamiento del punzòn

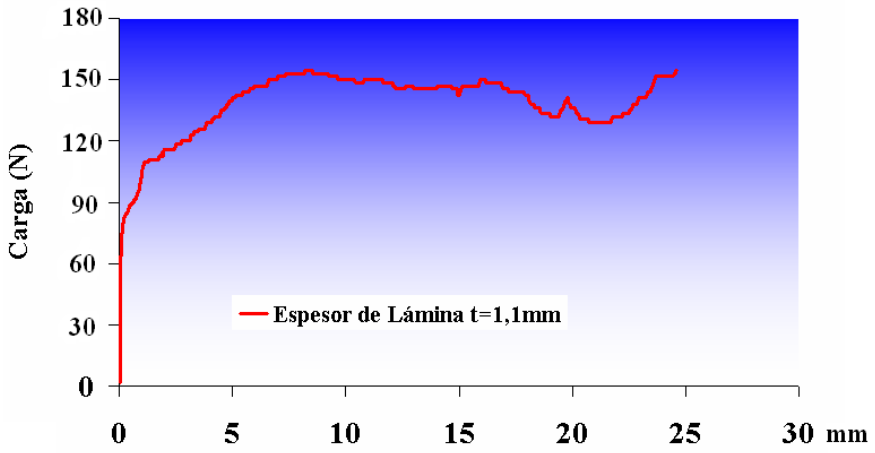


Figura 4.7 Gràfica:Carga de doblado en "V" Vs. Desplazamiento del punzón

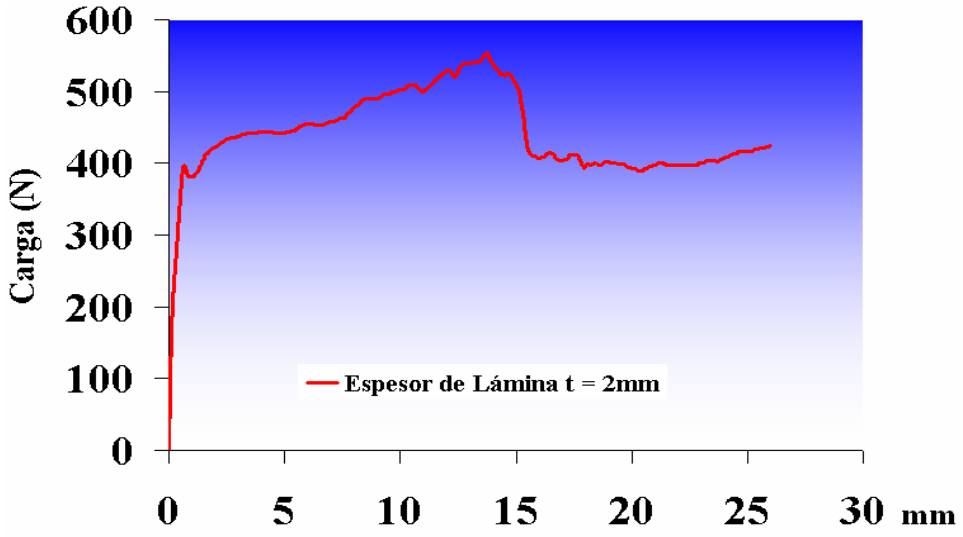


Figura 4.8 Gráfica:Carga de doblado en "V" Vs. Desplazamiento del punzón

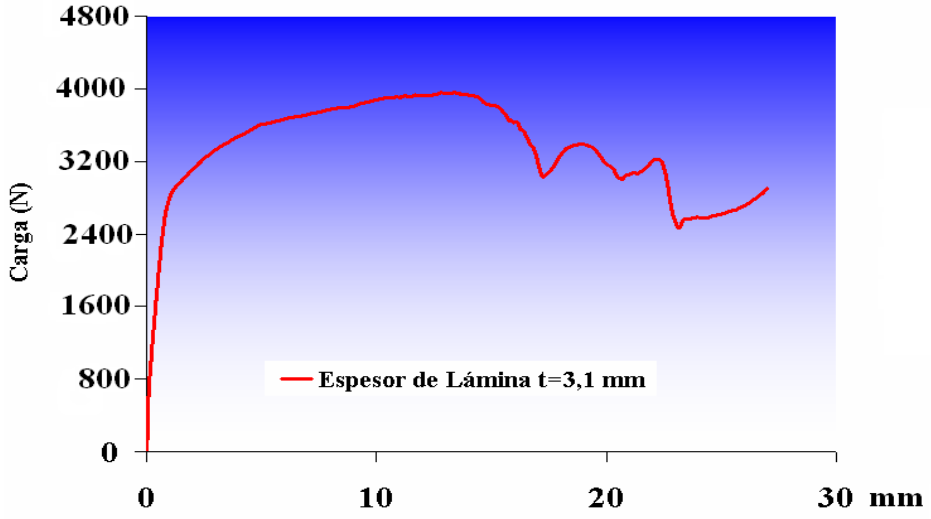


Figura 4.9 Gráfica carga de doblado en "V" Vs. Desplazamiento del punzón

4.3 RESULTADOS DE LA CARGA DE DOBLADO EN "V" EXPERIMENTAL Y LA CARGA TEÓRICA EN FUNCIÓN DE LA FORMULA DE DOBLADO.

De las ecuaciones planteadas en la tabla 2.2 pagina 25, para el cálculo de la fuerza teórica de doblado en "V" se seleccionó la ecuación 2.18, ya que dicha ecuación toma en cuenta: un factor geométrico (k=1.33) de la matriz, además variables de medición directa (espesor **"t"**, distancia de abertura de la matriz "**L**" y ancho de lámina "**W**") importantes para el estudio.

TABLA 4.2. RESULTADOS DE LA CARGA DE DOBLADO EN "V" EXPERIMENTAL Y LA CARGA TEÓRICA EN FUNCIÓN DE LA FORMULA DE DOBLADO.

Ecuación para la fuerza de doblado en V (N)	Espesor de lámina (mm)	Carga de doblado en "V" experimental (N)		Carga de doblado en V teórica (N)
		Individual	Promedio	
Ec. 2.18 $P_V = \frac{1.33 \times S \times b \times t^2}{L}$ S: Ver tabla 4.1 b: 30 mm t: Espesor (Tabla 4.1) L: 100 mm	0,9	140	131	114.08
		145		
		110		
		130		
	1,1	120	144	166.81
		120		
		120		
		180		
		180		
	2	280	495	558.47
		600		
		600		
		500		
	3,1	4000	3125	2028.39
		2000		
		4000		
		2500		

Graficas de los ensayos de doblado con dado basculante

A continuación se muestran gráficos de los resultados experimentales para el doblado con dado basculante en varios espesores del acero AISI 1008 recocido; (se realizaron 5 gráficas por cada espesor. v=200 mm/min.Ver apéndices).

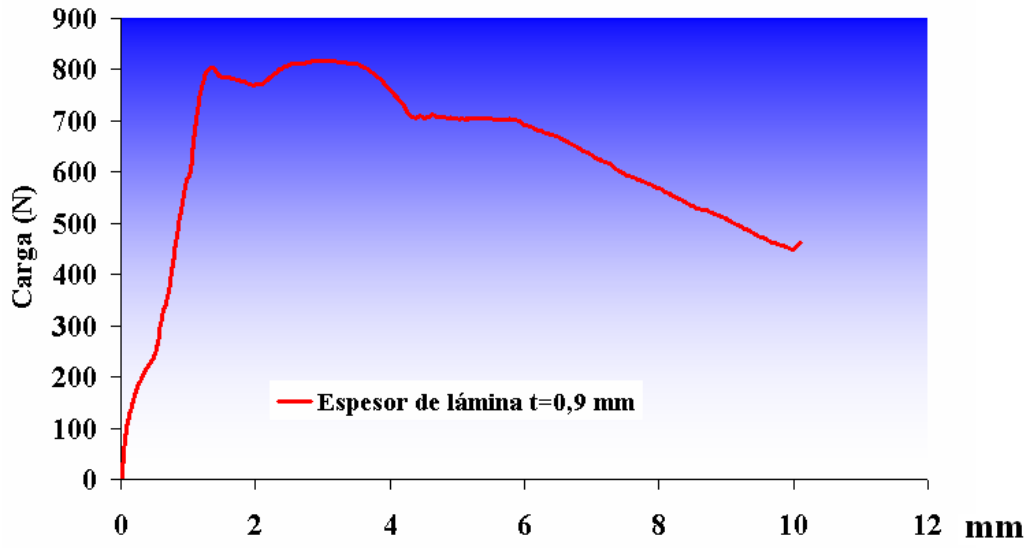


Figura 4.10 Gráfica: carga de doblado con dado basculante Vs. Desplazamiento del punzón

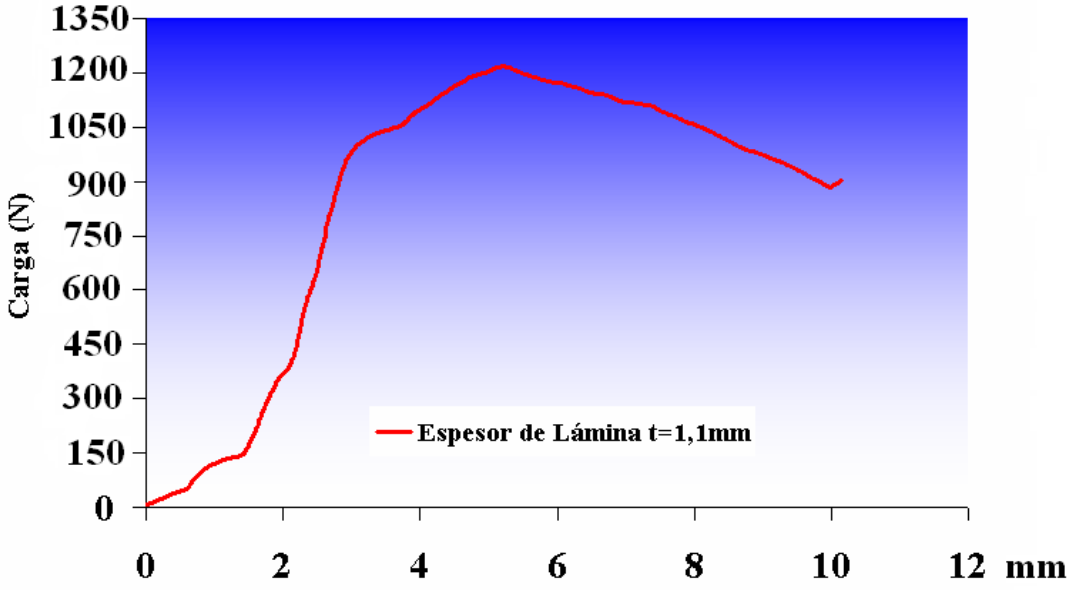


Figura 4.11Gráfica: Carga de doblado con dado basculante Vs. Desplazamiento del punzón

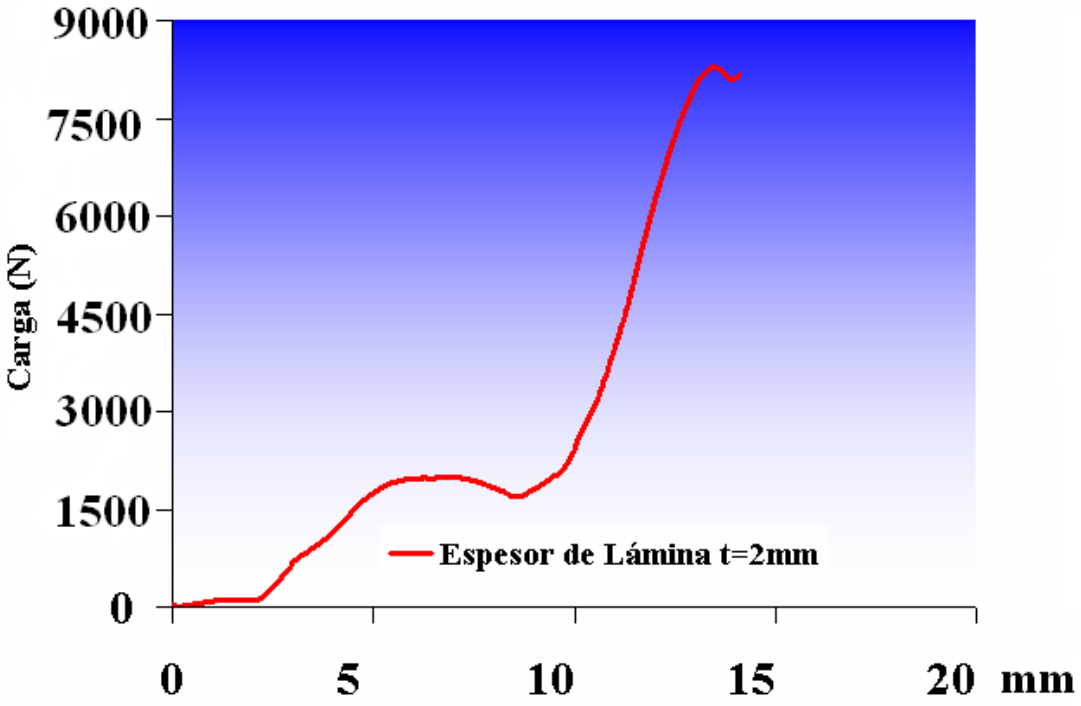


Figura 4.12 Gráfica: Carga de doblado con dado basculante Vs. Desplazamiento del punzón

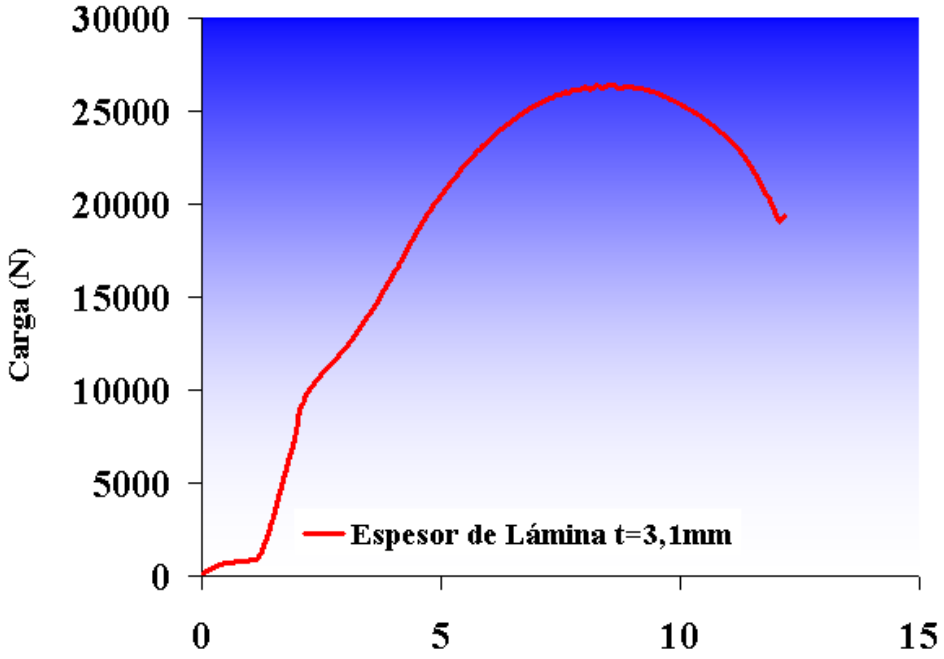


Figura 4.13 Gráfica carga de doblado con dado basculanteVs. Desplazamiento del punzón

4.4 RESULTADO DE LA CARGA DE DOBLADO CON DADO BASCULANTE EXPERIMENTAL Y LA CARGA TEÓRICA EN FUNCIÓN DE LA FORMULA DE DOBLADO.

De las ecuaciones planteadas en la tabla 2.2 pagina 25, para el cálculo de la fuerza teórica de doblado por dado basculante se seleccionó la ecuación 2.19, ya que dicha ecuación toma en cuenta: un factor geométrico (k=2.25) de la matriz, también variables de medición directa (espesor **"t"**, distancia de separación del dado basculante "**L**" y ancho de lámina "**W**") importantes para el estudio. Además en la bibliografía consultada solo existe esta propuesta.

TABLA 4.3. RESULTADO DE LA CARGA DE DOBLADO CON DADO BASCULANTE EXPERIMENTAL Y LA CARGA TEÓRICA EN FUNCIÓN DE LA FORMULA DE DOBLADO.

Ecuación para la fuerza de doblado con dado basculante (N)	Espesor de lámina (mm)	Carga de doblado experimental (N)		Carga de doblado con dado basculante teórica (N)
		Individual	Promedio	
Ec. 2.21 $P_R = \frac{2.25 \times S \times b \times t^2}{L}$ S: Ver tabla 4.1 b: 32 mm t: Espesor **(Ver tabla 4.1)** L: 24 mm (**Ver figura 4.14**)	0,9	800	680	804.17
		600		
		700		
		700		
		600		
	1,1	1200	1087	1175.84
		1200		
		975		
		975		
	2	4300	4175	3936.60
		4100		
		3900		
		4400		
	3,1	23500	23600	14297.87
		23750		
		24500		
		23500		
		22750		

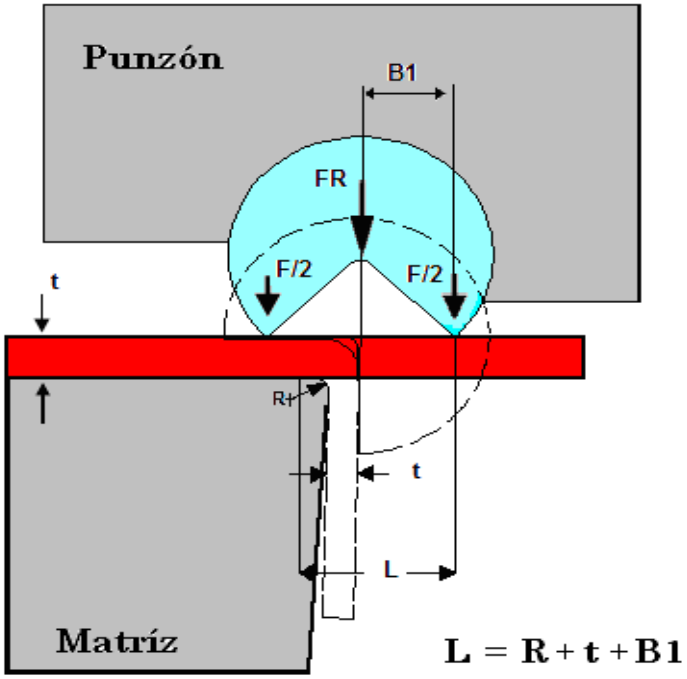


Figura 4.14.Esquema del sistema de doblado basculante, donde se muestra longitud "L" de doblado.

Las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 muestran los resultados experiméntales comparativos de carga de doblado y la carga teórica del doblado en "v" y doblado con dado basculante en láminas de acero AISI 1008 recocido.

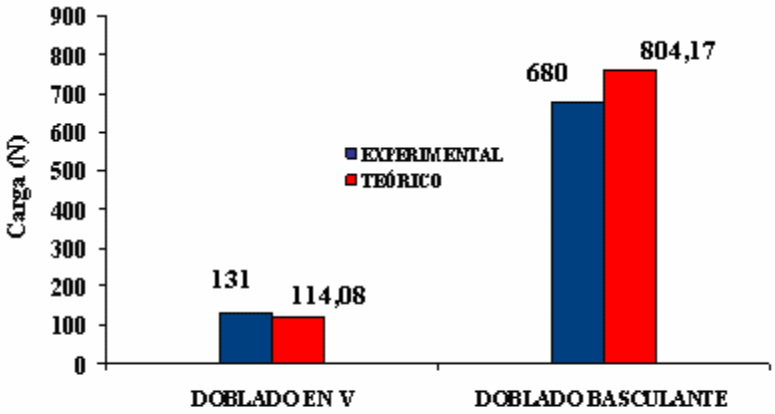


Figura 4.15 Carga de doblado Vs Método de doblado
Espesor de lámina t = 0,9

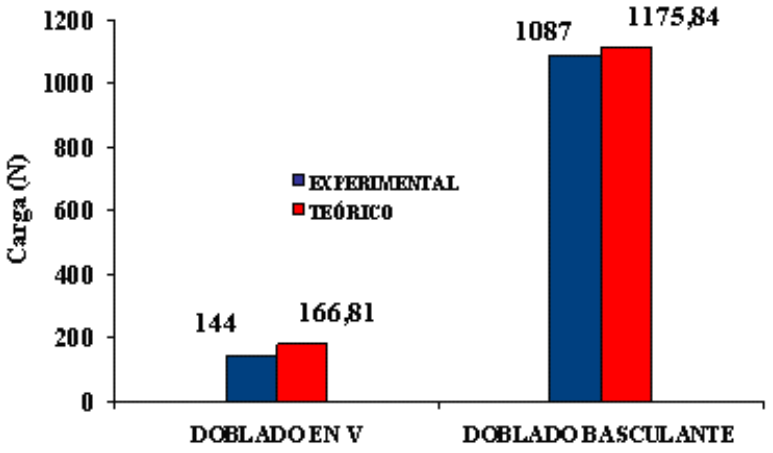


Figura 4.16 Carga de doblado Vs. Método de doblado
Espesor de lámina t = 1,1mm

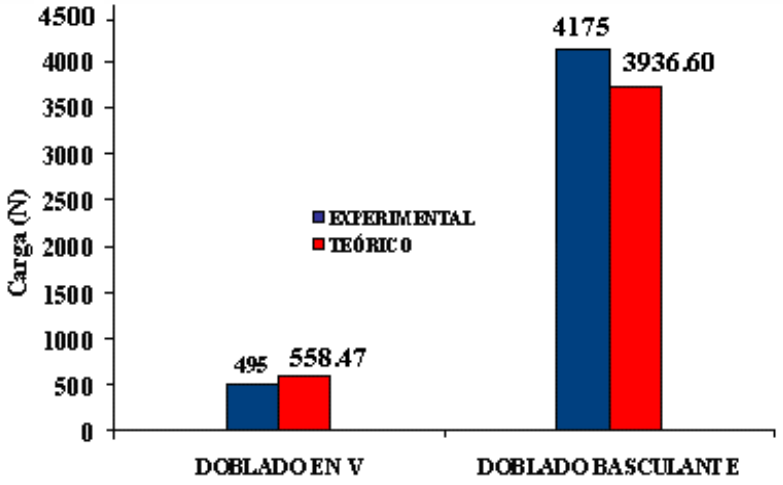


Figura 4.17 Carga de doblado Vs. Método de doblado
Espesor de lámina t = 2mm

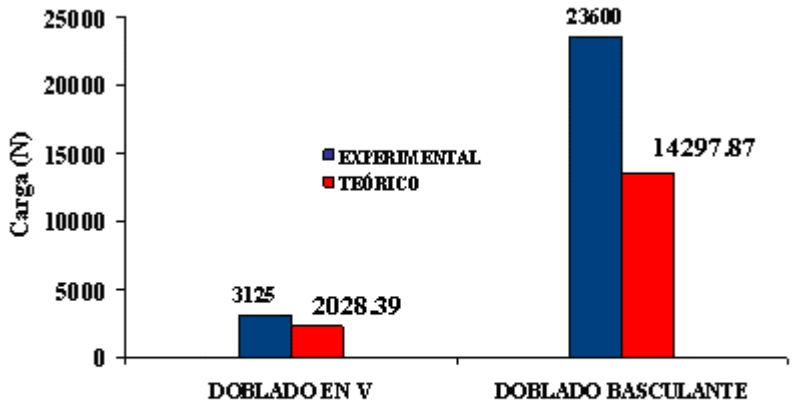


Figura 4.18 Carga de doblado Vs Método dedoblado
Espesor de lámina t = 3,1mm

4.5 RESULTADOS DE ÁNGULO FINAL DE LA PIEZA DESPUES DEL DOBLADO EN "V" PARA CADA ESPESOR DE LÁMINA.

Tabla 4.4. Ángulo final de la pieza después del doblado en V para espesor de lámina t= 0.9 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Ángulo de Matriz β_i(º)	Ángulo final de la pieza doblada β_f (º)	Ángulo final promedio β_{Fp} (º)
1	200	90º	85º	
2	200	90º	83º	
3	200	90º	86º	**85º**
4	200	90º	86º	
5	200	90º	85º	

Tabla 4.5. Ángulo final de la pieza después del doblado en V para espesor de lamina t= 1.1 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Àngulo de Matriz β_i (º)	Àngulo final de la pieza doblada β_f (º)	Àngulo final promedio β_{fP} (º)
6	200	90º	89º	
7	200	90º	88º	
8	200	90º	89º	**88.6º**
9	200	90º	92º	
10	200	90º	85º	

Tabla 4.6. Ángulo final de la pieza después del doblado en V para espesor de lámina t= 2 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Ángulo de Matriz β_i (º)	Ángulo final de la pieza doblada β_f (º)	Ángulo final promedio β_{FP} (º)
11	200	90º	83º	
12	200	90º	86º	
13	200	90º	86º	**84.6º**
14	200	90º	82º	
15	200	90º	86º	

Tabla 4.7. Ángulo final de la pieza después del doblado en V para espesor de lámina t= 3.1 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Ángulo de Matriz β_i (º)	Ángulo final de la pieza doblada β_f (º)	Ángulo final promedio β_{Fp} (º)
16	200	90º	80º	
17	200	90º	83º	
18	200	90º	85º	**82.4º**
19	200	90º	82º	
20	200	90º	82º	

4.6 RESULTADOS DE ÁNGULOS FINAL DE LA PIEZA DESPUES DEL DOBLADO CON DADO BASCULANTE PARA CADA ESPESOR DE LÁMINA.

Tabla 4.8. Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t= 0.9 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Ángulo de Matriz β_i (º)	Ángulo final de la pieza doblada β_f (º)	Ángulo final promedio β_{fP} (º)
1	200	90º	85º	
2	200	90º	86º	
3	200	90º	86º	**85º**
4	200	90º	83º	
5	200	90º	84º	

Tabla 4.9. Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t= 1.1 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Ángulo de Matriz β_i (º)	Ángulo final de la pieza doblada β_f (º)	Ángulo final promedio β_{fP} (º)
6	200	90º	87º	**87º**
7	200	90º	87º	
8	200	90º	87º	
9	200	90º	87º	
10	200	90º	87º	

Tabla 4.10. Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t= 2 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Ángulo de Matriz β_i (º)	Ángulo final de la pieza doblada β_f (º)	Ángulo final promedio β_{fP} (º)
11	200	90º	86º	**86.8º**
12	200	90º	90º	
13	200	90º	85º	
14	200	90º	87º	
15	200	90º	86º	

Tabla 4.11. Ángulo final de la pieza después del doblado con dado basculante para espesor de lámina t= 3.1 mm.

Probeta Nº	Velocidad del punzón de doblado mm / min	Ángulo de Matriz β_i (º)	Ángulo final de la pieza doblada β_f (º)	Ángulo final promedio β_{fP} (º)
16	200	90º	85º	**83.8º**
17	200	90º	85º	
18	200	90º	84º	
19	200	90º	80º	
20	200	90º	85º	

4.7 CÁLCULOS DE LOS VALORES DE RECUPERACIÓN EXPRESADO COMO K_r y $\Delta\beta$ PARA AMBOS PROCESOS DE DOBLADO.

En el apartado 2.4.1 se definió como un posible parámetro para cuantificar la recuperación, el factor de recuperación $\mathbf{K_r}$ como coeficiente entre los ángulos de doblado.

Un valor de K_r igual a la unidad indicará la ausencia de recuperación, mientras que un valor igual a cero indicará una recuperación elástica completa, como en el caso de un resorte donde solamente ha aparecido deformación elástica.

Relacionar el factor de recuperación y el ángulo de recuperación puede resultar fácil. Si el valor K_r se conoce, por ejemplo de forma experimental, el ángulo de recuperación se puede determinar por:

Empleando la ecuación 2.25 y 2.27 del capitulo 2 se obtienen los siguientes valores:

Cálculos Tipos:

$$K_{r1} = \frac{85^{o}}{90^{o}} = 0.9444$$

$$\Delta\beta_1 = \left(\frac{1}{0.9444} - 1\right)85^{o} = 5.004$$

Valores de Kr y Δβ para el proceso de doblado en "V"

TABLA 4.12. Valores de K_r y Δβ para doblado en "V", espesor de lámina t =0.9mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
1	0.9444	5.004
2	0.9222	7.002
3	0.9555	4.52
4	0.9555	4.52
5	0.9444	5
Promedio	**0.9444**	**5.35986**

TABLA 4.13. Valores de K_r y Δβ para doblado en "V", espesor de lámina t=1.1mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
6	0.9888	1.81
7	0.9777	2.72
8	0.9888	1.81
9	1.0222	1.80
10	0.9444	5
Promedio	**0.98438**	**2.628**

TABLA 4.14. Valores de K_r y Δβ para doblado en "V", espesor de lámina t= 2mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
11	0.9222	7
12	0.9555	4.52
13	0.9555	4.52
14	0.9111	8.10
15	0.9555	4.52
Promedio	**0.93996**	**5.732**

TABLA 4.15. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado en "V", espesor de lámina t=3.1mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
16	0.8888	10.9
17	0.9222	7
18	0.9444	5
19	0.9111	8.10
20	0.9111	8.10
Promedio	**0.91552**	**7.82**

Valores de Kr y Δβ para el proceso de doblado con dado basculante

TABLA 4.16. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado con dado basculante, espesor de lámina t= 0.9mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
1	0.9444	5
2	0.9555	4.52
3	0.9555	4.52
4	0.9222	7.21
5	0.9333	6.32

TABLA 4.17. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado con dado basculante, espesor de lámina t =1.1mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
6	0.9666	3.62
7	0.9666	3.62
8	0.9666	3.62
9	0.9666	3.62
10	0.9666	3.62

TABLA 4.18. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado con dado basculante, espesor de lámina t= 2 mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
11	0.9555	4.52
12	1	0
13	0.9444	5
14	0.9666	3.62
15	0.9555	4.52

TABLA 4.19. Valores de K_r y $\Delta\beta$ para doblado con dado basculante, espesor de lámina t =3,1 mm.

Probeta Nº	$K_r = \beta_f / \beta_i$	$\Delta\beta = \beta_i - \beta_F$
16	0.9444	5
17	0.9444	5
18	0.9333	6.32
19	0.8888	10.9
20	0.9444	5

A continuación se muestran resultados gráficos comparativos de los valores del factor de recuperación (k_r) y el ángulo de recuperación ($\delta\beta$) en función del ángulo final de la pieza doblada para ambos procesos de doblado.

PROCESO DE DOBLADO EN "V"

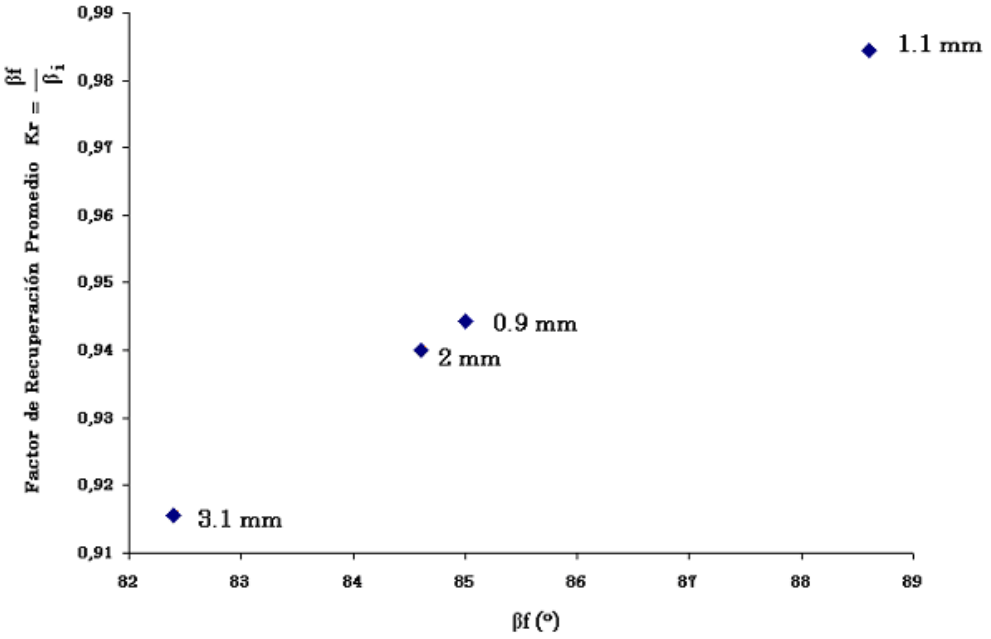


Figura 4.19 Valores experimentales de la recuperación expresada como el factor (Kr = βf / βi), en función del ángulo final para el ensayo de doblado en "V", W= 30 mm, en lámina de acero AISI 1008.

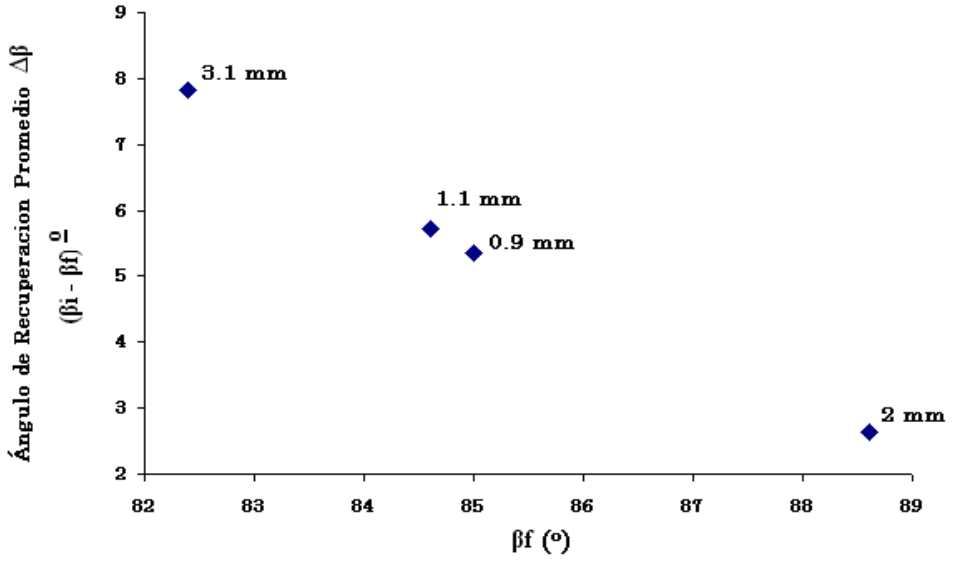


Figura 4.20 Valores experimentales de la recuperacion expresada como (βi – βf) para el ensayo de doblado en "V", W= 30 mm en lámina de acero AISI 1008.

PROCESO DE DOBLADO CON DADO BASCULANTE

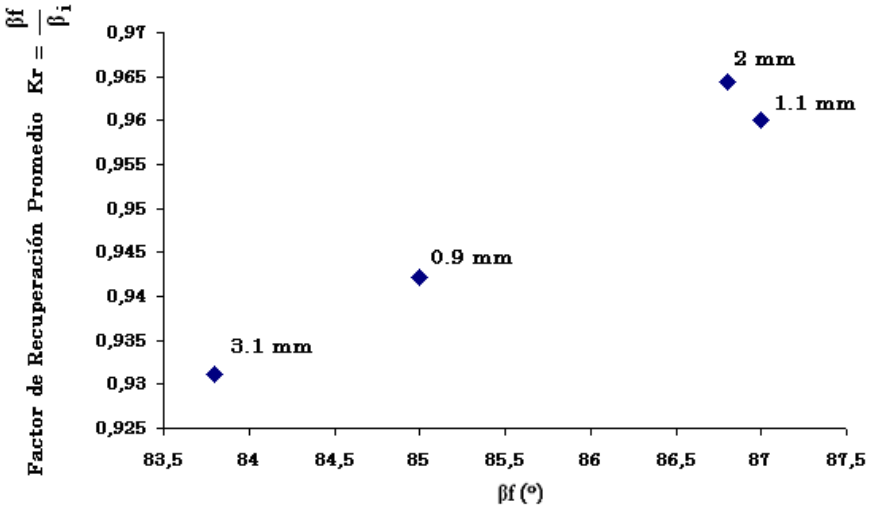


Figura 4.21 Valores experimentales de la recuperación expresada como el factor (Kr = βf / βi), en función del ángulo final para el ensayo de doblado con dado basculante, W= 30 mm, en lámina de acero AISI 1008.

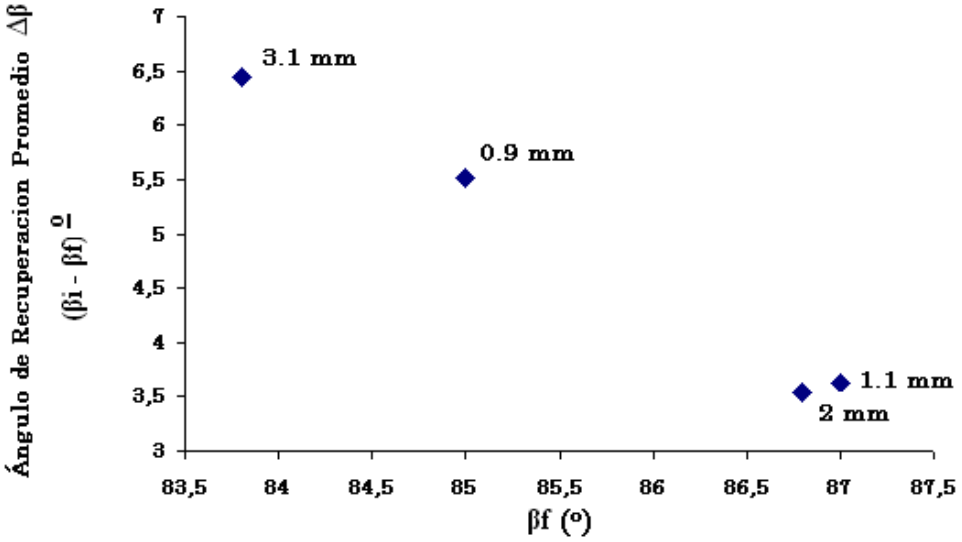


Figura 4.22 Valores experimentales de la recuperacion expresada como (βi – βf) para el ensayo doblado con dado basculante, W= 30 mm en lámina de acero AISI 1008.

4.8. RESULTADOS DEL RADIO FINAL Y ÁNGULO FINAL DE LA PIEZA DESPUES DEL DOBLADO EN "V" PARA CADA ESPESOR DE LÁMINA. (Ver figura 2.12 , pagina 36).

Tabla 4.20. Valores de radio final y ángulo final para doblado en V.

Probeta Nº	Espesor (mm)	Radio final (mm)	Ángulo final de la pieza (Grados)	Ángulo final Promedio (Grados)
1	0,9	5	85º	85º
2	0,9	5	83º	
3	0,9	5	86º	
4	0,9	5	86º	
5	0,9	5	85º	
6	1,1	9	89º	88,6º
7	1,1	9	88º	
8	1,1	9	89º	
9	1,1	9	92º	
10	1,1	9	85º	
11	2	9	83º	84,6º
12	2	9	86º	
13	2	9	86º	
14	2	9	82º	
15	2	9	86º	
16	3,1	7,5	80º	82,4
17	3,1	7,5	83º	
18	3,1	7,5	85º	
19	3,1	7,5	82º	
20	3,1	7,5	82º	

4.9 RESULTADOS DEL RADIO FINAL Y ÁNGULO FINAL DE LA PIEZA DESPUÉS DEL DOBLADO CON DADO BASCULANTE PARA CADA ESPESOR DE LÁMINA. (Ver figura 2.12 , pagina 36).

Tabla 4.21.Valores de radio final y ángulo final para doblado con dado basculante.

Probeta Nº	Espesor (mm)	Radio final (mm)	Ángulo final de la pieza (Grados)	Ángulo final Promedio (Grados)
1	0,9	3,5	85º	84,8º
2	0,9	3,5	86º	
3	0,9	3,5	86º	
4	0,9	3,5	83º	
5	0,9	3,5	84º	
6	1,1	3,5	87º	87º
7	1,1	3,5	87º	
8	1,1	3,5	87º	
9	1,1	3,5	87º	
10	1,1	3,5	87º	
11	2	2,5	86º	86,8º
12	2	2,5	90º	
13	2	2,5	85º	
14	2	2,5	87º	
15	2	2,5	86º	
16	3,1	2	85º	83,8º
17	3,1	2	85º	
18	3,1	2	84º	
19	3,1	2	80º	
20	3,1	2	85º	

Para el doblado en V

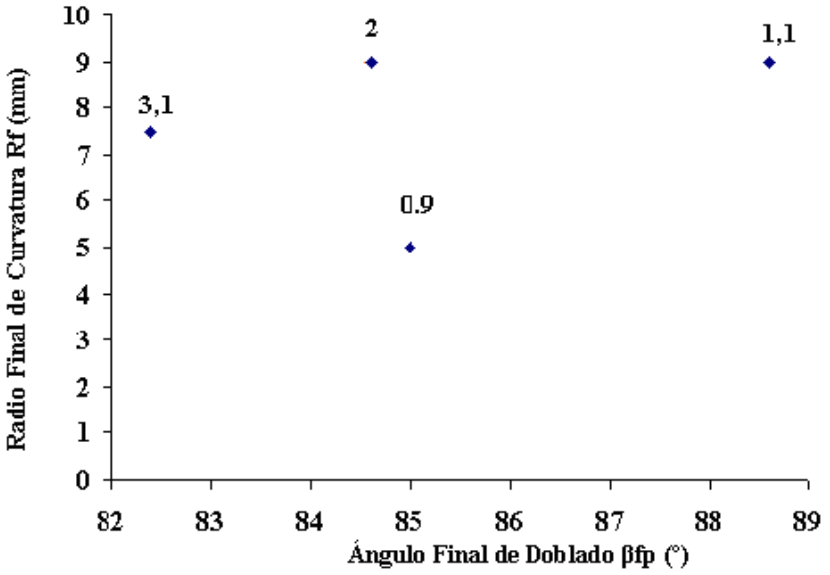


Figura 4.23 Valores de radio final de curvatura (Rf) Vs. Ángulo final promedio de doblado para el proceso de doblado en "V"

Para doblado con dado basculante

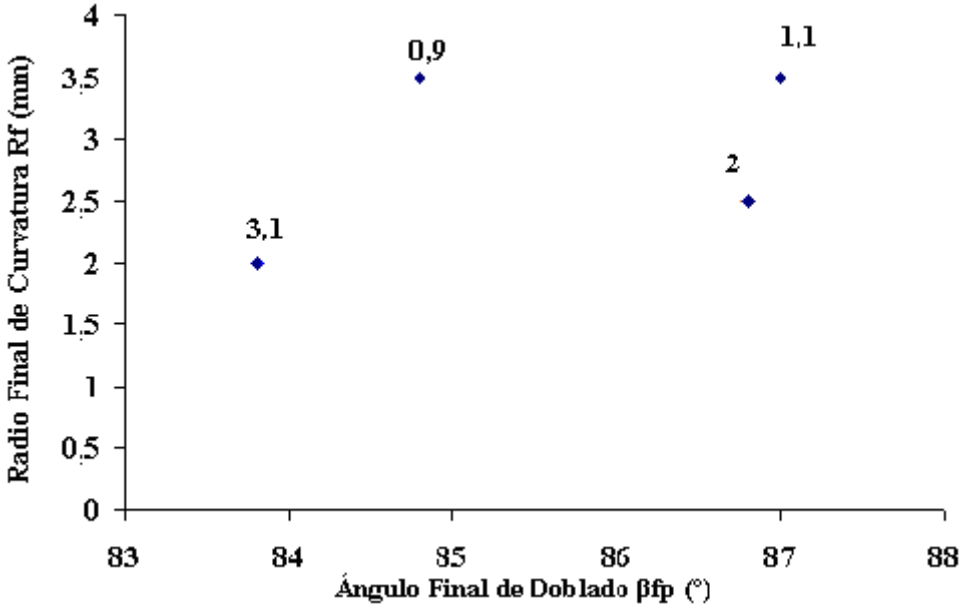


Figura 4.24 Valores de radio final de curvatura (Rf) Vs. Ángulo final promedio de doblado para el proceso de doblado con dado basculante.

4.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

En este apartado se presenta una discusión de resultados y las conclusiones extraídas de la totalidad de los experimentos sobre el doblado de la chapa de acero AISI 1008 en estado recocido, mediante graficas para los dos procesos de doblado se ha analizado la repetibilidad de la experimentación, evoluciones del ángulo de doblado final, el radio de doblado final y la recuperación elástica.

4.11 ENSAYOS DE TRACCIÓN DEL MATERIAL AISI 1008 EN ESTADO RECOCIDO.

La tabla 4.1 muestra los valores de los esfuerzos de tracción máximo obtenidos en los ensayos para los diferentes espesores de láminas utilizadas, acero AISI 1008 recocido a 550ºC. El esfuerzo de tracción promedio que resultó fue de 410,78 N/mm^2. Este esfuerzo de tracción obtenido se utilizó para calcular la carga teórica de doblado en "V" y doblado con dado basculante; para comparar con la carga experimental en cada proceso.

4.12 CARGA DE DOBLADO EXPERIMENTAL Y TEÓRICA.

Las figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 muestran los resultados experimentales comparativos de la carga de doblado en función del proceso de doblado en "V" y doblado por dado basculante.

* <u>Para el doblado en "V"</u>, las cargas experimentales y teóricas no muestran diferencia significativa, la formula teórica de carga se convalida con los resultados de carga experimentales y las propiedades mecánicas del material AISI 1008 en estado recocido.

* Para el doblado con dado basculante, el proceso mostró valores de carga teóricas y experimentales comparativamente superiores al proceso de doblado en "V".
Según la figura 4.18, se muestra una mayor desviación, para la carga experimental en el espesor 3,1mm. Pero a pesar de ello muestra valores muy aproximados.

La razón de la diferencia significativa de la carga experimental entre ambos procesos de doblado es que el momento flector, para el caso de doblado en "V", se comporta como una viga simplemente apoyada cuyo momento máximo es P.L/4, para el doblado con dado basculante, se comporta como una viga empotrada con carga concentrada en el extremo cuyo momento máximo es P.L.

Se observò entre el proceso de doblado en "V" y doblado basculante para un espesor de làmina **t = 0.9** mm una diferencia de carga de doblado de 16% , Para el espesor **t= 1.1** mm alrededor de 14%, para el espesor **t= 2** mm en el orden de 13% y finalmente para el espesor **t = 3.1** mm una diferencia de carga de doblado de 14%.

4.13 RECUPERACIÓN ELÁSTICA PARA EL DOBLADO EN "V" Y DOBLADO CON DADO BASCULANTE.

* Las figuras 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22, muestran los comportamiento de la recuperación elástica expresado como $K_r = \beta_f / \beta_i$ y $\Delta\beta = (\beta_i - \beta_F)$ (º) en función del ángulo final β_F (º), para el doblado en "V" y doblado con dado basculante.

* Según la referencia [5], el parámetro para cuantificar la recuperación, es el factor $K_r = \beta_f / \beta_i$ un valor Kr = 1 indicara ausencia de recuperación un valor Kr = 0 indicara una recuperación elástica completa.

* Las figuras 4.19 y 4.21 muestran que el factor de recuperación Kr depende fuertemente del ángulo de doblado final β_f (º).

A medida que disminuye el espesor de làmina doblada para ambos procesos el ángulo de doblado final β_f (º) es mayor, esto se traduce en una recuperación elástica muy pequeña.

Para espesores mayores (3,1mm) el factor Kr disminuye Kr ≈ 0,915 para doblado en "V" y Kr ≈ 0,93 para el doblado con dado basculante lo que indica en términos generales una recuperación elástica mayor y el momento flector requerido será menor.

* Las figuras 4.20 y 4.22 muestran el comportamiento de la recuperación elástica expresada como $\Delta\beta = (\beta_i - \beta_F)$ (º) en función del ángulo final β_f (º).

La recuperación expresada como $\Delta\beta = (\beta_i - \beta_F)$ (º) depende mucho del β_f (º) final que se quiere conseguir y cuando es mayor es este ángulo, menor es la recuperación elástica; expresada en ángulo.

La recuperación elástica expresada en ángulo se puede visualizar en las figuras 4.18 y 4.21 que para el doblado en "V" y espesor 3, 1mm la recuperación aproximada fue de 8 (º), para el doblado con dado basculante la recuperación fue de aproximadamente 6.5 (º).

También se puede visualizar en estas gráficas que para espesores menores la recuperación es menor para ambos procesos, convalidando las gráficas anteriores.

4.14 RADIO FINAL DE CURVATURA Rf DE LA PIEZA PARA EL DOBLADO EN "V" Y DOBALDO CON DADO BASCULANTE.

Las figuras 4.23 y 4.24 muestran el comportamiento del radio final de curvatura en función del ángulo final β_f (º), para ambos procesos de doblado.

Se visualizan en estas gráficas los siguientes aspectos:

* Comparativamente el proceso de doblado en "V", el radio final de curvatura Rf resulto entre un rango de 7.5mm a 9 mm.
Para el proceso de doblado con dado basculante, el radio final de curvatura Rf resultó entre un rango de 2 mm y 3.5 mm.

* Para menores espesores de lámina mayor radio de curvatura.

* Para mayor ángulo final mayor es el radio final de curvatura.

* Se puede inferir que el proceso de doblado con dado basculante las deformaciones por tensión y compresión fueron mayores que con el doblado en "V".

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

* Para la realización de las fases experimentadas se ha requerido el diseño y construcción del herramental de doblado con dado basculante, su adaptación a la máquina de ensayo de tracción y la obtención de los datos experiméntales.

* La recuperación elástica para el doblado en "V" y doblado con dado basculante según las figuras 4.19 y 4.21 expresadas como $K_r = \beta_f / \beta_i$ se cuantificó:

- **Para el doblado en "V",** valores de Kr entre 0.915 a 0.945 para los diferentes espesores de lámina.

- **Para el doblado con dado basculante**, valores de Kr entre 0.93 a 0.96 para los diferentes espesores de lámina.

  Los valores anteriormente expuestos pueden interpretarse de la siguiente manera: la recuperación elástica determinada fue muy pequeña para ambos procesos, la razón pudo ser que el material estaba en condiciones de recocido (muy blando).

* La recuperación elástica para el doblado en "V" y doblado con dado basculante según la figura 4.20 y 4.22 expresada como $\Delta\beta = (\beta_i - \beta_F)$ (º) se cuantificó:

- **<u>Para el doblado en "V"</u>**, valores de recuperación de ángulo **Δβ** entre 3º y 8º, para los diferentes espesores de lámina.

- **<u>Para el doblado con dado basculante</u>**, valores de recuperación de ángulo **Δβ** entre 3.5º a 6.5º para los diferentes espesores de lámina.

Lo anterior expuesto muestra que para ambos procesos de doblado no se visualizan mucha diferencia entre los valores de recuperación de ángulo **Δβ**.

* Según la figura 4.23 y 4.24 el radio de curvatura final aumenta en función del ángulo final de doblado β_f. Se determinó valores de radio final R_f de curvatura más pequeño para el doblado con dado basculante, lo cual indica mayores deformaciones por tensión y compresión.

* Para mayores espesores de chapa en ambos procesos de doblado se determinó mayores valores de recuperación elástica.

* La carga teórica y experimental resultó mayor para el doblado con dado basculante, en comparación con el proceso de doblado en "V", en un rango de valores entre 6 y 7 veces más, dependiendo del espesor de chapa; esto se debe al mayor momento flector requerido para cada proceso.

* El proceso de doblado por dado basculante es más eficiente en cuanto a rapidez en la obtención del doblado en comparación con el proceso de doblado en "V".

5.2 RECOMENDACIONES

Para finalizar este trabajo, se presentan un conjunto de propuestas para establecer otros enfoques futuros o Trabajos de Grados.

* Ampliación de la experimentación en materiales de otros aceros al carbono para mejorar la precisión en la aplicación de los modelos matemáticos y aumentar los antecedentes.

* Ampliación del rango de materiales utilizados, tales como acero inoxidable, aluminio, en el doblado con dado basculante y doblado en “V”.

* Elaborar un modelo de doblado en “V”, coherente, sencillo y preciso que permitan también cuantificar el fenómeno de la recuperación en función de un rango de ángulo final de doblado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Manuel Alfin – Henry Molina (2002) Diseño y construcción de un dispositivo para medir fuerza de doblado en lámina de aluminio Trabajo de Grado UC.

[2] Mayhleen Castillo (2003) Determinación de la zona de material afectada mecánicamente, según las variación de los parámetros característicos, en el proceso de doblado. Trabajo de Grado UC.

[3] Roberto J- Perez Q. (2004) Aplicación del ensayo de doblez y ensayo varestraint para determinar la figuración en soldadura de acero inoxidable AWS 309L, AWS 31GL Y AWS 347.

[4] Gary S. Vacilas (1982, marzo) A new approach to bending, manufacturing engineering, S.M.E. PP. 87 – 89.

[5] Universidad de Girona (Julio 2005) Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa modelo de predicción de ángulo de recuperación y del radio de doblado final, Girona. Maria luisa García Romero de luna (Tesis Doctoral).

[6] George E. Dieter (1986). Mechamical Metallurgy (THIRD EDITION) MC GRAW- HILL.

[7] Mario Rossi (1971) Estampado en frió de la chapa (9na Edición) Hoepli Editorial científico – medica.

[8] John A. Schey (2000) Procesos de manufactura (3ra Edicion) , Mac Graw – Hill.

[9] Solotorevski, V (1976) Pruebas mecánicas y propiedades de los materiales metales. Editorial Mir, Moscú.

[10] Fidias G. Arias (2001) Mitos y errores en la elaboración de tesis y proyectos de investigación (2da Edición).

[11] Carlos A. Sierra M. (2004) Estrategias para la elaboración de un proyecto de investigación, Maracay - Venezuela.

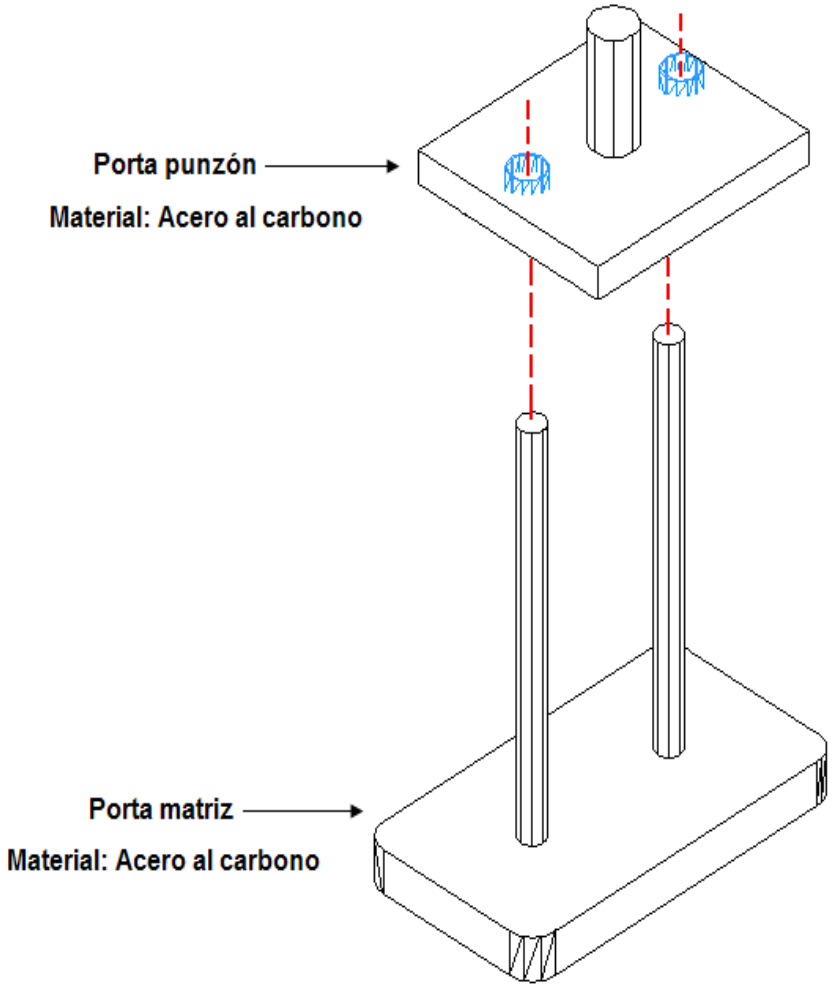
[12] Annual Book Of ASTM standards (1998) section 3, metal test methods y analytical procedure. Vol 03.01. Metal – Mechanical Testing.

[13] Torres, C. (2002). Programación del seminario y normas para la elaboración y presentación del trabajo especial de grado escuela de ingeniería mecánica. Universidad de Carabobo, Valencia.

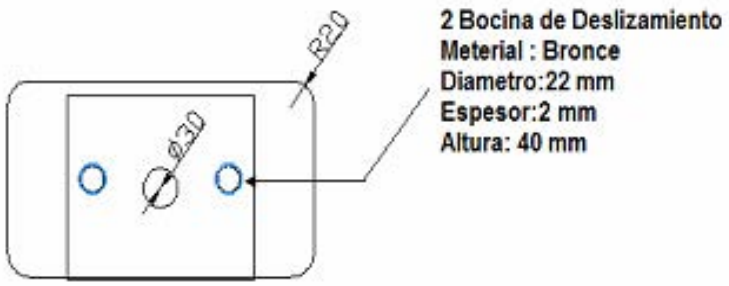
Apéndices

DISPOSITIVO DE DOBLADO CON DADO BASCULANTE

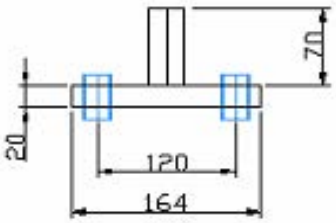
Esquema de porta punzón superior y matriz inferior del dispositivo de doblado de lámina.

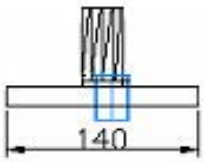


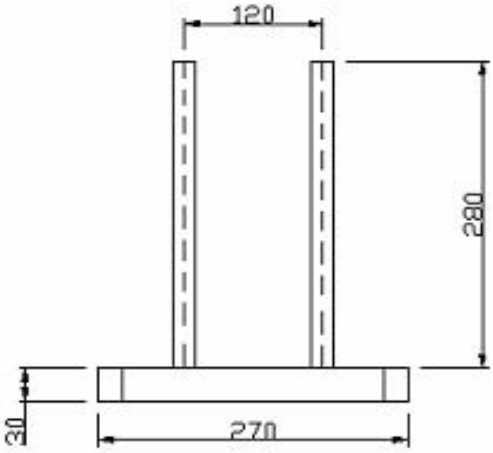
Vistas principales del porta punzón superior y matriz inferior del dispositivo de doblado de lámina (Todas las dimensiones en mm).

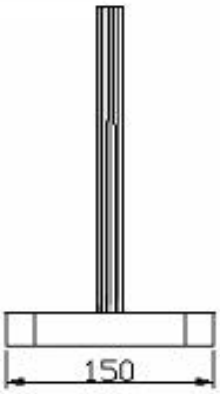


Vista de Planta





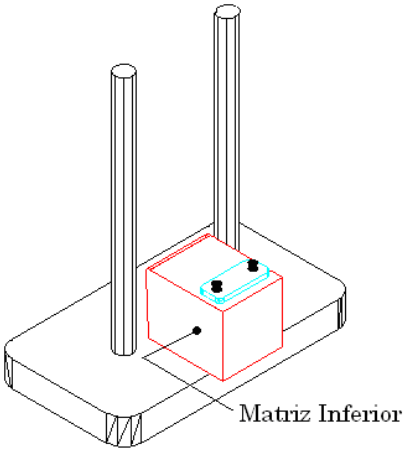




Vista de Frente

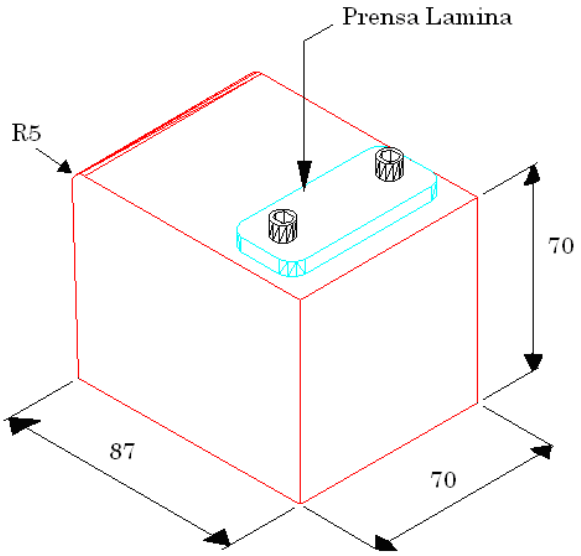
Vista de Perfil

Esquema porta matriz inferior y detalle de la matriz inferior (Todas las dimensiones en mm).

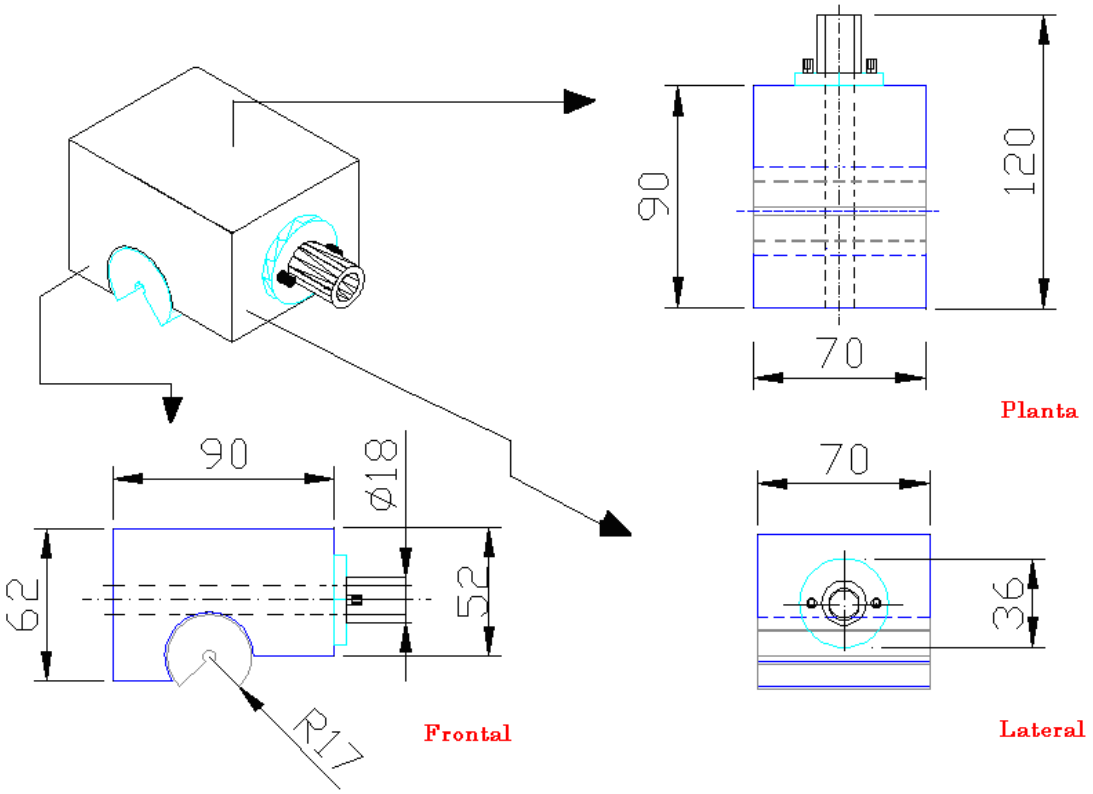


Porta Matriz

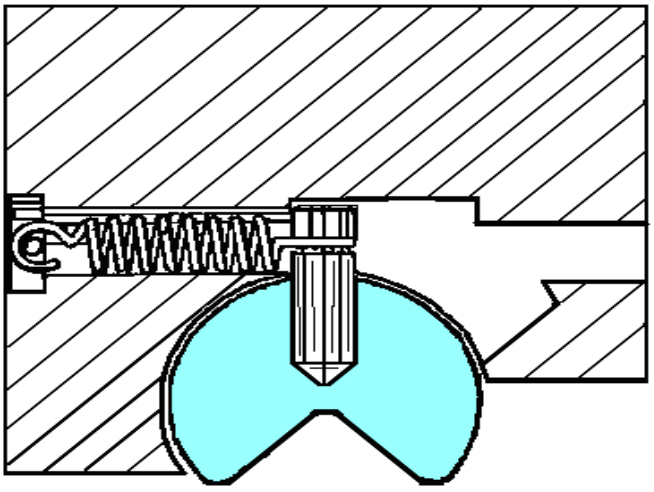
Detalle Matriz Inferior



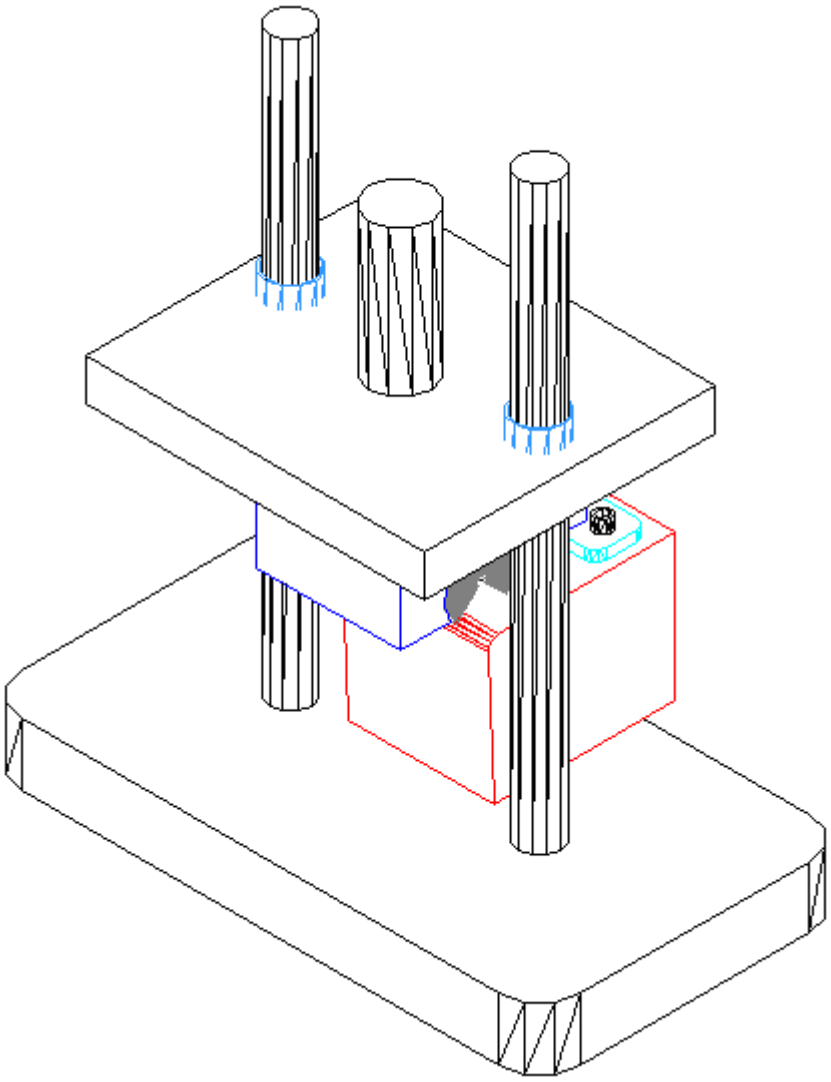
Vistas Principales y detalle interno del sistema basculante. (Todas las dimensiones en mm).



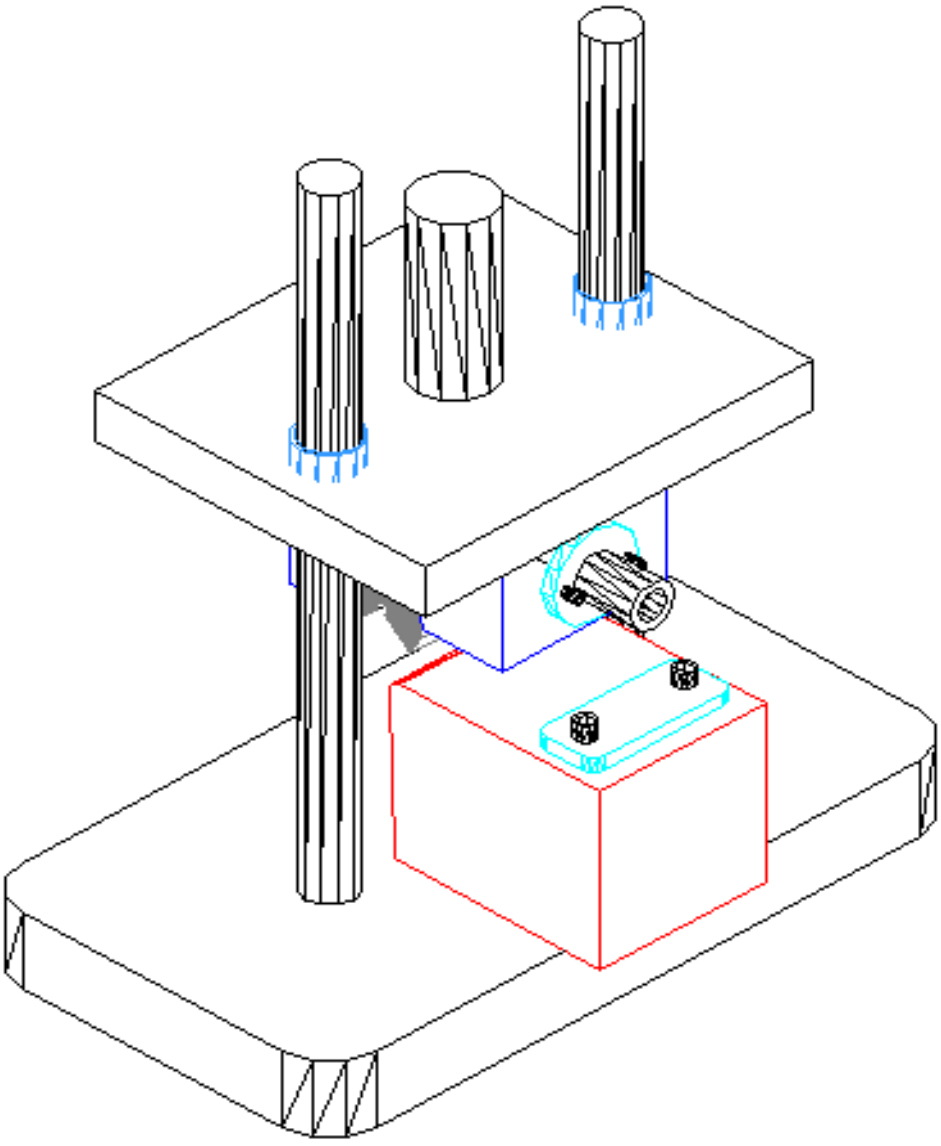
Detalle interno sistema basculante



Esquema ensamblado en isometría del dispositivo de doblado basculante.



Esquema ensamblado en isometría del dispositivo de doblado basculante.



Certificado de calidad acero AISI 1008

ENSAYOS DE TRACCION Y DOBLADO