



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**



**DETERMINACION DEL FACTOR DE FORMA  
DE LA MATRIZ DE DOBLADO EN FUNCION  
DEL TIPO DE MATERIAL Y EL ESPESOR.**

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

**Martínez P Miriam M  
Vizcaino M Alexander J**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**



**DETERMINACION DEL FACTOR DE FORMA**  
**DE LA MATRIZ DE DOBLADO EN FUNCION**  
**DEL TIPO DE MATERIAL Y EL ESPESOR.**

**Martínez P Miriam M**  
**Vascaíno M Alexander J**



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**



### **CERTIFICADO DE APROBACION**

Los abajo firmantes miembros del jurado designado para evaluar el trabajo especial de grado titulado “Determinación del factor de forma de la matriz de doblado en función del tipo de material y espesor”, realizado por los bachilleres: **Miriam M. Martínez Pérez.**, cedula de identidad: **V-15.480.726**, **Alexander J. Vizcaíno M.**, cédula de identidad: **V-15.877.937**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

**Ing. Carmelo Torres**  
**Tutor**

---

**Ing. Oswaldo Urbano**  
**Jurado**

---

**Ing. Evelio Arias**  
**Jurado**

## **Dedicatoria**

A esa fuerza suprema llamada Dios, ha logrado hacer de mí una persona de mucha fe, todas las experiencias de mi vida han sido un verdadero aprendizaje, he tropezado y caído, pero me he levantado y continuado, logrando con esto alcanzar todo lo que me he propuesto. A tí porque estás siempre cerca de mí.

A mis padres Gisela Moreno y Luis Vizcaino, por todas las herramientas dadas durante mi crianza, varios son los caminos a elegir pero siempre tuve la certeza que con todo lo que aprendí y sigo aprendiendo de ustedes, escogería el mejor sendero. Gracias por confiar en mí por encima de cualquier cosa, por su paciencia y su fe en mí.

A mis hermanos Luis José, Luis Manuel y Gisela Karolina, cada uno con su personalidad distinta han sumado, fortaleza y constancia, a mi temperamento.

A todas las personas, familiares o amigos, que han hecho posible la culminación de mi carrera, por su apoyo y ayuda, por haber colaborado de cualquier forma. Estar lejos de casa, te hace ver que existen muchas personas dispuestas a ayudar en lo que este a su alcance, sin importar cuan cerca o lejos estén físicamente, eso vale mucho, gracias por estar ahí.

A María Isabel Freites y Luis Alfredo Padrón, muchos fueron los obstáculos superados y los momentos alegres, por su jovialidad y respeto en todo momento.

A Arlines Loaiza, Rosalvy Ramos, Juan José Gutiérrez, Por todos las horas de estudio y los momentos compartidos desde los inicios de mis estudios universitarios.

A mi compañera de tesis y amiga personal, todas las cosas que aprendí compartiendo contigo me van a servir por el resto de mi vida, Miriam Martínez, logramos pasar de ingenuos a ingeniosos. Mucho éxito y gracias por tener tanta paciencia como yo.

**Alexander Vizcaino.**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo especial de grado te lo dedico principalmente a ti querido Dios, gracias por estar siempre ahí, por ayudarme a finiquitar esta meta y darme la fuerza y valor necesario para continuar por el camino del bien.

A mis padres Miriam y Luis, su cariño y esfuerzo, han logrado hacerme una persona de bien, este logro es suyo. Espero que Dios les conceda la sabiduría para ser más justos. Los quiero un montón y siempre apreciaré su cariño, dedicación y perseverancia.

He tenido la dicha de tener hermanos maravillosos, gracias a ustedes he seguido adelante ya que a través del tiempo me han dado el coraje y animo que necesite en los momentos difíciles de mi vida, Luis hermano eres como un padre para mi y sin tu ayuda no fuese posible este meta lograda, no tengo palabras para expresar la inmensa gratitud hacia ti.....

A lo largo de mi vida he tenido pocos amigos pero valen por miles ya que con ellos aprendí muchas cosas; Maisa hemos compartidos momentos tanto agradables como tristes que nos han enseñado a ser mejores día a día, gracias por estar siempre presente, Luis, Lisbeth amigos incondicionales, Juan, Arlines y Rosalvy, gracias por su apoyo y amistad.

Alex, mi gran amigo, gracias por soportarme. Espero que siempre continuemos siendo buenos amigos. Éxitos en tu carrera y en tu vida...

Miriam Martínez



---

## AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios Todo Poderoso que nos ha guiado a lo largo de este camino, que decidimos emprender, a pesar de las dificultades siempre aparecían nuevas esperanzas.

Gracias a nuestros padres: Miriam Pérez y Luis Martínez, Gisela Moreno y Luis Vizcaíno, por darnos la vida, la fortaleza, y los consejos indicados para convertirnos en profesionales de éxito.

Al CDCH por aprobar el crédito para cubrir parte de los gastos asociados a esta investigación.

Al Ingeniero Carmelo Torres por haber aceptado la tutoría de este Trabajo Especial de Grado.

Al Ingeniero Oswaldo Urbano por darnos la orientación y ayuda necesaria para la realización de este Trabajo de Grado.

A Josmary Pérez por prestarnos su colaboración de forma incondicional y estar dispuesta a ayudarnos en el uso del Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

A la Señora Cira por su amabilidad, comprensión y apoyo, en momentos importantes a lo largo de nuestra carrera.

A David Finol por facilitarnos el uso del Laboratorio de Metalurgia del Ince de Maracay en momentos de verdadera desesperación.

A la señora Alix Chacón, por habernos facilitado la donación de parte del material por medio de Inalum.

A las manos amigas de Luis Padrón, Lisbeth de Padrón, Maria Freites, Dreimar Macías, Rosalvy Ramos, Arlines Loaiza, Luis Garrido, Juan Gutiérrez, Yohelis Pantoja por brindarnos hospitalidad, apoyo, solidaridad, comprensión, en los momentos difíciles y en los alegres.

Y finalmente a todas y cada unas de las personas que en algún momento nos brindaron una ayuda, una información o una palabra de aliento y optimismo gracias a todos.

---



---

## RESUMEN

La finalidad de este trabajo de investigación es determinar el factor de forma en el proceso de doblado utilizando diferentes matrices y materiales con espesores de 1.5, 2 y 3 mm respectivamente. Inicialmente para lograr el propósito a los materiales a ser utilizados se le determinaron algunas propiedades mecánicas necesarias para la caracterización del mismo. En este sentido se realizaron a los materiales diferentes ensayos como lo son el de tracción de acuerdo a la norma establecida por la ASTM A-370, ensayos de doblado de acuerdo a la norma A-E190, microdureza Rockwell A, composición química para verificar el porcentaje de los elementos presentes en la muestra y un estudio metalográfico con la finalidad de observar la microestructura presente. Empleando tres (3) materiales; Aluminio 3003 H14, Acero 1020 y Acero 304, tres (3) matrices "U", "V" y "U Canal" y tres espesores 1.5, 2 y 3 mm se realizaron primeramente pruebas piloto, para luego hacer los ensayos respectivos de doblado, de los cuales se tomaron tres láminas de cada material y cada espesor para doblarlas según la matriz a usar, obteniendo con esto la fuerza máxima de doblado, necesaria para la determinación del factor de forma.

---



---

---

## INDICE GENERAL

INTRODUCCION	.....1
<b>CAPITULO I. EL PROBLEMA</b>	
1.1 El problema.	.....2
1.2 Objetivos.	.....4
1.2.1 Objetivo general.	.....4
1.2.2 Objetivos específicos.	.....4
1.3 Limitaciones.	.....4
1.4 Delimitación.	.....5
1.5 Plan de Trabajo.	.....5
<b>CAPITULO II FUNDAMENTOS TEORICOS</b>	
2.1 Antecedentes de la investigación	.....6
2.2 Trabajo en frío.	.....7
2.2.1 Ventajas.	.....7
2.2.2 Desventajas.	.....7
2.3 Acero.	.....8
2.3.1 Efecto de los elementos de aleación sobre las propiedades del acero.	.....8
2.4 Acero al Carbono.	.....9
2.4.1 Aplicaciones de los aceros al carbono.	.....10
2.5 Aceros inoxidables.	.....11
2.5.1 Serie 300- Los Aceros Inoxidables Austeníticos.	.....12
2.5.2 Acero inoxidable AISI 304 Antimagnético tipo 18/8.	.....13
2.6 Aluminio.	.....13
2.7 El proceso de doblado.	.....16
2.7.1 Descripción del proceso de doblado.	.....17

---

---



---

2.8 Tipos de doblado.	18
2.8.1 Doblado en “V”.	18
2.8.2 Doblado en “U”.	20
2.8.3 Doblado en “U canal”.	21
2.8.4 Doblado al aire.	22
2.9 Elementos que influyen en el doblado.	22
2.9.1 Material de las láminas.	23
2.9.2 Recuperación elástica del metal (efecto resorte).	23
2.9.3 Radio mínimo de doblado.	25
2.10 Análisis de Ingeniería del doblado.	26
2.11 Esfuerzo necesario para el doblado en V.	26
2.12 Esfuerzo Necesario para el Doblado en U	28
2.13 Ecuación empírica del doblado.	31
2.14 Otras operaciones en el doblado.	31
2.14.1 Formado de Bridas.	32
2.14.2 El Doblado.	32
2.14.3 El Engargolado.	33
2.14.4 Rebordeado.	33
 <b>CAPITULO III MARCO METODOLOGICO</b>	
3.1 Nivel de la investigación.	34
3.2 Diseño de la investigación.	34
3.2.1 Caracterización de los materiales a ensayar.	34
3.2.1.1 Microscopía óptica.	34
3.2.1.2 Ensayos de dureza del material.	36
3.2.1.3 Ensayo de Tracción.	37
3.3 Realización de un ensayo de doblado factorial.	38
3.4 Materiales y equipos utilizados.	38

---



---

<b>3.5 Instrumentos utilizados</b>	.....40
<b>CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS</b>	
4.1 Ensayo de Dureza Rockwell.	.....41
4.1.1 Ensayo de Dureza Rockwell para Aluminio 3003 H14.	.....41
4.1.2 Ensayo de Dureza Rockwell para Acero 1020.	.....41
4.1.3 Ensayo de Dureza Rockwell para Acero 304.	.....42
4.2.1 Microscopía realizada a las probetas de Aluminio 3003 H14.	.....43
4.2.2 Microscopía realizada a las probetas de Acero 1020.	.....44
4.2.3 Microscopía realizada a las probetas de Acero 304.	.....45
4.3 Ensayos de tracción.	.....46
4.4 Análisis en la Composición Química.	.....47
4.4.1 Acero Inoxidable 304.	.....47
4.4.2 Acero al Carbono 1020.	.....48
4.4.3 Aluminio 3003 H14.	.....48
4.5 Ensayo de Doblado.	.....48
4.6 Factor de Forma.	.....58
4.6.1 Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor.	.....59
4.6.2 Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor.	.....60
4.6.3 Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor.	.....61
4.6.4 Factor de Forma para Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor.	.....62
4.6.5 Factor de Forma para Acero 1020 de 2 mm. de espesor.	.....63
4.6.6 Factor de Forma para Acero 1020 de 3 mm. de espesor.	.....64
4.6.7 Factor de Forma para Acero 304 de 1.5 mm. de espesor.	.....65
4.6.8 Factor de Forma para Acero 304 de 2 mm. de espesor.	.....66
4.6.9 Factor de Forma para Acero 304 de 3 mm. de espesor.	.....67

---



---

4.7 Recuperación Elástica.	67
4.7.1 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 para Doblado en “U canal”.	69
4.7.2 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 para Doblado en “U”.	70
4.7.3 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 para Doblado en “V”.	70
4.7.4 Recuperación Elástica de Acero 1020 para Doblado en “U canal”.	71
4.7.5 Recuperación Elástica de Acero 1020 para Doblado en “U”.	72
4.7.6 Recuperación Elástica de Acero 1020 para Doblado en “V”.	73
4.7.7 Recuperación Elástica de Acero 304 para Doblado en “U canal”.	74
4.7.8 Recuperación Elástica de Acero 304 para Doblado en “U”.	75
4.7.9 Recuperación Elástica de Acero 304 para Doblado en “V”.	75
4.8 Recuperación elástica en función de la matriz.	76
4.9 Recuperación elástica en función del espesor.	79
4.10 Comparación entre los factores de forma. Material Aluminio 3003 H14.	82
4.11 Comparación entre los factores de forma. Material Acero 1020.	83
4.12 Comparación entre los factores de forma. Material Acero 304.	84
4.13 Graficas de recuperación elástica de Aluminio 3003 H14 ( $\Delta\alpha$ vs $\alpha_{prom}$ )	85
4.14 Graficas de recuperación elástica de Acero 1020 ( $\Delta\alpha$ vs $\alpha_{prom}$ )	88

---



---

4.15 Graficas de recuperación elástica de Acero 304 ( $\Delta\alpha$ vs $\alpha_{prom}$ )	.....91
4.16 Graficas de recuperación elástica de Aluminio 3003 H14 ( $kr$ vs $\alpha_{prom}$ )	.....94
4.17 Graficas de recuperación elástica de Acero 1020 ( $kr$ vs $\alpha_{prom}$ )	.....97
4.18 Graficas de recuperación elástica de Acero 304 ( $kr$ vs $\alpha_{prom}$ )	.....100
5.CONCLUSIONES	.....103
5.1 RECOMENDACIONES	.....105
5.2 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	.....106
APENDICES	.....107

---

---



---

## INDICE DE TABLAS

Tabla. 1.1 Aplicaciones de los aceros al carbono.	10
Tabla 4.1.A. Valores de dureza para Aluminio con espesor de 1.5, 2 y 3 mm.	41
Tabla 4.2.A. Valores de dureza para Acero 1020 con espesor de 1.5, 2 y 3 mm.	41
Tabla 4.3.A. Valores de dureza para Acero 304 con espesor de 1.5, 2 y 3 mm.	42
Tabla 4.4.A. Composición química del Acero 304 con espesor 1.5, 2 y 3 mm.	47
Tabla 4.5.A. Composición química del Acero 1020 con espesor 1.5, 2 y 3 mm.	48
Tabla 4.6.A Composición química del Aluminio 3003 H14 con espesor 1.5,2 y 3 mm	48
Tabla 4.7A Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14, de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, “U” y “V”.	59
Tabla 4.8A Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14, de 2 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, ”U” y “V”.	60
Tabla 4.9A Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14, de 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, “U” Y “V”.	61
Tabla 4.10A Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020, de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”.”U” y “V”.	62
Tabla 4.11A Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020, de 2 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, “U” y “V”.	63
Tabla 4.12A Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020, de 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, “U” y “V”.	64
Tabla 4.13A Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304, de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, “U” y “V”.	65

---



---

Tabla 4.14A Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304, de 2 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, “U” y “V”.	.....66
Tabla 4.15A Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304, de 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”, “U” y “V”.	.....67
Tabla 4.16A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”.	.....69
Tabla 4.17A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14, de 1.5,2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U”.	.....70
Tabla 4.18A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “V”.	.....70
Tabla 4.19A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”.	.....71
Tabla 4.20A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U”.	.....72
Tabla 4.21A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “V”.	.....73
Tabla 4.22A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U canal”.	.....74
Tabla 4.23A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U”.	.....75
Tabla 4.24A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304, de 1.5, 2 y 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “V”.	.....75
Tabla 4.25A Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Aluminio 3003 H14, de 1.5,2y 3 mm. de espesor.	.....77
Tabla 4.26A Recuperación elástica en función de la forma de la	.....77

---



---

matriz, para láminas de Acero 1020, de 1.5,2 y 3 mm. de espesor.	
Tabla 4.27A Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Acero 304, de 1.5,2 y 3 mm. de espesor.	.....78
Tabla 4.28A Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Aluminio 3003 H14 y matriz “U Canal”, “U” y “V”.	.....79
Tabla 4.29A Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 1020 y matriz “U Canal” “U” y “V”.	.....80
Tabla 4.30A Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 304 y matriz “U Canal” “U” y “V”.	.....81
Tabla 4.31 Comparación entre los factores de forma en Aluminio 3003 H14.	.....82
Tabla 4.32 Comparación entre los factores de forma en Acero 1020.	.....83
Tabla 4.33 Comparación entre los factores de forma en Acero 304.	.....84

---

---



---

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Esquema de una lámina sometida a doblado.	.....17
Fig. 2.2 Esquema de las etapas de un proceso de doblado.	.....17
Fig. 2.3.1 A Punzón y matriz usado en la realización del doblado en “V”.	.....18
Fig. 2.3.1 B Esquema del doblado en “V”.	.....19
Fig. 2.3.2 A Punzón y matriz usado en la realización del doblado en “U”.	.....20
Fig. 2.3.2 B Esquema del proceso de doblado en “U”.	.....20
Fig. 2.3.3A Punzón y matriz usado en la realización del doblado en “U canal”.	.....21
Fig. 2.3.3B Esquema del proceso de doblado en “U canal”.	.....21
Fig. 2.3.4 Esquema del proceso de doblado al aire.	.....22
Fig. 2.4 Representación de la recuperación elástica durante la realización de un ensayo de doblado en “U canal”.	.....24
Fig. 2.5 Esfuerzo necesario para doblar una lámina en “U canal”.	.....28
Fig. 2.6.1 Representación de formado de bridas.	.....32
Fig. 2.6.2 Representación de doblez.	.....32
Fig. 2.6.3 Representación de engargolado.	.....33
Fig. 2.6.4 Representación de rebordeado.	.....33
Fig. 3.1 Microscopio óptico.	.....35
Fig. 3.2 Probetas embutidas	.....35
Fig. 3.3 Durómetro.	.....36
Fig. 3.4 Máquina de ensayo universal.	.....37

---



---

Fig. 3.5	Probetas para la realización de ensayos de tracción, representación de las medidas en milímetros.	.....37
Fig. 3.6	Probetas para la realización de ensayos de doblado, representación de las medidas en milímetros.	.....38
Fig. 3.7	Esquema del plan de trabajo para la determinación del factor de forma de la matriz de doblado en función del tipo de material y espesor	.....39
Fig. 3.8	Cortadora metalográfica	.....40
Fig. 3.9	Desbastadora de bandas.	.....40
Fig. 3.10	Banco de pulido.	.....40
Fig. 4.1.	Microscopía Óptica para Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, con 200X.	.....43
Fig. 4.2.	Microscopía Óptica para Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, con 400X.	.....43
Fig. 4.3.	Microscopía Óptica para Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor, con 200X.	.....43
Fig. 4.4.	Microscopía Óptica para Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor, con 400X.	.....43
Fig. 4.5.	Microscopía Óptica para Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor, con 200X.	.....43
Fig. 4.6.	Microscopía Óptica para Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor, con 400X.	.....43
Fig. 4.7.	Microscopía Óptica para Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor, con 200X.	.....44
Fig. 4.8.	Microscopía Óptica para Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor, con 400X.	.....44
Fig. 4.9.	Microscopía Óptica para Acero 1020 de 2 mm. de espesor, con 200X.	.....44

---



---

Fig. 4.10. Microscopía Optica para Acero 1020 de 2 mm. de espesor, con 400X.	44
Fig. 4.11. Microscopía Optica para Acero 1020 de 3 mm. de espesor, con 200X.	44
Fig. 4.12. Microscopía Optica para Acero 1020 de 3 mm. de espesor, con 400X.	44
Fig. 4.13. Microscopía Optica para Acero 304 de 1.5 mm. de espesor, con 200X.	45
Fig. 4.14. Microscopía Optica para Acero 304 de 1.5 mm. de espesor, con 400X.	45
Fig. 4.15. Microscopía Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 200X.	45
Fig. 4.16. Microscopía Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 400X.	45
Fig. 4.17. Microscopía Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 200X.	45
Fig. 4.18. Microscopía Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 400X.	45
Fig. 4.19 Esfuerzo - Deformación para Aluminio 3003 H14.	46
Fig. 4.20 Esfuerzo - Deformación para Acero 1020.	47
Fig. 4.21 Esfuerzo - Deformación para Acero 304.	47
Fig. 4.22. Doblado en “U Canal” Aluminio 3003 H14. Espesor 1.5 mm.	49
Fig. 4.23. Doblado en “U Canal” Aluminio 3003 H14. Espesor 2 mm.	49
Fig. 4.24. Doblado en “U Canal” Aluminio 3003 H14 .Espesor 3 mm.	49
Fig. 4.25. Doblado en “U” Aluminio 3003 H14. Espesor 1.5 mm.	50

---



---

Fig. 4.26. Doblado en “U” Aluminio 3003 H14. Espesor 2 mm.	.....50
Fig. 4.27. Doblado en “U” Aluminio 3003 H14 . Espesor 3 mm.	.....50
Fig. 4.28. Doblado en “V” Aluminio 3003 H14 .Espesor 1.5 mm.	.....51
Fig. 4.29. Doblado en “V” Aluminio 3003 H14 .Espesor 2 mm.	.....51
Fig. 4.30 Doblado en “V” Aluminio 3003 H14. Espesor 3 mm.	.....51
Fig. 4.31. Doblado en “U Canal” Acero 1020. Espesor 1.5 mm.	.....52
Fig. 4.32. Doblado en “U Canal” Acero 1020. Espesor 2 mm.	.....52
Fig. 4.33. Doblado en “U Canal” Acero 1020. Espesor 3 mm.	.....52
Fig. 4.34. Doblado en “U” Acero 1020. Espesor 1.5 mm.	.....53
Fig. 4.35. Doblado en “U” Acero 1020. Espesor 2 mm.	.....53
Fig. 4.36. Doblado en “U” Acero 1020. Espesor 3 mm.	.....53
Fig. 4.37. Doblado en V. Acero 1020. Espesor 1.5 mm.	.....54
Fig. 4.38. Doblado en V. Acero 1020. Espesor 2 mm.	.....54
Fig. 4.39. Doblado en V. Acero 1020. Espesor 3 mm.	.....54
Fig. 4.40. Doblado en U Canal. Acero 304. Espesor 1.5 mm.	.....55
Fig. 4.41. Doblado en U Canal. Acero 304. Espesor 2 mm.	.....55
Fig. 4.42. Doblado en U Canal. Acero 304. Espesor 3 mm.	.....55
Fig. 4.43. Doblado en U. Acero 304. Espesor 1.5 mm.	.....56
Fig. 4.44. Doblado en U. Acero 304. Espesor 2 mm.	.....56
Fig. 4.45. Doblado en U. Acero 304. Espesor 3 mm.	.....56
Fig. 4.46. Doblado en V. Acero 304. Espesor 1.5 mm.	.....57
Fig. 4.47. Doblado en V. Acero 304. Espesor 2 mm.	.....57
Fig. 4.48. Doblado en V. Acero 304. Espesor 3 mm.	.....57

---



---

Fig. 4.49. Esquema demostrativo de la recuperación elástica en una lámina sometida a doblado en “U canal”.	.....68
Fig. 4.50. Esquema demostrativo de la recuperación elástica en una lámina sometida a doblado en “U”.	.....68
Fig. 4.51 Esquema demostrativo de la recuperación elástica en una lámina sometida a doblado en “V”.	.....68
Fig. 4.52 Comparación entre los factores de forma de acuerdo a espesores y matrices en Aluminio 3003 H14.	.....82
Fig. 4.53 Comparación entre los factores de forma de acuerdo a espesores y matrices en Acero 1020.	.....83
Fig. 4.54 Comparación entre los factores de forma de acuerdo a espesores y matrices en Acero 304.	.....84
Fig. 4.55 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U canal) en función de $\Delta\alpha$ .	.....85
Fig. 4.56 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U) en función de $\Delta\alpha$ .	.....85
Fig. 4.57 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz V) en función de $\Delta\alpha$ .	.....86
Fig. 4.58 Comportamiento de Recuperación Elástica en Aluminio 3003 H14 en función de $\Delta\alpha$	.....87
Fig. 4.59 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U canal) en función de $\Delta\alpha$ .	.....88
Fig. 4.60 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U) en función de $\Delta\alpha$ .	.....88
Fig. 4.61 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz V) en función de $\Delta\alpha$ .	.....89
Fig. 4.62 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 1020 en función de $\Delta\alpha$ .	.....90
Fig. 4.63 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U	.....91

---



---

canal) en función de  $\Delta\alpha$  .

Fig. 4.64 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U) en función de $\Delta\alpha$ .	.....91
Fig. 4.65 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz V) en función de $\Delta\alpha$ .	.....92
Fig. 4.66 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 1020 en función de $\Delta\alpha$ .	.....93
Fig. 4.67 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U canal) en función de Kr.	.....94
Fig. 4.68 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U) en función de Kr.	.....94
Fig. 4.69 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz V) en función de Kr.	.....95
Fig. 4.70 Comportamiento de Recuperación Elástica en Aluminio 3003 H14 en función de Kr.	.....96
Fig. 4.71 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U canal) en función de Kr.	.....97
Fig. 4.72 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U) en función de Kr.	.....97
Fig. 4.73 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz V) en función de Kr.	.....98
Fig. 4.74 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 1020 en función de Kr.	.....99
Fig. 4.75 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U canal) en función de Kr.	.....100
Fig. 4.76 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U) en función de Kr.	.....100
Fig. 4.77 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz V) en función de Kr.	.....101

---



---

Fig. 4.78 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 304 en función de  $K_r$  .....102





---

## INTRODUCCION

En el presente, existen muchos procesos de fabricación que se aplican en la industria, uno de los más utilizados es el proceso de doblado ya que a partir de este tipo de conformación se obtienen gran cantidad de productos de una manera compleja.

Existen variables que afectan el proceso de doblado, de acuerdo a las variaciones de éstas se obtendrán diferentes caracterizaciones en el proceso. El tipo de matriz es uno de ellos, la forma de la matriz define el estado final del material, el espesor de la lámina a usar influye en la fuerza de doblado y en la deformación microestructural, de igual modo el material juega un papel importante dado que cada uno de éstos presentan propiedades diferentes y reaccionará de acuerdo a sus características.

En resumen, este trabajo se basa en la obtención de un parámetro determinado, como es el factor de forma. Este se analizará de acuerdo al tipo de material, con distintos espesores y diferentes matrices de forma tal de establecer las comparaciones correspondientes y así establecer el comportamiento del mismo. Para esto es necesario realizar una serie de ensayos para determinar las características de los materiales en su estado inicial y final de proceso.

Básicamente este trabajo esta dividido en cinco capítulos:

Capitulo I; comprende el problema, objetivo general, objetivos específicos, limitaciones, delimitaciones y plan de trabajo.

Capitulo II; esta formado por los antecedentes de la investigación y fundamentos teóricos.

Capitulo III; se divide en nivel de la investigación, diseño de la investigación y realización de un ensayo de doblado factorial.

Capitulo IV; muestra los resultados obtenidos y los análisis de la investigación.

Capitulo V ; se encuentran las conclusiones y recomendaciones.

---



## 1.1 EL PROBLEMA

La clave del comportamiento de un material está en las fuerzas que pueden modificar la disposición de las partículas que lo componen. En el trabajo de láminas metálicas la operación de doblado se define como la deformación del metal alrededor de un eje recto. Durante la operación de doblado el metal dentro del plano neutro se comprime mientras que el metal fuera del plano neutral se estira. Cuando el esfuerzo exterior es pequeño la deformación es proporcional al esfuerzo, y el metal vuelve a su forma original, en cuanto cesa el esfuerzo, ésta es la deformación elástica y mientras el esfuerzo no sobrepasa el límite elástico no se producen deformaciones permanentes. Si el esfuerzo exterior se lleva por encima del límite elástico, se producen deformaciones permanentes en el metal, el cual ya no vuelve a recobrar su forma original, se producen entonces en el metal deformaciones plásticas, así que el doblado toma una forma inalterable al remover los esfuerzos que lo causaron. La operación de doblado modifica la geometría y la disposición interna de las partículas que conforman la lámina metálica sometida a este proceso. En el proceso de doblado es importante controlar varios parámetros, se utilizan como herramientas de trabajo distintos punzones y matrices, para generar diferentes formas en las láminas a doblar. El factor de forma permite predecir que tanto trabajo de deformación plástica puede soportar un material. En vista de que la información con respecto al factor es muy escasa, se pretende determinarlo para distintos materiales utilizando procesos de doblado.

Los requerimientos para cada una de las áreas abarcadas por la necesidad de piezas producidas por medios del doblado varía en cada caso, una de las variantes a tomar en cuenta es el material ya que éste va a proporcionar información de las propiedades de la pieza a doblar, de este modo los aceros al carbono proporcionan alta resistencia a la tracción así como también un alto límite elástico, mientras que los



aceros inoxidables podrían ofrecer tenacidad o alta dureza según el tratamiento al que haya sido sometido. Por otro lado el aluminio posee alta resistencia a la ductilidad. En este mismo sentido, el tamaño es otra variable a considerar en vista de que al variar el espesor de una lámina o el ancho de la matriz de doblado se va a notar esto en forma directa en el cálculo de la fuerza de doblado. [1]

El resultado del doblado es un pieza con un ángulo inducido, aunque no tan obvio ocurre un incremento en el radio de doblado; debido a la recuperación elástica. La magnitud de la recuperación elástica se incrementa por el módulo de elasticidad y la resistencia a la fluencia del material de trabajo. [6]

La fuerza que se requiere para realizar el doblado depende de la geometría del punzón y de la matriz, se puede determinar por medio de una ecuación que relaciona, el espesor de la lámina, el ancho de la matriz, el factor de forma, la longitud del doblado y la resistencia del material.

Al evaluar tres materiales diferentes, acero inoxidable, acero al carbono y aluminio, de varios espesores de forma de agregar mayor variabilidad al estudio tomando 1,5 2 y 3 mm para tres matrices de forma diferentes de U, V y U con ángulos rectos se obtendrá la fuerza de doblado para cada una de las combinaciones posibles. Al obtener estos valores de fuerza y comportamientos se puede obtener de cada experiencia el factor de forma y así determinar como influye la matriz, el material y el espesor en el factor de forma.





## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo general.

- ❖ Determinar el factor de forma de la matriz de doblado en función del espesor y del tipo de material.

### 1.2.2 Objetivos específicos.

- ❖ Obtener la gráfica fuerza-desplazamiento en función de la forma de la matriz, tipo de material y espesor.
- ❖ Determinar el factor de forma en el proceso de doblado para acero de bajo carbono, aluminio comercial y acero inoxidable.
- ❖ Establecer la recuperación elástica en el proceso de doblado en función del espesor del material.
- ❖ Evaluar la recuperación elástica en el proceso de doblado en función de la geometría de la matriz.

## 1.3 LIMITACIONES

- ❖ El recurso económico necesario para la compra de materiales así como cualquier necesidad presente durante la realización del trabajo de grado.
  - ❖ Los continuos desperfectos de los equipos de laboratorio a ser utilizados, lo cuál impide el uso de los mismos.
- 
-



### I.4 DELIMITACIONES

- ❖ Espesor de las láminas para las pruebas de doblado, de acuerdo a la disponibilidad comercial.
  
- ❖ Materiales usados, Acero de bajo carbono, Aluminio y Acero inoxidable para la realización de probetas para el ensayo.
  
- ❖ Las tres matrices usadas para los proceso de doblado en forma de U, V y U con ángulos rectos.

### I.5 PLAN DE TRABAJO

Actividad	Semestre	
	I	II
Establecer los materiales y espesores a usar para el proceso de doblado.	X	
Determinación de las dimensiones y el número de las probetas a utilizar.	X	
Fabricación de las probetas.	X	
Aplicación de los tratamientos térmicos.		X
Ensayos de tracción.		X
Análisis de los resultados del proceso de doblado.		X



## 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

En 1999, Anthony Lavanga, presentó ante la Universidad Central de Venezuela el trabajo de grado titulado “Diseño de un máquina automática para corte y doblado de alambre”, mediante el cual desarrolla una amplia investigación de los aspectos mas importante que deben ser tomados en consideración al realizar un doblado cualquiera que sea el método utilizado.

En el 2003, Bladimir Oviol presentó ante la Universidad de Carabobo, el trabajo especial de grado, “Influencia del espesor del material y radio del punzón en el ángulo de recuperación elástica de materiales metálicos sometidos al proceso de doblado”; con esta investigación se establecieron límites del efecto de la restitución elástica para el control del proceso de diseño y evaluación de materiales metálicos.

En el 2003 Maylheen Castillo presentó ante la Universidad de Carabobo el trabajo especial de grado, “Determinación de la zona afectada mecánicamente según la variación de los parámetros característicos en el proceso de doblado” en el cual realizo un estudio de las variables que influyen en el proceso de doblado de forma tal de obtener las variaciones en la microestructura del material.

En el 2005 María García –Romeu Presentó ante la Universidad de Girona la Tesis Doctoral, “Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa. Modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final” en el cual se desarrollo una herramienta que asistiera a la predicción de la forma final de una pieza doblada al aire y de la cantidad de recuperación que esta experimenta.



## FUNDAMENTOS TEORICOS

### 2.2 Trabajo en frío.

El trabajo en frío es el modelado de los metales por medio de deformación plásticas por debajo de la temperatura de recristalización. En la mayoría de los casos se hace a temperatura ambiente. Los procesos de trabajo en frío son muy importantes en la producción y su uso tiene ciertas ventajas y desventajas marcadas, comparándolas con los procesos de trabajo en caliente. [6]

#### 2.2.1 Ventajas.

Mayor control dimensional.

Reproductibilidad e intercambiabilidad de las piezas.

Mejor acabado de las superficies.

No se necesita recalentamiento.

Mejora las propiedades de la resistencia.

#### 2.2.2 Desventajas.

Se requieren mayores fuerzas para la deformación.

Se necesitan equipos más potentes y pesados.

La superficie de los metales debe estar limpia.

Se produce endurecimiento por deformación.

Se dispone de menor ductilidad.

El examen de estas ventajas y desventajas hacen el proceso en frío particularmente adaptable desde el punto de vista de la producción en masa. Las desventajas principales son aquellas relativas a las grandes fuerzas y potencia

---

---



requerida y a las limitaciones de la ductilidad. El equipo pesado necesario se puede justificar económicamente cuando se produce un gran número de piezas, ya que los requerimientos de fuerzas y energía no son límites serios. [6]

### **2.3 Acero.**

El acero es una aleación maleable de hierro y carbono, que contiene generalmente cantidades apreciables de manganeso, se produce a partir del arrabio mediante la eliminación de impurezas en un horno básico de oxígeno, en un horno de hogar abierto o en un horno eléctrico. [1]

#### **2.3.1 Efecto de los elementos de aleación sobre las propiedades del acero.**

Cuando se agregan al acero cantidades relativamente grandes de elementos de aleación, se destruye el comportamiento característico de los aceros al carbono. La mayor parte del acero de aleación es de contenido medio o alto de carbono al que se le han agregado diversos elementos para modificar sus propiedades en un grado apreciable, pero todavía debe sus características distintivas al carbono que contiene. El porcentaje del elemento de aleación necesario para un fin dado varía desde unas cuantas centésimas hasta posiblemente el 5 %.

Cuando están listos para el servicio, estos aceros contienen por lo general sólo dos elementos constitutivos, ferrita y carburo. La única manera en que un elemento de aleación puede afectar a las propiedades del acero es modificando la dispersión del carburo en la ferrita, variando las propiedades de esta última o cambiando las propiedades del carburo. Los elementos más efectivos para incrementar la templabilidad del acero son el manganeso, el silicio y el cromo.



Elementos como el molibdeno, el tungsteno y el vanadio son eficaces para aumentar la templabilidad, cuando se encuentran disueltos en la austenita, pero por lo común se encuentran en la austenita en forma de carburos. La ventaja principal de estos elementos que forman carburos es que impiden la aglomeración de los carburos en la martensita revenida.

La operación de revenido hace desaparecer los esfuerzos internos en el acero templado y causa la esferoidización de las partículas de carburo con una pérdida consiguiente en la dureza y la resistencia mecánica. Otro factor que contribuye a la resistencia de un acero de aleación es la presencia del elemento de aleación en la ferrita. Cualquier elemento que se encuentre en solución sólida en un metal aumentará la resistencia al mismo, de manera que estos elementos contribuirán materialmente a la resistencia de los aceros templados y revenidos. Los elementos más eficaces para aumentar la resistencia de la ferrita son el fósforo, el silicio, el manganeso, el níquel, el molibdeno, el tungsteno y el cromo. [1]

#### **2.4 Acero al Carbono.**

El acero al carbono debe sus propiedades distintivas a la cantidad de carbono que posee, constituye el principal producto de los aceros que se producen, estimando un 90% de la producción total producida mundialmente corresponde a aceros al carbono y el 10% restante son aceros aleados. Estos aceros son también conocidos como aceros de construcción, La composición química de los aceros al carbono es compleja, además del hierro, y el carbono que generalmente no supera el 1%, hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como el silicio y manganeso, y hay otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad.

---

---



### 2.4.1 Aplicaciones de los aceros al carbono.

Tabla 1.1 Aplicaciones de los aceros al carbono.

Porcentaje de C.	Aplicaciones.
0.05 – 0.10	Láminas, tiras, tubos, clavos de alambre.
0.10 – 0.20	Remaches, tornillos, piezas para templarse superficialmente
0.20 – 0.35	Acero estructural, placa, piezas forjadas como árboles de levas
0.35 – 0.45	Acero para maquinaria (árboles, ejes, bielas, etc.)
0.45 - 0.55	Piezas grandes de forja (cigüeñales, engranes para trabajo pesado, etc.)
0.60 – 0.70	Matrices para cabezas de pernos y para estampado, rieles, tornillos prisioneros
0.70 – 0.80	Cuchillas para tijeras o cizallas, cortafríos, martillos, picos, sierras de cinta
0.80 – 0.90	Matrices y punzones de corte y para punzonar, barrenas o perforadores para roca, cinceles de mano
0.90 – 1.00	Resortes, escariadores, brochas, punzones pequeños y matrices o dados
1.00 -1.10	Resortes pequeños, herramientas para torno, cepilladora, limadora y ranuradora
1.10 – 1.20	Brocas helicoidales, machos de roscar pequeños, dados para roscar (terrajás), cuchillería, herramientas pequeñas de torno
1.20 – 1.30	Limas, pistas para bolas, mandriles, matrices para estirado o trefilado, hojas de afeitar

[1]

En general los aceros al carbono ordinarios contienen:

$C < 1\%$ ,  $Mn < 0.90\%$ ,  $Si < 0.50\%$ ,  $P < 0.10\%$ ,  $S < 0.10\%$



## 2.5 Aceros inoxidables

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables es debida a una delgada película de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero; como consecuencia del agregado de los elementos cromo, níquel, molibdeno, titanio, niobio y otros se producen distintos tipos de acero inoxidable, cada uno con diferentes propiedades.

A pesar de ser sumamente delgada ésta película invisible fuertemente adherida al metal, lo protege contra los distintos tipos de corrosión, renovándose inmediatamente cuando es dañada por abrasión, corte, maquinado, etc. Aunque la mínima cantidad de cromo necesaria para conferir esta resistencia superior a la corrosión depende de los agentes de corrosión, el Instituto Estadounidense de Hierro y Acero ha elegido el 10 por ciento de cromo como la línea divisoria entre aceros aleados y aceros inoxidables, mientras que otros establecen ese límite entre el 10,5% y el 11%.

Los aceros inoxidables no son indestructibles, sin embargo con una selección cuidadosa, sometiéndolos a procesos de transformación adecuados y realizando una limpieza periódica, algún integrante de la familia de los aceros inoxidables resistirá las condiciones corrosivas y de servicio más severas. Resiste a la mayoría de los ácidos y agentes químicos industriales hasta 800°C además de agua salada. Para industrias químicas, alimenticia, y vitivinícola, petróleo, laboratorios, construcciones navales y aeronáuticas. La adición de molibdeno mejora la resistencia a la corrosión en ciertos medios. Alta resistencia al ataque de ácidos orgánicos e inorgánicos.

Todos los aceros inoxidables contienen el cromo suficiente para darles sus características de inoxidables, muchas aleaciones inoxidables contienen además níquel para reforzar aun más su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son añadidas al acero en estado de fusión para hacerlo inoxidable en toda su masa, por



este motivo, los aceros inoxidable no necesitan ser ni chapeados, ni pintados, ni de ningún otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión.

El acero ordinario, cuando queda expuesto a los elementos, se oxida y forma óxido de hierro pulverulento en su superficie; si esta no se combate, la oxidación sigue adelante hasta que el acero esté completamente corroído. También los aceros inoxidable se oxidan, pero en vez de óxido común, lo que se forma en la superficie es una tenue película con un espesor típico de 8 a 10 Ångstroms (1 Angstrom =  $10^{-8}$  cm.) de óxido de cromo -que también contiene hierro y níquel- muy densa que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. Si por cualquier razón esta película de óxido de cromo que recubre los aceros inoxidable es eliminada, se vuelve a formar inmediatamente otra es su reemplazo al combinarse el cromo con el oxígeno de la atmósfera ambiente.

### **2.5.1 Serie 300- Los Aceros Inoxidable Austeníticos.**

Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de Cromo varía de 16 a 28%, el de Níquel de 3.5 a 22% y el de Molibdeno 1.5 a 6%.

Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Las propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene - limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevada temperatura.

Principales aplicaciones: Utensilios y equipo para uso doméstico, hospitalario y en la industria alimentaria, tanques, tuberías, etc.



### **2.5.2 Acero inoxidable AISI 304 Antimagnético tipo 18/8.**

Resiste la mayoría de los ácidos y agentes químicos industriales hasta 800°C aproximadamente, además de la acción atmosférica y agua salada. Todo tipo de empleo en la industria química, alimenticia y vitivinícola, petróleo, laboratorios. Construcciones navales y aeronáuticas no soldadas. [10]

### **2.6 Aluminio.**

El aluminio debe la mayoría de sus aplicaciones a su baja densidad y a la resistencia mecánica relativamente elevada de sus aleaciones, aunque otros usos depende de su resistencia a la corrosión, que es relativamente buena, de sus buenas propiedades para ser trabajado o de sus propiedades eléctricas o térmicas de conductividad y reflexividad.

El aluminio es un elemento que reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no férricos, de ahí su elevado uso en la industria. Muy buena resistencia a la corrosión gracias a la película de alúmina, que se forma en su superficie de forma espontánea y lo protege de la corrosión Una propiedad cada vez más en alza como es la reciclabilidad donde el aluminio destaca especialmente, el proceso de obtención del aluminio requiere una alta cantidad de energía en comparación con otros metales como puede ser el acero, pero esta cantidad de energía se reduce enormemente en el proceso de producción secundaria (reciclaje) para el caso del aluminio, provocando que la industria lo tenga muy en cuenta a la hora de ahorrar dinero en forma de energía.

Las propiedades del aluminio dependen de un conjunto de factores, de estos, el más importante es la existencia de aleantes. Con la excepción del aluminio purísimo (99,99 % de pureza), técnicamente se utilizan sólo materiales de aluminio que



contienen otros elementos. Aún en el aluminio purísimo, las impurezas (Fe y Si) determinan, en gran medida, sus propiedades mecánicas.

Los elementos aleantes principales del aluminio son: cobre (Cu), silicio (Si), magnesio (Mg), zinc (Zn) y manganeso (Mn).

En menores cantidades existen, frecuentemente, como impurezas o aditivos: hierro (Fe), cromo (Cr) y titanio (Ti). Para aleaciones especiales se adiciona: níquel (Ni), cobalto (Co), plata (Ag), litio (Li), vanadio (V), circonio (Zr), estaño (Sn), plomo (Pb), cadmio (Cd) y bismuto (Bi).

La clasificación del aluminio y sus aleaciones se divide en dos grandes grupos bien diferenciados, estos dos grupos son: forja y fundición. Esta división se debe a los diferentes procesos de conformado que puede sufrir el aluminio y sus aleaciones.

Dentro del grupo de aleaciones de aluminio forjado encontramos otra división clara, que es la del grupo de las tratables térmicamente y las no tratables térmicamente. Las no tratables térmicamente solo pueden ser trabajadas en frío con el fin de aumentar su resistencia.

Como propiedades físicas del aluminio caben resaltar, su alta conductividad térmica y eléctrica, esta última le hace adecuado para muchas aplicaciones dentro de la industria eléctrica, su baja temperatura de fusión unido a su elevada temperatura de ebullición hacen al aluminio muy idóneo para la fundición. El aluminio cristaliza en la red FCC ( ó CCC ) y no sufre cambios alotrópicos, lo que le confiere una alta plasticidad, aunque las propiedades mecánicas varían enormemente según sean los elementos aleantes y los tratamientos termomecánicos a los que se haya sometido el aluminio.



La mayor parte de las aleaciones están basadas en sistemas de aluminio-cobre o aluminio-silicio, con adiciones para mejorar las características de fundición o de servicio. Entre las aleaciones aluminio-cobre, la que contiene 8% de cobre ha sido usada por mucho tiempo como la aleación para fines generales, aunque las adiciones de silicio y hierro, mejoran las características de la fundición por que la hacen menos quebradiza en caliente; la adición de zinc, mejora su maquinabilidad.

Las aleaciones con 12% de cobre son ligeramente más resistentes que las de 8%, pero considerablemente menos tenaces.

Las aleaciones de aluminio- silicio son de gran aplicación por sus excelentes cualidades para la fundición y su resistencia a la corrosión; no son quebradizas en caliente y es fácil obtener con ellas fundiciones sólidas en secciones gruesas o delgadas, la más comúnmente utilizada es la que contiene 5% de silicio, se solidifica normalmente con una gruesa estructura hipereutéctica que se modifica antes de fundirse por la adición de una pequeña cantidad de sodio para darle una estructura fina eutéctica de mayor resistencia mecánica y tenacidad, el contenido de hierro debe ser bajo para evitar la fragilidad. Las aleaciones de aluminio-magnesio son superiores a casi todas las otras aleaciones de fundición de aluminio en cuanto a resistencia, corrosión y maquinabilidad; además de excelentes condiciones de resistencia mecánica y ductilidad.

Se designan con un número de 4 dígitos de acuerdo con el sistema adoptado por la Aluminium Association. El primer dígito indica el tipo de aleación, de acuerdo con el elemento principal. El segundo indica las aleaciones específicas en la aleación, los dos últimos indican la aleación específica de aluminio o la pureza de éste. La designación del temple indica el tratamiento que ha recibido la aleación para llegar a su condición y propiedades actuales. El temple se indica con las letras: O(recocidas), F(tal como fue fabricada), H(trabajada en frío) o T(templado).

---

---



Las aleaciones de aluminio forjado se dividen en dos clases: endurecidas y reforzadas solo con trabajo en frío y las que deben sus propiedades mejoradas al tratamiento térmico.

Las aleaciones más importantes endurecibles al trabajarlas son el aluminio comercialmente puro (1100) o la aleación con 1.25% de manganeso (3003); las cuales pueden endurecerse con trabajo en frío, pero no se someten a tratamiento térmico.

Las aleaciones del tipo duraluminio son de alta resistencia mecánica, se trabajan con facilidad en caliente. Se debe someter a trabajo en frío prolongado después de transcurridas unas cuantas horas del temple por inmersión, donde la resistencia a la corrosión es máxima. [11]

### **2.7 El proceso de doblado.**

Uno de los procesos más utilizados en el conformado plástico de los metales, es el doblado en frío de láminas o pletinas, el cual puede definirse como aquel en el cual una sección recta de un cuerpo es transformado en una sección curva, mediante la aplicación de cargas; de tal manera que el doblado de todo metal se caracteriza por la condición indicada en la Figura 2.1 con el metal sujeto a esfuerzo más allá del límite elástico en tensión en el exterior y en compresión en el interior del doblado.

El estiramiento del metal en la superficie exterior hace más delgado el material y causa desplazamiento en el eje neutro a lo largo del cual el material no se deforma. Este se desplaza entre una distancia de  $0.3 * t$  y  $0.5 * t$  del interior de doblado en la mayoría de los casos. Con frecuencia se usa para los cálculos una cifra promedio de  $0.4 * t$ . [6]

---

---

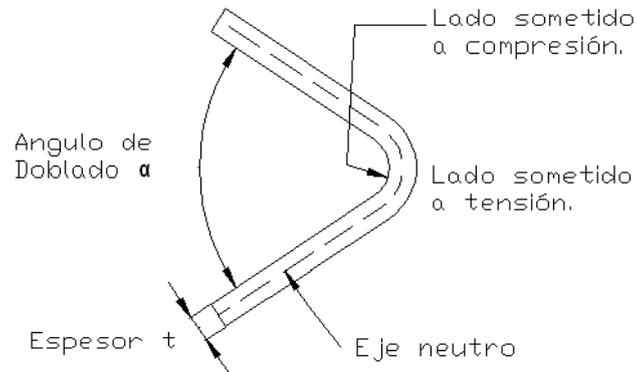


Figura 2.1 Esquema de una lámina sometida a doblado.

### 2.7.1 Descripción del proceso de doblado.

En los procesos de fabricación con láminas metálicas, el doblado es uno de los procedimientos más frecuentes. Se define como la deformación del metal alrededor de un eje recto, mediante la acción de un punzón que incide sobre una lámina que descansa sobre dos apoyos separados cierta distancia, según la cual se dobla el ángulo necesario y en el lugar preciso. En la figura 2.2 se muestran las fases durante el proceso de doblado.

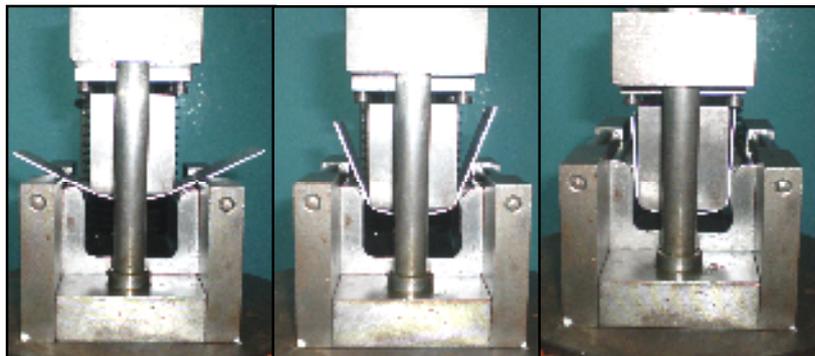


Figura 2.2 Esquema de las etapas de un proceso de doblado.

Fuente: Universidad de Carabobo.



Como se ha explicado, aún cuando el metal que se ha sometido a esfuerzos más allá del límite elástico, está propenso a cierta cantidad de recuperación elástica a un ángulo ligeramente más pequeño cuando se libera. Esta recuperación elástica es más grande para radio de doblado más pequeño, material más grueso, ángulo de doblado más grande y materiales endurecidos. [6]

## 2.8 Tipos de doblado.

Existen varios tipos de doblado, esto va a depender de la geometría del dado y de la matriz, por lo que de ese modo puede clasificarse, de igual manera la disposición de los elementos necesarios para realizar el proceso de doblado puede modificar los resultados obtenidos en el mismo.

### 2.8.1 Doblado en “V”.

El doblado en V es un método sencillo para doblar láminas, básicamente se requiere de la matriz en forma de V, el punzón, el metal a ser deformado, la fuerza externa y los apoyos principalmente, se hace con herramientas similares a las mostradas en la figura 2.3.1A.

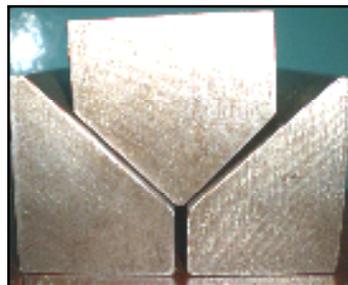


Figura 2.3.1A. Punzón y matriz usado en la realización del doblado en V.

Fuente: Universidad de Carabobo.

Inicialmente el material opone resistencia en las fibras que lo conforman, a la deformación durante la aplicación de la fuerza, el incremento gradual de dicha fuerza

---

---



produce una deformación de manera permanente en el material, que hace que la lámina adopte paulatinamente la forma de la matriz, a la vez que el punzón va realizando el movimiento descendente, hasta que finalmente la lámina metálica tome de modo irreversible la forma de la matriz, al remover el esfuerzo que la causó.

Este método permite un doblado parcial, y el logro de distintos ángulos mediante una carga en tres puntos. Los tres puntos son los dos rebordes del dado en V y la arista del punzón en V.

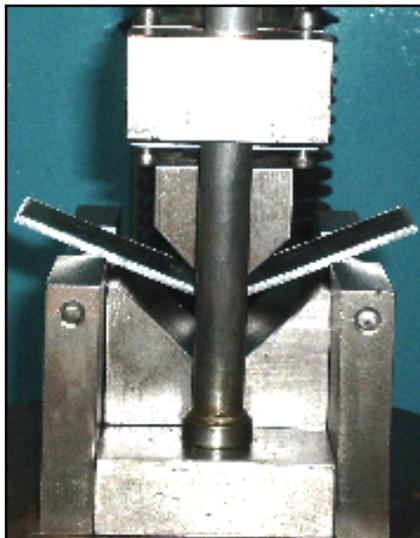


Figura 2.3.1B. Esquema del doblado en V.

Fuente: Universidad de Carabobo.

Tal como se ilustra en la Figura 2.3.1B, en el doblado en V, la lámina de metal se dobla entre un punzón y un dado en forma de V. El doblado en V se usa generalmente para operaciones de baja producción, los dados usados para este tipo de doblado son relativamente simples y de bajo costos.



### 2.8.2 Doblado en “U”.

El doblado en U, al igual que los otros procesos de doblado, es un proceso de deformación del material por medio de la aplicación de una fuerza externa sobre una lámina plana apoyada sobre bases a través de un punzón, en donde se usan elementos como los mostrados en la figura 2.3.2A. El material toma la forma de la matriz en U. Al inicio del proceso la lámina metálica es completamente plana, sufre la deformación plástica por la aplicación de fuerza a través de un punzón y pasa de ser plana a tomar completamente la forma de la matriz, por medio de un proceso similar al mostrado en figura 2.3.2B.

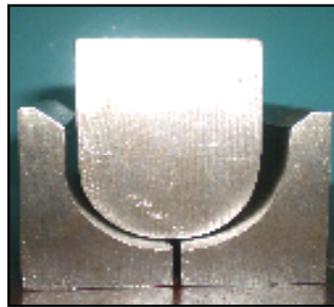


Figura 2.3.2A. Punzón y matriz usado en la realización del doblado en U.

Fuente: Universidad de Carabobo.

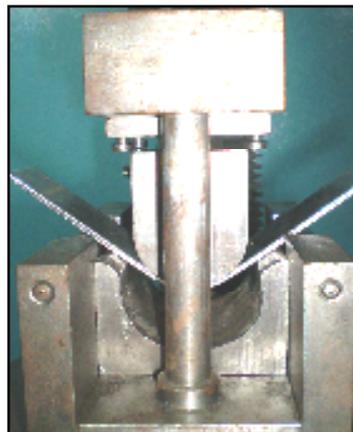


Figura 2.3.2B. Esquema del doblado en U.

Fuente: Universidad de Carabobo.



### 2.8.3 Doblado en “U canal”.

El doblado en U canal es una variación de doblado en U, como puede apreciarse en las figuras 2.3.3A y 2.3.3B, las características geométricas son diferentes así como también varían los parámetros obtenidos durante el proceso. La lámina metálica se deforma con la aplicación de cierta fuerza externa a cargo de un punzón, que ejerce presión el medio de la lámina la cual está siendo sostenida en los extremos por apoyos que son fundamentales para la realización del ensayo.

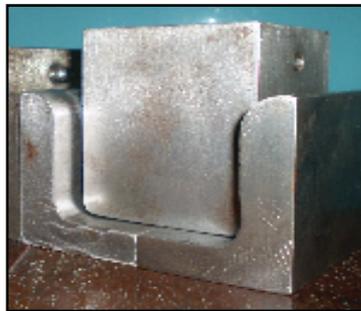


Figura 2.3.3A Punzón y matriz usado en la realización del doblado en U canal.

Fuente: Universidad de Carabobo.

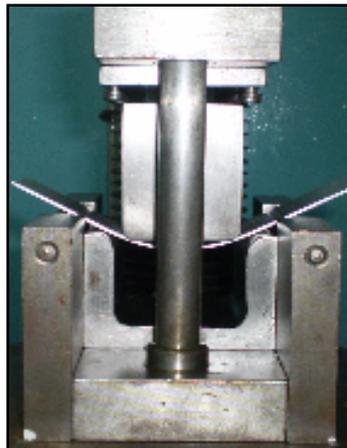


Figura 2.3.3B. Esquema del doblado en U canal.

Fuente Universidad de Carabobo.





#### 2.8.4 Doblado “al aire”.

En este caso el ángulo de doblado debe ser excedido, para compensar la recuperación del estado inicial del material al ser retirada la herramienta utilizada para el doblado. En general, el ángulo de estas herramientas es de  $85^\circ$ .

Una de las ventajas del doblado al aire es que se requiere menos fuerza para doblar el material, pueden ser dobladas láminas y placas pesadas. Pueden lograrse ángulos distintos con la misma herramienta. En la Figura 2.3.4 se ilustra el doblado al aire.

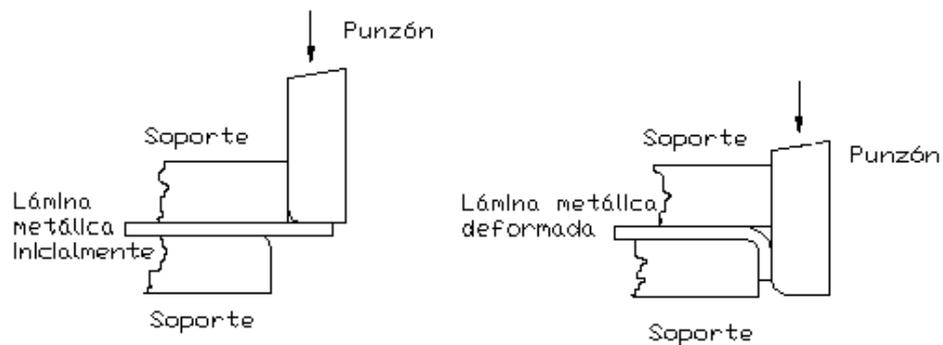


Figura 2.3.4. Esquema del proceso de doblado al aire.

Durante el doblado al aire, el material conserva algo de su elasticidad. En este caso el ángulo de doblado debe ser excedido, para compensarla recuperación del estado inicial del material al ser retirado del aparato. [6]

#### 2.9 Elementos que influyen en el doblado.

La variación de los parámetros en el proceso de doblado pueden influir en los resultados a obtener, entre los elementos que inciden en este proceso están, las características del material, la recuperación elástica y el radio mínimo de doblado.



### **2.9.1 Material de las láminas.**

Existen factores que influyen en el doblado y dependen del material, el tamaño de la lámina y el método de doblado empleado. Por ejemplo en ciertas clases de metal y con ciertas dimensiones de la lámina y el método de doblado empleado, puede haber una tendencia de la superficie de la lámina a arrugarse.

Estas tendencias dependen de propiedades físicas tales como: elongación, dureza, tenacidad, etc., que son características del material al cual se le está aplicando la deformación.

Un temple inadecuado puede hacer imposible el doblado, aún cuando otras condiciones sean favorables se puede asumir que las láminas completamente recocidas se doblan fácilmente, generalmente es así, pero en algunos casos no.

La anisotropía de una lámina es un factor primordial en la facilidad de conformado. La laminación en frío produce anisotropía por orientación preferencial y por fibrilación mecánica debido al alineamiento de todas las imperfecciones que se puedan presentar. Antes de doblar esa lámina se debería tener cuidado para cortarla en la dirección adecuada.

### **2.9.2 Recuperación elástica del metal (efecto resorte).**

La recuperación elástica es definida como el incremento del ángulo comprendido por la parte doblada en relación con el ángulo comprendido por el punzón después de que éste se retira.

Durante el doblado, el metal se deforma plásticamente así que la lámina toma una forma permanente al remover los esfuerzos que lo causaron. Sin embargo, a pesar de

---

---



que el metal es sometido a esfuerzos más allá del límite elástico, en el momento que la presión del doblado se retira al terminar la operación, la energía elástica permanece en la parte doblada haciendo que ésta recobre parcialmente su forma original después del formado tal como se indica en la figura 2.4.; por lo que ocurre algún retorno elástico a la posición original y pueden originarse considerables esfuerzos residuales. Es así que se debe tener en cuenta la recuperación elástica del metal, que en función del espesor y ancho de la lámina, el módulo de elasticidad, el ángulo de doblado y el radio del punzón, afecta el resultado final.

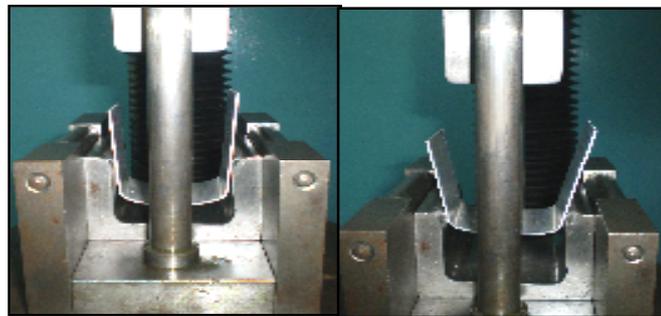


Figura 2.4 Representación de la recuperación elástica durante la realización de un ensayo de doblado en U canal.

Fuente: Universidad de Carabobo.

Finalmente el material resultará doblado a un radio de curvatura mayor al inicial y a un ángulo de doblado menor que el ángulo de doblado inicial debido a la recuperación elástica, la magnitud de esta recuperación se incrementa con el módulo de elasticidad  $E$  y la resistencia a la fluencia del metal trabajado. El cálculo de la recuperación elástica, es sumamente importante en el proceso de doblado en frío ya que la matriz deberá formar la pieza luego del efecto de recuperación elástica. Para contrarrestar este efecto, la deformación del material en la matriz deberá ser mayor que la deformación final requerida. Usualmente se utilizan ecuaciones empíricas para el cálculo de la recuperación elástica, las cuales no toman en consideración los cambios que sucedan si se varía el material o si se altera la geometría de la pieza a



doblar; cuando las ecuaciones empíricas no funcionan, el diseño de la matriz se basará en ensayo y error.

Se puede lograr una compensación para la recuperación elástica por varios métodos, uno de ellos se le conoce como, el sobre doblado, el ángulo del punzón y el radio se fabrican ligeramente menores que el ángulo especificado en la parte final, de manera que la lámina regrese al valor deseado. [12]

### 2.9.3 Radio mínimo de doblez.

La deformación de una lámina durante el doblado es:

$$e = \frac{1}{\left(\frac{2r}{t}\right) + 1} \quad \text{Ec. 2.1}$$

A medida que disminuye  $\frac{r}{t}$ , la relación entre el radio de doblez y el espesor se hace menor, la deformación por tensión en la fibra externa aumenta y, al final, el material se rompe.

La relación a la que aparece una grieta en la superficie externa de la lámina se denomina radio mínimo de doblado del material. Se suele expresar en función del espesor. Así, un radio mínimo de doblado de  $3t$  indica que el radio mínimo con el que se puede doblar la lámina sin que se agriete es de tres veces su espesor.

Hay una relación inversa entre la facilidad de doblado y la reducción de área del material por tensión. El radio mínimo de doblado es, aproximadamente:



$$R = t \left( \frac{50}{r-1} \right) \quad \text{Ec. 2.2}$$

La facilidad de doblado depende de la condición de borde de la lámina. Puesto que los bordes rugosos son puntos de concentración de esfuerzos, disminuye la facilidad de doblado a medida que aumenta la rugosidad del borde. Otro factor importante en el agrietamiento de los bordes es la cantidad y la forma de las inclusiones en la lámina metálica, así como la cantidad de trabajo en frío que sufren los bordes durante el corte. A causa de su forma puntiaguda, las inclusiones de forma alargada son más perjudiciales que las de forma globular. [2]

### **2.10 Análisis de Ingeniería del doblado.**

Algunos términos importantes de doblado se identifican en la figura. El metal, cuyo grosor es  $t$  se dobla a través de un ángulo, llamado ángulo de doblado  $\alpha$ . El resultado es una lámina de metal con un ángulo incluido  $\alpha'$ , tal que  $\alpha + \alpha' = 180^\circ$ . El radio del doblado  $r$  se especifica normalmente sobre la parte interna, en lugar de sobre el eje neutral. Este radio del ángulo se determina por el radio de la herramienta que se usa para ejecutar la operación. El doblado se hace sobre el ancho de la pieza de trabajo  $W$ . [6]

### **2.11 Esfuerzo necesario para el doblado en V.**

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. El esfuerzo necesario para su deformación se determina con las ecuaciones corrientes.

El momento flector de la figura exterior se expresa por:



$$Mf = \frac{p * \frac{l}{2} * \frac{l}{2}}{l} = \frac{p * l^2}{4 * l} = \frac{p * l}{4} \quad \text{Ec. 2.3}$$

y el momento flector debido a la reacción molecular interior es expresado por:

$$Mf = \sigma_d * \frac{I}{Z} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Igualando las dos ecuaciones, tendremos:

$$\frac{p * l}{4} = \sigma_d * \frac{I}{Z}$$

Para la sección rectangular, considerando el momento resistente mínimo, se tiene:

$$\frac{I}{Z} = \frac{b * S^2}{6} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Sustituyendo:

$$\frac{p * l}{4} = \frac{\sigma_d * b * S^2}{6}$$

y simplificando

$$\frac{p * l}{2} = \frac{\sigma_d * b * S^2}{3}$$

de la cual se obtiene:

$$p = \frac{2 * \sigma_d * b * S^2}{3 * l} \quad \text{Ec. 2.6}$$



### 2.12 Esfuerzo Necesario para el Doblado en U

La chapa podría también haberse doblado según la forma indicada en la figura 2.5. Se Considera que la lámina, durante la operación de doblado, es empujada continuamente contra la cara del punzón por efecto de un órgano elástico colocado debajo. El sólido sujeto al doblado se puede considerar, en este caso, sometido a flexión como si fuera una ménsula. La fuerza máxima necesaria para completar el trabajo de doblado no es de un valor único para toda la operación. En efecto, el punzón, después de haber hecho contacto con la laminilla, hace fuerza sobre ella y obliga a sus bordes a resbalar lentamente sobre los planos laterales inclinados a  $45^\circ$ . En esta primera operación los brazos a doblar tienen la longitud  $a$  y se necesita una presión inicial  $P_1$ . En un determinado punto, que corresponde a las esquinas inferiores de los planos inclinados, el punzón debe actuar con una presión  $P_2$  mayor que la  $P_1$  porque el brazo del doblado asume el valor mínimo  $t$ , correspondiente al espesor de la lámina. Los cálculos en algunos casos tienen un valor muy relativo. para simplificar se considera, la fuerza máxima  $P_2$ , como si la lámina fuera doblada directamente con un brazo mínimo de longitud  $t$ .

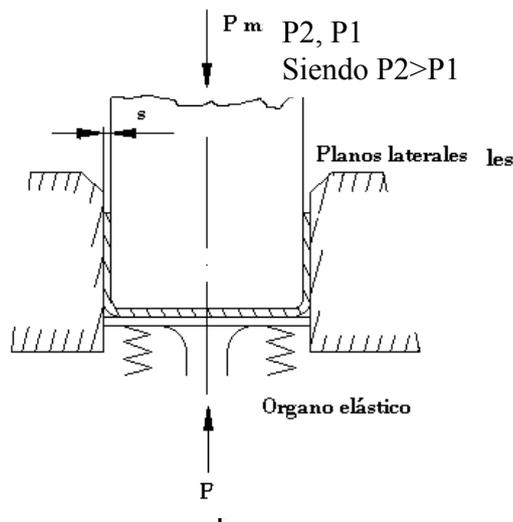


Figura 2.5 Esfuerzo necesario para doblar una lamina en U canal.



El momento flector máximo de la fuerza exterior se expresa por:

$$M_f = 2 * \left( \frac{p_2}{2} * t \right) = p_2 * t \quad (\text{Porque los bordes al doblar son 2}). \quad \text{Ec. 2.7}$$

Siendo

$$\frac{p_2}{2} = R \quad \text{La fuerza en cada extremo en Kg.}$$

y el momento flector debido a la reacción molecular interior viene expresado por:

$$M_f = 2 * \left( \sigma_d * \frac{I}{Z} \right) \quad \text{Porque los bordes a doblar son 2}. \quad \text{Ec. 2.8}$$

Igualando las dos ecuaciones, se tiene

$$p_2 * t = 2 * \left( \sigma_d * \frac{I}{Z} \right)$$

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

$$\frac{I}{Z} = \frac{w * t^2}{6} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Sustituyendo

$$p_2 * t = 2 * \left( \frac{\sigma_d * w * t}{6} \right)$$

Que simplificada queda.

---

---



$$p_2 = \left( \frac{\sigma_d * w * t}{3} \right) \quad \text{Ec. 2.10}$$

Este mismo resultado se obtiene también directamente de la Ec. 2.6 del primer caso sustituyendo 2. s en lugar de 1, es decir

$$p = \frac{2 * \sigma_d * w * t^2}{3 * l} = \frac{2 * \sigma_d * w * t^2}{3 * 2 * t} = \frac{\sigma_d * w * t^2}{3} \quad \text{Ec. 2.11}$$

A este valor de P2 se le debe sumar la carga P3 para vencer la acción elástica del muelle.

Nota.- la abertura 1 de las estampas, empleadas en el doblado en ángulo de la lámina, puede considerarse, en general a doce veces el espesor t de la lámina. [3] Si la Ec. (2.6) del primer caso se pone  $l = 12 * t$ , al tener presente que  $\sigma_d = 3\sigma_R$  se obtiene la siguiente ecuación simplificada:

$$p = \frac{2 * \sigma_d * w * t^2}{3 * l} = \frac{2 * 2 * \sigma_R * w * t^2}{3 * 12 * t} = \frac{\sigma_R * w * t^2}{9} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Es útil comparar entre sí las dos ecuaciones relativas a los dos casos. A tal fin, pongamos  $2\sigma_R$  en lugar de  $\sigma_d$  en la Ec. (2.12); se tiene:

$$p = \frac{\sigma_d * w * t}{3} = \frac{2 * \sigma_R * w * t}{3} = \frac{\sigma_R * w * t^2}{1,5}$$

Multiplicando numerador y denominador por 6, se tendrá:

$$p_2 = 6 * \frac{\sigma_R * w * t}{9} \quad \text{Ec. 2.13}$$



En donde se puede notar que la presión de doblado P2 es seis veces mayor que la presión P.

Se obtiene la siguiente regla: la presión necesaria para doblar una lámina en U es seis veces mayor que la necesaria para doblar a la misma en ángulo, cuando la abertura 1 de la matriz, (en éste último doblado) es doce veces el espesor t.[3]

### 2.13 Ecuación empírica del doblado.

Es de esperarse que la carga requerida dependa del espesor del material, de la longitud de doblado, del ancho de la matriz, del hecho de si se utiliza lubricante y de la cantidad de estiramiento presente. Para matrices en V, utilizadas comúnmente en las dobladoras, se requieren fuerzas mínimas.

De realizarse un doblado en U ó en canal, la carga necesaria será aproximadamente el doble de la listada, mientras que para el doblado de esquinas será la mitad de la indicada.

$$p = \frac{4 * w * s * t^2}{3 * L} \quad \text{Ec. 2.14}$$

[2]

### 2.14 Otras operaciones en el doblado.

Se dispone de otras operaciones en el doblado adicional, además de las de doblado en V, U, etc. Algunas de éstas involucran el doblado sobre ejes curvas en lugar de ejes rectos, o tienen otras características que se diferencian de las operaciones básicas descritas anteriormente.



### 2.14.1 Formado de Bridas.

Es una operación en la cual el filo de una lámina de metal se dobla en un ángulo de 90° para formar un borde. Se usa frecuentemente para reforzar o dar rigidez a la parte de lámina metálica. El borde se puede formar en un doblado sobre un eje recto, como se ilustra en la figura 2.6.1 o puede involucrar algunos estiramientos o contracciones del metal como en las partes como se indica de igual forma.

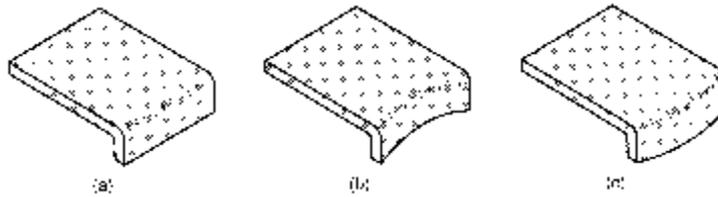


Figura 2.6.1. Representación de formado de bridas.

### 2.14.2 El Doblez.

Involucra el doblado del borde de la lámina sobre sí misma en más de un paso de doblado. Esto se hace frecuentemente para eliminar el borde agudo de la pieza. Para incrementar la rigidez y para mejorar su apariencia. El doblado se ilustra en la figura 2.6.2.

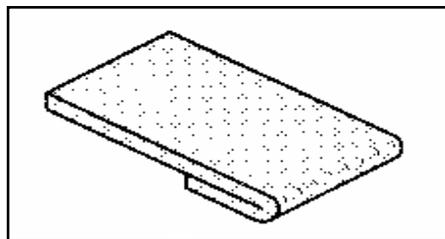


Figura 2.6.2. Representación de doblado.



### 2.14.3 El Engargolado.

El engargolado o empate es una operación relacionada en la cual se ensamblan dos bordes de láminas metálicas. Se ilustra en la figura 2.6.3.

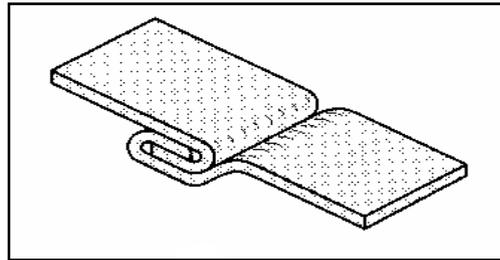


Figura 2.6.3. Representación de engargolado.

### 2.14.4 Rebordeado.

En el rebordeado, también llamado formado de moldeduras, los bordes de la parte se producen en forma de rizo o rollo se muestran en la figura 2.6.4 tanto esta operación como el dobléz se hacen con fines de seguridad, resistencia y estética. Algunos ejemplos de productos en los cuales se usa el ribeteado incluyen bisagras, ollas, sartenes y cajas para relojes de bolsillo. Estos ejemplos demuestran que el ribeteado se puede ejecutar sobre ejes rectos o curvos. [12]

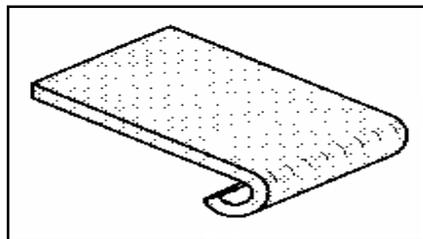


Figura 2.6.4. Representación de rebordeado.



## MARCO METODOLOGICO

### 3.1 NIVEL DE LA INVESTIGACION

El grado de investigación del siguiente trabajo a presentar es de tipo exploratorio, el estudio está orientado hacia la influencia de elementos característicos en el proceso de doblado, se realizaron varias pruebas variando ciertos parámetros, para obtener el comportamiento del factor de forma de acuerdo a la modificación del material y espesor en el proceso de doblado de láminas metálicas.

### 3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACION

#### 3.2.1 Caracterización de los materiales a ensayar.

Inicialmente a los materiales a ensayar se le realizó ciertos procedimientos con el fin de conocer sus características:

##### 3.2.1.1 Microscopía óptica.

Esto se hizo con el fin de determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura reveló el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, con lo que se obtuvo información referente al comportamiento esperado para ello se utilizó un microscopio óptico como el que se muestra en la fig. 3.1.

Cabe destacar que en la realización del análisis microscópico se hizo necesario embutir el material, esto debido a los bajos espesores utilizados, que dificultaron las



preparaciones previas de las probetas, para su posterior análisis en el microscopio óptico como se muestra en la fig. 3.2.



Fig. 3.1 Microscopio óptico.



Fig. 3.2 Probetas embutidas



### 3.2.1.2 Ensayos de dureza del material.

Con este tipo de ensayo se buscó determinar propiedades fundamentales de los metales, las cuales son:

Cohesión: Resistencia de los átomos a separarse unos de otros.

Elasticidad: Capacidad de un material de recobrar su forma primitiva cuando cesa la causa que los deformara.

Plasticidad: Capacidad de un material a deformarse.

Para este tipo de ensayo se utilizó un durómetro como el que se ilustra en la fig. 3.3



Fig. 3.3 Durómetro.

### 3.2.1.3 Ensayo de Tracción.

Permitió determinar las propiedades mecánicas de los materiales, es decir sus características de resistencia y deformabilidad. Otras características, no menos importantes, que pueden determinarse mediante el ensayo de tracción son la tenacidad, la deformación unitaria de rotura, la tensión máxima y el módulo de rigidez. La maquina utilizada para este ensayo se ilustra en la fig. 3.4 y las probetas ensayadas se muestran en la fig. 3.5



Fig. 3.4 Maquina de ensayo universal.

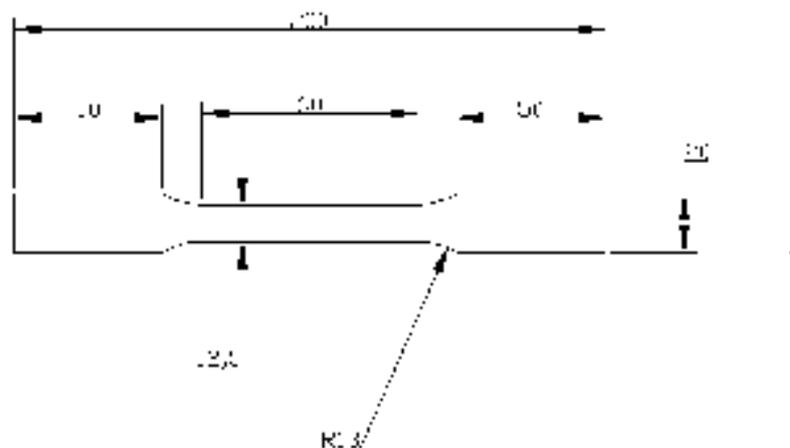


Fig. 3.5 Probetas para la realización de ensayos de tracción, representación de las medidas en milímetros.



### 3.3 REALIZACION DE UN ENSAYO DE DOBLADO FACTORIA .

El ensayo de doblado se realizó para tres materiales, de tres espesores y tres matrices (3\*3\*3), donde se hizo un cierto número de repeticiones, sacando un promedio de las mismas, para lograr de esta forma una estimación del comportamiento del parámetro a estudiar.

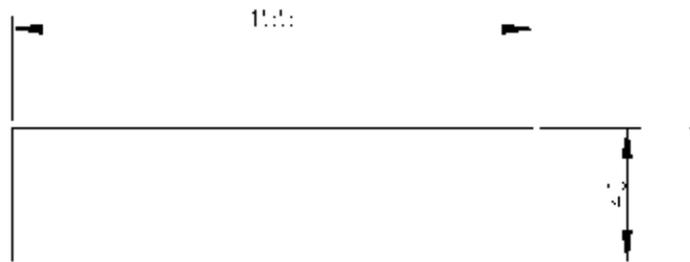


Fig. 3.6 Probetas para la realización de ensayos de doblado, representación de las medidas en milímetros.

### 3.4 Materiales y equipos utilizados.

- ❖ Laminas de Aluminio 3003 H14, Acero 1020, y Acero 304.
- ❖ Microscopio óptico.
- ❖ Máquina universal de ensayos.
- ❖ Máquina de microdureza.
- ❖ Desbastadora de banda.
- ❖ Cortadora metalográfica.
- ❖ Embutidora.
- ❖ Maquina para doblado.
- ❖ Baquelita.

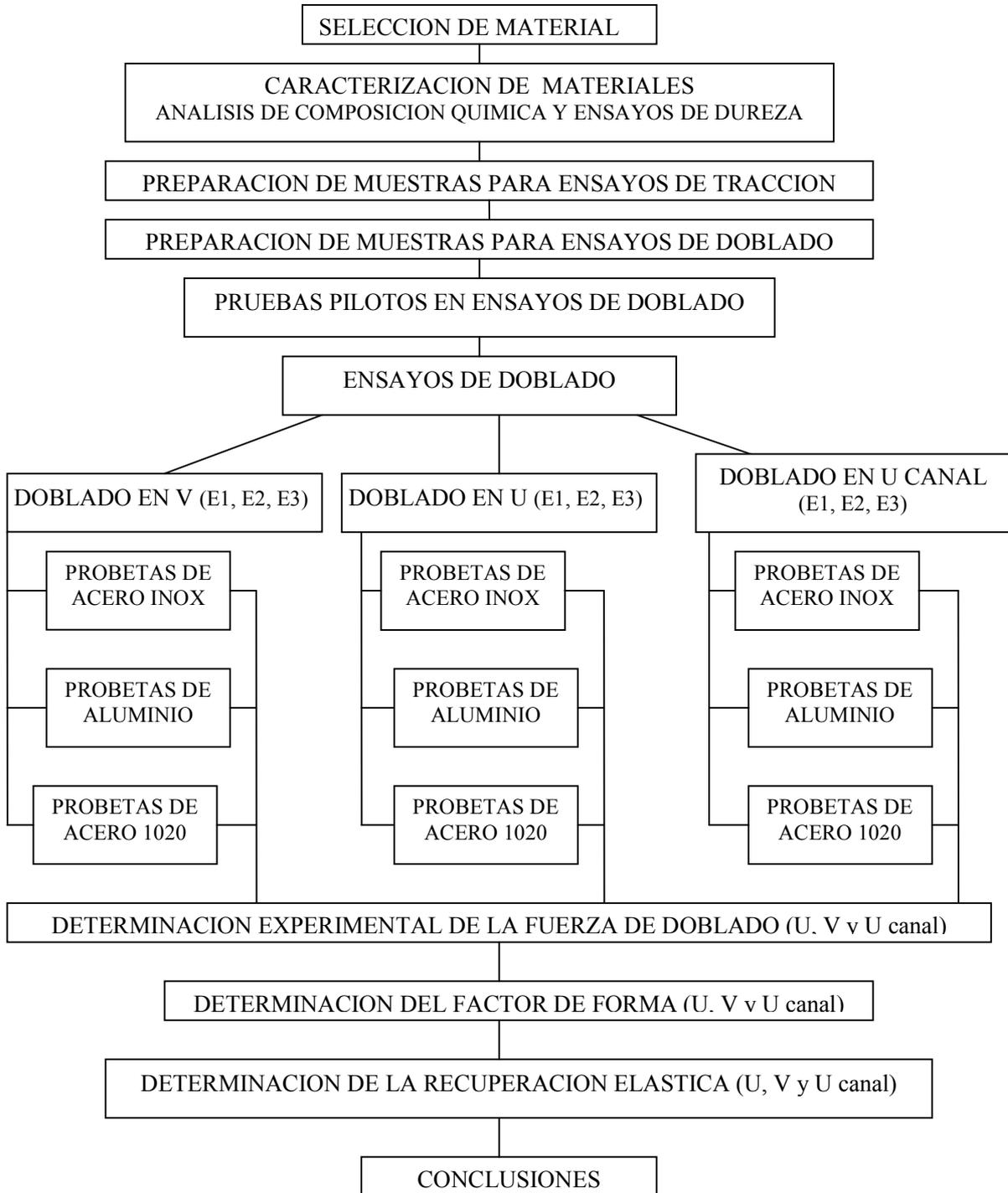


Fig. 3.7 Esquema del plan de trabajo para la determinación del factor de forma de la matriz de doblado en función del tipo de material y el espesor

### 3.5 Instrumentos utilizados.

- ❖ Papeles de esmeril de grano creciente de 240, 320, 400 y 600.
- ❖ Etanol.
- ❖ Alúmina fina y gruesa.
- ❖ Nital al 2%.
- ❖ Agua regia.
- ❖ Secador de probetas.
- ❖ Vernier, escuadra, goniómetro, transportador.



Fig. 3.8 Cortadora metalográfica.



Fig. 3.9 Desbastadora de bandas.



Fig. 3.10 Banco de pulido



## CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan en este capítulo los diferentes resultados obtenidos de los ensayos realizados de doblado que muestran el comportamiento del factor de forma y la recuperación elástica dependiendo de los materiales, matrices y espesores.

### 4.1 Ensayo de Dureza Rockwell.

En las tablas 4.1 hasta las tablas 4.3 se muestran los valores de dureza que fueron realizadas por el método Rockwell (A) para una carga de 60 Kg, a muestras de aluminio, acero 1020 y acero 304 con espesores de 1.5, 2 y 3 mm. en cinco puntos diferentes.

#### 4.1.1 Ensayo de Dureza Rockwell para Aluminio 3003 H14.

Tabla 4.1A. Valores de dureza para Aluminio con espesor de 1.5 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	7.0	7.4	7.8	7.0	7.7
PROMEDIO	7.38				

Tabla 4.1B. Valores de dureza para Aluminio con espesor de 2 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	8.9	9.8	8.3	9.9	9.7
PROMEDIO	9.32				

Tabla 4.1C. Valores de dureza para Aluminio con espesor de 3 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	13.8	13.2	13.4	14.6	13.8
PROMEDIO	13.76				

#### 4.1.2 Ensayo de Dureza Rockwell para Acero 1020.

Tabla 4.2A. Valores de dureza para Acero 1020 con espesor de 1.5 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	19.3	24	17.7	22.5	23.9
PROMEDIO	21.48				



Tabla 4.2B. Valores de dureza para Acero 1020 con espesor de 2 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	36.3	36.9	36.7	36.8	35.9
PROMEDIO	36.52				

Tabla 4.2C. Valores de dureza para Acero 1020 con espesor de 3 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	41.9	45.0	43.3	44.8	42.1
PROMEDIO	43.42				

### 4.1.3 Ensayo de Dureza Rockwell para Acero 304.

Tabla 4.3A. Valores de dureza para Acero 304 con espesor de 1.5 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	59.1	63.0	61.9	63.2	58.3
PROMEDIO	61.1				

Tabla 4.3B. Valores de dureza para Acero 304 con espesor de 2 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	59.7	58.2	58.3	58.0	57.0
PROMEDIO	58.24				

Tabla 4.3C. Valores de dureza para Acero 304 con espesor de 3 mm.

Ensayo	1	2	3	4	5
RA	56.4	58.3	54.3	59.2	58.3
PROMEDIO	57.3				

Tanto para el Aluminio 3003 H14 como para el Acero 1020, existe un incremento en la dureza, un factor que puede influir en esta propiedad es el hecho de que cada material es realizado durante distintas coladas por lo que no contienen el mismo porcentaje de elementos aleantes que provocan la variación de las características del material. Sin embargo el Acero 304 presenta una disminución en la dicha propiedad, debido a los diferentes procesos de fabricación a los que son sometidas las láminas de menores espesores.



#### 4.2.1 Microscopía realizada a las probetas de Aluminio 3003 H14.

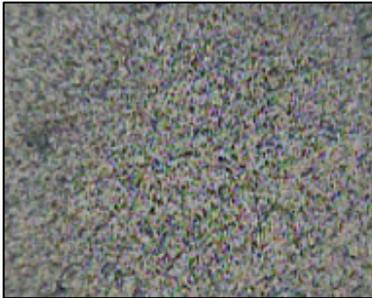


Fig 4.1. Microscopía de Optica para Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, con 200X.



Fig 4.2. Microscopía de Optica para Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, con 400X.



Fig 4.3. Microscopía de Optica para Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor, con 200X.



Fig 4.4. Microscopía de Optica para Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor, con 400X.



Fig 4.5. Microscopía de Optica para Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor, con 200X.



Fig 4.6. Microscopía de Optica para Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor, con 400X.



#### 4.2.2 Microscopía realizada a las probetas de Acero 1020.

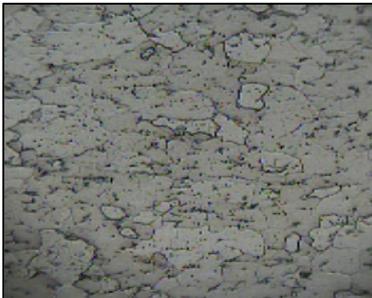


Fig 4.7. Microscopía de Optica para Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor, con 200X.

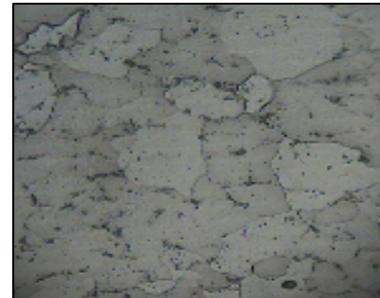


Fig 4.8. Microscopía de Optica para Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor, con 400X.

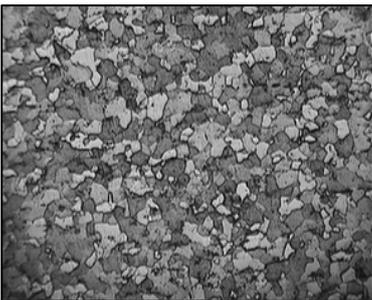


Fig 4.9. Microscopía de Optica para Acero 1020 de 2 mm. de espesor, con 200X.

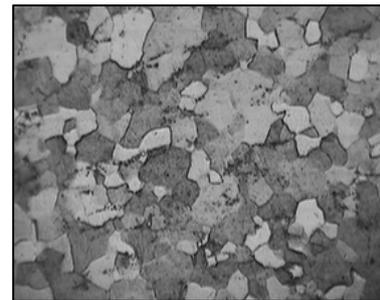


Fig 4.10. Microscopía de Optica para Acero 1020 de 2 mm. de espesor, con 400X.

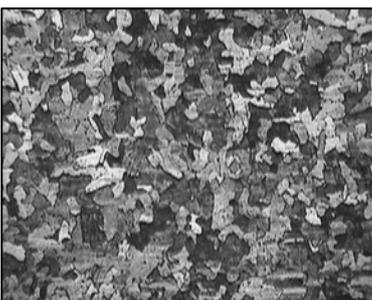


Fig 4.11. Microscopía de Optica para Acero 1020 de 3 mm. de espesor, con 200X.

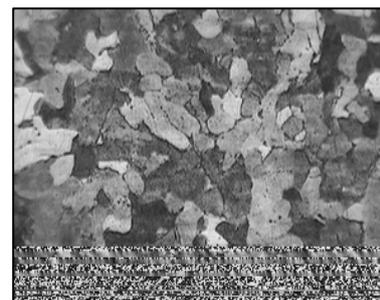


Fig 4.12. Microscopía de Optica para Acero 1020 de 3 mm. de espesor, con 400X.



### 4.2.3 Microscopía realizada a las probetas de Acero 304.

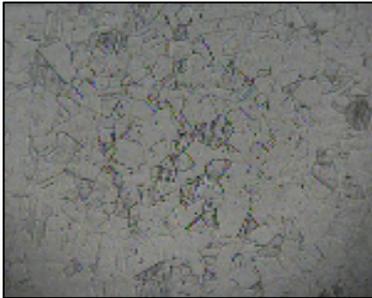


Fig 4.13. Microscopía de Optica para Acero 304 de 1.5 mm. de espesor, con 200X.

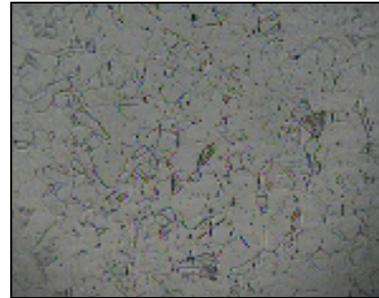


Fig 4.14. Microscopía de Optica para Acero 304 de 1.5 mm. de espesor, con 400X.

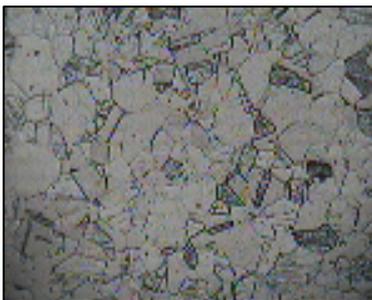


Fig 4.15. Microscopía de Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 200X.

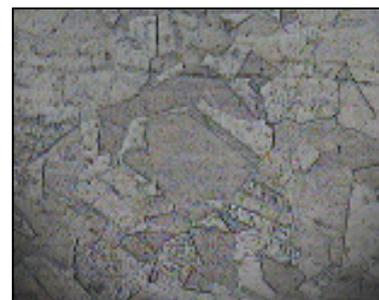


Fig 4.16. Microscopía de Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 400X.

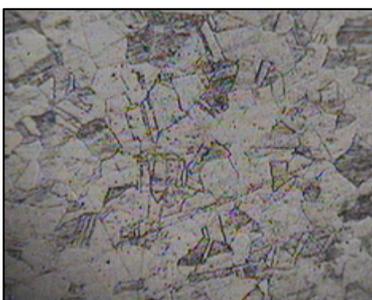


Fig 4.17. Microscopía de Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 200X.



Fig 4.18. Microscopía de Optica para Acero 304 de 2 mm. de espesor, con 400X.

Para las figuras mostradas anteriormente se puede observar que en el Aluminio 3003 H14 existe una similitud entre los diferentes espesores estudiados en donde los



granos oscuros pueden ser sulfuros o carburos, esto se puede verificar por medio de un estudio de electrónico de barrido.

En el acero 1020 existe la presencia de ferrita y perlita para los tres espesores utilizados en donde la ferrita le da al material la propiedad de ductilidad y la perlita por ser una mezcla de ferrita y cementita sus propiedades son intermedias entre la de sus componentes (ductilidad y dureza).

En las figuras de los aceros 304 presenta granos equiaxiales con maclas y por ser austeníticos normalmente tienen mejor resistencia a la corrosión, contienen gran cantidad de níquel que le da al material la propiedad de tenacidad.

#### 4.3 Ensayos de tracción.

A continuación se muestran las curvas de los esfuerzo vs deformación, más representativas de las probetas ensayadas, donde se pueden apreciar propiedades mecánicas tales como: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y deformación. Estas probetas están estandarizadas según norma para la realización del respectivo ensayo. Para estas pruebas se uso la maquina de ensayo universal en donde se trabajo con una velocidad de 10 mm/min y una fuerza de 10000 N/ mm<sup>2</sup>.

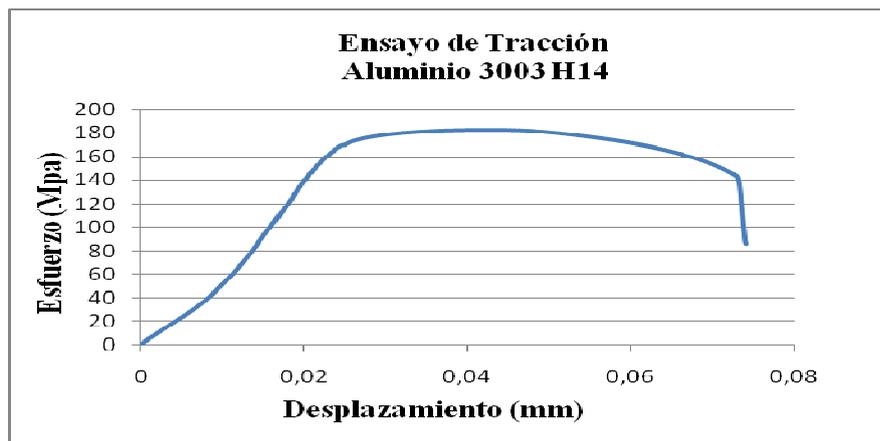


Fig. 4.19 Esfuerzo - Deformación para Aluminio 3003 H14.

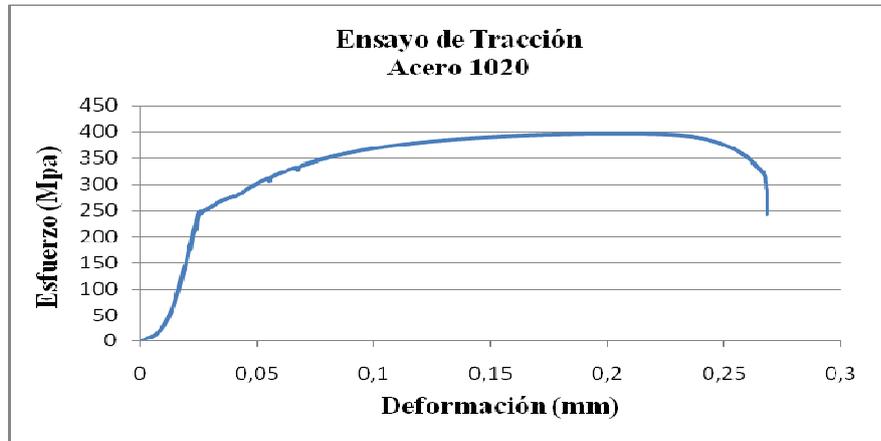


Fig. 4.20 Esfuerzo - Deformación para Acero 1020.

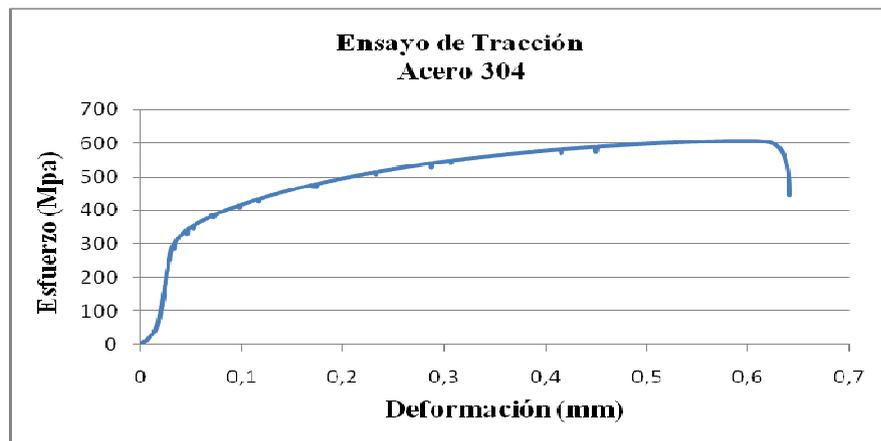


Fig. 4.21 Esfuerzo - Deformación para Acero 304.

#### 4.4 Análisis en la Composición Química.

Las tablas siguientes presentan la composición química de los materiales utilizados con sus respectivos espesores. Para esto se realizaron un análisis a cada probeta y así verificar la cantidad porcentual de cada elemento presente en cada material.

##### 4.4.1 Acero Inoxidable 304.

Tabla 4.4A. Composición química del Acero 304 con espesor 1.5 mm.

Fe	C	Si	Mn.	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
44727	0.079	0.531	1.562	0.047	0.037	18.929	9.411	0.081	0.025	0.218



Tabla 4.4B. Composición química del Acero 304 con espesor 2 mm.

Fe	C	Si	Mn.	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
46572	0.083	0.522	2.212	0.058	0.050	18.574	10.183	0.357	0.029	0.095

Tabla 4.4C. Composición química del Acero 304 con espesor 3 mm.

Fe	C	Si	Mn.	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
44651	0.092	0.594	1.294	0.058	0.037	18.857	9.294	0.066	0.021	0.078

#### 4.4.2 Acero al Carbono 1020.

Tabla 4.5A. Composición química del Acero 1020 con espesor 1.5 mm.

Fe	C	Si	Mn.	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
71709	0.092	0.038	0.162	0.019	0.035	0.057	0.000	0.018	0.026	0.002

Tabla 4.5B. Composición química del Acero 1020 con espesor 2 mm.

Fe	C	Si	Mn.	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
67253	0.100	0.067	0.145	0.021	0.040	0.057	0.000	0.019	0.030	0.002

Tabla 4.5C. Composición química del Acero 1020 con espesor 3 mm.

Fe	C	Si	Mn.	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V
68873	0.179	0.009	0.381	0.02	0.038	0.057	0.001	0.02	0.042	0.002

#### 4.4.3 Aluminio 3003 H14.

Tabla 4.6A. Composición química del Acero 3003 H14 con espesor 1.5 mm.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr	Al
0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05	0.00	0.00	99.5

Tabla 4.6B. Composición química del Acero 3003 H14 con espesor 2 mm.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr	Al
0.20	0.42	0.04	0.06	0.045	0.072	0.055	0.00	0.00	99.00

Tabla 4.6C. Composición química del Acero 3003 H14 con espesor 3 mm.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr	Al
0.22	0.43	0.045	0.056	0.045	0.073	0.053	0.00	0.00	99.3

#### 4.5 Ensayo de Doblado

A continuación se presentan las gráficas obtenidas en los ensayos de doblado para los diferentes materiales, espesores y las diferentes matrices en donde se puede apreciar las fuerzas máximas de cada material y espesor estudiado:



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

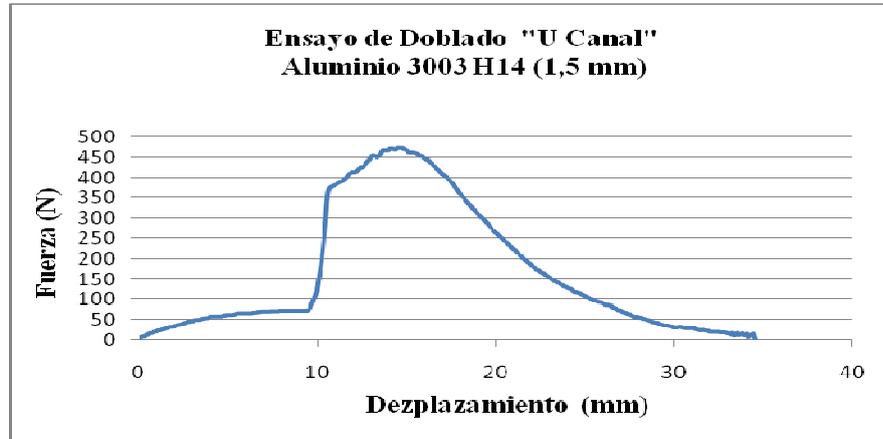


Fig. 4.22. Doblado en "U Canal". Aluminio 3003 H14 .Espesor 1.5 mm.

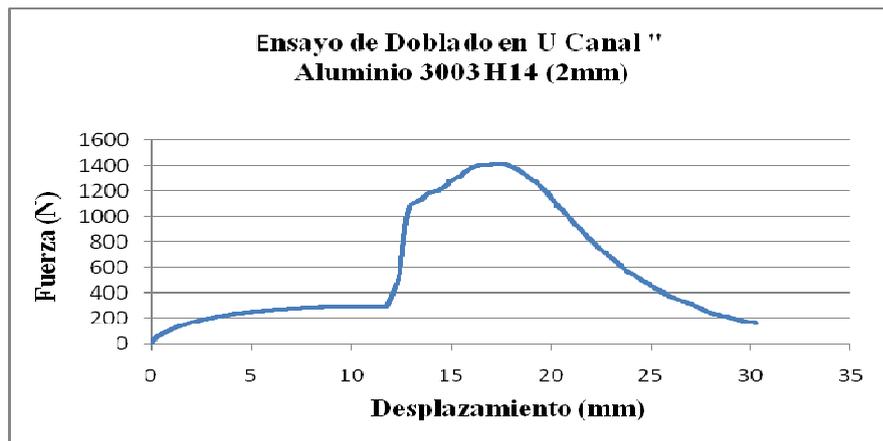


Fig. 4.23. Doblado en "U Canal". Aluminio 3003 H14. Espesor 2 mm.

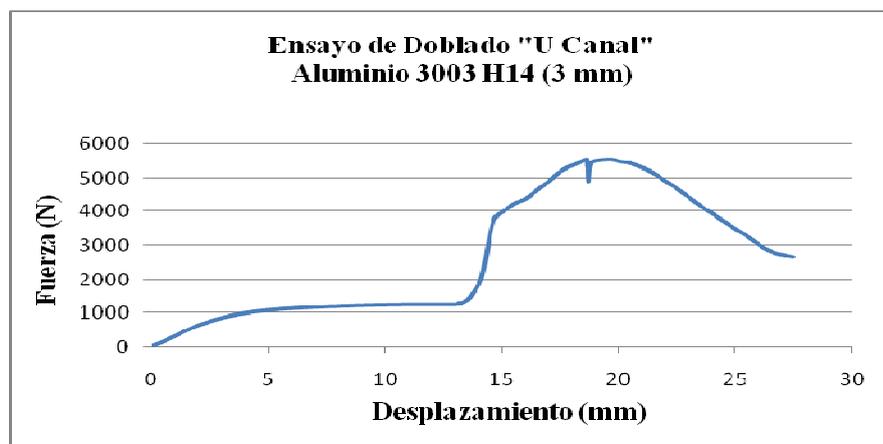


Fig. 4.24. Doblado en "U Canal". Aluminio 3003 H14 .Espesor 3 mm.



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

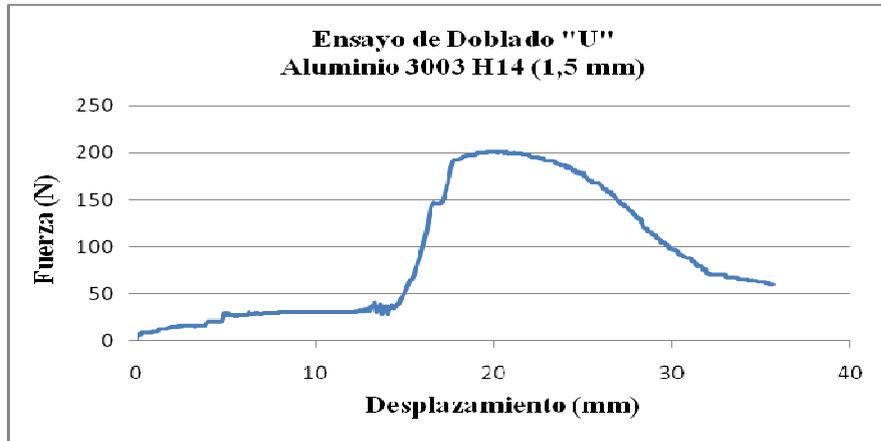


Fig. 4.25. Doblado en "U". Aluminio 3003 H14 .Espesor 1.5 mm.

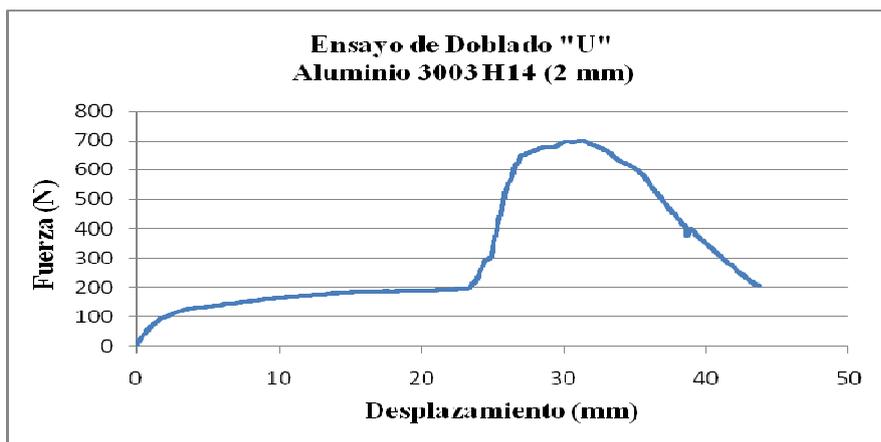


Fig. 4.26. Doblado en "U". Aluminio 3003 H14 .Espesor 2 mm.

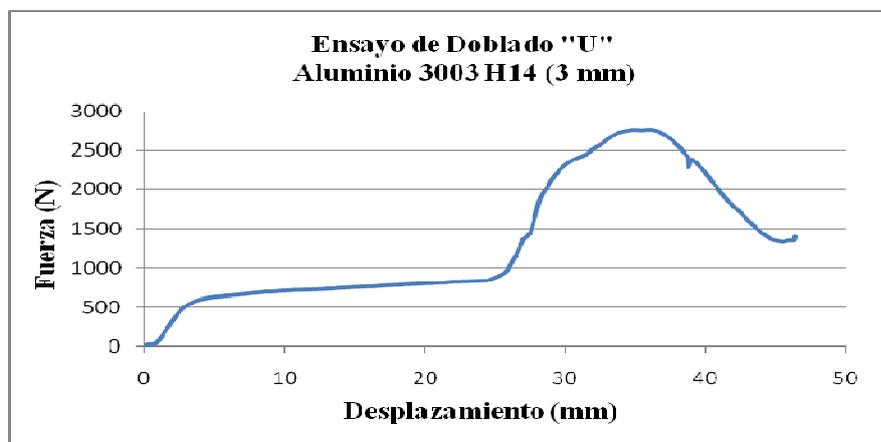


Fig. 4.27. Doblado en "U". Aluminio 3003 H14 .Espesor 3 mm.



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

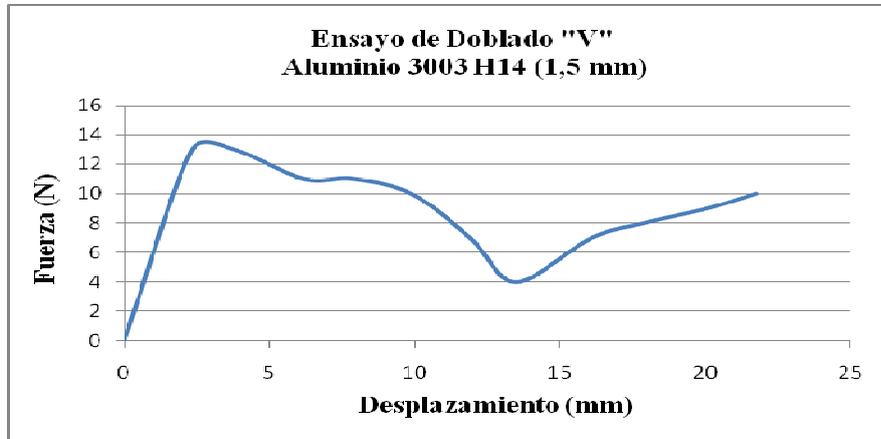


Fig. 4.28. Doblado en "V". Aluminio 3003 H14. Espesor 1.5 mm

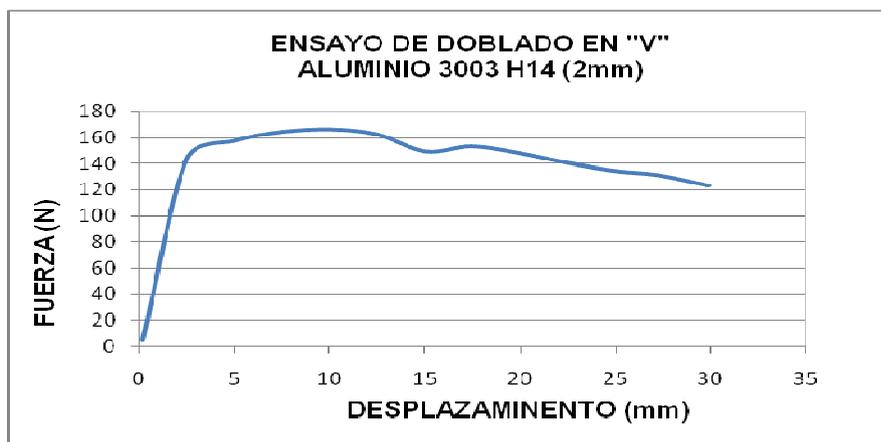


Fig. 4.29. Doblado en "V". Aluminio 3003 H14 .Espesor 2 mm

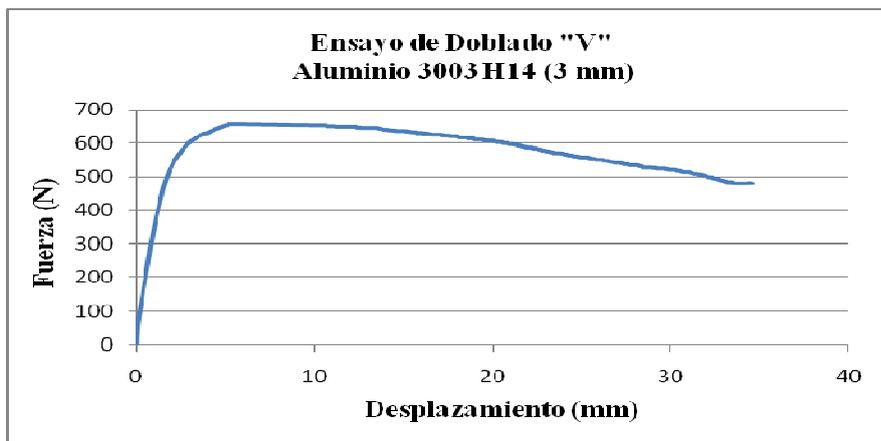


Fig. 4.30. Doblado en "V". Aluminio 3003 H14. Espesor 3 mm.



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

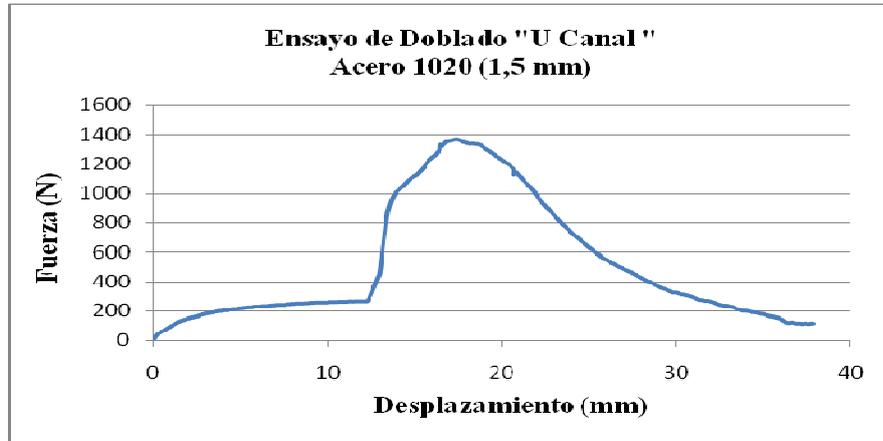


Fig. 4.31. Doblado en U Canal. Acero 1020. Espesor 1.5 mm.

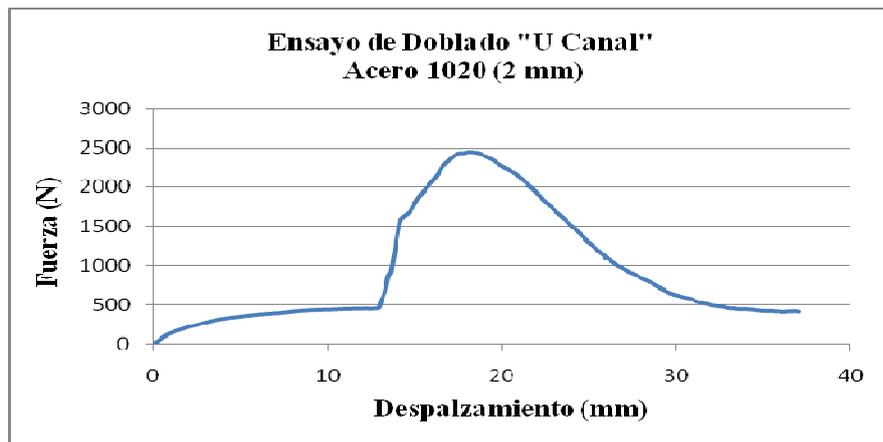


Fig. 4.32. Doblado en U Canal. Acero 1020. Espesor 2 mm.

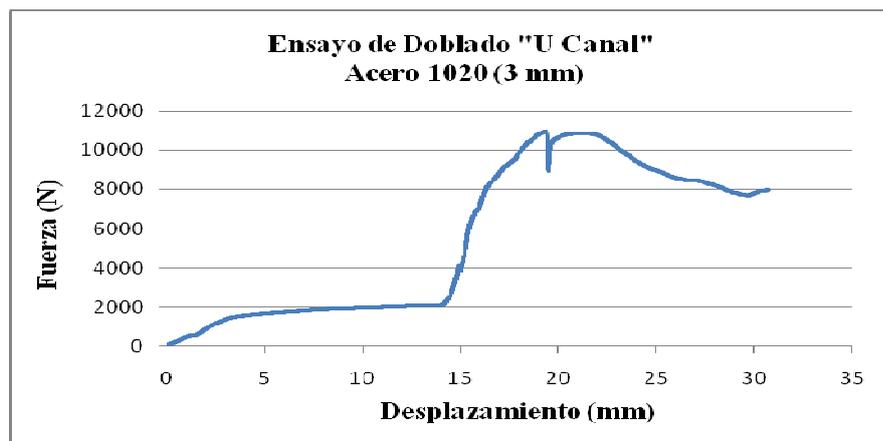


Fig. 4.33. Doblado en U Canal. Acero 1020. Espesor 3 mm.



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

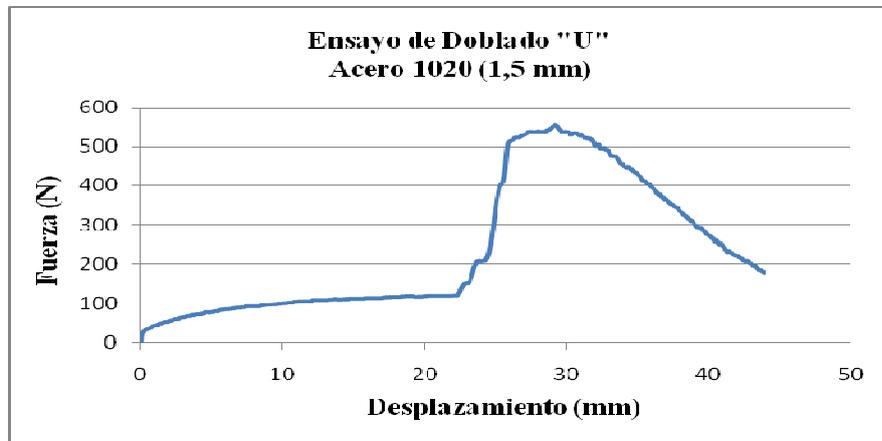


Fig. 4.34. Doblado en U. Acero 1020. Espesor 1.5 mm.

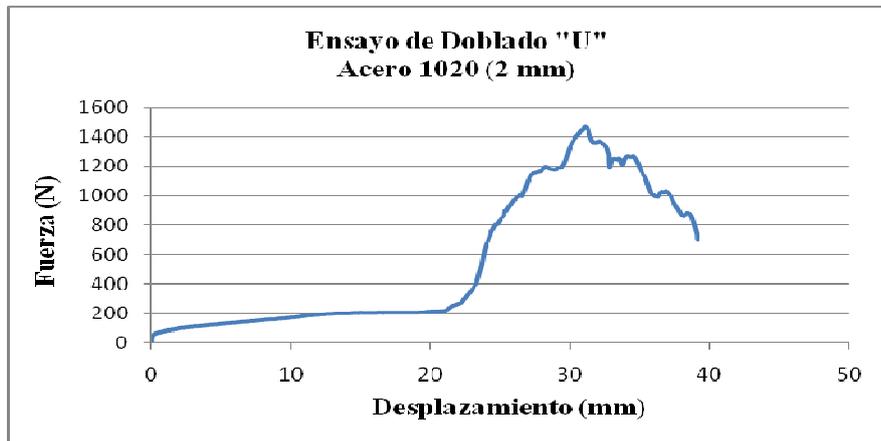


Fig. 4.35. Doblado en U. Acero 1020. Espesor 2 mm.

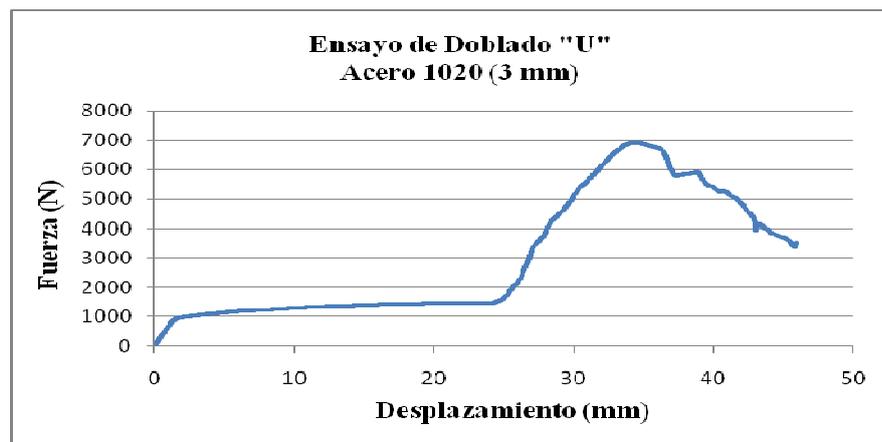


Fig. 4.36 Doblado en U. Acero 1020. Espesor 3 mm.



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

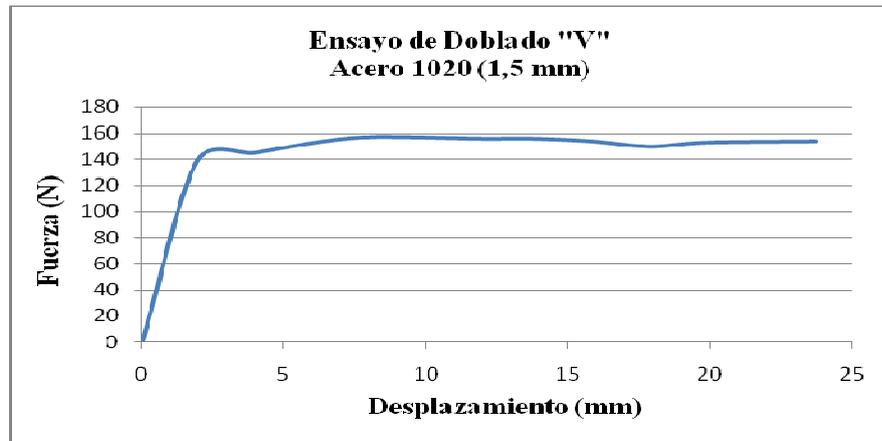


Fig. 4.37. Doblado en V. Acero 1020. Espesor 1.5 mm.

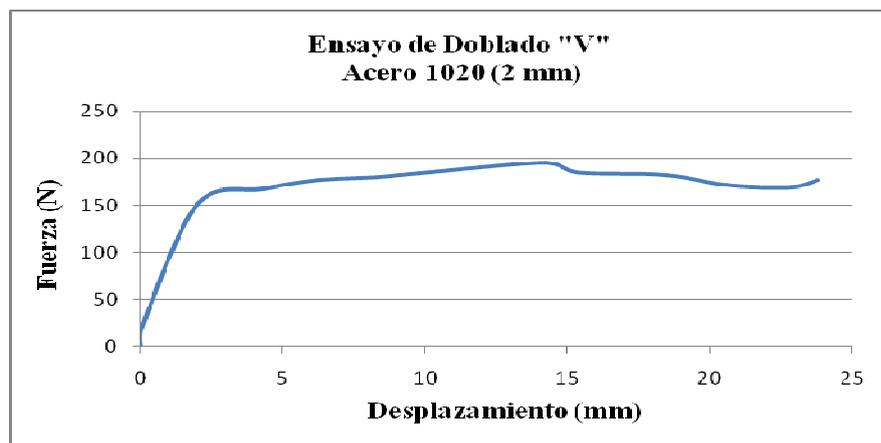


Fig. 438. Doblado en V. Acero 1020. Espesor 2 mm.

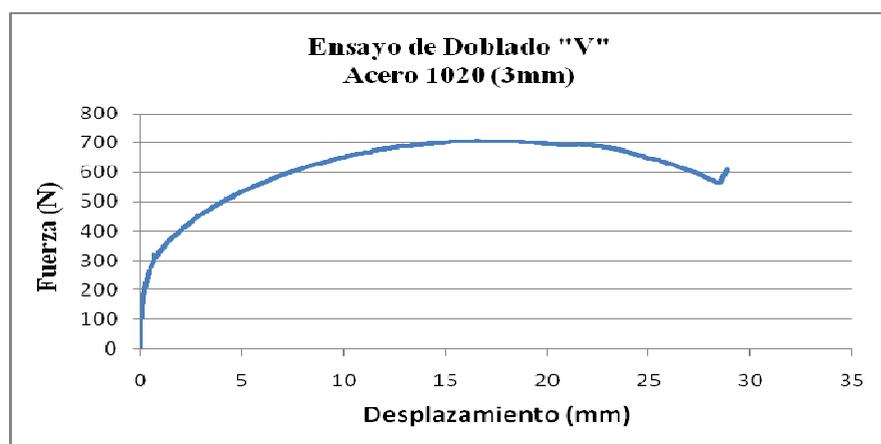


Fig. 4.39. Doblado en V. Acero 1020. Espesor 3 mm.



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

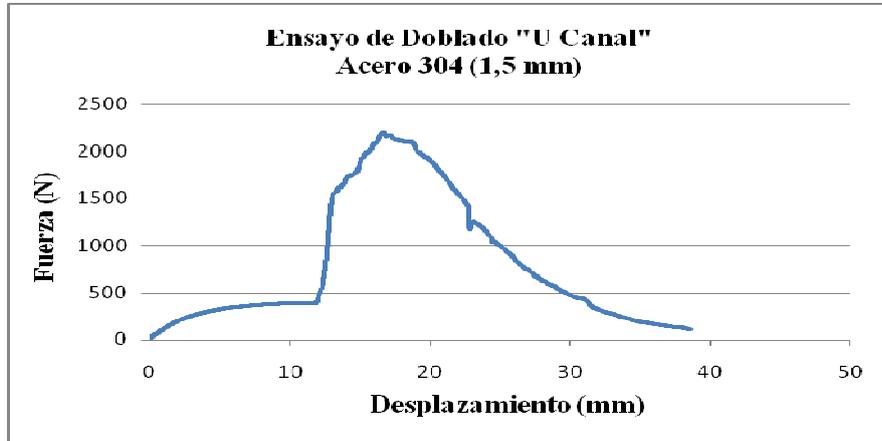


Fig. 4.40. Doblado en U Canal. Acero 304. Espesor 1.5 mm.

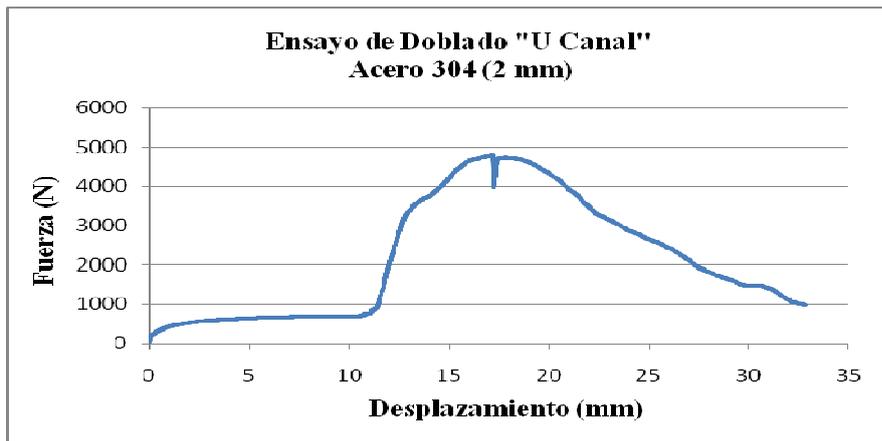


Fig. 4.41. Doblado en U Canal. Acero 304. Espesor 2 mm.

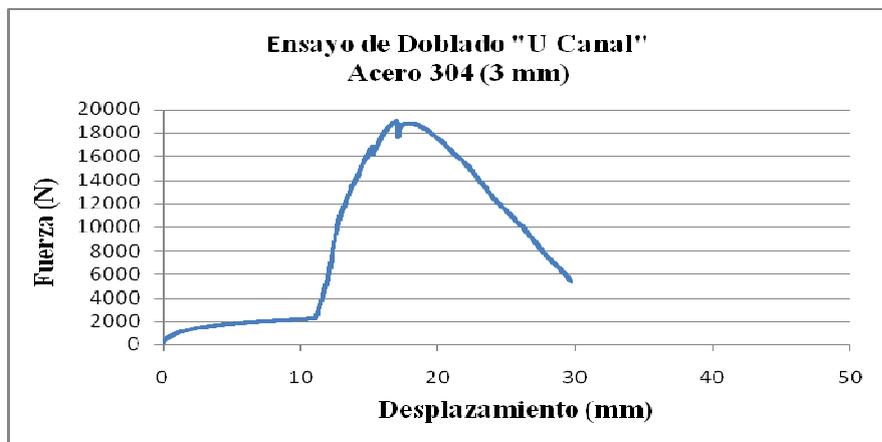


Fig. 4.42. Doblado en U Canal. Acero 304. Espesor 3 mm.

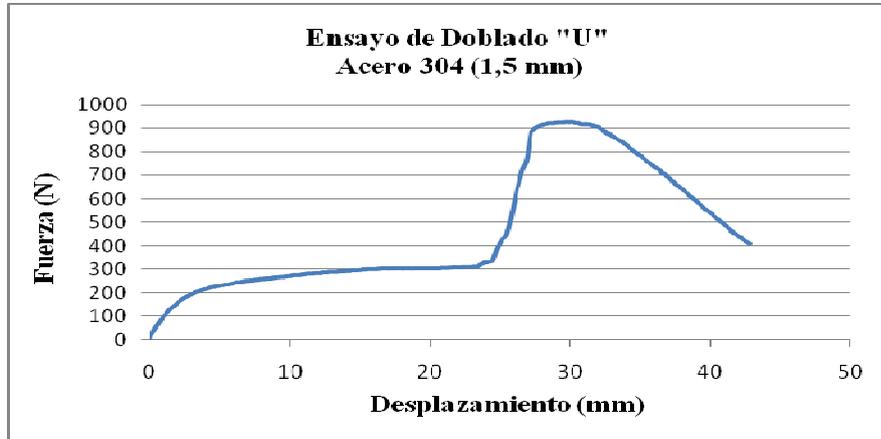


Fig. 4.43. Doblado en U. Acero 304. Espesor 1.5 mm.

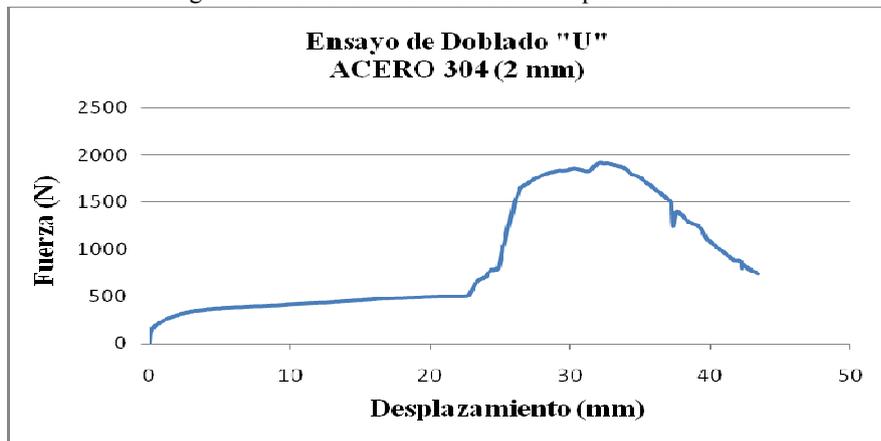


Fig. 4.44. Doblado en U. Acero 304. Espesor 2 mm.

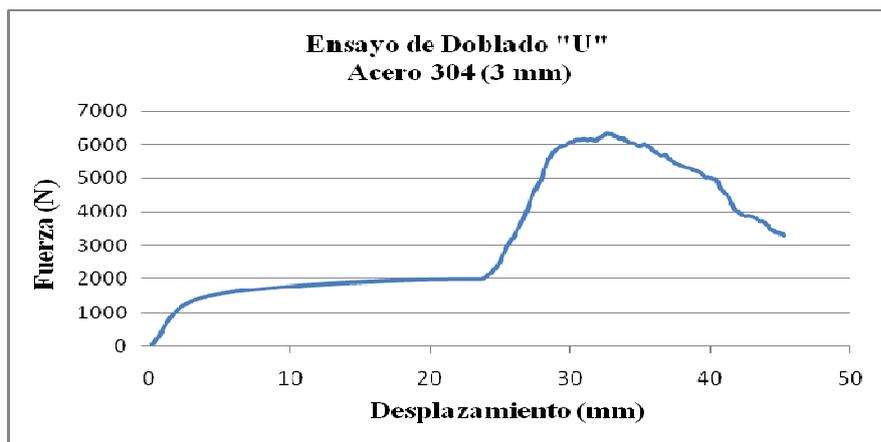


Fig. 4.45. Doblado en U. Acero 304. Espesor 3 m



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

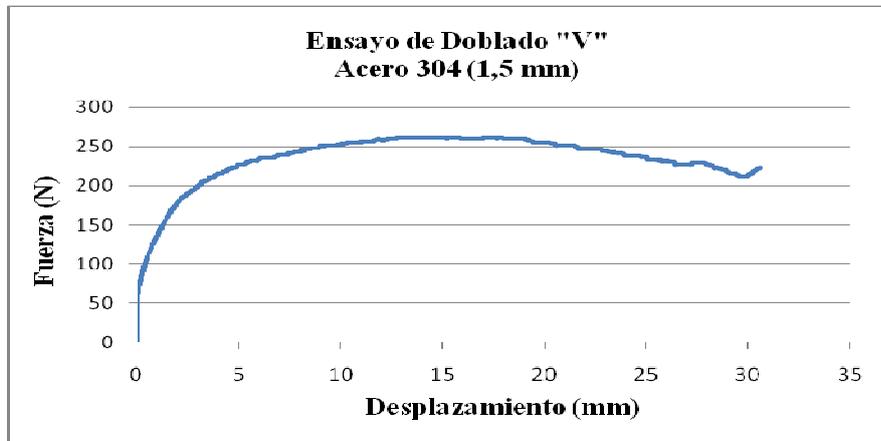


Fig. 4.46. Doblado en V. Acero 304. Espesor 1.5 mm.

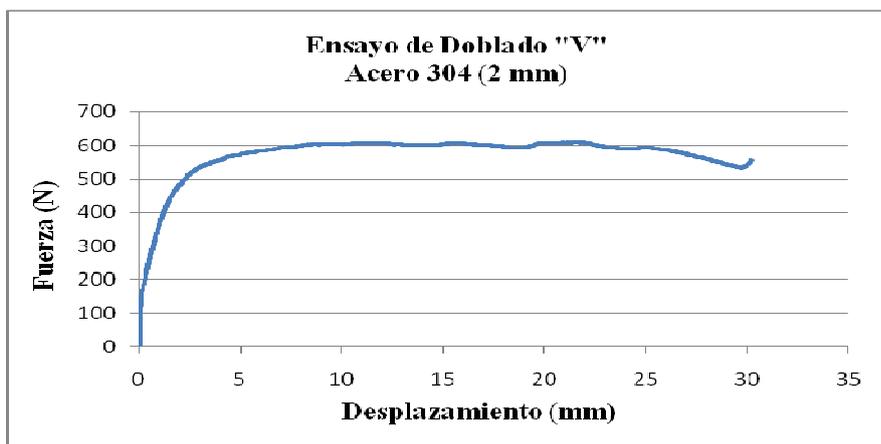


Fig. 4.47. Doblado en V. Acero 304. Espesor 2 mm.

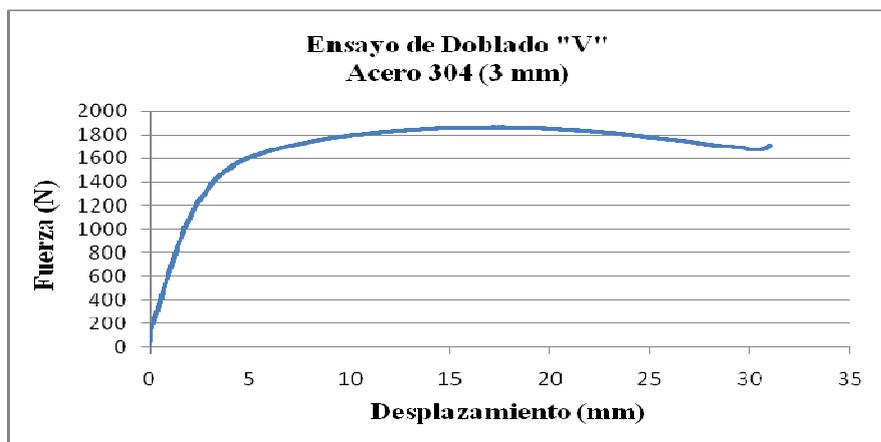


Fig. 4.48. Doblado en V. Acero 304. Espesor 3 mm.



Las figuras mostradas anteriormente (4.22 hasta 4.48) son las arrojadas durante los ensayos de doblado las cuales evidencian que la fuerza de doblado es directamente proporcional al incremento del espesor, en la realización de las pruebas en matrices con geometría de “V”, “U” y “U canal”, con los materiales ensayados Aluminio 3003 H14, Acero 1020 y Acero 304.

#### 4.6 Factor de Forma

A continuación se muestran las formulas y tablas en donde se presentan los resultados obtenidos del factor de forma con los diferentes espesores, materiales y matrices utilizadas.

Cálculo de Factor de Forma para la matriz “U Canal”.

$$F_{\max} = \frac{K_{bf} * TS * w * t^2}{R + t} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Y despejando el factor de forma para la matriz “U canal”, se obtiene.

$$K_{bf} = \frac{F_{\max} * (R + t)}{TS * w * t^2} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Cálculo de Factor de Forma para las matrices “U” y “V”:

$$F_{\max} = \frac{K_{bf} * TS * w * t^2}{D} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Y despejando el factor de forma para la matriz “U” y “V”, se obtiene.

$$K_{bf} = \frac{F_{\max} * D}{TS * w * t^2} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

F: Fuerza de doblado. (N)

D: Distancia entre los apoyos. (mm)



## CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

---

TS: Resistencia ultima a la tracción. (MPa.)

W: Ancho de la probeta. (mm)

T: Espesor de la probeta. (mm)

R: Radio del punzón (mm)

K: Factor de forma.

Ejemplo de cálculo de Factor de Forma en matriz “U canal” para el espesor 1.5 mm.

$$K_{bf} = \frac{475 * (2 + 1,5)}{109,564 * 40 * (1,5)^2} = 0,168597552$$

Ejemplo de cálculo de Factor de Forma en matriz “U” para el espesor de 1.5 mm.

$$K_{bf} = \frac{201 * 67,2}{109,564 * 40 * (1,5)^2} = 1,369792998$$

### 4.6.1 Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor.

Tabla 4.7A. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5mm. de espesor, en matriz en forma “U Canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	475	109,564	2	40	0,168597552
U canal	473	109,564	2	40	0,167887668
U canal	451	109,564	2	40	0,160078939
				Promedio.	<b>0,165521386</b>

---

---



## CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.7B. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	201	109,564	67,2	40	1,369792998
U	198	109,564	67,2	40	1,349348326
U	214	109,564	67,2	40	1,458386575
Promedio.					<b>1,392509299</b>

Tabla 4.7C. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	12	109,564	70,9	40	0,048677779
V	13	109,564	70,9	40	0,052734272
V	10	109,564	70,9	40	0,040564825
Promedio.					<b>0,083884677</b>

### 4.6.2 Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor.

Tabla 4.8A. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm de espesor, en matriz en forma “U Canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	1417	158,04	2	40	0,224152113
U canal	1492	158,04	2	40	0,236016198
U canal	1483	158,04	2	40	0,234592508
Promedio.					<b>0,23158694</b>

Tabla 4.8B. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm de espesor, en matriz en forma “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	672	158,04	67,2	40	1,785876993
U	757	158,04	67,2	40	2,011769172
U	701	158,04	67,2	40	1,86294609
Promedio.					<b>1,886864085</b>



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.8C. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm de espesor, en matriz en forma “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	167	158,04	70,9	40	0,468247754
V	125	158,04	70,9	40	0,350484846
V	131	158,04	70,9	40	0,367308118
Promedio.					<b>0,395346906</b>

**4.6.3 Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor.**

Tabla 4.9A. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm de espesor, en matriz en forma “U Canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	5528	177,56	2	40	0,432404696
U canal	5581	177,56	2	40	0,436550399
U canal	5576	177,56	2	40	0,436159295
Promedio.					<b>0,43503813</b>

Tabla 4.9B. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm de espesor, en matriz en forma “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	2769	177,56	67,2	40	2,911015995
U	2678	177,56	67,2	40	2,815348802
U	2821	177,56	67,2	40	2,965682962
Promedio.					<b>2,897349253</b>

Tabla 4.9C. Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm de espesor, en matriz en forma “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	662	177,56	70,9	40	0,734271357
V	647	177,56	70,9	40	0,717633789
V	658	177,56	70,9	40	0,729834672
Promedio.					<b>0,727246606</b>



#### 4.6.4 Factor de Forma para Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor.

Tabla 4.10A. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma "U Canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	1367	332,612	2	40	0,159829204
U canal	1352	332,612	2	40	0,158075409
U canal	1346	332,612	2	40	0,15737389
Promedio.					<b>0,158426167</b>

Tabla 4.10B. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	576	332,612	67,2	40	1,293038135
U	555	332,612	67,2	40	1,245896119
U	589	332,612	67,2	40	1,322221287
Promedio.					<b>1,28705185</b>

Tabla 4.10C. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	100	332,612	70,9	40	0,236845868
V	105	332,612	70,9	40	0,248688161
V	98	332,612	70,9	40	0,23210895
Promedio.					<b>0,239214326</b>



#### 4.6.5 Factor de Forma para Acero 1020 de 2 mm. de espesor.

Tabla 4.11A. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 2 mm de espesor, en matriz en forma “U canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	2454	316,0533333	78,4	40	0,194112808
U canal	2497	316,0533333	78,4	40	0,197514133
U canal	2479	316,0533333	78,4	40	0,196090322
				Promedio.	<b>0,195905754</b>

Tabla 4.11B. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 2 mm de espesor, en matriz en forma “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	1467	316,0533333	67,2	40	1,9494811
U	1452	316,0533333	67,2	40	1,929547756
U	1441	316,0533333	67,2	40	1,91492997
				Promedio.	<b>1,93131961</b>

Tabla 4.11C. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 2 mm de espesor, en matriz en forma “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	186	316,0533333	70,9	40	0,260782727
V	188	316,0533333	70,9	40	0,263586842
V	175	316,0533333	70,9	40	0,245360092
				Promedio.	<b>0,256576554</b>



#### 4.6.6 Factor de Forma para Acero 1020 de 3 mm. de espesor.

Tabla 4.12A. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 3 mm de espesor, en matriz en forma de “U canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	10968	395,02	78,4	40	0,385634483
U canal	10972	395,02	78,4	40	0,385775122
U canal	10966	395,02	78,4	40	0,385564163
Promedio.					<b>0,385657923</b>

(\*) FUENTE PROPIA.

Tabla 4.12B. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 3 mm de espesor, en matriz en forma de “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	6923	395,02	67,2	40	3,271463048
U	6394	395,02	67,2	40	3,021484144
U	6701	395,02	67,2	40	3,166556968
Promedio.					<b>3,153168053</b>

Tabla 4.12C. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 3 mm de espesor, en matriz en forma de “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	707	395,02	70,9	40	0,352487778
V	895	395,02	70,9	40	0,446218616
V	887	395,02	70,9	40	0,44223007
Promedio.					<b>0,413645488</b>



#### 4.6.7 Factor de Forma para Acero 304 de 1.5 mm. de espesor.

Tabla 4.13A. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma de “U canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	2194	716,38	78,4	40	0,119101904
U canal	2235	716,38	78,4	40	0,121327601
U canal	2115	716,38	78,4	40	0,114813367
Promedio.					<b>0,118414291</b>

Tabla 4.13B. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma de “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	862	716,38	67,2	40	0,898443098
U	925	716,38	67,2	40	0,964106573
U	879	716,38	67,2	40	0,916161814
Promedio.					<b>0,926237162</b>

Tabla 4.13C. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma de “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	270	716,38	70,9	40	0,296909461
V	268	716,38	70,9	40	0,294710132
V	262	716,38	70,9	40	0,288112144
Promedio.					<b>0,293243913</b>



#### 4.6.8 Factor de Forma para Acero 304 de 2 mm. de espesor.

Tabla 4.14A. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 2 mm de espesor, en matriz en forma de “U canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	4867	725,5733333	78,4	40	0,167694972
U canal	4783	725,5733333	78,4	40	0,164800709
U canal	4824	725,5733333	78,4	40	0,166213385
Promedio.					<b>0,166236356</b>

Tabla 4.14B. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 2 mm de espesor, en matriz en forma de “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	1899	725,5733333	67,2	40	1,09924106
U	1924	725,5733333	67,2	40	1,113712375
U	1926	725,5733333	67,2	40	1,11487008
Promedio.					<b>1,109274505</b>

Tabla 4.14C. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 2 mm de espesor, en matriz en forma de “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	610	725,5733333	70,9	40	0,372541599
V	587	725,5733333	70,9	40	0,358494949
V	603	725,5733333	70,9	40	0,368266532
Promedio.					<b>0,36643436</b>



#### 4.6.9 Factor de Forma para Acero 304 de 3 mm. de espesor.

Tabla 4.15A. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 3 mm de espesor, en matriz en forma de “U canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	18985	602,6633333	78,4	40	0,437525466
U canal	18983	602,6633333	78,4	40	0,437479374
U canal	18988	602,6633333	78,4	40	0,437594603
Promedio.					<b>0,437533148</b>

Tabla 4.15B. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 3 mm de espesor, en matriz en forma de “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	6038	602,6633333	67,2	40	1,870187335
U	6281	602,6633333	67,2	40	1,945453238
U	6332	602,6633333	67,2	40	1,961249786
Promedio.					<b>1,92563012</b>

Tabla 4.15C. Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 3 mm de espesor, en matriz en forma de “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Resistencia ultima a tracción. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	1803	602,6633333	70,9	40	0,58920265
V	1864	602,6633333	70,9	40	0,60913685
V	1859	602,6633333	70,9	40	0,607502899
Promedio.					<b>0,601947467</b>

#### 4.7 Recuperación Elástica.

A continuación se presentan los esquemas representativos de las matrices utilizadas para la realización de los ensayos de doblado y los cálculos obtenidos de la

Recuperación elástica para los materiales, matrices y espesores utilizados en el proceso.

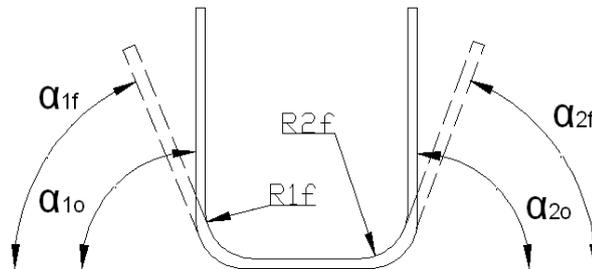


Fig. 4.49 Esquema demostrativo de la recuperación elástica en una lamina sometida a doblado en "V"..

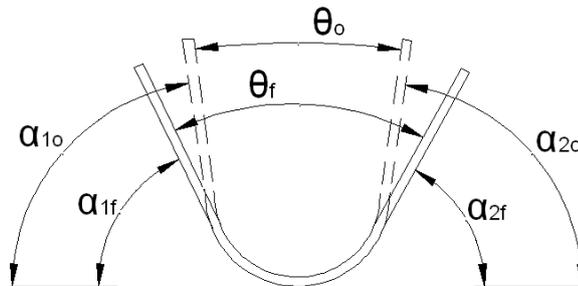


Fig. 4.50 Esquema demostrativo de la recuperación elástica en una lamina sometida a doblado en "U".

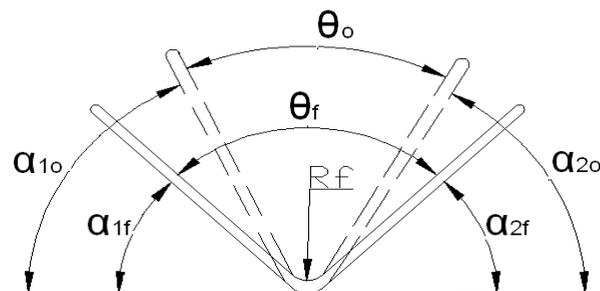


Figura 4.51 Esquema demostrativo de la recuperación elástica en una lamina sometida a doblado en "U CANAL".



Calculo de la recuperación elástica.

$$SB = AF - AI \quad \text{Ec. 4.5}$$

SB: Recuperación elástica.

AF: Angulo Final.

AI.: Angulo Inicial.

$$SB = 90^\circ - 78,75^\circ = 11,25^\circ$$

#### 4.7.1 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 para Doblado en “U canal”.

Tabla 4.16A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
1.5	90	77,5	80	78,75	3	3	11,25
1.5	90	77	80	78,5	3	3	11,5
1.5	90	78	79,5	78,75	3	3	11,25
Promedio							<b>11,33</b>

Tabla 4.16B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
2	90	81	82	81,5	4	4	8,5
2	90	82,5	83	82,75	3,5	3,5	7,25
2	90	82	84	83	3,5	3,5	7,00
Promedio							<b>7,58</b>

Tabla 4.16C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
3	90	80	84	82	4	4	8,00
3	90	82,5	82	82,5	4	4	7,50
3	90	82	84	83	4	4	7,00
Promedio							<b>7.5</b>



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

**4.7.2 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 para Doblado en “U”.**

Tabla 4.17A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica. (°)
1,5	30	47	80	66,5	66,5	13,5
1,5	30	43	80	73,5	73,5	6,5
1,5	30	47	80	66,5	66,5	13,5
Promedio						<b>11,16</b>

Tabla 4.17B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica. (°)
2	20	36	80	72	72	8,00
2	20	34	80	73	73	7,00
2	20	34	80	73	73	7,00
Promedio						<b>7,33</b>

Tabla 4.17C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H 14 de 3 mm espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica. (°)
3	10	25	80	77,5	77,5	2,50
3	10	25	80	77,5	77,5	2,50
3	10	24,5	80	77,75	77,75	2,25
Promedio						<b>2,58</b>

**4.7.3 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 para Doblado en “V”.**

Tabla 4.18A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
1,5	80	106	50	50	37	37	2,5	13
1,5	80	110	50	50	35	35	3	15
1,5	80	106	50	50	37	37	2,5	13
Promedio								<b>13.66</b>



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.18B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm. espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
2	80	106	50	50	37	37	4,5	13
2	80	105	50	50	37,5	37,5	5	12,5
2	80	104	50	50	38	38	5	12
Promedio								<b>12,5</b>

Tabla 4.18.C Determinación de la recuperación elástica para láminas de Aluminio 3003 H 14 de 3 mm. espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
3	80	97	50	50	41,5	41,5	0,75	8,5
3	80	105	50	50	37,5	37,5	1,5	12,5
3	80	106	50	50	37	37	1,5	13
Promedio								<b>11,33</b>

La recuperación elástica es inversamente proporcional al incremento del espesor en el material (Aluminio 3003 H14) para todas las matrices en estudio (“U canal” “U” y “V”). Para este caso se considera un ángulo inicial (90°, 80° y 50° respectivamente), y se parte de esto para la determinación de dicha característica, a medida que aumenta el espesor, menores son los ángulos finales obtenidos.

**4.7.4 Recuperación Elástica de Acero 1020 para Doblado en “U canal”.**

Tabla 4.19A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm. espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
1,5	90	83	82	82,5	6	6	7,5
1,5	90	82	84	83	6	6	7
1,5	90	81,5	83	82,25	6	6	7,75
Promedio							<b>7,41</b>



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.19B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 2 mm. espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
2	90	84	85	84,5	6	6	5,5
2	90	84,5	85	84,75	6	6	5,25
2	90	82	86	84	6	6	6
Promedio							<b>5,58</b>

Tabla 4.19C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 3 mm. espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
3	90	87	83	85	7	7	5
3	90	85	83	84	8	8	6
3	90	83	87	85	8	8	5
Promedio							<b>5,33</b>

**4.7.5 Recuperación Elástica de Acero 1020 para Doblado en “U”.**

Tabla 4.20A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm. espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm.)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica (°)
1,5	26	33	80	73,5	73,5	6,50
1,5	26	34	80	73	73	7,00
1,5	26	35	80	72,5	72,5	7,50
Promedio						<b>7,00</b>

Tabla 4.20B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 2 mm. espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica. (°)
2	20	32	80	74	74	6
2	20	32	80	74	74	6
2	20	31	80	74,5	74,5	5,5
Promedio						<b>5,83</b>



CAPITULO IV RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.20C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 3 mm. espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica. (°)
3	10	23	80	78,5	78,5	1,50
3	10	25	80	77,5	77,5	2,50
3	10	26	80	77	77	3,00
Promedio						<b>2,33</b>

(\*) FUENTE PROPIA.

**4.7.6 Recuperación Elástica de Acero 1020 para Doblado en “V”.**

Tabla 4.21A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm. espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
1,5	80	90	50	50	45	45	11	5
1,5	80	99	50	50	44	44	16	6
1,5	80	102	50	50	43	43	16	7
Promedio								<b>6,00</b>

Tabla 4.21B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 2 mm. espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
2	80	96	50	50	42	42	15	8
2	80	94	50	50	43	43	15	7
2	80	93	50	50	43,5	43,5	14	6,5
Promedio								<b>7,16</b>

Tabla 4.21C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 1020 de 3 mm. espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
3	80	102	50	50	39	39	16	11
3	80	102	50	50	39	39	16	11
3	80	101	50	50	39,5	39,5	16	11,5
Promedio								<b>11,16</b>

La recuperación elástica es inversamente proporcional al incremento del espesor en el material (Acero 1020) para dos de las matrices en estudios (“U canal” y “U”). Para este caso se considera un ángulo inicial (90° y 80° respectivamente), y se parte



de esto para la determinación de dicha característica, a medida que aumenta el espesor, menores son los ángulos finales obtenidos. Sin embargo en el caso de la matriz con geometría en “V” la recuperación elástica es directamente proporcional al incremento del espesor, tomando como ángulo inicial 50°.

#### 4.7.7 Recuperación Elástica de Acero 304 para Doblado en “U canal”.

Tabla 4.22A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 1.5 mm espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica.(°)
1,5	90	80	79	79,5	7	7	10,5
1,5	90	78,5	79	78,75	7	7	11,25
1,5	90	80	80	80	7	7	10
Promedio							<b>10,58</b>

Tabla 4.22.B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 2 mm. espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Promedio $\alpha_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica.(°)
2	90	82,5	80,5	81,25	10	10	8,75
2	90	81	81	81	9	9	9
2	90	81	84	82,5	10	10	7,5
Promedio							<b>8,41</b>

Tabla 4.22C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 3 mm. espesor, en matriz en forma de “U Canal”.

Espesor. (mm.)	$\theta_{1o} = \theta_{2o}$	$\theta_{1f}$	$\theta_{2f}$	Promedio $\theta_f$	R <sub>1F</sub> (mm)	R <sub>2F</sub> (mm)	Recuperación Elástica.(°)
3	90	86	83	84,5	12	12	5,5
3	90	83	82	82,5	11	11	7,5
3	90	82	81	81,5	12	12	8,5
Promedio							<b>7,16</b>



#### 4.7.8 Recuperación Elástica de Acero 304 para Doblado en “U”.

Tabla 4.23A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 1.5 mm espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica. (°)
1,5	20	40,5	80	69,75	69,75	10,25
1,5	20	43	80	68,5	68,5	11,5
1,5	20	44	80	68	68	12
Promedio						<b>11,25</b>

Tabla 4.23B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 2 mm espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica.(°)
2	20	40	80	70	70	10
2	20	37	80	71,5	71,5	8,5
2	20	36	80	72	72	8
Promedio						<b>8,83</b>

Tabla 4.23C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 3 mm espesor, en matriz en forma de “U”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o} = \alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	Recuperación Elástica.(°)
3	20	32	80	74	74	6
3	20	29	80	75,5	75,5	4,5
3	20	31,5	80	74,25	74,25	5,75
Promedio						<b>5,41</b>

#### 4.7.9 Recuperación Elástica de Acero 304 para Doblado en “V”.

Tabla 4.24A. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 1.5 mm espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	$R_F$ (mm)	Recuperación Elástica (°)
1,5	80	104	50	50	40	40	14	10
1,5	80	104	50	50	39	39	14	11
1,5	80	105	50	50	39,5	39,5	14	10,5
Promedio								<b>10,50</b>



Tabla 4.24B. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 2 mm espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica (°)
2	80	102	50	50	39	39	15	11
2	80	101	50	50	39,5	39,5	15	10,5
2	80	102	50	50	39	39	14	11
Promedio								<b>10,83</b>

Tabla 4.24C. Determinación de la recuperación elástica para láminas de Acero 304 de 3 mm espesor, en matriz en forma de “V”.

Espesor (mm)	$\theta_o$	$\theta_f$	$\alpha_{1o}$	$\alpha_{2o}$	$\alpha_{1f}$	$\alpha_{2f}$	R <sub>F</sub> (mm)	Recuperación Elástica. (°)
3	80	102	50	50	39	39	12,5	11
3	80	108	50	50	36	36	12,5	14
3	80	104	50	50	38	38	12,5	12
Promedio								<b>12,33</b>

La recuperación elástica es inversamente proporcional al incremento del espesor en el material (Acero 304) para dos de las matrices en estudios (“U canal” y “U”). Para este caso se considera un ángulo inicial (90° y 80° respectivamente), y se parte de esto para la determinación de dicha característica, a medida que aumenta el espesor, menores son los ángulos finales obtenidos. Sin embargo en el caso de la matriz con geometría en “V” la recuperación elástica es directamente proporcional al incremento del espesor, tomando como ángulo inicial 50°.

#### 4.8 Recuperación elástica en función de la matriz.

Las tablas siguientes muestran la recuperación elástica para el Aluminio 3003 H14 comparando los datos hallados de acuerdo a la geometría de la matriz, fijando para esto el espesor y material de la probeta.



#### 4.8.1 Recuperación elástica en función de la matriz para Aluminio 3003 H14.

Tabla 4.25A Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Aluminio 3003 H14	U canal	1.5	11,33
Aluminio 3003 H14	V	1.5	13,66
Aluminio 3003 H14	U	1.5	11,16

Tabla 4.25B Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Aluminio 3003 H14	U canal	2	7,58
Aluminio 3003 H14	V	2	12,5
Aluminio 3003 H14	U	2	7,33

Tabla 4.25C Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Aluminio 3003 H14	U Canal	3	7.5
Aluminio 3003 H14	V	3	11,33
Aluminio 3003 H14	U	3	2,58

Las tablas siguientes muestran la recuperación elástica para el Acero 1020 comparando los datos hallados de acuerdo a la geometría de la matriz, fijando para esto el espesor y material de la probeta.

#### 4.8.2 Recuperación elástica en función de la matriz para Acero 1020.

Tabla 4.26A Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 1020	U canal	1.5	7.41
Acero 1020	V	1.5	6,00
Acero 1020	U	1.5	7,00



Tabla 4.26B Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Acero 1020 de 2 mm de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 1020	U canal	2	5.58
Acero 1020	V	2	<b>7.16</b>
Acero 1020	U	2	5.83

Tabla 4.26C Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Acero 1020 de 3 mm. de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 1020	U canal	3	5,33
Acero 1020	V	3	11.16
Acero 1020	U	3	2.33

Las tablas siguientes muestran la recuperación elástica para el Acero 304, comparando los datos hallados de acuerdo a la geometría de la matriz, fijando para esto el espesor y material de la probeta.

#### 4.8.3 Recuperación elástica en función de la matriz para Acero 304.

Tabla 4.27A Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Acero 304 de 1.5 mm de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 304	U canal	1.5	10.58
Acero 304	V	1.5	10,50
Acero 304	U	1.5	11.25

Tabla 4.27B Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Acero 304 de 2 mm de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 304	U canal	2	8.41
Acero 304	V	2	10.83
Acero 304	U	2	8.83



Tabla 4.27C Recuperación elástica en función de la forma de la matriz, para láminas de Acero 304 de 3 mm de espesor.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 304	U canal	3	7.16
Acero 304	V	3	12.33
Acero 304	U	3	5.41

Al clasificar la recuperación elástica en función de la matriz se puede observar que para aluminio 3003 H14 la mayor recuperación elástica la presenta la matriz en “V” en todos los espesores mientras que para el resto de los materiales ensayados son solo los espesores de 2 y 3 mm.

#### 4.9 Recuperación elástica en función del espesor.

Las tablas siguientes muestran la recuperación elástica para el Aluminio 3003 H14, comparando los datos hallados de acuerdo al espesor de la probeta, fijando para esto la geometría de la matriz y el material de la lamina metálica.

##### 4.9.1 Recuperación elástica en función del espesor para Aluminio 3003 H14.

Tabla 4.28A Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Aluminio 3003 H14 y matriz “U Canal”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Aluminio 3003 H14	U canal	1.5	11,33
Aluminio 3003 H14	U canal	2	7,58
Aluminio 3003 H14	U canal	3	7,50

Tabla 4.28B Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Aluminio 3003 H14 y matriz “U”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Aluminio 3003 H14	U	1.5	11,16
Aluminio 3003 H14	U	2	7,33
Aluminio 3003 H14	U	3	2,58

---

---



Tabla 4.28C Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Aluminio 3003 H14 y matriz “V”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Aluminio 3003 H14	V	1.5	13,66
Aluminio 3003 H14	V	2	12,50
Aluminio 3003 H14	V	3	11,33

(\*) FUENTE PROPIA.

La recuperación elástica en función del espesor sigue un comportamiento similar para las diferentes matrices utilizadas en un mismo material (Aluminio 3003 H14), ya que a medida que aumenta el espesor la recuperación elástica disminuye.

Las tablas siguientes muestran la recuperación elástica para el Acero 1020, comparando los datos hallados de acuerdo al espesor de la probeta, fijando para esto la geometría de la matriz y el material de la lámina metálica.

#### 4.9.2 Recuperación elástica en función del espesor para Acero 1020.

Tabla 4.29A Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 1020 y matriz “U Canal”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 1020	U canal	1.5	7,41
Acero 1020	U canal	2	5,58
Acero 1020	U canal	3	5,33

Tabla 4.29B Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 1020 y matriz “U”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 1020	U	1.5	7,00
Acero 1020	U	2	5,83
Acero 1020	U	3	2,33

Tabla 4.29C Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 1020 y matriz “V”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 1020	V	1.5	6,00
Acero 1020	V	2	7,16
Acero 1020	V	3	11,16



La recuperación elástica en función del espesor, para las matrices “U canal” y “U” es inversamente proporcional al espesor, mientras que para el caso de la matriz con geometría “V” los valores de recuperación siguen un comportamiento directamente proporcional con el espesor trabajado.

Las tablas siguientes muestran la recuperación elástica para el Acero 304, comparando los datos hallados de acuerdo al espesor de la probeta, fijando para esto la geometría de la matriz y el material de la lámina metálica.

#### 4.9.3 Recuperación elástica en función del espesor para Acero 304.

Tabla 4.30A Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 304 y matriz “U Canal”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 304	U CANAL	1.5	10,58
Acero 304	U CANAL	2	8,41
Acero 304	U CANAL	3	7,16

Tabla 4.30B Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 304 y matriz “U”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 304	U	1.5	11,25
Acero 304	U	2	8,83
Acero 304	U	3	5,41

Tabla 4.30C Recuperación elástica en función de la forma del espesor del material, para láminas de Acero 304 y matriz “V”.

Material.	Matriz.	Espesor (mm).	Recuperación Elástica (°)
Acero 304	V	1.5	10,50
Acero 304	V	2	10,83
Acero 304	V	3	12,33

Para el Acero 304 la recuperación elástica en función del espesor, en matrices “U canal” y “U” es inversamente proporcional al espesor, mientras que para el caso de la matriz con geometría “V” los valores de recuperación siguen un comportamiento directamente proporcional con el espesor trabajado.



#### 4.10 Comparación entre los factores de forma. Material Aluminio 3003 H14.

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara el factor de forma de acuerdo al espesor de las láminas de Aluminio 3003 H14 para las distintas matrices.

Tabla 4.31 Comparación entre los factores de forma en Aluminio 3003 H14.

Espesor (mm.)	Factor de Forma Matriz V	Factor de Forma Matriz U	Factor de Forma Matriz U Canal
1.5	0.0838	1.3925	0.1655
2	0.3953	1.8868	0.2315
3	0.7272	2.8973	0.4350

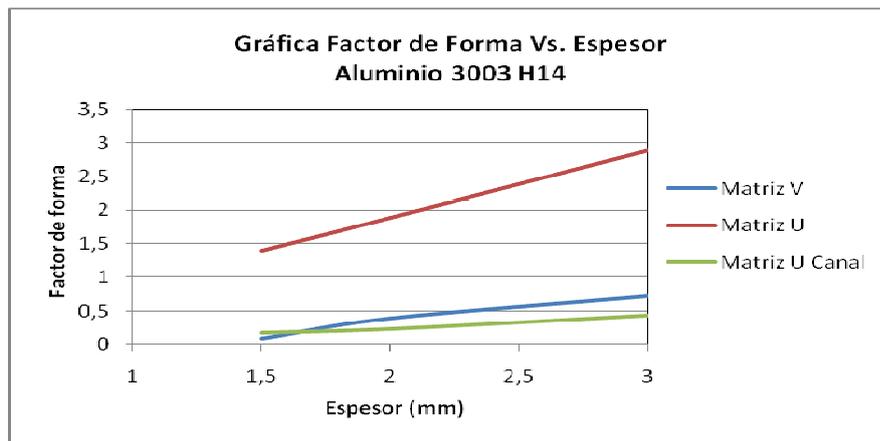


Fig. 4.52 Comparación entre los factores de forma de acuerdo a espesores y matrices en Aluminio 3003 H14

La matriz en V sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = -1.4329 + 1.3022X - 0.1940X^2$$

La matriz en U sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = -0.046 + 0.937X + 0.0014X^2$$

La matriz en U Canal sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = 0.11050 - 0.03483X + 0.04766X^2$$



#### 4.11 Comparación entre los factores de forma. Material Acero 1020.

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara el factor de forma de acuerdo al espesor de las láminas de Acero 1020 para las distintas matrices.

Tabla 32 Comparación entre los factores de forma en Acero 1020.

Espesor (mm.)	Factor de Forma Matriz V	Factor de Forma Matriz U	Factor de Forma Matriz U Canal
1.5	0.2392	1.2870	0.1580
2	0.2565	1.9313	0.1950
3	0.4136	3.1531	0.3850

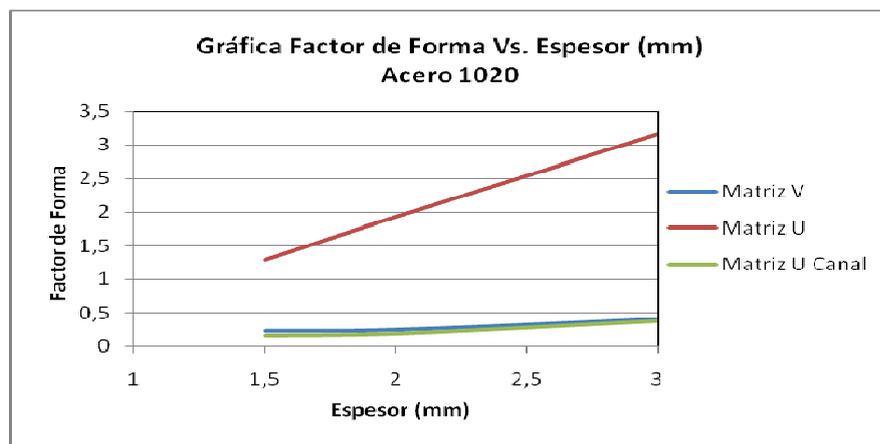


Fig. 4.53 Comparación entre los factores de forma de acuerdo a espesores y matrices en Acero 1020

La matriz en V sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = 0.432 - 0.251X + 0.081X^2$$

La matriz en U sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = -0.779 + 1.444X + 0.044X^2$$

La matriz en U Canal sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = 0.27530 - 0.19263X + 0.07646X^2$$



#### 4.12 Comparación entre los factores de forma. Material Acero 304.

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara el factor de forma de acuerdo al espesor de las láminas de Acero 304 para las distintas matrices.

Tabla 33 Comparación entre los factores de forma en Acero 1020

Espesor (mm)	Factor de Forma Matriz V	Factor de Forma Matriz U	Factor de Forma Matriz U Canal
1.5	0.2932	0.9262	0.1184
2	0.3664	1.1092	0.1662
3	0.6019	1.9256	0.4375

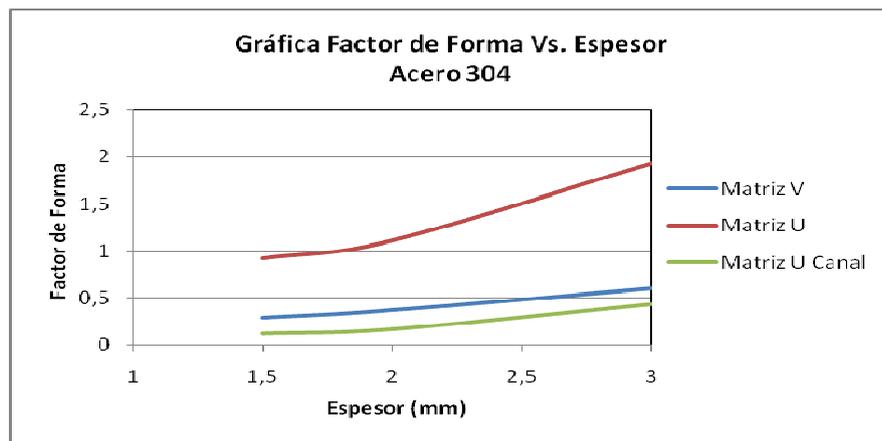


Fig. 4.54 Comparación entre los factores de forma de acuerdo a espesores y matrices en Acero 304

La matriz en V sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = 0.251 - 0.061X + 0.059X^2$$

La matriz en U sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = 1.278 - 0.684X + 0.3002X^2$$

La matriz en U Canal sigue el siguiente comportamiento:

$$Y = 0.32639 - 0.31436X + 0.11713X^2$$



### 4.13 Graficas de recuperación elástica de Aluminio 3003 H14 ( $\Delta\alpha$ vs $\alpha_{prom}$ )

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara la recuperación elástica de acuerdo al espesor de las láminas de Aluminio 3003 H14 para las distintas matrices.

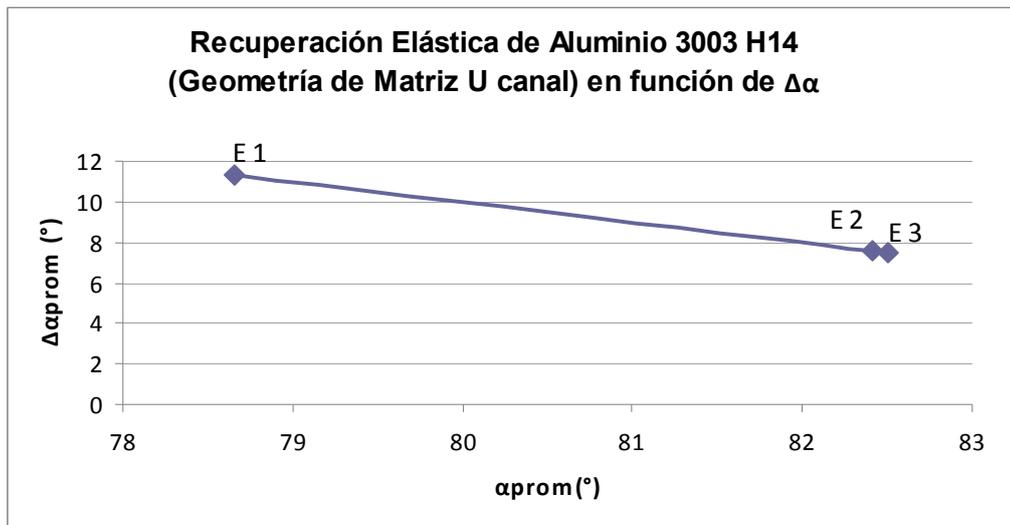


Fig. 4.55 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U canal) en función de  $\Delta\alpha$ .

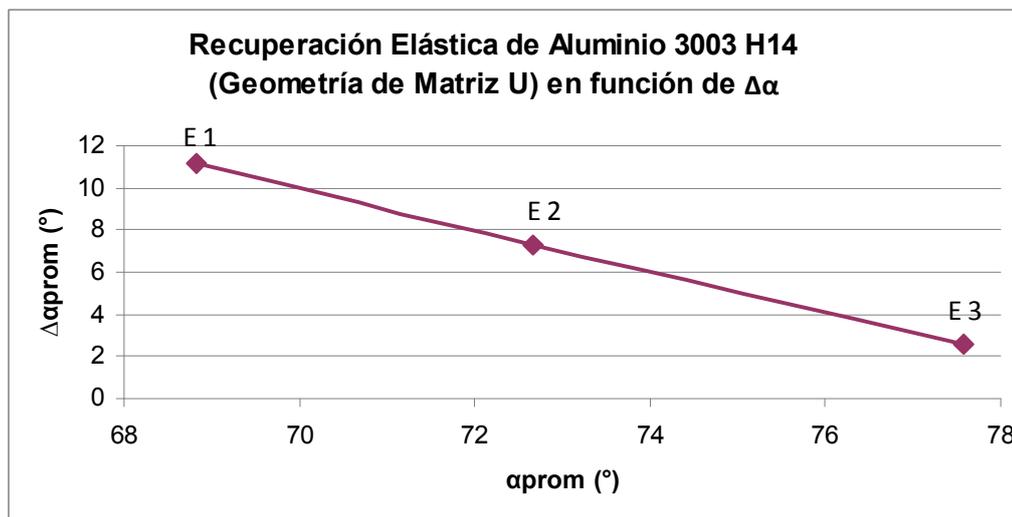


Fig. 4.56 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U) en función de  $\Delta\alpha$ .

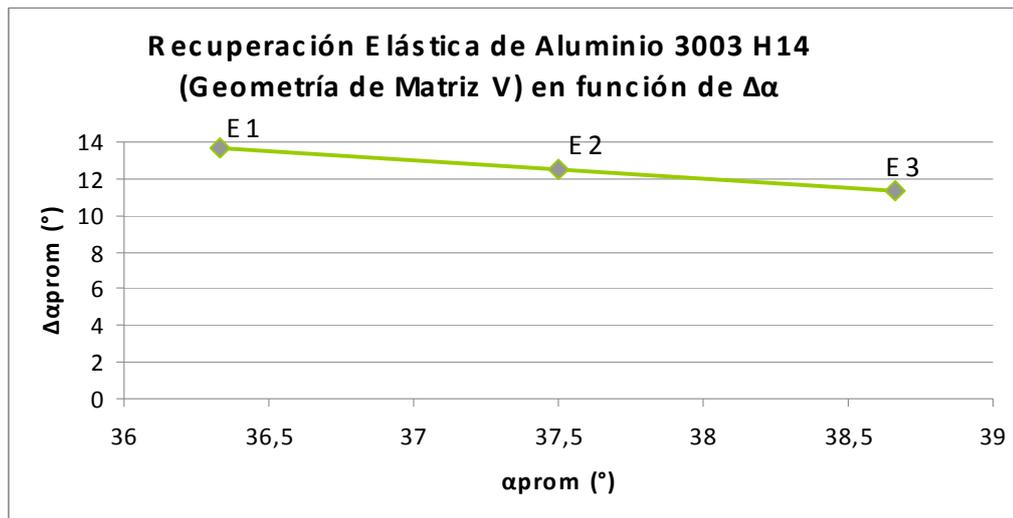
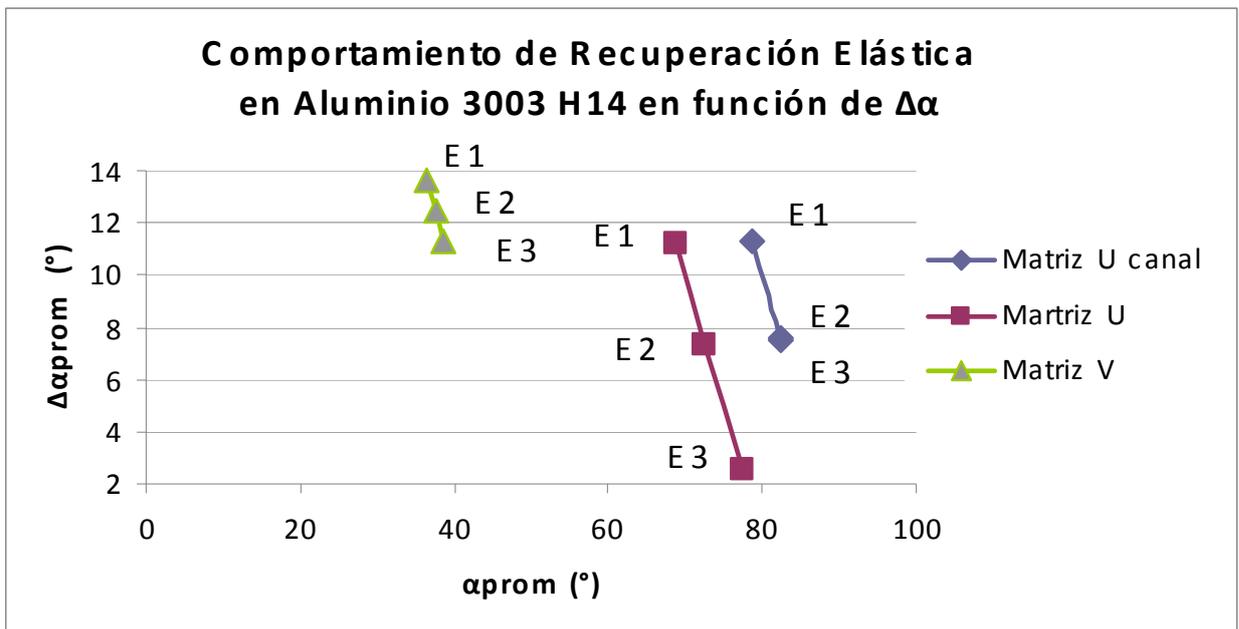


Fig. 4.57 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14  
(Geometría de Matriz V) en función de  $\Delta\alpha$ .



Gráfica 4.58 Comportamiento de Recuperación Elástica En Aluminio 3003 H14 en función de  $\Delta\alpha$



#### 4.14 Graficas de recuperación elástica de Acero 1020 ( $\Delta\alpha$ vs $\alpha_{prom}$ )

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara la recuperación elástica de acuerdo al espesor de las láminas de Acero 1020 para las distintas matrices.

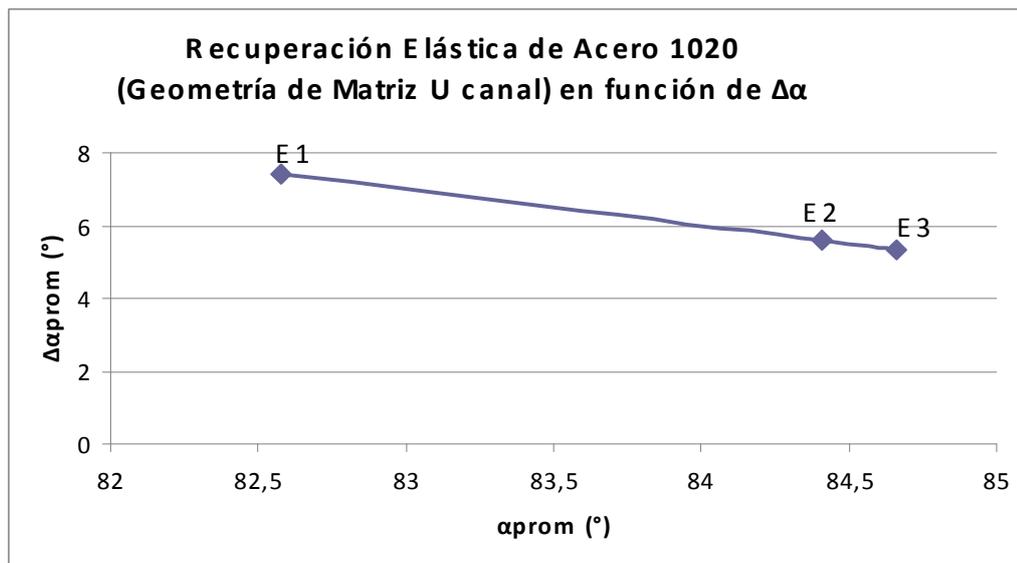


Fig. 4.59 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U canal) en función de  $\Delta\alpha$  .

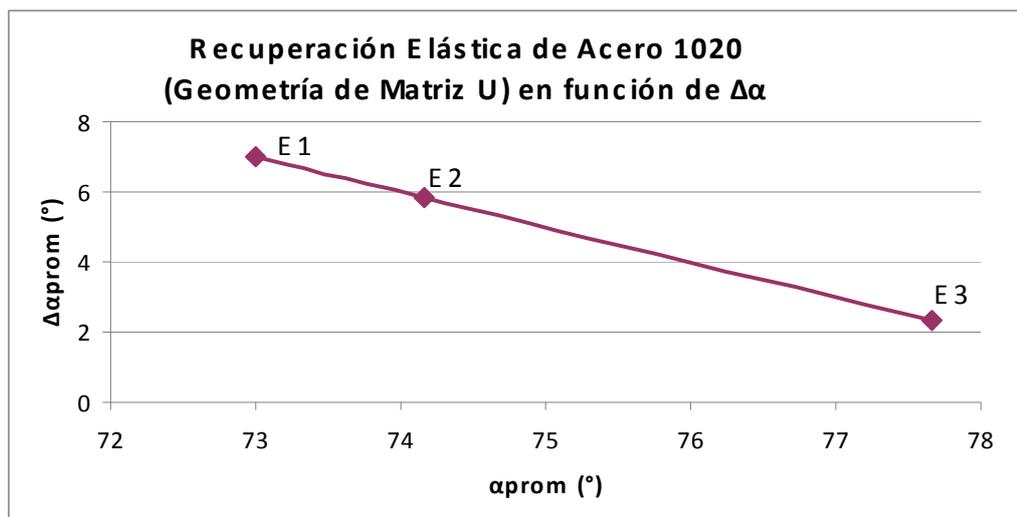


Fig. 4.60 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U) en función de  $\Delta\alpha$  .

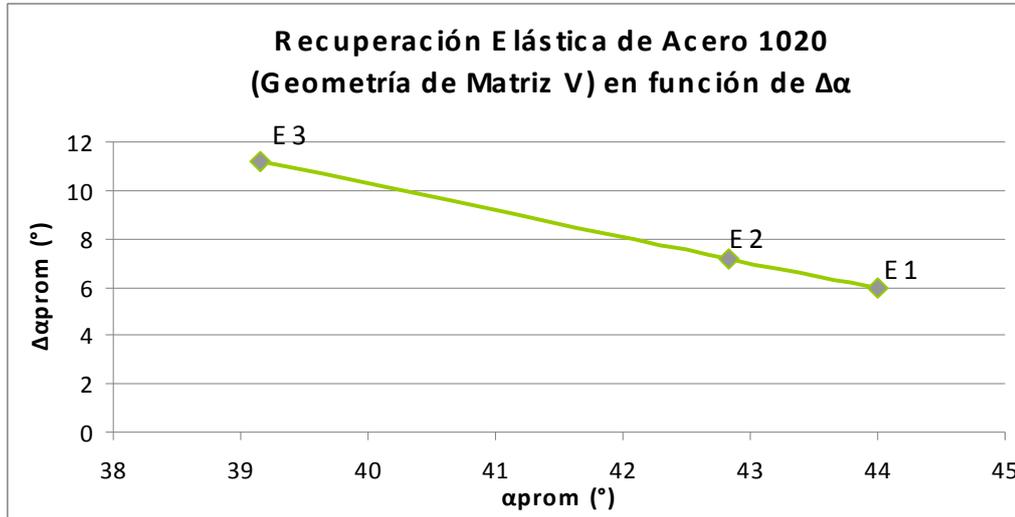
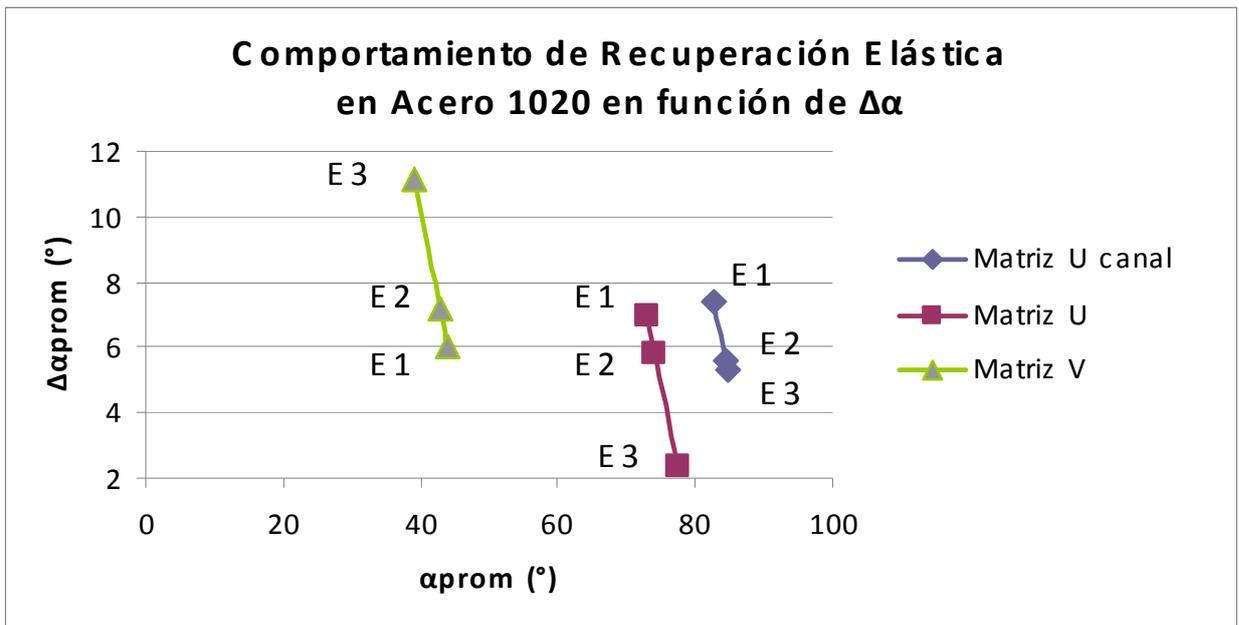


Fig. 4.61 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz V) en función de  $\Delta\alpha$ .



Grafica 4.62 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 1020 en función de  $\Delta\alpha$ .



#### 4.15 Graficas de recuperación elástica de Acero 304 ( $\Delta\alpha$ vs $\alpha_{prom}$ )

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara la recuperación elástica de acuerdo al espesor de las láminas de Acero 304 para las distintas matrices.

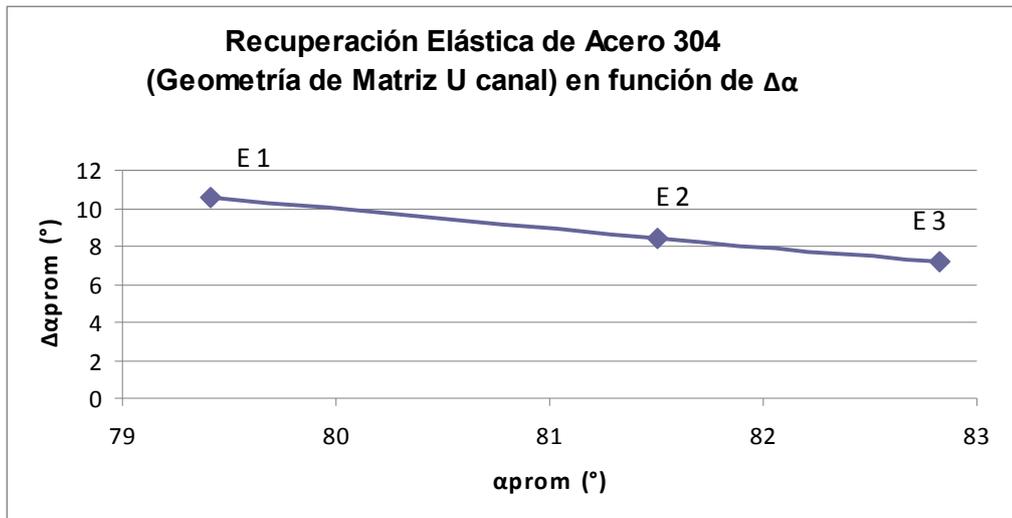


Fig. 4.63 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U canal) en función de  $\Delta\alpha$  .

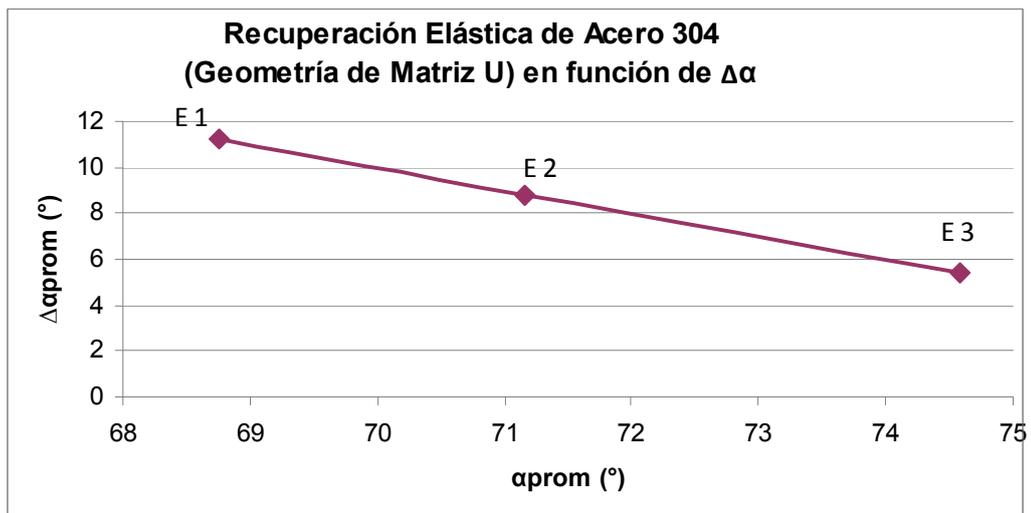


Fig. 4.64 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U) en función de  $\Delta\alpha$  .

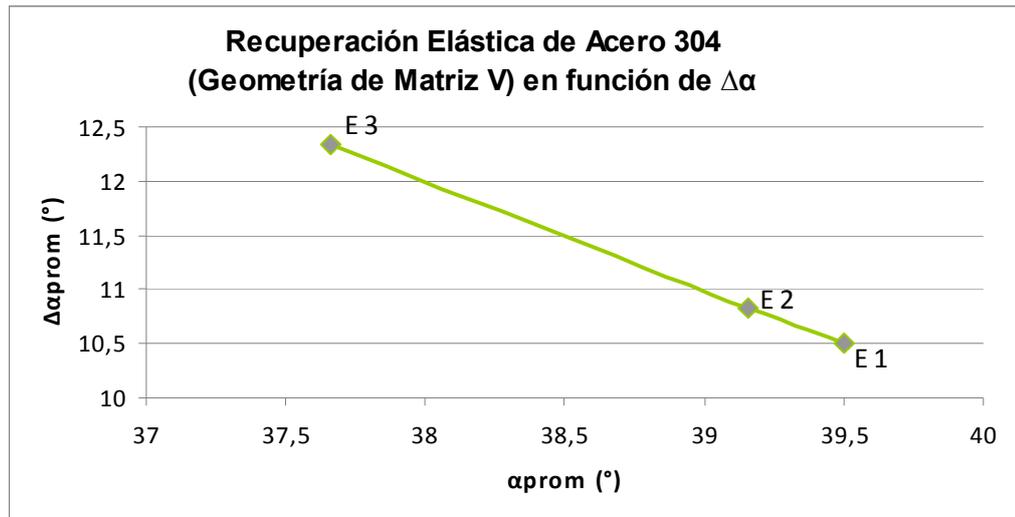


Fig. 4.65 Recuperación Elástica de Acero 304  
(Geometría de Matriz V) en función de  $\Delta\alpha$  .

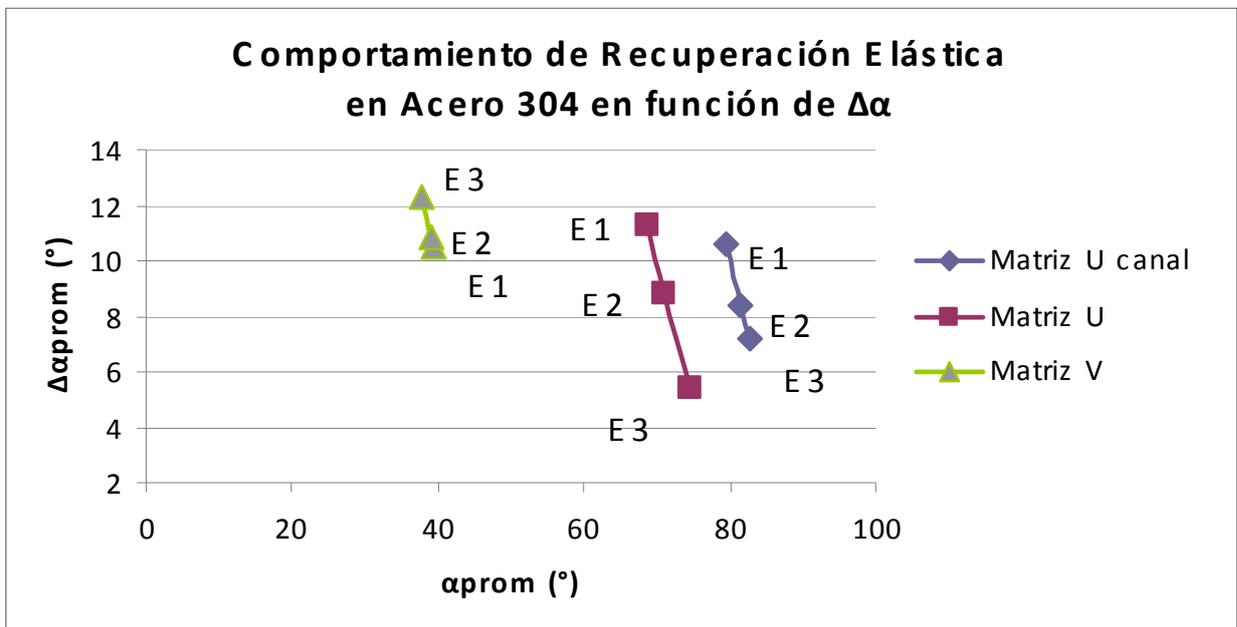


Fig. 4.66 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 1020 en función de  $\Delta\alpha$ .



#### 4.16 Graficas de recuperación elástica de Aluminio 3003 H14 ( $K_r$ vs $\alpha_{prom}$ )

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara la recuperación elástica de acuerdo al espesor de las láminas de Aluminio 3003 H14 para las distintas matrices.

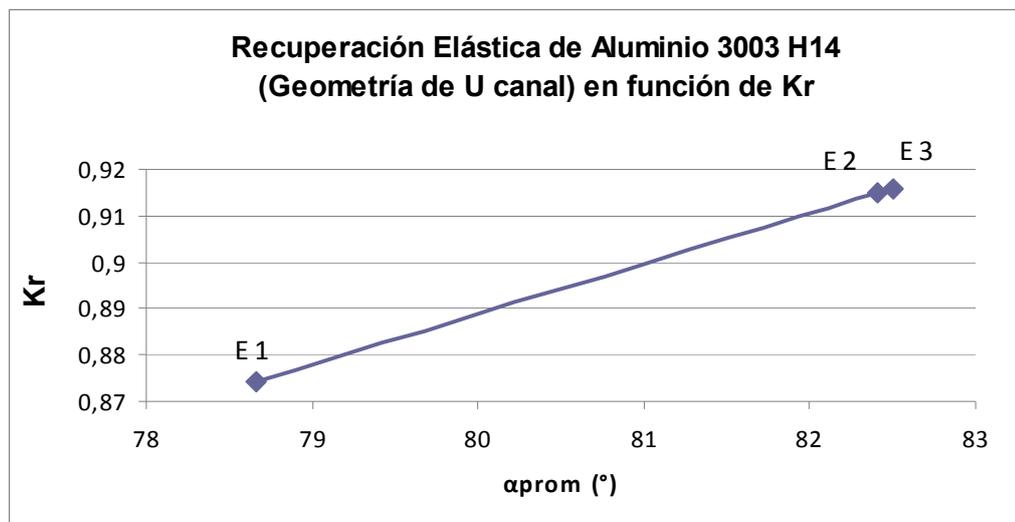


Fig. 4.67 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U canal) en función de  $K_r$ .

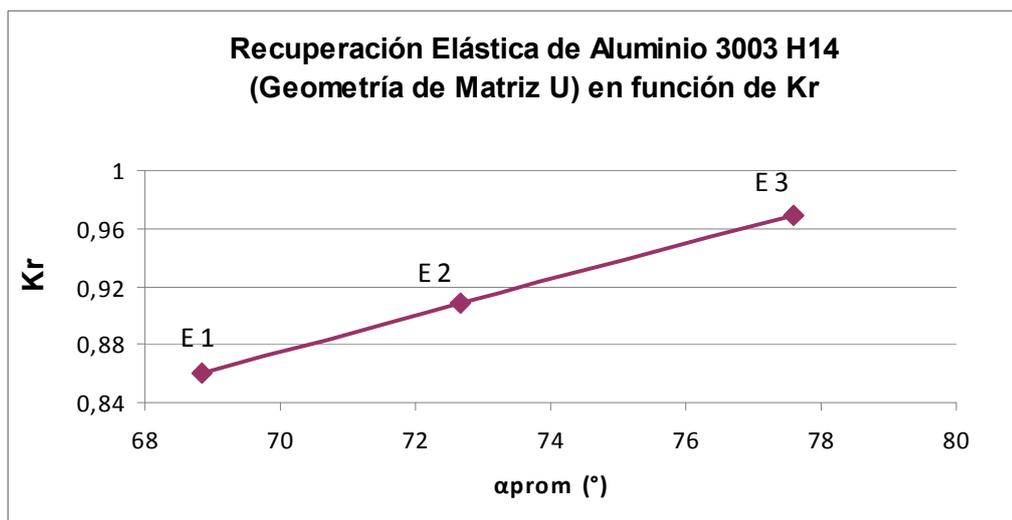


Fig. 4.68 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz U) en función de  $K_r$ .

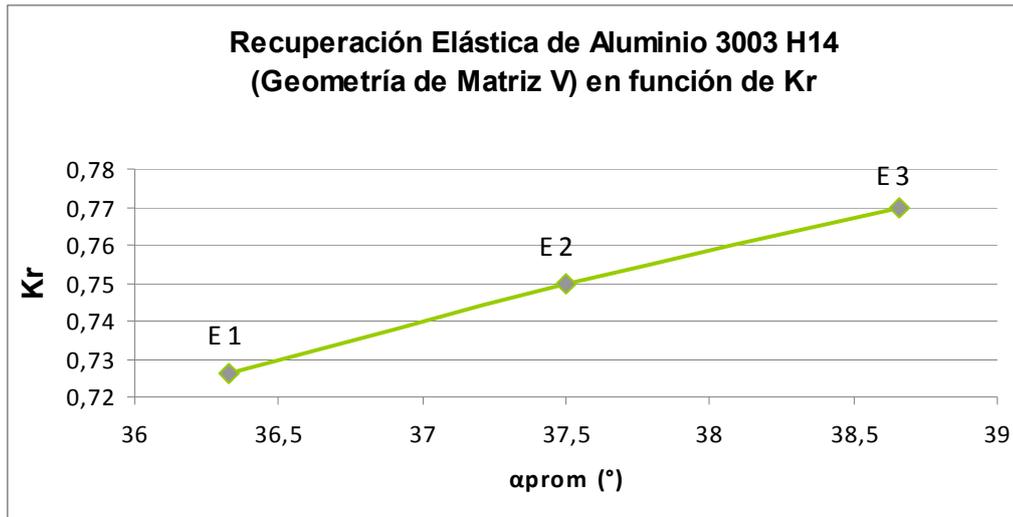


Fig. 4.69 Recuperación Elástica de Aluminio 3003 H14 (Geometría de Matriz V) en función de Kr.

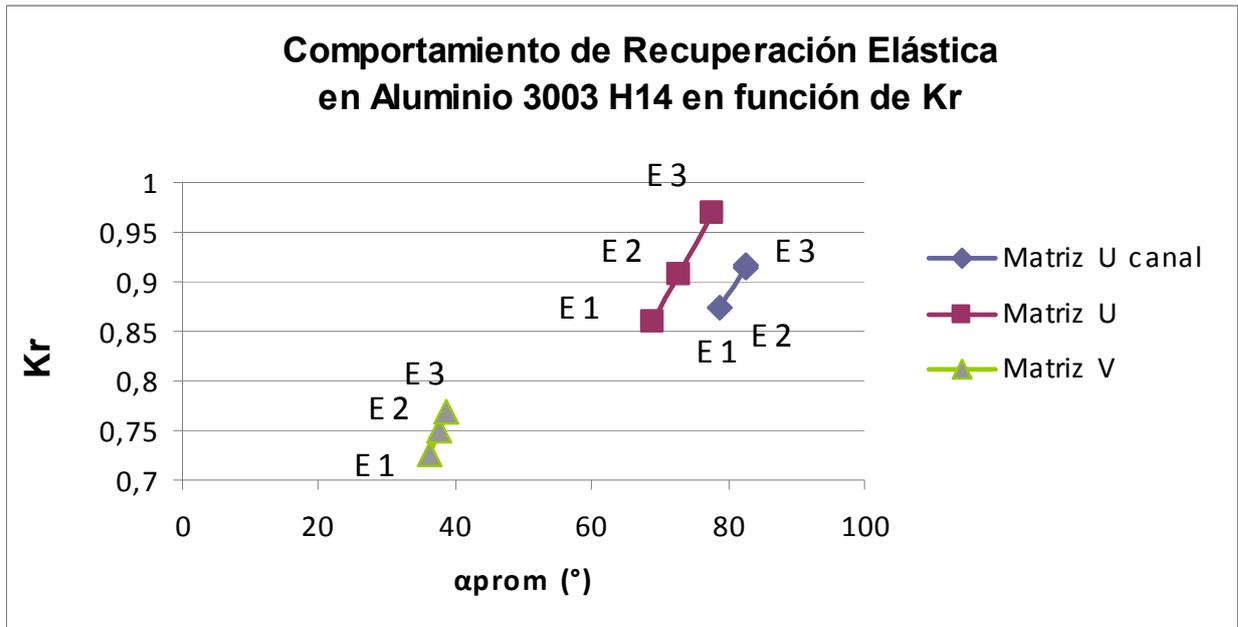


Fig. 4.70 Comportamiento de Recuperación Elástica en Aluminio 3003 H14 en función de Kr.



#### 4.17 Graficas de recuperación elástica de Acero 1020 ( $kr$ vs $\alpha_{prom}$ )

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara la recuperación elástica de acuerdo al espesor de las láminas de Acero1020 para las distintas matrices.

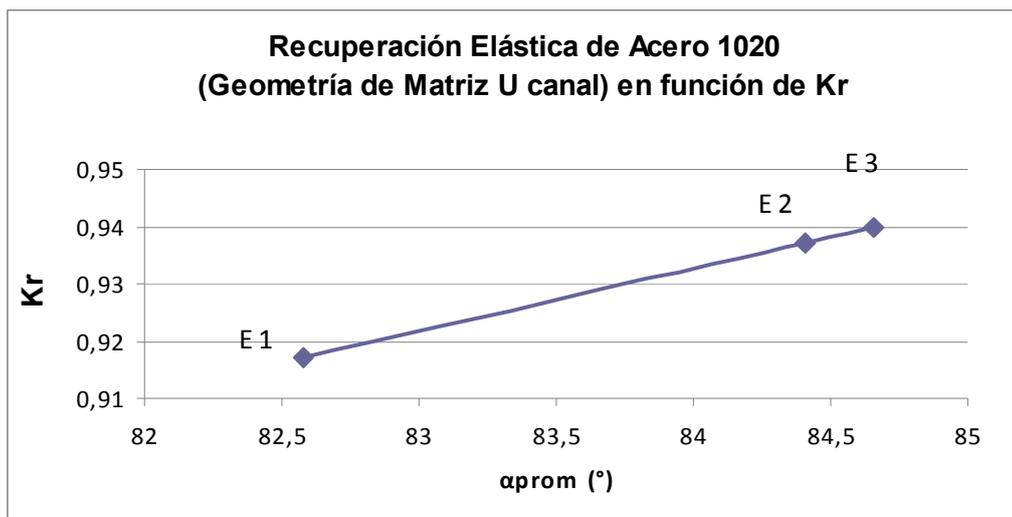


Fig. 4.71 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U canal) en función de  $Kr$ .

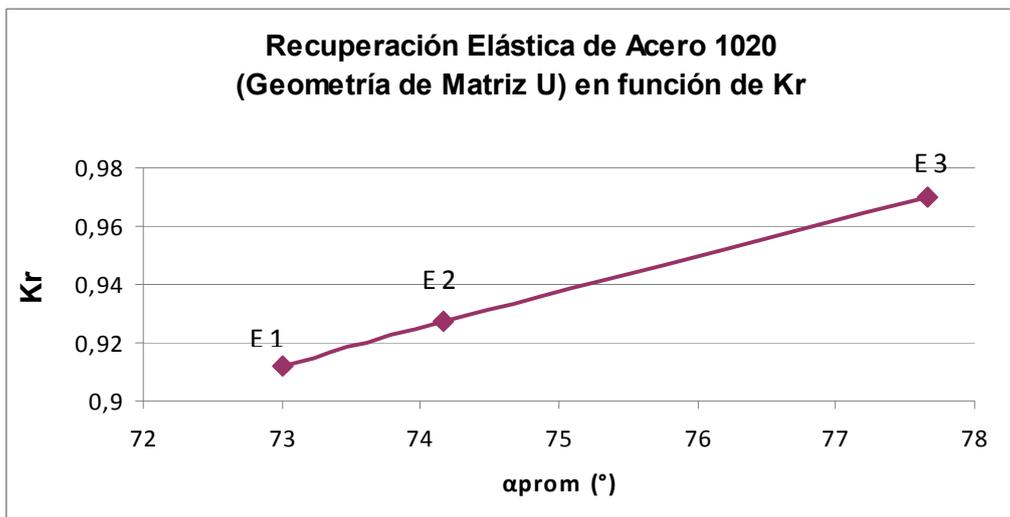


Fig. 4.72 Recuperación Elástica de Acero 1020 (Geometría de Matriz U) en función de  $Kr$ .

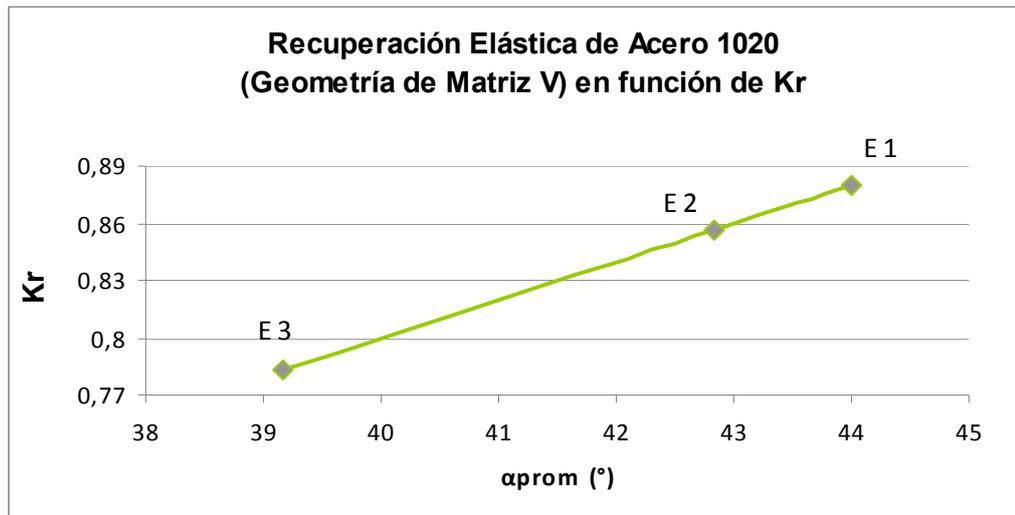
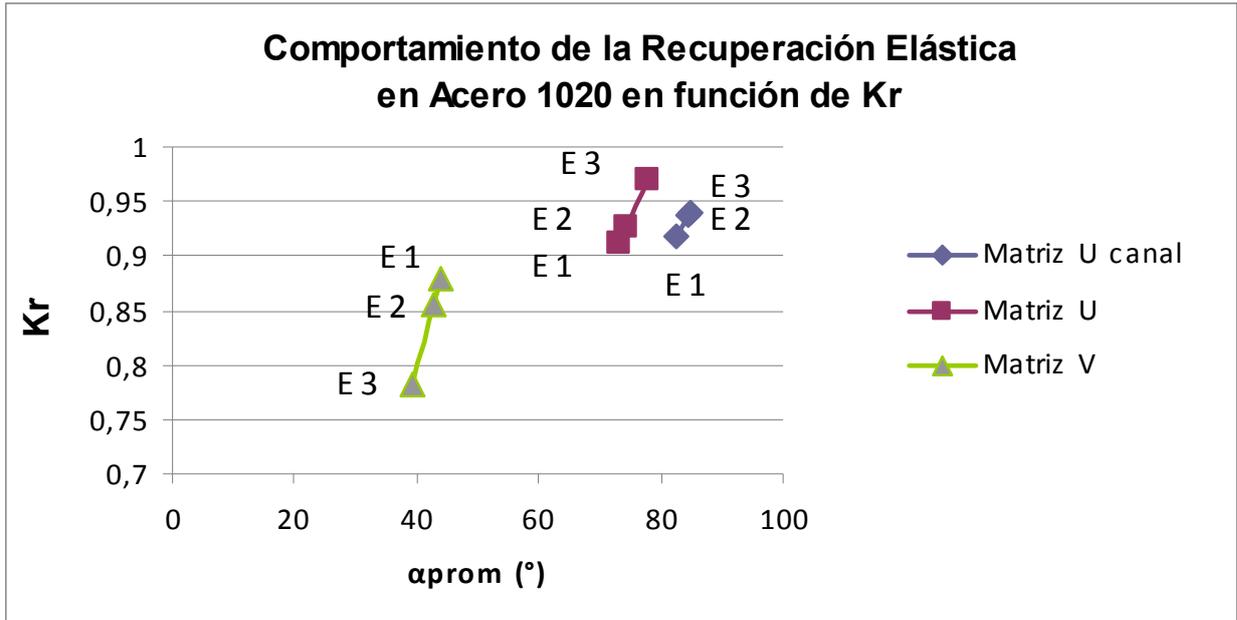


Fig. 4.73 Recuperación Elástica de Acero 1020  
(Geometría de Matriz V) en función de Kr.



Grafica 4.74 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 1020 en función de Kr.



#### 4.18 Graficas de recuperación elástica de Acero 304 ( $kr$ vs $aprom$ )

A continuación se muestran los valores a través de los cuales se compara la recuperación elástica de acuerdo al espesor de las láminas de Acero 304 para las distintas matrices.

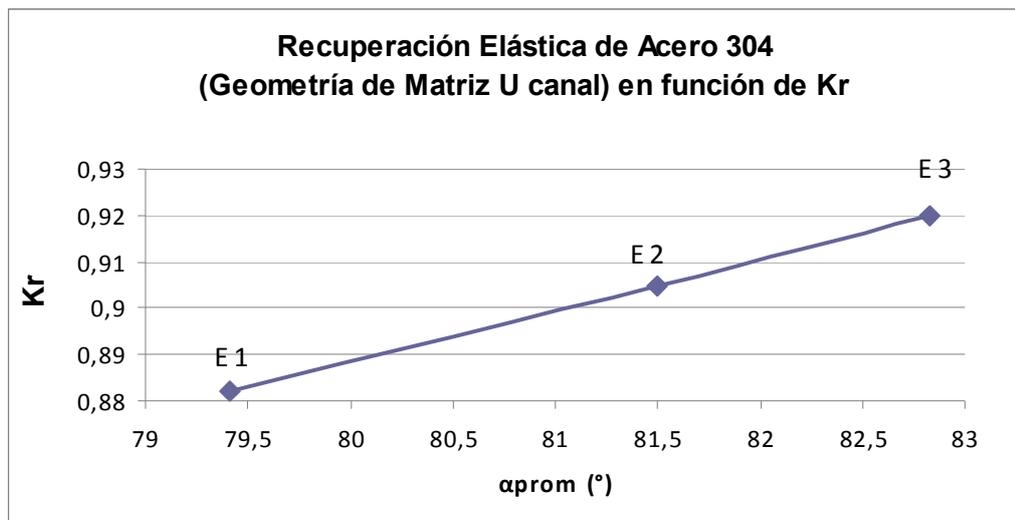


Fig. 4.75 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U canal) en función de  $Kr$ .

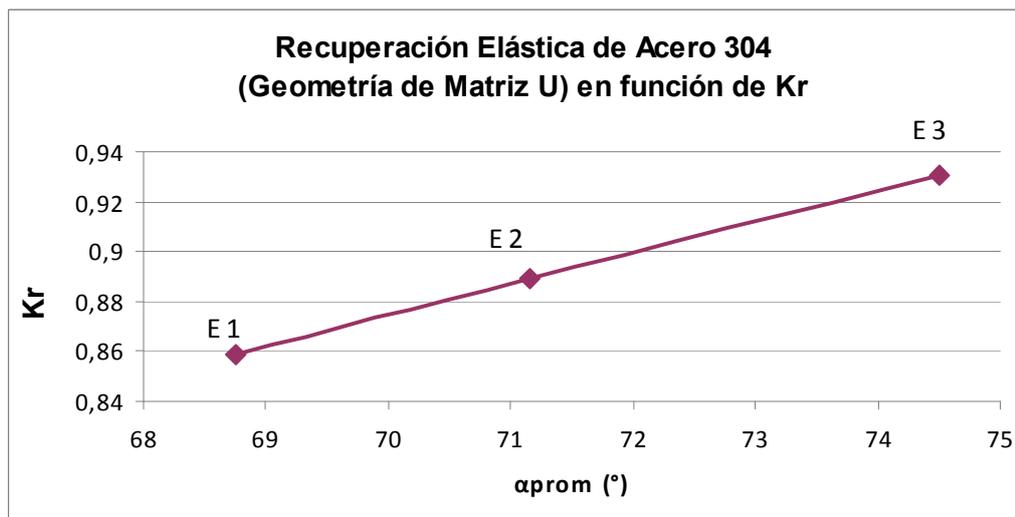


Fig. 4.76 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz U) en función de  $Kr$ .

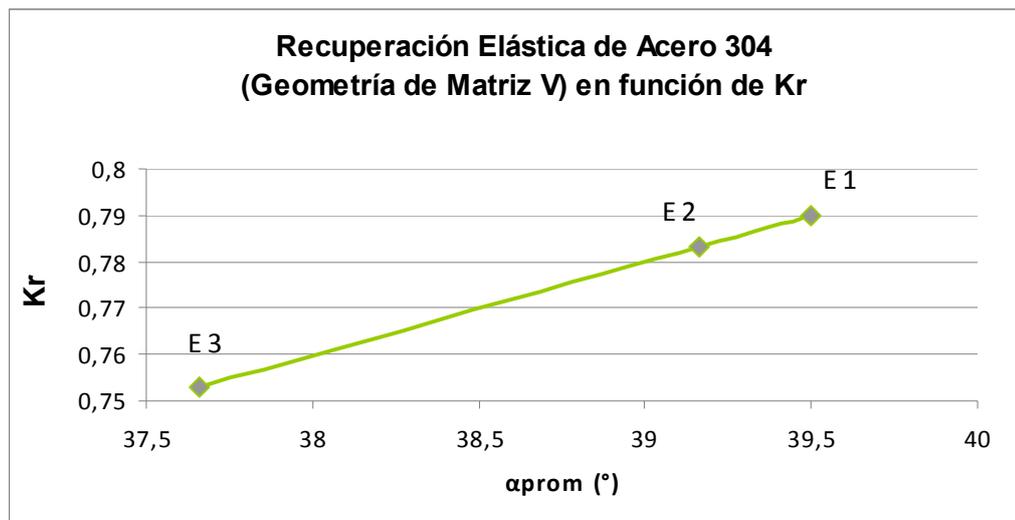
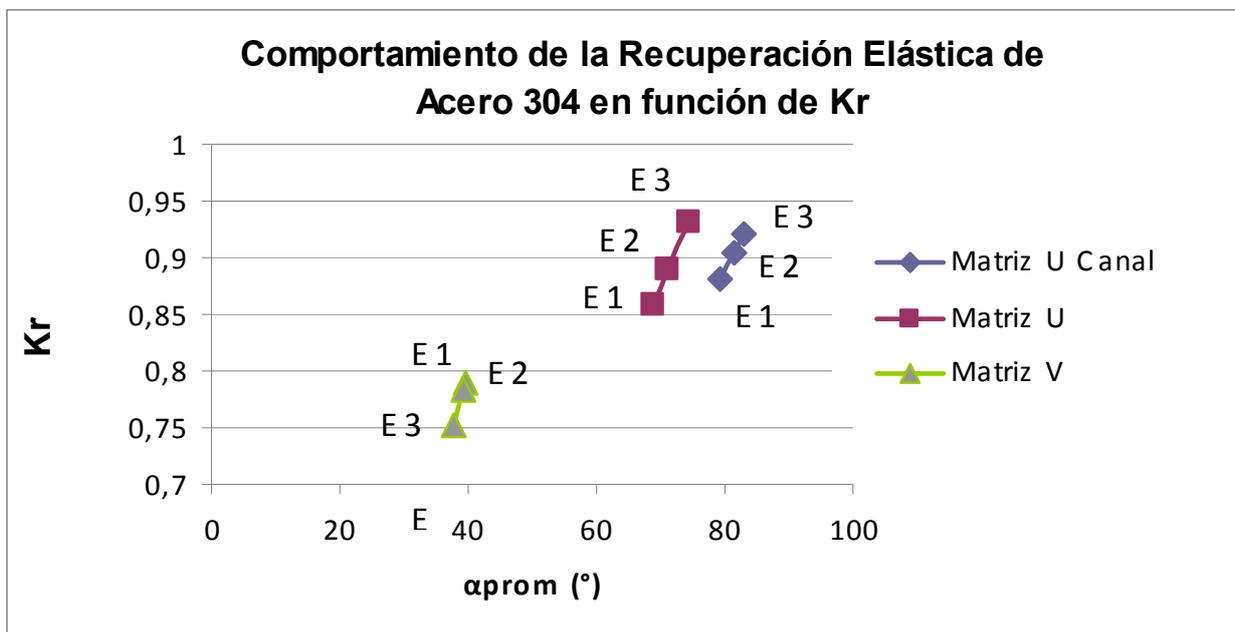


Fig. 4.77 Recuperación Elástica de Acero 304 (Geometría de Matriz V) en función de Kr.



Grafica 4.78 Comportamiento de Recuperación Elástica en Acero 304 en función de Kr

## CONCLUSIONES

- ❖ En las gráficas fuerza-desplazamiento la mayor fuerza ocurrió en los ensayos de la matriz con geometría en “U canal”, en los materiales ensayados, Acero 304, Acero 1020 y Aluminio 3003 H14 con valores en el orden de 18000, 5000 y 1300 N respectivamente, en los espesores de 3mm.
  - ❖ En la determinación del factor de forma para el material de Aluminio 3003 H14 en matrices con geometría de “U canal”, “U” y “V” se arrojaron valores de 0.16, 1.39 y 0.08 respectivamente, en espesores de 1.5 mm. de igual modo los valores para el caso del espesor de 2 mm. fueron 0.23, 1.88 y 0.39, y de 0.43, 1.89 y 0.23 en espesores de 3 mm.
  - ❖ En matrices de “U canal”, “U” y “V”, utilizando laminas de Acero 1020 se determinaron factores de forma de 0.15, 1.28, 0.23 en espesores de 1.5 mm. de Acero 1020, de 0.19, 1.93, 0.25 en espesores de 2mm. y 0.38, 3.15, 0.41 en espesores de 3 mm. respectivamente.
  - ❖ Sometiendo láminas de Acero 304 a procesos de doblado para la evaluación del factor de forma se obtuvo valores de 0.11, 0.92, 0.29 en espesor de 1.5 mm, 0.16, 1.10, 0.36 para espesores de 2 mm, y 0.43, 1.92. 0.60 trabajando con espesores de 3 mm. utilizando matrices con geometría en forma de “U canal”, “U” y “V”.
  - ❖ Al evaluar la recuperación elástica con espesores de 1.5 2 y 3 mm. para el material Aluminio 3003 H14, los valores de ésta decrecen, siendo 11.33, 7.58 y 7.50 (°) para matriz “U canal”, 11.16, 7.33 y 2.58 (°) para la matriz en U y para la matriz en “V” 13.66, 12.50, 11.33 (°).
- 
-

- ❖ Los valores de recuperación elástica en el Acero 1020 son inversamente proporcional al incremento del espesor, en matrices con geometría en “U canal” y “U”, dichos valores son 7.41, 5.58, 5.33 (°) y 7.00, 5.83, 2.33 (°) respectivamente. La matriz en “V” mantiene un comportamiento directamente proporcional al espesor siendo 6.00, 7.16, 11.16 (°) los valores de recuperación elástica.
  - ❖ La recuperación elástica es inversamente al incremento del espesor, utilizando como material Acero 304, en matrices “U canal” y “U”, los valores obtenidos fueron 10.58, 8.41, 7.16 (°) y 11.25, 8.83, 5.41 (°), respectivamente. Sin embargo los valores para el caso de la matriz en “V” en igualdad de condiciones fueron 10.50, 10.83, 12.33 (°) para los espesores trabajados, 1.5, 2 y 3mm.
- 
-



---

## RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar ensayos de doblado en materiales con espesores mayores a los ya utilizados, a fin de verificar el comportamiento ascendente del valor del factor de forma, en las matrices “U”, “U canal” y “V”.
  - ❖ Elaborar los ensayos de doblado modificando la velocidad de trabajo usada con la finalidad de comprobar si esta variable influye directamente en el resultado de los valores de factor de forma y recuperación elástica.
  - ❖ Continuar los estudios del proceso de doblado con distintos materiales y matrices a los ya utilizados, para de este modo observar el comportamiento del factor de forma y recuperación elástica, ampliando con esto la información disponible referente al tema.
-



---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1- AVALLONE, E. (1995). Manual del Ingeniero Mecánico (9ª ed.). México D. F. Marks.
  - 2- KALPAKJIAN, Serope. Manufactura Ingeniería y Tecnología (4ª ed.). Prentice Hall.
  - 3- ROSSI, Mario. (1971). Estampado en Frió de la Chapa. (2da ed). Barcelona, España.
  - 4- CASTILLO, M. (2003). Determinación de la zona afectada mecánicamente según la variación de los parámetros característicos en el proceso de doblado. Tesis de grado. Universidad de Carabobo. Valencia.
  - 5- OVIOL, B. (2003). Influencia del espesor del material y radio del punzón en el ángulo de recuperación elástica de materiales metálicos sometidos al proceso de doblado. Tesis de grado. Universidad de Carabobo. Valencia.
  - 6- Universidad Mayor de San Simón. Facultad de Ciencias y Tecnología. Cochabamba, Bolivia.  
Disponible en: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-332.pdf>
  - 7- Universidad de Chile. (2007). (On - line)  
Disponible en: <http://cabierta.uchile.cl/revista/28/articulos/pdf/edu3.pdf>
- 
-



8 -Universidad Politécnica de Catalunya. Disponible en:

<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3324/9/55872-9.pdf>

9 -Universidad Tecnológica Nacional (Argentina).

Disponible en: <http://www.frg.utn.edu.ar/cienciad.pdf>

10- Universidad Tecnológica de Pereira

Disponible en:

[http://www.utp.edu.co/~publio17/ac\\_inox.htm](http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_inox.htm)

11- Universidad Nacional de Colombia

Disponible en:

<http://www.unalmed.edu.co/~cpgarcia/noferreas.PDF>

12- García- Romeu María (2005) “Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa. Modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final”. Tesis Doctoral. Universidad De Girona. España.

---



---

# A P E N D I C E S

---



A continuación se muestran las formulas y tablas en donde se presentan los resultados obtenidos del factor de forma con los diferentes espesores, materiales y matrices utilizadas y variando algunas variables.

Cálculo de Factor de Forma para la matriz “U Canal”.

$$F_{\max} = \frac{K_{bf} * \sigma_r * w * t^2}{(R + t)}$$

Y despejando el factor de forma para la matriz “U canal”, se obtiene.

$$K_{bf} = \frac{F_{\max} * (R + T)}{\sigma_r * w * t^2}$$

Cálculo de Factor de Forma para las matrices “U” y “V”:

$$F_{\max} = \frac{2 * K_{bf} * \sigma_r * w * t^2}{D}$$

Y despejando el factor de forma para la matriz “U” y “V”, se obtiene.

$$K_{bf} = \frac{F_{\max} * D}{2 * \sigma_r * w * t^2}$$

Donde:

F: Fuerza de doblado. (N)

D: Distancia entre los apoyos. (mm)

$\sigma_r$  : Resistencia Rotura. (MPa.)

W: Ancho de la probeta. (mm)

T: Espesor de la probeta. (mm)

R: Radio del punzón (mm)

$K_{bf}$ : Factor de forma.



Ejemplo de cálculo de Factor de Forma en matriz “U canal” para el espesor 1.5 mm

$$K_{bf} = \frac{475 * (2 + 1.5)}{78.48 * 40 * 1.5^2} = 0.235374901$$

Ejemplo de cálculo de Factor de Forma en matriz “U” para el espesor de 1.5 mm

$$K_{bf} = \frac{201 * 67.2}{2 * 78.48 * 40 * 1.5^2} = 0,956167176$$

**Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 1,5 mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma “U canal”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	475	78,48	2	40	0,235374901
U canal	473	78,48	2	40	0,234383849
U canal	451	78,48	2	40	0,223482274
Promedio.					<b>0,231080341</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma “U”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	201	78,48	67,2	40	0,956167176
U	198	78,48	67,2	40	0,941896024
U	214	78,48	67,2	40	1,018008835
Promedio.					<b>0,972024012</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma “V”.

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	12	78,48	70,9	40	0,060227659
V	13	78,48	70,9	40	0,06524663
V	10	78,48	70,9	40	0,050189716
Promedio.					<b>0,058554668</b>

**Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	1417	67,85333333	2	40	0,466609589
U canal	1492	67,85333333	2	40	0,491306639
U canal	1483	67,85333333	2	40	0,488342993
Promedio.					<b>0,482086407</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	672	67,85333333	67,2	40	2,079779917
U	757	67,85333333	67,2	40	2,342847318
U	701	67,85333333	67,2	40	2,169532325
Promedio.					<b>2,19738652</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 2 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	167	67,85333333	70,9	40	0,545307587
V	125	67,85333333	70,9	40	0,408164362
V	131	67,85333333	70,9	40	0,427756251
Promedio.					<b>0,4604094</b>

**Factor de Forma para Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	5528	60,94666667	2	40	1,259753519
U canal	5581	60,94666667	2	40	1,271831474
U canal	5576	60,94666667	2	40	1,270692044
				Promedio.	1,267425679

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	2769	60,94666667	67,2	40	4,24042879
U	2678	60,94666667	67,2	40	4,101071975
U	2821	60,94666667	67,2	40	4,320061256
				Promedio.	<b>4,220520674</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Aluminio 3003 H14 de 3 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	662	60,94666667	70,9	40	1,069600926
V	647	60,94666667	70,9	40	1,045365256
V	658	60,94666667	70,9	40	1,063138081
				Promedio.	<b>1,059368087</b>

**Factor de Forma para Acero 1020 de 1,5 mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	1367	235,44	2	40	0,225794729
U canal	1352	235,44	2	40	0,223317099
U canal	1346	235,44	2	40	0,222326047
Promedio.					<b>0,223812625</b>

Tabla Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	576	235,44	67,2	40	0,913353721
U	555	235,44	67,2	40	0,880054366
U	589	235,44	67,2	40	0,933967607
Promedio.					<b>0,909125231</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	100	235,44	70,9	40	0,167299052
V	105	235,44	70,9	40	0,175664005
V	98	235,44	70,9	40	0,163953071
Promedio.					<b>0,168972043</b>

**Factor de Forma para Acero 1020 de 2mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 2 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	2454	256,8566667	2	40	0,238849164
U canal	2497	256,8566667	2	40	0,243034377
U canal	2479	256,8566667	2	40	0,241282427
Promedio.					<b>0,241055323</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 2 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	1467	256,8566667	67,2	40	1,199384871
U	1452	256,8566667	67,2	40	1,187121222
U	1441	256,8566667	67,2	40	1,178127879
Promedio.					<b>1,188211324</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 2 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	186	256,8566667	70,9	40	0,160442108
V	188	256,8566667	70,9	40	0,162167292
V	175	256,8566667	70,9	40	0,150953596
Promedio.					<b>0,157854332</b>

**Factor de Forma para Acero 1020 de 3mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 3 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	10968	257,9233333	2	40	0,590614782
U canal	10972	257,9233333	2	40	0,590830178
U canal	10966	257,9233333	2	40	0,590507084
Promedio.					<b>0,590650681</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 3 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	6923	257,9233333	67,2	40	2,50518888
U	6394	257,9233333	67,2	40	2,313762488
U	6701	257,9233333	67,2	40	2,424854931
Promedio.					<b>2,4146021</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 1020 de 3 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	707	257,9233333	70,9	40	0,269924633
V	895	257,9233333	70,9	40	0,341700915
V	887	257,9233333	70,9	40	0,338646605
Promedio.					<b>0,316757384</b>

**Factor de Forma para Acero 304 de 1,5 mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 1.5 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	2194	667,08	2	40	0,127904033
U canal	2235	667,08	2	40	0,130294218
U canal	2115	667,08	2	40	0,123298555
Promedio.					<b>0,127165602</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	862	667,08	67,2	40	0,482420899
U	925	667,08	67,2	40	0,517679039
U	879	667,08	67,2	40	0,491935
Promedio.					<b>0,497344979</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 1.5 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	270	667,08	70,9	40	0,159426156
V	268	667,08	70,9	40	0,158245221
V	262	667,08	70,9	40	0,154702418
Promedio.					<b>0,157457932</b>

**Factor de Forma para Acero 304 de 2mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 2 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	4867	534,7066667	2	40	0,227554672
U canal	4783	534,7066667	2	40	0,223627285
U canal	4824	534,7066667	2	40	0,225544224
Promedio.					<b>0,225575393</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 2 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	1899	534,7066667	67,2	40	0,745810787
U	1924	534,7066667	67,2	40	0,755629255
U	1926	534,7066667	67,2	40	0,756414732
Promedio.					<b>0,752618258</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 2 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	610	534,7066667	70,9	40	0,252761249
V	587	534,7066667	70,9	40	0,243230907
V	603	534,7066667	70,9	40	0,24986071
Promedio.					<b>0,248617622</b>

**Factor de Forma para Acero 304 de 3mm. de espesor.**

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 3 mm de espesor, en matriz en forma "U canal".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Radio del punzón (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U canal	18985	456,37	2	40	0,577778021
U canal	18983	456,37	2	40	0,577717154
U canal	18988	456,37	2	40	0,577869321
Promedio.					<b>0,577788166</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 3 mm. de espesor, en matriz en forma "U".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
U	6038	456,37	67,2	40	1,234845995
U	6281	456,37	67,2	40	1,284542513
U	6332	456,37	67,2	40	1,294972646
Promedio.					<b>1,271453718</b>

Determinación del factor de forma para láminas de Acero 304 de 3 mm. de espesor, en matriz en forma "V".

Forma de la matriz.	Fuerza de Doblado. (N)	Esfuerzo de Rotura. (MPa.)	Distancia entre los apoyos (mm.)	Ancho de la probeta. (mm.)	Factor de Forma.
V	1803	456,37	70,9	40	0,389038317
V	1864	456,37	70,9	40	0,402200456
V	1859	456,37	70,9	40	0,401121592
Promedio.					<b>0,397453455</b>