



Subsecretaría de Educación Superior
Dirección General de Educación Superior Tecnológica
Instituto Tecnológico de Pachuca

LOCALIZACIÓN DE LA FIBRA NEUTRA EN EL PROCESO DE DOBLADO DE UN ACERO

Tesis
que para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Mecánica

Presenta:
Salvador Bravo Vargas

Director de Tesis: Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo
Codirector: M. en C. Luis Manuel Palacios Pineda
Dra. Érika Osiris Ávila Dávila

Pachuca de Soto, Hgo., México, Junio 2014



Carr. México – Pachuca Km 87.5, A. P. 276, C.P. 42080, Col. Venta Prieta.
Pachuca, Hidalgo. Tels. (771) 711 3073, 711 3596, 711 5119, 7115538. Fax: 711 3399.

www.itpachuca.edu.mx



2014, Año de Octavio Paz

Pachuca, Hgo., 12/Mayo/2014

OFICIO No. DEPI-0123-14

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**ING. SALVADOR BRAVO VARGAS
PRESENTE**

La que suscribe Jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, comunica a usted que se autoriza la impresión de su tesis titulada:

"LOCALIZACIÓN DE LA FIBRA NEUTRA EN EL PROCESO DE DOBLADO DE UN ACERO"

Sin más, agradezco su amable atención y le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*EL HOMBRE ALIMENTA EL INGENIO EN CONTACTO CON LA CIENCIA**



**DRA. ERIKA OSIRIS AVILA DÁVILA
JEFA DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C. p. Expediente

EOAD/epr



Agradecimientos

A mi familia, mis Padres y Hermanos, los cuales me han apoyado a lo largo de todos mis estudios.

Un especial agradecimiento a mi director de tesis Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo, gracias por su tiempo que me ha dedicado, por su comprensión y paciencia, pero sobre todo por su aportación a la culminación de este proyecto.

A todo el personal docente del Posgrado en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Pachuca. Gracias por formarnos como profesionistas de alto nivel educativo, lo cual nos servirá para aportar mucho a nuestra sociedad y país.

* * *

Resumen

Uno de los procesos de manufactura de piezas de metal más empleado es el doblado de chapa metálica, el cual consiste en el uso de una matriz donde es deformada una pieza de metal (plantilla) por medio de un macho o punzón accionado por la parte móvil de una prensa-plegadora. El cálculo de dichas plantillas implica el uso de un factor muy importante denominado fibra neutra, que es la zona del espesor del material que no sufre deformación durante el doblado. Si bien es cierto que existen tablas técnicas para poder realizar este cálculo, estas son muy generales y usualmente contienen datos aproximados que provocan que las plantillas generadas no cumplan con las dimensiones de diseño.

Con el apoyo del software ANSYS y con experimentación física en el laboratorio de manufactura del Instituto Tecnológico de Pachuca, se logró obtener un modelo virtual que fue corroborado de manera real, el cual arrojó datos sobre la ubicación de la fibra neutra o llamado comúnmente factor K, el cual puede ser utilizado directamente en las tablas de plegado de los distintos softwares de diseño, o para hacer el cálculo de manera manual de la pieza desplegada.

* * *

Abstract

One of the manufacturing processes widely used is sheet metal bending, which consist in the use of one matrix where a sheet metal piece called blank is deformed by a punch by means of a mobile press. The obtaining of such blanks implicate the use of an important factor called neutral fiber, which is a region on the material thickness that not is deformed during bending. Actually exist technical tables to do the calculation but these are very general and usually they have information little accurately, this do like result that the pieces not accomplished with the engineering design.

By means of software ANSYS and with the physical experimentation at the manufacturing workshop of Instituto Tecnológico de Pachuca, it obtain a virtual model it which was confirm with real experimentation. It achieves the location of neutral fiber or normally called K factor, it can be used directly in tables of bending in the different types of design softwares, or to do the manual calculation with the blank piece.

* * *

Contenido

Resumen	I
Abstract	II
Índice de figuras	III
Índice de tablas	VI
Nomenclatura	VII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
Capítulo 2. Marco teórico	5
2.1 El doblado	5
2.1.1 Mecánica del doblado	6
2.1.2 Radio mínimo de doblado	8
2.1.3 Fuerza necesaria del doblado	11
2.1.4 Endurecimiento por trabajo	12
2.2 Retroceso elástico (springback)	15
2.2.1 Calculo del retroceso elástico	18
2.2.2 Factor de retroceso elástico	20
2.3 Momentos en el doblado	23
2.4 Herramientas para el análisis el conformado	26
2.4.1 Importancia de las tolerancias geométricas y el dimensionamiento	26
2.4.2 Uso de tolerancia asistida por computadora	27
2.4.3 Análisis de tolerancias	29
2.4.4 Tolerancias aplicadas al proceso de doblado	29

2.5	Simulaciones y sistemas CAE para procesos de conformado	30
2.6	Método de los elementos finitos	33
2.6.1	Concepto del análisis por elementos finitos	34
2.7	Aplicación de ANSYS al doblado	38
2.8	La ingeniería concurrente y los procesos de doblado	40
Capítulo 3. Desarrollo experimental		44
<hr/>		
3.1	Herramental (matrices y punzones) utilizado para el doblado en V	44
3.1.1	Geometrías del herramental	46
3.2	Equipo y material a doblar	46
3.3	Parámetros para ANSYS	50
3.3.1	Comportamiento modelado del material	51
3.3.2	Zona elástica lineal	52
3.3.3	Zona elástico plástica	52
3.3.4	Zona con endurecimiento por deformación	52
3.4	Prueba de tensión para obtener n	53
Capítulo 4. Resultados		54
<hr/>		
4.1	Aplicación de ANSYS	54
4.1.1	Análisis de resultados de ANSYS	61
4.2	Plegados en dobladora MEISTER	62
4.2.1	Análisis de resultados experimentales	65
4.3	Discusión de resultados de K por ANSYS y por experimentación	65
Capítulo 5. Aplicaciones		67
<hr/>		
5.1	Caso práctico I: Gabinete eléctrico	67
5.1.1	Dimensiones importantes	68
5.1.2	Calculo del desarrollo empleando el factor K	69

5.2	Caso práctico II: Soporte eléctrico	74
5.2.1	Dimensiones importantes	75
5.2.2	Calculo del desarrollo empleando el factor K	76
Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros		80
<hr/>		
6.1	Conclusiones	80
6.2	Trabajos futuros	81
Bibliografía		82
Anexos		86
A.	Características de aceros estructurales	86
B.	IV Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería de los Materiales	88
C.	XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM	91

Índice de figuras

Figura	Descripción	Página
2.1	Ejemplos de piezas metálicas dobladas	5
2.2	Terminología del doblado	6
2.3	Material fracturado	8
2.4	Reducción de área de material	10
2.5	Parámetros del cálculo de la fuerza de doblado	11
2.6	Curva esfuerzo deformación verdadero-deformación verdadera vs curva esfuerzo aparente-deformación aparente	13
2.7	Curva de esfuerzo verdadero - deformación verdadera para un acero dulce	13
2.8	Retroceso elástico	15
2.9	Forma del retroceso elástico	17
2.10	Cambios en el radio y ángulo de doblez debidos al retroceso elástico	18
2.11	Curva esfuerzo-deformación	19
2.12	Distribución de tensiones internas	19
2.13a	Momentos aplicados a una placa	23
2.13b	Vista ampliada corte dx	23
2.14	Establecimiento de tolerancias asistidas por computadora	28
2.15	Tolerancias de orientación (de acuerdo a ISO 1101:2002)	30
2.16	Discretización de formas geométricas	33
2.17	Zonas de discretización	38
2.18	Deformaciones altamente no lineales	39
2.19	Diversos tipos de pruebas con ANSYS Explicit Dynamics	40
2.20	Modelo de estructura del sistema de la tecnología del doblado	42

3.1	Doblado en V	44
3.2	Relación de radios entre matriz y punzón	45
3.3	Geometrías de punzones y matrices	45
3.4	Geometrías para el análisis (en mm)	46
3.5	Dobladora excéntrica de cortina	48
3.6	Geometría del punzón	49
3.7	Geometría de la matriz	49
3.8	Geometrías para el análisis por ANSYS Explicit Dynamics	50
3.9	Diagramas de esfuerzo deformación	51
3.10	Comportamiento del material para el doblado en V	52
3.11	Máquina para ensayos de tensión	53
4.1	Esfuerzo máximo en el doblado del acero ASTM A1011-50	55
4.2	Mallados para el doblado	56
4.3	Variables para obtener el factor K	58
4.4	Ubicación del Factor K ANSYS –acero estructural-	60
4.5	Ubicación del Factor K ANSYS –acero ASTM 572 GR50-	60
4.6	Ubicación del Factor K ANSYS –acero ASTM 572 GR60-	61
4.7	Ubicación del Factor K Dobladora –acero estructural-	63
4.8	Ubicación del Factor K Dobladora –acero ASTM 572 GR50-	64
4.9	Ubicación del Factor K Dobladora –acero ASTM 572 GR60-	64
4.10	Gráficas del factor K –acero estructural-	65
4.11	Gráficas del factor K – acero ASTM 572 GR50-	66
4.12	Gráficas del factor K – acero ASTM 572 GR60-	66
5.1a	Gabinete eléctrico	67
5.1b	Gabinete eléctrico	67
5.2	Dimensiones críticas del gabinete eléctrico	68

5.3	Plantilla de corte del gabinete eléctrico	68
5.4	Calculo de las partes rectas del desarrollo del ancho del gabinete	69
5.5	Indicación de holguras de dobléz	70
5.6	Calculo de las partes rectas del desarrollo longitudinal	71
5.7	Indicación de holguras de dobléz	72
5.8	Plantilla con factor $K=0.33$	73
5.9	Plantilla con factor $K=0.50$	73
5.10a	Soporte eléctrico	74
5.10b	Soporte eléctrico	74
5.11	Dimensiones críticas del soporte eléctrico	75
5.12	Plantilla de corte del soporte eléctrico	75
5.13	Calculo de las partes rectas del desarrollo longitudinal	76
5.14	Indicación de holguras de dobléz	76
5.15	Calculo de las partes rectas del ancho del gabinete	77
5.16	Indicación de holguras de dobléz	78
5.17	Plantilla con factor $K=0.33$	79
5.18	Plantilla con factor $K=0.50$	79

Índice de tablas

Tabla	Descripción	Página
2.1	Factor K en acero al bajo carbono	7
2.2	Radio mínimo de doblado para algunos materiales a temperatura ambiente	9
2.3	Valores típicos de k y n a temperatura ambiente	14
2.4	Comparación entre procesos de doblado y mecanizado	27
2.5	Resumen comparativo del estado de simulación-optimización con un enfoque de material multinivel	32
3.1	Composición química y propiedades mecánicas de los aceros	47
4.1	Fuerzas aplicadas al acero estructural	54
4.2	Fuerzas aplicadas al acero de alta resistencia	55
4.3	Esfuerzos máximos obtenidos con ANSYS Explicit Dynamics	57
4.4	Ubicación del factor K, basado en ANSYS	59
4.5	Ubicación del factor K, basado en experimentación física	62

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
CAE	Ingeniería Asistida por computadora (Computer Aided Engineering)
CNC	Control numérico por computadora
CMM	Máquina de medición por coordenadas
da	Distancia entre apoyos de la matriz
D	Deflexión
D_x	Deflexión en el eje X
E	Modulo de elasticidad del material
ϵ	Deformación unitaria
δ_x	Elongación en X
δ_y	Elongación en Y
F	Fuerza
k	Coefficiente de resistencia
K	Factor de la posición de la fibra neutra
L	Longitud del material (paralela al eje de doblez)
L_b	Holgura de doblado
M	Momento de doblez
MEF	Método del elemento finito
Tol	Tolerancia
T	Espesor de la placa
R	Radio de doblez

R_i	Radio inicial
R_f	Radio final
σ_y	Esfuerzo de fluencia del material
α	Ángulo de doblez en radianes
ρ	Radio de curvatura
σ_x	Esfuerzo normal en X
σ_y	Esfuerzo normal en Y
ν	Coefficiente de Poisson
γ_s	Factor de retroceso elástico
ϵ_p	Deformación permanente
ϵ_{pl}	Deformación plástica
ϵ_e	Deformación elástica
θ	Ángulo de doblez en grados
θ_i	Ángulo inicial
θ_f	Ángulo final
W	Desplazamiento vertical (deflexión)

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la industria metal-mecánica de todo el mundo una de las áreas de procesos de manufactura más importante es el conformado de piezas metálicas, que se utiliza para los sectores automotriz, aeronáutico, ferroviario y de los electrodomésticos.

El conformado de piezas metálicas es uno de los procesos más utilizados para la obtención de piezas de ensamble y productos finales en acero; además de ser uno de los que más antiguos y tratados en la manufactura. Los procesos de conformado son operaciones realizadas en placas y láminas, a temperatura ambiente o en caliente, mediante sistemas de punzones y dados, para doblarlas o embutirlas.

Los procesos de la industria metal-mecánica surgieron alrededor del año 8000 A.C., hay registros de que los primeros procesos y piezas obtenidas eran bastante burdos, debido a que aún se desconocían los procesos de refinamiento de los metales [1]. Con el paso del tiempo el hombre comenzó a desarrollar procesos de refinamiento y aleado de metales, así como también el uso de tratamientos térmicos. Durante los últimos 100 años se han implementado nuevos materiales, maquinas de alta capacidad y precisión, muchas de ellas con controles CNC en donde se puede obtener piezas de forma rápida y con geometrías complejas; todo esto ha permitido que la industria metal-mecánica se siga erigiendo como una de las más importantes que otorgan al ser humano productos indispensables para su uso cotidiano y para su desarrollo tecnológico.

La manufactura a pequeña escala de componentes conformados en acero, así como el incremento cada vez mayor de producir diversas piezas con los mismos

herramientales, utilizando tolerancia cada vez más estrechas provoca que la estandarización de materiales, herramientas y equipos para el conformado sea una labor muy ardua, pero sobre todo el mayor problema es el saber en que momento se puede utilizar determinado herramental para conformar una pieza, o en todo caso de que manera se puede utilizar más eficiente el material con las herramientas que se encuentran en el sitio de trabajo [2].

El área de la metal-mecánica ha sido por tradición un lugar donde se parte del conocimiento y aplicaciones empíricas del personal que allí labora, aunque esto ha estado cambiando con el paso del tiempo, pues durante los últimos 20 años la formulación de sofisticados análisis matemáticos del proceso de conformado han dado paso a productos de alta calidad lo cual ha incrementado la eficiencia en esta industria.

Este trabajo se enfocará particularmente a estudiar el proceso de doblado, el cual es un proceso sencillo donde mediante el uso de un dado o punzón, se pliega una pieza metálica llamada normalmente *pieza desplegada* dentro de una matriz, aprovechando la propiedad plástica del material.

La falta de cuidado en los parámetros de doblado ocasiona defectos o fallas en las piezas elaboradas, tales como: deformaciones no deseadas, falta de precisión de los ángulos de doblado y de geometría; adelgazamientos de las paredes, aplanamiento de las superficies curvas y la aparición de grietas y arrugas, entre otros.

Estos efectos o anomalías se pueden evitar si se estiman los parámetros o condiciones básicas del proceso de doblado, entre otras, la selección adecuada del conjunto matriz-punzón, el radio, la recuperación, la fuerza y capacidad de doblado, longitud de la chapa, y demás aspectos geométricos, de vital importancia para lograr un nivel de calidad elevado [3].

El cálculo de la pieza desplegada es básico en el proceso de doblado, las técnicas para obtener dicha pieza sin embargo se han basado en aproximaciones a base de tablas obtenidas en la práctica, las cuales no son elaboradas por métodos de Ingeniería, sino por prácticas de taller; el uso de un determinado punzón viene dado por la decisión empírica del supervisor del área y no por un método de cálculo, lo que desemboca que las piezas en varias ocasiones no conserven las dimensiones de diseño.

La ventaja actual de contar con potentes computadoras con software CAD/CAM/CAE tales como ANSYS, CATIA, SolidWorks, NX nos permite realizar simulaciones sobre el comportamiento del material a doblar, modificando variables importantes como el herramental utilizado, las propiedades mecánicas del material y espesores. Con esto se logran eliminar costos de prototipos y reducción de tiempos de producción, además de que lo más importante será que la pieza no tendrá problemas durante su manufactura y posterior operación para la cual fue diseñada.

Hoy en día existe amplia bibliografía que indica lo que es el doblado del acero, pero muy poca de esta información indica de manera adecuada como calcular los desplegados, existe muy poca teoría matemática sobre este tema, si bien es cierto que este podría tratarse como un tema empírico de Ingeniería, lo que se pretende es el desarrollo de un modelo que elimine el uso de tablas; con esto se obtendrán piezas desplegadas sin fallas dimensionales ni mecánicas durante su doblado.

1.2 Justificación

El desarrollo de piezas desplegadas para su posterior doblado en prensas representa un asunto muy importante a tratar dentro de la industria metalmeccánica, dado que de esto depende el que se eviten perdidas tan importantes como el rechazo de piezas fuera de dimensiones, tiempos de uso de maquinaria y equipo,

condiciones de falla mecánica en las piezas, todo esto derivando en pérdidas económicas.

1.3 Objetivos

Obtener un modelo virtual para determinar la ubicación de la fibra neutra, dentro de un proceso de doblado de piezas de acero ASTM A1011 SS40, ASTM A36, ASTM A572-50 y ASTM A572-65 en espesores de 3 a 19 mm, con el soporte de un modelo virtual en ANSYS y compararlo por medio de experimentación física y de esta manera calcular las dimensiones del elemento antes de ser doblado, con el fin que este cumpla con las tolerancias de diseño.

Capítulo 2 MARCO TEORICO

2.1 El doblado

El doblado es una de las operaciones más comunes de conformado. El doblado no sólo se usa para formar piezas en “L”, en “U” o en “V”, sino también para impartir rigidez a la pieza, aumentando su momento de inercia. El proceso de doblado tiene una gran cantidad de aplicaciones dentro de la industria metalmecánica. En la fig. 2.1 se muestran algunos ejemplos de piezas dobladas. El proceso de doblado se ha ido adaptando al paso del tiempo y a las nuevas tecnologías. Empezando por doblados manuales hasta llegar a las más modernas técnicas de doblado bajo máquinas de control numérico en las que automáticamente se calcula la fuerza necesaria a aplicar teniendo en cuenta varios parámetros. Por tanto ha evolucionado desde los antiguos sistemas rígidos y convencionales a unos de gran tecnología y flexibilidad.

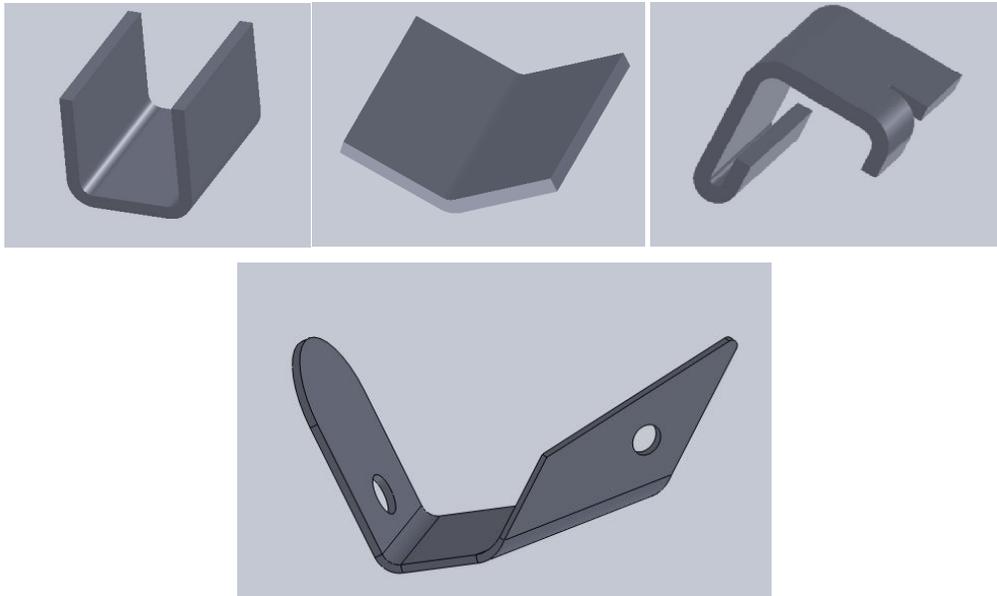


Fig. 2.1 Ejemplos de piezas metálicas dobladas

2.1.1 Mecánica del doblado

El doblado consiste en deformar de manera uniforme una placa alrededor de un eje recto, manteniendo el paralelismo de sus caras y el espesor.

En la fig. 2.2 se muestra la terminología del doblado. Nótese que, en el doblado, las fibras externas del material están en tensión, mientras que las interiores están en compresión. A causa de la relación de Poisson, el ancho de la pieza (Longitud de doblado, L) en la región externa es menor, y en la interna es mayor, que en el ancho original.

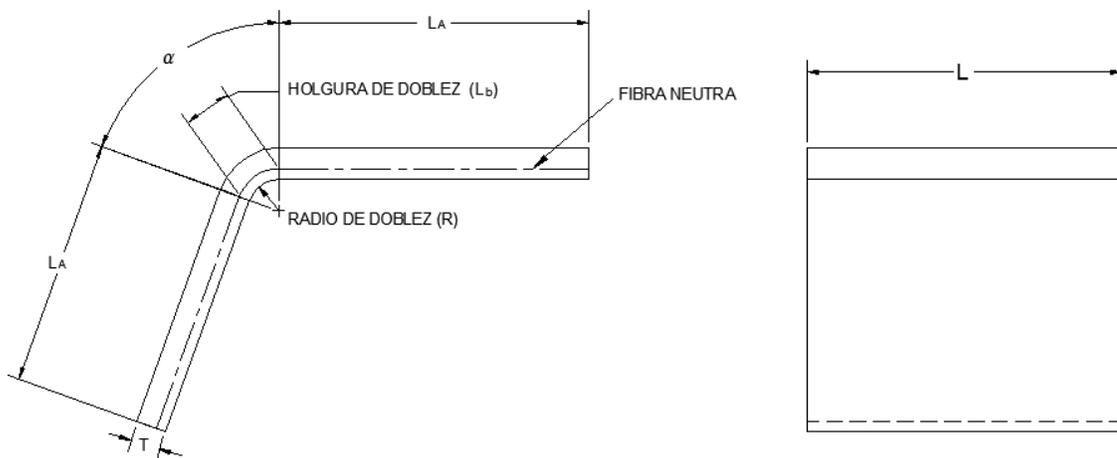


Fig. 2.2 Terminología del doblado

Como se ve en la figura 2.2, la holgura o tolerancia en el doblado es la longitud del eje neutro en el doblado, y se usa para determinar la longitud de la pieza bruta con que se fabrica una pieza doblada. Sin embargo, la posición del eje neutro depende

del radio y del ángulo del doblado, tal como se explica en los textos de mecánica de materiales [4] [5]. Una fórmula de la holgura de doblado L_b , es la siguiente [6]:

$$L_b = \alpha (R + KT) \quad (1)$$

donde α es el ángulo de doblado en radianes, T es el espesor de la chapa, R es el radio del doblado y K es un factor que depende del espesor y tipo de material. Nótese que, para el caso ideal, el eje neutro está en el centro del espesor de la lámina, $K=0.5$, y entonces:

$$L_b = \alpha \left(R + \frac{T}{2} \right) \quad (2)$$

En la práctica los valores de K suelen ser de 0.33 (para $R < 2T$) a 0.5 (para $R > 2T$).

La siguiente tabla 2.1 es una muestra de los valores utilizados de K en la práctica de la mayoría de empresas que utilizan el proceso de doblado:

Tabla 2.1 Factor K en acero al bajo carbono [7]

	Radio interno de doblado			
	1/8	1/4	3/8	1/2
Espesor	K para doblado a cualquier ángulo			
1/8	0.31	0.5	0.49	0.49
3/16	0.34	0.34	0.43	0.5
1/4	0.33	0.33	0.38	0.42
3/8	0.33	0.33	0.33	0.33
1/2	0.33	0.33	0.33	0.33

La fórmula (3) se utiliza para determinar la ubicación de la fibra neutra o factor K, para cualquier material y espesor.

$$K = \frac{L-2[L_A-2T]}{1.571*T} - 1 \quad (3)$$

Donde:

K = factor K (ubicación de la fibra neutra)

L = longitud del material (paralela al eje de doblado)

L_A = longitud del patín

T = espesor de la placa

2.1.2 Radio mínimo de doblado

La deformación unitaria de una lámina durante el doblado es [6]

$$e = \frac{1}{\left(\frac{2R}{T}\right)+1} \quad (4)$$

A medida que disminuye R/T, la relación del radio de doblado al espesor llega a ser más pequeña la deformación por tensión en la fibra externa aumenta y al final el material se rompe tal como se observa en la figura 2.3.

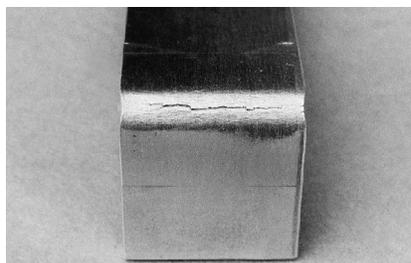


Fig. 2.3 Material fracturado

La relación a la que aparece una grieta en la superficie externa de la grieta se llama radio mínimo de doblez del material. Se suele expresar también en función del espesor, como 2T, 3T, 4T, etc. Así, un radio mínimo de doblez 3T indica que el radio mínimo con el que se puede doblar la lámina sin que se agriete es tres veces su espesor. Normalmente se encuentra que las industrias utilizan una relación 1T debido a los costos que implica el uso de punzones con radios más grandes. En la tabla 2.2 se ven radios mínimos de doblez para diversos materiales.

Tabla 2.2 Radio mínimo de doblado para algunos materiales a temperatura ambiente [6]

Material	suave	Duro
Aleaciones de aluminio	0	6T
Cobre al berilio	0	4T
Latón, bajo plomo	0	2T
Magnesio	5T	13T
Aceros		
Inoxidable austenítico	0.5T	6T
Bajo carbono, baja aleación y alta resistencia-baja aleación (HSLA)	0.5T	4T
Titanio	0.7T	3T
Aleaciones de titanio	2.6T	4T

Hay una relación inversa entre la facilidad de doblado y la reducción del área del material por tensión fig. 2.4. El radio mínimo de doblez es, aproximadamente,

$$R = T \frac{50}{r-1} \quad (5)$$

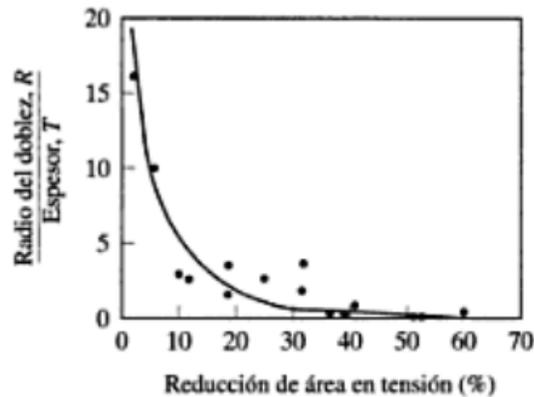


Fig. 2.4 Reducción de área del material [2]

donde r es la reducción del área del área de lámina metálica por tensión. Nótese que para $r=50$, el radio mínimo de doblado es cero; esto es, la lámina se puede doblar sobre sí misma casi como una hoja de papel. Para aumentar la facilidad de doblado de los metales y su ductilidad, se puede lograr por el tratamiento térmico de recocido o doblándolos en un ambiente de alta tensión.

La facilidad de doblado depende de la *condición del borde* de la lámina. Como 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 de su forma puntiaguda, las inclusiones de forma alargada son más perjudiciales que las de forma globular. La remoción de las regiones con trabajo en frío, por ejemplo, maquinando la pieza, o recociéndola para mejorar su ductilidad, mejora mucho la resistencia a la fractura de los bordes.

La anisotropía de una lámina es un factor importante en la facilidad de formado. La laminación en frío produce anisotropía por orientación preferencial y por fibrilación mecánica debido al lineamiento de todas las impurezas, inclusiones y huecos que

pueda haber. Antes de doblar una lámina se debe tener cuidado para cortarla en la dirección adecuada, regularmente en la dirección del laminado, aunque esta elección no siempre es posible.

Al día de hoy es posible utilizar softwares permiten ubicar y restringir las piezas en la posición correcta respecto a las fibras longitudinales de las placas de acero con el fin de aprovechar mejor las propiedades de laminación, de esta manera se asegura desde el corte de la plantilla, la pieza estará en la dirección correcta de la laminación de la placa y no tendrá problema alguno para alcanzar la dimensión especificada en diseño.

2.1.3 Fuerza necesaria del doblado

Para doblar una lámina apoyada en los extremos, la fuerza necesaria se determina teniendo en cuenta el espesor, longitud, ancho y resistencia de la chapa (Fig. 1.5).

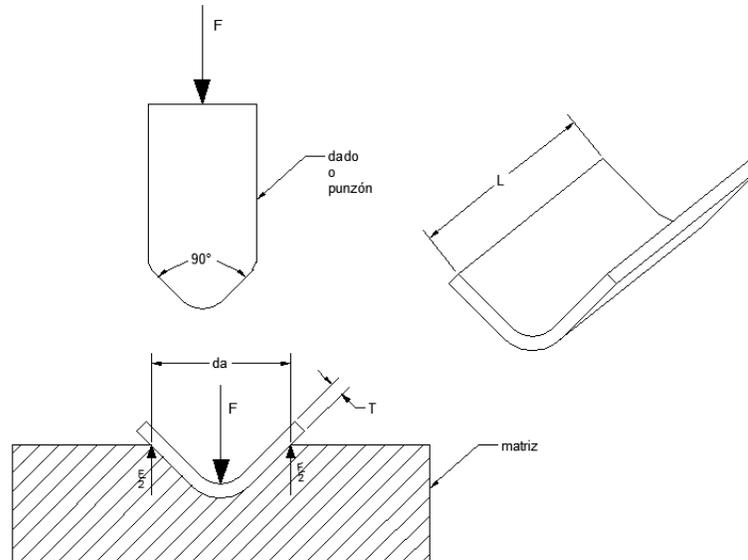


Fig.2.5 Parámetros del cálculo de la fuerza de doblado

El radio R del punzón puede ser igual o mayor al espesor de la chapa. Para calcular la fuerza necesaria durante el doblado se utiliza la siguiente expresión [8]:

$$F = \frac{LT^2\sigma_y}{da} \quad (6)$$

Donde:

F = fuerza (Newtons)

L = longitud del material (paralela al eje de dobléz)

T = espesor de la chapa

σ_y = esfuerzo de fluencia o cedencia del material

da = distancia entre apoyos

2.1.4 Endurecimiento por trabajo

En relación a una gráfica esfuerzo-deformación obtenida de un ensayo de tensión a un material metálico, un trazo de esfuerzo-deformación verdadero y deformación verdadera en la zona plástica con coordenadas lineales, se desvía del trazo de esfuerzo deformación de ingeniería, como se observa en las figuras (2.6) y (2.7). En la figura (2.7) se muestra la gráfica de esfuerzo-deformación verdadera sobre un trazo log-log correspondientes a un acero dulce [9]. En la región plástica se obtiene una línea recta que indica que

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (7)$$

donde n y k son valores constantes. El valor de k puede determinarse sustituyendo el valor correspondiente a $\log \sigma$ a una deformación $\varepsilon = 1$ por lo que $\log \varepsilon = 0$. Eso es, k es un esfuerzo verdadero o una deformación verdadera = 1. Conocido el valor de k y sustituyendo sus valores correspondientes de $\log \sigma$ y $\log \varepsilon$ en la ec. (7), se obtiene un valor para n.

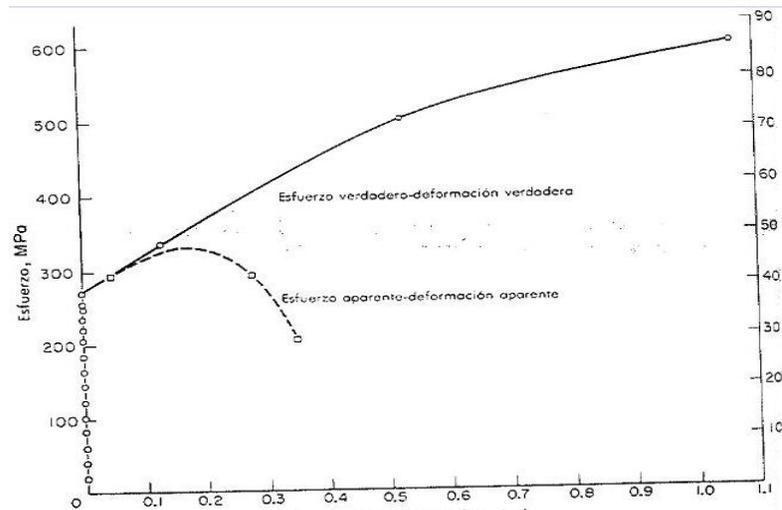


Fig.2.6 Curva esfuerzo deformación verdadero-deformación verdadera vs curva esfuerzo aparente-deformación aparente [6]

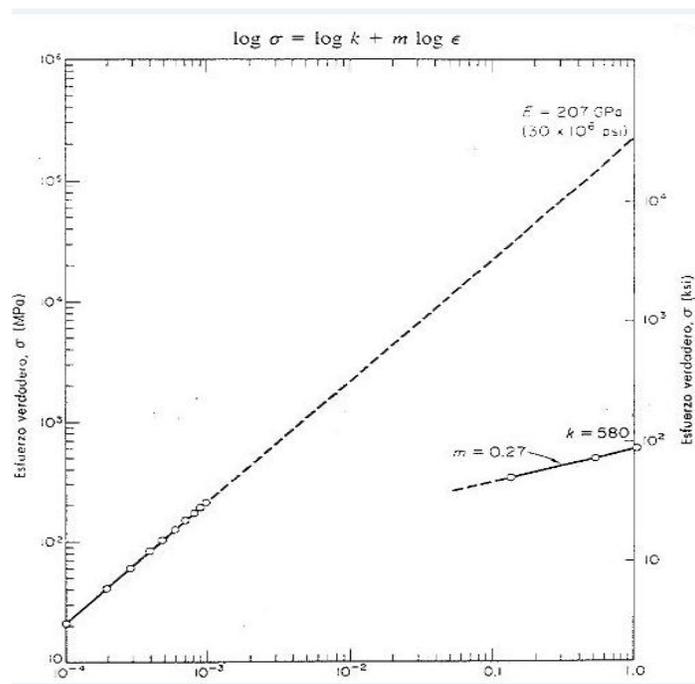


Fig.2.7 Curva de esfuerzo verdadero - deformación verdadera para un acero dulce [6]

La constante n es una propiedad del metal ó aleación y se conoce como “coeficiente de endurecimiento por trabajo” o “exponente de endurecimiento por deformación”. Valores de k y n para varios metales aparecen en la tabla (2.3).

Tabla 2.3 Valores típicos de k y n a temperatura ambiente [6]

Material	K (MPa)	n
Aluminio		
1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Latón		
70-30, recocido	900	0.49
85-15 laminado	580	0.34
Aleación base cobalto con tratamiento térmico	2070	0.50
Cobre, recocido	315	0.54
Acero		
Bajo C, recocido	530	0.26
4135 recocido	1015	0.17
4135 laminado	1100	0.14
4340 recocido	640	0.15
304 inoxidable, recocido	1275	0.45
410 inoxidable, recocido	960	0.10

La comparación entre las gráficas esfuerzo-deformación ingenieril y esfuerzo deformación-verdadero, radica en que la resistencia verdadera siempre es mayor que la resistencia de ingeniería.

La relación entre el esfuerzo y la deformación verdadera es importante, pues muestra que metales continúan haciéndose más resistentes a medida que prosigue la deformación en frío, hasta alcanzar el punto de ruptura. Esta es la razón por la que los esfuerzos que intervienen se hacen mayores a medida que continúan el endurecimiento y el trabajo en frío.

El grado hasta el que se fortalece un metal a causa del trabajo en frío queda indicado por el coeficiente n , de endurecimiento por trabajo. Valores grandes de n muestran que la resistencia y la dureza aumentan más para una cantidad determinada de trabajo en frío, que cuando los valores de n son pequeños.

El valor de n queda indicado por la pendiente del trazo log-log de la curva esfuerzo-deformación verdadera en la región plástica.

2.2 Retroceso elástico (springback)

Hasta el momento los estudios se han dirigido únicamente al estudio del retroceso elástico Figura. 2.8.

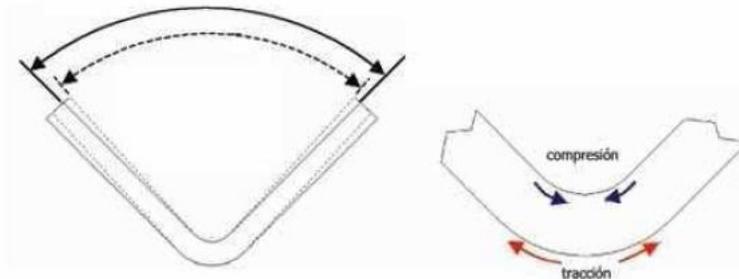


Fig. 2.8 Retroceso elástico

El estudio llamado *Efecto del espesor en la distribución del retroceso elástico en el doblado de chapa metálica* [2] nos menciona el efecto que tiene el espesor de la chapa en cuanto a la distribución de esfuerzos y tensiones en la placa, con el fin de

mostrar un modelo que nos pueda indicar claramente de que manera la pieza se deformará una vez terminado el proceso de doblado.

En el estudio de L.J. Vin y A.H. Streppel [2] se desarrolla un modelo que muestra la variación del retroceso elástico, relacionado con el ancho de la matriz y el radio del punzón.

Numerosos estudios fundamentales a través de los años se han dirigido hacia el intento de obtener una comprensión básica del comportamiento del doblado [10][11][12] y la recuperación elástica, dejando de lado la obtención del factor K. Estas actividades de investigación se han extendido desde la elasticidad a la plasticidad, desde el doblado de pequeñas a grandes curvaturas, desde el doblado puro al doblado con tracción. A pesar de que se ha progresado mucho en lograr modelos de doblado de chapa mejorados, sigue siendo cierto que existe la necesidad de seguir investigando en las teorías existentes. Como resultado de la revisión de la literatura, Wang [13] indica que en las formulaciones del doblado se deberían incorporar las siguientes características, relacionadas respectivamente con el material, la geometría y el proceso. Las características relacionadas con el material: el endurecimiento por deformación real y la anisotropía normal y plana de la placa, para considerar los efectos de la orientación del doblado sobre la capacidad de doblado y la recuperación.

Con la geometría de deformación tienen que considerarse la distribución de deformación no lineal o real a lo largo del grosor de la placa, el movimiento del eje neutro y la longitud de doblado desarrollada.

Con el proceso: la geometría de la herramienta y sus dimensiones (es decir la abertura de la matriz y los radios de la matriz y del punzón) y la fricción de la matriz.

En los modelos desarrollados durante los últimos 20 años se pueden observar que los investigadores han encabezado estudios únicamente enfocados al retroceso elástico bajo similares contextos [14] [15].

En el proceso de doblado, la deformación plástica de la lámina se concentra mayormente en el área de contacto del radio de la matriz y a lo largo de una pequeña línea de contacto, mientras que en el resto de la lámina se experimenta muy poca o nula deformación. En el área de doblado, los esfuerzos máximos de tensión ocurren en las fibras externas, mientras que los esfuerzos máximos a compresión ocurren en las fibras internas de la lámina doblada. Un ejemplo gráfico se muestra en la figura 2.9.

Uno de los problemas críticos en la práctica del doblado es la predicción del retroceso elástico y su compensación para cumplir con el requerimiento de las tolerancias. El retroceso elástico (*springback*) es el resultado de los esfuerzos residuales que permanecen en la lámina después del proceso de deformación. Este generalmente se incrementa al aumentar la resistencia del material y la razón radio de doblado-espesor de lámina (R/t) [6]. Como el esfuerzo de flujo de material se incrementa, los esfuerzos elásticos aumentan proporcionalmente.

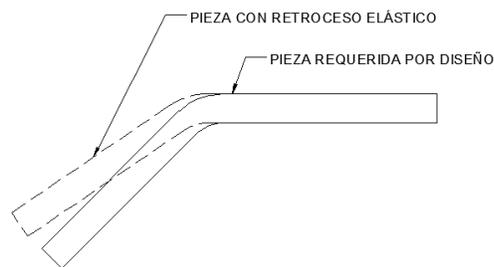


Fig. 2.9 Forma del retroceso elástico

Este fenómeno no puede eliminarse completamente por lo que habrá que asignar ángulos más acentuados de forma que las piezas puedan al final conseguir el ángulo deseado al cesar la acción deformante.

2.2.1 Cálculo del retroceso elástico

Cada deformación plástica está seguida por una recuperación elástica. Como consecuencia de este fenómeno, ocurren cambios en las dimensiones de la pieza doblada una vez retirada la carga.

La deformación permanente (ε_p) es expresada como la diferencia entre la deformación plástica (ε_{pl}) y la deformación elástica (ε_e):

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{pl} - \varepsilon_e \quad (8)$$

Todas las piezas al momento de doblarse reciben una determinada carga y mediante un punzón de radio inicial (R_i), sin embargo debido a la recuperación elástica, la pieza terminará con un radio final (R_f). Así mismo la pieza al doblarse tendrá un ángulo inicial (θ_i) y terminará con un ángulo final (θ_f) tal y como se muestra en la figura 2.10. Se concluye que tanto el radio final como el ángulo final serán más grandes que los proporcionados durante el proceso de doblado.

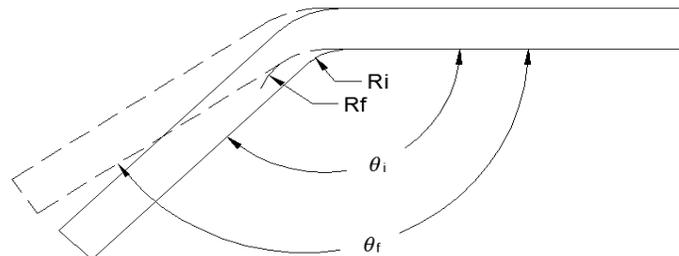


Fig. 2.10 Cambios en el radio y ángulo de doblez debidos al retroceso elástico

Los metales son materiales dúctiles por lo que cargados más allá del límite elástico σ_e , sin importar la tensión que se haya obtenido, la descarga siempre se realizará

siguiendo una trayectoria paralela al tramo recto de la curva tal y como se indica en la fig. 2.11, cumpliendo con la Ley de Hooke.

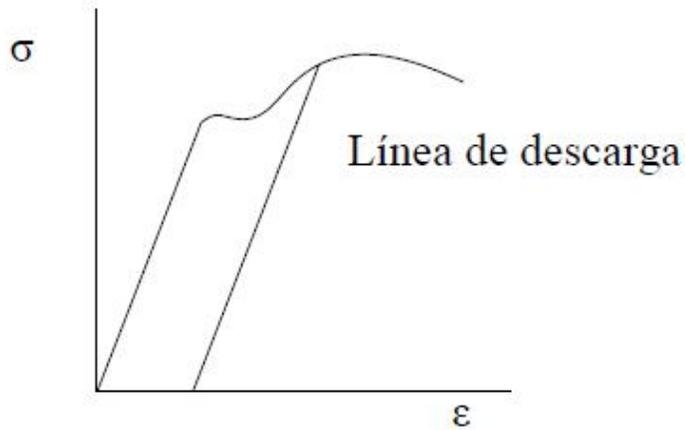


Fig. 2.11 Curva esfuerzo-deformación

Si el diagrama esfuerzo-deformación de la chapa metálica se encuentra en la zona de proporcionalidad, la distribución de las tensiones internas es como se muestra en la fig. 2.12a, pero si sobrepasa el límite de elasticidad, se tendrá una distribución de esfuerzos como en la figura 2.12b:

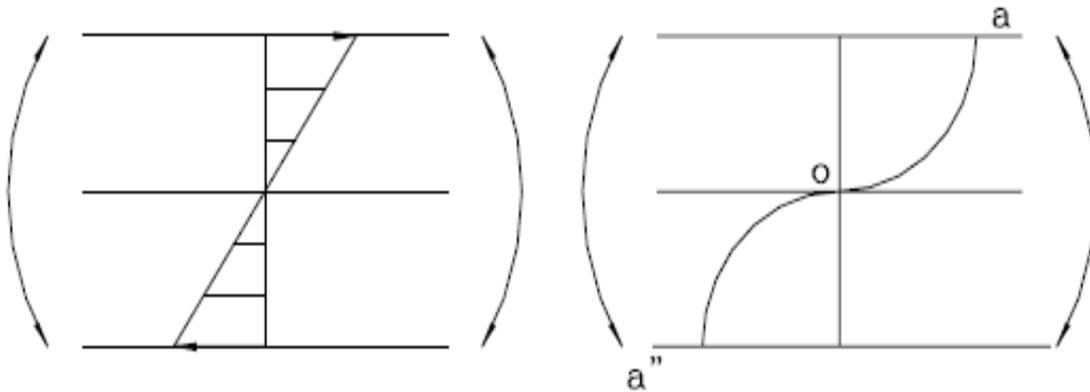


Fig. 2.12 (a)

Fig. 2.12 (b)

Figuras 2.12 Distribución de tensiones internas

2.2.2 Factor de retroceso elástico

Se puede indicar el retroceso elástico mediante una cantidad (γ_s), la cual nos indica el monto de retroceso elástico en la pieza, un $\gamma_s = 1$ nos indica que la pieza no sufre de retroceso elástico, y un valor de $\gamma_s = 0$ indica que la pieza tendrá una recuperación completamente elástica [16].

Determinación del factor γ_s :

$$\gamma_s = \frac{R_i + \frac{T}{2}}{R_f + \frac{T}{2}} = \frac{\frac{2R_i}{T} + 1}{\frac{2R_f}{T} + 1} = \frac{180^\circ - \theta_f}{180^\circ - \theta_i} \quad (9)$$

Para calcular el factor K_s por medio de los radios inicial y final:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i \sigma_y}{ET} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i \sigma_y}{ET} \right) + 1 \quad (10)$$

σ_y = Límite elástico

E = módulo de elasticidad

Para conocer de manera precisa el R_i que se puede utilizar para doblar el material, una vez obtenido el γ_s , se denota por la siguiente fórmula:

$$R_i = \gamma_s \left(R_f + \frac{T}{2} \right) - \frac{T}{2} \quad (11)$$

El retroceso elástico también se ve influenciado de manera muy importante por el factor geométrico que viene definido por el propio ángulo que se quiere alcanzar. Así

que cuanto mayor sea el ángulo de doblado que pretenda alcanzarse, mayor será el retroceso elástico.

La influencia de otros factores, tal como la fricción o el coeficiente de la ley de endurecimiento por deformación, entre otros, se evalúan en función de la conformidad de la verificación del modelo en el que se evalúan, en el caso que estamos desarrollando, nuestros aceros poseen buena formabilidad.

Puntos importantes para el doblado y el posible retroceso elástico:

- El retroceso elástico aumenta con el esfuerzo o la resistencia de fluencia, el endurecimiento y la anisotropía, desde el momento en que estos valores son mayores, mayor es la resistencia a la fluencia plástica [16].
- El retroceso disminuye con el aumento del módulo elástico (E) porque la resistencia al doblado elástico aumenta con el módulo de la elasticidad.
- El doblado de un acero con espesor fino con un radio de doblado grande (R), o un radio de doblado relativamente grande (R/T) mejora el retroceso.
- El doblado de un acero con un ancho amplio en la dobladora, tiene un retroceso mayor.

Existen varios métodos para controlar el factor de retorno:

Sobredoblar la pieza en la matriz hasta un ángulo mayor que el deseado (aproximadamente el mismo número de grados de recuperación).

Acuñar la región doblada mediante un dispositivo que permite localizar y dirigir el punto de compresión del doblado, proceso que asegura a deformación plástica de la lámina. Esta técnica también se conoce con el nombre de doblado a fondo y en las prensas mecánicas debe ser altamente controlado por el operador, dado que estas máquinas ejecutan fuerzas elevadas que pueden causar la fractura del material de la pieza.

Doblar la lámina por estiramiento, proceso que consiste en sujetarla y someterla a tracción, mientras que es doblada. Esta técnica se utiliza para reducir la recuperación en el conformado de piezas con elevada profundidad, como es el caso de las carrocerías para automóviles.

Regolpear en la matriz original con herramientas especiales, una vez que se ha producido la recuperación del material.

Realizar las operaciones de doblado a temperaturas elevadas, esto ayudará a minimizar la recuperación.

Para el análisis de este proyecto se utilizará la técnica de colocar un ángulo más grande en nuestra matriz, el cual ofrece la posibilidad de que el retroceso elástico sea pequeño y la pieza quede dentro de las dimensiones esperadas, sin necesidad de realizar un proceso extra como en los demás casos. Para los tipos de aceros A36, A572 y A1011, se utilizará un ángulo de 80° , puesto que este ángulo es estándar para los herramientales disponibles en el mercado nacional para el doblado en V. Existe la posibilidad de controlar el desplazamiento del punzón, permitiendo doblar a distintos ángulos sin necesidad de cambiar las herramientas empleadas, sin embargo el ángulo de 80° será útil en el proceso físico para evitar que las láminas y placas tengan un retroceso elástico de manera que provoque resultados insatisfactorios para el análisis del factor K.

2.3 Momentos en el doblado

Para el análisis en la operación de doblado, se supone que se tiene una viga recta, larga y delgada de sección (bxT) y una longitud L, la cual es doblada por los momentos M. La viga se muestra en la figura 2.13a. En una distancia x de la orilla izquierda, la deflexión de la viga es dada por la distancia z. La Figura 2.13b muestra un corte realizado de A-B y A'-B' de una longitud dx.

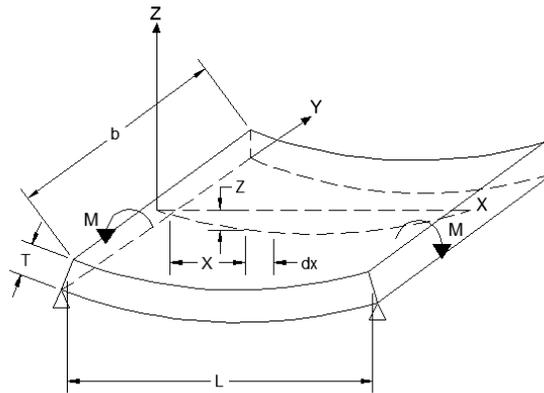


Figura 2.13a Momentos aplicados a una placa

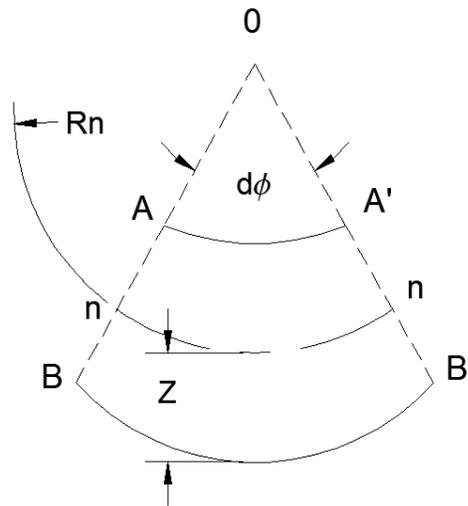


Figura 2.13b Vista ampliada corte dx

El corte indicado mediante A-A' y B-B' son es tomado perpendicularmente a la longitud del eje X de la viga recta original. Después del doblado se puede observar que las fibras se han extendido en B-B' y las de A-A' se han sometido a compresión, aquí podemos indicar que la fibra neutra (la cual no ha sufrido deformación) se encuentra en n-n.

Este tipo de carga es llamado doblado puro. No hay esfuerzos de corte o tangenciales y solo el esfuerzo normal σ es el que está actuando.

Para calcular el momento en la placa doblada se puede utilizar el concepto de una viga tipo Timoshenko [17], sobre la cual se subdividen dos regiones a partir de la fibra neutra del material (considerada exactamente a la mitad del material T/2), una a compresión y otra a tensión.

Haciendo uso de la ley de Hooke, las unidades de elongación en los ejes son definidas como ϵ_x y ϵ_y en términos del esfuerzo normal σ_x y σ_y , utilizando el modulo de elasticidad del material E y el coeficiente de Poisson ν , el material sufrirá una deformación igual a:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu\sigma_y}{E} \quad (12)$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu\sigma_x}{E} = 0 \quad (13)$$

De la ecuación 13 se obtiene que $\sigma_y = \nu\sigma_x$ puesto que la deformación lateral en la paca se vuelve cero, manteniendo de esta manera una continuidad del material, de esta manera se obtiene que:

$$\epsilon_x = \frac{(1 - \nu^2)\sigma_x}{E} \quad (14)$$

Por lo tanto:

$$\sigma_x = \frac{E\epsilon_x}{1-\nu^2} \quad (15)$$

Por medio de integración se puede obtener el momento en el elemento sujeto a dobléz:

$$M = \int_{-T/2}^{T/2} \sigma_x z dz = - \int_{-T/2}^{T/2} \frac{Ez^2}{1-\nu^2} \frac{d^2w}{dx^2} dz = - \frac{ET^3}{12(1-\nu^2)} \frac{d^2w}{dx^2} \quad (16)$$

Donde $-d^2w / dx^2$ es la curvatura de deflexión, siendo w la deflexión en el eje z .

Utilizando la siguiente notación:

$$\frac{ET^3}{12(1-\nu^2)} = D \quad (17)$$

De esta manera se puede representar el momento en la placa mediante la siguiente ecuación, en términos de la deflexión de la misma:

$$D = \frac{d^2w}{dx^2} = -M \quad (18)$$

2.4 Herramientas para el análisis del conformado

2.4.1 Importancia de las tolerancias geométricas y el dimensionamiento

El doblado de piezas metálicas permite elaborar diversos tipos de piezas, desde partes que van directamente al consumidor final, hasta pequeñas piezas que harán ensambles complejos, como lo puede ser un automóvil o un avión. Por eso es muy importante tomar en cuenta además del propio diseño y el método de manufactura, su adecuada idealización, es colocar debidamente sus tolerancias geométricas y dimensionamiento, a fin de que cumpla con las pautas de funcionalidad y costo. Una pieza bien diseñada para su manufactura disminuirá el costo de la misma y hará que se obtenga un proceso repetitivo y con alta calidad.

Hoy en día, a pesar de que todas las empresas buscan alta competitividad en el mercado, no utilizan en su mayoría la colocación de tolerancias geométricas, esto es más utilizado solo en las piezas que lleven algún mecanizado en la superficie. En algunas ocasiones se ha considerado que el proceso de doblado es un proceso que no necesita tolerancias geométricas, pero es un error el no considerarlas, pues los procesos de doblado son irreversibles, como nos indica Wang [13]. La diferencia e importancia del uso de estas tolerancias en los procesos de conformado en comparación con el mecanizado se proporciona en la tabla 2.4.

Es de suma importancia el control de los defectos de doblado en las piezas, pues si estas tienen alguna operación extra de maquinado, como un oblongo, un barreno o algún proceso de troquelado en alguno de sus lados, estos podrían no coincidir con la función para la cual fueron diseñados. Con un mal proceso de doblado los agujeros pueden quedar descentrados respecto a los tornillos o pernos que estén ubicados en algún punto específico.

Tabla 2.4 Comparación entre procesos de doblado y mecanizado

Doblado	Procesos de mecanizado convencional
Las piezas parten de una plantilla de corte, obtenida de una lámina o placa de acero	Las piezas parten de un tocho obtenido de una placa, del corte de un perfil o de un proceso de fundición
Los procesos son irreversibles. Una vez dobladas las plantillas, estas se pueden retrabajar en ocasiones a costos excesivos, o son inutilizables.	Si las piezas no cumplen con el diseño especificado, en muchas ocasiones se pueden volver a mecanizar hasta obtener la forma deseada, de otra manera estas son inservibles.
La deformación provoca cambios abruptos en la forma de la plantilla, conservándose con la mínima variación la superficie y el espesor de la pieza.	La superficie y el espesor de la forma geométrica de la pieza cambia potencialmente.

2.4.2 Uso de tolerancia asistida por computadora

El uso de tolerancias geométricas y dimensionamiento juega un papel muy importante dentro de la etapa de diseño de ingeniería y en el proceso de planeación del proceso de procesos de doblado. Dentro de una gran cantidad de diseños se encuentran muchos que exigen tolerancias muy estrechas, al ser utilizados para ensambles de gran precisión y en los cuales muchas veces va implícito un alto nivel de seguridad debido a la función que desempeñara. Las investigaciones recientes [16] indican seis categorías principales, tal y como lo muestra la figura 2.14. Las líneas punteadas indican que la transferencia de técnicas de tolerancia son derivadas de un análisis y síntesis de tolerancias.

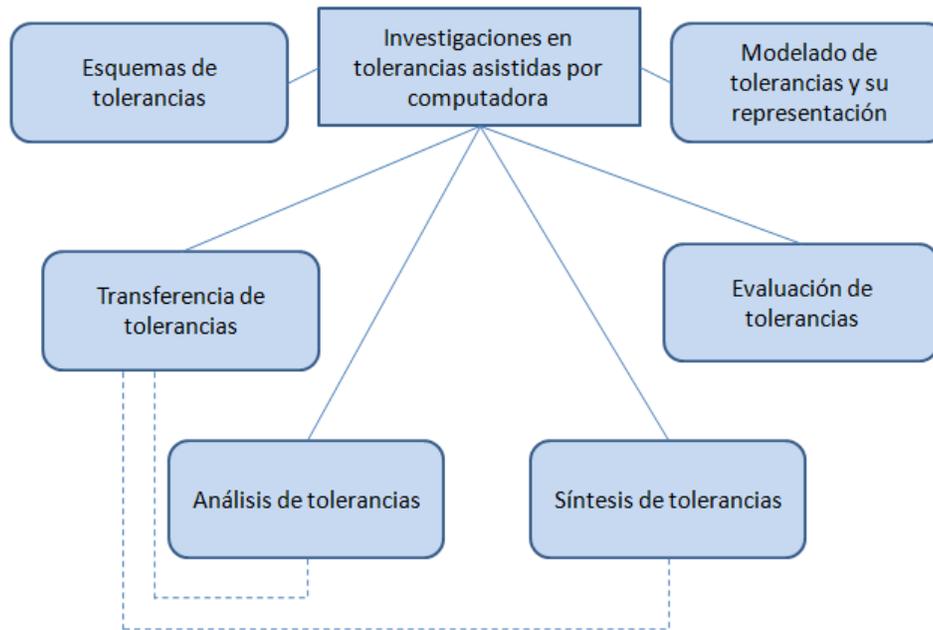


Fig. 2.14 Establecimiento de tolerancias asistidas por computadora

Existen dos tipos de esquemas de tolerancias a utilizar, el paramétrico y el geométrico. Las tolerancias paramétricas identifican un conjunto de entidades del diseño y asigna límites a las distribuciones de esas entidades, tales límites y desviaciones son establecido mediante tolerancias estadísticas o de manera convencional mediante los símbolos +/- . Las tolerancias geométricas describen la variación aceptable de la geometría respecto a un valor nominal de referencia. Esos valores están establecidos en base a las características de la pieza, tales como la forma, la orientación, la localización, etc. Esto está completamente definido en las normas ISO 1110 y la ANSI Y14.5:2009 [4].

Las tolerancias geométricas de orientación y posición son las que debería de utilizarse en todos los diseños en los que intervenga el doblado de aceros, ellas incluyen aspectos importantes como la perpendicularidad, el paralelismo y la

angularidad. Hoy en día algunas empresas tiene la ventaja de que al aplicar tolerancias geométricas desde el diseño de los dibujos de taller, inmediatamente estos son transferidos a máquinas CMM para un análisis completo y detallado de la superficie de la pieza terminada.

2.4.3 Análisis de tolerancias

El análisis de tolerancias es utilizado para estimar la acumulación de la variación de las dimensiones a través de los procesos de producción o ensamble de las piezas y para verificar la funcionalidad apropiada de la misma. Este tópico se maneja normalmente dentro del diseño 2D y 3D.

El análisis se basa en las siguientes variaciones:

- Dimensionales (lineales y de angularidad)
- Geométricas (planicidad, redondez)
- Variaciones cinemáticas (pequeños ajustes entre las partes de ensambles mecánicos)

2.4.4 Tolerancias aplicadas al proceso de doblado

El modelo utilizado para análisis de tolerancias más empleado en la industria es el de acumulación de tolerancias lineal, el cual nos permite decidir hacia donde absorber un error en la geometría de la plantilla de corte, o si la pieza ya ha sido doblada, nos permite decidir si es que aún podemos recuperarla mediante un retrabajo. Matemáticamente esta acumulación de tolerancias se denota por:

$$Tol = \sum_{i=1}^n T_i \quad (19)$$

Donde Tol es cada una de las tolerancias.

Las tolerancias empleadas en la industria se muestran de manera gráfica en la figura 2.15.

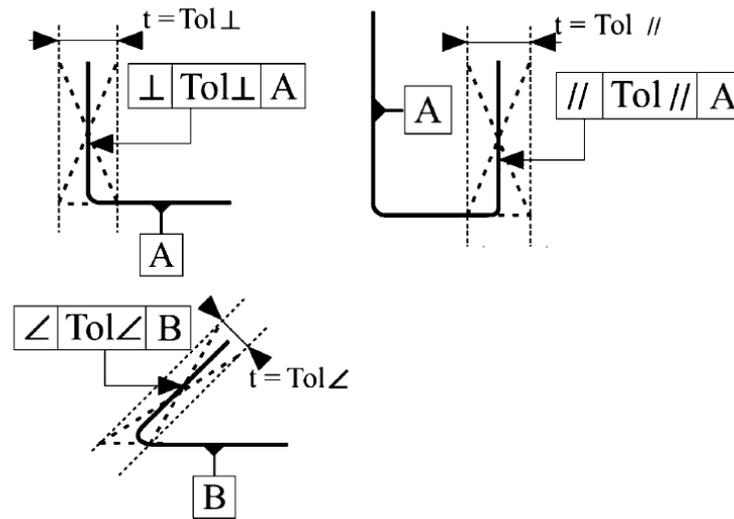


Fig. 2.15 Tolerancias de orientación (de acuerdo a ISO 1101:2002)

2.5 Simulaciones y sistemas CAE para procesos de conformado

Varios autores [6] reconocen que la simulación ha contribuido significativamente a mejorar la comprensión sobre los procesos de deformación del acero, a acortar los procesos de diseño y los tiempos de desarrollo de herramientas. En la actualidad, la práctica de las simulaciones de conformado por deformación se está llegando a convertir en una especie de experimentación virtual para sustituir los experimentos de prueba y error característicos de este tipo de procesos.

Los objetivos industriales de la simulación de los procesos de deformación se resumen en tres grupos principales:

- Reducción de tiempo: revisión temprana de la repetibilidad de las piezas de trabajo, reducción de los tiempos de desarrollo, reducción de los tiempos de prueba y respuesta rápida a los deseos de modificación.
- Reducción de costos: productos más baratos, reducción de los costos de herramientas y aumento de la fiabilidad.
- Aumento de la calidad del producto: selección óptima del material de la pieza de trabajo, producción de piezas más complicadas, acumulación del saber-hacer para nuevos materiales, repetitividad del proceso y optimización por variantes.

Anteriormente se utilizaban únicamente las técnicas de realizar pruebas físicas, las cuales implican costos excesivos, sobre todo si las piezas son de materiales costosos o con geometrías complejas que impliquen una ardua labor de doblado, es decir que impliquen bastante tiempo de proceso. Una vez que se corría la prueba física, el paso siguiente era la retroalimentación al departamento de diseño y/o manufactura, los cuales en ese momento debían cambiar las especificaciones, dibujos, procesos de manufactura, etc. de dicha pieza, algo que incluso después de haberse realizado podía fallar nuevamente, y desencadenaba un camino laborioso de revisar en qué parte del proceso se encontraba el error y cuáles eran las condiciones por las cuales se producía.

Actualmente se puede realizar simulaciones multinivel no solo en el propio proceso, sino inclusive en la propia estructura del material, como lo muestra la tabla 2.5.

A parte de los objetivos y las ventajas que pueden conseguirse con el uso de la simulación, es importante hacer notar la amplia posibilidad de análisis que ofrecen

diferentes herramientas, ya sean de simulación o algoritmos de optimización a diferentes niveles de comportamiento de material.

Tabla 2.5 Resumen comparativo del estado de simulación-optimización con un enfoque de material multinivel.

Nivel	Simulación	Optimización
Nivel 1, nivel macroscópico o integral	Flujo de material, requerimientos de fuerza o trabajo	Diseño de plan de proceso, número óptimo de etapas de forma
Nivel 2, nivel mesoscópico O de mecánica continua	Deformaciones, esfuerzos, temperaturas locales	Distribución óptima de deformaciones y esfuerzos
Nivel 3, nivel macroscópico o de física de metales	Tamaño de grano, anisotropía, inicio del fallo, densidad de dislocación	Distribución de microestructura óptima

Simular cualquier fenómeno en un proceso de fabricación, en este caso en el del doblado del acero, significa elaborar una representación del proceso por medio de un modelo físico matemático que permita un análisis más sencillo y económico que si se realizara sobre un modelo real. La mayoría de veces, esos modelos se convierten en los núcleos de determinados sistemas, mayoritariamente informáticos, que se pueden englobar bajo la denominación de sistemas CAE que se utilizan para optimizar la fabricación y la productividad.

Cuando los departamentos de ingeniería y manufactura realizan un ciclo completo de CAE-CAM, se logran eliminar los prototipos físicos y se logran crear modelos computacionales que permiten determinar fallas durante el proceso de producción de las partes de ensamble y/o producto terminados.

2.6 Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales por medio de “aproximaciones discretas”, este método supone que la zona de solución está compuesta de muchas subzonas interconectadas, las que se denominan “elementos finitos” [18].

En el método de elementos finitos el objeto o sistema bajo estudio se representa mediante un modelo geométrico formado por múltiples regiones discretas interconectadas entre ellas. Un conjunto de ecuaciones de equilibrio, junto con consideraciones físicas tales como compatibilidad y relaciones constitutivas, se aplican a cada elemento del sistema, resultando en un conjunto de ecuaciones de múltiples variables. Este sistema se resuelve utilizando las técnicas clásicas de resolución de problemas de álgebra lineal y no lineal según sea el problema a resolver.

Los elementos, pueden tomar formas simples (por ejemplo, líneas, triángulos, paralelepípedos) que se ensamblan de diferentes maneras para representar la solución sobre una región cualquiera, tal como se muestra en la figura 2.16.

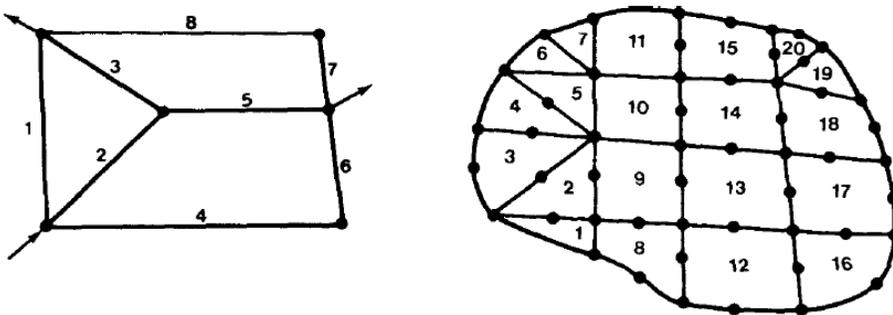


Fig.2.16 Discretización de formas geométricas

2.6.1 Conceptos del análisis por elementos finitos

El método de los elementos finitos por novedoso que parezca, tiene ya varios años en su forma conceptual, ya que se pueden recordar las bases del cálculo diferencial e integral propuestos por Isaac Newton por tomar un ejemplo, sin embargo, el desarrollo moderno de esta técnica comienza en 1940, específicamente en el campo de la ingeniería estructural, con los trabajos de Hrennikoff en 1941 y McHenry en 1943, quienes propusieron el uso de líneas en una dimensión para representar elementos como barras o vigas para el cálculo de esfuerzos en sólidos con sección transversal continua [18].

La mayoría de los trabajos desarrollados para la técnica de elementos finitos hasta principio de los años 60s, se enfocaron en la modelación matemática de problemas mecánicos que contemplaran únicamente deformaciones elásticas, desplazamientos cortos y concentraciones de esfuerzos bajos, en condiciones de modelación de cargas estáticas y materiales elásticos. Sin embargo, deflexiones de gran magnitud y análisis térmico, así como la modelación de materiales no lineales aparecieron hasta 1964, con los trabajos de Galagher [18], quien además de comenzar con la modelación matemática de materiales no lineales, también introdujo el concepto de pandeo de columnas en modelaciones matemáticas con elementos finitos.

Este nuevo giro que tomo en los 60s el análisis por elementos finitos, tomaba como referencia los trabajos de modelación matemática a través de métodos energéticos, ya que con la finalidad de tener modelos más confiables, se exploraba la aplicación de estos modelos de energía aplicados ya anteriormente a la mecánica de sólidos, para la determinación de fallas de material como es el criterio de Von Misses o también conocido dentro de la literatura como, “Criterio de Máxima Energía de Distorsión”.

Ya a partir de los años 80s, con la mejora en el hardware disponible en el mercado. La aplicación del método de los elementos finitos, viviría un auge sin precedentes. El rápido y evolutivo mundo de la computación, impulsaría a diferentes compañías de software, a incursionar en el desarrollo de este tipo de aplicaciones, ya que el método de elementos finitos, había traspasado las barreras de sus orígenes para análisis estructural y se había adecuado para una infinidad de aplicaciones y ramas de estudio, que van desde la ingeniería mecánica hasta la ingeniería aeroespacial.

El análisis de elementos finitos para un problema físico puede ser descrito de la siguiente forma:

1. El sistema físico se divide en series de elementos que están conectados por un número discreto de puntos nodales; este proceso se denomina “discretización”.
2. Una expresión matricial se desarrolla para relacionar las variables nodales de cada elemento. La matriz resultante se conoce comúnmente como matriz elemental. Para un problema discreto, la matriz elemental puede ser generada a partir de un análisis físico simple. Para problemas continuos, la matriz elemental se obtiene mediante un proceso matemático que utiliza técnicas variacionales o métodos de residuos ponderados.
3. Las matrices elementales se combinan o ensamblan para formar un conjunto de ecuaciones algebraicas que describen el sistema global. La matriz de coeficientes del problema global se conoce como la matriz global. El procedimiento de ensamble se realiza para cumplir condiciones de compatibilidad en la unión de elementos.
4. Condiciones de borde son incorporadas dentro de la matriz global.

5. El conjunto de ecuaciones algebraicas se resuelven mediante algún método matricial adecuado.

Una de las ventajas del método es que su precisión viene dada por la malla y número de elementos a analizar. Un refinamiento de la malla permite obtener soluciones más precisas, a costa del tiempo y con el peligro de que una malla excesivamente fina pueda incurrir en problemas de precisión numérica.

Uno de los usos más comunes de estos métodos es el cálculo de fatiga y desplazamiento en sistemas mecánicos. Sin embargo el análisis de elementos finitos es capaz de abordar una gran variedad de problemas tales como transferencia de calor, difusión en sistemas de estado sólido, dinámica de fluidos, electromagnetismo. Los algoritmos permiten abordar problemas más complejos que los que se pueden resolver mediante métodos analíticos, con la posibilidad de analizar problemas que requieran tener en cuenta distintos dominios de física, por ejemplo al realizar el doblado de un material mediante la aplicación de calor al material al mismo tiempo.

El análisis mediante el método de elementos finitos en general requiere de tres fases:

Preprocesado: modelar el problema y determinar las condiciones del entorno.

Resolución: resolver el problema planteado mediante el algoritmo deseado.

Postprocesado: una vez obtenidos los resultados es necesario presentarlos para poder analizarlos.

En la actualidad el análisis por elementos finitos es una de las herramientas fundamentales dentro de las diferentes industrias, dado que con esto es posible modelar aspectos relacionados con sus productos y procesos.

La mejora de los sistemas ha permitido el desarrollar y probar de manera virtual sistemas muy complejos y caros de prototipar, permitiendo realizar ajustes al modelo antes de ser fabricado, reduciendo el costo de diseño y el tiempo de llegada de productos al mercado.

Estimación de error y mallado adaptativo

Son diversas las fuentes de error en el análisis de problemas empleando el MEF. Los más comunes se listan a continuación.

- Errores de modelización:
 - En la modelización de cargas exteriores
 - Modelización de condiciones de contorno
 - Propiedades de los materiales

- Errores de la discretización:
 - Errores en la aproximación de la geometría. Por falta de capacidad de las funciones de forma geométricas de representar con exactitud la geometría real. Este problema se resuelve aumentando el mallado o refinándolo en las zonas conflictivas.

 - Errores en la discretización: Relacionados con el tamaño del elemento y la función de forma de los corrimientos de los nodos. Como norma general se emplean elementos pequeños en las zonas de variación rápida de la solución, y elementos grandes en las zonas de variación lenta, figura 2.17.

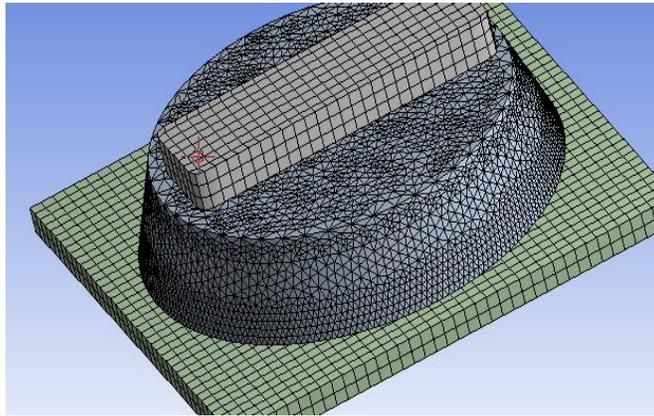


Fig. 2.17 Zonas de discretización

- Errores de computación
 - Error en la integración sobre los elementos. Dado que la solución viene dada por un polinomio, hay que aceptar cierto grado de error.
 - Error en la resolución del sistema de ecuaciones. Por errores de truncamiento en la representación interna de la computadora, por los mismos números reales y por errores de redondeo.
 - Error por colocación de fronteras. Representa el colocar zonas donde actúan fuerzas, momentos o flujos en regiones del espacio que no son correctas para un adecuado cálculo matemático. Es importante indicar donde están los elementos importantes en la geometría de análisis.

2.7 Aplicación de ANSYS al doblado

El diseño de productos que estarán sometidos a impactos o que son fenómenos de corta duración sometidos a grandes cargas, pueden ser analizados con precisión por medio de las herramientas disponibles en el módulo ANSYS Explicit Dynamics, una

solución dentro del mismo entorno de ANSYS. Problemas especializados como los antes mencionados requieren análisis avanzados y diversas herramientas que permitan prever el comportamiento del sistema bajo estudio y comprenderlo sin importar su complejidad, algo que en la mayoría de las ocasiones sin un paquete computacional como este, sería un proceso muy caro el realizarlo de manera física o algunas veces hasta imposible.

ANSYS Explicit Dynamics permite estudiar fenómenos altamente no lineales figura 2.18, así como potentes herramientas para maximizar la productividad de los análisis.

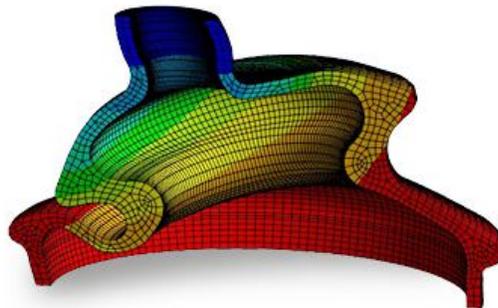


Fig. 2.18 Deformaciones altamente no lineales

Los usos más importantes de este módulo de ANSYS son:

- La respuesta de los materiales a impactos (impactos de baja y alta velocidad)
- Propagación de ondas en diferentes medios
- Interacción entre cuerpos diversos
- Pruebas de caída
- Análisis de pandeo altamente no lineales
- Diversos tipos de fallas en los materiales
- Pruebas en adhesivos

- Diversos tipos de falla en soldaduras
- *Conformados de metales*
- Aplastamientos
- Pruebas de explosivos

Estos módulos se muestran gráficamente en la figura 2.19.

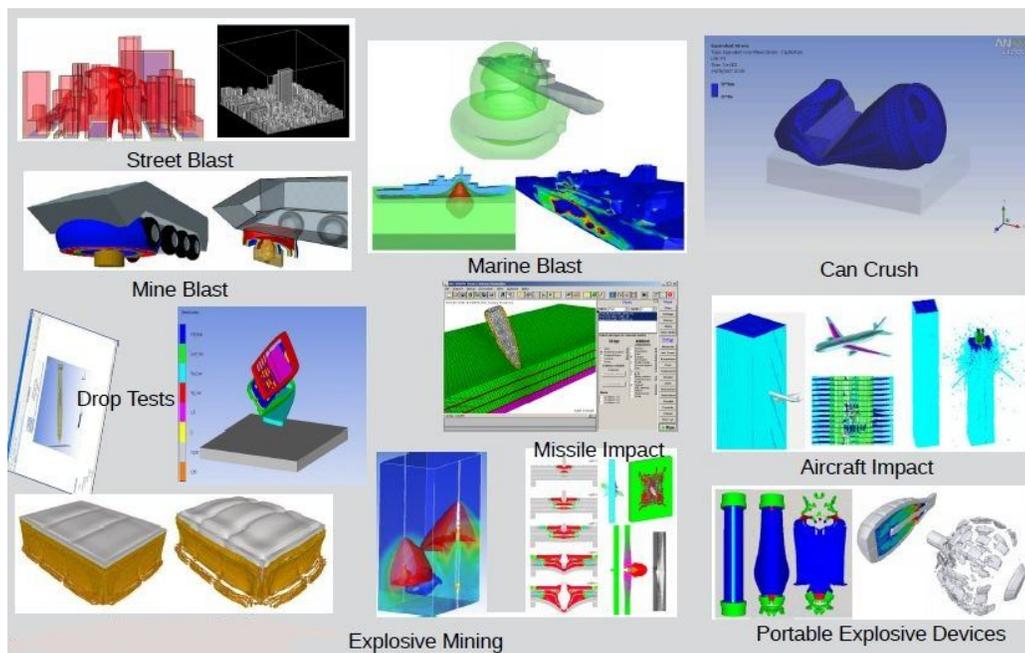


Fig.2.19 Diversos tipos de pruebas con ANSYS Explicit Dynamics

2.8 La ingeniería concurrente y los procesos de doblado

En el diseño y fabricación de producto de forma concurrente, el diseñador debe considerar toda la información y requerimientos posibles, incluso aquellos de procesos de desarrollo de producto de etapas posteriores e incorporar esas consideraciones en el diseño del producto. Se trata de respaldar el proceso de

elaborar decisiones inteligentes en las primeras etapas de diseño. Esta situación normalmente supone una gran presión sobre el equipo de diseño de producto, aunque sea poco realista, pues el éxito del desarrollo de producto necesita de las contribuciones y de la experiencia de casi la totalidad de la gente de una empresa [16].

Frecuentemente, los productos elaborados con piezas de acero dobladas se diseñan sin la consideración sistemática de los requerimientos de desarrollo de productos en etapas posteriores, tales como la planificación del proceso, la fabricabilidad, la planificación de la producción y la optimización. Además, las retroalimentaciones desde estos procesos de etapas posteriores, hasta el diseñador de producto sólo pueden hacerse después de que el producto sea diseñado o incluso fabricado. A menudo, esta situación puede resultar en la repetición de tareas que son bastante caras y que consumen mucho tiempo. Consecuentemente, afecta la calidad, coste y el tiempo de entrega del producto.

La integración es un concepto que en la actualidad recibe mucha atención. Una de las razones es la automatización tanto de la producción física como de las actividades de planificación precedentes. Un prerrequisito para la automatización es que la información involucrada en la misma, de cualquier proceso debe ser identificable, formalizada y explícita para que pueda controlarse.

Así pues un correcto análisis de la información relacionada con la elaboración de un componente de acero doblado, se puede pensar en la elaboración de herramientas que permitan tener consideraciones tempranas sobre la planificación de procesos, optimización, etc. La afirmación anterior puede conseguirse por la aplicación de tecnologías de computadora avanzadas, tecnología de ingeniería, tecnología de optimización de fabricación y tecnología de simulación.

Pensando en una aproximación integradora se define un modelo donde estructura el sistema de la tecnología de deformación del metal. En su modelo proporciona un enfoque integrador donde se reconocen un núcleo conectado con seis módulos-satélites dispuestos a su alrededor, tal como se muestra en la figura 2.20.

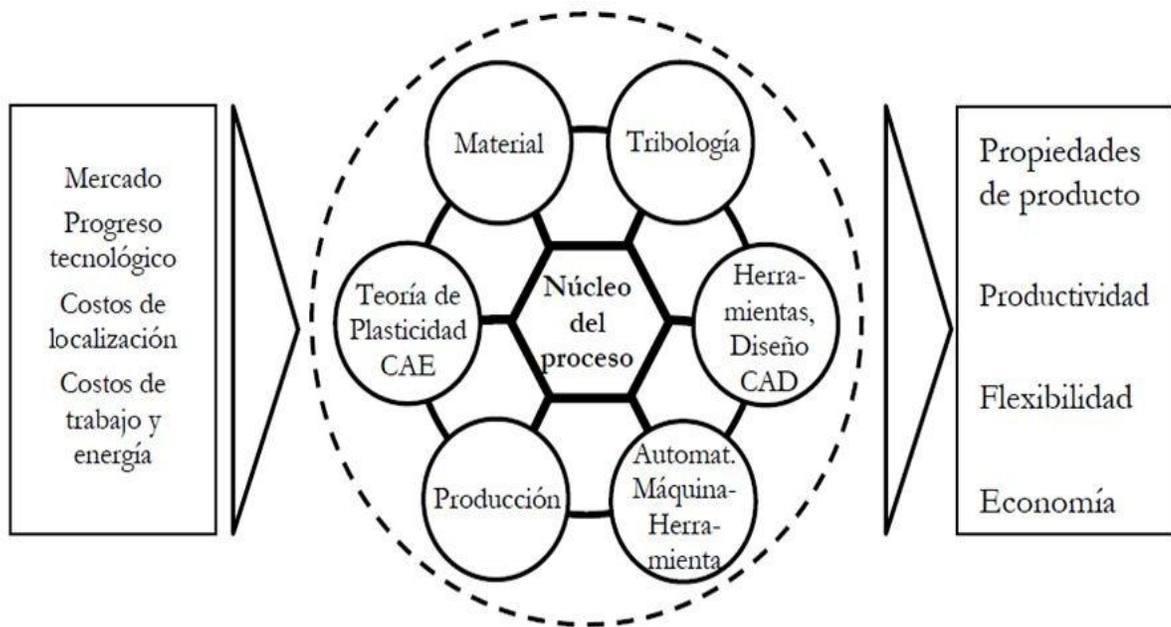


Fig. 2.20 Modelo de estructura del sistema de la tecnología del doblado

El centro está marcado por el núcleo-esencia del proceso, que se define por la relación geométrica de la pieza de trabajo-herramienta y la cinemática del proceso estudiado. Los seis módulos dispuestos a su alrededor son:

- Fundamentos de la teoría de la plasticidad incluyendo el análisis del proceso y el diseño, por ejemplo, por MEF
- Tecnología de materiales
- Tribología
- Tecnología de herramienta

- Automatización
- La fábrica

Todos los módulos están interconectados uno con los otros, en el mismo grado. Las relaciones entre ellos y con el núcleo del proceso pueden ser parcialmente formuladas matemáticamente o descritas por modelos del flujo de datos. Todos estos aspectos deberán definirse correctamente y tenerse en cuenta desde el principio, por la ingeniería simultánea para desarrollar un proceso de producción económico y exitoso.

En las últimas décadas y dentro de del entorno de la ingeniería concurrente, la planificación de la fabricación se ha vuelto una de las tareas clave, esta es una etapa de nexo entre los ingenieros de diseño y los de fabricación. Los diseñadores expresan su las especificaciones y fiabilidad de la piezas mecánicas y los ingenieros de fabricación toman las acciones concretas en materializar esas especificaciones en la pieza física, tomando en consideración las restricciones impuestas por el herramental y equipo con que se cuente en cada taller de fabricación. El estudio del comportamiento del factor K entra en la planificación de la fabricación, pues antes de cortar las piezas desplegadas o plantillas, se pueden colocar las restricciones del taller a las piezas elaboradas en la etapa de diseño.

La ingeniería concurrente es una ayuda para el proceso de diseño del producto, pues dependiendo de la complejidad del producto esta metodología acorta el tiempo, dado que permite recolectar y gestionar la información de todas las áreas con el fin de cumplir con todas las expectativas del cliente. El desarrollo de productos es un proceso de transformación de información donde se parte de la los requerimientos de cada una de las áreas involucradas y se obtienen conclusiones aplicables al producto a partir de dicha información.

Capítulo 3 Desarrollo experimental

3.1 Herramental (matrices y punzones) utilizado para el doblado en V

El doblado en V, el bloque que compone el herramental para el conformado en V está compuesto por un punzón y una matriz la cual tiene una abertura normalmente de ocho veces el espesor del material a doblar. De esta manera el punzón desciende sobre la pieza de trabajo y le da forma aprovechando la deformación plástica del material tal como se muestra en la figura 3.1

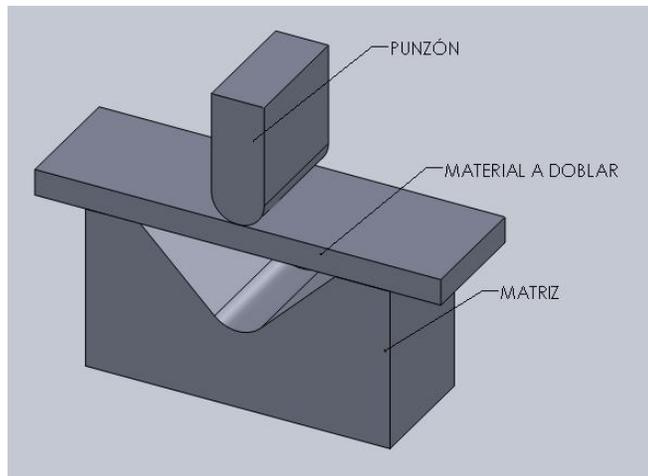


Fig. 3.1 Doblado en V

En el doblado en V el radio del punzón no debe ser menos de $1T$ para los aceros al carbón, y debe incrementarse tanto como la ductibilidad del material decrezca. El radio de la matriz en este proceso de doblado en V debe ser más grande que el radio del punzón, este debe ser el radio del punzón más el espesor del material. En la práctica generalmente se utilizan matrices con ángulos que varían de los 80° a los 85° para obtener piezas a 90° , dado que como se verá más adelante se debe de considerar el efecto del retroceso elástico tal y como se exhibe en la figura 3.2.

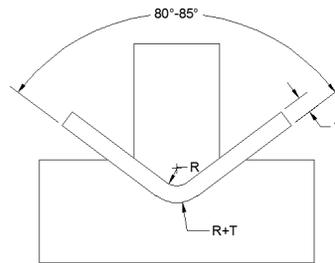


Fig. 3.2 Relación de radios entre matriz y punzón

Las matrices usadas pueden tener una geometría muy variada dependiendo de la forma final que se necesite obtener. Esto mismo ocurre con la geometría del punzón. Dependiendo del ángulo final de doblado o si se va a realizar una secuencia de varios plegados de forma automática, la geometría puede variar de forma sustancial tal como se muestra en la siguiente figura 3.3.

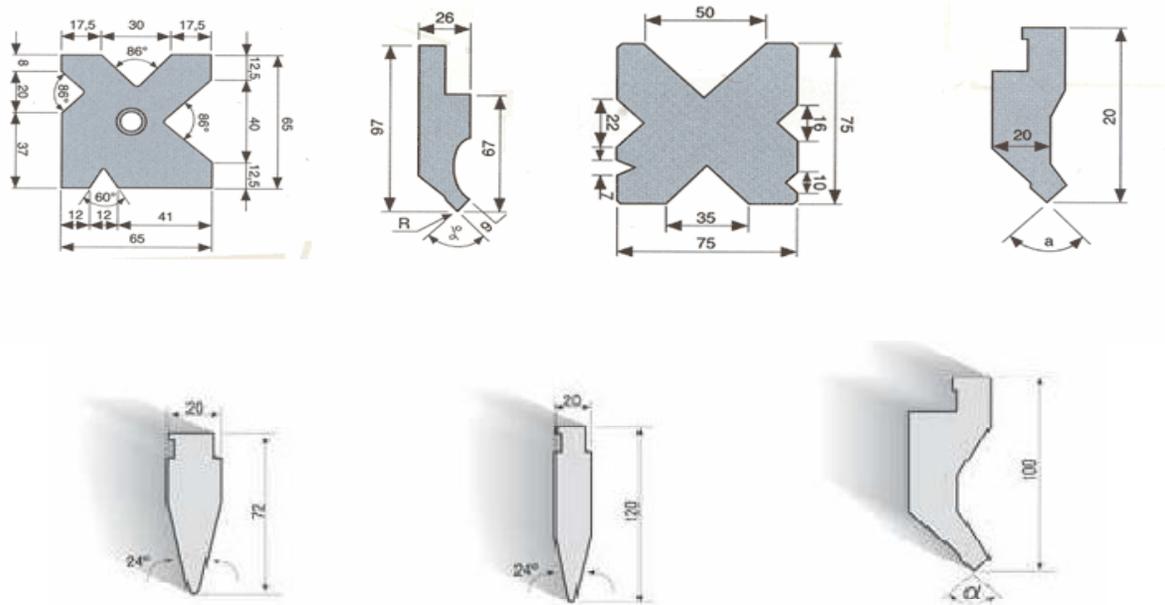


Fig. 3.3 Geometrías de punzones y matrices

3.1.1 Geometrías del herramental

Se ha considerado el efecto del retroceso elástico y por ello la matriz tendrá un ángulo de 88° . En la figura 3.7 se presenta la geometría del punzón y matriz que se utilizará para el análisis del doblado en la simulación.

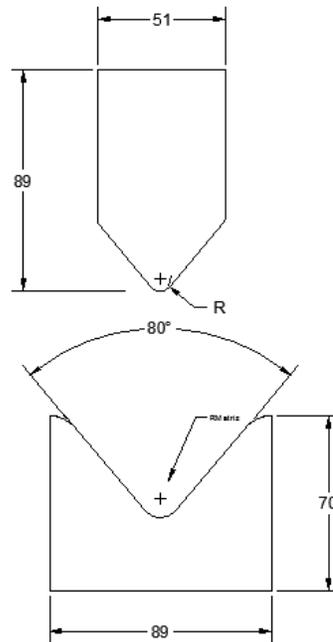


Fig. 3.4 Geometrías para el análisis (en mm)

3.2 Equipo y material a doblar

Por su resistencia a la deformación los aceros se clasifican de la siguiente manera:

- I. Aceros de baja resistencia:
Son todos aquellos que tienen un esfuerzo de fluencia 207 MPa mín.

- II. Aceros de media resistencia:
Son todos aquellos con un esfuerzo de fluencia de 242 MPa mín.

III. Aceros de alta resistencia:

Son los aceros con un esfuerzo de fluencia de 311Mpa mín.

Para el análisis se utilizarán los aceros de media y alta resistencia más empleados dentro de la industria metalmeccánica, los aceros ASTM A1011-50 y ASTM A-36, este último es conocido como acero estructural y con él se fabrican placas, perfiles estructurales y vigas; y los aceros de alta resistencia ASTM A572-50 y ASTM A572-60. En la tabla 3.1 se muestra la composición química y algunas propiedades mecánicas de estos aceros.

Tabla 3.1 Composición química y propiedades mecánicas de los aceros [19]

Especificación	Composición química % en peso (máximo)							Esfuerzo de fluencia	Resistencia Última	% de elong.
	C	Mn	P	S	Si	Cb	V	Mpa mín.	Mpa mín	200 mm (8") mín
ASTM A1011-50	0.25	0.90	0.035	0.040	-	0.008	0.008	345	380	21
ASTM A-36	0.27	1.20	0.040	0.050	0.040	-	-	250	400-550	20
ASTM A572-50	0.23	1.35	0.040	0.050	0.040	0.050	0.060	350	450	21
ASTM A572-60	0.26	1.35	0.040	0.050	0.040	0.050	0.150	420	550	18

Para poder garantizar una redistribución de esfuerzos en el proceso de doblado y evitar fallas de fragilidad prematuras, se sugiere según expertos que el porcentaje mínimo de elongación sea de 20%. Como podemos constatar en la tabla anterior, este material tiene esa propiedad.

Ahora la probeta para doblez, consiste en una pequeña placa de dimensiones de 51 mm x 200 mm, la cual será utilizada en los análisis variando únicamente su espesor.

El doblado en V se realizó en una máquina dobladora MEISTER WC-K-40-200, la cual tiene una longitud de bancada de 2 m y una fuerza nominal máxima de 400 kN, un profundidad de desplazamiento de la cortina de 200 mm, tal como se muestra en la figura (3.4). Las pruebas se efectuaron con el acero ASTM A-36 y con espesores de lámina hasta 4.76 mm (3/16").



Fig. 3.5 Dobladora excéntrica de cortina

La geometría y dimensiones del dado y punzón utilizado en la dobladora MEISTER, se ilustran en las figuras 3.5 y 3.6.

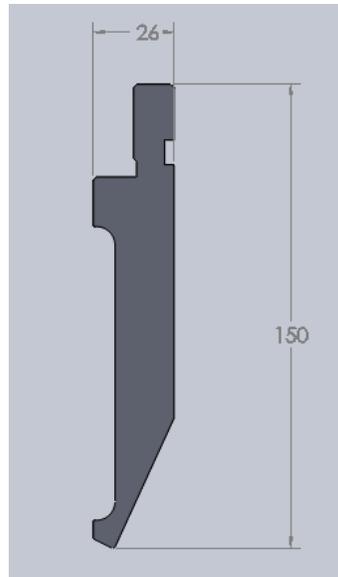


Figura 3.6 Geometría del punzón (en mm)

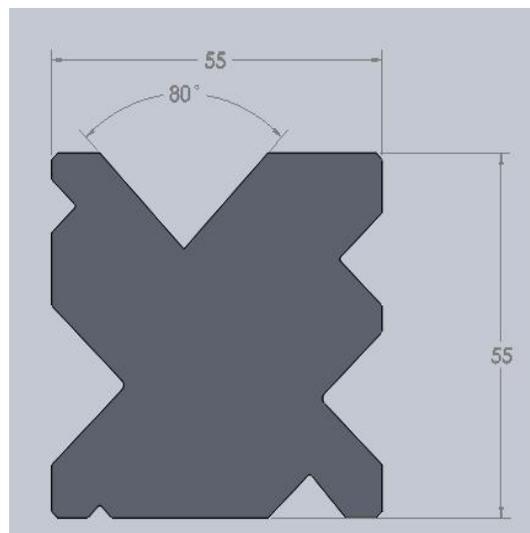


Figura 3.7 Geometría de la matriz (en mm)

3.3 Parámetros para ANSYS.

Se utilizó el software ANSYS Explicit Dynamics para llevar a cabo la simulación del doblado, por lo cual para la realización del mismo se debe establecer la geometría.

Para este análisis se utilizó un punzón con un radio de 3 mm, dado que es versátil para doblar placas de espesor delgado, así mismo la matriz será conforme al punzón, estableciendo un ancho de la matriz de $8T$, ya que este tipo de relación matriz-punzón es el que se utiliza ampliamente en el ámbito industrial.

Se ha considerado el efecto el retroceso elástico y por ello la matriz tendrá un ángulo. En la figura 3.8 se presenta la geometría del punzón y matriz que se utilizó en el análisis de doblado en la simulación.

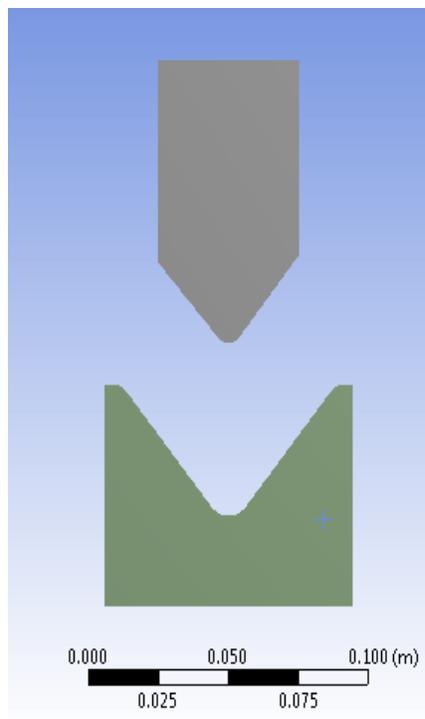


Figura 3.8 Geometrías para el análisis por ANSYS Explicit Dynamics

Para poder garantizar una redistribución de esfuerzos en el proceso de doblado y evitar fallas de fragilidad prematuras, se sugiere según expertos que el % mínimo de elongación sea de 20% como se puede constatar con la tabla anterior, este material tiene esta propiedad.

La probeta para doblado, consiste en una pequeña placa de dimensiones de 51 mm x 200 mm, la cual será utilizada en los análisis variando únicamente su espesor.

3.3.1 Comportamiento modelado del material

Existen varios modelos para describir el comportamiento del material, pero a pesar de ello, algunos fenómenos son difíciles de modelar.

El modelado del comportamiento del material en el doblado de la placa se describe principalmente por su relación esfuerzo-deformación. Una representación gráfica de esta relación se muestra en los siguientes diagramas esfuerzo-deformación de la figura 3.9.

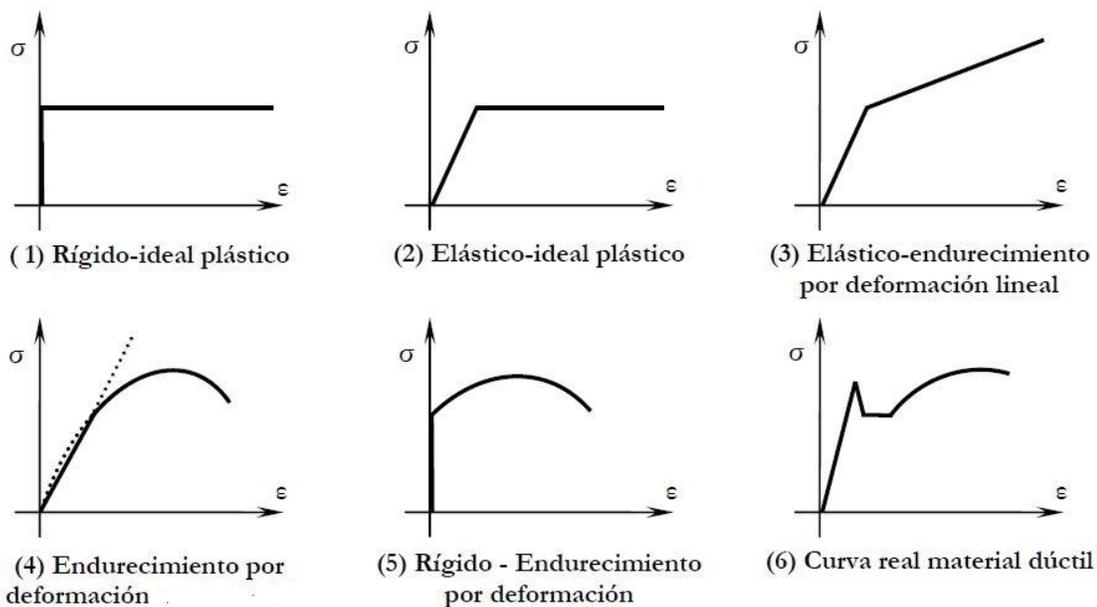


Figura 3.9 Diagramas esfuerzo deformación

Estas gráficas esfuerzo-deformación que se han presentado son las más comunes para describir el comportamiento material en modelos analíticos. Cada material se adapta a un tipo de relación, aunque a veces se realicen simplificaciones de comportamiento, pues resulta más sencillo modelarlo analíticamente.

Para el estudio se utilizará el diagrama (4) de la figura 3.9, donde se puede distinguir tres zonas, una elástica lineal, una región de transición elástico-plástica y finalmente otra con endurecimiento por deformación tal como se muestra en la figura 3.10.

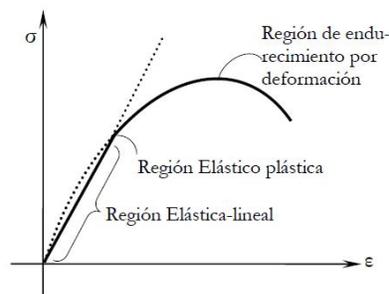


Figura 3.10 Comportamiento del material para el doblado en V

3.3.2 Zona elástica lineal

En la etapa inicial de doblado, las fuerzas que se imponen mediante el punzón son demasiado pequeñas como para causar la deformación plástica de la chapa. Consecuentemente, no existiría deformación plástica si el punzón se retirara durante esta etapa. La cantidad de deformación elástica que se produce cuando la fuerza del punzón está actuando con el módulo de elasticidad (E) del material.

3.3.3 Zona elástico plástica

La transición entre la deformación elástica y la deformación plástica se caracterizan en un punto de transición que está relacionado con el esfuerzo de fluencia del material. En las regiones donde los esfuerzos exceden el esfuerzo de fluencia, localizadas en la superficie de la placa, la deformación plástica se produce primero, y el modelo material aplicable cambia de comportamiento, de elástico a plástico.

3.3.4 Zona con endurecimiento por deformación

Los parámetros Ludwik-Nadai se utilizan para definir la relación esfuerzo-deformación durante la deformación plástica del material. Estos parámetros se pueden encontrar en la relación Ludwik-Nadai o en la ecuación de Swift, a veces referida como Ludwik-Nadai ampliada [2].

Como en lo expuesto en el tema 2.1.4 “Endurecimiento por trabajo en frío” la ecuación es:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (19)$$

$$\sigma_x = k(\varepsilon_0 + \varepsilon_x)^n \quad (20)$$

3.4 Prueba de tensión para obtener n

Para los materiales utilizados en este trabajo de investigación, aceros ASTM A1011-50, ASTM A36, ASTM A572-50, ASTM A572-60, se maquinaron probetas planas para tensión según la norma ASTM E-8. Los ensayos a tensión se realizaron en una máquina marca GALDABINI con capacidad de hasta 60 toneladas. En la figura (3.11) se muestra la máquina.



Figura 3.11 Máquina para ensayos de tensión

Capítulo 4. RESULTADOS

4.1 Aplicación de ANSYS

Para el desarrollo del experimento de manera computacional, se procede a calcular la fuerza a utilizar para los dobleces en cada tipo de material, se realiza un primer cálculo como muestra y después se indica en la tabla 4.1 los restantes.

$$F = \frac{LT^2\sigma_y}{da} \quad (6)$$

Para el material 1.5189 mm ASTM A1011-50 (Esfuerzo de fluencia 345 MPa)

$$F = \frac{\left(345 \times 10^6 \frac{N}{m^2}\right)(51 \times 10^{-3} m)(1.5189 \times 10^{-3} m)^2}{(84 \times 10^{-3} m)} = 483 \text{ N}$$

Tabla 4.1 Fuerzas aplicadas al acero estructural ASTM A-36 con ANSYS

Espesor	Material	Fuerza
1.5189 mm	ASTM A1011-50	483 N
3.0378 mm	ASTM A1011-50	1,933 N
3.4290 mm	ASTM A1011-50	2,463 N
4.7645 mm	ASTM A36	3,418 N
6.3500 mm	ASTM A36	6,071 N
7.9375 mm	ASTM A36	9,487 N
9.5250 mm	ASTM A36	13,661 N
12.7000 mm	ASTM A36	24,286 N
15.8750 mm	ASTM A36	37,946 N
19.0500 mm	ASTM A36	54,643 N

De igual manera en la tabla 4.2 se presentan las fuerzas aplicadas en los dobleces para los aceros de alta resistencia.

Tabla 4.2 Fuerzas aplicadas a los aceros de alta resistencia con ANSYS

Espesor	Material	Fuerza
9.5250 mm	ASTM A572-50	19,279 N
12.7000 mm	ASTM A572-50	34,274 N
15.8750 mm	ASTM A572-50	53,553 N
19.0500 mm	ASTM A572-50	77,117 N
9.5250 mm	ASTM A572-60	23,135 N
12.7000 mm	ASTM A572-60	41,129 N
15.8750 mm	ASTM A572-60	64,264 N
19.0500 mm	ASTM A572-60	92,540 N

Se ha colocado el análisis del material con espesor 3.4290 mm (ASTM A1011-50), para ilustrar los resultados arrojados por ANSYS y después estos serán tabulados en la tabla 4.3.

En la tabla que acompaña a la figura se puede obtener el esfuerzo máximo, el cual es mayor que el esfuerzo de fluencia para el material. (439 MPa > 345 MPa):

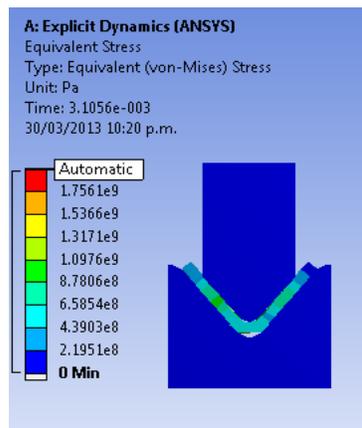


Figura 4.1 Esfuerzo Máximo en el doblado del acero ASTM A1011-50

En la figura 4.2 se ilustra el mallado para el doblado que utiliza el software ANSYS.

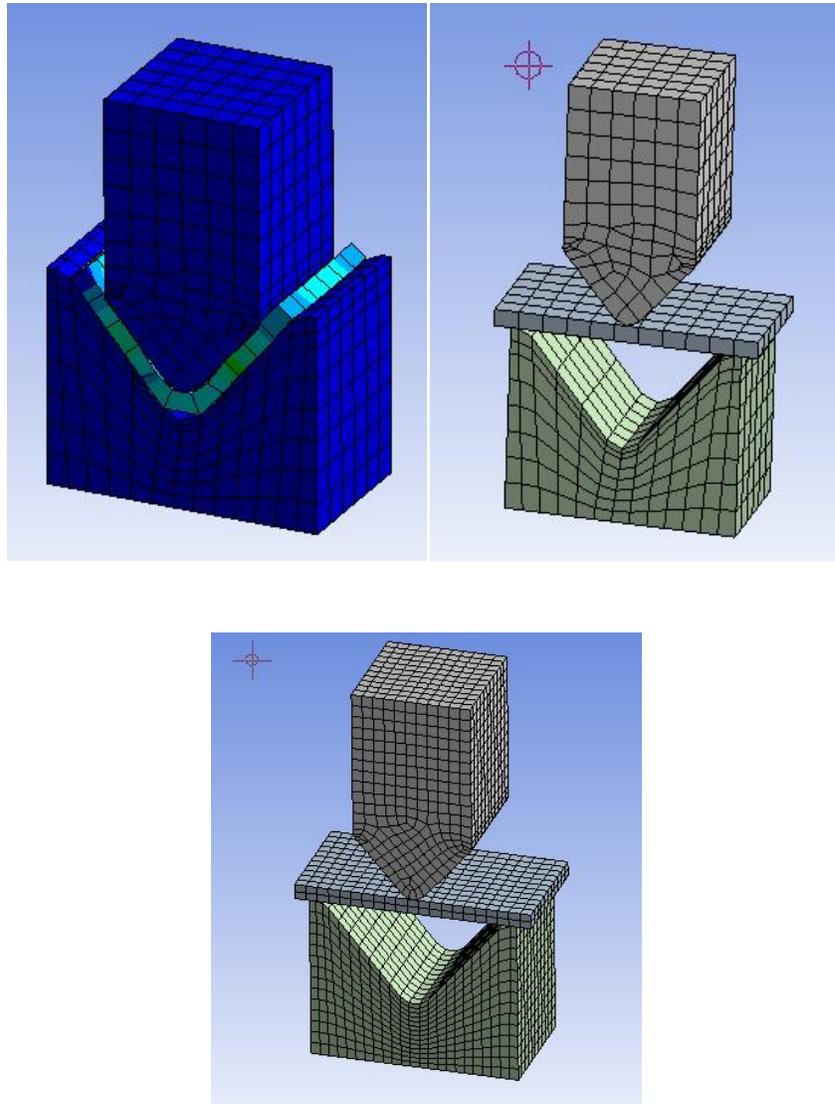


Figura 4.2 Mallados para el doblado

Durante la realización de la simulación el uso de uno o dos elementos en la discretización representa una varianza del 0.3% en la ubicación de la fibra neutra del material.

En la tabla 4.3 se muestran los esfuerzos máximos obtenidos por ANSYS en la prueba de doblado.

Tabla 4.3 Esfuerzos Máximos obtenidos con ANSYS Explicit Dynamics

Espesor	Material	$\sigma_{Máx}$
1.5189 mm	ASTM A1011-50	483 N
3.0378 mm	ASTM A1011-50	1,933 N
3.4290 mm	ASTM A1011-50	2,463 N
4.7645 mm	ASTM A36	3,418 N
6.3500 mm	ASTM A36	6,071 N
7.9375 mm	ASTM A36	9,487 N
9.5250 mm	ASTM A36	13,661 N
12.7000 mm	ASTM A36	24,286 N
15.8750 mm	ASTM A36	37,946 N
19.0500 mm	ASTM A36	54,643 N
9.5250 mm	ASTM A572-50	19,279 N
12.7000 mm	ASTM A572-50	34,274 N
15.8750 mm	ASTM A572-50	53,553 N
19.0500 mm	ASTM A572-50	77,117 N
9.5250 mm	ASTM A572-60	23,135 N
12.7000 mm	ASTM A572-60	41,129 N
15.8750 mm	ASTM A572-60	64,264 N
19.0500 mm	ASTM A572-60	92,540 N

Estos valores sirven para verificar que el análisis de doblado, se elaboró de manera correcta y además permite obtener una pieza con doblado en L, sobre la cual ahora se

aplicará un análisis dimensional y se utilizará la fórmula de desdoblado para calcular la fibra neutra en cada espesor y cada tipo de material.

La fórmula 3 del capítulo 2 sirve para poder determinar la ubicación del factor K en las diferentes muestras. Se está partiendo de que el doblado se aplica exactamente a la mitad de nuestra pieza, esto se comprueba en ANSYS, es por ello que se obtiene una pieza doblada en L con ambos lados (patines) iguales mostrada en la figura 4.3.

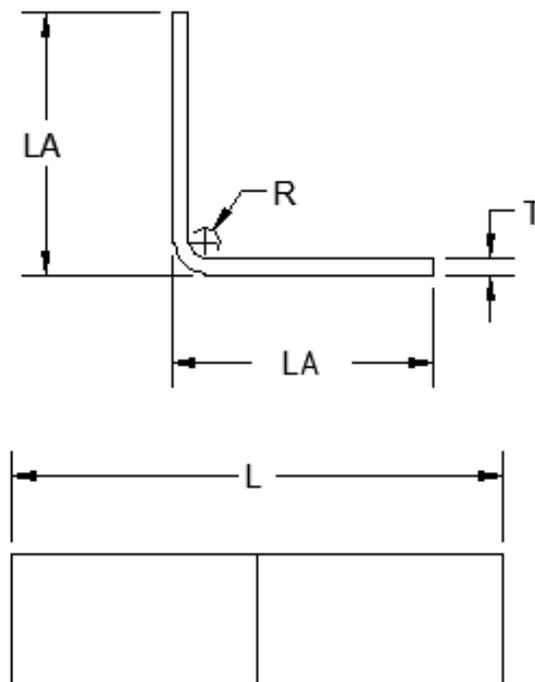


Figura 4.3 Variables para obtener el factor K

La tabla 4.4 presenta los valores del factor K obtenidos por el software ANSYS Explicit Dynamics.

Tabla 4.4 Ubicación del factor K, basado en ANSYS:

Espesor	Material	K
1.5189 mm	ASTM A1011-50	0.29
3.0378 mm	ASTM A1011-50	0.33
3.4290 mm	ASTM A1011-50	0.31
4.7645 mm	ASTM A36	0.32
6.3500 mm	ASTM A36	0.33
7.9375 mm	ASTM A36	0.33
9.5250 mm	ASTM A36	0.33
12.7000 mm	ASTM A36	0.33
15.8750 mm	ASTM A36	0.50
19.0500 mm	ASTM A36	0.50
9.5250 mm	ASTM A572-50	0.34
12.7000 mm	ASTM A572-50	0.36
15.8750 mm	ASTM A572-50	0.50
19.0500 mm	ASTM A572-50	0.50
9.5250 mm	ASTM A572-60	0.36
12.7000 mm	ASTM A572-60	0.36
15.8750 mm	ASTM A572-60	0.50
19.0500 mm	ASTM A572-60	0.50

Las siguientes gráficas correspondientes a las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran el comportamiento del factor K. Las gráficas se obtuvieron aplicando el software ANSYS Explicit Dynamic.

La ubicación de la fibra neutra a través de ANSYS se realizó exportando la geometría 2D a un archivo de AutoCAD, para aplicar un trazo de puntos a través de ella y generar una representación 2D de la pieza doblada, con esto se obtiene el valor de la longitud del patín L_A y mediante la fórmula (3), se obtiene K.

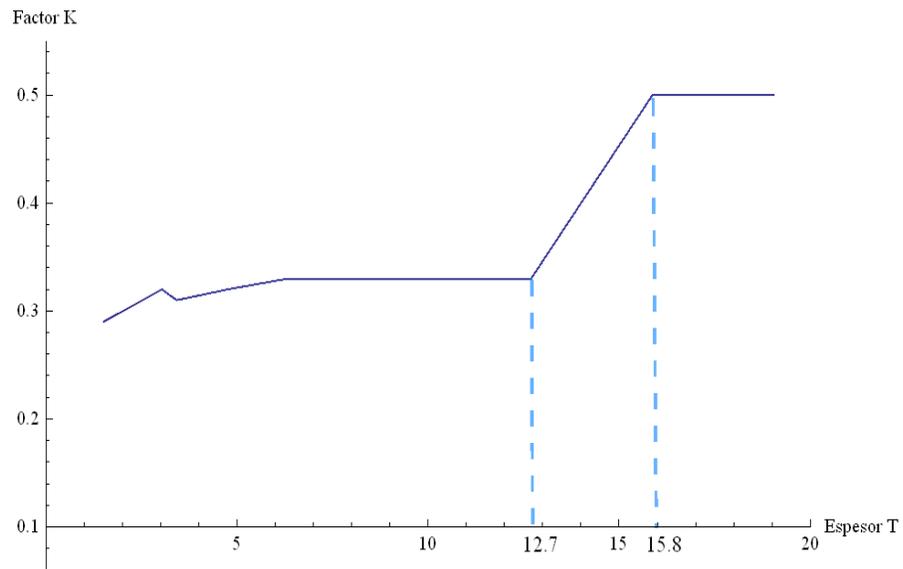


Figura 4.4 Ubicación del Factor K ANSYS –acero estructural-

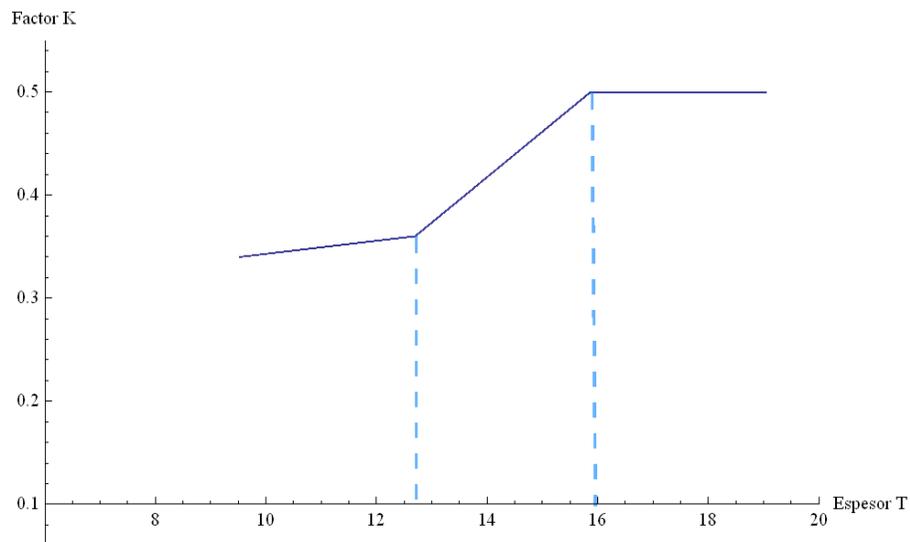


Figura 4.5 Ubicación del Factor K ANSYS –acero ASTM 572 GR50-

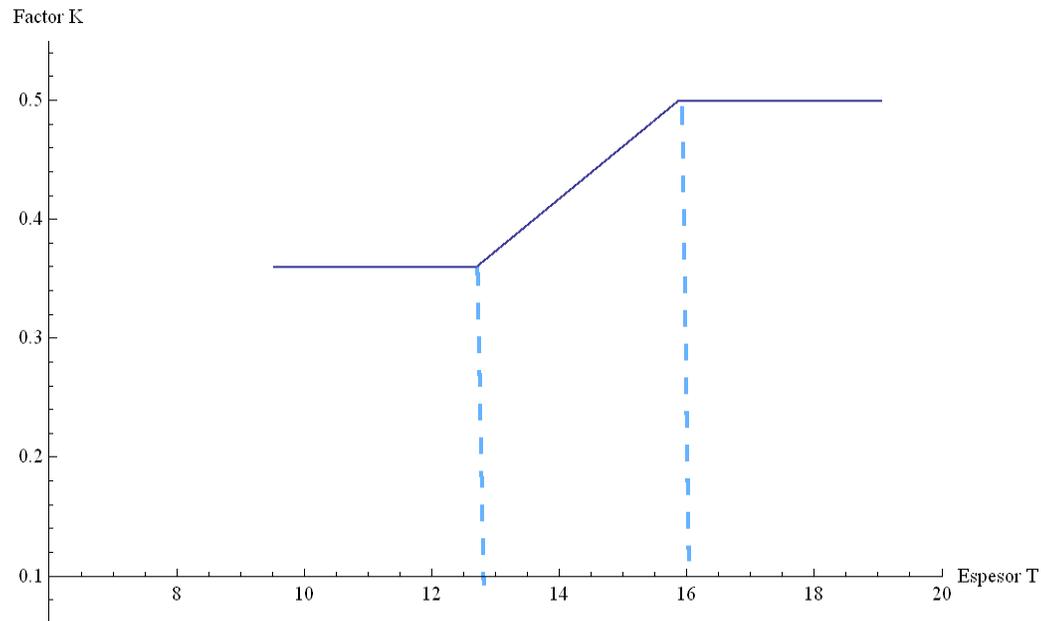


Figura 4.6 Ubicación del Factor K ANSYS –acero ASTM 572 GR60-

4.1.1 Análisis de resultados en ANSYS

Las gráficas obtenidas por ANSYS Explicit Dynamics muestran los cambios del factor K, pero se observan 3 etapas básicamente; la primera con valores ligeramente por encima de 0.3 para valores de espesor de lámina y placa inferiores ó iguales a 12.7 mm (1/2"); la segunda que muestra el ascenso de K 0.3 a 0.5 para valores de espesor de placas de 12.7 mm (1/2") a ligeramente mayores de 16 mm (41/64") y por último para placas superiores a los 15.8 mm (5/8") el factor K permanece constante alrededor de 0.5.

4.2 Plegados en dobladora MEISTER

Se realizó experimentación física en el laboratorio de manufactura del Instituto Tecnológico de Pachuca, en el material de acero estructural, hasta un espesor de 4.76 (3/16”), con lo cual se pudieron comprobar los primeros datos arrojados por ANSYS.

Los demás resultados únicamente son los arrojados por el programa, tanto en espesores mayores a 4.76 mm en acero estructural y a partir de 9.52 mm en acero de alta resistencia.

De las pruebas físicas de las láminas de los diferentes aceros especificados en las tablas 3.1 y con las placas de 51 x 200 mm y espesores hasta 4.76 mm (3/16”) que se realizaron en la dobladora MEISTER y con la ayuda de la ecuación 3 del capítulo 2, se obtuvieron los diferentes valores de K que se presentan en la tabla 4.5

Tabla 4.5 Ubicación del factor K , basado en experimentación física:

Espesor	Material	K
1.5189 mm	ASTM A1011-50	0.30
3.0378 mm	ASTM A1011-50	0.29
3.4290 mm	ASTM A1011-50	0.31
4.7645 mm	ASTM A36	0.31
6.3500 mm	ASTM A36	0.31
7.9375 mm	ASTM A36	0.33
9.5250 mm	ASTM A36	0.33
12.7000 mm	ASTM A36	0.33
15.8750 mm	ASTM A36	0.50

Tabla 4.5 continuación

19.0500 mm	ASTM A36	0.50
9.5250 mm	ASTM A572-50	0.31
12.7000 mm	ASTM A572-50	0.33
15.8750 mm	ASTM A572-50	0.50
19.0500 mm	ASTM A572-50	0.50
9.5250 mm	ASTM A572-60	0.34
12.7000 mm	ASTM A572-60	0.34
15.8750 mm	ASTM A572-60	0.50
19.0500 mm	ASTM A572-60	0.50

Con los datos obtenidos de los dobleces de lámina y placas en la experimentación física a continuación se presentan de manera gráfica en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9

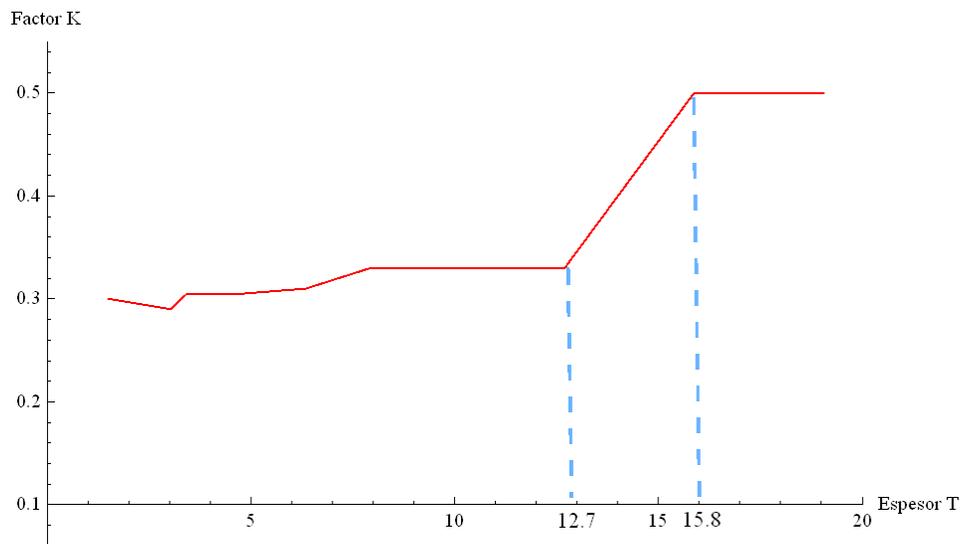


Figura 4.7 Ubicación del Factor K Dobladora–acero estructural-

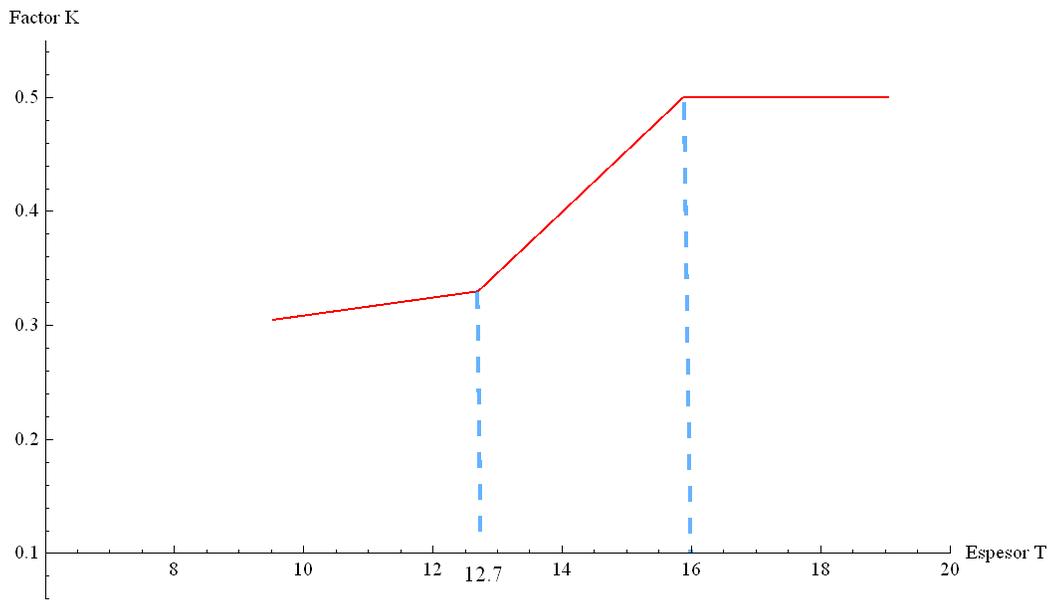


Figura 4.8 Ubicación del Factor K Dobladora –acero ASTM 572 GR50-

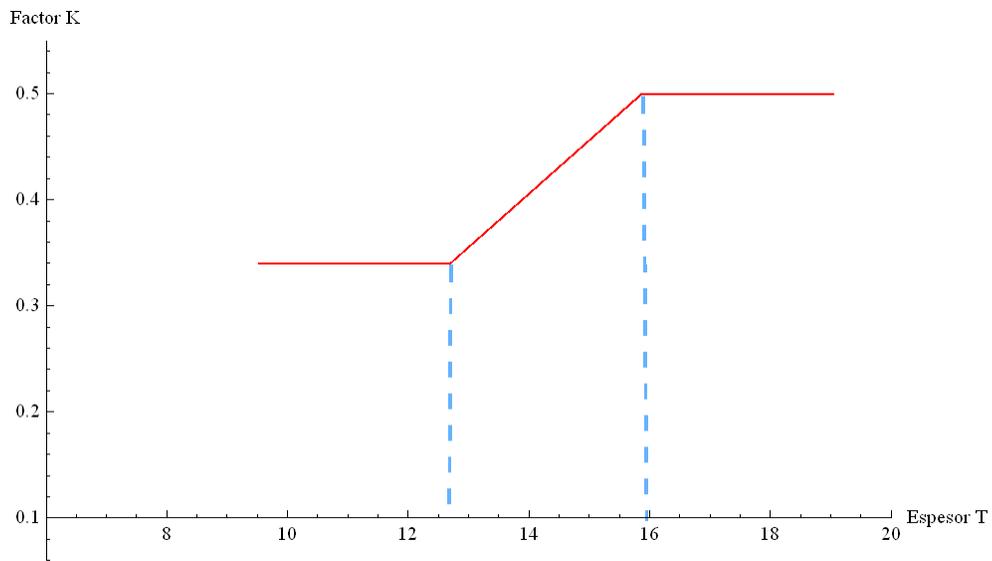


Figura 4.9 Ubicación del Factor K Dobladora –acero ASTM 572 GR60-

4.2.1 Análisis de resultados experimentales

Casi de manera similar a los resultados por ANSYS, los resultados por experimentación física, muestran la misma tendencia, donde básicamente exhiben 3 etapa: la primera con valores de K de 0.3 hasta espesores menores o iguales a 12.7 mm (1/2"); la segunda que indica el ascenso de K de 0.3 a 0.5 y la última donde se estabiliza con valores de K de 0.5.

4.3 Discusión de resultados de K por ANSYS y por experimentación física

A continuación en las 3 figuras siguientes (4.10, 4.11 y 4.12) se presentan las gráficas de los resultados de valores de K para los aceros estructural, ASTM A572 GR50 y ASTM A572 GR60.

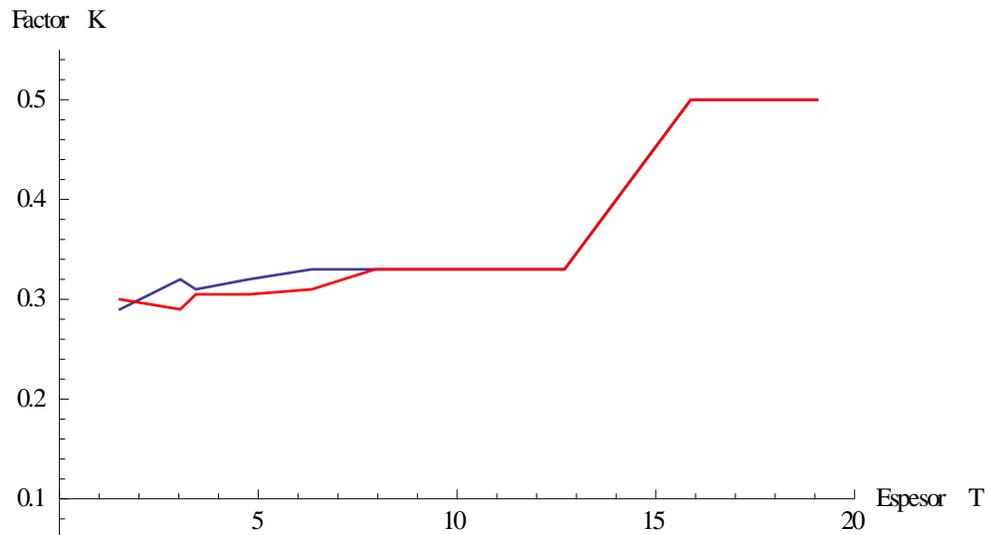


Figura 4.10 Gráficas del Factor K –acero Estructural-

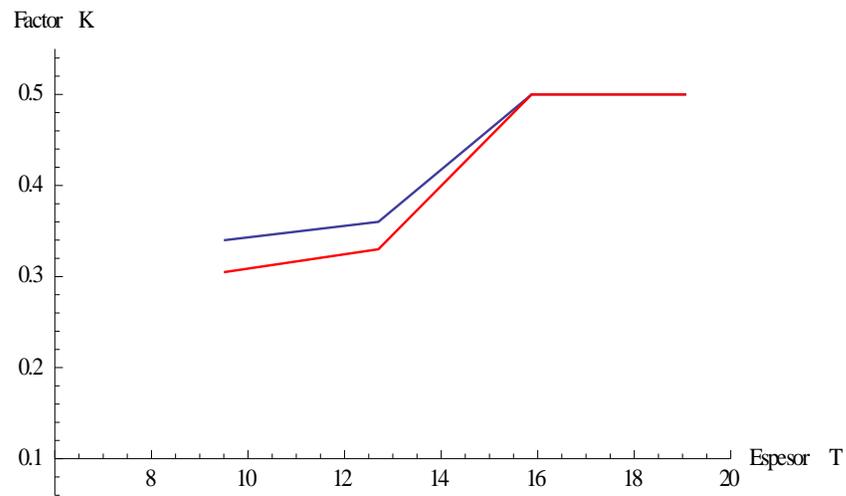


Figura 4.11 Gráficas del Factor K –acero ASTM 572 GR50-

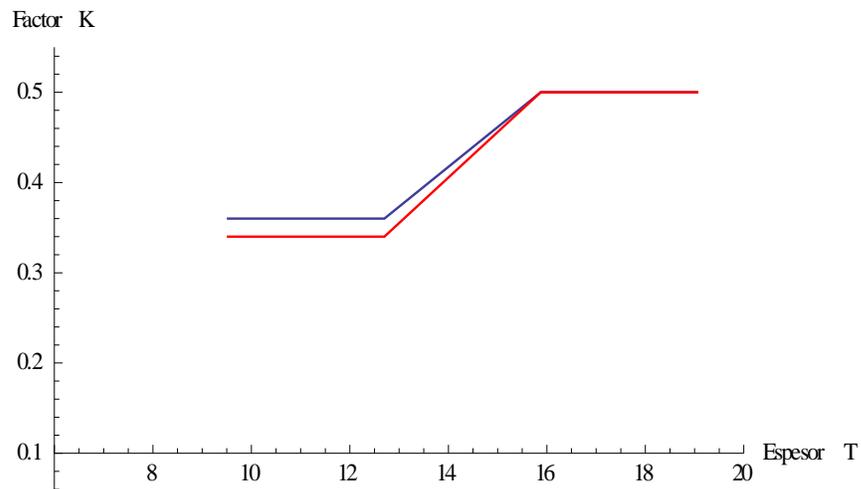


Figura 4.12 Gráficas del Factor K –acero ASTM 572 GR50-

Después de analizar las tendencias de las gráficas, se puede concluir que en la tercera etapa para valores de K alrededor de 0.5 no existe variación entre los resultados de ANSYS y la experimentación física.

En la primera etapa donde K es igual o ligeramente superior a 0.3 si existen algunas discrepancias pero son mínimas y ya por último en la zona de ascenso de K, se minimiza la variación de K.

CAPÍTULO 5. APLICACIONES

5.1 Caso práctico I: Gabinete Eléctrico

Aplicando lo desarrollado en este trabajo se va a calcular el desplegado práctico de este diseño de gabinete eléctrico de uso en sistema ferroviario tal como se observa en figuras 5.1a y 5.1b. Cuyo espesor de lámina es de 2.31 mm.

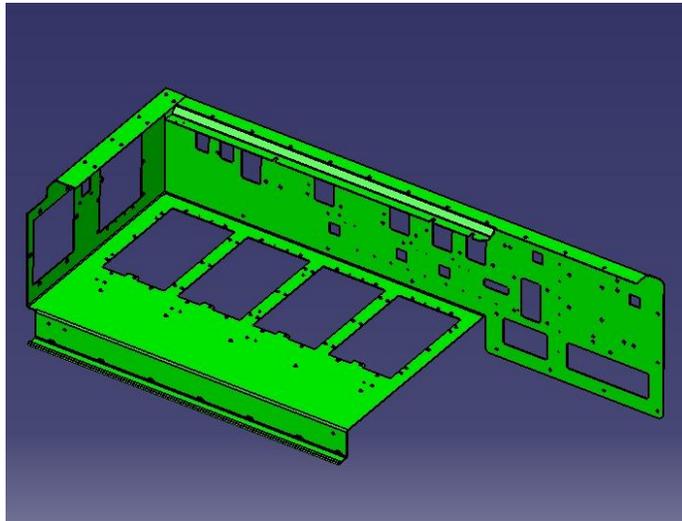


Figura 5.1a Gabinete eléctrico

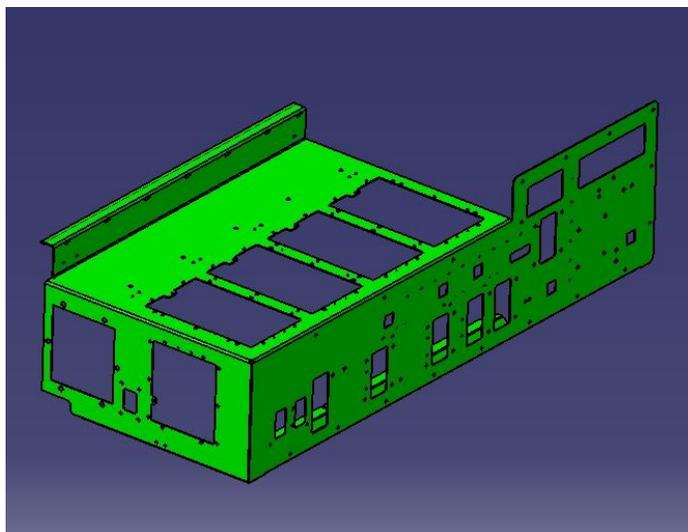


Figura 5.1b Gabinete eléctrico

5.1.1 Dimensiones importantes

En la figura 5.2 se colocan las dimensiones más importantes para el ensamble correcto de este diseño.

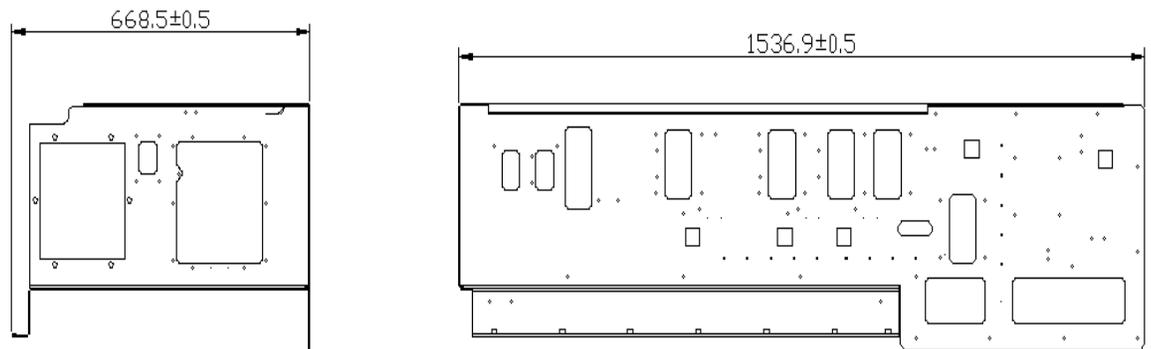


Figura 5.2 Dimensiones críticas del gabinete eléctrico

Considerando los datos arrojados en este trabajo, se calculará la plantilla de corte con la indicación de los centros de golpe de la herramienta como se observa en figura 5.3.

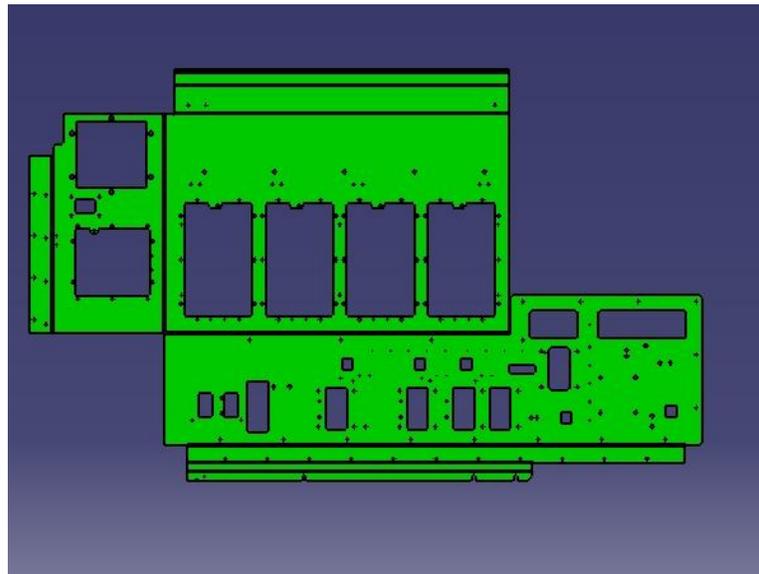


Figura 5.3 Plantilla de corte del gabinete eléctrico

5.1.2 Cálculo del desarrollo empleando el factor K

Cálculo del desarrollo del ancho del gabinete:

Utilizando la fórmula 1 (capítulo 1):

$$L_b = \alpha (R + KT) \quad (\text{en radianes})$$

$$L_b = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT) \quad (\text{en grados})$$

Donde L_b será la longitud de las holguras de doblado, es decir el arco contenido en la zona de la fibra neutra.

En la figura 5.4 se muestra cada una de las longitudes rectas sin contemplar la holgura contenida en los radios.

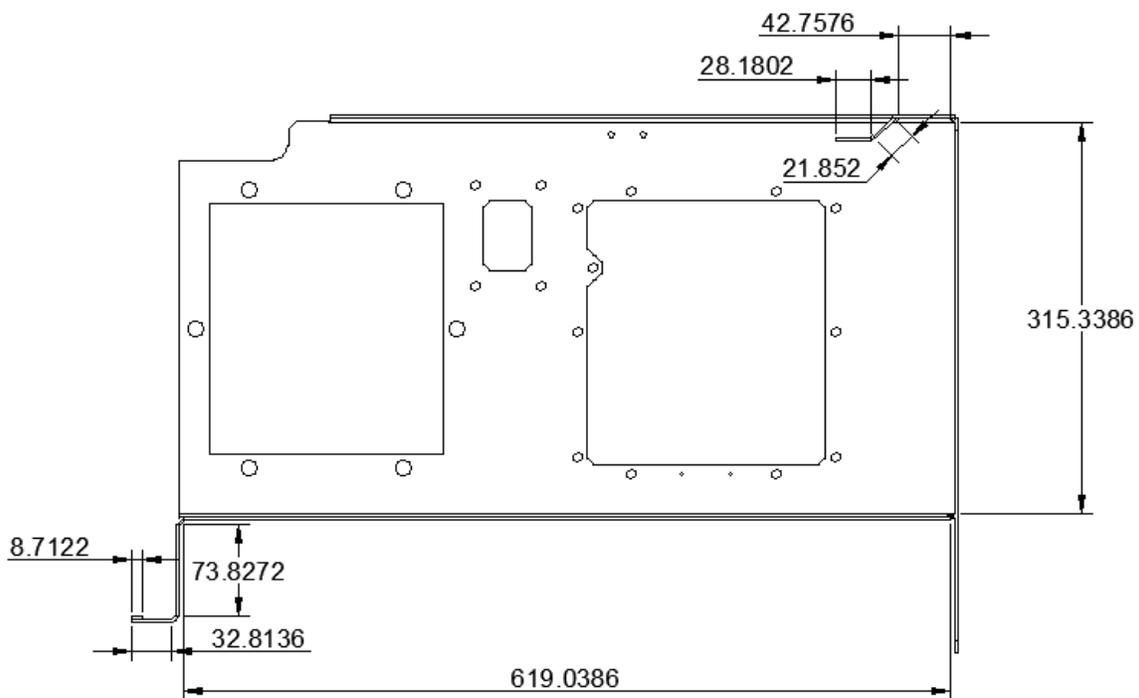


Figura 5.4 Cálculo de las partes rectas del desarrollo del ancho del gabinete

Calculo de partes rectas:

$$\text{Longitudes rectas} = 8.7122 + 32.8136 + 73.8272 + 619.0386 + 315.3565 + 42.7572 + 21.8520 + 28.1802 = 1142.5365 \text{ mm}$$

Cálculo de holguras de dobléz a la tercera parte (T/3):

Ahora a las partes rectas se le adiciona las holguras de dobléz indicadas en la figura 5.5.

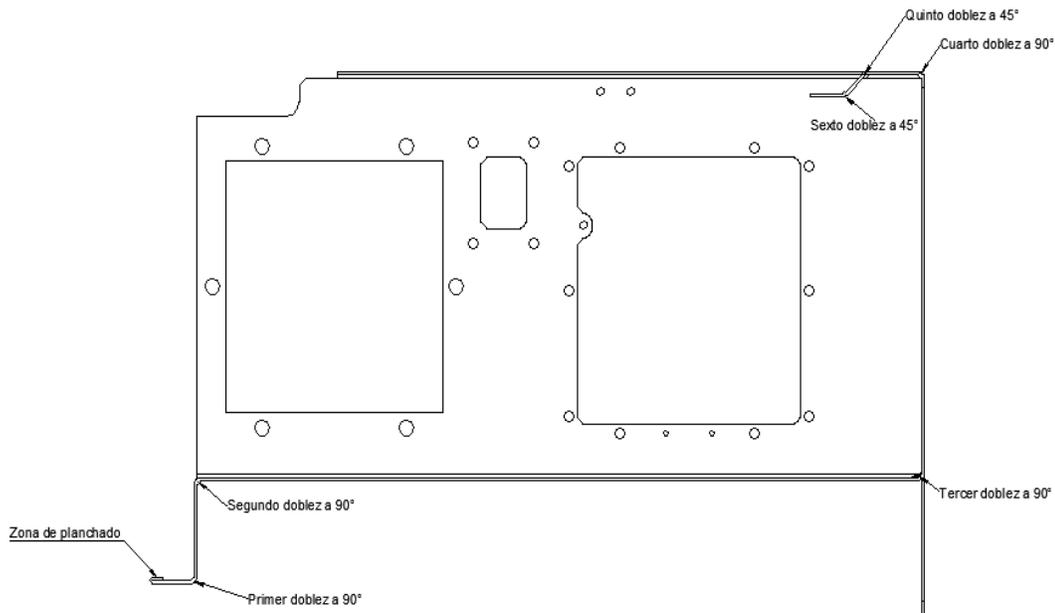


Figura 5.5 Indicación de holguras de dobléz

Primero se calcula el primer planchado:

$$L_{b1} = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT) = \frac{\pi}{180} (90)(0.2 + (0.33)2.31)2 = 3.0231 \text{ mm}$$

Ahora la holgura de cuatro dobléces iguales a 90 grados:

$$L_{b2} = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT) = \frac{\pi}{180} (90)(3.175 + (0.33)2.31) = 6.1847 \text{ mm}$$

Ahora la holgura de dos dobleces iguales a 45 grados:

$$L_{b2} = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT) = \frac{\pi}{180} (45)(3.175 + (0.33)2.31) = 3.0923 \text{ mm}$$

El cálculo total del desarrollo longitudinal es: $1142.5365 + 3.0231 + (6.1847) \times 4 + (3.0923) \times 2 = 1176.4830 \text{ mm}$

Cálculo del desarrollo longitudinal.

Primero se calcula las partes rectas tal como se ilustra en figura 5.6.

Utilizando la fórmula (1):

$$L_b = \alpha (R + KT)$$

$$L_b = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT)$$

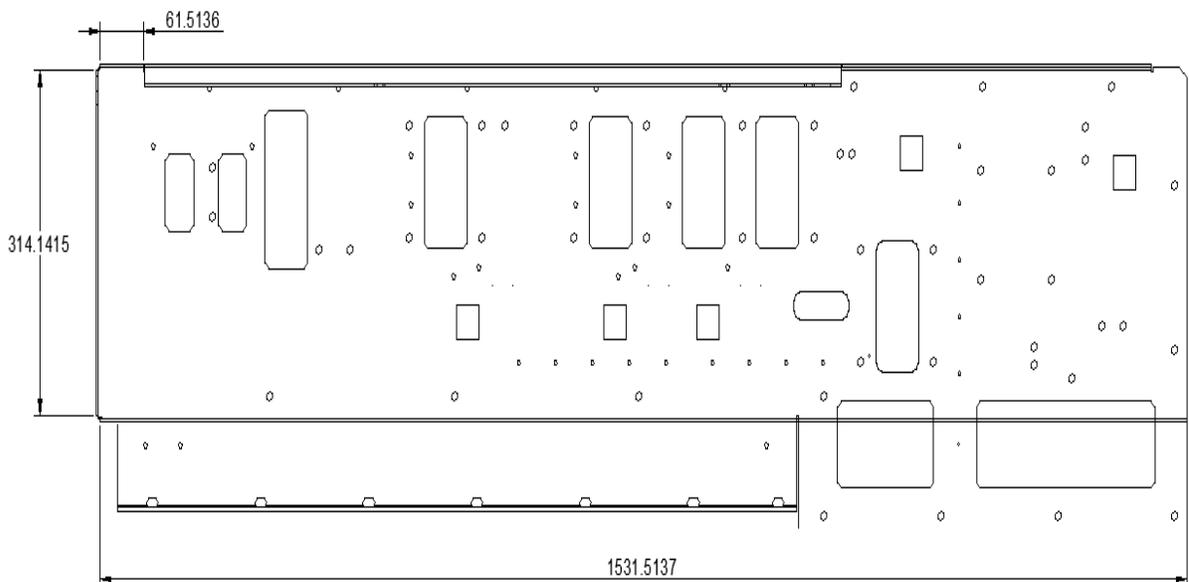


Figura 5.6 Cálculo de las partes rectas del desarrollo longitudinal

Calculo de partes rectas:

$$\text{Longitudes rectas} = 1531.5137 + 314.1415 + 61.5136 = 1907.1688 \text{ mm}$$

Cálculo de holguras de dobléz a la tercera parte tal como se ilustra en figura 5.7.

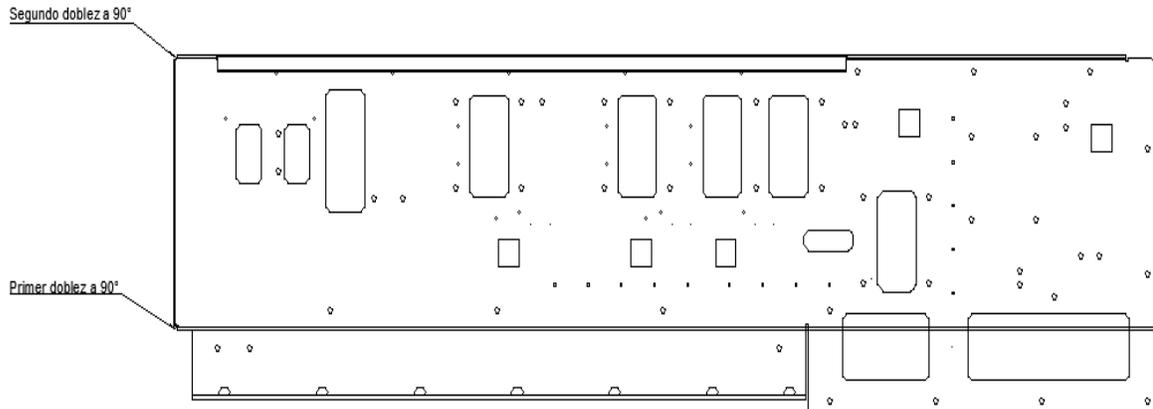


Figura 5.7 Indicación de holguras de dobléz

Ahora la holgura de dos dobleces iguales a 90 grados:

$$L_{b2} = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT) = \frac{\pi}{180} (90)(3.175 + (0.33)2.31) = 6.1847 \text{ mm}$$

El cálculo total del desarrollo a lo ancho es:

$$1907.1688 + (6.1847) \times 2 = 1919.5382 \text{ mm}$$

Con las medidas obtenidas se procede a colocar las medidas para el corte del material, es decir la plantilla de corte de la pieza para que al doblarse quede en las dimensiones y tolerancias indicadas en el dibujo de diseño.

Las dimensiones obtenidas han sido a una tercera parte del material, utilizando para ello los valores obtenidos en la tabla 4.4, para un acero del tipo ASTM A1011-50 ($K=0.33$), posteriormente se calculo empleando un valor de $K=0.50$, con el fin de observar las diferencias que provoca e ocupar un distinto factor de K para calcular las plantillas de corte.

La plantilla de corte calculada a la tercera parte del espesor del material arroja las siguientes dimensiones indicadas en figura 5.8.

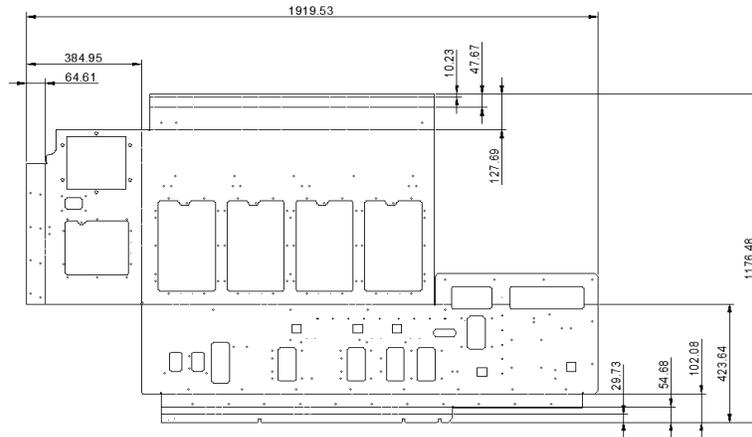


Figura 5.8 Plantilla con factor $K=0.33$

La plantilla de corte calculada a la mitad del espesor del material arroja las siguientes dimensiones indicadas en figura 5.9.

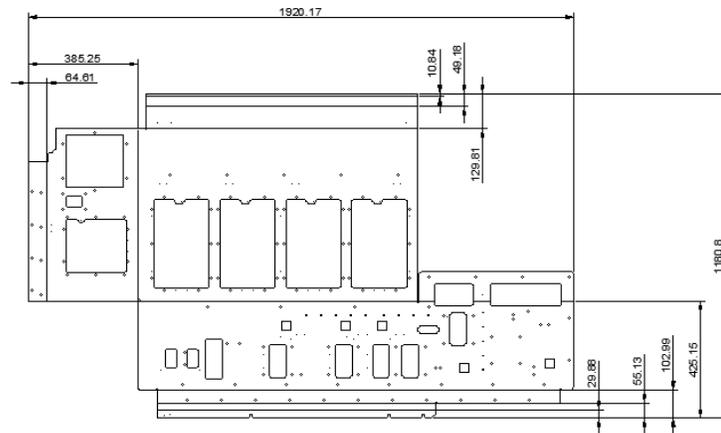


Figura 5.9 Plantilla con factor $K=0.50$

Se concluye que el uso correcto del factor K (en este caso de 0.33) para el corte de la plantilla del gabinete eléctrico permite obtener una pieza en dimensiones reales, con una diferencia de 1.5 mm en largo y ancho, respecto al uso del factor K a 0.50, el uso del factor K según la tabla 4.4 permite realizar cálculos precisos en el doblado.

5.2 Caso Práctico II: Soporte Eléctrico

Calcular el desarrollo práctico de este diseño de soporte eléctrico de uso en sistema ferroviario de espesor 1.5 mm, tal como se muestra en la figura 5.10a y 5.10b.

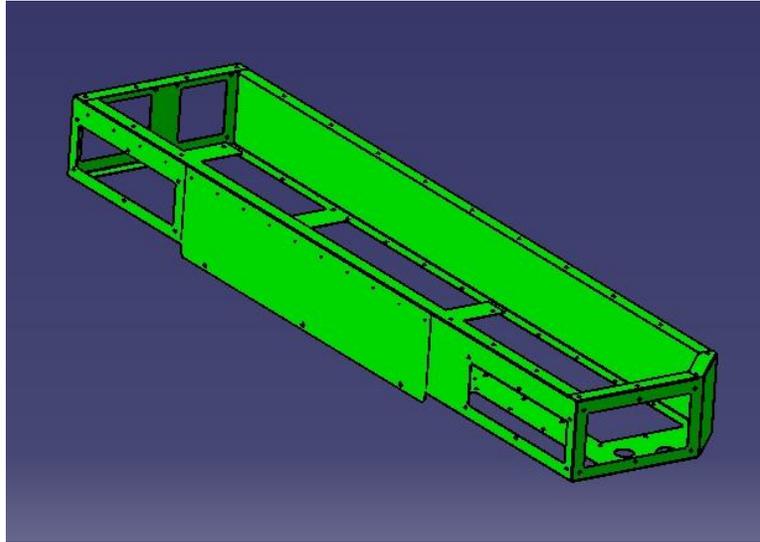


Figura 5.10a Soporte eléctrico

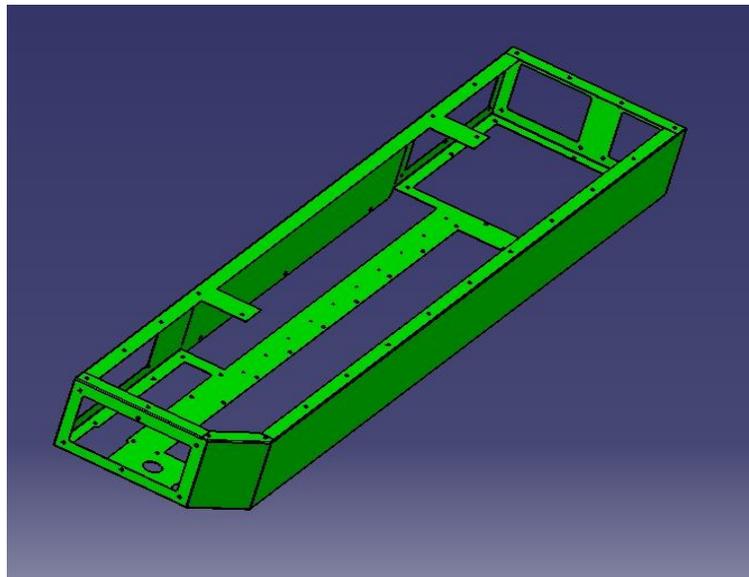


Figura 5.10b Soporte eléctrico

5.2.1 Dimensiones importantes

En la figura 5.11 se colocan las dimensiones más importantes.

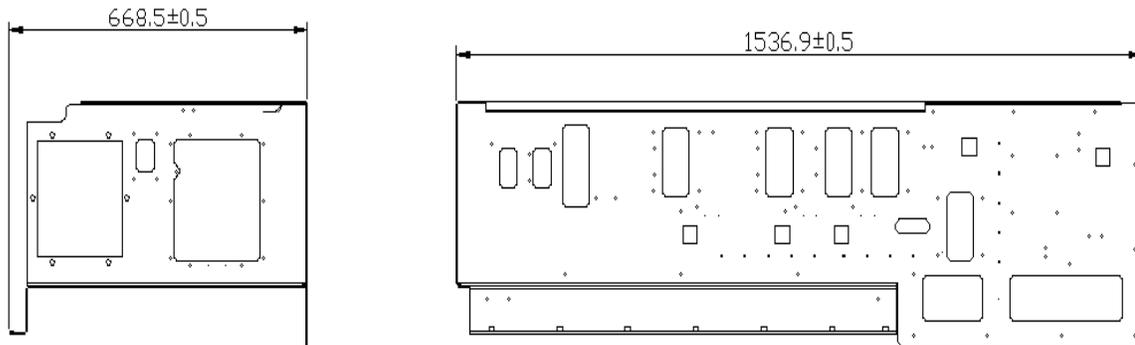


Figura 5.11 Dimensiones críticas del soporte eléctrico

Se necesita la plantilla de corte con la indicación de los centros de golpe de a herramienta, tal como se indica en figura 5.12.

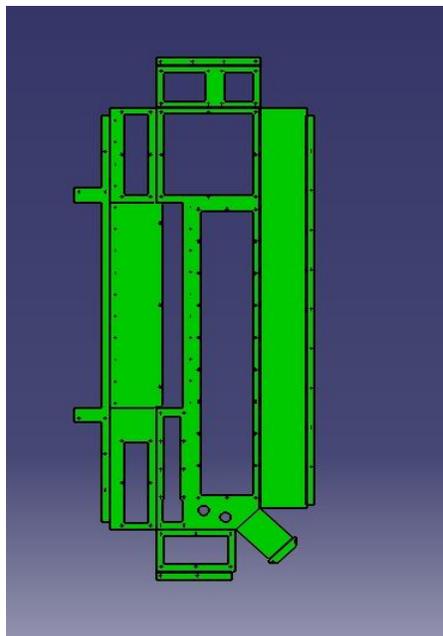


Figura 5.12 Plantilla de corte del soporte eléctrico

5.2.2 Cálculo del desarrollo empleando el factor K

Cálculo del desarrollo longitudinal:

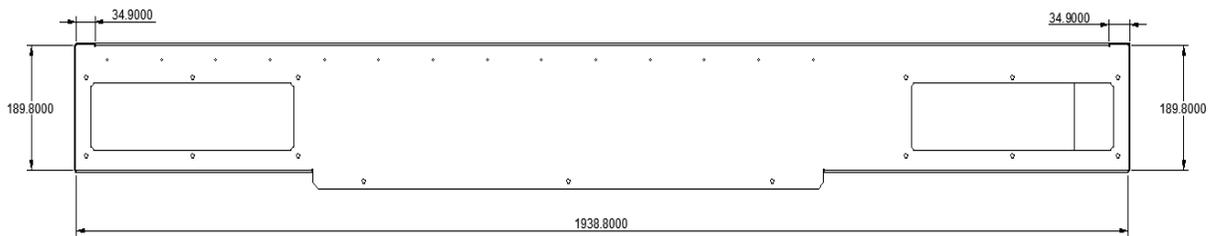
Utilizando la fórmula 1:

$$L_b = \alpha (R + KT)$$

$$L_b = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT)$$

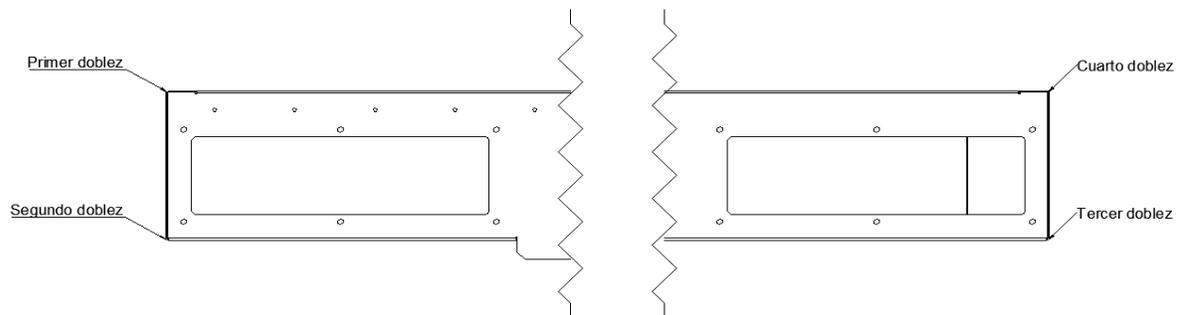
Cálculo de partes rectas, tal como se muestra en figura 5.13.

$$\text{Longitudes rectas} = 34.9000 + 189.8000 + 1938.8000 + 189.8000 + 34.9000 = 2388.2000 \text{ mm}$$



5.13 Cálculo de las partes rectas del desarrollo longitudinal

Cálculo de holguras de doblado a la tercera parte (T/3) tal como se indica en figura 5.14.



5.14 Indicación de holguras de doblado

Holgura de cuatro dobleces iguales a 90 grados:

$$L_{b2} = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT) = \frac{\pi}{180} (90)(1.6 + (0.33)1.5) = 3.2908 \text{ mm}$$

El cálculo total del desarrollo longitudinal es: $2388.2000 + (3.2908) \times 4 = 2401.3633 \text{ mm}$

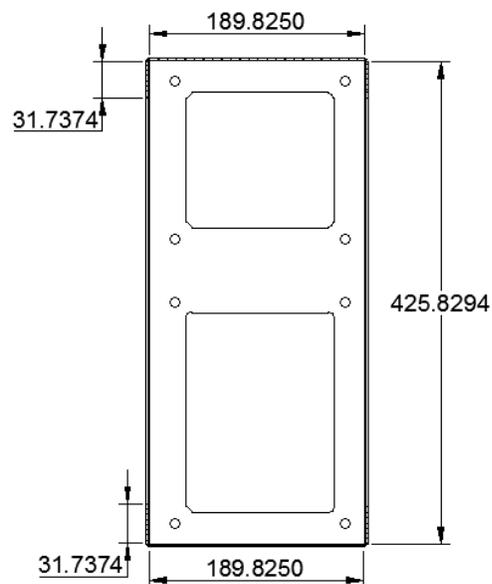
Cálculo del desarrollo a lo ancho:

Utilizando la fórmula 1:

$$L_b = \alpha (R + KT)$$

$$L_b = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT)$$

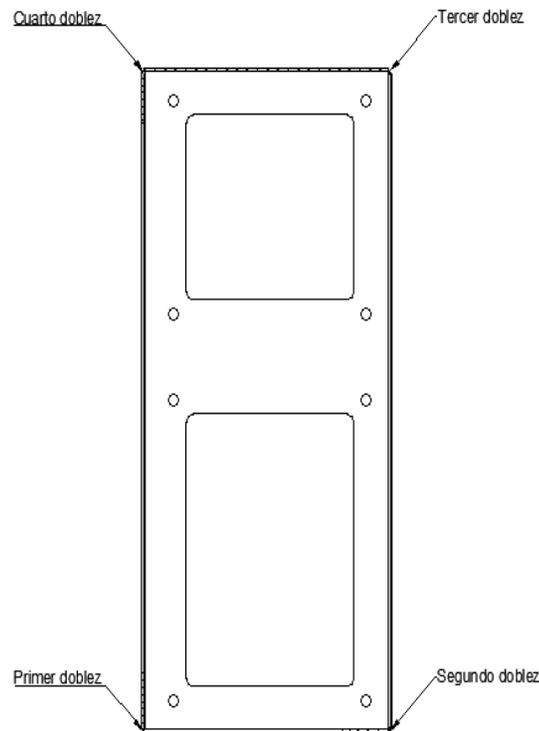
Calculo de partes rectas tal como se muestra en figura 5.15.



5.15 Calculo de las partes rectas del ancho del gabinete

Longitudes rectas = 31.7374 + 189.8250 + 425.8294 + 189.8248 + 144.9125 = 982.1291 mm

Cálculo de holguras de doblado a la tercera parte (T/3) tal como se muestra en figura 5.16.



5.16 Indicación de holguras de doblado

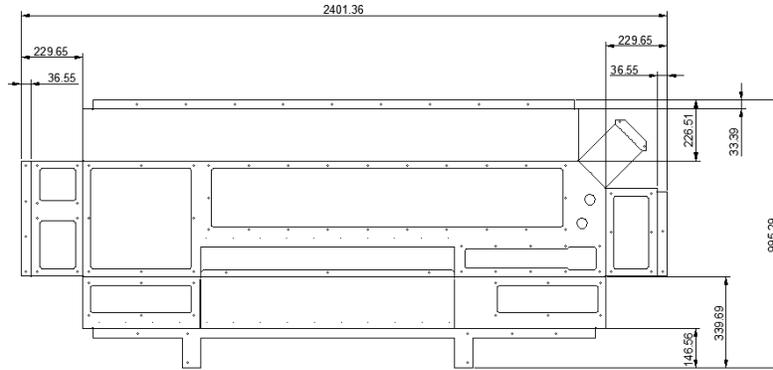
Ahora la holgura de cuatro dobleces iguales a 90 grados:

$$L_{b2} = \frac{\pi}{180} \theta (R + KT) = \frac{\pi}{180} (90)(1.6 + (0.33)1.5) = 3.2908 \text{ mm}$$

El cálculo total del desarrollo a lo ancho es:

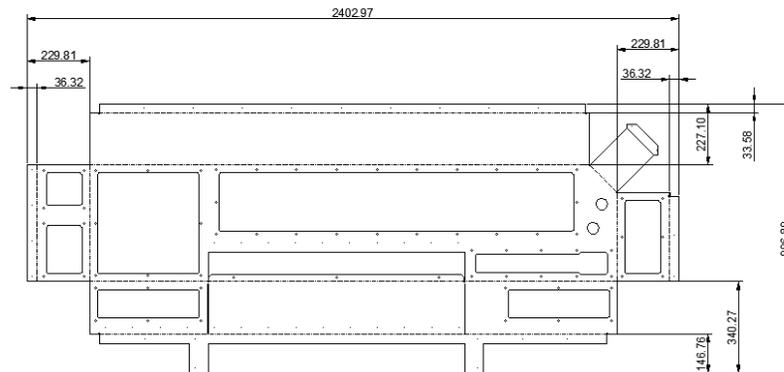
$$982.1291 + (3.2908) \times 4 = 995.2923 \text{ mm}$$

La plantilla de corte calculada a la tercera parte del espesor del material arroja las siguientes dimensiones indicadas en figura 5.17.



5.17 Plantilla con factor $K=0.33$

La plantilla de corte calculada a la mitad del espesor del material arroja las siguientes dimensiones indicadas en figura 5.18.



5.18 Plantilla con factor $K=0.50$

Se concluye que el uso correcto del factor K (en este caso de 0.33) para el corte de la plantilla del gabinete eléctrico permite obtener una pieza en dimensiones reales, con una diferencia de 1.6 mm en largo y ancho respecto al uso del factor K a 0.50, el uso del factor K según la tabla 4.4 permite realizar cálculos precisos en el doblado.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

Después de haber trabajado con el proceso de doblez y la ubicación de la fibra neutra con diferentes aceros, se tienen las siguientes conclusiones:

Se desarrolló un modelo en el paquete ANSYS, para poder obtener la ubicación de la fibra neutra del acero estructural y de alta resistencia, dentro del proceso de doblado en V. Este modelo ha sido validado por medio de la experimentación física en una dobladora Meister del Instituto Tecnológico de Pachuca.

Se han obtenido respectivamente tablas del modelo y otra del proceso físico, las cuales indica lo que el modelo de ANSYS es bastante preciso en los siguientes casos:

- En el acero estructural ASTM A36, para un espesor mayor a 6 mm
- Para los aceros de alta resistencia ASTM A572GR50 y ASTM A572GR60 siguen un mismo patrón de comportamiento, pero solo se igualan los valores de K hasta un espesor de 16 mm
- En el acero de alta resistencia ASTM A572GR60 sigue un mismo patrón de comportamiento, pero solo se igualan los valores de K hasta un espesor de 16 mm.
- Los aceros ASTM A36, ASTM A572GR50 y GR60, muestran 3 etapas de valor K: una para espesores menores o iguales a 12.7 mm (1/2") con $K=0.3$, la segunda donde se incrementa de 0.3 a 0.5 para espesores mayores de 12.7 mm y menores a 16.5 mm y la tercera con $K=0.5$ para espesores de placa superiores a 16.5 mm.

Para poder predecir la manera en la que se comportará el material en algún proceso de manufactura, en este caso el doblado, el software ANSYS se considera fiable para un primer intento de realizar prototipos rápidos y económicos.

Se concluye que el paquete de elementos finitos muestra una relación bastante cercana a la realidad y se puede utilizar para poder predecir la ubicación de la fibra neutra en los aceros.

6.2 Trabajos futuros

Las líneas de trabajo futuras, pueden estar principalmente encaminadas a obtener el factor K en el proceso de doblado en V para el acero inoxidable y el aluminio; así mismo se pueden obtener el factor K para procesos diferentes, como lo es el doblado al aire, el embutido profundo y el rolado.

Se puede realizar un trabajo utilizando procesos de doblado complejos, en los cuales un factor importante que puede afectar el valor K es el retroceso elástico y las condiciones si es que se realiza el trabajo en frío o en caliente.

Se pueden analizar a futuro cuestiones más precisas aún como lo es el adelgazamiento de las placas durante el doblado.

Un estudio bastante interesante sería el análisis del proceso de manufactura de placas de gran espesor como las utilizadas para las embarcaciones y tanques sometidos a presión.

Bibliografía

1. ASM Handbook Vol.14 Forming and Forging. ASM International 9th Edition, 1988.
2. L.J. de Vin, A.H. Streppel. A process model for air bending. Journal of Materials Processing Technology. 1994.
3. Luisa F. Castro Patiño. Condiciones Técnicas para un correcto doblado. Metal Actual. 2010.
4. Robert W. Fitzgerald. Mecánica de Materiales. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A.. 2da. Edición. 1984
5. Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu. Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth Heinemann. 2da. Edición. 2002.
6. Kalpakjian, Schmid. Manufacturing Processes for Engineering Materials. 5th. Ed. Pearson Education. 2008.
7. Sheet Metal Parameters. MEF Simulación. www.mefsimulacion.com.
8. Mikell P. Groover. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall. 1997.
9. Doyle, Keyser, Singer.; Procesos de Manufactura y Materiales Para Ingenieros; Ed. Diana, 1980, 19 Edición.
10. Lange, K. Modern metal forming technology for industrial production. Journal of Materials Processing Technology. 1997.
11. Dr. Partchapol Sartuklvanch. Investigando la recuperación elástica. Stamping journal. 2009

12. S.V. Mohammadi, M.H. Parsa. Effect of the thickness distribution and setting condition on springback in multi-layer sheet bending. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011
13. Wang Rui. George LotharThimm. Ma Yongsheng. Geometric and dimensional tolerance modeling for sheet metal forming and integration with CAPP. Springer. 2010.
14. Estela Amor Martín. Modelización numérica del plegado de los aceros inoxidables austentínicos. Universidad Carlos III de Madrid. 2009.
15. Hakim Sultan, Abdel Magid. Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process *European Journals of Scientific Research*. 2009
16. María Luisa García-Romeu de Luna. Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa. Modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final. Girona, Julio de 2005
17. S. Timoshenko, S.Woinoswsky-Krieger. Theory of plates and shells. McGraw-Hill. 2da. Edición. 1976.
18. MEF Algor. Manual Práctico. Universidad Americana.
19. Manual de Especificaciones y garantías AHMSA. 4a. Edición. 2009.
20. Structural Engineering Handbook. CRC Press LLC, 1999.
21. Donald R. Askeland. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. International Thomson Editores. 3ra. Edición. 1988.
22. Casti Metals Black Book. CASTI Publishing Inc. 5ta. Edición. 2003.

23. Olaf Diegel. BendWorks. Bend Works Services. 2002.
24. CATIA Sheet Metal Design V19. Wichita State University. 2009.
25. Catalogo de Manufacturera de dados. Puebla. México.
26. M.H. Parsa, S. Nasher Al Ahkami. Bending of Work Hardening Sheet Metals Subjected to Tension. University of Tehran. 2008.
27. Satyandra K. Gupta. Sheet Metal Operation Planning: Using Virtual Node Generation To Improve Search Efficiency. Mechanical Engineering Department and Institute for Systems Research. 2006.
28. Heinz Tschaetsch. Metal Forming Practise. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006.
29. Smith & Associates. Bendinf Of Metals Including “V”, Wipe And Rotatory die Operations. Monroe Michigan. 2005.
30. Gerald Davis. Design Guide For Bent Sheet Metal. D.S.M. Manufacturing Company. 2006.
31. John G. Nee. Fundamentals of Tool Design. SME. 4ta Edición. 1998.
32. Sheet Metal Design Handbook. Quality Tool, Manufacturing, Design and Engineering. 2008.

33. K. Osakada. History of Plasticity and Metal Forming Analysis. Osaka University. 2008.
34. I. A. Burchitz. Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming. Netherlands Institute For Metals Research. 2008.
35. Fuh-Kuo, Shen-Fu Ko. Department Of Mechanical Engineering, National Taiwan University. Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering. 2006.
36. Hill R.; Mathematical Theory of Plasticity; Oxford University Press, Oxford, 1950.
37. Lange, K.; Handbook of Metal Forming; McGraw-Hill, New York, 1985.
38. Rowe G.W.; Principles of Industrial Metal Forming Processes; Edward Arnold, London. 1977.
39. Altan T. Oh S. and Gegel H.; Metal Forming Fundamentals and Applications, American. Soc. for Metals. Metal Park, OH, 1983.
40. Sim Tech Simulation Et Technologie. Introduction To Sheet Metal Forming Processes . 1999.
41. Dr. Ramón Álvarez Cabal. Teoría general del MEF. Universidad Politécnica de Madrid. 1999.

Anexos**A. Características de aceros estructurales**

Aceros estructurales reconocidos

Las especificaciones del AISI 1996, sección A3.1, reconocen los siguientes tipos de acero de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM).

- ASTM A36/A36M, Acero estructural de carbono
- ASTM A242/A242M, Acero estructural de alta resistencia y baja aleación
- ASTM A283/A283M, Placas de acero de carbono de resistencia a la tensión baja e intermedia.
- ASTM A500, Tubulares estructurales redondos y de otros perfiles laminados en frío de acero de carbono.
- ASTM A529/A529M, Acero de calidad estructural de manganeso y carbono de alta resistencia.
- ASTM A570/A570M, Acero de calidad estructural de carbono para láminas y cintas laminadas en caliente.
- ASTM A572/A572M, Acero estructural de alta resistencia y baja aleación.
- ASTM A588/A588M, Acero estructural de alta resistencia y baja aleación con esfuerzo de fluencia mínimo.
- ASTM A606, Acero estructural de alta resistencia y baja aleación para láminas y cintas laminadas en caliente y en frío con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica.
- ASTM A607, Acero estructural de alta resistencia y baja aleación para láminas y cintas formadas en caliente y en frío.
- ASTM A611, Acero estructural de carbono para láminas formadas en frío.

- ASTM A653/A653M, Alta resistencia y baja aleación, láminas de acero con recubrimiento de zinc o con recubrimiento de aleación zinc-hierro realizado por medio del proceso de inmersión en caliente.
- ASTM A715, Acero de alta resistencia y baja aleación para láminas y cintas formadas en caliente y de acero de alta resistencia y baja aleación para láminas y cintas formadas en frío con propiedades mejoradas de formabilidad.
- ASTM A792/A792M, Láminas de acero con recubrimiento de aleación 55% aluminio-zinc realizado por medio del proceso de inmersión en caliente.

B. IV Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

MEMORIAS DEL IV CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES
18 NAL 22 DE FEBRERO, 2013 PACHUCA, HIDALGO, MÉXICO

LOCALIZACIÓN DEL FACTOR K EN EL PROCESO DE DOBLADO

Bravo Vargas, Salvador¹; Rodríguez Castillo, Mario Emigdio¹; Palacios Pineda, Luis Manuel¹; Ávila Dávila, Erika Osiris¹.

¹Instituto Tecnológico de Pachuca
Autopista México Pachuca Km 87.5 Venta Prieta, 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo
Teléfono 01 771 711 3140

salvador_bravo@live.com.mx, rurianluca@hotmail.com, palacios@itpachuca.edu.mx,
osirisavila77@yahoo.mx

Palabras clave:

Doblado, fibra neutra, factor K, elementos finitos.

RESUMEN

Este artículo muestra la ventaja de utilizar un programa de elementos tal como ANSYS, para modelar y resolver un problema físico. En este caso el encontrar el factor K en el proceso de doblado de un acero. El proceso a utilizar será el clásico doblado en "V", debido a que es el más utilizado en la industria y se podrá corroborar mediante doblado físico.

ABSTRACT

This article shows the advantage to use a finite Element software like ANSYS, for modeling and solve a physic problem. In this case to find the K factor in the bending process of steel. The process to use is "V" bending, owing to is the most used in industry and to confirm by physic bending.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de producción de la industria metalmecánica, uno de los más utilizados es el doblado, el cual consiste en deformar una placa metálica alrededor de un eje recto aprovechando para ello las propiedades plásticas del material. El proceso de doblado ha demostrado ser uno de los problemas pos los que atraviesa la industria a nivel mundial, esto debido a las mayores exigencias de los clientes para obtener productos cada vez más complejos y con tolerancias geométricas cada vez más estrechas. Antes de doblar la placa se debe de calcular cual es la longitud correcta para que la pieza quede conforme al diseño especificado, para ello se utiliza un factor denominado "K", que permite ubicar donde se localiza la fibra neutra de dicha placa, esto es la longitud de la placa que no se modifica durante dicho proceso. El uso de software computacional que utiliza el método de los elementos finitos permite simular operaciones con diversos

procesos y materiales, obteniendo así resultados confiables. El presente trabajo consiste en simular el proceso de doblado en ANSYS, parametrizando el punzón, la matriz y las diversas placas y así obtener medidas para la ubicación del factor "K", la simulación será aplicada a los aceros al carbón ASTM A36, ASTM A572 GR 50 y SS1011 los cuales son los más utilizados dentro de la industria mexicana.

DESARROLLO

El doblado en V, el bloque que compone el herramental para el conformado en V está compuesto por un punzón y una matriz la cual tiene una abertura normalmente de ocho veces el espesor del material a doblar. De esta manera el punzón desciende sobre la pieza de trabajo y le da forma aprovechando la deformación plástica del material tal como se muestra en la figura 1.

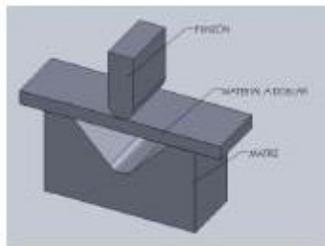


Figura 1

Para la realización de la simulación se debe establecer la geometría que se va a utilizar.

Se ha decidido que para este análisis se utilizará un punzón con radio de 5 mm, dado que es versátil para doblar placas de espesor delgado, así mismo la matriz que utilizaremos será conforme al punzón, estableciendo un ancho de la matriz de 8T, dado que este tipo de anchos de matriz son los que se utilizan ampliamente en el ámbito industrial.

Se ha considerado el efecto del retroceso elástico y por ello la matriz tendrá un ángulo de 88° figura 2.

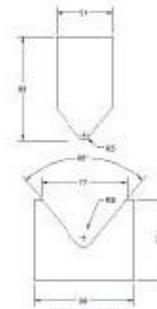


Figura 2

Para el análisis se utilizarán aceros ASTM-A36, ASTM A572 GR50 y SS1011, los cuales tienen las siguientes propiedades.

Consideraciones de momentos figura 3 y figura 4.

Tipo de Acero	Límite Elástico	Última Tensión	% de elongación
SS1011	210 Mpa	340 Mpa	25
ASMT A36	250 Mpa	400-550 Mpa	20
ASTM A572GR50	350 Mpa	420 Mpa	18

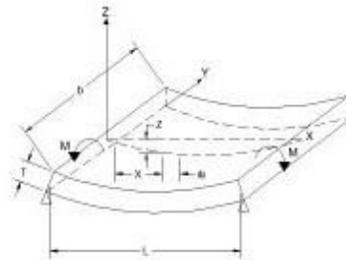


Figura 3

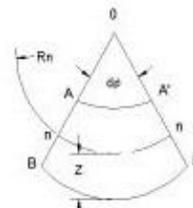
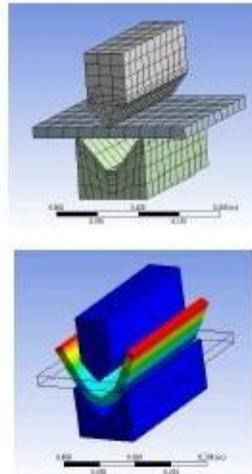


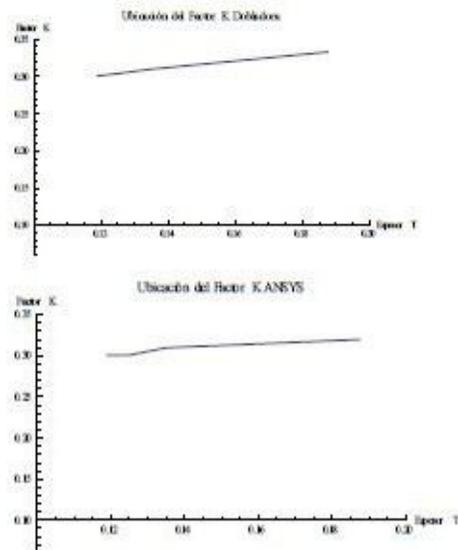
Figura 4

Modelo virtual en ANSYS



CONCLUSIONES

Se obtuvieron las siguientes gráficas con respecto al modelo en ANSYS y a las pruebas físicas, se puede notar como es muy similar lo simulado y los resultados reales. El factor K se encuentra a una distancia aproximada del 30% del espesor del material.



BIBLIOGRAFÍA

1. ASM Handbook Vol.14 Forming and Forging. ASM International 9th Edition, 1988.
2. Kalpakjia, Schmid. Manufacturing Processes for Engineering Materials. 5th. Ed. Pearson Education. 2008.
3. L.J. de Vin, A.H. Streppel. A process model for air bending. Journal of Materials Processing Technology. 1994.
4. S.V. Mohammadi, M.H. Parsa. Effect of the thickness distribution and setting condition on springback in multi-layer sheet bending. International Journal of Engineering Science and Technology. 2011
5. S. Timoshenko, S.Woinoswsky-Krieger. Theory of plates and shells. McGraw-Hill. 2da. Edición. 1976.
6. Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu. Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth Heinemann. 2da. Edición. 2002.

C. IV XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM

MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
25 al 27 DE SEPTIEMBRE, 2013 PACHUCA HIDALGO, MEXICO

LOCALIZACIÓN DEL FACTOR K EN EL PROCESO DE DOBLADO

¹Bravo Vargas Salvador, ¹Rodríguez Castillo Mario Emigdio, ¹Palacios Pineda Luis Manuel, ¹Ávila Dávila Érika Osiris

¹Instituto Tecnológico de Pachuca. División de estudios de Posgrado e Investigación.
Carretera México-Pachuca km. 87.5, Venta Prieta, 42083, Pachuca de Soto, Hgo., MEXICO
Teléfono: 01 771 71 13140 Ext. 139

salvador_bravo@live.com.mx narianluca@hotmail.com palacios@itpachuca.edu.mx osirisavila77@yahoo.mx

RESUMEN.

Este artículo muestra las posibilidades y ventajas de utilizar un programa de solución por el método de elementos finitos (MEF) como ANSYS, para modelar y resolver un problema físico, en este caso particular un proceso de manufactura. Se obtendrá el denominado factor K, en el doblado dicho factor es muy importante para cortar de manera exacta la plantilla antes de doblarla en la forma deseada. El proceso utilizado será el denominado doblado en "V", debido a que es uno de los más económicos y utilizados en la industria; para corroborar los datos obtenidos en la simulación, se procederá a realizar el mismo proceso de manera física y se compararán los datos.

ABSTRACT.

This paper shows the possibilities and advantages to use finite element method software (FEM) like ANSYS, to model a physic problem, in this case a manufacturing process. It will obtain a called K factor, in bending this factor is very important to cut exactly the blank before bending to obtain the desire piece. The process to use is called "V" bending, owing to is a low cost and most use in industry; to confirm simulation data, it will be a physical bending to compare data.

PALABRAS CLAVE

Doblado, plantilla, factor K, MEF.

NOMENCLATURA

α = ángulo de doblado
 L_b = holgura de doblado
 K = factor K
 R = radio de doblado
 T = espesor del material

INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de producción de la industria metalmecánica encontramos aquellos denominados procesos de conformado y uno de los más utilizados es el doblado, el cual es el método más utilizado para elaborar marcos, canales, piezas en "U", "V" [1] y en general distintas partes primarias para subensambles mayores Figura 1. Este proceso consiste en deformar una placa metálica alrededor de un eje recto aprovechando para ello las propiedades plásticas del material. El proceso de doblado ha demostrado ser uno de los problemas por los que atraviesa la industria a nivel mundial, debido a las mayores exigencias de los clientes para obtener productos cada vez más complejos y con tolerancias geométricas cada vez más estrechas [2]. Antes de doblar la placa se debe de calcular cual es la longitud correcta para que la pieza quede conforme al diseño especificado, esta es llamada comúnmente plantilla de corte, para ello se utiliza un factor denominado "K", que permite ubicar donde se localiza la fibra neutra de dicha placa, esto es la longitud de la placa que no se modifica durante dicho proceso.

El uso de software computacional que utiliza el método de los elementos finitos permite simular operaciones con diversos procesos y materiales, obteniendo así resultados confiables. El presente trabajo consiste en simular el proceso de doblado en ANSYS, parametrizando el punzón, la matriz y las diversas placas y así obtener medidas para la ubicación del factor "K", la simulación será aplicada a los aceros al carbón ASTM A36, ASTM A572 GR 50, ASTM A572 GR 60 y SS1011 SS40 los cuales son los más utilizados dentro de la industria mexicana.

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles y físicos. Ya que permite

Derechos Reservados © 2013. SOMIM

resolver casos que hasta hace poco eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, someterlos a las condiciones reales de esfuerzos e ir realizando mejoras sobre la marcha, lo que traía consigo un elevado costo de tiempo y desarrollo.

El MEF permite realizar un modelo matemático del sistema real, más fácil y económico que un prototipo real. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo. Sin embargo, este método ofrece diseños óptimos muy cercanos a la realidad.



Figura 1. Piezas dobladas mediante doblado en "V".

El doblado consiste en deformar de manera uniforme una placa alrededor de un eje recto, manteniendo el paralelismo de sus caras y el espesor uniforme. La terminología del doblado se muestra en la figura 2.

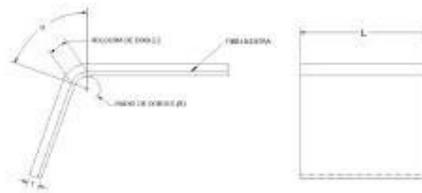


Figura 2

Se tiene una holgura de doblez L_b , la cual es el descuento que se realiza en la zona del radio, un ángulo α que es al ángulo al cual se dobla la pieza, un radio que depende del herramental utilizado (R), el propio espesor de la placa T y la ubicación de la fibra neutra (factor K), medido a partir del radio realizado con la herramienta hacia el interior del espesor de la placa.

La fórmula para encontrar la holgura de doblado es la siguiente:

$$L_b = \alpha (R + KT) \dots (1)$$

Se debe mencionar que el radio de doblez debe ser igual o mayor que el espesor T del material, esto se hace con el fin de evitar deformaciones y probables fracturas en la zona donde se aplica la fuerza del herramental. En este caso la importancia del presente trabajo estará en localizar la ubicación de K en el espesor del material, en un caso ideal el factor K se ubica en el centro del espesor del material ($0.5T$), pero en la práctica se sabe que los valores están ubicados entre $0.33T$ y $0.5T$.

En el doblado en V, el herramental para el conformado está compuesto por un punzón y una matriz. El punzón desciende sobre la pieza de trabajo y le da forma aprovechando la deformación plástica del material tal como se muestra en la figura 3. La zona interior de la placa (donde golpea el radio del punzón) se ve sometida a compresión, mientras que la zona exterior se ve sometida a tracción [3].

Para determinar la fuerza con la cual doblaremos nuestra pieza, se utilizará la siguiente fórmula:

$$F = \frac{LT^2k\sigma_y}{da} \dots (2)$$

Donde:

F = Fuerza (Newtons)

L = longitud del material (paralela al eje de doblez)

T = espesor de la chapa

σ_y = límite elástico del material

k = factor de abertura de la matriz

da = distancia entre apoyos

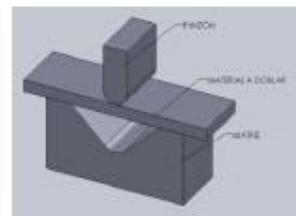


Figura 3

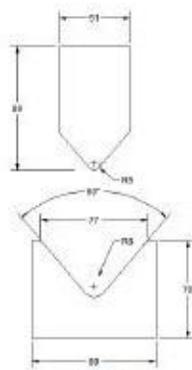
DESARROLLO

Para la realización de la simulación se debe establecer la geometría que se va a utilizar.

Se ha decidido que para este análisis se utilizarán punzones con un radio igual al espesor de la placa a doblar $R = T$, así mismo la abertura de la matriz será de 10 veces el espesor del material (abertura = 10T), dado que este tipo de anchos de matriz son los que se utilizan ampliamente en el ámbito industrial.

Se ha considerado el efecto del retroceso elástico (springback) y por ello la matriz tendrá un ángulo de 88°. Dicho efecto produce que las piezas no queden respecto a diseño, si se utiliza un herramental con los grados exactos indicados en el diseño, por lo cual se debe de realizar una compensación, ya sea de manera manual en la prensa aplicando un poco más de fuerza que la calculada o por medio de un ángulo más cerrado en la matriz. En este caso se empleará la compensación por medio de la matriz. En la figura 4 se da un ejemplo del herramental utilizado en las simulaciones [4].

De la misma manera que utilizaremos estas geometrías de manera virtual, las utilizaremos de manera física en el taller de manufactura del Instituto Tecnológico de Pachuca. Se utilizarán diversos herramientas en la dobladora de control numérico marca Meister.



Para el análisis se utilizarán aceros ASTM-A36, ASTM A572 GR50, ASTM A572GR60 y SS1011 SS40, los cuales tienen las propiedades indicadas en la tabla 1 [5].

Tipo de Acero	Limite Elástico	Última Tensión	% de elongación
SS1011 SS40	210 MPa	340 MPa	25
ASMT A36	250 MPa	400-550 MPa	20
ASTM A572GR50	350 MPa	420 MPa	21
ASTM A572GR60	420 MPa	550 MPa	18

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero.

Las tabla 2 indica la fuerza empleada para cada uno de los materiales de la simulación virtual y física.

Tabla 2. Fuerza necesaria para el doblar

Espeor	Materia	Fuerza
1.5199 mm	ASTM A1011-50	459 N
3.0375 mm	ASTM A1011-50	1.933 N
3.4290 mm	ASTM A1011-50	2.403 N
4.7645 mm	ASTM A36	3.418 N
6.3500 mm	ASTM A36	6.071 N
7.9375 mm	ASTM A36	9.487 N
9.5250 mm	ASTM A36	13.661 N
12.7000 mm	ASTM A36	24.266 N
15.8750 mm	ASTM A36	37.940 N
19.0500 mm	ASTM A36	54.643 N
9.5250 mm	ASTM A572-50	19.279 N
12.7000 mm	ASTM A572-50	34.274 N
15.8750 mm	ASTM A572-50	53.560 N
19.0500 mm	ASTM A572-50	77.117 N
9.5250 mm	ASTM A572-60	23.126 N
12.7000 mm	ASTM A572-60	41.129 N
15.8750 mm	ASTM A572-60	64.364 N
19.0500 mm	ASTM A572-60	92.540 N

El siguiente paso es crear el modelo virtual en ANSYS, y discretizarlo. Figuras 5 y 6.

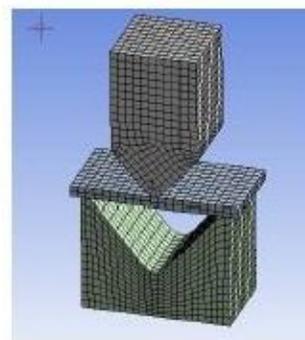


Figura 5

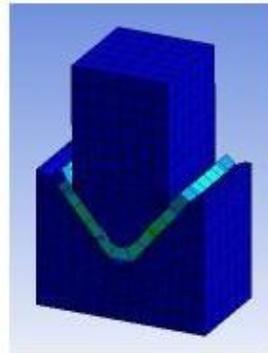


Figura 6

RESULTADOS

A continuación se muestra la gráfica con los valores obtenidos de la ubicación del factor K en el acero estructural por medio de la simulación en ANSYS. Figura 7.

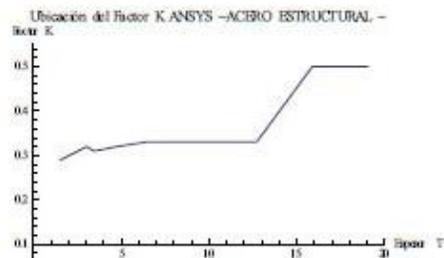


Figura 7

Ubicación del factor K en el acero de alta resistencia. Figuras 8 y 9.

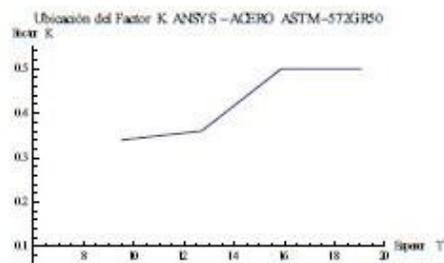


Figura 8

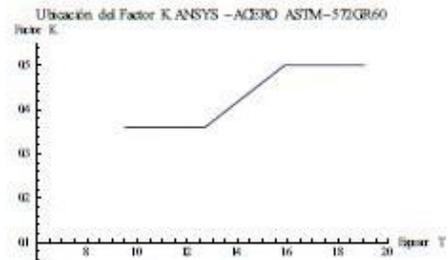


Figura 9

Ubicación del factor K en el acero estructural basado en la experimentación física en una dobladora. Figura 10.

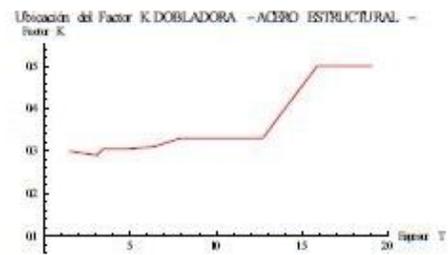


Figura 10

Ubicación del factor K en el acero de alta resistencia basado en la experimentación física en una dobladora. Figuras 11 y 12.

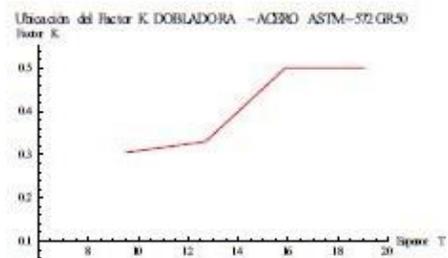


Figura 11

Derechos Reservados © 2013, SOMIM

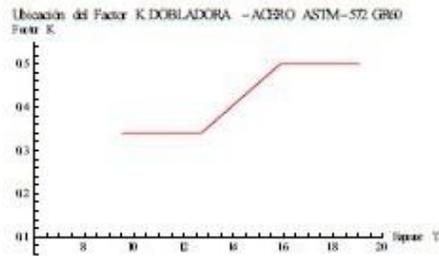


Figura 12

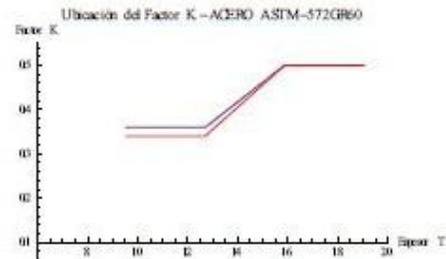


Figura 15

Comparación de resultados, la línea negra representa la simulación en ANSYS y la línea roja representa la experimentación física. Figuras 13, 14 y 15.

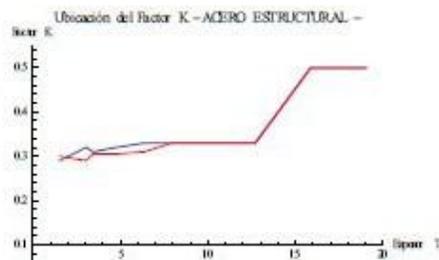


Figura 13

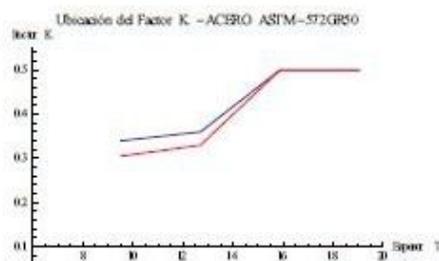


Figura 14

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo virtual en ANSYS, el cual nos permite obtener la ubicación de la fibra neutra del acero estructural y de alta resistencia, en el proceso de doblado en V. El modelo se validó de manera experimental en una dobladora hidráulica Meister. Los resultados arrojados por ANSYS nos indican que el desarrollo de modelos de procesos de manufactura en ANSYS son muy aproximados a la realidad, y para el caso en particular del doblado, funciona como un medio fiable, sin costo de insumos, rápido y capaz de detectar alguna falla mecánica de manera anticipada.

Los valores obtenidos del factor K se pueden aplicar de manera directa, ya sea para hacer cálculos de plantillas de corte basados en la fórmula de descuento por holgura de doblado, o para ser utilizados directamente en las tablas de los módulos de Sheet Metal de los softwares como SolidWorks, CATIA y SolidEdge [6].

REFERENCIAS

- (1) M. H. Parsa. And S. Nasher Al Ahkami: Bending Of Work Hardening Sheet Metals Subjected To Tension, School Of Metallurgy And Material Engineering, 2008.
- (2) L.J. De Vin And A.H. Streppel: A Process Model For Air Bending. Journal Of Materials Processing Technology, 1994.

MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
25 al 27 DE SEPTIEMBRE, 2013 PACHUCA HIDALGO, MÉXICO

- (3) Kalpakjian And Schmid: Manufacturing Processes For Engineering Materials. Editorial Pearson Education, 5ta. Ed., 2008.
- (4) T. Meinders And I.A. Burchitz. Numerical Product Design: Springback Prediction, Compensation And Optimization. University of Twente. 2007.
- (5) Manual De Especificaciones y Garantías. AHMSA. 4ta. Ed., 2009.
- (6) CATIA Sheet Metal Design V19. Wichita State University, 2009.

Derechos Reservados © 2013, SOMIM