



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN DEL “PROTECTOR METÁLICO PARA EL TANQUE DE COMBUSTIBLE DEL CHEVROLET SZ” MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER
EN DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

SALAZAR MASSON JUAN FERNANDO

juan.salazar@epn.edu.ec

VILLACRÉS PAREDES ISRAEL MAURICIO

israel.villacres@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. WILLIAM RICARDO VENEGAS TORO, Mgs.

william.venegas@epn.edu.ec

Quito, Enero de 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Salazar Masson Juan Fernando y Villacrés Paredes Israel Mauricio**, bajo mi supervisión.

Ing. William Venegas Toro, Mgs.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Salazar Masson Juan Fernando y Villacrés Paredes Israel Mauricio**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Salazar Masson Juan Fernando

Villacrés Paredes Israel Mauricio

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación es dedicado para mis Padres Javier y Beatriz, ya que gracias a ellos a la guía y al amor que me han dado, he tenido la fuerza para realizar uno de mis sueños; a mis hermanas Dario, Jessica y Dayana por su cariño y apoyo; A mis sobrinos Javier Alberto y Danna Nathalia por darme su amor sin interés alguno y demostrarme esa felicidad y nobleza que da un niño.

Y a todas las personas que me supieron dar sus palabras de apoyo para continuar y finalizar este proyecto de titulación.

Israel Villacrés Paredes

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis queridos sobrinos Sebastián, Alejandra y Anita Victoria, quienes con su ternura, inocencia y cariño me inspiran y motivan para luchar día a día por las metas planteadas que a veces parecen tan distantes pero que poquito a poquito se van convirtiendo en una realidad.

Juan Salazar Masson

AGRADECIMIENTO

El presente proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto, por esto agradecemos a nuestro director de t3pico Ing. William Venegas Mgs por dedicar su apoyo, conocimientos, consejos, y pautas para as3 poder culminar de la mejor manera el vigente trabajo.

Galardonamos de manera especial a la Escuela Polit3cnica Nacional por permitirnos realizar nuestro trabajo de titulaci3n con un proyecto dentro de la Facultad de Ingenier3a Mec3nica. As3 tambi3n, agradecemos a las autoridades y profesores por brindarnos la oportunidad de cursar nuestros estudios en esta prestigiosa instituci3n educativa y brindarnos la mejor educaci3n tanto humana como t3cnica aportando un granito de arena a nuestra formaci3n.

Tambi3n agradecemos a nuestros compa1eros que durante la carrera profesional han logrado aportar con sus experiencias y conocimientos para el crecimiento conjunto en las aulas.

Para ellos muchas gracias y que Dios los bendiga.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1	1
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN EN CHAPAS METÁLICAS	
1.1. TEORÍA DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA	1
1.1.1. Conformación en frío	3
1.1.2. Conformación en caliente	4
1.1.3. Energía de deformación (u)	5
1.1.4. Criterios de fluencia, tensiones y deformaciones efectivas	8
1.1.5. Criterios de falla plástica.....	15
1.1.6. Recuperación elástica y factor de conformabilidad	17
1.2. CONTEXTO DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN ACTUALES EN LA AUTOMOCIÓN	20
1.2.1. Situación actual del sector	20
1.2.2. La evolución de los materiales de fabricación.....	20
1.2.3. Estudio comparativo de los nuevos materiales de fabricación	22
1.3. PROCESO DE EMBUTICIÓN.....	23
1.3.1. Descripción del proceso de embutición.....	23
1.3.2. Embutido sin prensa chapas.....	25
1.4. VARIABLES DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN	26

1.4.1.	Obtención del desarrollo de la chapa.....	26
1.4.2.	Herramientas de embutición	27
1.4.3.	Factores de forma en la embutición.....	28
1.5.	DEFECTOS QUE SE PRODUCEN POR EMBUTICIÓN.....	31
1.5.1.	Formación de arrugas.....	31
1.5.2.	Grietas.....	32
1.5.3.	Émbolo descentrado.....	32
1.5.4.	Presencia de orejas	33
CAPÍTULO 2.....		34
MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS		
2.1.	ASPECTOS IMPORTANTES DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	34
2.1.1.	Sistemas continuos.....	34
2.1.2.	Sistemas discretos.....	35
2.2.	FORMULACIÓN DIRECTA DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	36
2.3.	CONDICIONES DE CONTORNO	43
2.4.	DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES BÁSICAS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	44
2.5.	PASOS REQUERIDOS PARA EL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS .	47
2.6.	FORMULACIÓN PARA ANSYS Y DEFINICIÓN DE TIPO DE ELEMENTO PARA EL CASO DE ESTUDIO	49
2.6.1.	Tipos de elementos	49
2.6.2.	Elemento Shell aplicado al problema de estudio.....	50
CAPÍTULO 3.....		52
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO		
3.1.	SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PROCESOS DE EMBUTICIÓN DE PIEZAS METÁLICAS DENTRO DEL MUNDO AUTOMOTRIZ	52
3.1.1.	Diagnóstico de la industria.....	52
3.1.2.	Factor medioambiental	53
3.1.3.	Evolución de los procesos de diseño y fabricación	54

3.1.4.	Descripción del proceso de fabricación.....	55
3.1.5.	Diseño del objeto de estudio.....	56
3.2.	PLANTEAMIENTO Y SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	57
3.2.1.	Material y espesor a utilizarse	57
3.2.2.	Selección del material a utilizarse.....	57
3.2.3.	Solución del problema	59
CAPÍTULO 4	61
DISEÑO Y SIMULACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS		
4.1.	METODOLOGÍA DE LA HERRAMIENTA ANSYS	61
4.1.1.	Métodos de resolución de ANSYS y LS-DYNA.....	62
4.2.	PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA	64
4.2.1.	Modelado de la geometría	64
4.2.2.	Descripción del elemento a utilizarse en el software para su geometría	65
4.2.3.	Datos de entrada para el material en ANSYS	65
4.2.4.	Módulo ANSYS en la creación del proyecto	69
4.3.	GENERACIÓN DE LA MALLA Y SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	71
4.3.1.	Asignación de material a cada superficie que interviene en la embutición	71
4.3.2.	Generación de la malla.....	71
4.4.	HERRAMIENTAS PARA LA SIMULACIÓN Y DEFINICIÓN DE OPERACIONES DE EMBUTICIÓN EN ANSYS	73
4.4.1.	Condiciones de frontera del modelo numérico.....	73
4.4.2.	Proceso de cálculo y simulación mediante módulo LS-DYNA MANAGER	79
4.5.	INTERPRETACIÓN DE POS PROCESO DE SIMULACIÓN	81
4.6.	PROTOCOLO DE PRUEBAS	83
4.6.	PROCESO REAL DE EMBUTICIÓN	85
4.7.	VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROCESO REAL DE EMBUTICIÓN.....	88
4.8.1.	Comparación de resultados obtenidos en chapa experimental	89

4.8.2.	Comparación de resultados obtenidos mediante simulación en ANSYS	91
4.8.3.	Validación de resultados.....	94
4.9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
4.9.1.	Desplazamientos totales.....	94
4.9.2.	Espesor relativo y porcentaje de reducción	95
4.9.3.	Mapa FLD y zona de seguridad	97
4.9.4.	Esfuerzos generados en la embutición	99
4.9.5.	Gráfica de fuerzas de conformado.....	99
4.9.6.	Gráfica de análisis de energía Hourglass y energía interna	100
4.9.7	Modificación de parámetros en programa ANSYS en el MÓDULO LS-DYNA	102
CAPÍTULO 5		106
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
CONCLUSIONES		106
RECOMENDACIONES		108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		109
ANEXOS		113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Curva esfuerzo deformación ingenieril	1
Figura 1. 2. Alargamiento axial y contracción lateral	3
Figura 1. 3. Efectos de la restauración del material en función de la forma y tamaño de grano.....	4
Figura 1. 4. Ejemplos de procesos de deformación en frío	4
Figura 1. 5. Resistencia de los bordes de grano y de cristales en función de la temperatura	5
Figura 1. 6. Material que se obtiene de trabajo en caliente.....	5
Figura 1. 7. Descomposición de un estado general de esfuerzos en su componente hidrostática (Cambio de volumen).....	6
Figura 1. 8. Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de tracción simple uniaxial	10
Figura 1. 9. Esfuerzo equivalente	12
Figura 1. 10. Representación de diagrama límite de conformado.....	13
Figura 1. 11. Representación esquemática del diagrama de recuperación elástica	18
Figura 1. 12. Curva de esfuerzo en el momento de deformación.....	18
Figura 1. 13. Representación de una lámina doblada.....	18
Figura 1. 14. Representación de relaciones de fuerza-alargamiento para una baja resistencia, HSS convencional y aceros AHSS.....	21
Figura 1. 15. Representación gráfica de materiales en una carrocería de un automóvil	21
Figura 1. 16. Deformaciones y tensiones en un proceso de estampado	23
Figura 1. 17. Prensas de simple efecto	24
Figura 1. 18. Prensas de doble efecto	24
Figura 1. 19. Embutición inversa.....	25
Figura 1. 20. Representación de embutición profunda.....	25
Figura 1. 21. Formación de arrugas	31
Figura 1. 22. Grietas originadas por una embutición grande	32
Figura 1. 23. Descentramiento del eje del émbolo con respecto al de la matriz.....	32
Figura 1. 25. Formación de orejas en el borde de una pieza embutida	33
Figura 2. 1. Sistemas continuos: a) túneles., b) bases y c) placas	34
Figura 2. 2. Elementos finitos a) unidimensionales, b) bidimensionales, c) tridimensionales Fuente: (CELIQUETA LIZARZA, 2008, pág. 5).....	35
Figura 2. 3. Discretización de un sistema continuo a un sistema discreto.....	36
Figura 2. 4. Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de nodos.....	37
Figura 2. 5. Interpolación lineal en el caso de un triángulo	38
Figura 2. 7. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento	41
Figura 2. 8. Fuerzas de equilibrio en un elemento.....	41
Figura 2. 9. Aplicación de condiciones de contorno con $u_i=0$. y $v_i=0$	44

Figura 2. 10. Diferenciación central para determinar la ecuación general de movimiento	45
Figura 2. 11. Algoritmo para análisis explícito estable	45
Figura 2. 12. Elementos planos: triángulo (3 nodos), cuadrilátero (4 nodos)	49
Figura 2. 13. Ejemplos de elementos SOLID	50
Figura 2. 14. Cascara modelizada mediante elementos planos	51
Figura 2. 15. Definición de las cascara superior e inferior	51
Figura 2. 16. Definición de la superficie media de la cáscara	51
Figura 3. 1. Ciclos del automóvil para el cuidado del medio ambiente	54
Figura 3. 2. Protector Metálico de Tanque de Gasolina Grand Vitara SZ	57
Figura 3. 3. Protector metálico de tanque de gasolina Grand Vitara SZ	59
Figura 3. 4. Ubicación de protector metálico de tanque de gasolina del Grand Vitara ..	60
Figura 4. 1. Diferentes simulaciones con la ayuda de la herramienta ANSYS	61
Figura 4. 2. Comparación del método implícito y explícito	63
Figura 4. 3. Modelo del proceso a ser embutido, se puede visualizar el punzón, chapa y matriz	65
Figura 4. 4. Propiedades mecánicas del material ingresadas en el software ANSYS ..	66
Figura 4. 5. Malla no deformada y malla deformada con efecto de reloj de arena o Hourglass	68
Figura 4. 6. Modo de control de hourglass	69
Figura 4. 7. Formulación del proyecto en ANSYS 16.1, creación de la base o datos de ingeniería y el modelo Explicit de LS-DYNA	70
Figura 4. 8. Geometría importada a ANSYS 16.1	70
Figura 4. 9. Asignación de material a la superficie que representa la placa de acero ..	71
Figura 4. 10. Generación de la malla de todo el conjunto que interviene en el proceso	72
Figura 4. 11. Generación de la malla cuadrangular en placa con cuadrícula mínima de 3 mm y máxima de 15 mm	72
Figura 4. 12. Asignación de interacción entre superficies	73
Figura 4. 13. Condición de borde asignada a la matriz, este será un elemento completamente fijo	74
Figura 4. 14. Aplicación de fuerza a punzón	75
Figura 4. 15. Medidas de los elementos a utilizarse (a) chapa y punzón (b)	76
Figura 4. 16. Asignación de fuerza equivalente para el proceso de embutición	77
Figura 4. 17. Condición de desplazamiento al punzón en el eje Y	77
Figura 4. 18. Ajustes en el sistema de simulación. Se establece ya por defecto	78
Figura 4. 19. Proceso de resolución mediante el menú SOLVE	79
Figura 4. 20. Creación de archivo *.k donde almacena toda la información de los elementos a ser conformados	79
Figura 4. 21. Inicio de cálculo mediante MEF en ANSYS con módulo LS-DYNA PROGRAM MANAGER	80

Figura 4. 22. Menú de opciones para cálculo START LS-DYNA.....	80
Figura 4. 23. Ventana de estado de la solución y finalización del proceso.....	81
Figura 4. 24. Inicio de LS PREPOST para visualización de resultados	81
Figura 4. 25. Inicio de LS PREPOST para cargar resultados	82
Figura 4. 26. Forma inicial de las superficies antes de la simulación	83
Figura 4. 27. Forma final de la embutición	83
Figura 4. 28. Chapa grabada con método de ensayo, y parametrizada con ejes longitudinal y transversal.....	84
Figura 4. 29. Prensa hidráulica y herramientas utilizadas en el proceso	85
Figura 4. 30. Proceso de conformado de la chapa dentro del troquel	86
Figura 4. 31. Pieza embutida sin discretización de cuadrícula	87
Figura 4. 32. Pieza embutida discretizada	87
Figura 4. 33. Configuración de malla redefinida en ANSYS.....	88
Figura 4. 34. Numeración de cuadrículas para medición de deformación	89
Figura 4. 35. Numeración de cuadrículas para medición de deformación en pieza simulada.....	92
Figura 4. 36. Desplazamiento total en el eje XYZ.....	95
Figura 4. 37. Espesor de la chapa después de deformación	96
Figura 4. 38. (a) Porcentaje de visualización con colores en modelo y (b) Porcentaje de adelgazamiento de la chapa máxima de 10% en gráfica.....	97
Figura 4. 39. Zona de seguridad y mapa FLD de pieza embutida	98
Figura 4. 40. (a) y (b) Zonas del diagrama FLD	98
Figura 4. 41. Gráfica de esfuerzo de la chapa.....	99
Figura 4. 42. Gráfica de fuerza empleada en la chapa	100
Figura 4. 43. Curva de energía de hourglass	101
Figura 4. 44. Energía interna dentro de la chapa de simulación	101
Figura 4. 45. Creación de superficie para maximizar el tipo de mallado	102
Figura 4. 46. Esfuerzo de Von Mises sometido a convergencia de la malla	103
Figura 4. 47. Resultado de elementos donde se visualiza los esfuerzos	103
Figura 4. 48. Reducción de espesor después de refinamiento de malla.....	104
Figura 4. 49. Porcentaje de reducción	104
Figura 4. 50. Energía de Hourglass minimizada	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Propiedades del material ASTM A-36	58
Tabla 3. 2. Propiedades del material que se utilizará como herramienta para el proceso de embutición.....	59
Tabla 4. 1. Valores obtenidos en la deformación experimental de la chapa	89
Tabla 4. 2. Promedio del porcentaje de error experimental de la chapa.....	91
Tabla 4. 3. Valores obtenidos en el proceso de simulación	92
Tabla 4. 4. Promedio del porcentaje de error teórico.	94

RESUMEN

Actualmente los diseños de embutición en el país mayormente se basan en la experiencia de los diseñadores, la cual ha sido adquirida de forma empírica a base de prueba y error, lo que conlleva elevados costos y tiempos de fabricación. El presente trabajo tiene como objetivo principal simular el proceso de embutición empleando elementos finitos mediante el software ANSYS para una autoparte. En dicha simulación se varió los parámetros involucrados para identificar sus consiguientes efectos. Adicionalmente se comparó los resultados obtenidos con la pieza real embutida. En el primer capítulo se describieron los conceptos involucrados en la embutición, abordando temas como la teoría de deformación, conformación, criterios de fluencia entre otros. En el segundo capítulo se explicó la formulación del método de elementos finitos y la aplicación específica para el caso de estudio, la cual fue mediante el método explícito. Posteriormente, en el capítulo tercero, se describió el proceso de diseño basado en el contexto actual de los métodos de fabricación. En el capítulo cuarto se desarrolló la simulación del proceso de embutición dentro del programa ANSYS y el módulo LS-DYNA. También se describió la metodología de simulación que utiliza el software, la creación de la malla, la asignación de condiciones de frontera entre otros parámetros. Este capítulo también presenta los resultados obtenidos y la validación de los mismos al compararlos con el proceso real de embutición. Adicionalmente se validó con el método de la energía cero Hourglassing. Finalmente en el último capítulo se presentan las conclusiones finales obtenidas y recomendaciones.

Palabras Clave: Embutición, cinemática bilineal, deformación plástica, hourglassing, elemento shell, Ansys

ABSTRACT

Nowadays, the sheet metal drawing designs are based on the experience of the designer which has been acquired through years of trial and error. This implies longer manufacturing times and high costs. The objective of this project is to model the drawing process of an automobile body part through finite element analysis (FEA) with the ANSYS software. In this simulation, the parameters were varied in order to identify the effects they had in the process. Additionally, the results were compared with the real auto body part. The first chapter describes the sheet metal drawing process by reviewing topics such as deformation theory, sheet metal drawing, and deformation criteria. The second chapter explains the settings of the finite element analysis and its application on this specific case, which will be by the explicit method. The third chapter describes the design process based on the context of current manufacturing methods. The fourth chapter describes the simulation of the sheet metal drawing process by the ANSYS software and the LS-DYNA module. It also describes the simulation methodology used by the software, the meshing of the part, the boundary conditions values assigned and other parameters. This chapter presents the results obtained, and their validation by comparing them with the real sheet metal drawing process. These results were also validated by the Hourglass zero-energy method. Finally, the fifth chapter presents the conclusions from the simulation and recommendations based on them.

Keywords: Sheet metal drawing, bilinear kinematic, plastic deformation, hourglassing, shell element, ANSYS.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN EN CHAPAS METÁLICAS

1.1. TEORÍA DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Se define como deformación plástica a aquellos procedimientos de producción de elementos mecánicos que experimentan desplazamientos permanentes e irreversibles de dislocaciones por encima de su límite elástico, logrando cambiar la forma de la superficie del material mediante la aplicación de cargas exteriores. Este proceso de fabricación plástica se lo conoce como conformado sin supresión de material. El análisis de la deformación plástica se realiza a partir de la “Teoría de la Plasticidad”, determinando matemáticamente tensiones y deformaciones en sólidos deformados. (RODRÍGUEZ, 2011, págs. 2,3)

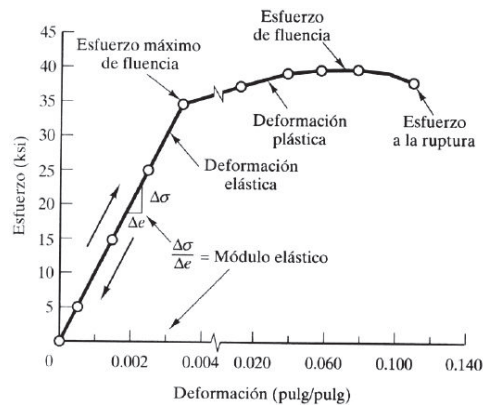


Figura 1. 1. Curva esfuerzo deformación ingenieril

Fuente: (MANGONON P, 2001, pág. 142)

La curva de esfuerzo verdadero $\sigma - \epsilon$ es la propiedad más importante en las operaciones de manufactura porque describe la necesidad de carga real del material. Para poder ajustar una ecuación matemática a la curva $\sigma - \epsilon$ se ha determinado la siguiente:

$$\sigma = K * \epsilon^n \quad (1. 1)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo verdadero.

ϵ = Deformación verdadera.

K = Coeficiente de endurecimiento por deformación.

n = Índice de endurecimiento por deformación.

El proceso por deformación plástica puede ejecutarse en caliente o en frío, según la temperatura de trabajo ya sea que se encuentre por encima o por debajo de la temperatura de recristalización T_r .

$$T_r = \frac{T_f}{2} \quad (1.2)$$

Donde:

T_r = Temperatura de recristalización en °K

T_f = Temperatura del punto de fusión en °K

Un material cambia de forma de acuerdo a los esfuerzos que se apliquen, un esfuerzo de tracción induce al material a deformarse paralelamente a esta fuerza, y a reducir su espesor lateralmente. Las deformaciones se dan por tracción y por deformación lateral. Por tanto:

$$\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.3)$$

$$\epsilon_w = \frac{\Delta w}{w} \quad (1.4)$$

Donde:

ϵ_L = Deformación por tracción.

ϵ_w = Deformación lateral.

L = Dimensión original paralela a la fuerza de tracción.

w = Dimensión original perpendicular a la fuerza de tracción.

La razón entre la deformación lateral y la deformación longitudinal se define como la razón de Poisson, aumentándose la longitud en la dirección de la carga. (MANGONON P, 2001, pág. 179)

El coeficiente de Poisson para el acero se considera en 0.3 en el período plástico. Pero el valor puede variar entre 0 y 0.5, siendo un material altamente compresible o un material no compresible respectivamente.

$$\nu = -\frac{\epsilon_w}{\epsilon_L} \quad (1.5)$$

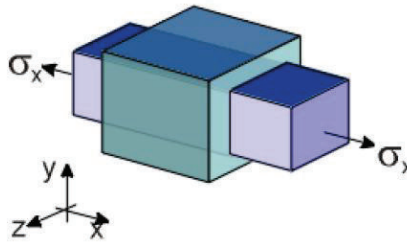


Figura 1. 2. Alargamiento axial y contracción lateral

Fuente: (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 19)

1.1.1. Conformación en frío

Es el trabajo que se produce después de aplicar una carga mayor que la resistencia de cedencia original del metal a una temperatura ambiente o menor, generando cambios en la estructura cristalina por ende la deformación del material. Las principales ventajas son: mejores superficies y tolerancias dimensionales, obtención de mejores propiedades mecánicas en el producto final como una mayor dureza.

Sin embargo, se tiene algunas desventajas ya que requiere mayor necesidad de fuerza y energía, porque el metal aumenta su resistencia debido al endurecimiento por deformación (Figura 1.1), se reduce la ductilidad e incrementa la resistencia a la tensión limitando la cantidad de operaciones de conformado que se pueda realizar. (ESCUELA COLOMBIA DE INGENIERÍA, 2008, pág. 6)

Para eliminar toda la energía acumulada en este proceso de conformado se da lugar a tres etapas:

- a) **Restauración.** Los átomos pasan a tomar posiciones de equilibrio firme, sin movimiento de los contornos de los granos.

- b) **Re cristalización.** Se forman cristales nuevos en los lugares de mayor acritud, es decir, en los límites de grano y en los planos de deslizamiento y maclado logrando sustituir al edificio cristalino deformado.
- c) **Crecimiento de grano.** Esto depende de la temperatura a la que se le somete al grano ya recristalizado el cual crece a medida que acrecienta la temperatura.

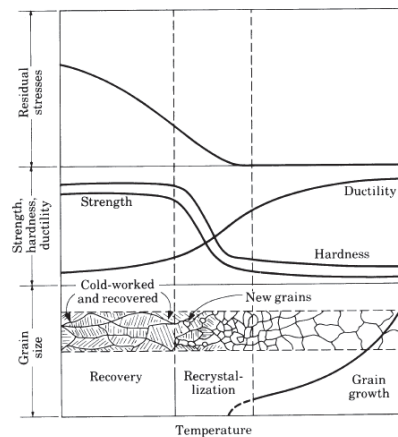


Figura 1. 3. Efectos de la restauración del material en función de la forma y tamaño de grano

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2011, pág. 5)

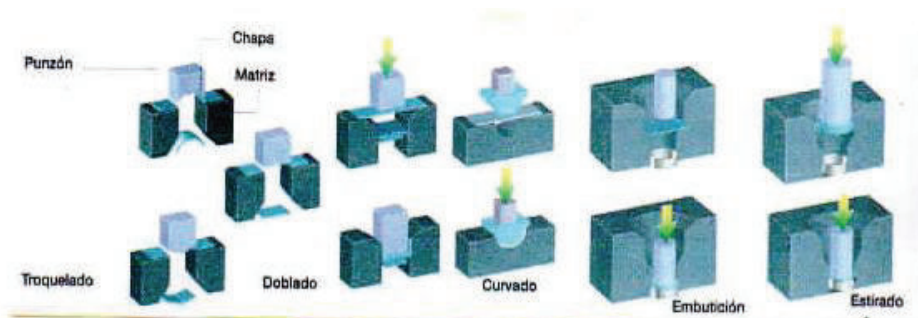


Figura 1. 4. Ejemplos de procesos de deformación en frío

Fuente: (<http://matildesalvadortecnico.wikispaces.com/10+Estampaci%C3%B3n+en+fr%C3%ADo>)

1.1.2. Conformación en caliente

Es la deformación plástica del material metálico a una temperatura mayor que la de recristalización. Las ventajas del trabajo consiste en la creación de una deformación plástica casi ilimitada, siendo ideal para el conformado de partes de gran tamaño por su baja resistencia de cedencia, una alta ductilidad, menores esfuerzos y fuerzas requeridas

para deformar. Así también permite trabajar con metales que se fracturan cuando son trabajados en frío y evita el endurecimiento del material.

El acabado superficial y tolerancias del trabajo en caliente suelen ser más bajas en relación al trabajo en frío. En la práctica se realiza desde temperaturas un poco mayores a $0.5T_f$ (la mitad de la temperatura de fusión). Así mismo se debe tener un control de exactitud dimensional y contracción térmica del metal, razón por la cual, en el diseño es necesario tomar en cuenta una tolerancia mayor en las dimensiones del material antes de iniciar cualquier operación. (ESCUELA COLOMBIA DE INGENIERÍA, 2008, pág. 7)

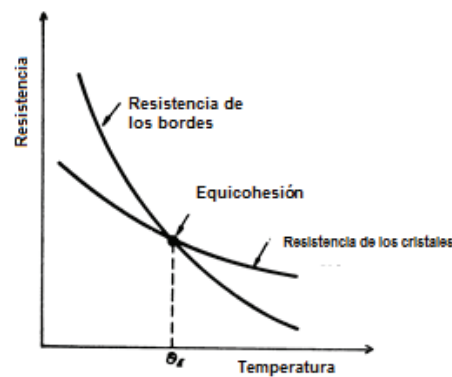


Figura 1. 5. Resistencia de los bordes de grano y de cristales en función de la temperatura

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2011, pág. 7)

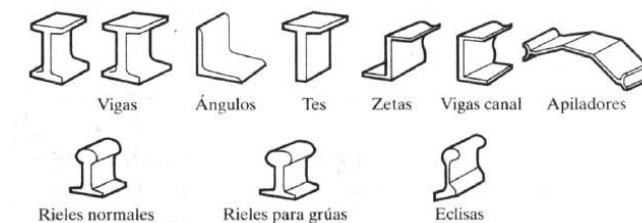


Figura 1. 6. Material que se obtiene de trabajo en caliente

Fuente: (MANGONON P, 2001, pág. 271)

1.1.3. Energía de deformación (u)

Es la acumulación de energía en el interior de un sólido deformable, como efecto del trabajo realizado por las fuerzas que provocan su deformación. (GERE J & GOODNO J, 2002, pág. 120)

La energía específica de deformación se compone de dos partes:

- Energía necesaria para promover el cambio de volumen del elemento diferencial infinitésimo considerado u_V .
- Energía que causa el cambio de forma o distorsión del elemento (energía de distorsión) u_F .

$$u = u_V + u_F \quad (1.6)$$

Las distorsiones angulares no inducen al cambio de volumen, únicamente de forma, en cambio las deformaciones específicas ocasionan cambios de volumen y forma.

La energía u se puede descomponer en sus componentes tangenciales y normales.

$$u_\tau = \frac{1}{2G} [\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2] = \frac{(1 + \mu)}{E} [\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2] \quad (1.7)$$

$$u_G = \frac{1}{2G} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\mu (\sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z)] \quad (1.8)$$

Se considera un elemento sometido únicamente a tensiones normales:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (1.9)$$

Si se expresa como la suma de los siguientes estados (Figura 1.8):

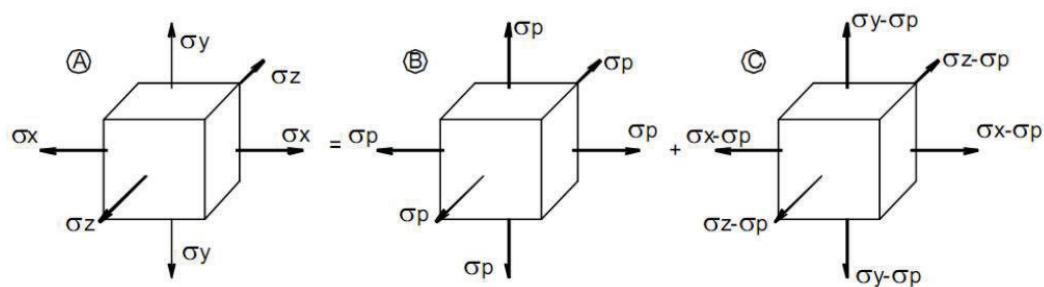


Figura 1. 7. Descomposición de un estado general de esfuerzos en su componente hidrostática (Cambio de volumen)

Fuente: (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 21)

Se puede explicar los componentes de la energía:

a) Energía por cambio de volumen

$$\varepsilon_V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (1.10)$$

$$\varepsilon_{V_B} = 3\varepsilon_p = \frac{3}{E} [\sigma_p - 2\mu\sigma_p] = \frac{3(1-2\mu)}{E} \sigma_p \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{V_C} &= \frac{1}{E} [(\sigma_x - \sigma_p) - \mu(\sigma_y + \sigma_z - 2\sigma_p)] \\ &+ \frac{1}{E} [(\sigma_y - \sigma_p) - \mu(\sigma_x + \sigma_z - 2\sigma_p)] \\ &+ \frac{1}{E} [(\sigma_z - \sigma_p) - \mu(\sigma_x + \sigma_y - 2\sigma_p)] \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$\varepsilon_{V_C} = \frac{1-2\mu}{E} [\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z - 3\sigma_p] = \frac{1-2\mu}{E} [3\sigma_p - 3\sigma_p] = 0 \quad (1.13)$$

Por lo que:

$$\varepsilon_{V_B} = \varepsilon_{V_A} \quad (1.14)$$

Donde:

- El estado C no representa cambio de volumen,
- El estado B se denomina estado de tensión hidrostática,

La energía por el cambio de volumen es igual a la energía en el estado de tensión hidrostática.

$$u_V = u_{V_B} = \frac{1}{2E} [3\sigma_p^2 - 6\mu\sigma_p^2] = \frac{3(1-2\mu)}{2E} \left[\frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \right]^2 \quad (1.15)$$

$$u_V = \frac{1-2\mu}{6E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 2\sigma_x\sigma_y + 2\sigma_x\sigma_z + 2\sigma_y\sigma_z] \quad (1.16)$$

b) Energía por cambio de forma

$$u_F = u - u_V \quad (1.17)$$

$$u_F = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2u(\sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z)] \quad (1.18)$$

$$- \frac{1-2\mu}{6E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 2\sigma_x \sigma_y + 2\sigma_x \sigma_z + 2\sigma_y \sigma_z]$$

$$u_F = \frac{1-2\mu}{3E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z] \quad (1.19)$$

Y para el caso general en donde existen tensiones tangenciales.

$$u_F = \frac{1-2\mu}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z] + 3[\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2] \quad (1.20)$$

En la cual representa a la energía que produce la fluencia o deformación plástica del material.

Obteniendo la ecuación final en función de las tensiones principales resulta:

$$u_F = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \quad (1.21)$$

Donde:

σ_1 = Es el mayor esfuerzo en una de las direcciones principales (x, y, z)

σ_2 = Es el menor esfuerzo en una de las direcciones principales.

σ_3 = Es el esfuerzo en la restante dirección principal.

1.1.4. Criterios de fluencia, tensiones y deformaciones efectivas

La mayor parte de la teoría de la plasticidad se ocupa finalmente de la predicción de las tensiones mecánicas o de los esfuerzos que actúan durante la deformación del metal y, en consecuencia de las fuerzas que se deben aplicar. (RODRÍGUEZ, 2011, pág. 70)

Al enfocar el problema de la determinación teórica de las cargas de trabajo existen dos factores, el primero, en el conformado de metales está determinado por las tensiones y esfuerzos que se generan dentro del metal, considerando adicionalmente la recuperación elástica que tiene lugar cuando desaparece la carga. En segundo lugar la fluencia está

provocada por una tensión directa que actúa solamente en una dirección y por lo tanto, se puede predecir fácilmente.

La fluencia depende de la combinación de todas las tensiones que actúan y se puede predecir solamente considerando las relaciones entre ellas llamados criterios de fluencia.

1.1.4.1. Criterios de fluencia

La deformación ocurre en un material sujeto a una tensión de tracción a lo largo de su eje (tracción uniaxial), cuando esta excede a la tensión de fluencia. Y el esfuerzo de fluencia se puede determinar a partir de la curva esfuerzo-deformación ya sea como un valor característico (el punto de fluencia) o como la resistencia a la fluencia.

En la mayoría de los procesos de conformación y corte, la deformación tiene lugar bajo estados más complejos de tensión, esto significa que se debe establecer un criterio de fluencia que permita considerar todas las combinaciones de tensiones, que producirán un flujo plástico.

Los criterios de fluencia mayormente utilizados son:

- Energía interna acumulada en una entidad de volumen.
- Criterios de Coulomb-Tresca-Guest.
- Criterio de Maxwell-Huber-Henky-Von Mises.

a. Criterios de fluencia de Tresca

Ocurre cuando la tensión cortante máxima excede un valor determinado crítico. Este criterio implica que la fluencia es independiente de la tensión principal intermedia, lo cual no es estrictamente cierto.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \text{constante } k = \tau_{crit} \quad (1.22)$$

De lo cual resulta que $\sigma_1 = Y$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$:

Y la ecuación final es:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{Y}{2} \geq k = \tau_{crit} \quad (1.23)$$

Lo cual significa que la tensión cortante crítica está relacionado con la tensión de fluencia en tracción simple.

b. Criterio de fluencia de Von Mises

El criterio se basa en que la fluencia ocurre cuando el trabajo de deformación por unidad de volumen realizado por el sistema de tensiones excede un valor crítico para el material particular, lo cual se expresa matemáticamente como: (RODRÍGUEZ, 2011, pág. 84)

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \geq C \quad (1.24)$$

La constante C es la misma para todos los sistemas de tensiones y la tensión uniaxial representada por $\sigma_1 = Y$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ (Ver Figura 1.8) por lo que puede ser usada para determinar C .

$$\sigma_1^2 + \sigma_1^2 = 2Y^2 = C \quad (1.25)$$

Por tanto el criterio de Von Mises se puede expresar por:

$$6k^2 = 2Y^2 \rightarrow k = \frac{Y}{\sqrt{3}} \quad (1.26)$$

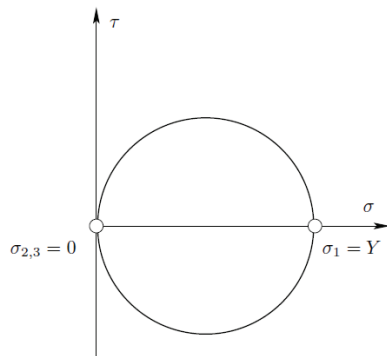


Figura 1. 8. Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de tracción simple uniaxial

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2011, pág. 17)

Comparando las ecuaciones (1.23) y (1.26) demuestra que la tensión cortante crítica en fluencia difiere en 1.15, lo que significa que el criterio de Von Mises requiere un valor de tensión cortante crítica 15% más alto para iniciar la fluencia que el criterio de Tresca, para metales dúctiles el criterio de Von Mises es más preciso, aunque de Tresca es aplicado en muchos casos debido a su simplicidad.

1.1.4.2. Tensión efectiva y deformación efectiva

La tensión y deformación efectiva o equivalente son una forma conveniente mediante las cuales los sistemas complejos se transforman en situaciones uniaxiales equivalentes. Una ventaja es que se puede utilizar la curva de tracción uniaxial (esfuerzo) – deformación para determinar, por ejemplo, las propiedades de endurecimiento por deformación.

La definición de tensión efectiva o equivalente o σ_e se basa en el criterio de fluencia de Von Mises y está dada por:

$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.27)$$

“Donde la constante $\frac{1}{2}$ se elige de tal manera que $\sigma_e = \sigma_1$ para tensión uniaxial $(\sigma_1, 0, 0)$. Esto se puede explicar básicamente como otra forma de expresar el criterio de fluencia de Von Mises (ósea el flujo ocurre cuando $\sigma_e \geq Y$)”. (RODRÍGUEZ, 2011, pág. 89)

De manera similar, la deformación efectiva o equivalente $\bar{\epsilon}$ está definida por:

$$\bar{\epsilon} = \left[\frac{2}{3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.28)$$

Las ecuaciones 1.27 y 1.28 constituyen un método simple para describe sistemas complejos de tensiones y deformaciones.

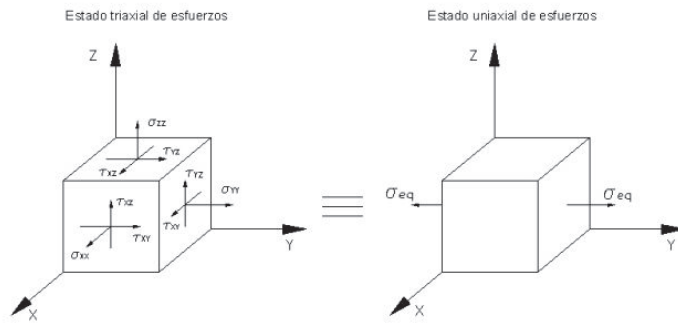


Figura 1. 9. Esfuerzo equivalente

Fuente: (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 24)

1.1.4.3. Diagrama límite de conformado (FLD)

La conformabilidad de un material es habitualmente definida como el arte que tiene el metal para deformarse hasta la forma esperada sin originar la fractura o la disminución excesiva del espesor por estricción. (DEL-LERO MOREAU, J, 2008, pág. 1, 2). Estos diagramas representan los límites de deformación de un material. Los valores a los que pueden llegar las deformaciones sin producir fractura son llamados límites de conformado.

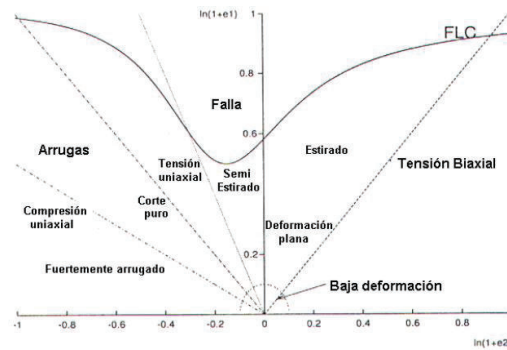
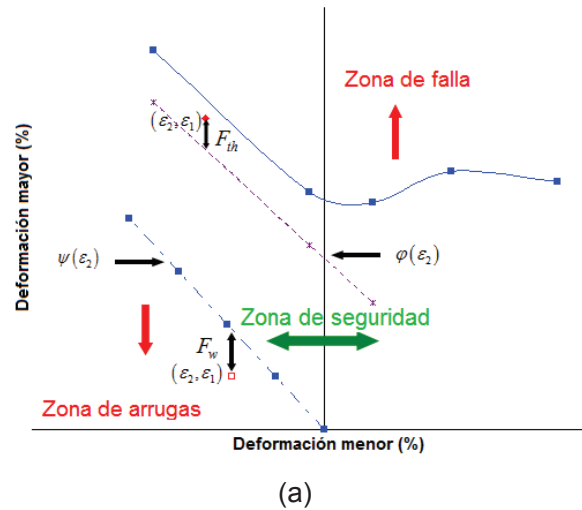


Figura 1. 10. Representación de diagrama límite de conformado

Fuente: (a) (MOHSEN, 2012, pág. 20)

Fuente: (b) (<http://www.cimne.com/projects/stamping/intro/default.html>)

Las líneas/curvas se estudian en dirección contraria a las agujas del reloj y pertenecen a las condiciones de deformación siguientes (ver figura 1.10): (PASCUAL GUARDIOLA, 2010, págs. 51, 52)

- Deformación biaxial (“Biaxial stretch”): El material se estira sin perder su forma, originando un alto valor de endurecimiento.
- Deformación plana (“Plane strain”): La plancha se estira en el plano de deformación y su valor principal es cero, siendo está la línea de ductilidad mínima.
- Tracción uniaxial (“Uniaxial tensión”): La tensión principal menor es cero, mientras que la tensión principal mayor es positiva, la deformación principal mayor es por lo tanto el doble de la deformación principal menor (en valores absolutos).

- Cizalla pura (“Pure shear”): Las tensiones principales mayor y menor son iguales y opuestas, las tensiones principales son por tanto, iguales y opuestas también. No hay ningún cambio en el espesor.
- Compresión uniaxial (“Uniaxial compression”): La deformación principal mayor es la mitad de la deformación principal menor (en valores absolutos).
- FLC: Este es el criterio del límite de falla de conformado.
- Semicírculo inferior: Este es el límite de deformaciones pequeñas.

Las curvas dividen el campo de deformación en una serie de zonas que corresponden a las condiciones de deformación siguientes (también en sentido anti-horario):

Una zona carece de importancia en el conformado:

- Deformaciones pequeñas (“Low strain”): Esta es la región en la que el material se somete a un comportamiento plástico muy pequeño y por lo tanto lejos de la falla.

Las siguientes tres zonas producen adelgazamiento:

- Alto estiramiento (“Tight panel”): Región donde se produce el mayor adelgazamiento.
- Estiramiento moderado (“Semi-tight panel”): Región donde el adelgazamiento es moderado en el material.
- Bajo estiramiento (“Loose material”): Región donde se evidencia un adelgazamiento pequeño.

Las siguientes dos zonas producen engrosamiento:

- Arrugas (“Wrinkling tendency”): Debido a las fuerzas de compresión generada en la chapa se observa la formación de arrugas.
- Fuerte Arrugamiento (“Strong wrinkling tendency”): Región que indica un fuerte arrugamiento de la plancha.

La zona que en el proceso de conformado debe evitarse es:

- Falla: Es la región donde el material tiende a romperse por haber superado su límite de falla (curva límite de conformado).

1.1.5. Criterios de falla plástica

Los materiales no son capaces de soportar esfuerzos de tracción que exceden la resistencia a la tracción local del material. El cálculo del movimiento dinámico de los materiales suponiendo que siempre permanecen continuos, incluso si las tensiones locales previstas alcanzan valores muy grandes, conducirá a soluciones no físicas.

En el sistema dinámico explícito pueden representarse varios modos diferentes de iniciación de falla. El fallo de elementos en el sistema dinámico explícito tiene dos componentes: Iniciación de falla donde existen varios mecanismos para iniciar el fallo en un material, y cuando se cumplan los criterios especificados dentro de un elemento, se activa una respuesta de fallo posterior.

Respuesta posterior al fallo

Después del inicio del fallo en un elemento, las características de resistencia subsiguientes del elemento cambiarán dependiendo del tipo de modelo de falla:

- Falla instantánea: al iniciarse el fallo, la tensión desviadora del elemento se pondrá inmediatamente a cero y se mantendrá en este nivel. Posteriormente, el elemento sólo será capaz de soportar presiones de compresión.
- Incumplimiento gradual (Daño): después de la iniciación del fallo, el esfuerzo del elemento está limitado por una ley de evolución de daños. Por lo general, estos resultados es una reducción gradual en la capacidad de los elementos para soportar tensiones deviatoricas y / o de presión. Por defecto, los modelos de falla de tracción producirán una respuesta instantánea de fallos posteriores. Además insertan una grieta de fallo de ablandamiento, así como también otras propiedades de iniciación de falla, esto da como resultado una respuesta de fallo gradual.

En esta sección se tratan los siguientes modelos de fallos: (ANSYS, 2013, pág. 1759)

- **Plastic strain failure:** esta falla se puede utilizar para modelar el fallo dúctil en materiales. La iniciación del fallo se basa en la efectividad del material. El usuario introduce un valor máximo de deformación plástica. Si la deformación plástica efectiva del material es mayor que el máximo definido por el usuario, se produce

el inicio de la falla, el material falla instantáneamente. Este modelo de falla debe utilizarse junto con un modelo de plasticidad o frágil en elementos shells. (ANSYS, 2013, pág. 1759)

- **Principal stress failure:** El fallo de tensión principal puede ser usado para representar un fallo quebradizo en los materiales. La iniciación del fallo se basa en uno de los dos criterios:
 - Máxima tensión de tracción principal
 - Esfuerzo de cizallamiento máximo (derivado de la diferencia máxima en las tensiones principales)

El fallo se inicia cuando se cumple cualquiera de los criterios anteriores, el material falla instantáneamente. La propiedad de fallo de ablandamiento de la grieta se puede combinar con esta propiedad para invocar fractura por ablandamiento basado en energía. (ANSYS, 2013, pág. 1759)

- **Principal strain failure:** la falla de la tensión principal puede usarse para representar fallas frágiles o dúctiles en los materiales. La iniciación del fallo se basa en uno de los dos criterios:
 - Máxima tensión de tracción principal
 - Máxima deformación por cizallamiento (derivada de la diferencia máxima en las tensiones principales) (ANSYS, 2013, pág. 1759)

El fallo se inicia cuando se cumple cualquiera de los criterios anteriores. El material falla instantáneamente.

- **Stochastic failure:** para modelar la fragmentación para la carga simétrica y la geometría es necesario imponer algún material heterogeneidad. Los materiales reales tienen defectos microscópicos inherentes, que causan fallas y grietas. Un enfoque para reproducir esto numéricamente es aleatorizar la tensión de falla o tensión para el material. Para realizar esto se utiliza una distribución de Mott para definir la varianza en el esfuerzo de fallo o deformación. A cada elemento se le asigna un valor, determinado por la distribución de Mott, donde el valor de uno es equivalente a la tensión de falla o tensión del material. (ANSYS, 2013, pág. 1759)

- **Tensile pressure failure:** el modelo de falla de presión de tracción permite especificar un máximo límite de tracción hidrodinámico. Esto se utiliza para representar una espiral dinámica (o cavitación) de la resistencia del material. El algoritmo simplemente limita la máxima presión de tracción en el material como: (ANSYS, 2013, pág. 1759)

$$P < P_{\min.} * (1 - D)$$

Si la presión de material P es menor que la presión de tracción máxima definida, el inicio de la falla ocurre. El material falla instantáneamente y la propiedad sólo puede aplicarse a cuerpos sólidos. (ANSYS, 2013, pág. 1759)

- **Crack softening failure:** El modelo de suavizado de grietas a tracción es un modelo de daños basado en energía de fractura que se puede usar con diferentes tipos de modelos de iniciación de falla para proporcionar una reducción gradual en la capacidad de un elemento para soportar tensiones de tracción. El modelo se utiliza principalmente para investigar la falla de materiales frágiles, se ha aplicado a otros materiales para reducir los efectos de la dependencia de la malla. (ANSYS, 2013, pág. 1759)
- **Johnson-Cook Failure:** El modelo de falla Johnson-Cook puede usarse para modelar fallas dúctiles de materiales que experimentan presiones, velocidades de deformación y temperaturas. Este modelo se construye de manera similar al modelo de plasticidad Johnson-Cook que consiste en tres términos independientes que definen la deformación dinámica de la fractura como una función de la presión, tasa de deformación y temperatura. (ANSYS, 2013, pág. 1759)

1.1.6. Recuperación elástica y factor de conformabilidad

Para la recuperación elástica en el material es necesario sobredimensionar o modificar sus dimensiones deseadas tanto de radios y ángulos de doblado, además está relacionada *“con la existencia de una zona de bajos esfuerzos, cerca del eje neutro del material, en la cual bajo grandes cargas únicamente existe deformación elástica, esta zona es la causante de la recuperación una vez retirada las cargas aplicadas. En los materiales maleables como el cobre o bronce la recuperación está dentro de los 0,5° y el*

acero hasta 1° , en cambio en el acero inoxidable puede llegar a ser de hasta 3° .
 (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 31)

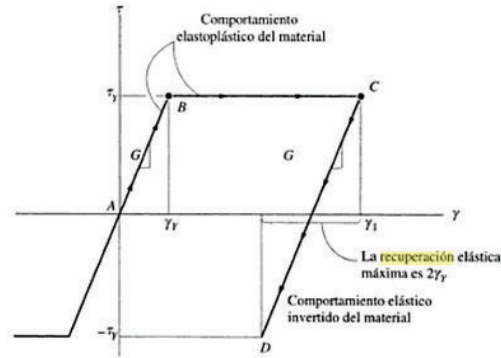


Figura 1. 11. Representación esquemática del diagrama de recuperación elástica

FUENTE : (HIBBELER, 2006, pág. 253)

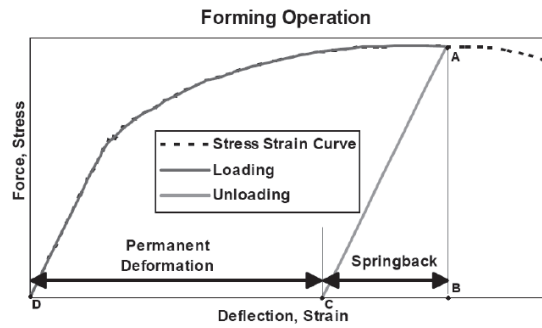


Figura 1. 12. Curva de esfuerzo en el momento de deformación

Fuente: (MOHAMMED SULIMAN, 2005-2006, pág. 85)

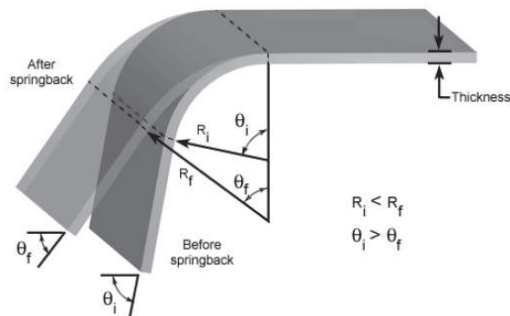


Figura 1. 13. Representación de una lámina doblada

Fuente: (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 31)

En donde:

$$K = \frac{(R_0 + \frac{t}{2})}{(R_f + \frac{t}{2})} \quad (1.29)$$

K = Matriz de rigidez

R = Radio de doblado

t = Espesor de la lámina

a. Coeficiente de recuperación elástica

Es la relación entre el ángulo de deformación resultante y el ángulo de deformación inicial luego de retirar la carga. (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 31)

$$R_e = \frac{\theta_f}{\theta_i} \quad (1.30)$$

b. Factor de conformabilidad

Es el grado de deformación inquebrantable que se obtiene si el ángulo de dobles no varía luego de retirada la carga. Si el valor de F es 1, se dice entonces que el estampado es completo, no hay recuperación elástica. (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 31)

Las relaciones entre deformación y el ángulo de conformado está dado por:

$$\theta_f = \theta_i * F \quad (1.31)$$

$$\theta_{recuperación} = \theta_i - \theta_i * F \quad (1.32)$$

Para obtener el ángulo deseado es necesario aplicar la carga con un ángulo de:

$$\theta_i = \frac{\theta_f}{F} \quad (1.33)$$

1.2. CONTEXTO DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN ACTUALES EN LA AUTOMOCIÓN

1.2.1. Situación actual del sector

El proceso de embutición es una de las áreas que más actividad ha generado en el sistema de mecanizados para la producción de partes automotrices, innovando sus productos y generando un dinamismo económico. En definitiva, este proceso de conformado ayuda al análisis de factibilidad del desarrollo de cualquier elemento metálico o de nuevos materiales, además facilitando el desmontaje, reutilización y valorización de la misma pieza conformada.

Por tal razón, este proceso ha ganado un desarrollo basado en los conceptos de seguridad sin relegar el confort y las nuevas necesidades de comunicación con los vehículos, adicionalmente se ha logrado una sostenibilidad con el medio ambiente y eficacia energética. (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 20)

1.2.2. La evolución de los materiales de fabricación

Debido a las normas internacionales el diseño de los automóviles ha tenido un cambio en la fase de Investigación-Diseño-Ingeniería, los cuales han obligado a la obtención y producción de nuevos materiales que contemplen mejores propiedades mecánicas (resistencia), así también estos materiales deben actuar de mejor manera frente a elevadas temperaturas de trabajo (motores, discos de freno), pero el principal objetivo es el reducir su peso para reducir el consumo de combustible. (ASCAMM, 2003)

En los últimos años la utilización de materiales compuestos se ha incrementado en la aplicación de estructuras, debido a la evolución de sus propiedades mecánicas en relación a rigidez, resistencia mecánica siendo capaz de absorber la energía de la carrocería, etc. Esta utilización de nuevos materiales lleva no sólo una adaptación de los procesos de fabricación actuales, sino el desarrollo de nuevos procesos que permitan obtener piezas con los requerimientos establecidos, sin sobredimensionar los mismos por desconocimiento.

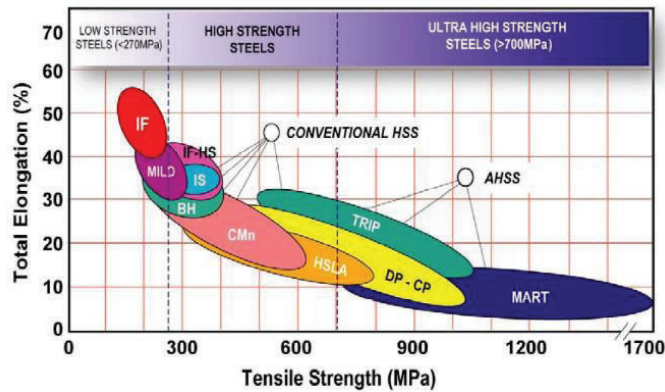


Figura 1. 14. Representación de relaciones de fuerza-alargamiento para una baja resistencia, HSS convencional y aceros AHSS

Fuente: (MOHAMMED SULIMAN, 2005-2006, pág. 13)

Dentro de los nuevos materiales están los siguientes:

- Aceros de alta resistencia y ultra resistencia
- Aleaciones ligeras: aluminio, magnesio-titanio, aluminio ASF
- Acero al carbono: el más frecuente por su ductilidad.
 - Espesor = 1.5 mm en carrocerías de automóvil, electrodomésticos,....
- Materiales compuestos de matriz orgánicos, metálica o cerámica, fibra de carbono (muy resistente a la flexión y la compresión y por sobre todas las cosas liviano)
- Recubrimientos cerámicos de aleaciones ligeras.
- Plásticos o polímeros que es el material más abundante en el armado del auto.

Fuente: Volkswagen: Passat 2010

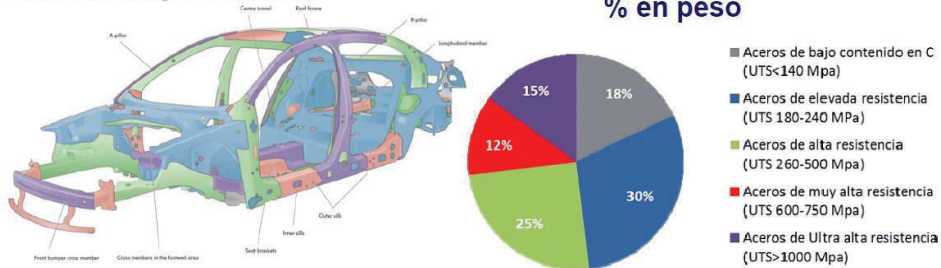


Figura 1. 15. Representación gráfica de materiales en una carrocería de un automóvil

Fuente: (ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA BILBAO, pág. 5)

1.2.3. Estudio comparativo de los nuevos materiales de fabricación

a. Aceros de alta resistencia y ultra resistencia

Los aceros de alta resistencia se utilizan en componentes de la carrocería, elementos de la suspensión, etc. Estos presentan valores límites elásticos entre 200 y 550 MPa., por encima de estos se encuentran los aceros llamados de alta resistencia mecánica (aceros AHSS) cuyo límite elástico es superior a 550 – 1200 MPa. (MOHAMMED SULIMAN, 2005-2006, pág. 13)

b. Aleaciones ligeras

Dentro de las aleaciones ligeras se tiene las del aluminio que por sus propiedades y bajo costo son muy utilizadas en la fabricación de piezas automotrices, en cambio las aleaciones de magnesio ostentan la mejor relación resistencia/peso, siendo más atractivas para la aplicación en la industria aeroespacial y del transporte pero por su baja resistencia a la corrosión y a su reactividad superficial con otros metales han sido relegados. Esto ha tenido el mismo efecto con las aleaciones de titanio que a pesar de poseer grandes propiedades mecánicas ha sido excluido por sus costes de fabricación elevados.

c. Materiales compuestos

Dentro de los materiales compuestos están los materiales con matriz metálica, la cual suele ser de aluminio, y las características principales son su bajo peso y excelentes propiedades mecánicas. Estos materiales tienen una buena amortiguación del sonido y son muchas las piezas dentro de un automóvil que son fabricadas como son los paneles de la carrocería, chasis, etc.

d. Cerámicos estructurales

Por su propiedad de resistir temperaturas elevadas a más de 1000 °C y esfuerzos continuos, estos materiales tienen un costo elevado y de difícil mecanizado, y al

presentar estas características son utilizados en la fabricación de piezas del motor los cuales trabajan a elevadas temperaturas como cilindros y émbolos.

1.3. PROCESO DE EMBUTICIÓN

1.3.1. Descripción del proceso de embutición

Se denomina embutición al proceso de conformado en frío de una lámina metálica, utilizando una matriz la cual al tener un cuerpo hueco de revolución o prismático, y mediante la presión ejercida por una prensa se obtiene un producto final con la forma deseada. Al desarrollar la deformación en la chapa se producen estados tensionales variables y muy complejos. (CARATE & GALLARDO, 2007, pág. 39)

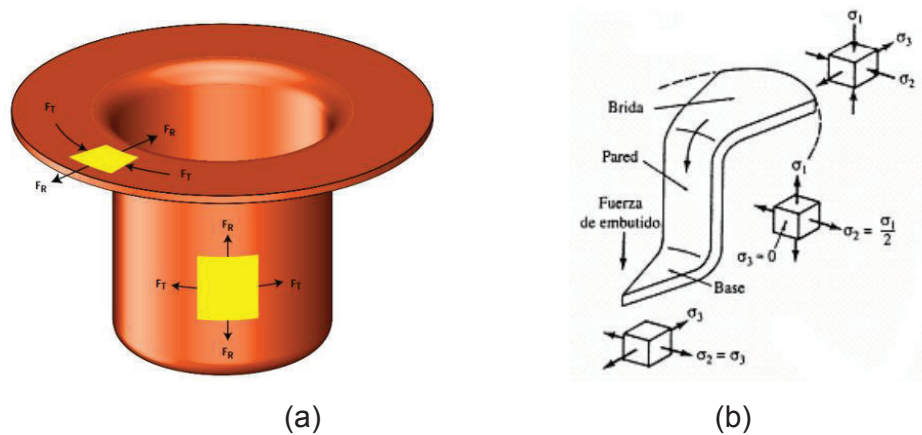


Figura 1. 16. Deformaciones y tensiones en un proceso de estampado

Fuente (a): (ALTÁN, 1998, pág. 157)

Fuente (b): (LÓPEZ NAVARRO, 1976, pág. 117)

1.3.1.1. Tipos de procesos de embutición

a. Embutición de efecto simple

La chapa metálica que se va a embutir se fija en la base de la matriz y el punzón baja y empuja al material, seguido se expulsa la pieza embutida con la ayuda de un expulsor.

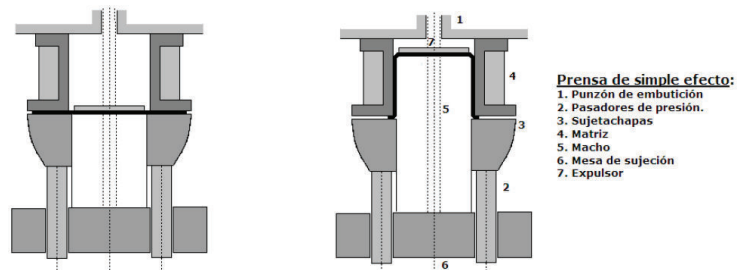


Figura 1. 17. Prensas de simple efecto

Fuente: (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 30)

b. Embutido de doble efecto

En este proceso de embutido la chapa es colocada en la matriz actuando en primera instancia el prensa chapas y posteriormente el punzón, al final estos dos últimos elementos juegan un papel importante actuando en la obtención del proceso de mecanizado.

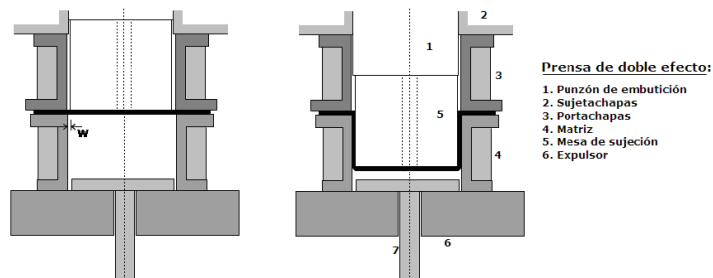


Figura 1. 18. Prensas de doble efecto

Fuente: (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 31)

c. Embutición inversa

El proceso en esta embutición inicia con la ubicación de la pieza en la abertura hacia abajo sobre una matriz negativa de embutir, el punzón desciende sobre la pieza y la deforma obteniendo profundidades mayores que con la embutición normal.

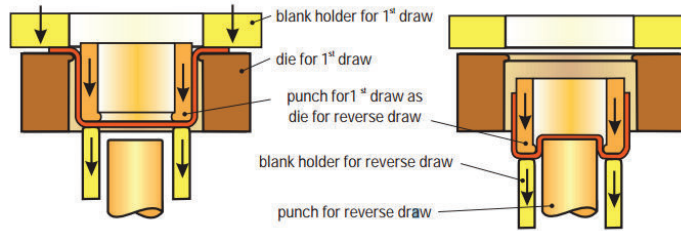


Figura 1. 19. Embutición inversa

Fuente: (ALTÁN, 1998, pág. 12)

d. Embutición profunda

La tecnología de embutido profundo de chapa metálica es uno de los procesos de manufactura de mayor desafío ya que dependen de diferentes variables como el espesor y la diferencia entre sus diámetros tanto del disco de embutición y de la matriz. La dimensión de los redondeamientos se puede tomar de tablas, más cuando los radios son relativamente pequeños originando roturas, y en cambio cuando los redondeamientos son grandes se forman arrugas en la zona superior de la chapa.

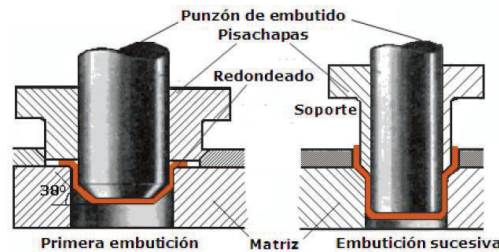


Figura 1. 20. Representación de embutición profunda

Fuente: ([http://es.scribd.com/doc/5644887/3-teoria-de-la-embutición.](http://es.scribd.com/doc/5644887/3-teoria-de-la-embutición))

1.3.2. Embutido sin prensa chapas

Solamente puede embutirse sin prensa chapas piezas que tengas poca profundidad de embutición, es decir, con pequeña relación de embutición β , como, por ejemplo: botes de crema para los zapatos y sus tapas. La altura de pared lateral h que puede conseguirse sin prensachapas es función del espesor de la chapa s y del diámetro d , y cumple con la siguiente igualdad empírica: (OEHLER & KAISER, 1977, pág. 344)

$$h \leq 0.3\sqrt[3]{d^2} \sqrt{s} \quad (1.34)$$

Donde:

h = Altura de la pared lateral en mm.

β = Relación de embutición máxima admisible

d = Diámetro del embolo en mm.

s = Espesor de la chapa en mm.

1.4. VARIABLES DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN

1.4.1. Obtención del desarrollo de la chapa

Para efectuar el cálculo se asume que la disminución del espesor de las paredes de la chapa es nulo, por lo tanto, el desarrollo final del producto es el mismo que el de la pieza metálica inicial, con estos antecedentes se podrá realizar el cálculo del desarrollo de la chapa a utilizar.

a. Parámetros de embutición

Para la obtención del desarrollo de una pieza se profundiza en la relación de embutido DR también llamada razón máxima de embutido RME o LDR por sus siglas en inglés. Esta se define, para una forma cilíndrica, como la relación entre el diámetro del disco inicial D_d y diámetro del punzón D_p . (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 35)

$$DR = \frac{D_d}{D_p} \quad (1.35)$$

- Relación máxima de embutido es 2.0.

Dónde:

D_d = Diámetro inicial del disco, (mm)

D_p = Diámetro del punzón, (mm)

El valor limitante real depende del radio de las esquinas en el punzón y de la matriz (R_p y R_m), de las condiciones de fricción, de la profundidad de embutido y de las características de la lámina de metal (ductilidad y propiedades de resistencia en el metal). Existe otra forma para caracterizar una operación dada de embutido que es por la reducción r , que debe ser menor o igual a 0.5 y se determina por:

$$r = \frac{D_d - D_p}{D_p} \quad (1.36)$$

1.4.2. Herramientas de embutición

1.4.2.1. Punzón

Comunica la fuerza de embutido para su deformación. (MARCINIAK, 2002, pág. 117)

$$F = \pi D_p t (S) \left(\frac{D_d}{D_p} - 0.7 \right) \quad (1.37)$$

Dónde:

F = Fuerza de embutido, (N)

t = Espesor original, (mm)

S = Resistencia a la tensión (MPa)

0.7 = Es una corrección para la fricción.

1.4.2.2. Prensa chapas

Ejerce la presión sobre la chapa, evitando la formación de pliegues y la fluencia entre la matriz y el punzón. La fuerza de sujeción como primera aproximación se debe fijar en un valor = 0.0015 de la resistencia a la fluencia de la lámina del metal. Esto se determina por la siguiente ecuación:

$$F_h = 0.0015\pi S \left[D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2r_m)^2 \right] \quad (1.38)$$

Donde:

F_h = Fuerza de sujeción, (N)

S = Esfuerzo de fluencia de la lámina de metal, (MPa)

t = Espesor inicial del material, (mm)

r_m = Radio de la esquina de la matriz, (mm)

1.4.2.3. Matriz

Elemento que funciona como molde y conjuntamente con el punzón confieren la forma final a la lámina metálica.

1.4.3. Factores de forma en la embutición

a. Radios de aristas

Son los radios de borde del punzón, y si es demasiado pequeño cortará el material y si es grande producirá pliegues dobles, el radio se lo puede calcular por la siguiente ecuación (OEHLER & KAISER, 1977, pág. 330):

$$r_M = \frac{0.04D_d}{D_p * \beta} [50 + (D_d - D_p)]\sqrt{S} \quad (1.39)$$

Donde:

r_M = Radio de redondeo de la matriz, (mm)

β = Relación de embutición máxima admisible (relación de gradación)

El radio mínimo del embolo o punzón debe ser por lo menos de 3 a 5 veces mayor que el redondeo de la arista de embutición. (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 41)

b. Juegos ente el punzón y la matriz

El juego que debe existir entre estos dos elementos está entre el 10-20% mayor al espesor original del material, esto favorece al esfuerzo empleado por el punzón, al existir

un juego grande puede producir la deformación, formación de ondulaciones y pliegues en la pieza, por el contrario si el juego es pequeño produce un adelgazamiento de la pared de la pieza. Un juego aceptable, experimentalmente es igual a 1.4 veces el espesor de la chapa, esto se demuestra según las siguientes formulas empíricas (OEHLER & KAISER, 1977, pág. 334):

Chapa de acero:

$$c = e + 0.07a\sqrt{10e} \quad (1.40)$$

Chapa de aluminio blanda:

$$c = e + 0.02a\sqrt{10e} \quad (1.41)$$

Chapa de materiales no ferrosos:

$$c = e + 0.04a\sqrt{10e} \quad (1.42)$$

Chapa de aleaciones resistentes a altas temperaturas:

$$c = e + 0.20a\sqrt{10e} \quad (1.43)$$

Donde para embuticiones cilíndricas se cumple:

$$a = \beta \frac{D_p}{D} \quad (1.44)$$

Donde:

c = Holgura de la chapa

e = Espesor de la chapa

D = Diámetro del desarrollo

c. Velocidad de embutición

Es la velocidad que se le da al carro de la prensa al momento de entrar en contacto el embolo con el material. En la siguiente tabla se indica las velocidades según los materiales conformados:

Tabla 1.1. Velocidad de embutición para diferentes materiales

Material	Velocidad de formado en condiciones ideales(cm./seg)	Velocidad de formado comúnmente empleadas(cm./seg)
Aluminio	76-88	50
Bronce	88-101	75
Cobre	63-76	-
Acero	9-25	25
Acero inoxidable	15-20	20
Zinc	63-76	20

Fuente: (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 43)

d. Fricción en la embutición

Aumenta la presión superficial entre la herramienta y el material de chapa, lo que resulta en la deformación de ambos, con la degradación posterior de calidad de la superficie y el desgaste de las herramientas. Esto aumenta la demanda de fuerza de la prensa, a menudo escalada considerablemente sus niveles. (SUCHY I, 2006, pág. 77)

Existen diferentes tipos de fricción: (SUCHY I, 2006, pág. 78)

- **Estática o fricción seca:** es un lubricante metálico por ejemplo plomo, zinc, estaño o cobre pueden mejorar esta condición
- **Fricción sin límites:** cuando dos superficies están separadas por una capa delgada de lubricante no metálico.
- **Hidrodinámico:** las dos superficies están separadas por un lubricante viscoso.
- **Fricción o combinado:** una combinación de las anteriores.

e. Lubricación

La función principal del lubricante es disminuir la influencia de la fricción entre las superficies en contacto, adicionalmente actúan como refrigerante y aislamiento térmico evitando que los materiales se suelden en frío, beneficia al terminado y aumenta la capacidad de transformación del material, en algunos casos se ha observado que las soluciones de jabón en agua tienen una mayor aptitud que el aceite para retener la chapa, en la industria se observa el uso de cebo de animal.

El proceso real de la lubricación es proporcionada por varios ingredientes básicos. Estos son: (SUCHY I, 2006, págs. 78, 79)

- Aceites minerales, que son derivados del petróleo, tales como aceite de motor, fluido de transmisión, y SAE-aceites.
- Los aceites solubles en agua, que son una combinación de aceites minerales, ajustados por una adición de otros elementos para convertirse en emulsionable con agua.
- Aceites y Grasas grasos, más a menudo de origen vegetal o animal, tales como la manteca de cerdo, aceite de pescado, cebo, todos los aceites vegetales, y cera de abejas.
- Jabones metálicos, que son insolubles en agua, tales como estearato de aluminio y estearato de zinc.

1.5. DEFECTOS QUE SE PRODUCEN POR EMBUTICIÓN

1.5.1. Formación de arrugas

Las líneas de fluencia (líneas de Luders) se forman en la zona límite de alargamiento, según la forma de la pieza. Existen 3 razones por las que se producen por compresión (a), exceso de material (b) y por el flujo del material (c). (PASCUAL GUARDIOLA, 2010, pág. 46)

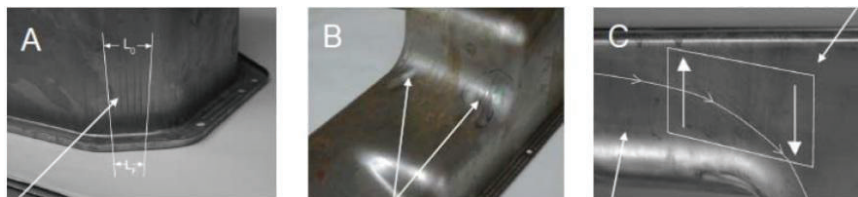


Figura 1. 21. Formación de arrugas

Fuente: (PASCUAL GUARDIOLA, 2010, pág. 46)

1.5.2. Grietas

Se generan al momento que el material es sometido a un adelgazamiento excesivo. Las grietas se producen generalmente en los radios de curvatura.



Figura 1. 22. Grietas originadas por una embutición grande

Fuente: (PASCUAL GUARDIOLA, 2010, pág. 45)

1.5.3. Émbolo descentrado

Un factor importante a tomar en cuenta en el momento de la operación, debido a que las piezas embutidas se rompen en la zona más estrecha del juego de embutición. Como muestra la Figura 1.23, donde el émbolo está descentrado en una medida e con respecto a la matriz, de tal forma que las piezas embutidas se rompen por a .

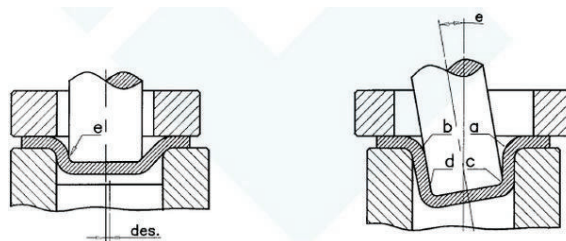


Figura 1. 23. Descentramiento del eje del émbolo con respecto al de la matriz

Fuente: (<http://es.scribd.com/doc/5644887/3-teoria-de-la-embutición.>)

1.5.4. Presencia de orejas

Causadas por la acumulación de material, inician su aparición en las esquinas superiores de la pieza embutida.

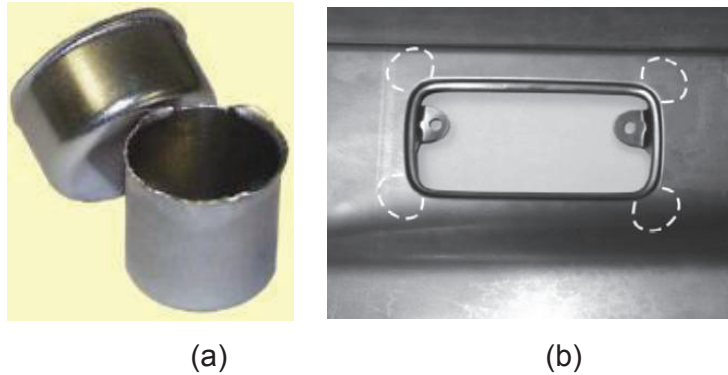


Figura 1. 24. Formación de orejas en el borde de una pieza embutida

Fuente (a): ([http://es.scribd.com/doc/5644887/3-teoria-de-la-embutición.](http://es.scribd.com/doc/5644887/3-teoria-de-la-embutición))

Fuente (b): (PASCUAL GUARDIOLA, 2010, pág. 47)

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

2.1. ASPECTOS IMPORTANTES DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Las diferentes complicaciones matemáticas ha implicado el desarrollo de métodos aplicables al análisis estructural de cualquier elemento, los cuales son sometidas a deformaciones mecánicas y térmicas tanto estacionarias como transitorias. El método de los elementos finitos simplifica las ecuaciones diferenciales por un conjunto discreto de ecuaciones con sus respectivas condiciones o límites de contorno para su posterior resolución.

2.1.1. Sistemas continuos

Un modelo matemático en sistemas continuos se le considera cuando se realiza un número de divisiones infinitas, y estas no pueden ser observadas con claridad y necesitan ser tratadas de una manera infinitesimal. (CARATE & GALLARDO, 2007, pág. 39). La idea general del método numérico por elementos finitos es la discretización del problema mediante un proceso de modelización con pequeños elementos interconectados por una cadena de puntos llamados nodos. Estos ayudan a obtener el campo de desplazamientos así como también las incógnitas que se generan e interesan como son: tensiones, deformaciones, etc.

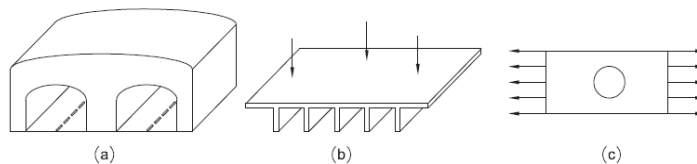


Figura 2. 1. Sistemas continuos: a) túneles., b) bases y c) placas

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis por el método de elementos finitos se debe considerar tres variables para la resolución de problemas:

- a) **Dominio.**- Es la superficie o espacio del elemento donde se realiza el análisis del sistema, mediante puntos en el caso lineal, líneas en el caso bidimensional y superficies en el tridimensional. (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 5)
- b) **Condiciones de contorno.**- Datos conocidos que condicionan el cambio del sistema: desplazamientos, fuerzas, fenómenos termodinámicos, cargas eléctricas, etc. (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 5)
- c) **Incógnitas.**- Variables del sistema que se desea obtener después de aplicar las condiciones de borde o contorno. (Hernández & Vásquez , 2010, pág. 5)

2.1.1.1. Discretización de un sistema continuo

La manera de discretización de un sistema continuo se da por medio de ciertos elementos que se usan de acuerdo al campo de acción en el cual se está efectuando el fenómeno.

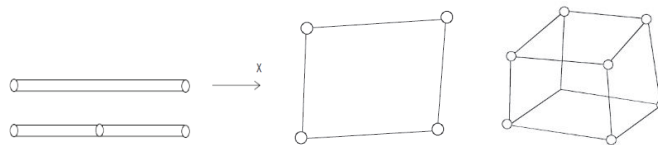


Figura 2. 2. Elementos finitos a) unidimensionales, b) bidimensionales, c) tridimensionales

Fuente: (CELIQUETA LIZARZA, 2008, pág. 5)

2.1.2. Sistemas discretos

Se define a un sistema discreto como al planteamiento del problema del sistema continuo en el cual se describe el comportamiento de cada elemento, y también el comportamiento del sistema en conjunto (parámetros). Este planteamiento conduce a unas ecuaciones que no tienen solución analítica en la mayor parte de los casos.

$$u = f_1(x, y) \quad \varepsilon = f_2(x, y) \quad \sigma = f_3(x, y) \quad (2.1)$$

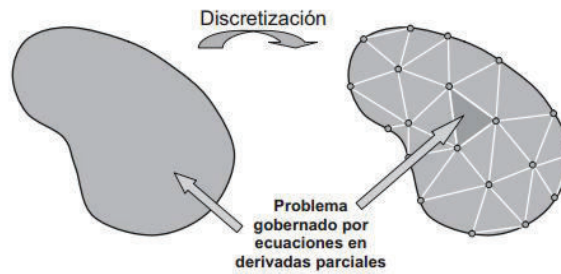


Figura 2. 3. Discretización de un sistema continuo a un sistema discreto

Fuente: Elaboración propia

2.2. FORMULACIÓN DIRECTA DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A esta formulación se le considera como una derivación del método directo de rigidez, aplicable para cualquier situación. Las propiedades del material se establecen empleando directamente las ecuaciones físicas para formar ecuaciones para los elementos de la discretización en términos variables. Dichas ecuaciones se combinan posteriormente para formar las ecuaciones que gobiernan el sistema completo, el procedimiento de ensamble es común en todos los análisis del método del elemento finito.

a. Función desplazamiento

Un típico elemento finito, e , se define por los nodos, i, j, m , etc. y los límites en línea recta. Sean los desplazamientos u para cualquier punto dentro del elemento, esto está aproximado como un vector columna $\hat{u}(x, y, z)$, en la cual los componentes de N son funciones prescritas de posición a^e representando un listado de desplazamientos nodales para un elemento particular. (ZIENKIEWICO & TAYLOR, 1994, pág. 24)

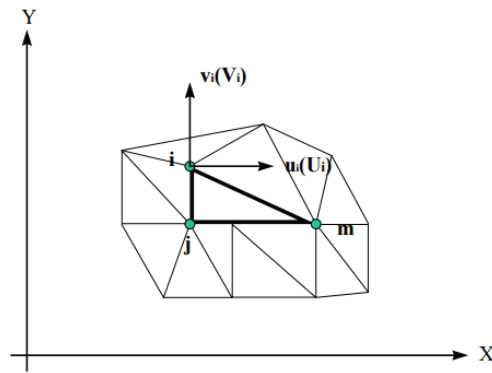


Figura 2. 4. Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de nodos

Fuente: (ZIENKIEWICO & TAYLOR, 1994, pág. 24)

Analizando se determina u :

$$u \approx \hat{u} = \sum N_i a_i^e = (N_i, N_j, \dots) \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \end{Bmatrix}^e = N a^e \quad (2.2)$$

En el caso de esfuerzo plano por ejemplo:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

La ecuación siguiente representa movimientos horizontales y verticales de un punto típico dentro del elemento y el desplazamiento correspondiente de un nodo i.

$$a_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Las funciones N_i, N_j, N_m , son matrices de forma, que se identifican con las siguientes propiedades:

- Son cuadradas, porque el número de elementos del vector columna $\hat{u}(x, y, z)$ es igual al número de componentes en a_i, a_j, \dots
- Cumple que $N_i(x_i, y_i, z_i) = I$ (matriz identidad), $N_i(x_j, y_j, z_j) = [0]$ si $i \neq j$, puesto que las funciones de interpolación toman los valores de los desplazamientos nodales en los mismos. Por lo tanto, se considera las mismas funciones de forma en todas las componentes de $\hat{u}(x, y, z)$, dando lugar a:

$$N_i(x_i, y_i, z_i) = N_i(x, y, z). [I] \quad (2.5)$$

Donde $N_i(x, y, z)$ es la función escalar de forma.

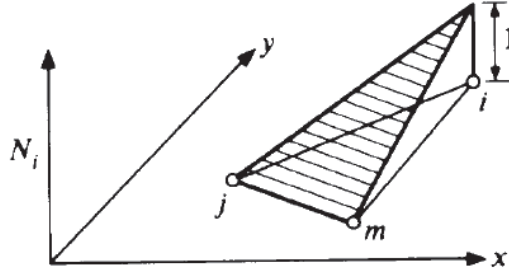


Figura 2. 5. Interpolación lineal en el caso de un triángulo

Fuente: (ZIENKIEWICO & TAYLOR, 1994, pág. 25)

b. Deformaciones unitarias

Es el desplazamiento conocido para todos los puntos dentro del elemento, la deformación para cualquier punto puede determinarse mediante derivadas parciales de las componentes. Esto resultara siempre en una relación la cual puede ser escrita en notación matricial como: (SANDOVAL , 2009, pág. 94)

$$\varepsilon = L u \quad (2.6)$$

Donde:

L: es un operador lineal apropiado que incluye las derivadas parciales adecuadas. Y para el caso de esfuerzo plano las deformaciones relevantes de interés son aquellas que ocurren en el plano y se definen en términos de los desplazamientos.

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Esta ecuación muestra al operador matricial ∂ que permite convertir las deformaciones de un punto u a las deformaciones unitarias ε . Este operador posee tantas filas como deformaciones unitarias y tantas columnas como componentes tengan el campo de desplazamientos u en el problema. (CELIGUETA LIZARZA, 2008, pág. 17)

Reemplazando las deformaciones u en función de las deformaciones nodales, mediante las funciones de interpolación, se obtiene:

$$\varepsilon = \partial u = \partial N \delta^e \quad (2.8)$$

Siendo la matriz B el campo de deformaciones unitarias que se expone en el interior del elemento finito:

$$B = \partial N \quad (2.9)$$

Tal que se cumple que:

$$\varepsilon = B \delta^e \quad (2.10)$$

c. Estado de tensiones

Las tensiones en un punto cualquiera dentro de los límites del elemento puede ser sujeto a deformación inicial debido a cambios de temperatura, contracciones, crecimiento de cristal, y así sucesivamente. Tal deformación se denota por ε_0 , entonces el esfuerzo será causado por la diferencia entre la deformación final e inicial. (ZIENKIEWICO & TAYLOR, 1994, pág. 26)

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

En consecuencia al comienzo del análisis del cuerpo se realiza por los esfuerzos residuales iniciales σ_0 . Así suponiendo la conducta lineal elástica, las relaciones entre esfuerzo y deformación serán lineales y de la forma:

$$\sigma = D (\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (2.12)$$

Donde D es una matriz rigidez del material, y depende de dos parámetros del módulo de elasticidad E y del módulo de Poisson ν

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

La matriz D puede ser simplemente obtenida de las relaciones isotrópicas usuales para esfuerzo-deformación.

$$\varepsilon_x - (\varepsilon_x)_0 = \frac{1}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_y, \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_y - (\varepsilon_y)_0 = -\frac{\nu}{E} \sigma_x + \frac{1}{E} \sigma_y, \quad (2.15)$$

$$\gamma_{xy} - (\gamma_{xy})_0 = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (2.16)$$

Resolviendo:

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

d. Equilibrio del elemento

Para el equilibrio del elemento debe existir una distribución de fuerzas volumétricas por unidad de volumen $\{q_V\}$, además deben actuar fuerzas superficiales por unidad de superficie $\{q_S\}$, esto se lo conoce como el principio de los trabajos virtuales en el cual el objetivo principal es determinar el conjunto de fuerzas nodales $\{P_N^e\}$ o variación de las deformaciones para que coexista un equilibrio en el elemento. (SEGERLIND, 1984, pág. 75)

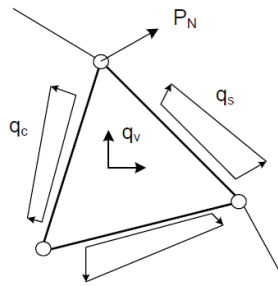


Figura 2. 6. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento

Fuente: (CELIGUETA LIZARZA, 2008, pág. 19)

La formulación de los trabajos virtuales consiste en :

$$\int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + \int_c N^T q_c ds + P_N^e = \int_v B^T \sigma dv \quad (2.18)$$

La variación de las deformaciones unitarias se relaciona con la variación de las deformaciones nodales a través de la matriz B. La integral debida a las fuerzas distribuidas q_c sobre el contorno de unión (desconocidas) se sustituye por:

$$\int_c N^T q_c ds = P_c^e \quad (2.19)$$

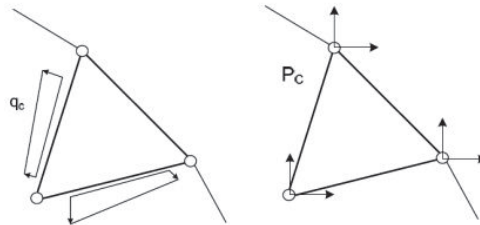


Figura 2. 7. Fuerzas de equilibrio en un elemento

Fuente: (CELIGUETA LIZARZA, 2008, pág. 21)

$$\int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + P_c^e + P_N^e = \int_v B^T \sigma dv \quad (2.20)$$

Sustituyendo en ella el valor de la tensión mediante la ecuación constitutiva (2.12) se obtiene:

$$\int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + P_c^e + P_N^e = \int_v B^T (D (\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0) dv \quad (2.21)$$

Reordenando los distintos términos se llega a:

$$\int_v B^T D B dv \delta^e = \int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + \int_v B^T D \varepsilon_0 - \int_v B^T \sigma_0 dv + P_c^e + P_N^e \quad (2.22)$$

Esta es la ecuación final de equilibrio del elemento finito considerado. En ella se identifica los siguientes términos:

- **Matriz de rigidez del elemento finito.** Es una matriz cuadrada simétrica de igual tamaño al número de grados de libertad del elemento.

$$K^e = \int_v B^T D B dv \quad (2.23)$$

- **Vector de fuerzas nodales equivalentes** es el producto de las fuerzas actuantes por unidad de volumen.

$$P_v^e = \int_v N^T q_v dv \quad (2.24)$$

- **Vector de fuerzas nodales equivalentes** relaciona las fuerzas exteriores aplicadas en la superficie.

$$P_s^e = \int_s N^T q_s ds \quad (2.25)$$

- **Vector de fuerzas nodales equivalentes** producidas por las deformaciones iniciales existentes en el material:

$$P_T^e = \int_v B^T D \varepsilon_0 dv \quad (2.26)$$

- **Vector de fuerzas nodales equivalentes** son producto de las tensiones iniciales existentes en el material:

$$P_b^e = \int_v B^T \sigma_0 dv \quad (2.27)$$

Después de haber analizado la ecuación de equilibrio del elemento se la expresa de la siguiente manera:

$$K^e \delta^e = P_v^e + P_s^e + P_T^e + P_b^e + P_c^e + P_N^e \quad (2.28)$$

Y la formulación de la matriz de rigidez es:

$$K = \int_v B^T D B dv = \int_v B^T Q^T D' Q B dv \quad (2.29)$$

2.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Para la reducción del número de ecuaciones de equilibrio y de incógnitas se utiliza las condiciones de contorno, las cuales ayudan a resolver un sistema una vez sustituidos sus desplazamientos. El problema se presenta al no sustituir un número mínimo de desplazamientos obligados para impedir que la estructura se mueva como un sólido rígido, sería imposible resolver el problema pues los desplazamientos no pueden estar unívocamente determinados por las fuerzas y habría infinitas soluciones para un sistema de fuerzas dado. Este hecho, físicamente evidente, debe interpretarse matemáticamente en razón de que la matriz de rigidez K, al ser singular, carece de inversa. (ZIENKIEWICO & TAYLOR, 1994, pág. 12)

a. Restricción de desplazamiento.

Aplicando el principio del trabajo virtual se obtienen las ecuaciones de equilibrio y las condiciones de contorno asociadas a ellas, las condiciones de contorno fijan el cuerpo en el espacio. Para imponer la condición de contorno bastara con sustituir la ecuación de equilibrio asociada con el desplazamiento prescrito (incógnita a priori) por la ecuación del valor real de la prescripción. En este caso: para X es $u_i = 0$, y para el desplazamiento en Y es $v_i = 0$.

A nivel práctico esto se traduce en eliminar las filas y columnas del sistema de ecuaciones que están relacionadas con el desplazamiento prescrito. Por lo tanto se reduce la dimensión del sistema a resolver y solo se calculan las verdaderas incógnitas del problema.

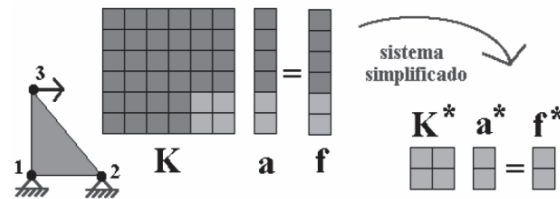


Figura 2. 8. Aplicación de condiciones de contorno con $u_i=0$. y $v_i=0$

Fuente: (OÑATE, 1995, pág. 21)

2.4. DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES BÁSICAS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Para la aproximación del análisis numérico o ecuaciones básicas se efectúa una aproximación quasi - estática de los efectos dinámicos del sistema. Estos efectos se aplican a coeficientes de ampliación dinámica equivalente a dichas acciones estáticas. Al realizar esto se producen condiciones de elevadas frecuencias inestables, donde el intervalo de tiempo se reduce teniendo un modelo de formulación explícita.

Para lo cual basándonos en un volumen de control se procede a determinar la ecuación básica del modelo:

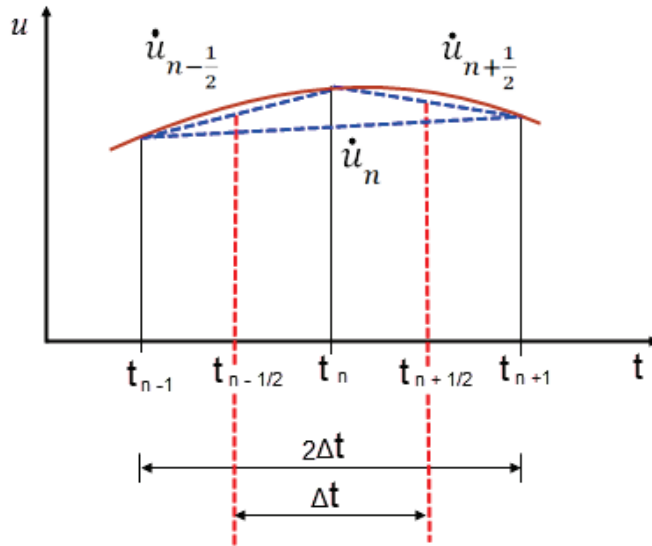


Figura 2. 9. Diferenciación central para determinar la ecuación general de movimiento

Fuente: Elaboración propia

Donde la velocidad está determinada por:

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (2.30)$$

Y la aceleración:

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(\dot{u}_{n+1/2} - \dot{u}_{n-1/2}) \quad (2.31)$$

Y al remplazar el valor de $\dot{u}_{n+1/2}$ y $\dot{u}_{n-1/2}$ se tiene:

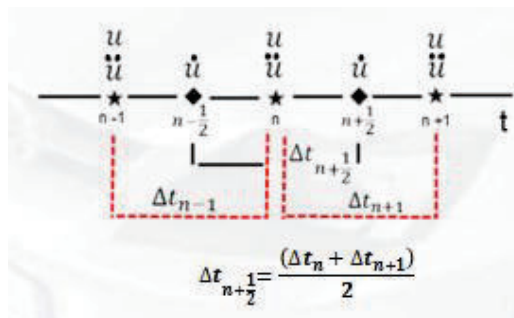


Figura 2. 10. Algoritmo para análisis explícito estable

Fuente: Elaboración propia

$$\dot{u}_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2\Delta t} (u_{n+1} - u_n) \quad (2.32)$$

Y al sustituir en la ecuación 2.31 se obtiene

$$\begin{aligned} \ddot{u}_n &= \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} - \frac{u_n - u_{n-1}}{\Delta t} \right) \\ \ddot{u}_n &= \frac{1}{\Delta t^2} (u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Y para obtener la ecuación básica se expresa la ecuación general de movimiento para la solución explícita:

$$[M]\ddot{u}_n + [C]\dot{u}_n + [K]u_n = [F_n^{externa}] \quad (2.34)$$

Donde:

M es la masa del elemento

C es el amortiguamiento propio del material y

K es la rigidez dada por el módulo de elasticidad del material

F es la fuerza externa que provoca el desplazamiento

n es el desplazamiento

Y sustituyendo en la ecuación general de movimiento (2.34) las ecuaciones (2.31) y (2.33) se obtiene la ecuación básica del modelo:

$$\begin{aligned} \left([M] \frac{1}{\Delta t^2} + [C] \frac{1}{2\Delta t} \right) u_{n+1} + \left([K] - [M] \frac{2}{\Delta t^2} \right) u_n + \left([M] \frac{1}{\Delta t^2} - [C] \frac{1}{2\Delta t} \right) u_{n-1} \\ = [F_n^{externa}] \end{aligned} \quad (2.35)$$

2.5. PASOS REQUERIDOS PARA EL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

El análisis por el método numérico es un trabajo laborioso, para que sea eficiente, es necesario establecer una estrategia adecuada en función del tipo de problema contando con las siguientes propiedades:

- Derivabilidad
- Integrabilidad
- Semejanza con las leyes de distribución de desplazamientos dentro de un sistema.
- Condición de polinomio completo, en caso de ser esta la forma escogida para que la función se aproxime a la solución real hasta el término n-ésimo.

La solución del problema general toma la siguiente estrategia: (PORTABELLA CASTANY, 2014, págs. 4, 5)

- Discretización de la estructura. Consiste en dividir la estructura en elementos, definiendo los grados de libertad entre sus nodos, cada tipo de elemento tiene ventajas para una geometría.
- Selección del modelo de interpolación. Los desplazamientos de una estructura sometida a un estado de carga no pueden predecirse exactamente, por lo que, se asume una posible solución debiendo satisfacer los requerimientos de convergencia y a la vez ser simple.
- Obtención de la matriz de rigidez $[K^{(e)}]$ y del vector de carga $F^{(e)}$, este proceso se lo realiza usando las condiciones de equilibrio u principio razonable de variación para cada elemento.
- Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos la cual sirve para el cálculo de deformaciones y esfuerzos. Obteniendo $[K]\vec{a} = \vec{F}$.

- La ecuación de equilibrio general debe ser modificada, pero debe cumplir las condiciones de borde.
- Determinado el vector de desplazamientos nodales, se obtiene las tensiones y deformaciones generadas dentro del objeto de estudio.
- Se introduce las condiciones de frontera, aplicando los tipos de apoyo en los nodos especificados y se especifica la dirección que se debe restringir. En este mismo paso se colocan las cargas correspondientes, ya sea de presión, puntual, temperatura, etc., según sea el caso. Finalmente se procede a hacer el análisis donde se obtendrán los esfuerzos, deformaciones y producto terminado que es el objetivo de esta investigación.

a. Análisis mediante software

El análisis mediante software, facilita la solución a un determinado modelo, considerando siguiendo las etapas:

- **Pre proceso.** Generar el modelo en CAD en 2D o 3D según las características del problema, se realiza el mallado dividiendo al modelo y creando nodos, se aplica las propiedades, cargas y restricciones del objeto en estudio.
- **Análisis.** El procesador utilizado procede a resolver las ecuaciones generadas.
- **Post-proceso.** Los resultados obtenidos se los visualiza con la ayuda de herramientas adecuadas, las cuales conciben desplazamientos, esfuerzos, velocidades o variaciones de temperatura en una escala de colores y valores.

2.6. FORMULACIÓN PARA ANSYS Y DEFINICIÓN DE TIPO DE ELEMENTO PARA EL CASO DE ESTUDIO

2.6.1. Tipos de elementos

2.6.1.1. Elementos planos (2D):

Los tipos de elementos pueden ser: (MECHANICAL EVENT SIMULATION)

Los hidrodinámicos 2D utilizados en simulaciones que presentan la interacción de sólidos y fluidos los cuales experimentan grandes distorsiones.

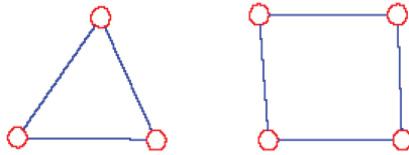


Figura 2. 11. Elementos planos: triángulo (3 nodos), cuadrilátero (4 nodos)

Fuente: Elaboración Propia

Los elementos cinemáticos 2-D se utilizan para simular estructuras que experimentan pequeñas deformaciones relativas después de ser sometidos a determinadas cargas. Se incluyen en modelos axisimétricos, y al poseer masa pueden transmitir cargas lo que genera movimiento y tensiones en elementos flexibles.

2.6.1.2. Elementos cáscara (SHELL)

Para la simulación de sólidos de sección transversal fina donde experimentan tensiones de flexión y membrana (cargas constantes de tracción o compresión) se utiliza los elementos tipo Shell por ejemplo placas delgadas. Específicamente se aplica en estructuras laminares, siendo el espesor menor a 0.1 veces su longitud menor. Además este tipo de elementos permiten cargas en el plano y normales al mismo y solo se emplea en análisis dinámicos explícitos (no lineales).

2.6.1.3. Elementos sólidos (SOLID)

Son elementos sólidos de pared gruesa utilizados para simular el comportamiento a diferente tipo de cargas



Figura 2. 12. Ejemplos de elementos SOLID

Fuente: Elaboración Propia

2.6.1.4. Elementos tipo barra

Los elementos barra son empleados para introducir rigidez entre dos nodos, transmitiendo esfuerzos de tracción y compresión en su eje alcanzando un comportamiento tanto elástico lineal como plástico. Estos elementos pueden tener secciones circulares, rectangulares, etc.

2.6.2. Elemento Shell aplicado al problema de estudio

Para los requerimientos del proceso de simulación es necesario estudiar o hacer referencia la discretización del medio mediante el elemento del tipo SHELL 163 o cascara ya sea de 3 y 4 nodos, y en consecuencia no se considera la energía debido a las tensiones cortantes. Así también las deformaciones producidas en los nodos de la cara superior e inferior se sustituyen por los desplazamientos del plano medio de la placa. (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 15)

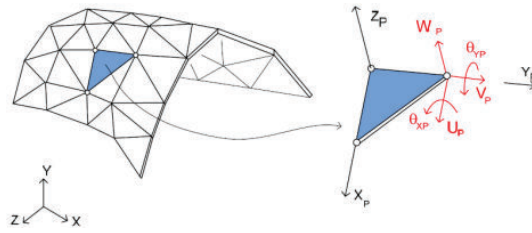


Figura 2. 13. Cascara modelizada mediante elementos planos

Fuente: (CELIQUETA LIZARZA, 2008, pág. 197)

Sean ξ, η unas coordenadas curvilíneas situadas en la superficie media del elemento y ζ una coordenada lineal en la dirección del espesor, variando entre -1 y 1. Y la forma del elemento se define mediante una serie de n puntos situados en sus caras superior e inferior. Los puntos en la cara superior se identifican con el subíndice t , y los de la cara inferior con el subíndice b . Al ser pequeño el espesor, la variación en la dirección ζ se puede suponer lineal.

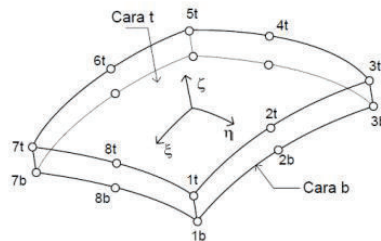


Figura 2. 14. Definición de las cascara superior e inferior

Fuente: (CELIQUETA LIZARZA, 2008, pág. 201)

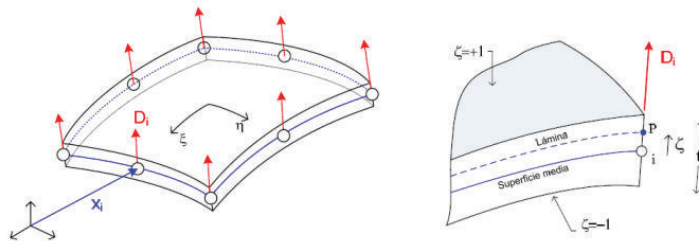


Figura 2. 15. Definición de la superficie media de la cáscara

Fuente: (CELIQUETA LIZARZA, 2008, pág. 202)

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO

3.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS PROCESOS DE EMBUTICIÓN DE PIEZAS METÁLICAS DENTRO DEL MUNDO AUTOMOTRIZ

La industria automotriz es uno de los principales pilares de la economía global y es uno de los sectores cuyos procesos de fabricación han experimentado mayor cantidad de cambios. Los principales retos para esta industria son la aparición de multinacionales dedicadas a elaborar autopartes y el surgimiento de ensambladoras a nivel global. Actualmente, el principal objetivo de la industria consiste en desarrollar vehículos en el marco del transporte sostenible basándose en conceptos tales como: seguridad, eficiencia energética, comodidad, conectividad, responsabilidad con el medio ambiente, competitividad, y al mismo tiempo generar el mayor beneficio económico.

Es en este contexto en el que se observa la necesidad de la industria automotriz ecuatoriana de adaptarse a los cambios en el entorno tanto nacional como global. Como ejemplos de estos retos podemos mencionar la disponibilidad de energía, el requerimiento de integración de partes nacionales en los vehículos ensamblados, la necesidad de desarrollar tecnología nacional, etc.

3.1.1. Diagnóstico de la industria

En el país existen ensambladoras como AYMESA, MARESA, OMNIBUS BB, siendo OBB la pionera en el proceso de manufactura automotriz. La actividad principal de estas empresas consiste en el ensamblaje de vehículos tanto para transporte público y privado tanto de personas como de productos. Otras actividades de estas ensambladoras incluyen la venta de repuestos y otras partes.

Inicialmente, la industria de autopartes nacional solamente se encargaba de la fabricación de neumáticos, baterías, resortes de ballestas y filtros de motor. Actualmente, la gama de productos de la industria incluye también asientos, tapicería, partes de fibra de vidrio, vidrios, aislantes insonorizantes, sistema de escape, material de fricción, bujías, partes estampadas, cajones para camionetas, etc.

El desarrollo actual de la industria automotriz nacional se debe a las medidas tomadas por parte del gobierno de tratar de impulsar la mano de obra y la producción de autopartes, reduciendo la importación de CKD y posterior ensamblaje de automóviles tal es el caso del Suzuki Gran Vitara SZ que actualmente la mayor cantidad de sus partes son fabricadas nacionalmente y por tanto impulsando el consumo del mismo ya que tiene preferencias económicas por encima de los automóviles que son importados, dentro de la misma gama.

Uno de los factores para el desarrollo de autopartes en la gestión nacional es el desarrollo de diseño y desarrollo en el proceso de varias partes tal es el caso del proceso de embutición para partes metálicas el cual favorece a varios sectores de la industria ecuatoriana y a la vez al desarrollo del producto interno del país.

3.1.2. Factor medioambiental

La necesidad de cuidar el medio ambiente obliga a la industria automotriz a fabricar vehículos de bajo peso, menor consumo de combustible y un bajo nivel de emisiones. El protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) obliga a que se considere el impacto ambiental del vehículo desde su diseño. Para esto, la industria se ve en la necesidad de desarrollar nuevos sistemas de propulsión y transmisión de potencia con el objetivo de producir vehículos más eficientes. También existe la necesidad de considerar el potencial del vehículo para ser reciclado. Es por esto que las marcas se ven en la necesidad de considerar el impacto sobre el medio ambiente del vehículo desde su concepción hasta su retirada.



Figura 3. 1. Ciclos del automóvil para el cuidado del medio ambiente

Fuente: (<http://waste.ideal.es/reciclajeautomoviles.htm>)

Actualmente, la tendencia actual es la de desarrollar vehículos híbridos, es decir, que cuenten con propulsión alternativa tanto por un motor eléctrico como de un motor de combustión interna. Las investigaciones también se enfocan en el desarrollo de vehículos de pila de combustible.

Seguridad. El factor de la seguridad, dentro del desarrollo de los automóviles ha evolucionado teniendo en cuenta el cumplimiento de normativas de protección personal, por ende se ha generado el desarrollo de nuevos materiales en la construcción de las partes automotrices, así como también se ha introducido sensores electrónicos en el motor del automóvil con la finalidad de mejorar su eficiencia en el proceso de combustión y reduciendo la emisión de gases al medio ambiente.

3.1.3. Evolución de los procesos de diseño y fabricación

Desde inicios de los años 2000, la industria de la matricería y moldes se ha convertido en uno de los principales sectores de la economía. Este sector resulta de gran importancia para la industria automotriz ya que puede ayudar a reducir el *time to market* de los modelos de automóviles fabricados y al mismo tiempo, aumentar su calidad y agregarles valor. Los avances en la industria de la matricería y moldes permiten aumentar la productividad en la economía y reducir los costes al reducir los tiempos de producción y así aprovechar las ventajas del proceso de manufactura.

Las tecnologías basadas en sistemas informáticos permiten el análisis de la pieza suministrada, que adicionalmente contiene un listado de requerimientos que esta debe cumplir. El modelo informático se enfoca principalmente en la visualización por pantalla y la capacidad de procesamiento de la información mediante herramientas de simulación, generando comportamientos bajo diversas condiciones de trabajo y simulando sus reacciones desde el punto de vista estructural, térmico, etc.

El desarrollo de nuevos materiales ha obligado a las empresas automotrices a volver a plantear los procesos de diseño y manufactura de autopartes basándose en los conceptos de diseño integral e ingeniería concurrente. Las autopartes se diseñan en base tanto a sus procesos de fabricación como a sus requerimientos de funcionamiento.

El costo de desarrollo de herramientas y maquinaria necesarias para la fabricación de autopartes constituye un factor muy importante a tener en cuenta. Adicionalmente se deben considerar los costes de las pruebas y ensayos necesarios para asegurar la calidad tanto estas herramientas como de las partes en si mismas. Esto debido a que los procesos de fabricación se optimizan de forma iterativa, es decir, mediante prueba y error.

Estos costos han motivado a las empresas a buscar métodos teóricos que puedan aportar resultados válidos que se aproximen al comportamiento real de los elementos involucrados en el proceso de fabricación.

3.1.4. Descripción del proceso de fabricación

El proceso de fabricación de la autoparte que se analiza en el presente trabajo es un proceso de conformado mecánico por deformación plástica, más concretamente, un proceso de embutición.

El proceso de conformado mecánico por deformación plástica se basa en la propiedad de algunos materiales, en este caso el acero, de ser deformados permanentemente. Adicionalmente, al material se le aplican esfuerzos de cizalladura que superan el límite de este con el objeto de remover material y obtener un elemento de formas y dimensiones específicas.

La temperatura juega un papel fundamental tanto en los procesos de corte como en los procesos de conformado por deformación plástica. Esto debido a que al aumentar la temperatura también lo hace la ductilidad del acero, lo que se traduce en un menor esfuerzo necesario para superar el límite de fluencia de este material y así conseguir más fácilmente la deformación permanente o el corte de este. Es por este motivo que los procesos de conformado mecánico generalmente se realizan a una temperatura mayor a la temperatura ambiente pero siempre menor a la temperatura de punto de fusión.

3.1.5. Diseño del objeto de estudio

El objeto de estudio del presente trabajo es la simulación computarizada del proceso de embutición de un protector para el tanque de combustible del modelo SZ de la marca Chevrolet. Antes de realizar la simulación, es necesario definir claramente los pasos que se deben seguir antes de plantear la geometría 3D y las etapas de análisis.

A continuación se presenta un resumen de las consideraciones que se deben tomar antes de crear el modelo de la pieza.

- Mediante un software de CAD se desarrolla la geometría de la pieza basándose en la superficie del tanque de combustible o en términos de ingeniería inversa, basándonos en la geometría del protector actual.
- Considerar los radios mínimos de curvatura que tendrá el objeto de estudio.
- Definir el material con el que se va a desarrollar la pieza, para lo cual se especifica sus propiedades mecánicas.
- Determinar la fuerza de embutición o la velocidad que se aplicará a la placa de metal a ser conformada.

El proceso de diseño debe considerar las herramientas de embutición, es decir el punzón y la matriz. Se deben considerar las aberturas de la matriz, los radios de acuerdo de las matrices de embutición, las superficies de deslizamiento de la matriz y el prensa-chapas (estas superficies deben ser lo más lisas posibles). El valor de los radios de las aristas de la matriz depende del espesor de la chapa a embutir y de la diferencia en el diámetro del disco inicial y las dimensiones de la pieza final. Este valor puede ser consultado en tablas u obtenido experimentalmente.

3.2. PLANTEAMIENTO Y SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

La industria manufacturera del Ecuador no dispone de una herramienta adecuada que permita el diseño de piezas embutidas en chapa de acero. Para la elaboración de prototipos se utiliza el método de prueba y error. Actualmente, las compañías dedicadas a embutir en chapa de acero invierten en la capacitación de su personal para el manejo de paquetes computacionales de simulación virtual.

3.2.1. Material y espesor a utilizarse

De acuerdo con el análisis a desarrollarse, se podrán utilizar los siguientes materiales: acero dulce, acero al carbono, acero inoxidable y aleaciones especiales de aluminio. En cualquier caso y con el objeto de compensar los efectos de embutición, los espesores dependerán de las características y las propiedades del material empleado.



Figura 3. 2. Protector Metálico de Tanque de Gasolina Grand Vitara SZ

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Selección del material a utilizarse

El material seleccionado para la embutición del protector metálico para el tanque de combustible es una aleación de acero al carbono ASTM A 36, esto según las especificaciones solicitadas por GM OBB. Sus propiedades tanto químicas como mecánicas se encuentran especificadas en la norma ASME/ASTM A 36/A 36M “Specification for Steel Sheet, Carbon, Drawing Quality, Special Killed, Cold Rolled”.

Este material es un acero no aleado, laminado en frío, con valores máximos garantizados de límite elástico y resistencia a la tracción, y propiedades mínimas garantizadas de ductilidad (alargamiento de rotura) y buena aptitud al conformado. Estas calidades cumplen los requisitos de la norma EN 10130:2006.

Este material está recomendado para procesos de conformado mecánico en donde se requieren alta resistencia, alta rigidez y alta ductilidad. Es más comúnmente aplicado en la industria automotriz, en la fabricación de electrodomésticos, en la fabricación de muebles metálicos, en la elaboración de ejes, de aparatos de aire acondicionado y en la elaboración de tubos y perfiles estructurales.

Tabla 3. 1. Propiedades del material ASTM A-36

Propiedades del acero ASTM-36	
Módulo de Young (E)	2900 ksi [200 GPA]
Relación de Poisson (ν)	0.26
Límite de proporcionalidad o fluencia	250 MPa, 36 ksi
Densidad (ρ)	7850 [kg/m ³]
Coefficiente de Lankford (r)	1.6
Módulo tangente	145 [MPa]
SHEAR MODULOS	11500 ksi [79.3 GPA]
Bulk Modulos	20300 ksi [140 GPA]
Composición química	
Elemento	% en Peso
C	0.26
Mn	0.0
P	0.04
S	0.05
Cu	0.2 (min)

Fuente: (WWW.MATWEB.COM)

Tabla 3. 2. Propiedades del material que se utilizará como herramienta para el proceso de embutición

Propiedades del material de la herramienta	
Módulo de Young (E)	210000 [MPa]
Relación de Poisson (ν)	0.30
Densidad (ρ)	7800 [kg/m ³]

Fuente: (GARCÍA GAYOL, 2009)

3.2.3. Solución del problema

En la figura 3.3 se muestra un modelo de la geometría del protector metálico a ser analizado. Las dimensiones generales de este se ajustan al tanque de combustible del modelo de vehículo Grand Vitara SZ, pero se ha planteado las dimensiones de una plancha de 808 x 748 x 1.1 mm.

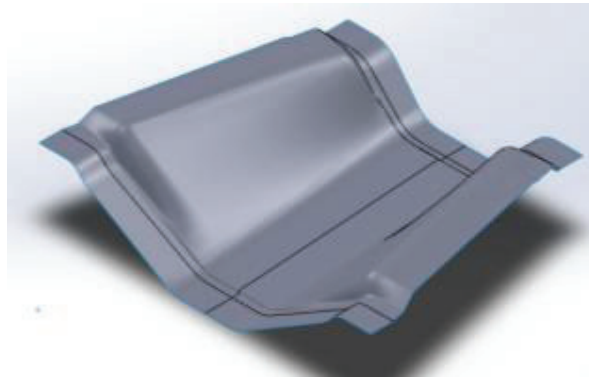


Figura 3. 3. Protector metálico de tanque de gasolina Grand Vitara SZ

Fuente: Elaboración propia



Figura 3. 4. Ubicación de protector metálico de tanque de gasolina del Grand Vitara

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y SIMULACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS

4.1. METODOLOGÍA DE LA HERRAMIENTA ANSYS

Este programa solventa la necesidad de hacer análisis numéricos en problemas de geometrías complejas de un mallado muy fino que permita estudiar de manera detallada ciertas regiones de gran interés. También se ha logrado hacer simulaciones casi reales que representan situaciones que se presentarían en una prueba en el laboratorio, lo anterior ayuda a ahorrar recursos económicos y tiempo, generando así resultados muy cercanos a los reales. (SEGERLIND, 1984)

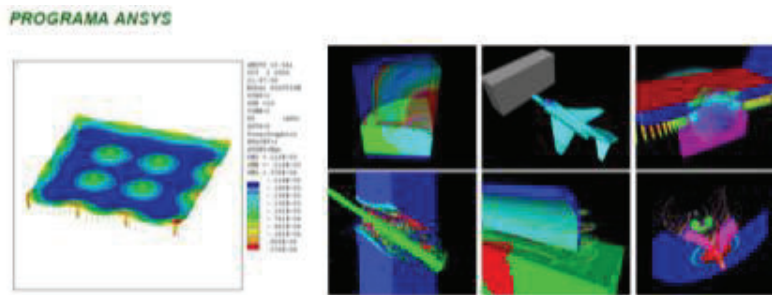


Figura 4. 1. Diferentes simulaciones con la ayuda de la herramienta ANSYS

Fuente: (www.ansys.com)

En cuanto a los tipos de análisis se encuentran el estático modal, armónico, transitorio, espectro de respuesta y subestructura. En cualquier tipo de problemas que se esté trabajando se puede hacer un análisis lineal o no lineal. El programa resuelve problemas complejos de diseño en más de 100 tipos de elementos distintos de los cuales se puede escoger algunos de ellos para caracterizar la respuesta del sistema, las dimensiones del modelo y el nivel preciso que se busca en los resultados.

El programa computacional ANSYS puede interactuar con otros programas de cómputo, que se basan en el MEF. Esto significa que se puede procesar gran parte o toda la base

en otros programas y posteriormente introducir este archivo en ANSYS y seguir trabajando con él.

En este capítulo se explicara la metodología para el modelado de embutición mediante el modelo explícito de ANSYS, sin embargo sabemos que para optimizar un diseño es necesario realizar una parametrización de variables geométricas para utilizarlas como variables de entrada.

4.1.1. Métodos de resolución de ANSYS y LS-DYNA

- **ANSYS:** *“Es un programa que da solución a procesos implícitos, es decir, resuelve sistemas estáticos/cuasi estáticos (fuerzas aplicadas en grandes lapsos de tiempo) en los que el sistema se comporta de forma lineal. Se resuelve en una sola iteración, definida a partir de intervalos grandes de tiempo, ya que la solución converge fácilmente mostrando una gran estabilidad. De manera que utiliza pocos recursos computacionales”.* (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 36)
- **LS-DYNA:** *“Resuelve procesos explícitos, es decir, problemas dinámicos en los que se producen problemas de impactos, de contactos entre superficies, grandes deformaciones y múltiples no linealidades. Como la solución explícita depende del tiempo (el tiempo total del transcurso del proceso se divide en intervalos muy pequeños), el sistema debe resolverse completamente (campos de tensión y de deformación) para cada intervalo de tiempo hasta llegar a completar el tiempo total de la simulación”.* (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 36)

a) Soluciones implícitas-explicitas (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 39)

Resuelve problemas dinámicos en los cuales sus elementos son sometidos a una pretensión, siendo mejor simular mediante el método implícito

b) Soluciones explícitas- implícitas (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 39)

Simula problemas en los que después de haber sido sometido a un proceso de conformado se produce una situación cuasi estática, generándose una recuperación de la pieza o springback. Este fenómeno se ha convertido en un reto para la simulación del

proceso de estampado ya que se calcula de una forma implícita y el proceso de conformado es un proceso dinámico y explícito, suponiendo un menor tiempo de cálculo.

La desventaja principal y la razón por la que se va a optar por otro tipo de concatenación de soluciones es que, como se ha comentado en la descripción del método de resolución implícito-explicito, se utiliza en problemas dinámicos en los que previamente se ha aplicado una precarga. Como este no es el caso, no va a ser posible emplearla.

c) Soluciones doble explícita (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 42)

Este método resuelve procesos dinámicos no lineales y al ser el proceso de embutición un análisis estructural explícito no lineal se considera como la solución al proceso, pues tanto la penetración como el repliegue del punzón se realizan en la misma simulación. La ventaja es la simplicidad en el proceso y el uso de una base simple de datos para la simulación. Lo que reduce posibles errores a la hora de importar/exportar estados tensionales, resultados, etc., y se tendrá una visualización completa del proceso.

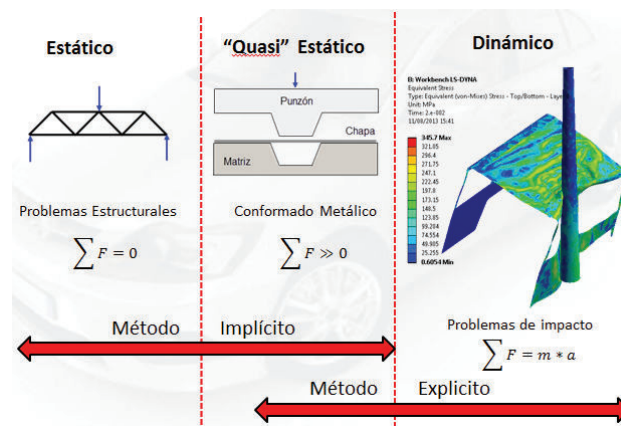


Figura 4. 2. Comparación del método implícito y explícito

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.1. Método p

Este método utiliza un polinomio de grado P en función de las variables del sistema logrando una solución aproximada, la exactitud de la solución depende del grado del polinomio. Con esta ecuación se consigue resultados como tensiones, desplazamientos o

deformaciones con un grado de exactitud determinado. Su malla es flexible y constante.
(GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 44)

4.1.1.2. Método h

La generación de la malla en este método es una adaptativa al sistema, siendo necesario su afinación para conseguir un tamaño adecuado de la misma (incremento en el número de nodos), y conseguir una precisión mayor en el resultado. Este método es utilizado en la resolución de problemas dinámicos, de fluidos, campos electromagnéticos, etc.
(GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 44)

4.1.1.3. LS-DYNA explicit

Este método calcula grandes deformaciones, desplazamientos y tensiones que se producen en procesos dinámicos explícitos no lineales. La precisión de los resultados depende del refinamiento que se le dé al mallado del sistema, incrementando el proceso y tiempo de cálculo. (GARCÍA GAYOL, 2009, pág. 44)

4.2. PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA

4.2.1. Modelado de la geometría

Por la complejidad del diseño de la geometría este fue realizado en el software SOLID WORKS, debido a que las herramientas de ANSYS para diseño son limitadas pudiendo dibujar geometrías poco complejas, por tal razón se realizó la importación desde el formato *.IGS generado en Solid works a la plataforma de ANSYS dentro de su módulo LS-DYNA Explicit.

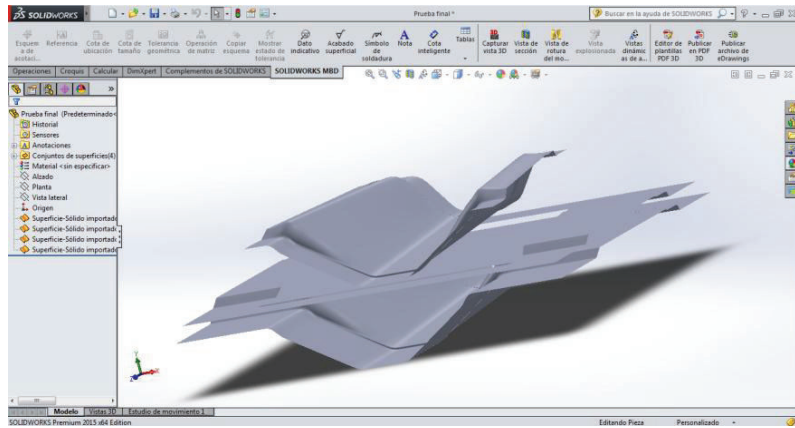


Figura 4. 3. Modelo del proceso a ser embutido, se puede visualizar el punzón, chapa y matriz

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Descripción del elemento a utilizarse en el software para su geometría

En el capítulo 2 se detalló los tipos de elementos que tiene el software para el análisis de las diferentes aplicaciones, y dentro de las cuales se determinó al elemento SHELL 163 el indicado para modelizar elementos de chapa con estructuras delgadas tipo cascara.

4.2.3. Datos de entrada para el material en ANSYS

4.2.3.1. Propiedades del material

Se define las propiedades del material tanto para la chapa y para el troquel. El material de la chapa debe reflejar el proceso de deformación empleado en el análisis, y el segundo material no presentará deformación alguna. Aunque en la realidad todos los materiales sufren desgaste y un porcentaje de deformación.

Para la chapa se escogió el acero estructural tipo I muy semejante en características al material seleccionado en el capítulo 3. Y para el troquel se le asignó el material tipo K, al cual posteriormente se le asignará la característica de cuerpo rígido indeformable.

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Structural Steel K	General_Materials.xml		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Structural Steel I	General_Materials.xml		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 4: Structural Steel I

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m ⁻³		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,26			
10	Bulk Modulus	1,3889E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,9365E+10	Pa		
12	Field Variables				
16	Bilinear Isotropic Hardening				
17	Yield Strength	2,5E+08	Pa		
18	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa		
19	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
23	Strain-Life Parameters				
24	Display Curve Type	Strain-Life			
25	Strength Coefficient	9,2E+08	Pa		

Outline of Schematic A2: Engineering Data

3	Structural Steel I	General_Materials.xml		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Structural Steel K	General_Materials.xml		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: Structural Steel I

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m ⁻³		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
12	Field Variables				
13	Temperature	Yes			
14	Shear Angle	No			
15	Degradation Factor	No			
16	Bilinear Kinematic Hardening				
17	Yield Strength	2,5E+08	Pa		
18	Tangent Modulus	1,45E+09	Pa		
19	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
20	Interpolation	Log-Log			

Figura 4. 4. Propiedades mecánicas del material ingresadas en el software ANSYS

Fuente: Elaboración propia

En este proceso se considera constante el espesor del material de la placa de acero a embutir el cual es de 1.1 mm y para los troqueles se asigna un espesor de 0.001 mm ya que se suponen que son elementos infinitamente rígidos.

4.2.3.2. Modelo constitutivo para la simulación (ANSYS LS-DYNA User's Guide)

Para el análisis o simulación de la chapa se escoge un modelo y un material que se ajuste lo más fielmente a su comportamiento real durante su deformación, y estos son: (ANSYS, 2013, pág. 1719)

- *Modelo de plasticidad de Johnson/Cook. Es de tipo visco plástico de plasticidad depende de la temperatura. Se puede emplear en materiales sometidos a velocidades elevadas de deformación.*
- *Modelo Plastic Kinematic. Modelo que puede exhibir un comportamiento isotrópico, cinemático o una combinación de ambos con endurecimiento cinemático.*
- *Modelo Bilinear Kinematic. Modelo de plasticidad isotrópico, utilizado principalmente en conformado de metales y plásticos.*
- *Modelo Bilinear Isotropic Hardening. Este modelo es independiente de la velocidad, utiliza dos pistas (elástico y plástico) para representar el comportamiento tensión - deformación de un material. Especifica el comportamiento tensión - deformación a una sola temperatura.*
- *Modelo lineal Piecewise. Modelo elastoplástico que envuelve el efecto de la velocidad de deformación. El fallo basado en la deformación plástica puede ser representado con este material.*

Para el análisis de elementos tipo shell y debido a las grandes deformaciones que es sometida la chapa, el modelo Bilinear Kinematic es el ideal para el proceso, en razón, al endurecimiento isotrópico que se produce en la superficie del material por la plastificación que genera las tensiones principales, y en el caso cinemático se mantiene la superficie de fluencia constante y se desplaza a lo largo de las direcciones principales. Por lo tanto, el comportamiento de este material va a ser “Plástico con Endurecimiento Cinemático”.

4.2.3.3. Hourglass (ANSYS LS-DYNA User’s Guide)

“El hourglass es un efecto de deformación con energía cero que oscila a una frecuencia mucho mayor que la respuesta global de la estructura. Las formas de hourglass son estados matemáticos que no son físicamente posibles. Típicamente, no poseen rigidez y dan una apariencia de zigzag a la deformación de la malla. Los elementos de integración reducida promueven la deformación con cero energía”. (ANSYS, 2013, pág. 113)

$$[M]\ddot{u}_n = [F_n^{externa}] - [F_n^{interna}] + H_n + [F_n^{contacto}] + [F_n^{flexión}] \quad (4. 1)$$

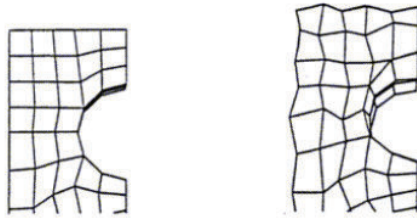


Figura 4. 5. Malla no deformada y malla deformada con efecto de reloj de arena o Hourglass

Fuente: (ANSYS, 2013, pág. 113)

Dentro de las diferentes formulaciones que dispone el programa se empleará la que por defecto se encuentra, siendo Flanagan Belytschko (ANSYS LS-DYNA User's Guide, pág. 9) la formulación más rápida para resolver análisis dinámicos con placas. Por la presencia de este fenómeno se puede invalidar los resultados de un análisis si su valor es superior al 10% de la energía interna, por lo tanto, se debe minimizar o eliminar. En muchos casos 5% puede resultar excesivo. (ANSYS, 2013, págs. 2-12)

Existen varias técnicas para minimizar el efecto hourglassing en LS-DYNA, las cuales se listan a continuación:

- Evitar las cargas en puntos únicos. El hourglassing tiende a expandirse de elemento a sus vecinos. Es conveniente aplicar las cargas en forma de presión sobre elementos.
- Refinar la malla reduce la energía de hourglassing, pero esto consume más tiempo de CPU.
- Ajustar la viscosidad global del modelo reduce la deformación por hourglassing. El control a través de la viscosidad es recomendable en problemas de deformación a altas velocidades.
- Agregar rigidez elástica disminuye la energía de hourglassing. Puede conseguirse incrementando el coeficiente de hourglassing. Recomendado para problemas de baja velocidad.

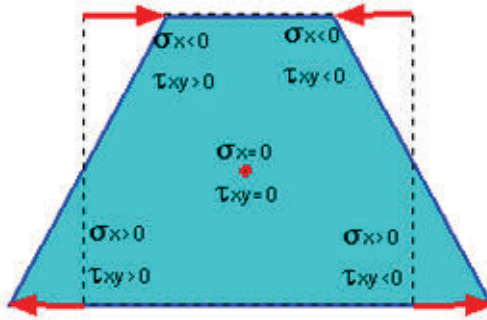


Figura 4. 6. Modo de control de hourglass

Fuente: (ANSYS, 2013, pág. 113)

4.2.3.4. Propiedades de la herramienta (Punzón, matriz)

Para modelizar los troqueles en la etapa de embutición se va a utilizar cuerpos rígidos “Rigid Bodies”, por la mayor y elevada dureza que la del material a deformar. A estos elementos se los puede mallar con un tamaño grande generando un menor número de nodos, y ayudando a reducir el tiempo de cálculo computacional sin problemas de convergencia.

- Este tipo de elementos no se deben crear con área o espesor cero.
- No se debe permitir que el espesor en sus esquinas disminuya o tienda a cero.
- Para obtener una superficie curva es necesario realizar la unión de varios elementos planos tipo Shell. Estos elementos planos no deben tener curvaturas de más de 15°.

4.2.4. Módulo ANSYS en la creación del proyecto

Para el proyecto se escoge entre los modelos que dispone ANSYS dentro del módulo de LS-DYNA EXPLICIT con el cual se enlaza los datos de ingeniería que se asignó para los materiales que intervendrán en la simulación.

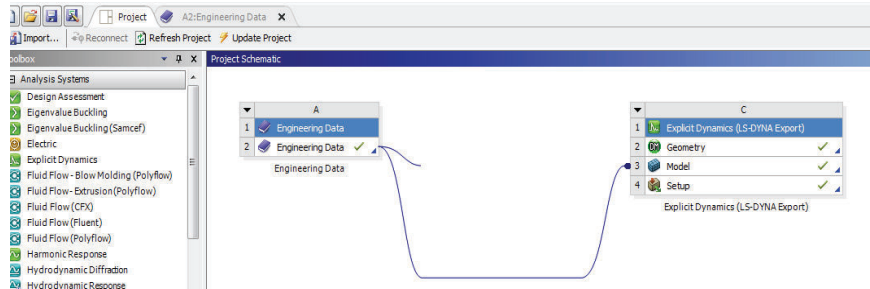


Figura 4. 7. Formulación del proyecto en ANSYS 16.1, creación de la base o datos de ingeniería y el modelo Explicit de LS-DYNA

Fuente: Elaboración propia

4.2.4.1. Geometría y construcción del modelo en ANSYS

Para la creación de la geometría en el módulo de LS-DYNA explicit, se importa el archivo *IGS que fue generado en SOLIDWORKS, la importación se lo realiza como elementos superficies manteniendo las restricciones que se establecieron en el software SOLIDWORKS pero prevaleciendo el espesor de la chapa siendo esta constante. La creación del modelo se lo realiza por partes para poder asignar las restricciones del caso a cada elemento y posterior ensamblado.

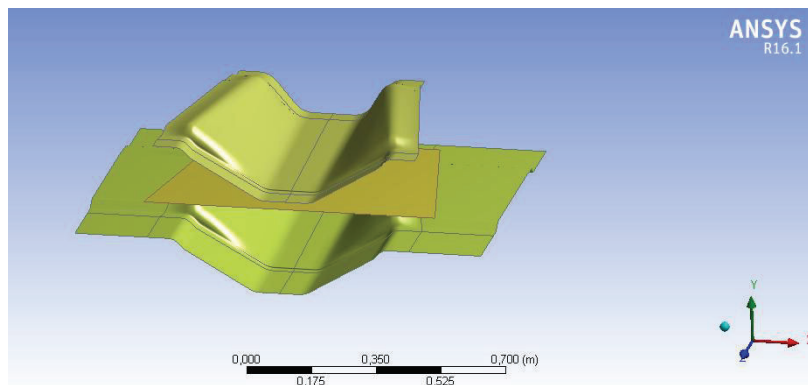


Figura 4. 8. Geometría importada a ANSYS 16.1

Fuente: Elaboración propia

4.3. GENERACIÓN DE LA MALLA Y SELECCIÓN DEL MATERIAL

4.3.1. Asignación de material a cada superficie que interviene en la embutición

Al iniciar todo el proceso dentro de ANSYS se estableció dos materiales los cuales fueron denominados como materiales STRUCTURAL STEEL I y K definiendo todas sus propiedades mecánicas y que se describieron en el capítulo 3. El material tipo I se asignó para materiales flexibles y el material K es para cuerpos rígidos siendo su deformación mínima. Dentro de esta opción el comando SURFACE BODY ayuda a asignar manualmente el espesor de las superficies del sistema, pero en el proceso de diseño o dibujo se estableció el espesor de 1.1 mm que es el espesor real de la chapa a deformarse.

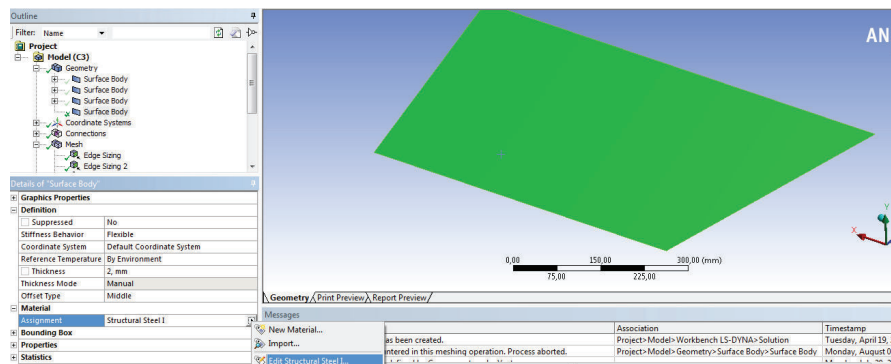


Figura 4. 9. Asignación de material a la superficie que representa la placa de acero

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Generación de la malla

Una vez definido el tipo de elemento y los materiales de los cuerpos que intervienen en el análisis de embutición (punzón, matriz y chapa) se procede a realizar el mallado a cada uno de los cuerpos; para lo cual se trabaja con el atributo MODEL de LS-DYNA como se puede ver en la Figura 4.10.

Realizar un mallado significa discretizar el dominio físico en un número finito de celdas, dichas celdas están limitadas por un número de superficies; toda celda tiene un centroide, y cada vértice de la celda se los conoce como nodos. Y para el análisis el programa trabaja con pequeños intervalos de tiempo (time step size, Δt). Por defecto el programa escoge un Δt en función de las dimensiones del mallado de los objetos.

Cabe destacar que las mallas estructuradas vs. las no estructuradas, presentan mejores prestaciones en tiempo de cálculo, memoria computacional y precisión numérica, es así que la malla estructurada ideal, es una distribución cartesiana de los nodos en donde todos los puntos sean equidistantes y las celdas sean cuadrados perfectamente definidos, este tipo de mallas presenta mayor precisión. El tamaño del mallado es de un máximo de 15 mm y un mínimo de 3 mm, este tamaño de nodos corresponde con el grado de precisión que se le requiere dar a la estructura.

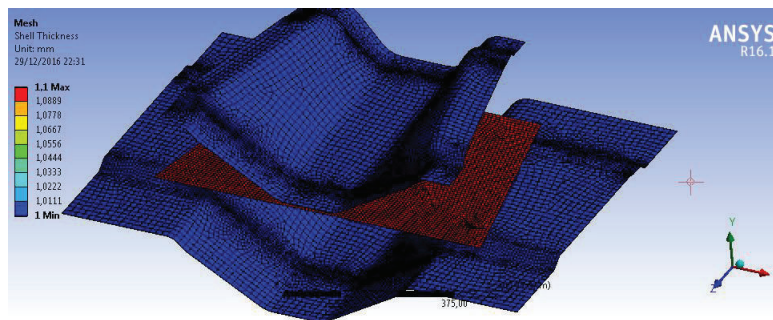


Figura 4. 10. Generación de la malla de todo el conjunto que interviene en el proceso

Fuente: Elaboración propia

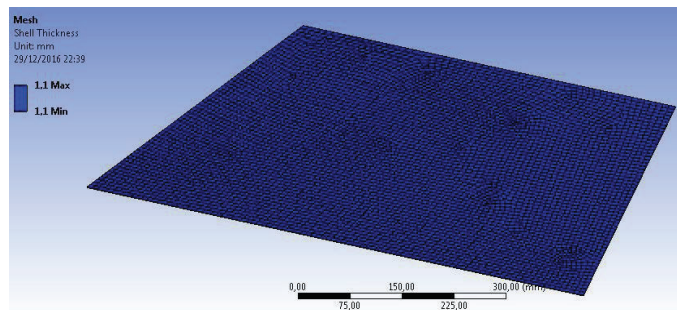


Figura 4. 11. Generación de la malla cuadrangular en placa con cuadrícula mínima de 3 mm y máxima de 15 mm

Fuente: Elaboración propia

El mallado que se realiza en los elementos rígidos como el punzón y la matriz no es tan definida, ya que al ser elementos esbeltos en el menor caso posible serán afectados o sufrirán deformación alguna dentro del proceso, por lo tanto su malla no debe ser bien definida, otorgando una mayor distribución de recursos informáticos a la chapa la cual si será afectada.

4.4. HERRAMIENTAS PARA LA SIMULACIÓN Y DEFINICIÓN DE OPERACIONES DE EMBUTICIÓN EN ANSYS

Dentro de la asignación de las condiciones para la simulación se debe definir las conexiones que existen dentro del modelo, por lo que se le debe asignar una interacción de contacto entre todas las superficies. Esta asignación se la realiza de forma manual y global a todo el proyecto. Además el programa por defecto asigna los valores de rozamiento.

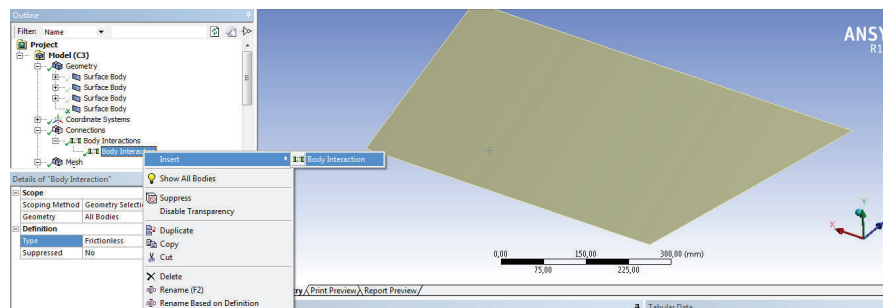


Figura 4. 12. Asignación de interacción entre superficies

Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Condiciones de frontera del modelo numérico

Las condiciones de frontera o de borde como se las conoce, establecen las condiciones de ingreso y salida del dominio de estudio. En todo modelo numérico sea este unidimensional, bidimensional y con mayor razón si es tridimensional, las condiciones de frontera son muy importantes e influyen directamente en los resultados de la modelación, estas condiciones deben ser definidas en función del tipo de estructura y de los datos que se dispongan.

En la Figura 4.13 se le asigna una condición de borde a la matriz que en este caso al ser un elemento rígido no debe sufrir deformaciones y debe tener la condición de un soporte fijo.

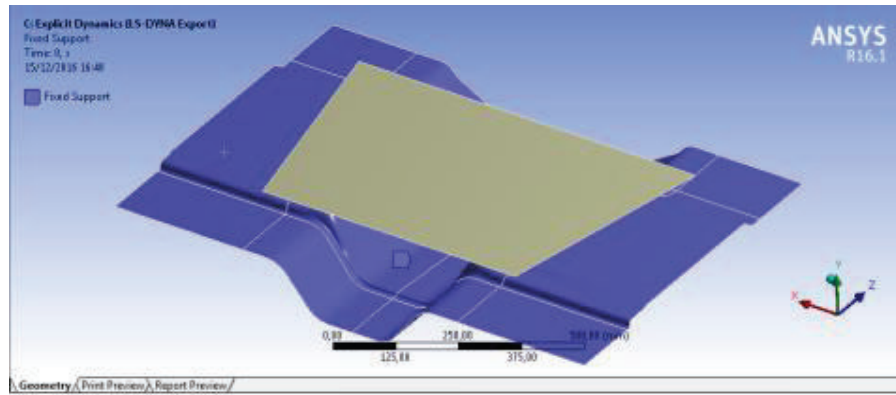


Figura 4. 13. Condición de borde asignada a la matriz, este será un elemento completamente fijo

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.1. Determinación y asignación de la fuerza equivalente necesaria para la embutición

La fuerza de embutido en piezas que tienen forma irregular resulta imposible obtener en la mayoría de casos; por lo cual se realizan numerosas pruebas empíricas para alcanzar fórmulas para procesos de conformación, estos han permitido obtener valores estimados debiendo ser ajustados en el proceso. Las ecuaciones que se han desarrollado en estas pruebas son generalmente obtenidas de embuticiones en forma cilíndrica, esto debido a que la forma geométrica es mucho más simple y los resultados son muy cercanos a la realidad.

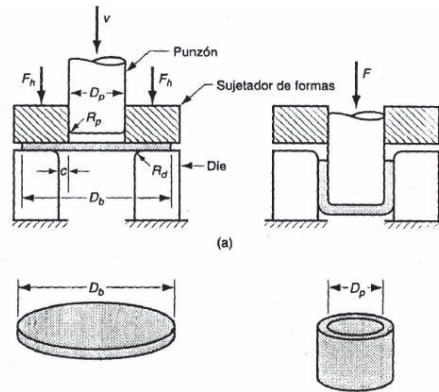


Figura 4. 14. Aplicación de fuerza a punzón

Fuente: Elaboración propia

La fuerza de embutido requerida está en función del espesor, resistencia última a la tensión del material (suponiendo una sección circular de la pieza) y diámetro del cilindro y se puede estimar mediante la siguiente expresión: (HANDBOOK ASM, 1993, pág. 1268)

$$F = \sigma_{max} e D_p \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad (4. 2)$$

Donde:

F = fuerza de embutido

e = espesor inicial 1.1 mm

σ_{max} = resistencia a tracción $S_y = 25.5 \frac{kg}{mm^2}$

D_b y D_p son los diámetros de la placa inicial y del punzón, respectivamente.

0.7 = constante de corrección para la fricción.

La ecuación 4.2 estima la fuerza máxima para el análisis de embutición, pero al no ser una forma geométrica circular la fuerza solo será estimativa dentro del diseño, la cual dependiendo del diseño varía.

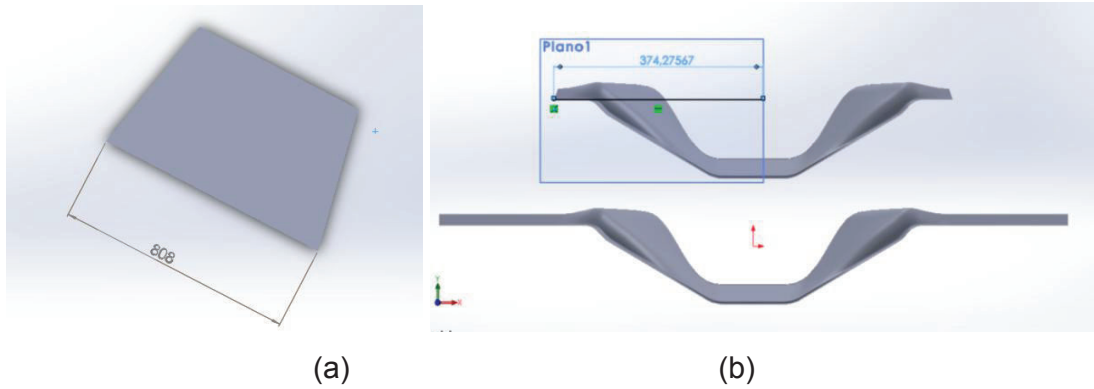


Figura 4. 15. Medidas de los elementos a utilizarse (a) chapa y punzón (b)

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la fuerza equivalente se utiliza la ecuación 4.2, pero al no ser una embutición circular se reemplaza los diámetros por las longitudes más grandes. La fuerza de embutido alcanzará su valor máximo a una tercera parte de la longitud de la carrera.

$$F = 25.5 \left(\frac{kgf}{mm^2} \right) * 1.1 mm * 748.54mm * \left(\frac{808mm}{748.54mm} - 0.7 \right)$$

$$F = 7966,81 kgf$$

$$F = 78127,72 N$$

Para definir la fuerza de embutición existen diferentes posibilidades: fuerza uniforme o distribuida, en este caso se utilizará una fuerza uniforme y constante, para iniciar con el proceso de simulación primeramente se asignó una fuerza de 5000 N obteniendo resultados fuera del proceso de simulación, pero al determinar una equivalencia de la fuerza necesaria para el proceso se asignó una fuerza de 78000 N como se puede ver en la figura 4.16.

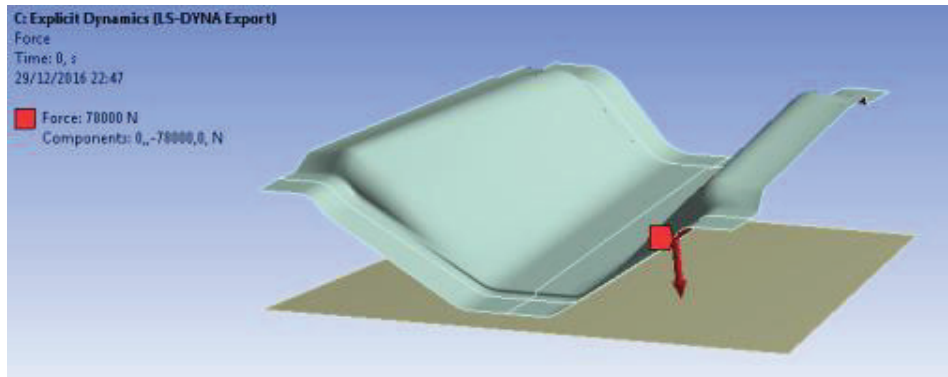


Figura 4. 16. Asignación de fuerza equivalente para el proceso de embutición

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.2. Asignación de desplazamiento del punzón

La asignación del desplazamiento en el punzón es una condición de borde primordial en el proceso de embutición, el cual al unirse con la matriz darán la forma final a la chapa o elemento de deformación. Este desplazamiento será en el eje Y negativo, condicionante necesaria para evitar el movimiento o rotación en cualquier otro eje del punzón.

El programa nos permite solo asignar el tipo de condición que deseemos para lo cual se le asignó un desplazamiento libre en el eje Y, y por default el programa calcula de manera automática la distancia entre los dos puntos y finaliza al momento que ha realizado su desplazamiento y entran en contacto los tres elementos principales que son la matriz, el punzón y la chapa.

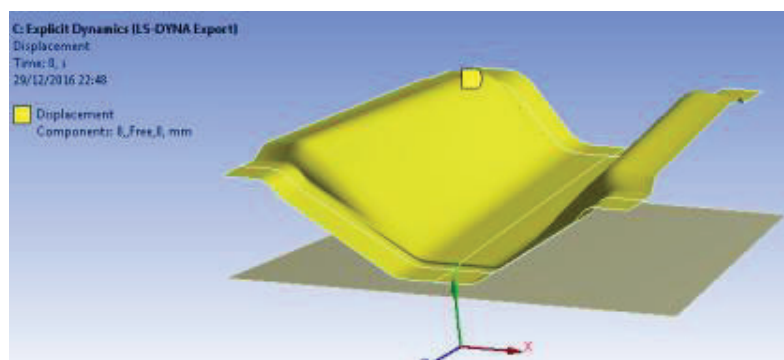


Figura 4. 17. Condición de desplazamiento al punzón en el eje Y

Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de fricción por defecto está en 0.1, que es un valor medio en el contacto acero-acero. Se puede modificar este valor según las condiciones específicas del análisis. Un ajuste adicional que se debe realizar es el ajuste del tiempo que tomará en realizar el proceso de embutición y por default el programa nos determina el tiempo requerido en el cual se podrá realizar la simulación, pero el usuario puede modificar y verificar el proceso o las características que cambian durante el proceso de embutición.

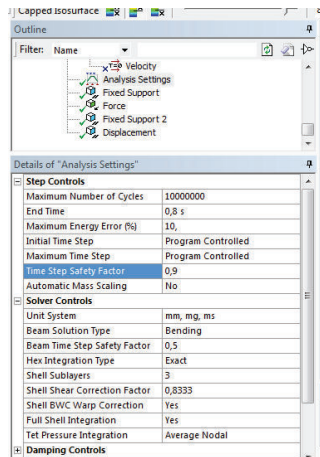


Figura 4. 18. Ajustes en el sistema de simulación. Se establece ya por defecto

Fuente: Elaboración propia

Al asignar todas las condiciones de borde a las superficies que intervienen en la simulación se procede mediante el software MODEL ANSYS MULTIPHYSICS/LS-DYNA y el comando SOLVER a que genere el modelo matemático del proceso de embutición, al realizar este proceso se genera un archivo digital con la extensión *.k, a este archivo el usuario debe re direccionar para que se almacene en la carpeta donde conste el expediente de todo el proceso a simular.

Este archivo de extensión *.k sirve para ser procesado con un módulo de ANSYS adicional, estos archivos se generan por ser creados en un modelo explícito definido desde el inicio del proyecto.

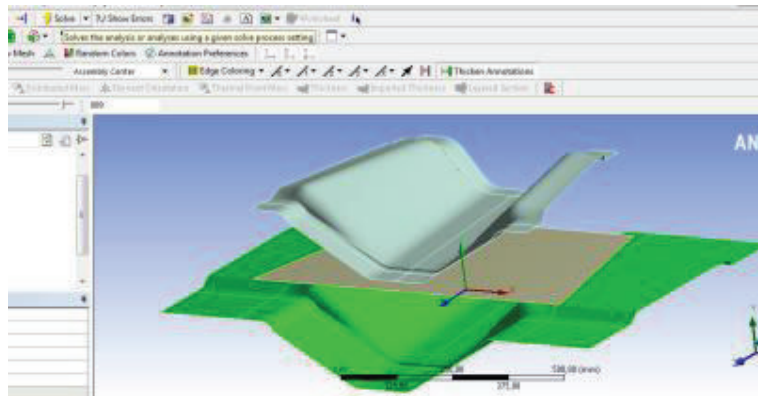


Figura 4. 19. Proceso de resolución mediante el menú SOLVE

Fuente: Elaboración propia

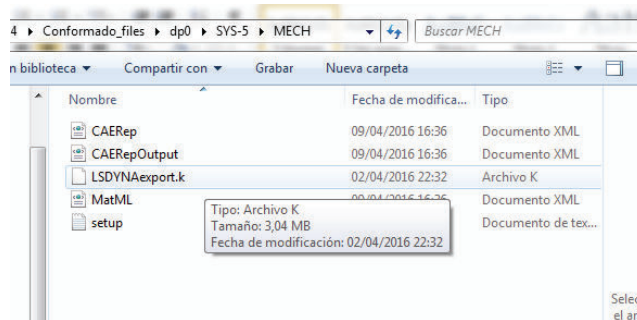


Figura 4. 20. Creación de archivo *.k donde almacena toda la información de los elementos a ser conformados

FUENTE: Elaboración propia

4.4.2. Proceso de cálculo y simulación mediante módulo LS-DYNA MANAGER

Para realizar el proceso de cálculo del modelo matemático se utiliza el módulo LS-DYNA PROGRAM MANAGER esta aplicación se utiliza después de haber asignado y definido las operaciones que intervienen en el problema y luego de generar el archivo digital de extensión *.k donde consta todo el modelo del proceso a simular.

Una vez discretizado el problema, se puede pasar a la caracterización del proceso de cálculo a través del menú principal utilizando la herramienta SOLVE, el cual despliega un cuadro de diálogo, seleccionando la opción START LS-DYNA ANALYSIS (Ver figura 4.21).

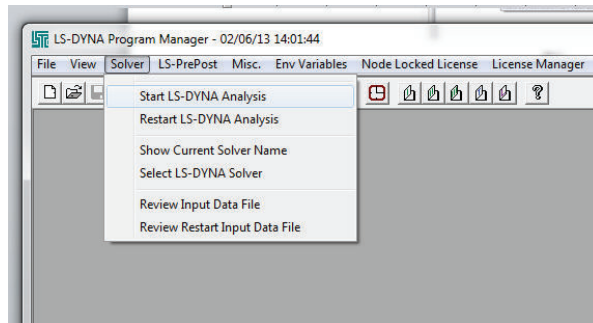


Figura 4. 21. Inicio de cálculo mediante MEF en ANSYS con módulo LS-DYNA PROGRAM MANAGER

Fuente: Elaboración propia

Como consecuencia de esta acción, se activa una ventana (ver figura 4.22), que será el que permitirá a continuación importar el archivo de extensión *.k y completar el cálculo del modelo que contempla el proceso de embutición, el menú que despliega esta ventana nos permite incrementar los recursos informáticos que dispone la unidad procesadora o computadora.

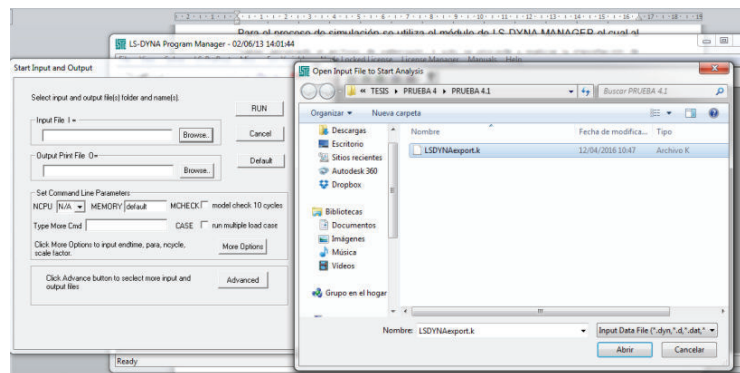


Figura 4. 22. Menú de opciones para cálculo START LS-DYNA

Fuente: Elaboración propia

El programa en la etapa de cálculo nos permite visualizar el avance de las etapas calculadas y la duración de cada una, el número de nodos y elementos, tiempo restante y las posibles incidencias que puede que hayan ocurrido durante el cálculo, este proceso tiene un lapso de tiempo dependiendo de la complejidad del modelo y de los recursos informáticos que se dispongan. En el caso del análisis del proyecto el tiempo estimado es de 3 a 4 horas de duración.

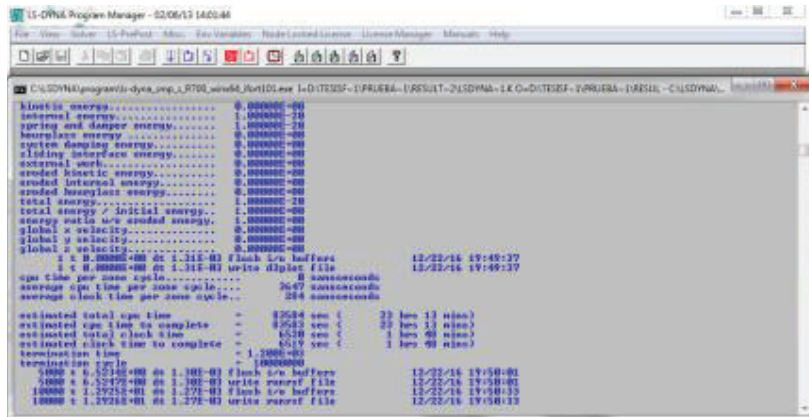


Figura 4. 23. Ventana de estado de la solución y finalización del proceso

Fuente: Elaboración propia

Finalizada la etapa de cálculo, el programa permite visualizar los resultados accediendo al módulo del post Proceso LS-PREPOST, este programa nos ayuda procesando la información ya que genera un archivo digital de extensión *.b donde almacena los resultados que se obtiene en el proceso de embutición.

4.5. INTERPRETACIÓN DE POS PROCESO DE SIMULACIÓN

Los resultados de cada operación se observan únicamente en el post-proceso, y para visualizar es necesario cargar la etapa de cálculo. Esto se realiza ingresando en el menú de herramientas de LS-DYNA PROGRAM MANAGER accediendo al módulo de LS-PREPOST de ANSYS (ver Figura 4.24), donde se procesa los datos resultantes de los análisis.

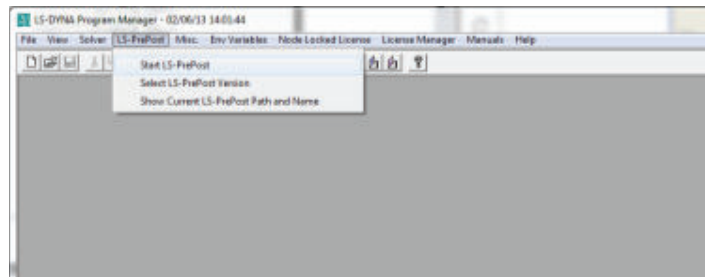


Figura 4. 24. Inicio de LS PREPOST para visualización de resultados

Fuente: Elaboración propia

a. Análisis de la simulación obtenida

Los resultados en las simulaciones realizadas se contrastarán con el parámetro de medición planteado en la placa de embutición real, de esta forma, se proyecta dar una validez al método de simulación u análisis teniendo en cuenta los errores que se generan en el programa y en el modelo empleado. El error que se produce en la embutición real de la placa es el instrumento de medida.

Las hipótesis planteadas para el análisis son:

- Cuerpos rígidos
- El espesor de la chapa
- Las propiedades de la chapa son constantes
- No existe cambios diferenciales de temperatura.

Para entender de forma más clara se parte accediendo a LS PREPOST, y en la barra de herramientas ingresamos a FILE (ver Figura 4.25), en el menú desplegado se selecciona LS-DYNA Binary Plot el cual permite buscar y visualizar el archivo donde se generó toda la solución del problema planteado.

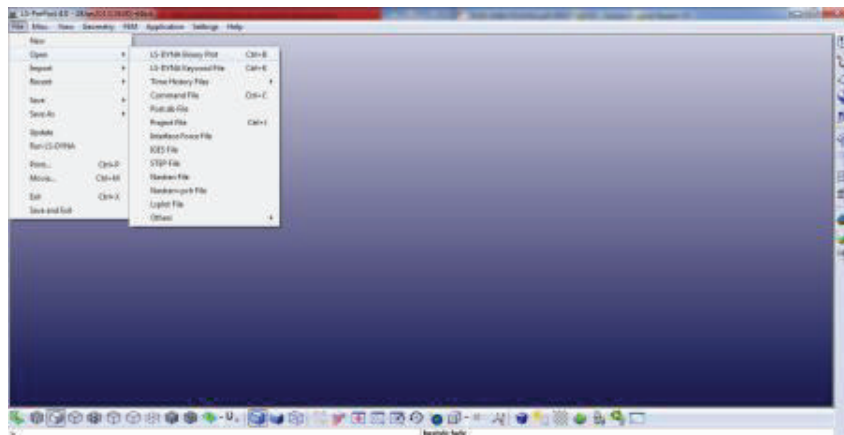


Figura 4. 25. Inicio de LS PREPOST para cargar resultados

Fuente: Elaboración propia

Al cargar los resultados del conformado en el pos proceso, se procede a realizar un análisis de la información que se requiere para generar las diferentes gráficas de las superficies que intervienen en el proceso

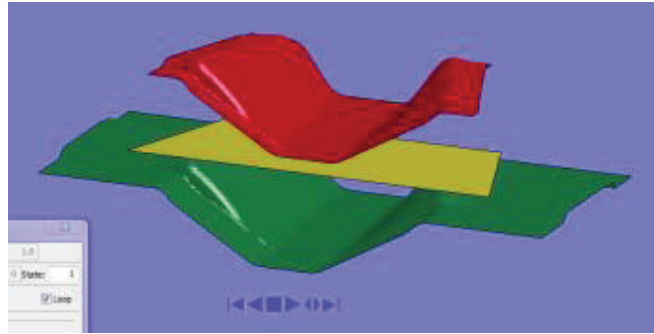


Figura 4. 26. Forma inicial de las superficies antes de la simulación

Fuente: Elaboración propia

Primero se debe hacer una revisión de la forma de la pieza, y en la imagen se puede visualizar las tres superficies representadas: la matriz de color verde, el punzón de color rojo y la chapa de color amarilla, y para poder apreciar de mejor manera la forma que tomó la chapa el programa permite ocultar las superficies que se deseen, una vez realizado esto se evidencia la forma que adquirió la chapa muy similar a la matriz que es justamente lo que se esperaba.

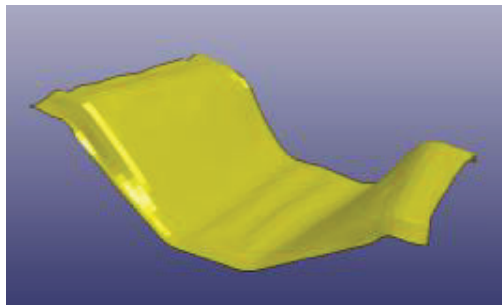


Figura 4. 27. Forma final de la embutición

Fuente: Elaboración propia

4.6. PROTOCOLO DE PRUEBAS

La formabilidad es una medida de deformación que experimenta un material sin que este falle, dependiendo de las condiciones de borde asignadas como por ejemplo la fricción (GEDNEY, 2002, pág. 33). Los parámetros de la formabilidad se obtienen de ensayos de tracción estándar (alargamiento hasta fractura, coeficiente de endurecimiento por deformación, relación de deformación plástica y otros).

a. Ensayo mediante matriz cuadriculada en chapa

El ensayo consiste en grabar una matriz cuadriculada con un patrón de 30 mm por lado en la superficie de la plancha de acero, este tipo de ensayo ayudará a tomar un criterio final del proceso de embutición y evaluar los resultados obtenidos dentro del proceso embutición virtual y real.

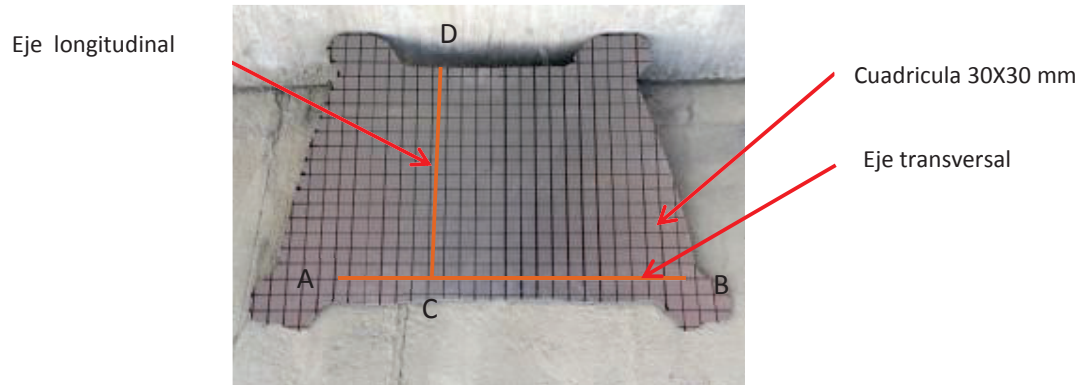


Figura 4. 28. Chapa grabada con método de ensayo, y parametrizada con ejes longitudinal y transversal

Fuente: Elaboración propia

La función principal de este parámetro de ensayo será el medir la elongación o deformación unitaria sufrida en diferentes cuadrículas de la chapa discretizada (ver figura 4.28), el análisis corresponderá a variables a lo largo de las líneas o ejes auxiliares establecidos en la chapa, especialmente en áreas donde se visualice o contengan radios de curvatura grandes.

Los resultados obtenidos se comparará con la malla generada dentro del programa de simulación, una vez que haya sido deformada la chapa. Para esto se determinará un porcentaje de deformación unitaria y se analizará con el resultado de la deformación real.

4.6. PROCESO REAL DE EMBUTICIÓN

a. Descripción del proceso de embutición real

Una vez que se ha realizado la discretización o grafiado de la cuadrícula en la superficie de la chapa metálica, se procede a ubicarla en la prensa de embutición. Esta es una prensa hidráulica marca INOUE (ver figura 4.29). La presión máxima de la máquina es de 300 Toneladas o $250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$.



Figura 4. 29. Prensa hidráulica y herramientas utilizadas en el proceso

Fuente: Elaboración propia

Nótese que posee cuatro frenos de embutición en cada esquina del troquel los cuales sujetan en las pestañas que se observan en la chapa (ver Figura 4.29). Estos ayudan a evitar que la chapa tenga un desplazamiento dentro del troquel y se produzca un proceso de conformado no deseado.

En la figura 4.30 se aprecia a la chapa colocada dentro del troquel, cabe señalar que no se aplica ningún tipo de lubricante. El proceso se inicia con el desplazamiento del punzón, tomando contacto en primera instancia los frenos de embutición con la chapa y posteriormente el punzón topará suavemente a la plancha de acero transmitiendo la fuerza del sistema hidráulico. Así, la chapa sufre un proceso de transformación adoptando la forma del troquel. Por último, se eleva el punzón y se observa la forma de la embutición final.

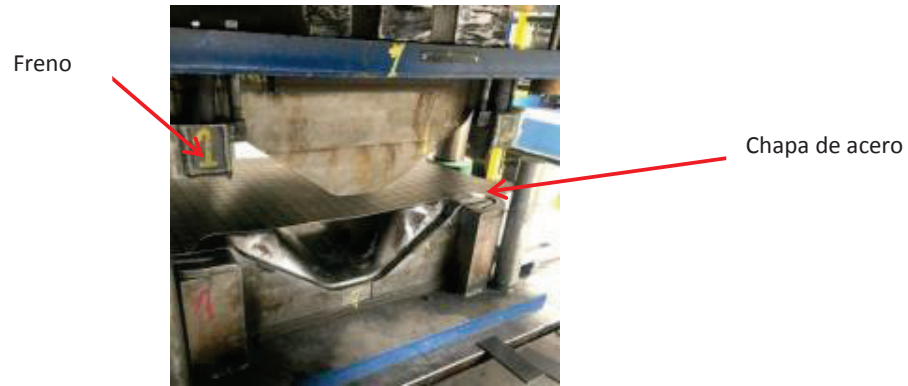
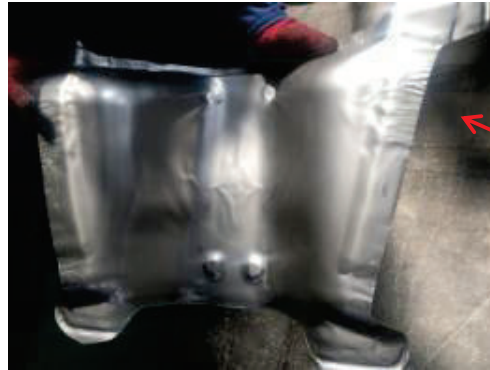


Figura 4. 30. Proceso de conformado de la chapa dentro del troquel

Fuente: Elaboración propia

La presión de operación durante el embutido varió hasta llegar a una presión máxima de $150 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ lo cual produce una fuerza de 1765197 Newton, también se midió la velocidad de descenso del punzón para ello se registró el tiempo que demora el conjunto en desplazarse. De estas mediciones se calculó la velocidad promedio de descenso del conjunto siendo un valor de $22.2 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Este proceso se la realiza en una sola operación.

Análisis de resultados: en la pieza real de embutición se visualiza la presencia de arrugas debido al efecto de compresión que sufre la chapa, esto se puede corregir con la ayuda de un pisador en toda la chapa metálica, y posterior proceso de corte.



Defectos de embutición
arrugas

(a)



Efecto del
freno de
embutición

(b)

Figura 4. 31. Pieza embutida sin discretización de cuadrícula

Fuente: Elaboración propia



Chapa
discretizada

Figura 4. 32. Pieza embutida discretizada

Fuente: Elaboración propia

4.7. VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROCESO REAL DE EMBUTICIÓN

En este acápite se analiza la distribución o proceso de deformación que se obtuvo con el software de elementos finitos ANSYS y la embutición real de la pieza. Esto consiste en analizar los perfiles de deformación plástica efectiva obtenidos a lo largo de los ejes planteados eje transversal A-B y eje longitudinal C-D (ver figura 4.28), el mismo parámetro se plantea dentro de la simulación.

Estos ejes o curvas corroboran el hecho del estado inicial y final de las cuadrículas dentro del proceso de embutición, donde se podrá definir las deformaciones que ocurren en distintas zonas, mientras que en otras sufre pequeñas deformaciones con distribución prácticamente uniforme.

Debido a las configuraciones geométricas planteadas experimentalmente con cuadrículas de 30 mm por lado (ver figura 4.28) y de la malla cuadrícula re-definida dentro del programa ANSYS con dimensiones mínimas aproximadamente de 7 mm por lado (ver figura 4.33). Se compara las configuraciones entre la pieza embutida y la generada en la simulación numérica.

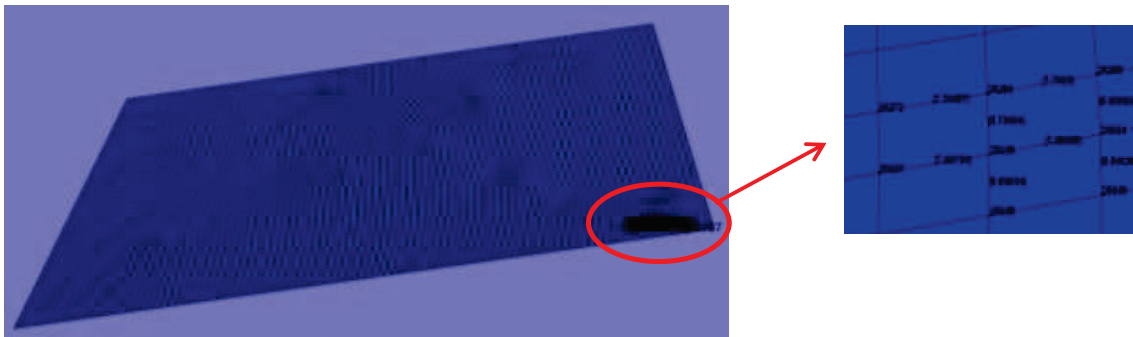


Figura 4. 33. Configuración de malla redefinida en ANSYS

FUENTE: Elaboración propia

Para fines de visualización y comparación con las mediciones experimentales, se selecciona las mismas áreas tanto en el proceso real como en el virtual, donde se podrá determinar la variación de sus cuadrícula.

4.8.1. Comparación de resultados obtenidos en chapa experimental

Las áreas establecidas fueron enumeradas en diferentes cuadrículas para poder analizar sus resultados de deformación (ver figura 4.34). Los valores medidos en dichos puntos se visualizan en la tabla 4.1, además se calculó un porcentaje de error relacionando el valor de la longitud final con respecto al inicial.

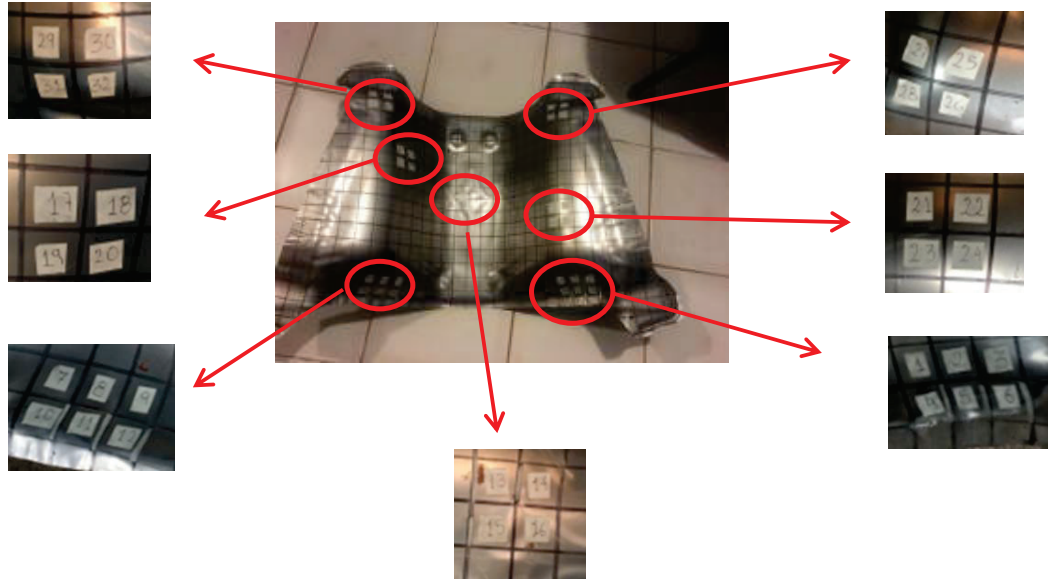


Figura 4. 34. Numeración de cuadrículas para medición de deformación

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 1. Valores obtenidos en la deformación experimental de la chapa

Nº CUADRICULA	EJES	LONG. INICIAL	LONG. FINAL	DEFORMACIÓN UNITARIA	% DEFORMACIÓN
1	A-B	30	29,8	-0,0066667	-0,6667
	C-D	30	30,6	0,0200000	2,0000
2	A-B	30	29,2	-0,0266667	-2,6667
	C-D	30	30,3	0,0100000	1,0000
3	A-B	30	29,7	-0,0100000	-1,0000
	C-D	30	30,4	0,0133333	1,3333
4	A-B	30	29,9	-0,0033333	-0,3333
	C-D	30	30,3	0,0100000	1,0000
5	A-B	30	28,8	-0,0400000	-4,0000
	C-D	30	30,2	0,0066667	0,6667
6	A-B	30	29	-0,0333333	-3,3333
	C-D	30	30,9	0,0300000	3,0000

Nº CUADRICULA	EJES	LONG. INICIAL	LONG. FINAL	DEFORMACIÓN UNITARIA	% DEFORMACIÓN
7	A-B	30	29,7	-0,010000	-1,000000
	C-D	30	30,7	0,023333	2,333333
8	A-B	30	29,9	-0,003333	-0,333333
	C-D	30	30,4	0,013333	1,333333
9	A-B	30	29,9	-0,003333	-0,333333
	C-D	30	30,2	0,006667	0,666667
10	A-B	30	29,5	-0,016667	-1,666667
	C-D	30	30,2	0,006667	0,666667
11	A-B	30	29,4	-0,020000	-2,000000
	C-D	30	30,2	0,006667	0,666667
12	A-B	30	29,7	-0,010000	-1,000000
	C-D	30	29,8	-0,006667	-0,666667
13	A-B	30	29,7	-0,010000	-1,000000
	C-D	30	30,1	0,003333	0,333333
14	A-B	30	29,5	-0,016667	-1,666667
	C-D	30	30,1	0,003333	0,333333
15	A-B	30	29,5	-0,016667	-1,666667
	C-D	30	30,1	0,003333	0,333333
16	A-B	30	29,6	-0,013333	-1,333333
	C-D	30	30,1	0,003333	0,333333
17	A-B	30	31,57	0,0523333	5,2333333
	C-D	30	29,9	-0,0033333	-0,3333333
18	A-B	30	30,25	0,0083333	0,8333333
	C-D	30	30,2	0,0066667	0,6666667
19	A-B	30	29,5	-0,0166667	-1,6666667
	C-D	30	30,7	0,0233333	2,3333333
20	A-B	30	30,5	0,0166667	1,6666667
	C-D	30	29,7	-0,0100000	-1,0000000
21	A-B	30	29,23	-0,0256667	-2,5666667
	C-D	30	30,5	0,0166667	1,6666667
22	A-B	30	29,1	-0,0300000	-3,0000000
	C-D	30	30	0,0000000	0,0000000
23	A-B	30	30	0,0000000	0,0000000
	C-D	30	30,3	0,0100000	1,0000000
24	A-B	30	30	0,0000000	0,0000000
	C-D	30	30,05	0,0016667	0,1666667
25	A-B	30	30,8	0,0266667	2,6666667
	C-D	30	30,1	0,0033333	0,3333333
26	A-B	30	30,5	0,0166667	1,6666667
	C-D	30	30,2	0,0066667	0,6666667
27	A-B	30	29,9	-0,0033333	-0,3333333
	C-D	30	30,1	0,0033333	0,3333333
28	A-B	30	30,6	0,0200000	2,0000000
	C-D	30	30,3	0,0100000	1,0000000
29	A-B	30	29,9	-0,0033333	-0,3333333
	C-D	30	30,1	0,0033333	0,3333333
30	A-B	30	30,5	0,0166667	1,6666667
	C-D	30	30,2	0,0066667	0,6666667

Nº CUADRICULA	EJES	LONG. INICIAL	LONG. FINAL	DEFORMACIÓN UNITARIA	% DEFORMACIÓN
31	A-B	30	29,9	-0,0033333	-0,3333333
	C-D	30	30,6	0,0200000	2,0000000
32	A-B	30	30,4	0,0133333	1,3333333
	C-D	30	30,5	0,0166667	1,6666667

Fuente: Elaboración propia

Nota: Ejes A-B eje Transversal, C-D eje longitudinal. (Ver figura 4.28)

Resultado: Analizando la tabla 4.1, se determina que los porcentajes de error determinados corresponden a los efectos de compresión y tracción que sufre en varias áreas la chapa, como por ejemplo se visualiza que en la cuadrícula 17 en el eje A-B (Transversal) tiene el mayor porcentaje de tracción la chapa llegando a un porcentaje del 5% de deformación.

Y el mayor efecto de compresión se visualiza en la cuadrícula 5 eje A-B (Transversal) donde el porcentaje se visualiza del 4%. Estos porcentajes de deformación van variando dependiendo de la zona que ha sido analizada.

En la tabla 4.2 se ve una media determinada de los esfuerzos que han sido generados.

Tabla 4. 2. Promedio del porcentaje de error experimental de la chapa

Media de los porcentajes de esfuerzos generados en la malla	
Compresión (%)	Tracción (%)
-1,0281	1,4344

4.8.2. Comparación de resultados obtenidos mediante simulación en ANSYS

Las áreas seleccionadas (ver figura 4.35) en la pieza alcanzada mediante el proceso de simulación deben mantener una estrecha relación con la superficie experimental. Esto en función del análisis que se debe realizar para contrastar y validar los resultados obtenidos en los dos procesos. Estos resultados se pueden visualizar en la tabla 4.3. Así como

también se puede concebir el error de deformación el cual se comparará con el error experimental obtenido y se procederá a la validación del proceso.

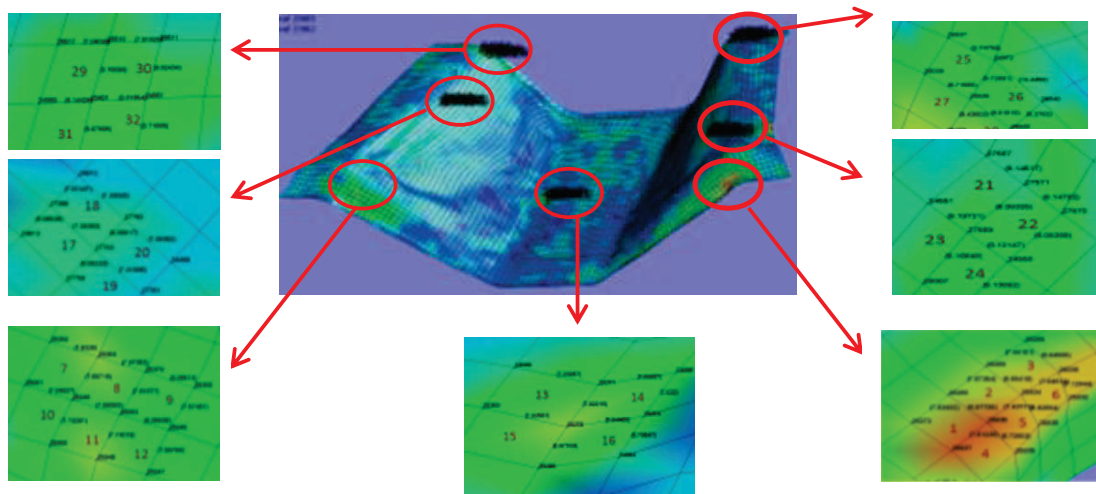


Figura 4. 35. Numeración de cuadrículas para medición de deformación en pieza simulada

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 3. Valores obtenidos en el proceso de simulación

Nº CUADRICULA	EJES	NODOS	LONG. INICIAL	LONG. FINAL	DEFORMACION UNITARIA	% DEFORMACIÓN
1	A-B	26272-26268	7,70307	7,63492	-0,0088471	-0,8847
	C-D	26268-25035	6,70564	6,97795	0,0406091	4,0609
2	A-B	26268-26269	7,7923	7,67354	-0,0152407	-1,5241
	C-D	26269-25834	6,66859	6,68419	0,0023393	0,2339
3	A-B	26269-26265	7,79129	7,44101	-0,0449579	-4,4958
	C-D	26265-25036	6,63212	6,84565	0,0321963	3,2196
4	A-B	25837-25035	7,80734	7,61239	-0,0249701	-2,4970
	C-D	25035-25835	6,69634	6,72803	0,0047324	0,4732
5	A-B	25035-25834	7,85005	7,43771	-0,0525271	-5,2527
	C-D	25834-25836	6,68636	6,92684	0,0359658	3,5966
6	A-B	25834-25036	7,85005	7,04518	-0,1025306	-10,2531
	C-D	25036-25832	6,67714	7,12044	0,0663907	6,6391
7	A-B	26382-26383	7,9711	7,9226	-0,006084	-0,608448
	C-D	26383-25948	7,42049	7,68716	0,035937	3,593698
8	A-B	26383-26379	7,97107	7,87353	-0,012237	-1,223675
	C-D	26379-25002	7,42197	7,61677	0,026246	2,624640
9	A-B	26379-26380	8,04703	8,09513	0,005977	0,597736
	C-D	26380-25945	7,42373	7,57457	0,020319	2,031863
10	A-B	25001-25948	7,9861	7,84627	-0,017509	-1,750917
	C-D	25948-25950	7,49725	7,73291	0,031433	3,143286

Nº CUADRICULA	EJES	NODOS	LONG. INICIAL	LONG. FINAL	DEFORMACION UNITARIA	% DEFORMACIÓN
11	A-B	25948-25002	7,98506	7,88083	-0,013053	-1,305313
	C-D	25002-25946	7,49694	7,74019	0,032447	3,244657
12	A-B	25002-25945	8,05702	8,06839	0,001411	0,141119
	C-D	25945-25947	7,49508	7,55768	0,008352	0,835215
13	A-B	24009-29371	7,41329	7,23257	-0,024378	-2,437784
	C-D	29371-29375	6,9889	7,02216	0,004759	0,475897
14	A-B	29371-24008	7,21619	7,00687	-0,029007	-2,900700
	C-D	24008-29374	6,98776	7,033	0,006474	0,647418
15	A-B	29369-29375	7,39845	7,22557	-0,023367	-2,336706
	C-D	29375-29298	6,94807	6,97703	0,004168	0,416806
16	A-B	29375-29374	7,16216	6,94488	-0,030337	-3,033722
	C-D	29374-24024	6,75729	6,79547	0,005650	0,565019
17	A-B	24613-27366	8,00467	8,06525	0,0075681	0,7568082
	C-D	27366-27763	7,38535	7,29392	-0,0123799	-1,2379914
18	A-B	27366-24612	7,89837	7,97431	0,0096146	0,9614642
	C-D	24612-27762	7,41799	7,33025	-0,0118280	-1,1828002
19	A-B	27759-27763	7,99256	8,05233	0,0074782	0,7478205
	C-D	27763-27761	7,40708	7,31886	-0,0119102	-1,1910226
20	A-B	27763-27762	7,99237	8,06017	0,0084831	0,8483091
	C-D	27762-24489	7,37592	7,29392	-0,0111173	-1,1117257
21	A-B	27571-27569	8,18796	8,08325	-0,012788	-1,278829
	C-D	27567-27571	8,05121	8,14517	0,011670	1,167030
22	A-B	27570-24550	8,19594	8,08389	-0,013671	-1,367140
	C-D	27571-27570	8,05219	8,14792	0,011889	1,188869
23	A-B	27569-28007	8,27916	8,16648	-0,013610	-1,361008
	C-D	24551-27569	8,10151	8,19721	0,011813	1,181261
24	A-B	24550-28006	8,23648	8,13892	-0,011845	-1,184487
	C-D	27569-24550	8,01968	8,12147	0,012693	1,269253
25	A-B	26037-24972	9,96159	9,74758	-0,0214835	-2,1483518
	C-D	24972-26038	9,58807	9,72691	0,0144805	1,4480495
26	A-B	24972-26040	12,2251	12,4458	0,0180530	1,8053022
	C-D	26040-26042	8,18502	8,2762	0,0111399	1,1139863
27	A-B	26039-26038	9,92348	9,71555	-0,0209533	-2,0953335
	C-D	26038-25279	9,19176	9,43603	0,0265749	2,6574889
28	A-B	26038-26042	10,4409	9,81818	-0,0596424	-5,9642368
	C-D	26042-25694	8,84076	8,88397	0,0048876	0,4887589
29	A-B	26517-26518	7,89011	7,84028	-0,0063155	-0,6315501
	C-D	26518-26401	8,46943	9,15098	0,0804718	8,0471767
30	A-B	26518-26511	7,91313	7,91826	0,0006483	0,0648290
	C-D	26511-24861	8,39312	9,02434	0,0752068	7,5206836
31	A-B	24560-26401	8,16601	8,14428	-0,0026610	-0,2661030
	C-D	26401-26403	8,49068	9,07905	0,0692960	6,9295981
32	A-B	26401-24861	8,19629	8,31354	0,0143053	1,4305253
	C-D	24861-26399	8,27003	8,7105	0,0532610	5,3260992

Fuente: Elaboración propia

Nota: Ejes A-B eje Transversal, C-D eje longitudinal. (Ver figura 4.28)

Resultado: Analizando la tabla 4.3 se determinó que los porcentajes de error en la deformación de la chapa simulada tiene efectos de compresión y de tracción con valores máximos de 10 y 8 % correspondiente. Así como también se visualiza que los valores obtenidos son muy similares a los valores experimentales, pero se debe indicar que los porcentajes se alteran por la precisión que se tiene en el instrumento de medición, adicionalmente el proceso de simulación es una aproximación de soluciones de las ecuaciones diferenciales parciales.

Tabla 4. 4. Promedio del porcentaje de error teórico.

Media de los porcentajes de esfuerzos generados en la malla	
Compresión (%)	Tracción (%)
-1,9227	2,5467

4.8.3. Validación de resultados

Comparando las tablas 4.2 y 4.4 donde se visualiza el porcentaje de error experimental y teórico correspondientemente se concluye, que los resultados conseguidos en los dos procesos son muy similares y tienden al mismo promedio de porcentaje en los ejes donde la chapa sufre efectos de compresión y de tracción respectivamente. Finalmente, se puede concluir que el proceso y formulación mecánica empleada en este análisis es una herramienta útil para el diseño y la optimización dentro de los procesos industriales.

4.9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.9.1. Desplazamientos totales

El programa muestra los desplazamientos totales de la placa de acero en los ejes XZY, el desplazamiento se inicia en la parte inferior de la plancha donde se realiza el contacto inicial de la chapa con el punzón, produciendo un desplazamiento de material hacia esa dirección, como se puede evidenciar en la figura 4.36, el mayor desplazamiento es en el eje Z.

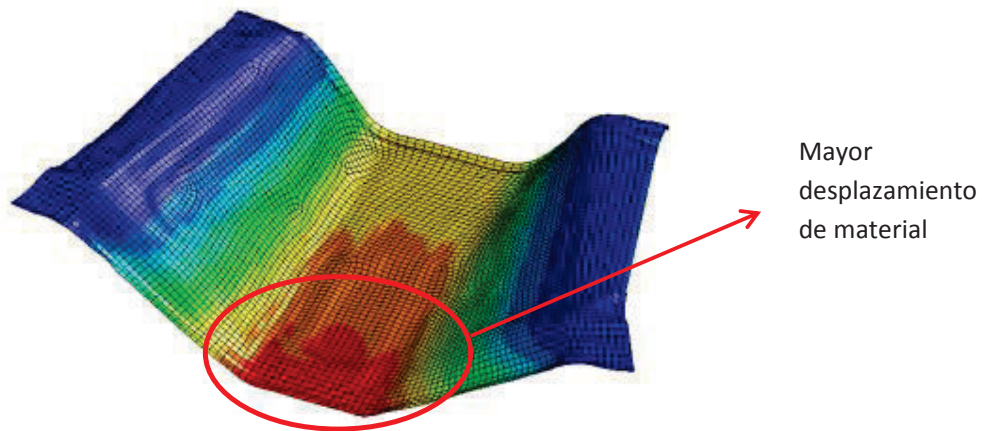
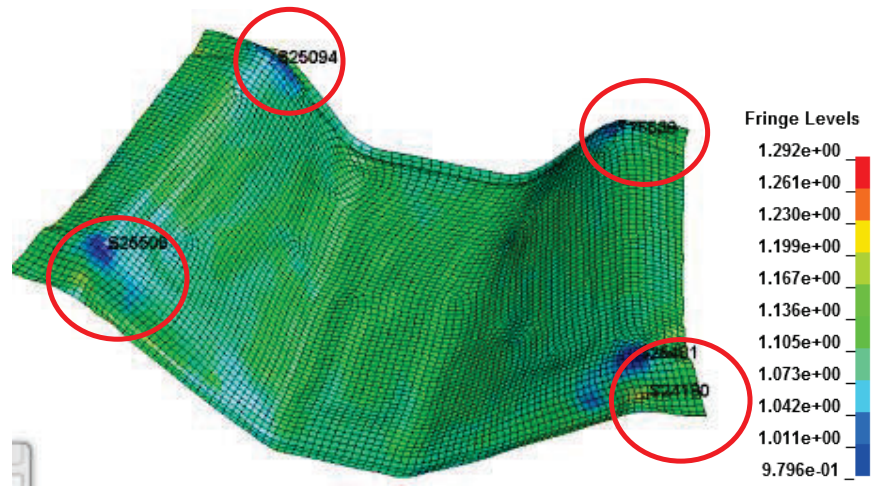


Figura 4. 36. Desplazamiento total en el eje XYZ

Fuente: Elaboración propia

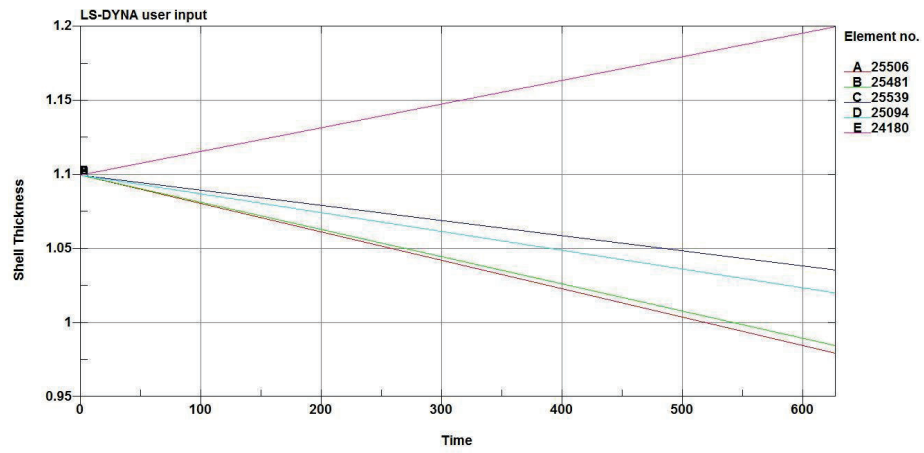
4.9.2. Espesor relativo y porcentaje de reducción

El espesor relativo y el adelgazamiento están relacionados, como se ve en la figura 4.37 y 4.38 en la cual indica la variación del espesor de la chapa respecto a su espesor inicial, así mismo en la curvatura inferior se puede evidenciar la reducción de material con color azul; y en la escala que se dispone se visualiza que la reducción es hasta los 0.9796 mm en relación al espesor inicial que es de 1.1 mm. Este adelgazamiento se produce por el radio de curvatura que disponen. Así también se evidencia el porcentaje de reducción del 11% máximo, como se visualiza en la figura 4.38 (b).



Reducción de material mínimo de 0.9796 mm, espesor original de chapa de 1.1 mm

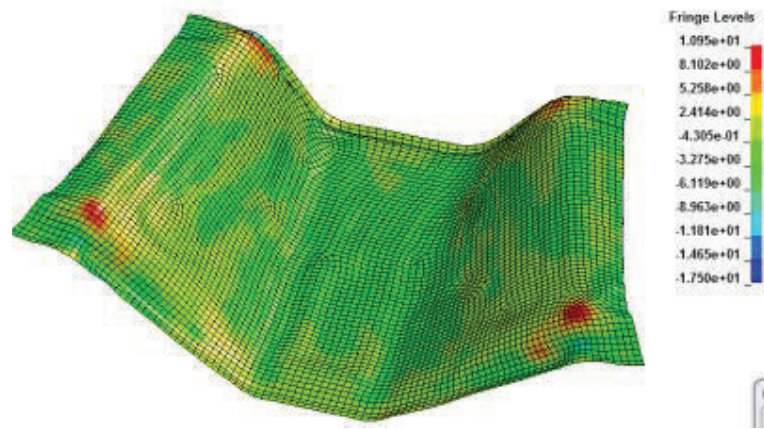
(a)



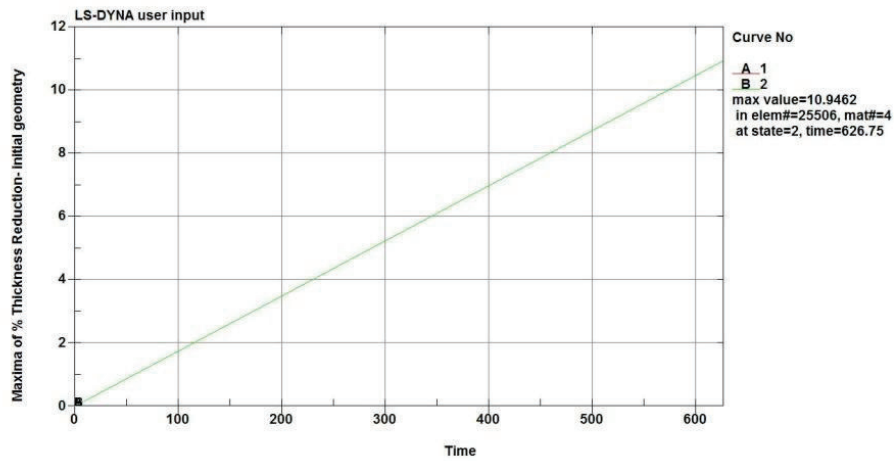
(b)

Figura 4. 37. Espesor de la chapa después de deformación

Fuente: Elaboración propia



(a)



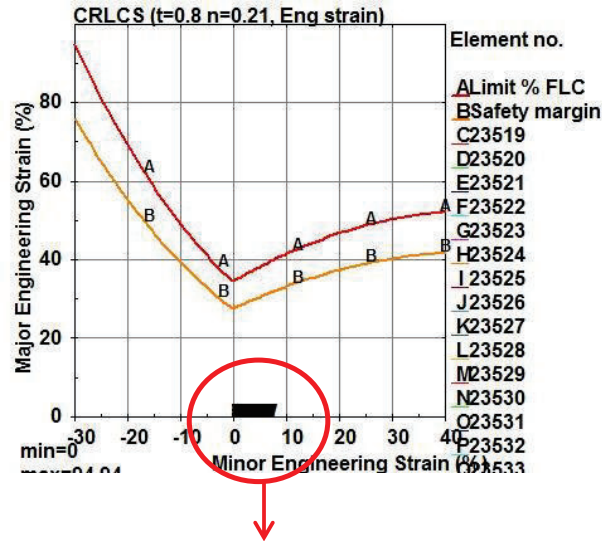
(b)

Figura 4. 38. (a) Porcentaje de visualización con colores en modelo y (b) Porcentaje de adelgazamiento de la chapa máxima de 10% en gráfica

Fuente: Elaboración propia

4.9.3. Mapa FLD y zona de seguridad

La aplicación del diagrama FLD y zona de seguridad, es determinar en qué zona se encuentran los elementos discretizados y que han sido afectados por la carga aplicada en el momento de la simulación, este método es una ayuda adicional para certificar el proceso empleado y la seguridad del material.



Ubicación de puntos de deformación en diagrama FLD

Figura 4. 39. Zona de seguridad y mapa FLD de pieza embutida

Fuente: Elaboración propia

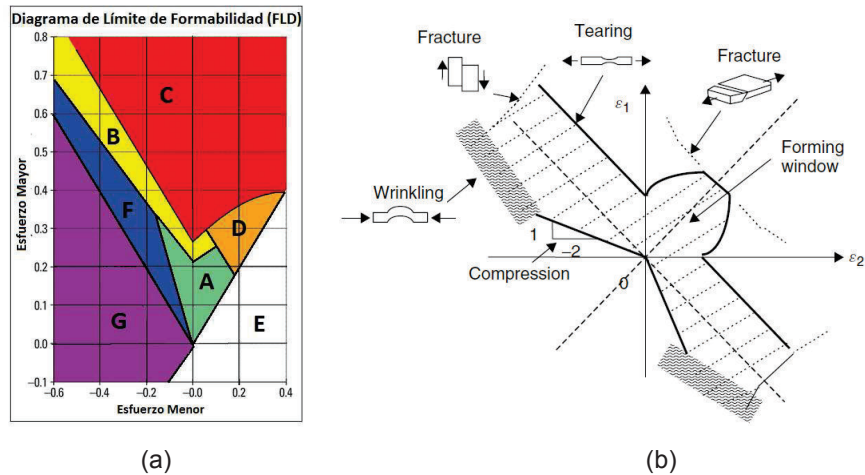


Figura 4. 40. (a) y (b) Zonas del diagrama FLD

Fuente: (ALTÁN, 1998)

Al visualizar la figura 4.39 del mapa FLD y comparar con la figura 4.40 (a) y (b) se visualiza que los puntos seleccionados de la chapa se encuentran en las zonas A y E. Al encontrarse puntos en la zona E significa que una parte del material no ha sido estirado lo suficiente, coexistiendo en un alto riesgo de tener recuperación elástica. Lo ideal en un conformado seguro es tener a totalidad de sus puntos en la zona A. Y dependiendo del

proceso los puntos pueden estar dentro de las zonas D y E, dentro del proceso en análisis se visualiza que la mayoría de puntos se encuentran dentro de la zona A lo que garantiza el proceso de conformado. (CLAES, 2005, pág. 11)

4.9.4. Esfuerzos generados en la embutición

Para el análisis de los esfuerzos que se generan en la embutición se analizó con el criterio de Von Mises (ver figura 4.41). En la cual mediante la ayuda de una escala de colores se observa los esfuerzos o tensiones que se generan en la placa durante el proceso de simulación, siendo el mayor esfuerzo equivalente a 3.58×10^5 MPa sobrepasando el esfuerzo de plasticidad. Esto muestra que el material entro en el límite plástico que es lo que se quería determinar, adicionalmente este valor indica que el material se encuentra dentro del rango seguro de trabajo y no presentará roturas, ajustándose a las zonas seguras del diagrama FLD que fue obtenido en la figura 4.39.

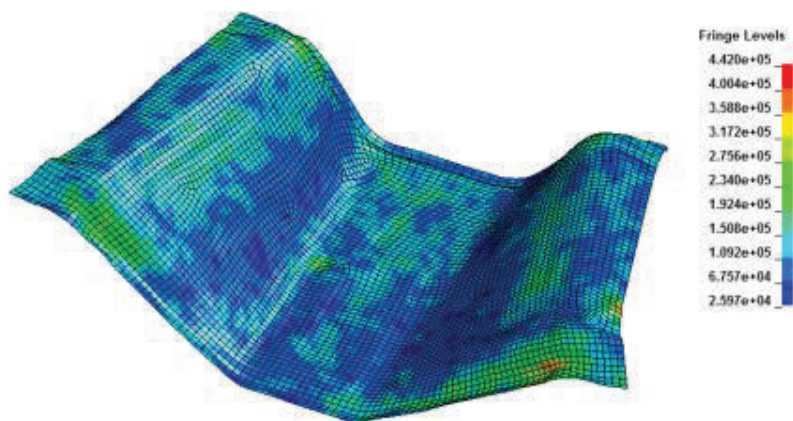


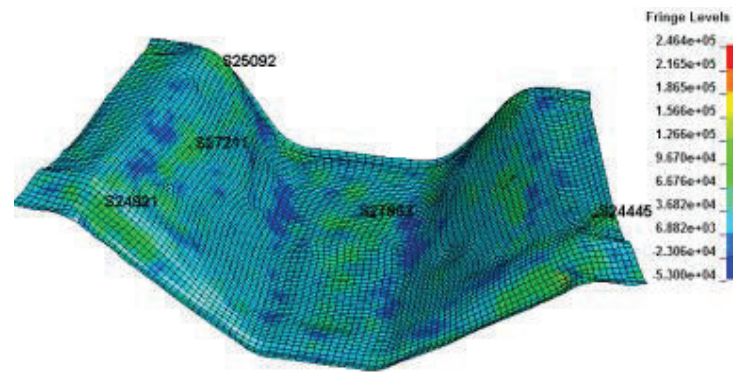
Figura 4. 41. Gráfica de esfuerzo de la chapa

Fuente: Elaboración propia

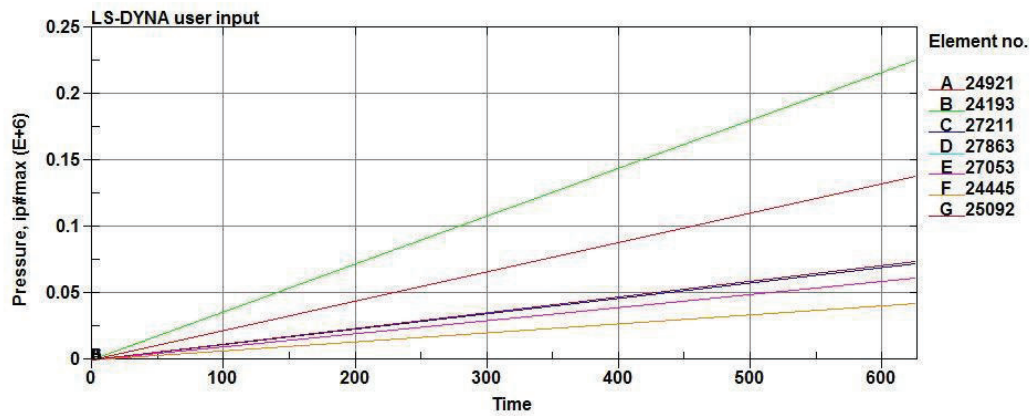
4.9.5. Gráfica de fuerzas de conformado

Como se estableció en capítulos anteriores, la determinación de las fuerzas de embutido es realmente complejo e inexacto al utilizar métodos empíricos. Y una vez realizado el proceso de simulación el software otorga una fuerza mínima requerida para este proceso de conformado de 56996 Newton (ver figura 4.42), así como también la mayor fuerza será aproximadamente el valor que se ingresó en el sistema de 78000 Newton al inicio de

la asignación de las condiciones de borde. Esto se visualiza en la figura inferior en la escala de colores.



(a)



(b)

Figura 4. 42. Gráfica de fuerza empleada en la chapa

Fuente: Elaboración propia

4.9.6. Gráfica de análisis de energía Hourglass y energía interna

Para la validación del proceso de simulación se debe verificar el valor que se obtiene de la energía de hourglass, este valor al haber realizado mediante el método de Flanagan como ya se explicó anteriormente debería tender a ser una energía cero, que no influencia en el método de simulación, por lo cual, este valor debe compararse con un refinamiento de su malla.

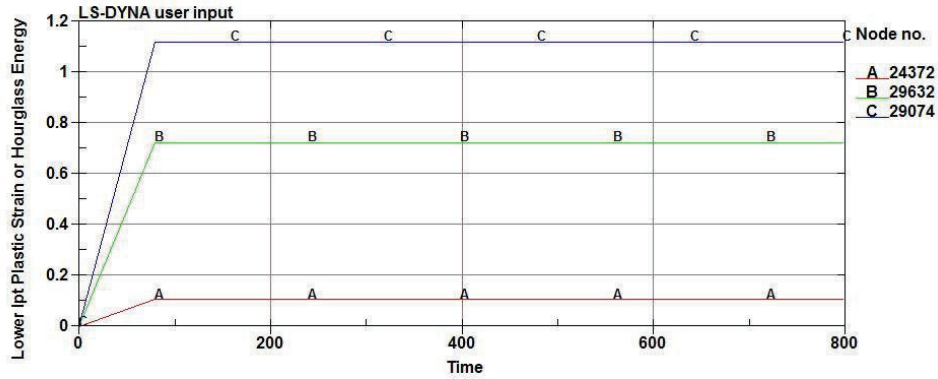


Figura 4. 43. Curva de energía de hourglass

Fuente: Elaboración propia

Como se visualiza en la figura 4.43 el valor de la energía de hourglass en la chapa simulada no sobrepasa 1.2 Joule y para validar el resultado se comparará con el resultado que se obtenga luego del refinamiento de la malla.

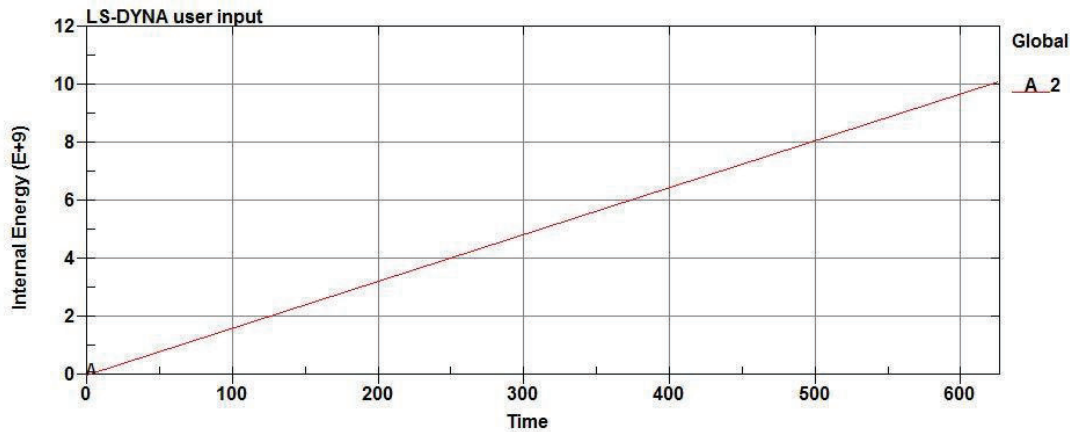


Figura 4. 44. Energía interna dentro de la chapa de simulación

Fuente: Elaboración propia

La figura 4.44 muestra el valor de la energía interna medida en Joule que ha sido absorbida dentro de la fase elástica y plástica del material simulado, además para validar los resultados obtenidos en el estudio, se ha recurrido a la relación entre la energía interna de deformación y el valor de la energía de hourglass (ver figura 4.43). Para la validación del proceso la energía de hourglass debe ser menor al 10% de la energía interna.

$$HG = \frac{HourglassB}{Internal EB} * 100\% \quad (4. 3)$$

$$HG = \frac{1.2J}{10 \times 10^9 J} * 100\%$$

$$HG = 0,000000012\%$$

Se observa que el valor obtenido es menor al 10% de la energía interna, por lo que se concluye que el estudio es válido.

4.9.7 Modificación de parámetros en programa ANSYS en el MÓDULO LS-DYNA

4.9.7.1. Variación de la superficie de la placa de embutido y el rango de mallado

Para optimizar y mejorar la visibilidad de la embutición se ha procedido a dividir la superficie que conforma la chapa o plancha de acero en diferentes superficies. Al haber generado más subdivisiones en la superficie se debe realizar el refinando de la malla en las áreas donde existirá mayor deformación. Esto produce una reducción en las dimensiones del mallado, debiendo considerar que debe existir una relación conjunta entre los mallados de las diferentes zonas que se generaron.

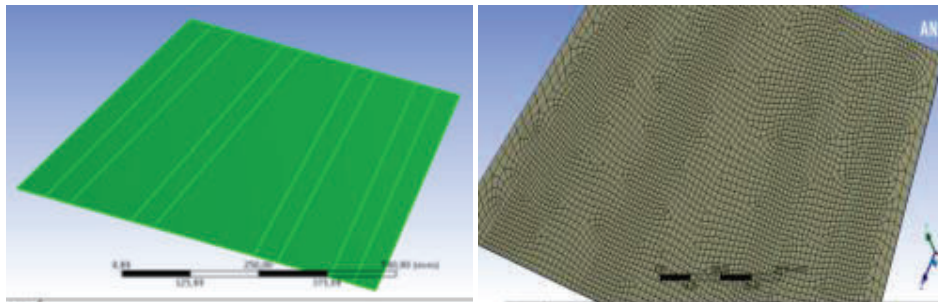


Figura 4. 45. Creación de superficie para maximizar el tipo de mallado

Fuente: Elaboración propia

La fuerza de embutición se mantiene con 78000 N, obteniendo como resultados lo siguiente.

4.9.7.2. Resultados posteriores a la creación de superficies y refinamiento de la malla

Una vez realizada la simulación de la placa de acero sometida al incremento de superficies, el resultado obtenido en los esfuerzos que se generan tiene una mejor visibilidad y comportamiento. Al realizar el cambio de los dos parámetros ayuda a determinar de una mejor manera la concentración de los puntos donde se genera el mayor esfuerzo en la chapa al momento de su proceso de simulación.

El esfuerzo de Von Mises determinado converge en un valor más exacto y se aproxima al valor real, determinando que la plancha no sobrepasa el límite de fallo o rotura. Este resultado se debe a que existe un mayor número de divisiones infinitesimales dentro de la plancha.

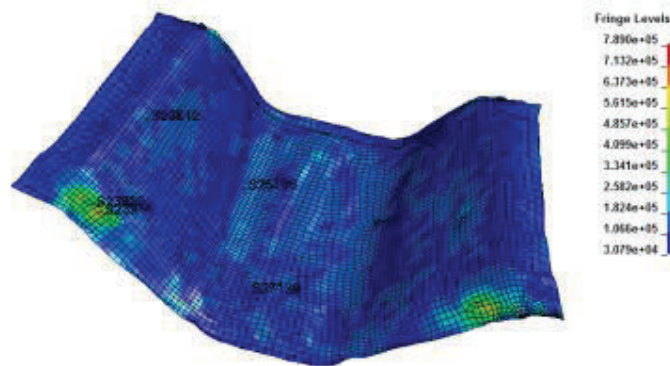


Figura 4. 46. Esfuerzo de Von Mises sometido a convergencia de la malla

Fuente: Elaboración propia.

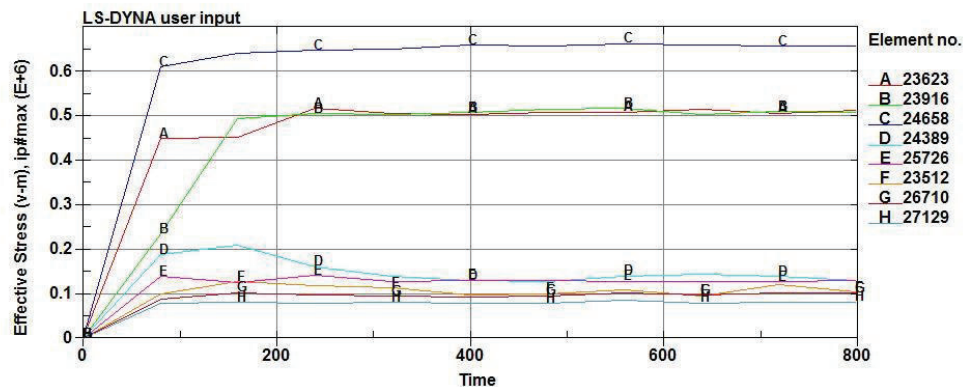


Figura 4. 47. Resultado de elementos donde se visualiza los esfuerzos

Fuente: Elaboración propia

4.9.7.3. Resultados de espesor, porcentaje de reducción y energía Hourglass

En las figuras inferiores podemos visualizar los nuevos resultados obtenidos tanto en reducción de espesor de material como la energía de Hourglass, estos valores ayudarán a validar el proceso de convergencia de la simulación.

Comparando las figuras 4.37 y 4.38 (b) con las figuras 4.48 y 4.49 se evidencia que la reducción del espesor se encuentran dentro de los mismos rangos sin tener una variación mayor, lo cual, validaría el proceso de simulación.

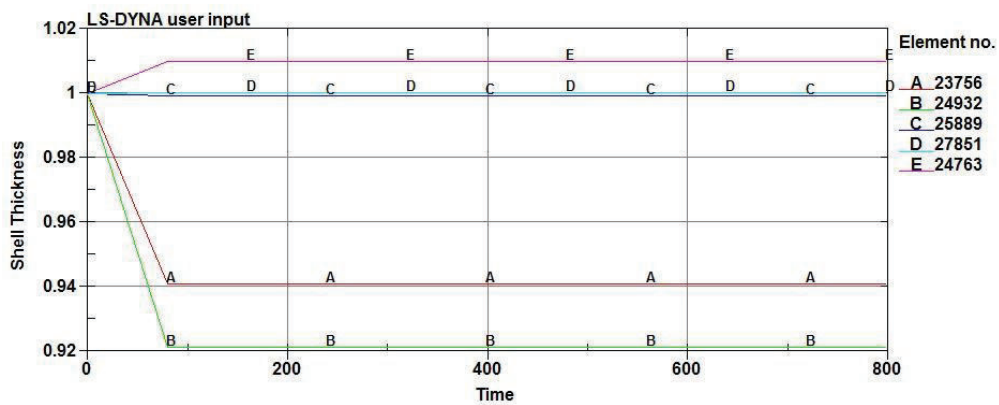


Figura 4. 48. Reducción de espesor después de refinamiento de malla

Fuente: Elaboración propia

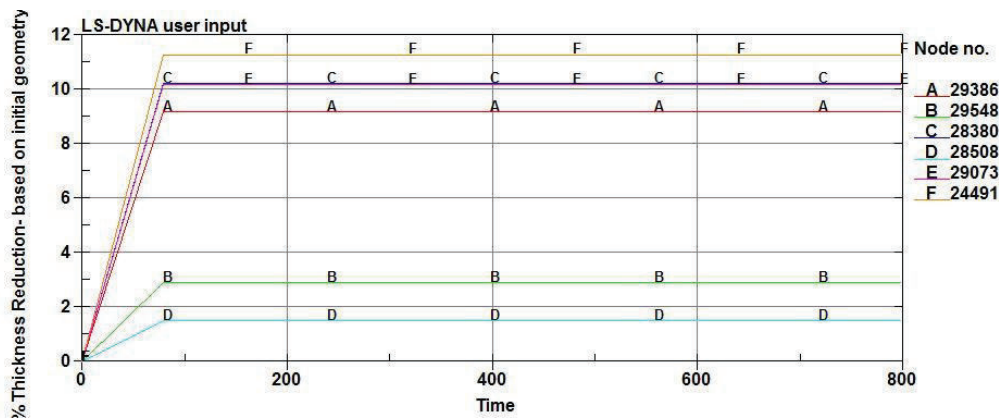


Figura 4. 49. Porcentaje de reducción

Fuente: Elaboración propia

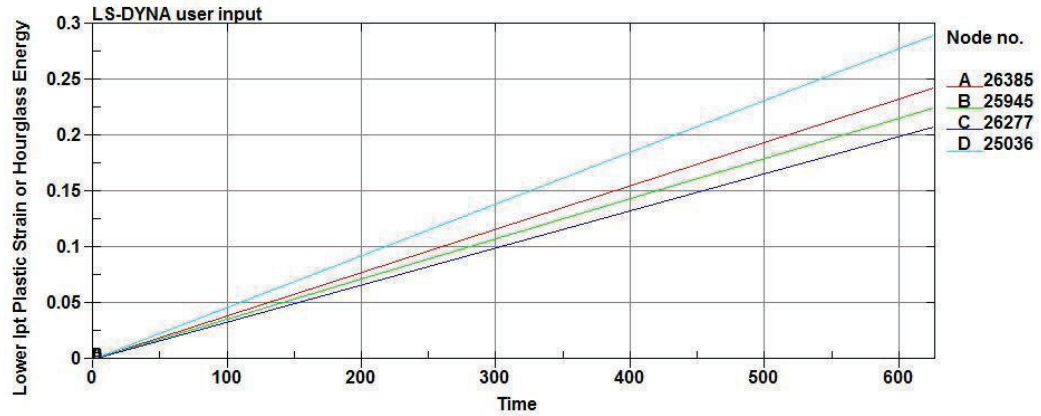


Figura 4. 50. Energía de Hourglass minimizada

Fuente: Elaboración propia

A demás para la validación del proceso se debía minimizar el efecto de Hourglass, y comparando las gráficas 4.44 y 4.50 se visualiza que se logró reducir este parámetro a 0.3, lo cual, nos determina que el efecto de refinar su malla ayuda a obtener el efecto de casi energía cero dentro del parámetro de Hourglassing, que es lo que se quería determinar.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Con la realización de la presente tesis se ha logrado cumplir con el objetivo planteado al desarrollar y simular el proceso de embutición del protector del tanque del Chevrolet SZ y validarlo con el proceso real de embutición, de ésta manera se podrá aplicar ésta metodología de simulación a piezas similares para obtener resultados confiables en el proceso de diseño y construcción de matrices de embutición.
- Al ser un problema dinámico no lineal se utilizó el método explícito, con el cual se calculó deformaciones, desplazamientos, tensiones y energía interna que se generó en el proceso de embutición, y para poder evaluar de mejor manera los resultados se realizó un mallado más fino, logrando determinar con una mayor precisión todos los esfuerzos que se produjeron. Esto ayuda a la toma de decisiones para el desarrollo del proyecto.
- El software ANSYS LS-DYNA se ha convertido en una herramienta de cálculo muy valiosa para la reproducción o resolución numérica de los diferentes procesos de conformado mecánico, en este caso se aplicó en la resolución de problemas de deformación plástica validando el proceso experimental que se realiza actualmente en la industria de embutición.
- Para garantizar la convergencia de los resultados, debe existir un equilibrio entre el tamaño de celda, el número de elementos y el gasto computacional que se genera durante la simulación. Esta convergencia depende del tamaño de celda ya sea muy pequeños o mallados muy finos no garantiza una adecuada obtención de resultados.
- Es posible observar que las deformaciones predichas mediante la simulación se ajustan a las deformaciones reales que experimenta la chapa ya que los

porcentajes de variación entre el proceso teórico y el proceso experimental tienden a valores similares tanto en compresión y tracción. Estos valores ayudaron a validar el proceso realizado.

- Es posible observar que los espesores obtenidos en las dos simulaciones tienden a valores aproximados, existiendo un porcentaje de reducción del material del 12 %; en ambos casos la contracción que sufre la chapa se debe al arrastre producido por el punzón, por lo tanto, esta es una de las zonas críticas de la chapa pudiendo presentar desgarramiento.
- La variación entre 0 y 0.1 del coeficiente de fricción no tiene mucha influencia en los resultados obtenidos ya que al igual que en el proceso real su fricción es mínima y no se utiliza ningún tipo de lubricación.
- El empleo de elemento cáscara o elemento Shell dentro del análisis por elementos finitos agiliza los resultados, alcanzando a determinar una solución rápida y teórica en comparación al proceso experimentalmente, logrando validar el proceso de simulación.
- Un elemento que falla degenera en el fenómeno del Hourglassing. El Hourglassing ocasiona un desbalance de energía, porque la energía interna es igual a la pérdida de energía cinética menos la energía de Hourglassing, por lo tanto, para reducir este fenómeno de Hourglassing se subdividió a la superficie de deformación con la finalidad de reducir el mallado, esta opción ayudó a minimizar el valor de Hourglassing en comparación al valor obtenido inicialmente.
- Dentro del análisis realizado se tiene un endurecimiento isotrópico, en el que la superficie de expansión se expande con una tensión creciente. La carga en tensión endurece también el material en compresión.
- Se desarrolló una guía para la ejecución del proceso de embutición, la cual, paso a paso guiará para futuros procedimientos que se puedan realizar.

RECOMENDACIONES

- Para evitar defectos de embutición es recomendable controlar los parámetros de operación como por ejemplo la fuerza del punzón, o en el proceso real controlar la fuerza de los frenos que existen con la finalidad de evitar el desgarramiento de la chapa.
- En procesos de conformado mecánico, para poder validar un estudio es necesario también comparar los valores de la energía interna y de hourglass que se generan en el interior, debiendo ser la relación entre dichas energías menor al 5%.
- Realizar un estudio de embutición empleando como parámetro la velocidad a la que el punzón actúa sobre la chapa, esto ayudará a determinar el comportamiento de la misma, en virtud que el presente estudio solo se realizó aplicando una determinada fuerza.
- Establecer correctamente las condiciones de borde en especial las de desplazamiento con la finalidad de evitar movimientos no deseados en el proceso de embutición, tales como movimiento de rotación. Estos movimientos impedirán un proceso de simulación adecuado.
- En los métodos de falla por plasticidad también se puede aplicar el método Piecewise el cual es un método que ayuda a incrementar el proceso de deformación normal basándose en el efecto de la tensión de fluencia. Esto genera tensiones desviadoras las cuales se van modificando elásticamente.
- Para medir los diferentes esfuerzos que se producen en el efecto de embutición un método que se debería considerar es el uso de galgas extensiométricas, las cuales miden la deformación, presión, carga, desplazamientos que se producen en los ejes mecánicos de un material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTÁN, T. (1998). *Metal Forming Handbook*. Berling, Alemania: Schuler.
- ANSYS. (2013). *Ansys LS-DYNA User's Guide*. Canonsburg, Estados Unidos.
- ANSYS. (2013). *ANSYS Mechanical User's Guide*. Canonsburg, Estados Unidos.
- ASCAMM, F. (2003). Informe Técnico sobre Nuevos Materiales Aplicados a Componentes del Sector de la Automoción. *Asociación Catalana de Empresas de Moldes y Matrices*.
- CARATE, L., & GALLARDO, D. (2007). *Análisis del proceso de Embutición Profunda para la Elaboración de Recipientes Cilíndricos de Pared Delgada por medio del Software STAMPAK (Tesis)*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica.
- CARDENAS , V. (1983). *Fundamentos Generales del Conformado de los Metales*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- CELIGUETA LIZARZA, J. (2008). *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural (3ra ed.)*. (U. C.B, Ed.) Navarra, España: Tecnológico de la Universidad de Navarra.
- CLAES, A. (2005). *Tesis "Numerical Simulation of Sheet Metal Forming for High Strenghth Steels"*. (L. U. Technology, Ed.) Lulea, Sweden: Division of Manufacturing Systems Engineering.
- COLORADO, J. (2008). *Análisis de las Características de los Modelos de Material Recomendados para la Simulación de Procesos de Embutición en Chapa de Acero (Tesis)*. (E. P. Mecánica, Ed.) Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- DEL-LERO MOREAU, J. (2008). *Evolución Microestructural de Chapas Metálicas Bajo Procesos de Larga Deformación (Tesis)*. (D. d. Materiales, Ed.) Madrid, España: Escuela Politécnica Universidad Carlos III de Madrid.
- ESCUELA COLOMBIA DE INGENIERÍA. (2008). *Conformado de Metales, Protocolo Curso de Materiales*. Colombia: Facultad Ingeniería Industrial, Laboratorio de Producción.

- ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA BILBAO.
http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/715_ca.pdf. (U. d.-E. Unibertsitatea, Editor, & D. d. Mecánica, Productor)
- GARCÍA GAYOL, N. (2009). *Simulación de un Proceso de Embutición Mediante ANSYS LS-DYNA (Tesis)*. (F. d. Mecánica, Ed.) Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- GEDNEY, R. (2002). Mater Process. *ASM INTERNATIONAL*, 33.
- GERE J, & GOODNO J. (2002). *Resistencia de Materiales*. México, México: Ed. Cengage Learning.
- HANDBOOK ASM. (1993). *Forming and Forging* (9th ed., Vol. 14). The Ohio, Estados Unidos.
- HERNÁNDEZ C, & VÁSQUEZ W. (2010). *Diseño y Simulación del Proceso de Embutición de Chapa Metálica para la Construcción de Extintores utilizando el Método de Elementos Finitos (Tesis de Ingeniería)*. (I. Ing. Zambrano, Ed.) Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica.
- HIBBELER, R. (2006). *Mecánica de Materiales*. México, México: Ed. Prentice Hall.
- LÓPEZ NAVARRO, T. (1976). *Troquelado y Estampación* (5ta ed.). Barcelona, España: Ed. Gustavo Gili.
- LS-DYNA. (s.f.). *ANSYS 16.1*.
- MANGONON P. (2001). *Ciencia de Materiales, Selección y Diseño*. México, México: Ed. Prentice Hall.
- MARCINIAK, D. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming* (2da ed.). London, Inglaterra: Ed. Butterworthen, Henemann.
- MARTÍNEZ, A. (1998). *El Método de los Elementos Finitos en el Análisis Estructural*. Madrid, España: Escuela Superior de Ingeniería Aeronáutica.
- MECHANICAL EVENT SIMULATION. (s.f.). www.caesoft.es/products/algos/events_mes/elementos.htm.
- METALASA. (s.f.). Productos Siderúrgicos, Datos y Características de Metales.

- MOHAMMED SULIMAN, A. (2005-2006). *Numerical Simulation of Metal Sheet Plastic Deformation (Tesis Doctoral)*. (P. R. Teti, Ed.) Napoles, Italy: University of Naples Federico II, Department of Materials and Production Engineering.
- MOHSEN, K. (2012). *Metal Forming Process, Tools, Desing*. Rijeka, Croatia: InTech.
- OEHLER, G., & KAISER. (1977). *Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir* (6ta ed.). México, México: Ed. Gustavo Gili.
- OÑATE, E. (1995). *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos*. (CIMNE, Ed.) Barcelona, España: Ed. McGraw-Hill.
- PASCUAL GUARDIOLA, F. (2010). *Optimización del Proceso de Conformado de Chapa (Tesis)*. (D. G. Duffett, Ed.) Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- PORTABELLA CASTANY, M. (2014). *Un Procedimiento para Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos con Error Prefijado Utilizando Refinamiento de Malla Adaptativo (Tesis)*. (E. IBÁÑEZ DE NAVARRA, & J. ZÁRATE ARAIZA, Edits.) Barcelona, España: Escola de Camins.
- RODRÍGUEZ, J. (2011). *Fundamentos de Conformación por Deformación Plástica* (Vol. Universidad Politecnica de Cartagena). Cartagena, Cartagena, Colombia: Ed. Industriales.
- SANDOVAL , M. (2009). *Análisis de Esfuerzos en un Diente de Engrane Recto para Bomba Hidráulica Aplicando el Método Foto elástico y el Método de Elementos Finitos (Tesis)*. (E. S. Eléctrica, Ed.) México: Instituto Politécnico Nacional.
- SEGERLIND, L. (1984). *Applied Finite Element Analysis* (2da ed.). (M. S. University, Ed.) Michigan, Estados Unidos: Ed. Jhon Wiley and Sons.
- SUCHY I. (2006). *Handbook of Die Design* (2da ed.). New York, Estados Unidos: Ed. The MacGraw-Hill.
- ZIENKIEWICO, C., & TAYLOR, R. (1994). *EL Método de los Elementos Finitos Formulación Básica y Problemas Lineales* (4ta ed.). Barcelona, España: Ed. McGraw-Hill.

<http://es.scribd.com/doc/5644887/3-teoria-de-la-embutición>.

<http://matildesalvadortecno.wikispaces.com/10+Estampaci%C3%B3n+en+fr%C3%ADo>.

Obtenido de <http://matildesalvadortecno.wikispaces>.

<http://waste.ideal.es/reciclajeautomoviles.htm>.

http://www.arcelormittal.com/industry/prd_web/new_web_details.pl?

<http://www.cimne.com/projects/stamping/intro/default.html>.

www.ansys.com.

WWW.MATWEB.COM.

ANEXOS

TABLA DE PROPIEDADES DE LA PLANCHA SIMULADA

ASTM A36 Steel, bar

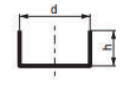
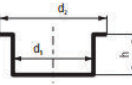
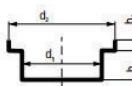
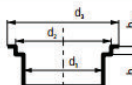
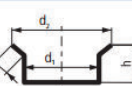
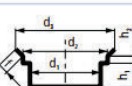

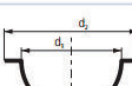
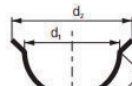
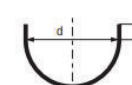
Categories:	Metal ; Ferrous Metal ; ASTM Steel ; Carbon Steel ; Low Carbon Steel
Material Notes:	Minimum Cu content when copper steel is specified. Used for guardrails.
Key Words:	UNS K02600
Vendors:	Click here to view all available suppliers for this material.
	Please click here if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

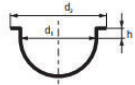
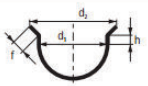
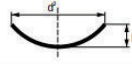
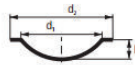
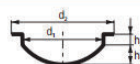
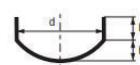
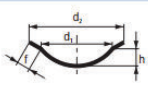
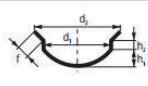
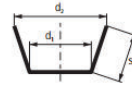
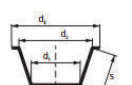
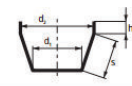
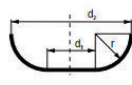
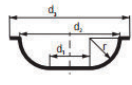
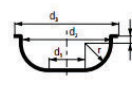
Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi	
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi	
Elongation at Break	20.0 %	20.0 %	in 200 mm
	23.0 %	23.0 %	In 50 mm.
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	
Compressive Yield Strength	152 MPa	22000 psi	Allowable compressive strength
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0.260	0.260	
Shear Modulus	79.3 GPa	11500 ksi	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.260 %	0.260 %	
Copper, Cu	0.20 %	0.20 %	
Iron, Fe	99.0 %	99.0 %	
Manganese, Mn	0.75 %	0.75 %	
Phosphorous, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %	
Sulfur, S	<= 0.050 %	<= 0.050 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your

FÓRMULAS PARA DETERMINAR EL DIÁMETRO EQUIVALENTE EN EMBUTICIÓN

<i>Table 4.2.1: Formulas for the circular blank diameter D</i>	
Container shape (cross-section) rotationally symmetrical shapes	Blank diameter D =
1 	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} *$
2 	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h} *$
3 	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)} *$
4 	$\sqrt{d_3^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)} *$
5 	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)} *$
6 	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2) + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)} *$
7 	$\sqrt{2 \cdot d^2} = 1.414 \cdot d$
8 	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$
9 	$1.414 \cdot \sqrt{d_1^2 + f \cdot (d_1 + d_2)}$
10 	$1.414 \cdot \sqrt{d^2 + 2 \cdot d \cdot h}$

11		$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$
12		$1.414 \cdot \sqrt{d_1^2 + 2 \cdot d_1 \cdot h + f \cdot (d_1 + d_2)}$
13		$\sqrt{d^2 + 4 \cdot h^2}$
14		$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot h^2}$
15		$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d_1 \cdot h_2)}$
16		$\sqrt{d^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d \cdot h_2)}$
17		$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot h^2 + 2 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)}$
18		$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot [h_1^2 + d_1 \cdot h_2 + 0.5 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)]}$
19		$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2)} \cdot *$
20		$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2} \cdot *$
21		$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot [s \cdot (d_1 + d_2) + 2 \cdot d_2 \cdot h]} \cdot *$
22		$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2}$ or $\sqrt{d_2^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 - 0.56 \cdot r^2}$
23		$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + d_3^2 - d_2^2}$ or $\sqrt{d_3^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 - 0.56 \cdot r^2}$
24		$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + d_3^2 - d_2^2}$ or $\sqrt{d_3^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h) - 0.56 \cdot r^2}$

(ALTÁN, 1998, pág. 164)

PRIMERA OBTENCIÓN DEL MODELO EN SIMULACIÓN

