ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

"SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ESTAMPADO EN CHAPAS METÁLICAS Y SU RECUPERACIÓN ELÁSTICA A TRAVES DEL SOFTWARE POR ELEMENTOS FINITOS STAMPACK"

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

NATALIA ELIZABETH BAHAMONDE MEAN

WILSON RENE GUARANDA MORA

DIRECTOR: MCS. ING. IVAN ZAMBRANO

Quito, Octubre 2007

DECLARACIÓN

Nosotros, Natalia Elizabeth Bahamonde Mean y Wilson Rene Guaranda Mora, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada 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 nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Natalia Bahamonde M.	Wilson Guaranda M.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Natalia Bahamonde M. y Wilson Guaranda M., bajo mi supervisión.

Ing. Iván Zambrano
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la salud y la fuerza necesaria para cumplir nuestras metas.

A nuestros padres por todo el apoyo y amor que siempre nos dieron para seguir adelante.

Al Ing. Iván Zambrano por su paciencia, amistad y por la dirección acertada en este proyecto.

A la Carrera de Ingeniería Mecánica, por la formación profesional y personal que hemos recibido en sus aulas.

Natalia Bahamonde.
Wilson Guaranda.

DEDICATORIA

Deseo dedicar el presente proyecto a Dios por permitirme conocerlo en la universidad, por enseñarme y acompañarme en todo momento, por ser mi guía y fuerza para cumplir mis sueños y metas.

A mis padres Iván y Marina por darme todo el amor y apoyo para ser mejor en la vida, a mi hermana Margarita y su esposo Daniel por ser incondicionales, y a mi hermano y a mis sobrinos Diana y Filipo quienes son mi alegría y siempre los llevo presentes en mi corazón.

A mis mejores amigos Wilson, Mayra y Paulina por acompañarme durante mi trayectoria universitaria dentro y fuera de las aulas, siendo un gran apoyo para mi vida.

A Victor y David por su verdadera amistad, apoyo y paciencia; y a mis amigos: Myriam, Anita, Alex, Edwin, Santiago y Miguel porque compartieron buenos y malos momentos y supieron extenderme su mano incondicional.

Natalia

El presente trabajo dedico a mis padres, Hilda y Gonzalo, porque que con su apoyo diario e incondicional han hecho que día a día me enfoque en mi carrera universitaria, a mi hermana América, a su esposo Marco, por su amistad y apoyo, a mi sobrina Yana Luz, porque con sus ocurrencias me contagia de su alegría todos los días.

A Natalia, por haber sido mi compañera y amiga desde los primeros semestres en la facultad, por ser mi compañera de tesis y por que gracias a su apoyo y exigencia el presente trabajo se ha desarrollado exitosamente.

A mis amigos: Luís (Pete), José (Salce), Santiago (Peter), Edwin (Chato), Santiago, Alex, Henry(Mayors) y Guido por haber sido un grupo unido y leal.

Wilson

CONTENIDO

RESUMEN…… xix
PRESENTACIÓN……. Xxi
CAPÍTULO I El Método de los Elementos Finitos (MEF)…… 1
1.1 Descripción del Método de Elementos Finitos…… 3
1.2 Aplicación del método……. 4
1.3 Funciones de forma…… 7
1.3.1 Tipos de funciones de forma…… 7
1.4 Integración numérica…….. 9
1.5 Mallado o discretización espacial……. 12
1.6 Funcionamiento de un programa de elementos finitos…… 12

CAPÍTULO II Fundamentos de la Conformación Plástica de chapas metálicas……... 14
2.1 Conformabilidad…… 14
2.2 Deformación le los metales……... 16
2.2.1Deformación……. 16
2.2.2 Deformación elástica…… 16
2.2.3 Límite elástico…… 16
2.2.4 Módulo de elasticidad…….. 16
2.2.5 Constante de Poisson…….. 17
2.3 Deformación plástica…… 18

CAPÍTULO III Teoría de la Recuperación Elástica (Springback)……. 21
3.1 Determinación del factor de Recuperación Elástica…… 24
3.2 Radio de curvado…… 25
3.3 Factor de formabilidad (F)…… 31
3.4 Límite de conformabilidad (FLD)…….. 33
3.4.1 Análisis de grilla circular …….. 33
3.4.2 Diagrama límite de formabilidad (FLD) ……. 34

CAPÍTULO IV Importación y corrección de una geometría real compleja (Parachoques) al programa Stampack……. 36
4.1 Descripción del problema de un troquel original……. 36
4.2 Forma actual del troquel de estampado del parachoques…….. 37
4.3 Parámetros de estampado…… 39
4.3.1 Velocidad de formado…… 39
4.3.2 Coeficiente de fricción…….. 41
4.3.3 Lubricación……. 43
4.4 Importación de una geometría compleja real (Parachoques) al programa Stampack…….. 43
4.4.1 Proceso de importación de un archivo Iges…….. 44
4.4.2 Parámetros de importación…… 44
4.4.3 Proceso de importación de geometrías ……. 46
4.4.4 Generación de una malla preliminar…….. 49
4.4.4.1 Mallado por Defecto……. 49
4.4.4.2 Generación de una Malla Conforme…….. 51
4.4.4.3 Colapso General del Modelo……. 51
4.4.4.4 Corrección de Superficies…… 55

CAPÍTULO V Aplicación del software Stampack en la simulación incluyendo el módulo del Springback en una geometría importada real (Parachoques)…… 58
5.1 Herramientas para la simulación del parachoques…….. 58
5.2 Ejecución de la simulación en el parachoques…… 60
5.2.1 Preproceso……. 61
5.2.1 Resultados obtenidos en la etapa de cálculo……..…… 64
5.3 Aplicación del módulo Springback Implícito…….. 67
5.3.1 Pre-proceso de la recuperación elástica…… 67
5.3.2 Cálculo…… 73
5.3.2.1 Calculate……. 73
5.3.2.2 General options……. 74
5.3.3 Post- proceso de la recuperación elástica…… 75

CAPÍTULO VI Análisis de resultados y planteamiento de alternativas…… 82
6.1 Resultados obtenidos en la geometría original del parachoques…… 82
6.1.1 Resultados del post- proceso…… 82
6.1.1.1 Forma final…… 82
6.1.1.2 Desplazamiento…… 83
6.1.1.3 Espesor relativo…… 83
6.1.1.4 Calidad de estampado…… 84
6.1.1.5 Zonas de seguridad…… 85
6.2 Alternativas de solución…… 86
6.2.1 Primera alternativa…… 89
6.2.2 Segunda alternativa.....…… 91
6.3 Resultados obtenidos en la geometría propuesta para la mejora…… 93
6.3.1 Forma final…… 93
6.3.2 Espesor relativo…… 94
6.3.3 Calidad de estampado……..…… 94
6.3.4 Zonas de seguridad…… 95
6.3.5 Desplazamiento…… 95
6.4 Comparación de resultados …… 96
6.4.1 Final Shape (forma final)…… 97
6.4.2 Desplazamiento…… 101
6.4.2.1 Desplazamiento vs Tiempo de la geometría original…… 103
6.4.2.2 Desplazamiento vs Tiempo de la alternativa de solución 105
6.4.3 Espesor Relativo…… 106
6.4.3.1 Espesor Relativo de la geometría original…… 106
6.4.3.2 Espesor Relativo de la alternativa de solución…… 108
6.4.4 Resultados de la zona critica…… 111
6.4.4.1 Espesor Relativo de la geometría original(Nodo 3867)… 111
6.4.4.2 Espesor Relativo de la alternativa de solución(Nodo 5230 114
6.4.4.3 Zona de Seguridad en la geometría original…… 118
6.4.4.4 Zona deSeguridad en la alternativa de solución…… 119

CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…… 121
CONCLUSIONES…….. 121
RECOMENDACIONES…… 123
BIBLIOGRAFÍA……. 125

ANEXOS 127
Anexo A. Simulación del Sringback de un canal estampado.....…… 127
Anexo B. Costos de fabricación……. 132
Anexo C. Plano de mejoras en el troquel…… 137

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso de discretización…… 3
Figura 1.2 Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de los Nodos…….. 4
Figura 1.3 Tipos de nodos……. 8
Figura 1.4 Transformación de la geometría por medio de funciones de interpolación…… 8
Figura 1.5 Elementos con pliegues en el elemento transformado…….. 8
Figura 1.6 Sistema de coordenadas locales (ζ, η, ξ) y sistema global de coordenadas cartesianas (x,y,z)……... 9
Figura 1.7 Integración de Gauss-Legendre de la función f……. 11
Figura 2.1 Herramientas que conforman el proceso de estampado…….. 14
Figura 2.2 Deformación de la chapa…… 15
Figura 2.3 Chapa deformada por el punzón……..... 15
Figura 2.4 Curva esfuerzo-deformación……. 17
Figura 2.5 El módulo de Elasticidad y la constante de Poisson…… 18
Figura 2.6 Diagrama esfuerzo deformación de los metales…… 19
Figura 2.7 Diagrama esfuerzo deformación en función del valor *n* de la ecuación (2.4)……. 20
Figura 3.1 Springback (recuperación elástica)……. 22
Figura 3.2 Compresión y alargamiento durante la dobladura de la Chapa…… 23
Figura 3.3 Curva esfuerzo-deformación……. 24
Figura 3.4 Distribución de las tensiones internas……. 24
Figura 3.5 Distribución de las tensiones internas……. 25
Figura 3.6 Condiciones de equilibrio final……..... 25
Figura 3.7 Esfuerzo deformación en función del radio de curvatura sobrepasado……. 26
Figura 3.8 Esfuerzo - deformación en función del radio de

curvatura insuficiente…… 27
Figura 3.9 Esfuerzo - deformación en función del radio de curvatura para la .recuperación elástica…… 28
Figura 3.10 Tensiones antes de dejar de aplicar la fuerza, y una vez desaparecida la carga en la operación de curvado……. 30
Figura 3.11 Factor de reacción elástica K ……. 31
Figura 3.12 Recuperación elástica…… 32
Figura 3.13 Grilla circular grabada en una chapa para estampado…… 33
Figura 3.14 Deformación de los círculos grabados en la chapa…….. 35
Figura 3.15 Curva límite de formado para un material…….. 35
Figura 4.1 Herramientas del Troquel de Estampado Actual…….. 36
Figura 4.2 Rotura a causa de mayor velocidad de estampado…….. 37
(lado superior del parachoques)
Figura 4.3 Rotura del parachoques debido a la alta velocidad……. … 38
Figura 4.4 Perfil de corte de exceso de material en el estampado……. 38
Figura 4.5 Punzón actual dibujado en el software Solidworks……..... 39
Figura 4.6.a Gradiente de deformación localizado…… 40
Figura 4.6.b Un cuello localizado en la zona 1 por una mayor velocidad de deformación y con una menor velocidad de deformación en la zona 2……... 40
Figura 4.7 Esquema del ensayo de Inland……. 42
Figura 4.8 Geometría original en el programa SOLIDWORKS…….. 44
Figura 4.9 Ejecución del colapso automático…… 45
Figura 4.10 Ingreso al colapso manual del modelo…… 46
Figura 4.11 Importación de IGS……. 46
Figura 4.12 Cuerpo central parachoque.Igs…… 47
Figura 4.13 Lectura de parámetros…….. 47
Figura 4.14 Traducción del formato IGES…… 47
Figura 4.15 Colapso del modelo…… 47
Figura 4.16 Reparación del modelo…….. 48
Figura 4.17 Ventana de información……. 48

Figura 4.18 Vista normal del cuerpo central .Iges……... 48
Figura 4.19 Vista renderizada del cuerpo central .Iges…….. 49
Figura 4.20 Creación de malla…… 49
Figura 4.21 Ventana de información……. 50
Figura 4.22 Ventana de progreso de mallado…… 50
Figura 4.23 Ventana de dialogo……. 50
Figura 4.24 Malla generada…… 51
Figura 4.25 Ventana de dialogo……. 51
Figura 4.26 Ingreso al colapsado general……. 52
Figura 4.27 Ventana de dialogo…….. 52
Figura 4.28 Ingreso a contornos de superficies……. 52
Figura 4.29 Ventana de dialogo……. 53
Figura 4.30 Visualización de contornos……..... 53
Figura 4.31 Cambio del parámetro de tolerancia…… 54
Figura 4.32 Errores en el proceso de mallado……. 55
Figura 4.33 Error localizado a través de la ventana de dialogo…… 55
Figura 4.34 Error localizado para corregirlo……. 56
Figura 4.35 Información de generación de malla exitosa…….. 56
Figura 4.36 Malla conforme de la geometría a simular…… 57
Figura 5.1 Conjunto armado de herramientas para estampado del PARACHOQUES en el software Stampack……. 59
Figura 5.2 Cuerpo Central estampado original…….. 59
Figura 5.3 Diagrama de esfuerzo – deformación …….. 60
Figura 5.4 Conjunto de herramientas en el software Stampack…….. 61
Figura 5.5 Verificación de las normales en la chapa ……. 61
Figura 5.6 Verificación de las normales en la matriz…….. 61
Figura 5.7 Verificación de las normales en el punzón…… 62
Figura 5.8 Mallado de la chapa…….. 62
Figura 5.9 Mallado de la matriz…….. 63
Figura 5.10 Mallado del punzón……. 63
Figura 5.11 Conjunto de herramientas mallado previo a la etapa de

Cálculo…….. 63
Figura 5.12 Conjunto de herramientas después de la etapa de cálculo 64
Figura 5.13 Lista de resultados que se obtienen en la simulación del software Stampack……. 64
Figura 5.14 Forma final de la chapa luego del cálculo del estampado (FINAL SHAPE)……... 65
Figura 5.15 Espesor relativo de la chapa estampada……. 65
Figura 5.16 Probabilidad de rotura de la chapa ……. 66
Figura 5.17 Zonas de seguridad…… 66
Figura 5.18 Zonas de formación de arrugas…… .. 66
Figura 5.19 Deformación de la chapa ……..... 67
Figura 5.20 Vista Renderizada del Modelo en el pre-proceso para Iniciar etapa Springback...……. 67
Figura 5.21 Selección del tipo de Springback……. … 68
Figura 5.22 Ventana para caracterizar al Springback……. 69
Figura 5.23 Ingreso a la selección de nodos para el Springback……. 69
Figura 5.24 Selección de nodos para el Springback…….. 70
Figura 5.25 Selección de grados de libertar para los nodos……. 70
Figura 5.26 Selección de los tres nodos no colineales…….. 71
Figura 5.27 Visualización de los nodos en la geometría…… 72
Figura 5.28 Ejecución del Advanced para modificar parámetros……. 73
Figura 5.29 Definición de parámetros avanzados……... 73
Figura 5.30 Selección de la operación de cálculo……... 74
Figura 5.31 Parámetros de corrido de la simulación……..... 75
Figura 5.32 Ingreso al post- proceso del Springback…….. 75
Figura 5.33 Parachoques deformado…… 76
Figura 5.34 Visualización de la deformación del Springback…… 76
Figura 5.35 Selección de las referencias para la malla de referencia……. 77
Figura 5.36 Visualización antes y después del Springback ……. 78
Figura 5.37 Visualización de la inclinación en los bordes por el Springback…… 78
Figura 5.38 Cortes a realizar a la chapa para mejorar la visualización…… 79

Figura 5.39 Vista de las secciones divididas…… 79
Figura 5.40 Exportación de los cortes a iges…… 79
Figura 5.41 Importación de cortes a iges…….. 79
Figura 5.42 Chapa recuperada elásticamente sobrepuesta con la Matriz……. 80
Figura 5.43 Vista de los cortes que son la recuperación elástica en la chapa en conjunto con la matriz…….. 81
Figura 6.1 Forma final del parachoques…… 82
Figura 6.2 Desplazamiento en el eje Z de la chapa estampada…….. 83
Figura 6.3 Espesor Relativo de la chapa estampada……. 83
Figura 6.4 Zonas de formación de arrugas, estiramientos y Deformaciones……... 84
Figura 6.5 Zonas de posible falla del material (Vista izquierda)……..... 85
Figura 6.6 Zonas de posible falla del material (Vista derecha)……. 85
Figura 6.7 Variación de espesores en la geometría original…… 87
Figura 6.8 Pisador Ondulado…… 90
Figura 6.9 Troquel con el pisador nuevo…… 90
Figura 6.10 Troquel de estampado modificado (Placas en el pisador)…..... 92
Figura 6.11 Troquel de estampado modificado (Placas en la matriz)…… 92
Figura 6.12 Forma final de la geometría…… 93
Figura 6.13 Espesor Relativo de la chapa estampada propuesta ……. … 94
Figura 6.14 Zonas de formación de arrugas, estiramientos y deformacione 94
Figura 6.15 Posible falla del material en la geometría planteada…… 95
Figura 6.16 Desplazamiento total de la geometría planteada…… 95
Figura 6.17 Corte del exceso de material e la Geometría Original……. 98
Figura 6.18 Cara plana del Parachoques Terminado.…… 98
Figura 6.19 Altura H en la cara lateral del Parachoques Terminado…..… 98
Figura 6.20 Geometría de solución……. 99
Figura 6.21 Recorrido del punzón en una prensa real y en un el software Stampack…… 101
Figura 6.22 Desplazamiento total de la geometría original…..…… 101
Figura 6.23 Desplazamiento total de la alternativa de solución…..…… 101
Figura 6.24 Geometrías vs. Desplazamiento del punzón durante el

estampado……... 102
Figura 6.25 Posición del Nodo 5422…… 103
Figura 6.26 Curva Desplazamiento en x, y *y* z vs Tiempo del Nodo 5422 103
Figura 6.27 Posición del Nodo 5850……. 105
Figura 6.28 Curva Desplazamiento en x, y *y* z vs Tiempo……..… 105
Figura 6.29 Espesores relativos en la geometría original …… 106
Figura 6.30 Curva Espesor Relativo vs Desplazamiento en x, y *y* z…… 107
Figura 6.31 Espesores relativos en la alternativa de solución……... 108
Figura 6.32 Curva Espesor Relativo vs Tiempo……..…… 109
Figura 6.33 Curva Espesor Relativo vs Desplazamiento en x,y,z…… 109
Figura 6.34 Espesor relativo máximo vs. Nodos de comparación…… 110
Figura 6.35 Espesor relativo mínimo vs. Nodos de comparación…… 111
Figura 6.36 Posición del Nodo 3867…… 112
Figura 6.37 Curva Espesor Relativo vs Tiempo…… 112
Figura 6.38 Curva Espesor Relativo vs Desplazamiento en x, y *y* z…….. 113
Figura 6.39 Espesores relativos en la alternativa de solución…… 114
Figura 6.40 Curva Espesor Relativo vs Tiempo……..…… 115
Figura 6.41 Curva Desplazamiento en x,y,z vs Tiempo……. 116
Figura 6.42 Espesor Relativo vs Desplazamiento en x, y y z……. 117
Figura 6.43 Zona de seguridad en la geometría original (Nodo 3867)…… 118
Figura 6.44 Zona de seguridad en la alternativa de solución (Nodo 5230)…… 119

SIMBOLOGÍA

e	Elemento finito
u	Desplazamientos de cualquier punto del elemento
i,j,k	Coordenadas nodales
a^e	Vector formado por los desplazamientos nodales de los elementos
$\mathbf{a_i}$	Desplazamientos del nodo i
ε	Deformaciones
S	Operador lineal
ε_0	Deformaciones iniciales
σ_0	Tensiones y deformaciones.
q_i^e	Fuerzas que actúan sobre los nodos
K	Matriz de rigidez
ζ, η, ξ	Coordenadas locales
x,y,z	Coordenadas cartesianas
σ	Esfuerzo aplicado
ε	Deformación ocurrida en un material
E	Modulo de elasticidad
l	Deformación transversal
m	Deformación longitudinal
v	Constante de Poisson
K	Coeficiente de resistencia o coeficiente de endurecimiento por deformación
Θf	Angulo final de estampado
Θo	Angulo inicial de estampado
Ro	Radio inicial de estampado
Rf	Radio final de estampado
e_t	Alargamiento de dobladura
e_s	Recuperación elástica del material
e_r	Alargamiento residual

e_r/e_t	Factor de formabilidad
r_i	Radio exterior de doblado
s	Espesor de la chapa
$\boldsymbol{\sigma_z}$	Esfuerzo de tracción
$\boldsymbol{\sigma_d}$	Esfuerzo de compresión
r_m	Radio de curvatura basado en el tamaño de la herramienta
σ_s	Esfuerzo correspondiente al límite de resistencia a la tracción
h	Espesor de la película de lubricante
Ra	Rugosidad de la chapa
μ	Coeficientes de fricción

RESUMEN

El presente proyecto abarca el análisis mediante el software de elementos finitos Stampack en el proceso de estampado de un parachoques, con el fin de obtener información que sirva de guía para la realización de mejoras en el troquel de estampado actual.

En el primer capítulo se hace una introducción a la teoría de los elementos finitos, se analiza las ventajas que tienen respecto a los métodos de cálculo tradicionales, se hace una introducción a la utilización de las computadoras para el cálculo y se establecen las etapas necesarias que se deben seguir para elaborar una simulación utilizando equipos computacionales y software basado en el método de los elementos finitos.

En el segundo capítulo se hace un estudio de las fundamentos de la conformación plástica de la chapa metálica, se analiza las propiedades mecánicas de los materiales, se define la conformabilidad y se describen las herramientas que son necesarias para un proceso de estampado.

En el tercer capítulo se hace un estudio de la teoría de la recuperación elástica de los materiales, se establecen unas sencillas ecuaciones para determinar el factor de la recuperación elástica, luego se establece ecuaciones que nos permiten calcular el radio máximo de doblado de un material. Se define el límite de conformabilidad del material y se explica brevemente como se obtiene la curva de conformabilidad de la chapa metálica utilizando la técnica de la grilla circular.

En el cuarto capítulo se explica la forma en la que se debe importar un archivo de un programa CAD hacia el software Stampack. Se empieza describiendo el problema del estampado del parachoques y se muestra el diseño del parachoques elaborado en un software de diseño como el Solidworks, se parte de la geometría creada en Solidwoks y se generan superficies que son guardadas con extensión IGES para luego importar al software Stampack, se describe como

se deben corregir las superficies importadas hasta obtener una superficie para el mallado conforme.

En el capítulo cinco se describen la etapa de preproceso, cálculo y postproceso del software Stampack aplicada a la geometría del parachoques, se empieza por crear las capas(layers) que servirán para crear las herramientas de la simulación del estampado, se verificaran que tenga un mallado conforme y se define el problema de estampado para posteriormente entrar en la etapa de introducción de los parámetros de cálculo del estampado, se muestran de manera general los resultados que entrega el software Stampack y finalmente se describe los pasos para realizar la simulación de la recuperación elástica de una chapa metálica estampada.

En el capítulo seis se hace un análisis detallado de los resultados de la simulación, se escogen nodos en las zonas más críticas, se determinan las zonas de deformación, las curvas de deformación y desplazamiento en función del tiempo de estampado con el objetivo de determinar la causa de la falla del estampado en el diseño original, a continuación se plantean dos alternativas de solución al problema encontrado y se realiza la simulación del estampado de la alternativa viable, se obtienen los resultados y se comparan con los nodos ubicados en las mismas zonas de deformación del parachoques original para finalmente comparar sus deformaciones.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones recopiladas durante el desarrollo de este proyecto.

PRESENTACIÓN

En el Ecuador la producción metalmecánica se encuentra en un proceso de desarrollo, las empresas tienen que competir en el mercado Latinoamericano ante países como Brasil, Colombia y Venezuela, dichos países cuentan con métodos de diseño de partes de equipos y estructuras para vehículos a través de software de simulación y como consecuencia los costos de diseño son mas bajos.

El proceso de construcción de una matriz para estampado de chapas metálicas, en las empresas ecuatorianas, se realiza primero a través de software de diseño paramétrico y se procede a la elaboración de las cavidades en un centro de mecanizado CNC, de esta manera no es posible saber si la forma que tomará la chapa en el momento de realizar el estampado cumplirá con los requerimientos tanto en forma como en seguridad ya que se tiene casos en que la chapa estampada luego de ser retirada de la matriz se rompe debido a múltiples causas desconocidas.

En consecuencia surge la necesidad de realizar la simulación del proceso de estampado de la chapa metálica en un software de elementos finitos con la finalidad de obtener la información necesaria para la posterior elaboración de la matriz para el estampado real.

Las simulaciones del estampado permiten utilizar diferentes parámetros para un mismo modelo, con lo cual se puede llegar a determinar la mejor forma de realizar el estampado.

El presente proyecto es una referencia para que las industrias del Ecuador que se dedican a la producción de partes estampadas busquen apoyo en la universidad para poder mejorar sus proyectos y la imagen ante sus clientes.

CAPÍTULO I

EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es un método de cálculo numérico avanzado el cual permite obtener una aproximación de la solución de un problema de contorno que se resuelve por medio de ecuaciones matriciales, las ecuaciones planteadas son generalizadas a través de sistemas discretos (estructuras) o continuos (formas), que caracterizan el comportamiento físico de diversos problemas de ingeniería en una serie de subdominios no intersecantes entre si denominados elementos finitos; el conjunto de estos forma una partición del dominio denominada discretización.

Dentro de cada elemento se distingue una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, y un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos, el conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla.

Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas generadores de mallas que relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales, la matríz de dicho sistema de ecuaciones se llama matríz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Sistemas discretos.- Divididos de forma natural y claramente definidos como el análisis de estructura de un edificio en la que cada viga constituye una entidad aislada bien definida

Sistemas continuos.- No pueden ser divididos en forma natural en unidades simples, por lo que su análisis resulta mucho más complejo.

Los elementos transformados son continuos cuando están engendrados por elementos generatrices cuyas funciones de forma satisfacen las condiciones de continuidad.[1]

El Método de los Elementos Finitos, se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y posteriormente a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de Mecánica de Sólidos o más generalmente de un problema de Mecánica de Medios Continuos.

En el cálculo estructural, el Método de Elementos Finitos (M.E.F.) puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad en un problema en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (nodos). Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas para pasar a ser los valores de dichas funciones en un número finito de puntos.

El M.E.F. supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento, en los que se subdivide queda definido por un número finito de parámetros (grados de libertad) asociados a los puntos que en dicho momento se une al resto de los elementos de su entorno (nodos).

Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de interpolación.

El M.E.F. a pesar de ser un método aproximado desde múltiples perspectivas como: discretización, interpolación y utilización de métodos numéricos, es una herramienta muy útil que permite realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas difíciles de resolver por métodos analíticos clásicos; permitiendo una aproximación de la forma real a través de un modelo numérico que permite la resolución del problema. Los diversos coeficientes del

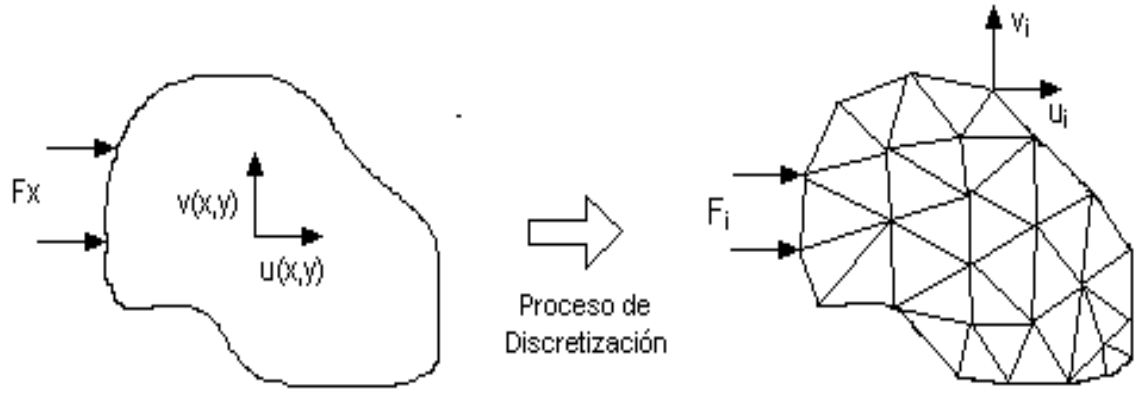
[1] **FUENTE:** UTecNoticias Número 9 - Elementos finitos en ingeniería práctica.htm

modelo son automáticamente calculados por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento.

La discretización correcta depende de diversos factores como el tipo de información que se desea extraer del modelo o tipo de solicitación aplicada.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

- El elemento continuo se divide en un número finito de partes denominadas elementos donde su comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados "nodos". Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.



Modelo continúo Modelo discreto

Figura 1.1 Proceso de discretización.

El M.E.F, por tanto se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización

del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

1.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO

El MEF se puede entender, desde un punto de vista estructural como una generalización del cálculo matricial de estructuras al análisis de sistemas continuos. De hecho el método nació por evolución de aplicaciones a sistemas estructurales.

Un elemento finito **e** viene definido por sus nodos (i,j,m) y por su contorno formado por líneas que los unen. Los desplazamientos **u** de cualquier punto del elemento se aproximan por un vector columna en la ecuación1.1:

$$\vec{u} = \sum N_i a_i^e = \left[Ni\,, Nj \ldots\ldots \right] \cdot \begin{pmatrix} \vec{a}_i \\ \vec{a}_j \\ \ldots\ldots \end{pmatrix} = Na^e \qquad (1.1)$$

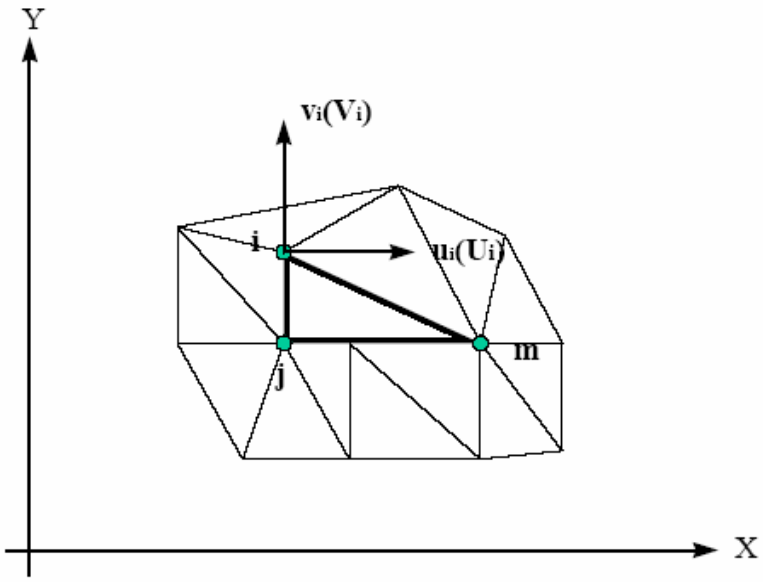


Figura 1.2 Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de los nodos

N son las funciones de posición o funciones de forma y a^e es un vector formado por los desplazamientos nodales de los elementos considerados.

En el caso de un plano bidimensional:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix}, \qquad u = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \tag{1.2}$$

u: son los movimientos horizontal y vertical en un punto cualquiera del elemento.

$\mathbf{a_i}$ = son los desplazamientos del nodo i.

Las funciones Ni, Nj, Nm, han de escogerse de tal forma que al sustituir en la ecuación 1.2 las coordenadas nodales, se obtengan los desplazamientos nodales.

Conocidos los desplazamientos de todos los puntos del elemento, se pueden determinar las deformaciones (ε) en cualquier punto, las mismas que están dadas por la relación:

$$\varepsilon = Su \tag{1.3}$$

Siendo S un operador lineal adecuado y reemplazando la expresión 1.2 en 1.3 se obtiene las expresiones siguientes:

$$\varepsilon = Ba \tag{1.4}$$

$$B = SN \tag{1.5}$$

Suponiendo que el cuerpo esta sometido a unas deformaciones iniciales ε_0 debidas a cambios externos como de temperatura, cristalización y σ_0 y debido a tensiones y deformaciones iniciales, entonces tenemos:

$$\sigma = D(\varepsilon_0 - \varepsilon) + \sigma_0 \tag{1.6}$$

Donde D es una matríz de elasticidad que contiene las propiedades del material.

Las fuerzas q_i^e actúan sobre los nodos que son estáticamente equivalentes a las tensiones en el contorno y a las fuerzas distribuidas q_j^e que actúan sobre el material.

$$q^e = \begin{Bmatrix} q_i^e \\ q_j^e \\ .... \end{Bmatrix} \tag{1.7}$$

Cada fuerza debe tener el mismo número de componentes que el desplazamiento nodal a_i y a_j correspondientemente y debe ordenarse en las direcciones adecuadas.

En el caso de tensión plana (fuerzas generadas en un solo plano en diferentes direcciones) las fuerzas nodales son:

$$q_i^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \end{Bmatrix} \tag{1.8}$$

Las fuerzas distribuidas *B* son las que actúan por unidad de volumen en direcciones correspondientes a los desplazamientos *u* en este punto. La relación entre las fuerzas nodales y tensiones en el contorno y fuerzas distribuidas se determina por:

$$q_i^e = \int_{V^e} B^T \sigma . dV - \int_{V^e} N^T b . dV \tag{1.9}$$

V^e: es el volumen del elemento e.

Esta expresión es válida con carácter general cualesquiera que sean las relaciones entre tensiones y deformaciones. Si las tensiones siguen una ley lineal como en 1.8, puede reescribir la ecuación de la siguiente forma:

$$q_i^e = K^e a^e + f^e$$

$$K^e = \int_{V^e} B^T D B . dV$$

$$f^e = \int_{V^e} N^T b . dV - \int_{V^e} B^T D \varepsilon_o . dV + \int_{V^e} B^T \sigma_o . dV \tag{1.10}$$

En la expresión de f^e aparecen las fuerzas debidas a las fuerzas distribuidas, las deformaciones iniciales y las tensiones iniciales.

K: es la matríz de rigidez.

Si existen fuerzas t distribuidas uniformemente alrededor de la superficie, se debe añadir un término adicional a las fuerzas nodales del elemento, cuyo contorno posee una superficie A^e.

$$-\int_{A^e} N^T t.dA \qquad (1.11)$$

Para que la expresión sea válida t es igual en valor al número de movimientos u, obteniendo los desplazamientos nodales, por resolución de las ecuaciones, entonces se puede calcular las tensiones en cualquier punto del elemento.

1.3 FUNCIONES DE FORMA

Las funciones de forma son la interpolación con la que se consigue reducir el problema a la determinación del corrimiento de nodos en cualquier punto del elemento, es un elemento clave de MEF.

1.3.1 TIPOS DE FUNCIONES DE FORMA

En un elemento puede existir tres tipos de nodos:

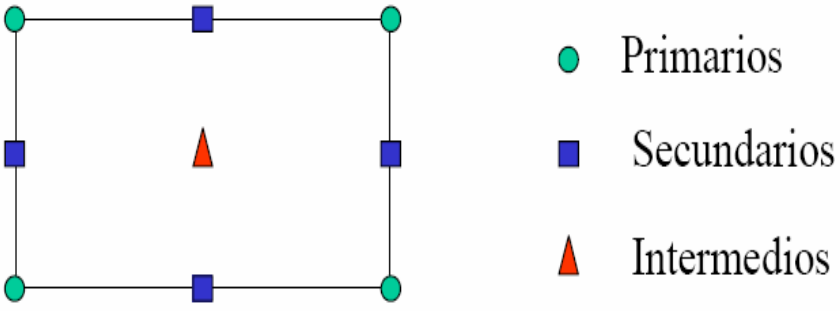


Figura 1.3 Tipos de nodos[2]

[2] **FUENTE:** E. Oñate. "Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos".CIMNE, Barcelona. 1995

Según el tipo de nodos las funciones de forma se dividen en dos grupos:

1. Serendípidas.- En las que solo existen nodos de frontera primarios y secundarios.
2. Lagrangianas.-Son los nodos intermedios.

Se puede obtener elementos de lados curvos a partir del empleo de funciones de interpolación de tipo geométrico consiguiendo un mejor ajuste de los elementos a la geometría del cuerpo.

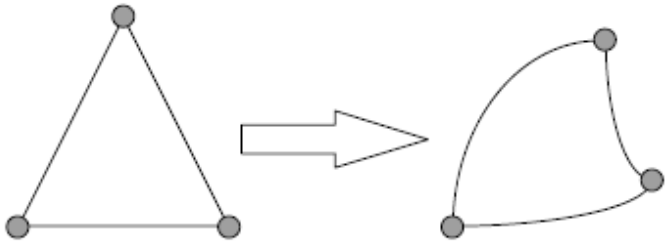


Figura 1.4 Transformación de la geometría por medio de funciones de interpolación

Si las funciones de forma N empleadas son tales que la continuidad de los movimientos **u** se mantiene en las coordenadas del elemento generatriz, las condiciones de continuidad se satisfacen entonces en los elementos distorsionados.

Las transformaciones deben ser univocas, es decir, a cada punto del sistema le debe corresponder un único punto del sistema curvilíneo y viceversa, por lo que no pueden existir elementos con pliegues, huecos, ni solapes entre los elementos transformados.

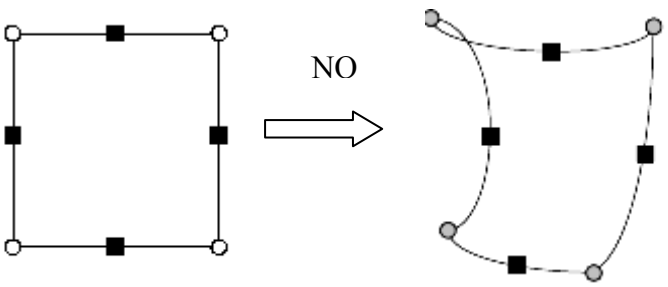


Figura 1. 5 Elementos con pliegues en el elemento transformado

Las funciones de forma tienen por tanto tres objetivos principales dentro del MEF.

1. Obtener resultados en cualquier punto del elemento por interpolación de los valores nodales
2. Permitir transformaciones geométricas que permiten adaptar el mallado a la forma del cuerpo analizado de una manera más exacta
3. Realizar la integración de las ecuaciones mediante la sustitución de las funciones elementales por polinomios de Legendre.

Estas funciones deben cumplir con propiedades de:

- Derivabilidad,
- Integración numérica,
- Semejanza con las leyes de distribución de corrimientos,
- Condición de polinomio completo (si la función de forma escogida es polinómica).

1.4 INTEGRACIÓN NUMÉRICA

Las transformaciones curvilíneas transforman las coordenadas x,y,z a las coordenadas locales ζ, η, ξ; por lo que cambian las variables en las ecuaciones integrales que describen los comportamientos de los elementos.

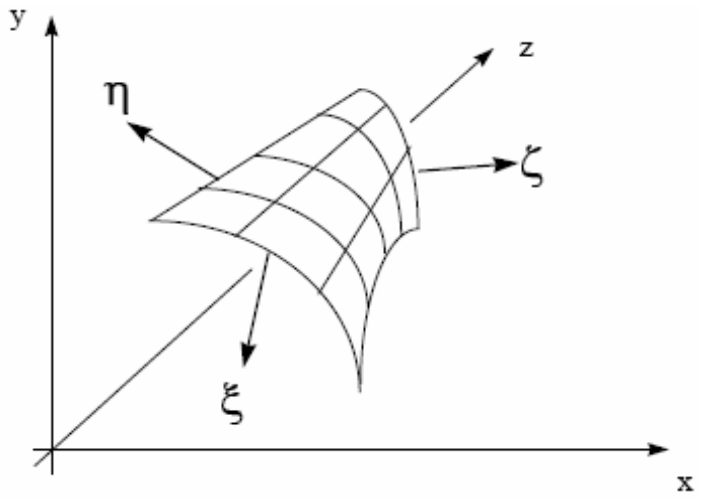


Figura 1.6 Sistema de coordenadas locales (ζ, η, ξ) y sistema global de coordenadas cartesianas (x,y,z)

Las derivadas de las funciones de forma que intervienen en la expresión de *B* son respecto a las coordenadas cartesianas que guardan relación con la ec (1.11) respecto a las coordenadas locales. [3]

$$K^e = \int_{V^e} B^T .dB.dV$$

$$f_b^e = -\int_{V^e} N^T b.dV \qquad f_\sigma^e = -\int_{V^e} B^T \sigma_o .dV$$

$$f_\varepsilon^e = -\int_{V^e} B^T D\varepsilon_o .dV \qquad f_t^e = -\int_{A^e} N^T t.dA$$

$$\frac{\partial N_j}{\partial x_i} = \left[J\right]^{-1} \frac{\partial N_j}{\partial \zeta_i} f_\varepsilon^e \qquad (1.12)$$

Donde J es la matríz Jacobiana de la transformación

$$\left[J\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \xi} \end{bmatrix} \qquad (1.13)$$

Donde los diferenciales de volumen en el sistema de coordenadas local es:

$$dx.dy.dz = \det\left[J\right] d\zeta .d\eta .d\xi \qquad (1.14)$$

[3] **FUENTE:** E. Oñate. "Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos".CIMNE, Barcelona. 1995

Esta integración es más sencilla que en el cartesiano donde los dominios se distorsionan, pero se debe tener en cuenta que el resultado de final de la matríz **J** puede presentar problemas si esta mal condicionado teniendo en cuenta que es laboriosa, además una mala discretización puede que det(J) resulte próximo a cero por lo que la solución no seria posible.

La integración del polinomio se realiza a través de una suma de los valores de la función en estos puntos de Gauss.

$$\int_a^b f(x).dx \approx \int_a^b P(x).dx \qquad (1.15)$$

El método mas empleado para sustituir la función por un polinomio es la cuadratura de Gauss- Legendre. El método permite integrar cualquier función entre -1 y +1, reemplazando la función a integrar f(x) por un polinomio de 2n-1. Tomando como base los n puntos de Gauss se puede obtener un valor tan aproximado como se desee.[4]

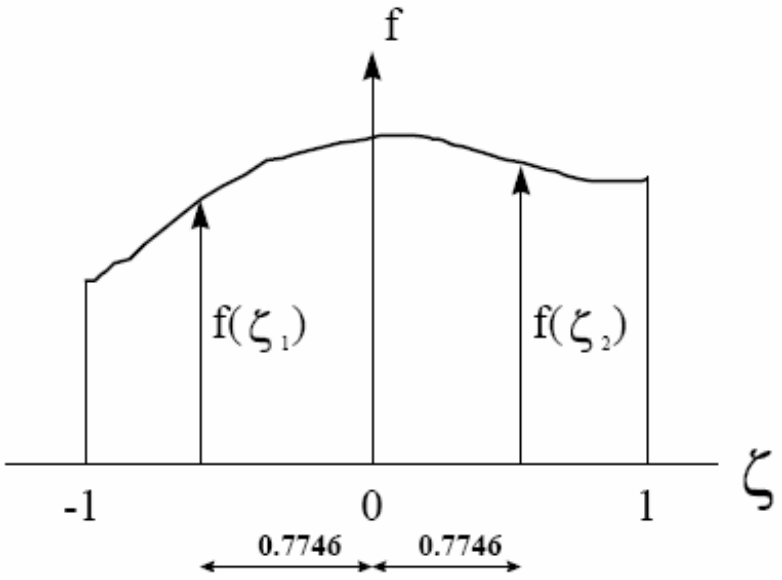


Figura 1.7 Integración de Gauss-Legendre de la función f

[4] **FUENTE:** APLICACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Eduardo Frías Valero, UPC, 1994.

Los puntos de Gauss son óptimos para la evaluación de tensiones y deformaciones, en otros puntos del elemento la aproximación puede ser errónea.

1.5 MALLADO O DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

La discretización espacial, es decir, la generación de la malla es un paso fundamental para la resolución de problemas reales de ingeniería mediante el método de los elementos finitos. Con frecuencia se trata de la fase más tediosa del cálculo. Además, la calidad de la malla tiene una influencia directa en la precisión y el coste computacional del análisis.

La generación de mallas triangulares está ampliamente desarrollada. Sin embargo, en algunas aplicaciones es preferible trabajar con elementos cuadriláteros. El algoritmo se basa en tres ideas básicas:

1.- La división recursiva del dominio hasta conseguir triángulos o cuadriláteros del tamaño deseado;

2.- La colocación de nodos en las líneas recién generadas mediante una interpolación lineal del tamaño deseado;

3.- El suavizado global para minimizar la distorsión de los elementos.

1.6 FUNCIONAMIENTO DE UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA SIMULACION DE ESTAMPADO

Un programa de cálculo por elementos finitos tiene tres etapas a seguir:

1. **Pre – proceso**: Se prepara el modelo para el cálculo, donde se realiza:

- El dibujo del modelo o importación si se ha generado por medio de un sistema CAD.
- Selección de los componentes a emplear en la simulación (matríz, punzón, chapa, pisador y frenos si es necesario).
- Selección de los materiales y asignar propiedades a los diferentes componentes del modelo.

- Mallado de los componentes del modelo.
- Aplicación de las cargas exteriores (puntuales, lineales o superficiales).
- Aplicaciones de las condiciones de contorno del modelo.

2. **Cálculo.-** El programa realiza y genera las soluciones de la siguiente manera:

- Selección del tipo de cálculo a realizar
- Configuración de los parámetros de cálculo (intervalos de tiempo, norma de error, etc.)
- Inicio del cálculo, el programa empieza transfiriendo las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, la triangulación de la matríz y resuelve el sistema de ecuaciones generando la solución.

3. **Post-proceso**.- Permite observar la representación gráfica de los resultados; en una simulación de estampado se pueden obtener resultados como: la forma final de la chapa, los desplazamientos, las zonas en las que el doblado es más severo, las deformaciones principales mayores en la chapa, las deformaciones principales menores en la chapa, la posición relativa del estado de deformaciones respecto a la curva FLC, la calidad del estado de deformaciones del material, las marcas debido al rozamiento entre la chapa y la herramienta, el esfuerzo al que se somete el material en la superficie de la chapa.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DE LA CONFORMACION PLASTICA DE CHAPAS METALICAS

2.1 CONFORMABILIDAD

La conformabilidad es una propiedad importante en las chapas de acero utilizadas para envases de gaseosas, paneles de automóviles, cubiertas de electrodomésticos, etc. La conformabilidad no puede definirse en función de una única propiedad del material, ya que depende del proceso de conformado en particular, como por ejemplo el embutido profundo (Deep-drawing), el tenso-estampado (Stretch-forming); y del espesor de la chapa.

El tenso-estampado (Stretch-forming) se utiliza en la fabricación de paneles de carrocerías de automóviles. A diferencia del embutido profundo, la chapa está sujeta por columnas de retención (pisadores o prensachapas), para que no se incruste en la matríz y no se formen arrugas. Es importante que la chapa logre una deformación por alargamiento y un estrechamiento uniforme.

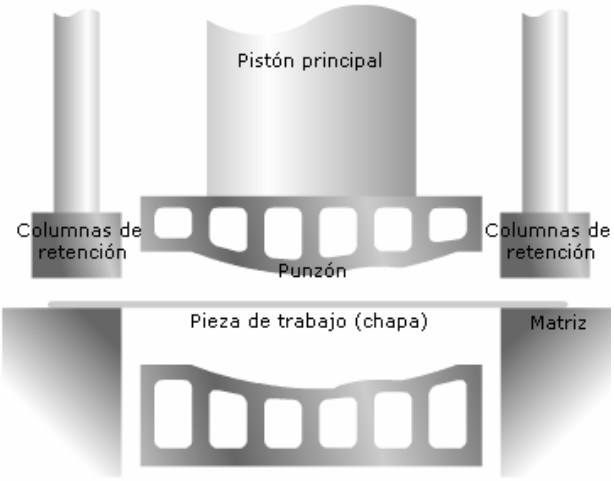


Figura 2.1 Herramientas que conforman el proceso de estampado

Durante el tenso-estampado, la chapa de acero es expuesta a una combinación de deformaciones elásticas y plásticas.

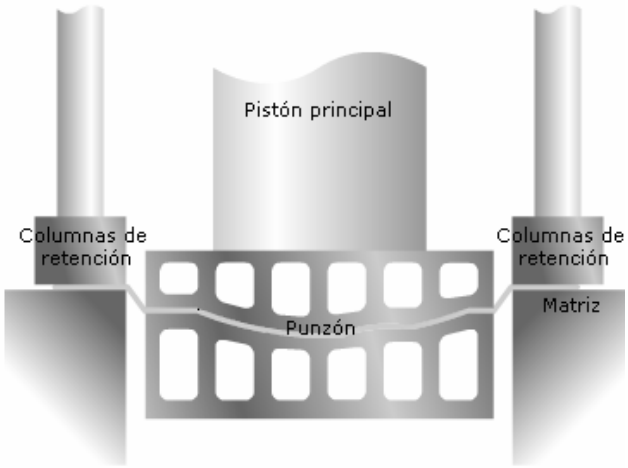


Figura 2.2 Deformación de la chapa

Cuando la chapa es descargada, la componente plástica de la deformación se mantiene. Sin embargo, el componente elástico tiende a neutralizarse. Esta recuperación de la deformación es lo que se conoce como Springback (efecto resorte).

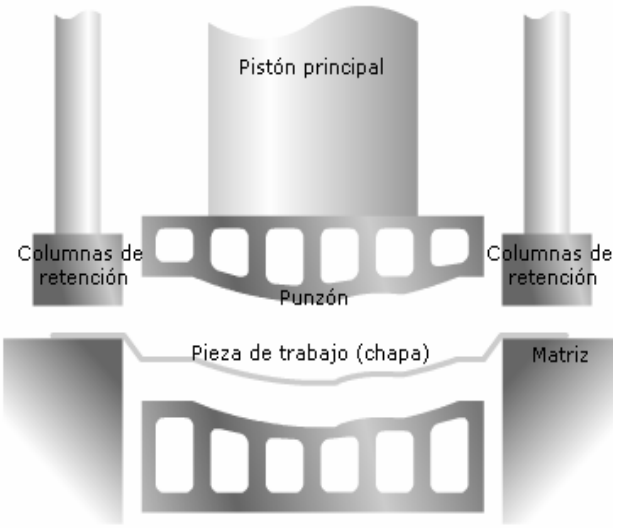


Figura 2.3 Chapa deformada por el punzón

Un cuerpo perfectamente plástico tiene la propiedad de fluir, bajo la acción de diversos esfuerzos desiguales, ejercidos en distintas direcciones, semejantes a los líquidos. Solamente en virtud de esta propiedad es posible deformar convenientemente los metales sometidos a procedimientos tales como el estampado y la extrusión[5].

[5]**FUENTE:** LOPEZ Navarro, Troquelado y Estampación

2.2 DEFORMACIÓN DE LOS METALES

2.2.1 DEFORMACIÓN

Es el cambio y variación de dimensiones y forma debido a fuerzas exteriores del elemento estructural. La deformación de un cuerpo depende de la fuerza deformante y del tipo y calidad del material.

Las deformaciones se clasifican de dos formas: dependiendo de las cargas exteriores y de donde se las aplica.

2.2.2 DEFORMACIÓN ELÁSTICA

La deformación subsiste mientras está presente la carga deformante, es reversible porque el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que la provoca la deformación. En este tipo de deformación el sólido al variar su estado tensional y aumentar su energía interna en forma de energía potencial elástica solo pasa por cambios termodinámicos reversibles.

2.2.3 LÍMITE ELÁSTICO

Es el valor máximo de la fuerza aplicada para que la deformación sea elástica y una vez superado el límite elástico aparecen deformaciones plásticas.

2.2.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Es la relación entre el esfuerzo aplicado y la correspondiente deformación ocurrida en un material. Esta relación es la expresión analítica de la ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad (2.1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo aplicado (kg/cm2, Psi)

ε = Deformación del material

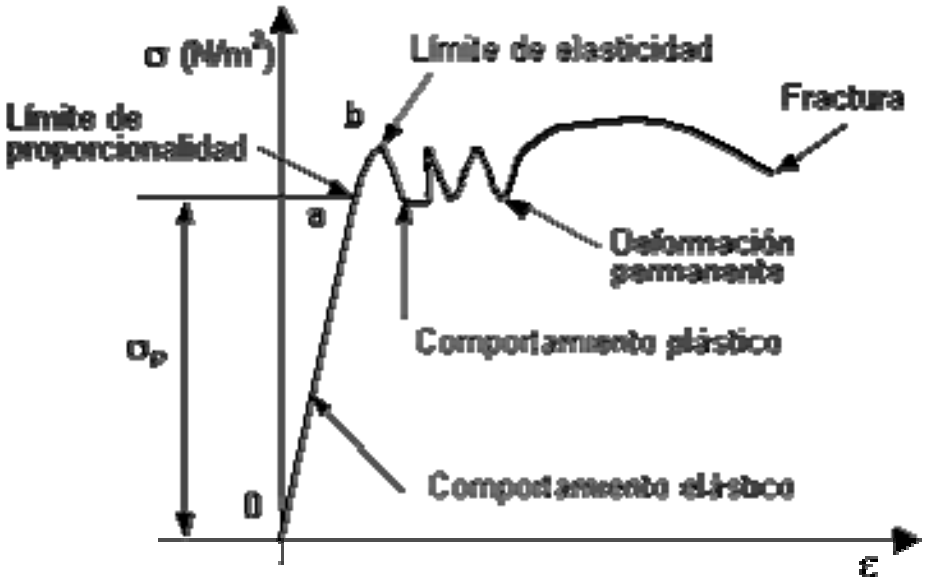


Figura 2.4 Curva esfuerzo-deformación

De **0** hasta **a**, se llama recta de Hooke.

De **0** hasta **b**, aun cuando se descarga la pieza recupera su longitud original, el material es elástico.

2.2.5 CONSTANTE DE POISSON

Es la razón entre la deformación transversal y la deformación longitudinal.

$$\frac{I}{m} = \frac{Deformaciòn\ Transversal}{Deformaciòn\ longitudinal} \qquad (2.2)$$

El valor de m varia generalmente entre $3I$ y $4I$ y la relación I/m es aproximadamente ¼ para muchos metales.

El módulo de Elasticidad y la constante de Poisson son obtenidos en ensayos uniaxiales de tracción o compresión y relacionan la deformación elástica longitudinal con la deformación elástica que ocurre simultáneamente en sentido transversal.

$$E = \frac{d\sigma_a}{d\varepsilon_a},$$

$$v = \frac{de_r}{d\varepsilon_a} \qquad (2.3)$$

Para materiales ideales e incompresibles v = 0,5; para materiales reales varia desde 0,25 hasta 0,5.

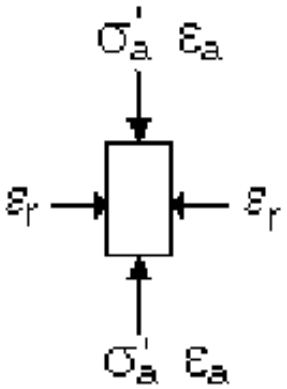


FIGURA 2. 5 El módulo de Elasticidad y la constante de Poisson

2.3 DEFORMACIÓN PLÁSTICA

En la deformación plástica quedan presentes en el cuerpo aunque se retiren las cargas deformantes y el material no puede recuperar completamente sus dimensiones originales. Durante la deformación plástica, los átomos del metal son desplazados permanentemente de sus posiciones originales para tomar unas nuevas.

La capacidad de algunos metales de ser deformados plásticamente en gran extensión sin sufrir fractura, es una de las propiedades más útiles de los metales en ingeniería.

La deformabilidad plástica del acero posibilita que: partes del automóvil tales como PARACHOQUES, cubiertas y puertas sean troqueladas mecánicamente sin romperse el metal.

Un material es tanto más dúctil cuanto más extendido es su diagrama σ - ε en el sentido del eje ε.

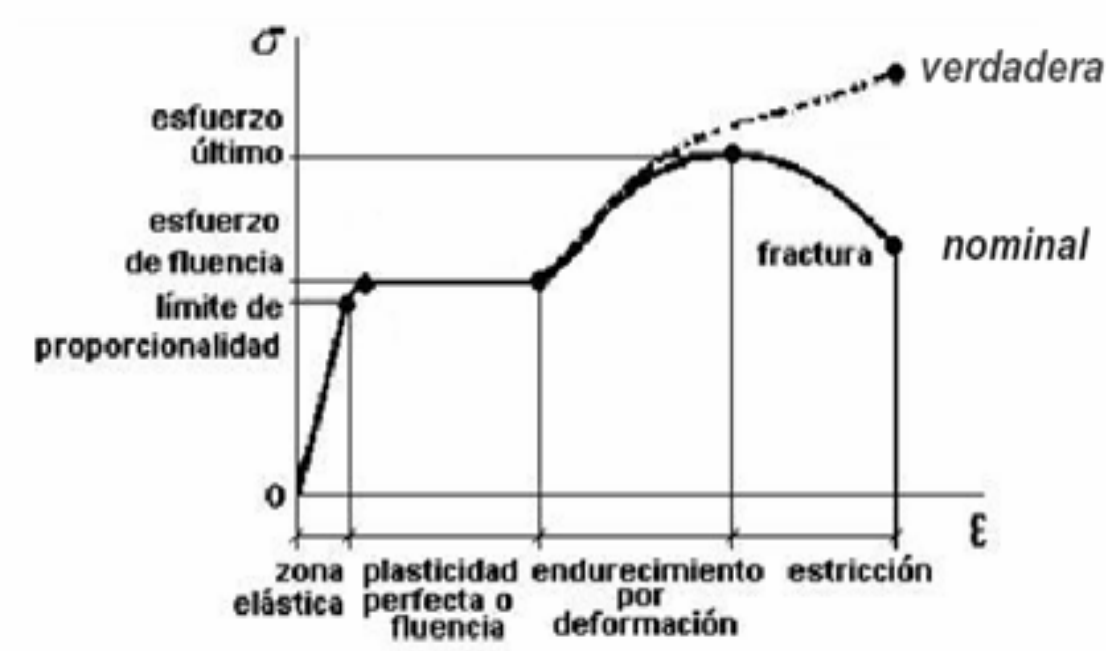


Figura 2.6. Diagrama esfuerzo deformación de los metales

Hollomon sugiere que la región plástica se puede describir aproximadamente por la ecuación[6]:

$$\sigma = K\epsilon^{n} \qquad (2.4)$$

Donde:

σ = esfuerzo real

K=coeficiente de resistencia o coeficiente de endurecimiento por deformación,

Є = deformación plástica real,

n = exponente para el endurecimiento por deformación.

La medida más apropiada de conformabilidad para el tenso-estampado es el exponente de endurecimiento por deformación o valor “n”. Se recomienda un valor bajo de “n” si la chapa debe tener una buena conformabilidad de alargamiento.

[6] **FUENTE**:SHIGLEY, Manual de Diseño Mecánico, Tomo I, 1989

Los materiales para la deformación en chapas metálicas deben ser isotrópicos, es decir, que se deforma por igual como el acero donde su estructura cristalina es cúbica y tienen iguales propiedades en todas las direcciones; a diferencia del hierro fundido que es un material cristalino pero anisotrópico que es pésimo si se somete a fuerzas deformantes.

A medida que aumenta la resistencia de los materiales disminuye la deformación específica y por lo tanto su ductilidad, por lo que el material va ganando en fragilidad.

La maleabilidad como propiedad de los materiales, específicamente metálicos, constituye en realidad una fase de la ductilidad.

Las chapas de acero laminadas en caliente tienen valores de n ~ 0,1, mientras que las chapas de acero de bajo carbono laminadas en frío y tratadas con aluminio presentan valores n de 0,2 - 0,25.

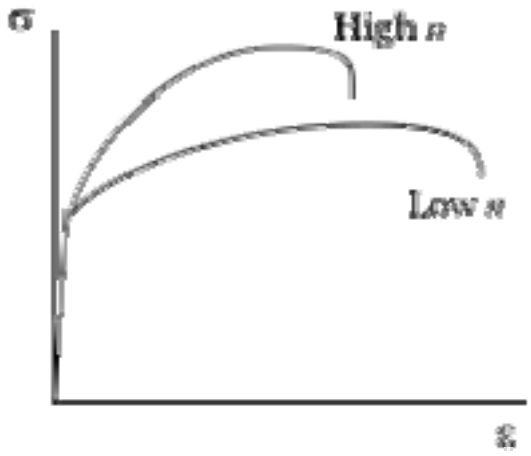


Figura 2.7 Diagrama esfuerzo deformación en función del valor *n* de la ecuación (2.4)

CAPÍTULO III
TEORIA DE LA RECUPERACION ELÁSTICA (SPRINGBACK)

Al conformar piezas de acero por estampado, como el panel de un guardachoque, este se deforma para adquirir la conformabilidad deseada por medio de una combinación de deformaciones elásticas y plásticas.

La chapa en el proceso de estampado mientras es descargada, la componente plástica de la deformación se mantiene; sin embargo, la componente elástica tiende a neutralizarse. Esta recuperación de la deformación es lo que se conoce como **Springback** (efecto resorte o recuperación elástica).

El grado del Springback es muy difícil de calcular ya que depende de:

- la resistencia del acero;
- el espesor del material;
- el ángulo de plegado;
- el radio de la matríz;
- la separación entre la matríz y el punzón;
- las condiciones de lubricación.

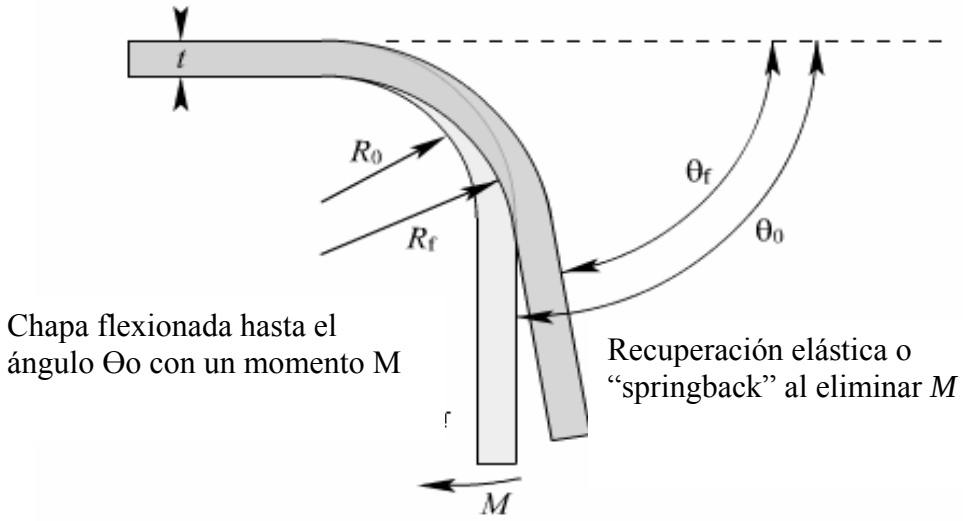
La recuperación elástica en el estampado de chapas metálicas, es importante analizar, para tener una idea de la forma final de la pieza que se estampa.

Para realizar el Springback, es necesario tener los resultados de la etapa de estampado, caso contrario no es posible realizar el cálculo de la recuperación elástica.

Las diferentes durezas del material que se trabaja dan lugar a un comportamiento distinto durante la operación de conformado. Principalmente al realizar curvados en ángulo recto, las piezas muestran una tendencia a volver de nuevo a su forma inicial. Es por ello que las piezas se curvan hasta una medida que sobrepasa a la

que se desea, de tal forma que, al reaccionar, quedan con el ángulo de curvado exacto.

En general este fenómeno viene determinado por el cambio de los ángulos Θf y el radio Rf, que tiene lugar durante el estampado. Fig. 3.1



Coeficiente de "springback" = Θf / Θo
(Recuperación elástica), $K = (Ro + t/2)/(Rf + t/2)$

Figura 3. 1 Springback (recuperación elástica)

Cuando se incrementa la resistencia del acero y se reduce el espesor del material para lograr un panel más liviano, también es necesario modificar la geometría del punzón y de la matríz e incrementar el ángulo de conformado de aquellos utilizados para un fleje de acero de mayor espesor y menor resistencia.

Al diseñar la matríz y el punzón de conformado este efecto debe ser tomado en cuenta para lograr que la deformación final sea adecuada, ya que la recuperación elástica sobreviene cuando se retira la carga que se había aplicado al material para conformarlo.

Cada una de las fibras longitudinales del material, sufre un alargamiento por tracción o compresión, en la que dicha deformación es proporcional a su distancia del plano neutro.

En el diagrama de cargas y alargamiento de la fig. 3.2, se representa las fibras exteriores del material que son las que más se deforman cuando se someten a una carga.

Al representar las condiciones de estas fibras desde la carga cero a una máxima dada, siguiendo las flechas ya sea en la tracción o en la compresión se obtiene un alargamiento de dobladura e_t y recuperándose el material elásticamente un e_s al retirar la carga, obtiene un alargamiento residual e_r.

La relación entre la curvatura inicial y final se iguala a la relación e_r/e_t que se conoce como "*factor de formabilidad".*

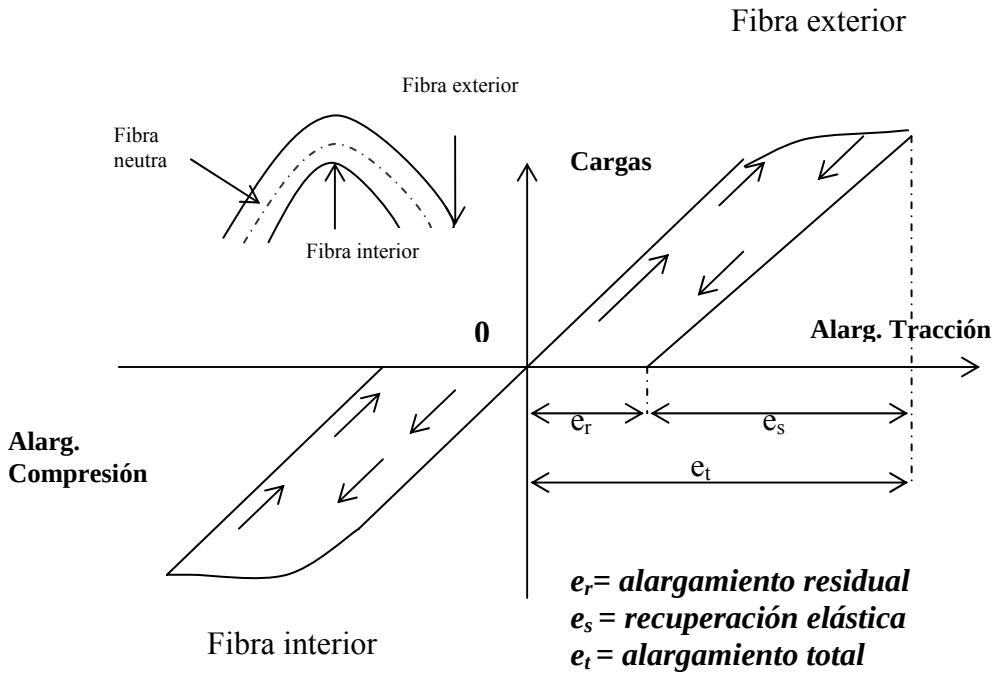


Figura 3.2 Compresión y alargamiento durante el doblado de la chapa

En conclusión, la magnitud del retroceso elástico de la chapa depende, de la dureza o resistencia del material, pero principalmente de la relación del radio de dobladura y espesor de la chapa.[7]

[7] **FUENTE**: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, López Navarro, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1981.

3.1 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE RECUPERACION ELÁSTICA

Para determinar el coeficiente de recuperación elástica y conocer la geometría final de la pieza curvada plásticamente, se debe conocer el radio de curvatura resultante como consecuencia del Springback.

Los metales son materiales dúctiles por lo que cargados mas allá del límite de fluencia, sin importar a la tensión máxima que se haya llegado, la descarga siempre se realiza siguiendo una trayectoria paralela al tramo recto de la curva tal como se indica en la figura 3.3, cumpliendo la ley de hooke.

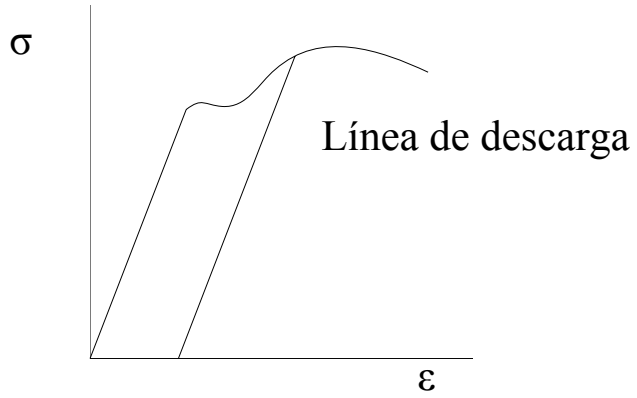


Figura 3.3 Curva esfuerzo-deformación

Si el diagrama esfuerzo-deformación de la chapa metálica se encuentra en la zona de proporcionalidad, la distribución de las tensiones internas es como se muestra en la figura 3.4, pero si se sobrepasa el límite de fluencia se tendrá una distribución de esfuerzos como en la figura 3.5.

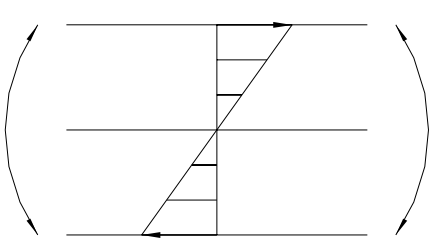


Figura 3.4

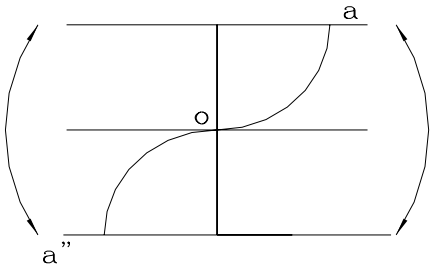


Figura 3.5

Figura 3.4 y 3.5 Distribución de tensiones internas

Las condiciones de equilibrio final se dan por la suma de un momento aplicado en la descarga. Si se considera el límite de fluencia total entonces al momento límite se añade la descarga.

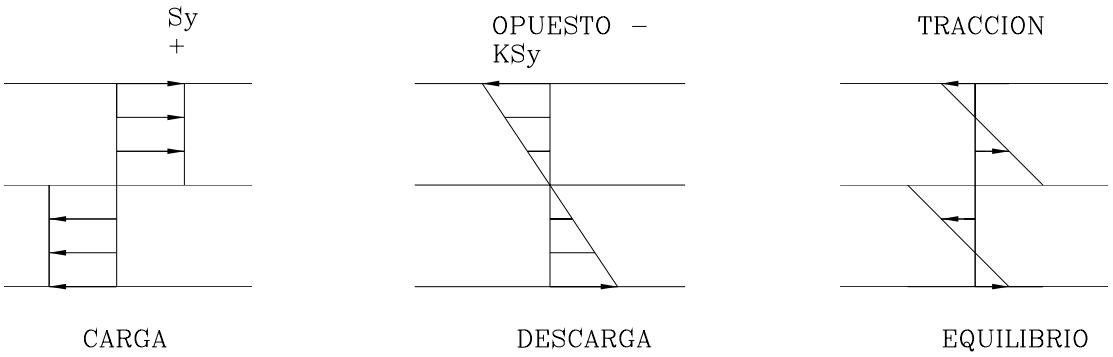


Figura 3.6 Condiciones de equilibrio final

Combinando la deformación plástica producida por la carga con la recuperación elástica que se tiene en la descarga, se puede determinar el radio y el ángulo final de curvado en función del radio y ángulo iniciales. [8]

3.2 RADIO DE CURVADO

Partiendo del supuesto no exacto de que la fibra exenta de tensiones se encuentra en el eje neutro, se calcula el alargamiento de la fibra exterior en una operación de doblado con la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\frac{s}{2}}{r_i + \frac{s}{2}} \qquad (3.1)$$

Donde: r_i = Radio exterior de doblado

s = espesor de la chapa

Cuando la deformación tiene radio de curvaturas muy grandes, s/2 se desprecia en el denominador de la ecuación (3.1), y se tiene la siguiente expresión:

[8] **FUENTE**: ESTUDIO DE CARGAS Y RECUPERACION ELASTICA, Ing. Oswaldo Landazuri , 1983.

$$\varepsilon = \frac{1}{2\frac{r_i}{s}} \qquad (3.2)$$

Si la relación r_i/s es muy grande, el doblado se encuentra en la zona elástica por lo que el material regresará a su forma original.

Para que la deformación se mantenga es necesario sobrepasar el límite elástico, para esto se debe cumplir con lo siguiente:

$$\varepsilon \geq \frac{\sigma_s}{E} \qquad (3.3)$$

Donde: σ_s = Límite elástico del material

E = Módulo de elasticidad del material

De la igualdad de las ecuaciones (3.2) y (3.3) se obtiene el radio de curvado máximo admisible para que el doblado se mantenga. Al rebasar este valor la chapa regresará a su forma original y en ese caso la deformación de la chapa se encuentra en la zona elástica[9].

$$\frac{S}{2\ r_i} = \frac{\sigma_s}{E} \qquad (3.4)$$

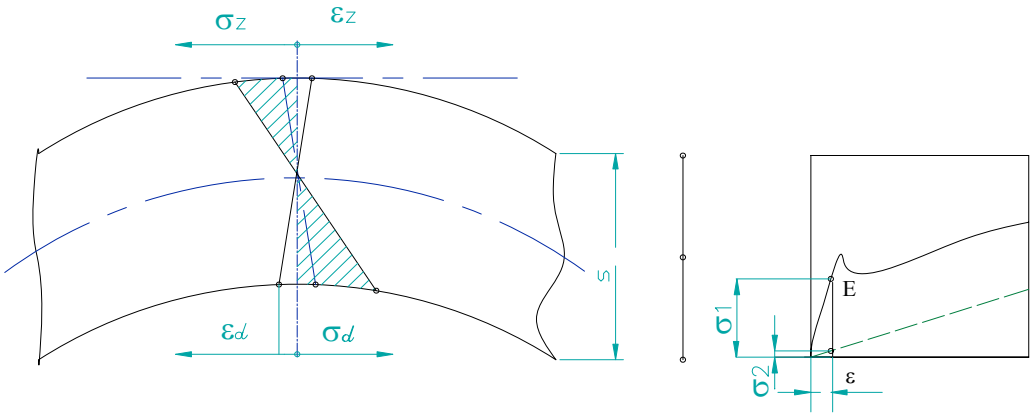


Figura 3.7 Esfuerzo - deformación en función del radio de curvatura sobrepasado

[9] **FUENTE:** OEHLER-KAISER, Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir

En la figura 3.7, se representa una curvatura pequeña; donde el radio es r_i y el espesor es *s*, donde la relación de r_i/s es muy grande, y el alargamiento es tan pequeño que no llega a alcanzarse el límite de fluencia, como se indica a la derecha en el diagrama ε vs σ.[10]

Las tensiones elásticas en la fibra exterior con un esfuerzo de tracción (σ_z), y en la fibra interior con un esfuerzo de compresión (σ_d), descienden hasta cero una vez que se retira la carga, es decir, se ha sobrepasado el valor $r_{i\max}$, y la pieza curvada no conserva su forma y retrocede por flexión a su forma inicial, el momento que se origina indicado en la zona rayada disminuye hasta cero tal como indica la recta vertical del centro.

Si la curvatura aumenta, es decir el radio máximo de curvatura no sobrepasa su valor, la zona interior en ambos lados de la fibra media está libre de tensiones y presenta un momento cuya representación gráfica da una superficie triangular.

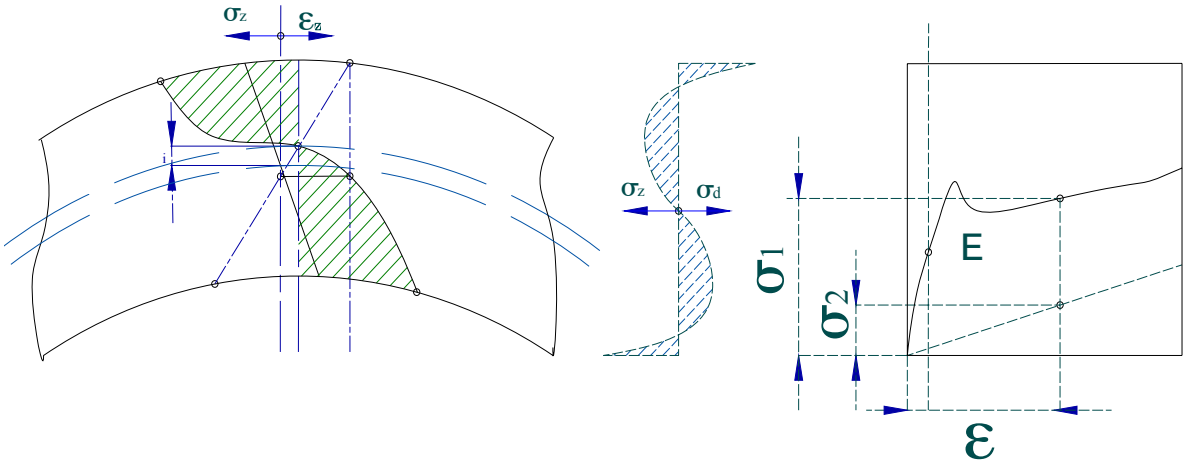


Figura 3.8 Esfuerzo - deformación en función del radio de curvatura insuficiente

Por último, las tensiones tomadas de el diagrama esfuerzo – deformación dibujada a la derecha describe una curva que se desvía hacia la fibra exterior. De acuerdo con la igualdad (3.4) el espesor de la lámina elástica vale:

[10] **FUENTE:** OEHLER-KAISER, Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir

$$\frac{2\sigma_s \; r_m}{E} = S_e \qquad (3.5)$$

Siendo:

S_e, el espesor de la chapa

r_m, el radio de curvatura basado en el tamaño de la herramienta;

σ_s, el esfuerzo correspondiente al límite de resistencia a la tracción, y

E, el módulo de elasticidad

Según Geleji[11] puede calcularse el radio de curvatura resultante como consecuencia del retroceso elástico del material, por medio de la fórmula:

$$r_m' = r_m \left[1 + \frac{2S_e^3}{3S\left(S^2 - S_e^2\right)} \right] \qquad (3.6)$$

Las zonas rayadas de la figura 3.9 abrazan la gama de tensiones correspondientes a la curva superior de trazo seguido del gráfico de la derecha, mientras que las curvas de trazos representan tensiones menores sobre un material que tiene un menor límite de alargamiento.

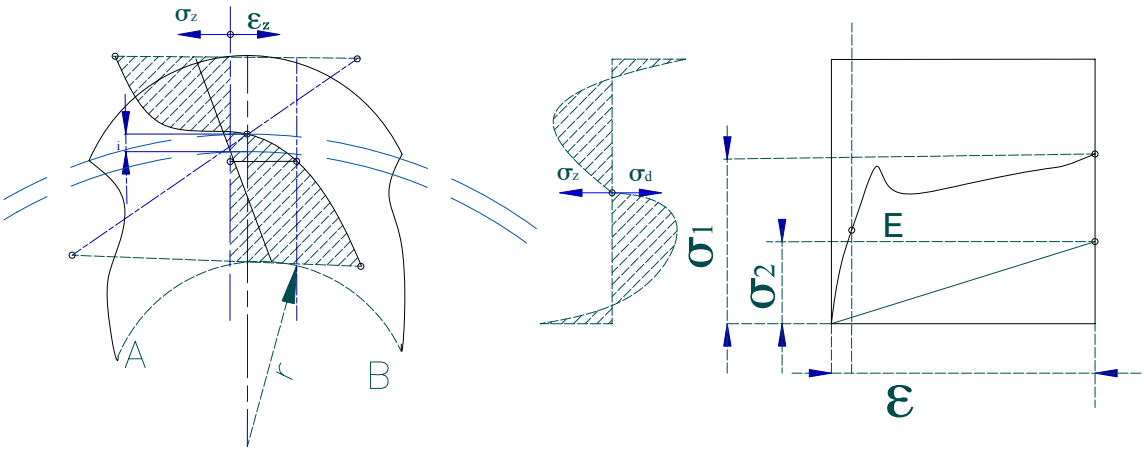


Figura 3.9 Esfuerzo - deformación en función del radio de curvatura para la recuperación elástica

[11] **FUENTE:** OEHLER-KAISER, Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir

De las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 se concluye que al disminuir la relación ***r / s*** disminuye la componente elástica de la deformación, y la reacción elástica del material será mayor con radios de curvado grandes.

Una vez desaparecida la carga, quedan tensiones residuales en las cercanías de las fibras superficiales, dirigidas en sentido contrario a la tensión inicial. En un proceso de estampado, se designa por $\mathbf{r_{i1}}$ al radio de doblado interior y por $\mathbf{r_{i2}}$ al radio que se obtiene luego de la recuperación elástica, con lo que se puede determinar el siguiente valor[12]:

$$K = \frac{r_{i1} + 0.5\ s}{r_{i2} + 0.5\ s} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \qquad (3.7)$$

El valor **K** se denomina ***factor de reacción elástica***, en donde α_1 es le ángulo inicial en el proceso de estampado y α_2 es el ángulo resultante después de retirar el punzón de estampado.

De esta forma, las fibras exteriores, que hasta ahora estaban solicitadas a tracción, sufren una compresión, y las interiores sufren un esfuerzo de tracción, cumpliendo así con el principio de compensación de fuerzas y momentos. Esto puede verse más claramente en la figura 3.10.

[12] **FUENTE:** OEHLER-KAISER, Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir

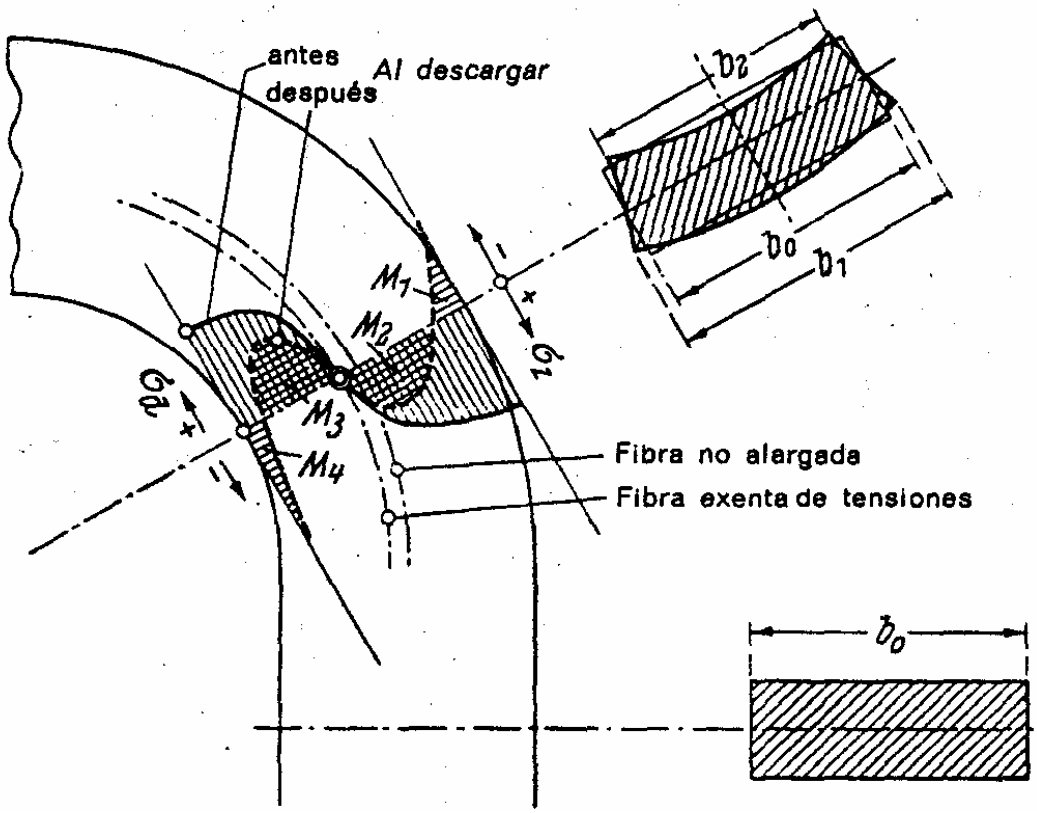


Figura 3.10 Tensiones antes de dejar de aplicar la fuerza, y una vez desaparecida la carga en la operación de curvado

Otra manera de encontrar el valor K es mediante el diagrama de Sachs[13] de la figura 3.11, partiendo del valor r_{i2}/s y comparando con la curva del tipo de material.

[13] **FUENTE:** OEHLER-KAISER, Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir

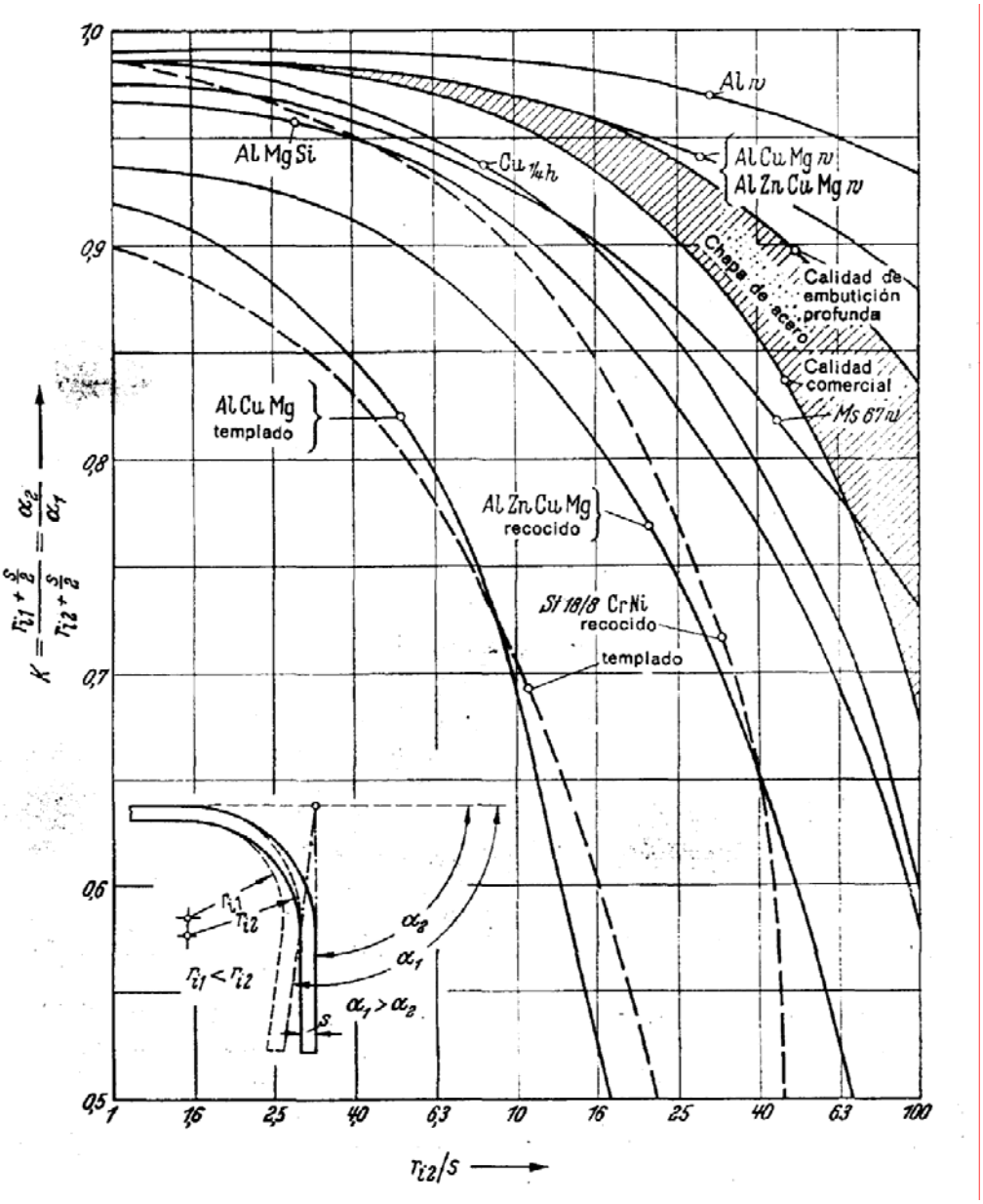


Figura 3.11 Factor de reacción elástica K en función de la relación ri2/s

3.3 FACTOR DE FORMABILIDAD (F)

Esta relación expresa aproximadamente el grado de deformación permanente que se puede obtener y se la denomina con la letra F.

Si la longitud que se alarga es L donde el ángulo de doblez no varía F será igual a 1, entonces el estampado es completo, es decir, no existe recuperación elástica.

Si una placa de metal es sometida a un doblez de 90°, después de dejar libre la pieza el ángulo final de doblado será de 90 x F.

Considerando que F tiene un valor de 0,9, la pieza tiene un ángulo de 81 en lugar de 90°; por lo tanto el ángulo de recuperación será entonces de 9°. Para obtener el ángulo final deseado será necesario reembutir la pieza. El valor de F deberá determinarse por métodos prácticos o calcularse, y el ángulo del conformador se aumentará con el factor correspondiente. Para obtener un ángulo final de 90°, como en el caso anterior, el ángulo del conformador tendrá que ser de 90/F = 100°. [14]

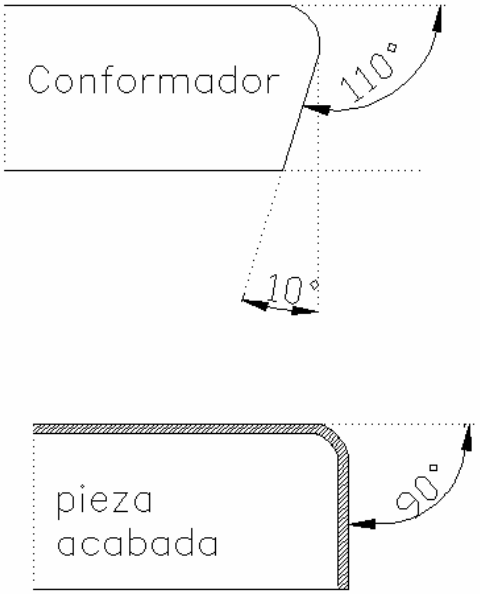


Figura 3.12 Recuperación elástica

[14]**FUENTE**: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, López Navarro, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1981.

3.4 LÍMITE DE CONFORMABILIDAD (FLD).

3.4.1 ANÁLISIS DE GRILLA CIRCULAR

El análisis de la Grilla Circular (CGA) mide la deformación plástica del conformado y es de gran utilidad para crear los Diagramas de Límite de Conformabilidad (FLD).

La chapa metálica se prepara para el CGA grabando una grilla circular en su superficie. La deformación plástica en el acero durante el proceso de conformado hace que los círculos se deformen en elipses.

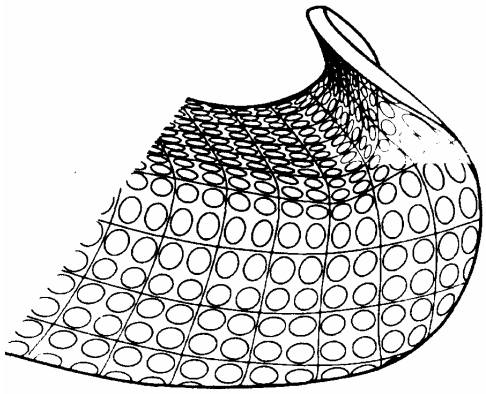


Figura 3.13 Grilla circular grabada en una chapa para estampado

El grado de deformación plástica en cada círculo puede calcularse considerando los diámetros mayores y menores de las elipses como indica la figura 3.13, que indica que la mayor deformación siempre es positiva, y la menor deformación puede ser positiva, negativa o cero.

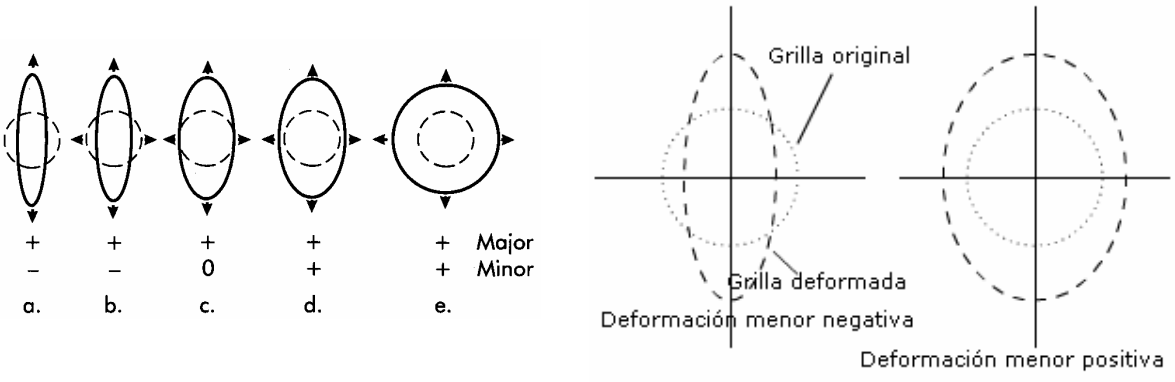


Figura 3.14 Deformación de los círculos grabados en la chapa

3.4.2 DIAGRAMA LÍMITE DE FORMABILIDAD (FLD)

Durante los procesos de conformado de chapas metálicas, en particular cuando éstas son sometidas a procesos combinados de estirado y embutido, se presentan fenómenos de localización, los cuales pueden generar una limitación importante a la formabilidad. Tal limitación en metales sometidos a diferentes modos de carga es comúnmente resumida en lo que se conoce como curva límite de formabilidad (FLC).

La curva límite de formabilidad asociada a una chapa metálica consiste en un diagrama donde se muestra la evolución de las deformaciones principales en una inicial y en una final en conexión con los diferentes estados de deformación a los que puede estar sometida la chapa.

Estos diagramas aportan información necesaria para la predicción de posibles problemas durante los procesos de conformado, y constituyen una herramienta útil en las etapas de diseño, elección de material, definición de la geometría de la pieza en la matríz, etc. [15]

Todas las curvas de límite de conformabilidad para los grados de acero utilizados en carrocerías de automóviles tienen básicamente la misma forma. La diferencia es su posición vertical en el diagrama, que está determinada por el exponente de endurecimiento por deformación n y el espesor del acero.

Los aceros con un FLD alto tienen una mayor conformabilidad que aquellos con un FLD bajo. En la superficie se puede calcular la mayor y menor deformación en diferentes puntos mediante la grilla circular.

Las deformaciones calculadas con el método de la grilla circular son los puntos en el diagrama de límite de conformabilidad en diferentes puntos de la superficie. El área segura en el FLD está por debajo de la curva límite de deformación que es

[15] **FUENTE:** INSTITUTO DE FÍSICA ROSARIO, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2000.

la que representa el límite de deformación máxima admisible para que no se fisure el material.[16]

La Curva Límite de Formado de un material se realiza con los datos de las variaciones de los diámetros de los círculos grabados en la chapa, estos datos se agrupan en una zona que tiende a formar la curva mostrada en la figura 3.14. De estudios realizados se ha llegado a determinar la forma general de la curva y sus valores límites dependen del tipo de material.

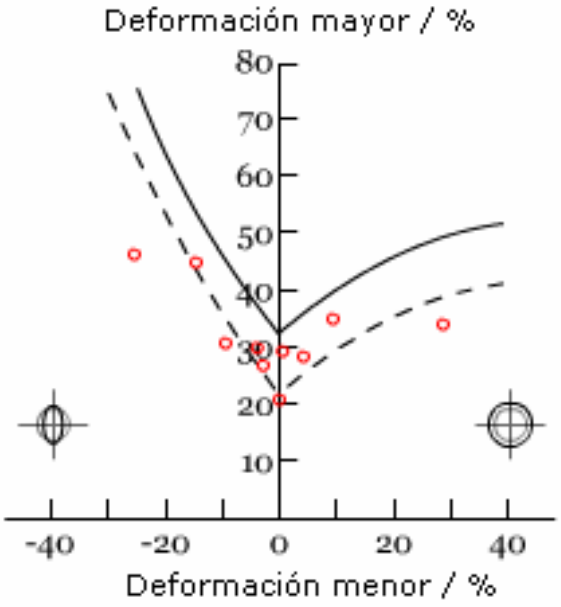


Figura 3.15 Curva límite de formado para un material

[16] **FUENTE:** IVANA SUCH; Handbook of Die Design; Second Edition; McGraw-Hill; 2006.

CAPÍTULO IV
IMPORTACIÓN Y CORRECCION DE UNA GEOMETRÍA COMPLEJA REAL (PARACHOQUES) AL PROGRAMA STAMPACK

Para realizar la simulación del proceso de estampado en chapas metálicas de una geometría compleja real se ha tomado a un PARACHOQUES, debido a su complejidad en el diseño y el cual presenta problemas de fractura en un 30%; se busca dar alternativas de solución que sean validas y accesibles para la industria, con la información obtenida de los resultados de la simulación con el programa de elementos finitos Stampack.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

TROQUEL DE ESTAMPADO ORIGINAL PARA EL PARACHOQUES

El troquel original para estampar el PARACHOQUES se muestra desarmado en la figura 4.1, donde se indica las partes que lo componen; este troquel fue construido en base a planos generales que se encuentran en el anexo C y especificaciones requeridas del producto, mediante la experiencia de la empresa en la fabricación de troqueles anteriores y pruebas reales debido a la falta de tecnología para simulaciones de estampado que puedan ayudar a un buen diseño.

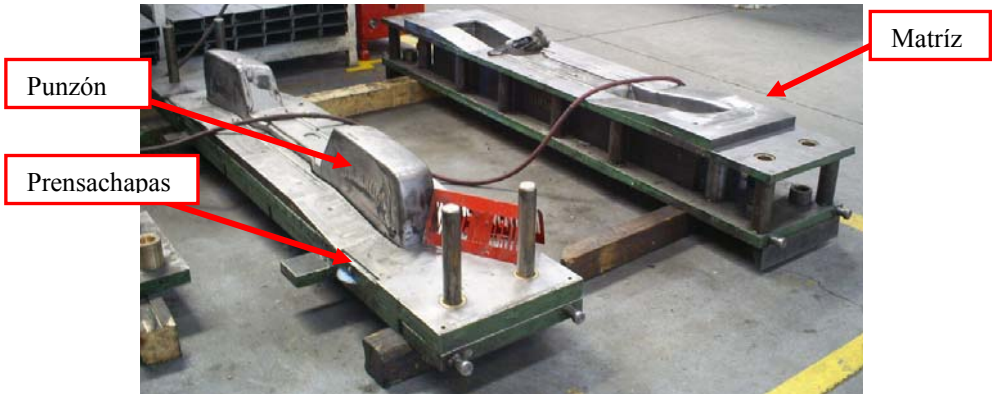


Figura 4.1 Herramientas del Troquel de Estampado Actual

El resultado de la construcción del troquel original ocasiona desperdicios en la materia prima debido: primero al corte que se debe realizar en cada PARACHOQUES estampado por el defecto en el diseño que se describe posteriormente y segundo a la rotura de los mismos en un 30% de la producción total causando pérdidas económicas.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA EN EL PARACHOQUES ESTAMPADO

La figura 4.2 muestra las arrugas formadas en el proceso de estampado debido a la baja presión que existe entre el pisador y la matríz.

Figura 4.2 Rotura a causa de falta de presión del prensachapas

La velocidad de estampado es de 0.012 m/s, si se supera el límite de velocidad establecida el PARACHOQUES se rompe, como indica la figura 4.3; por el contrario si se disminuye la velocidad para evitar las roturas, el proceso no permite estampar lotes de 500 unidades en una jornada de trabajo de 8 horas establecidas para cumplir con los pedidos.

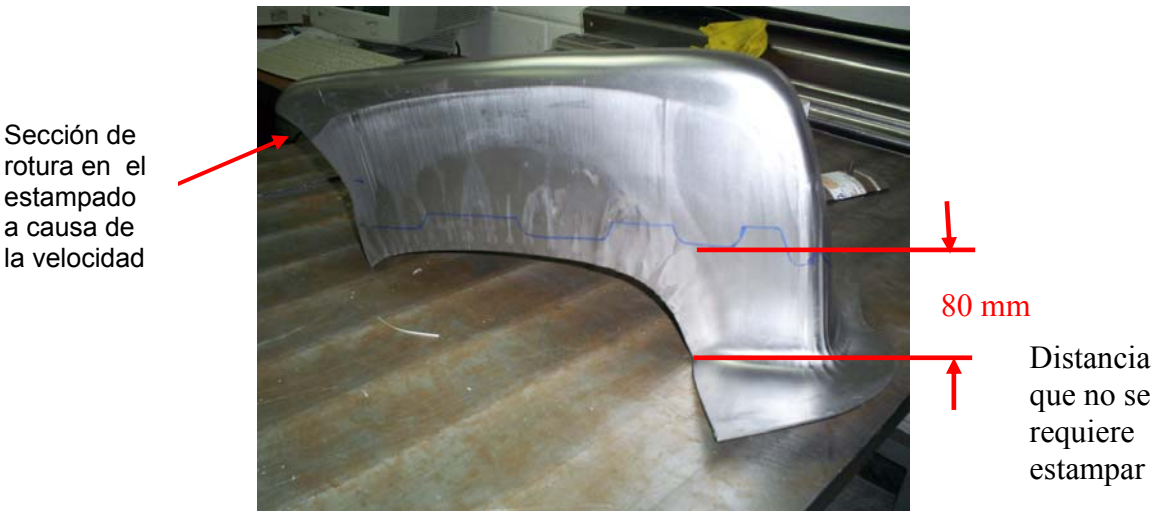


Figura 4.3 Rotura del PARACHOQUES debido a la alta velocidad en el estampado

En la figura 4.3 y figura 4.4 se puede observar una línea azul, que es dibujada después del estampado para recortar y formar el PARACHOQUES (parte superior de la línea azul), es decir, la distancia de 80 mm no se requiere estampar, pero el diseño del troquel actual lo hace innecesariamente, haciendo que se tenga un mayor estiramiento en el material.

Figura 4.4 Perfil de corte de exceso de material en el estampado

En la figura 4.5 se muestra el punzón actual dibujado en el software Solidworks, donde el área innecesaria del diseño original se indica en color verde oscuro.

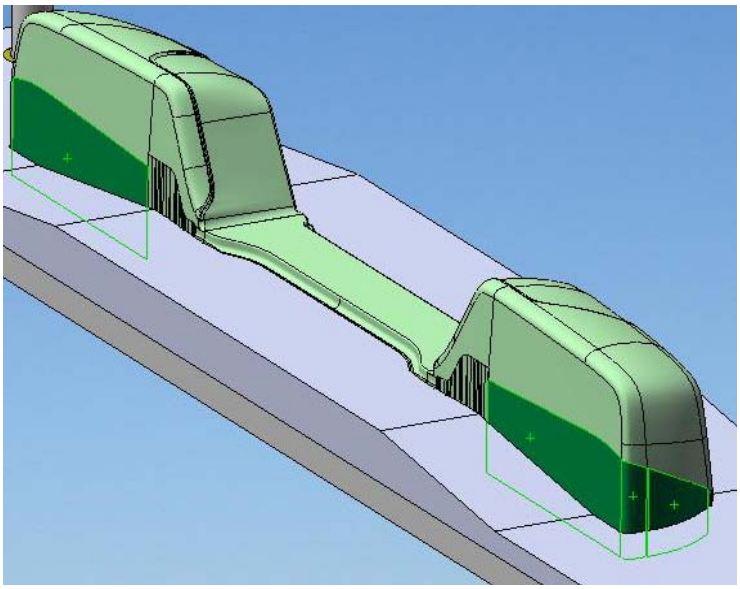


Figura 4.5 Punzón actual dibujado en el software Solidworks

4.3 PARÁMETROS DE ESTAMPADO

Los parámetros que se requieren para correr la simulación son tomados de la prensa en la que se realiza el estampado del cuerpo central y son los siguientes:

- Velocidad de estampado
- Presión de prensachapas
- Material
- Espesor
- Dimensiones del desarrollo para ser estampado
- Coeficiente de fricción

4.3.1 VELOCIDAD DE FORMADO

La velocidad de formado es la velocidad de la prensa, que influye directamente con una mayor o menor capacidad de deformación en la chapa metálica. El comportamiento de un auto, donde la velocidad de este se ve envuelto en una colisión tiene una forma muy parecida al de la velocidad con que un punzón deforma un material en proceso. [17]

[17] **FUENTE:** La Ciencia del Formado, STUART KEELER

La influencia de la velocidad de deformación en el formado de la chapa metálica se resume en dos efectos:

- Efectos globales.- Se relacionan directamente con la velocidad de la prensa o del punzón que se aplica a la pieza en el proceso de formado.

- Efectos locales.- Son las diferencias en la velocidad de formado entre las áreas adyacentes del estampado, es decir, es la tasa relativa en la deformación de los elementos adyacentes en el formado de una chapa metálica.

Un ejemplo sencillo muestra los dos efectos. Si dos personas están compitiendo en un maratón, sus velocidades relativas (el efecto de velocidad local) determina cual es el ganador. El hecho de que la tierra rote a una velocidad extraordinariamente alta (el efecto de velocidad global) no ejerce influencia alguna en la carrera. Esto es muy parecido al formado de la placa metálica[18].

Dos ejemplos importantes de efectos locales en el formado de la chapa metálica como el controlar los gradientes del esfuerzo local (Figura4.6.a) y el retardo en el inicio de formación dependiendo el espesor, son caracterizados por el diagrama de límite deformado (FLD) (Figura 4.6.b).

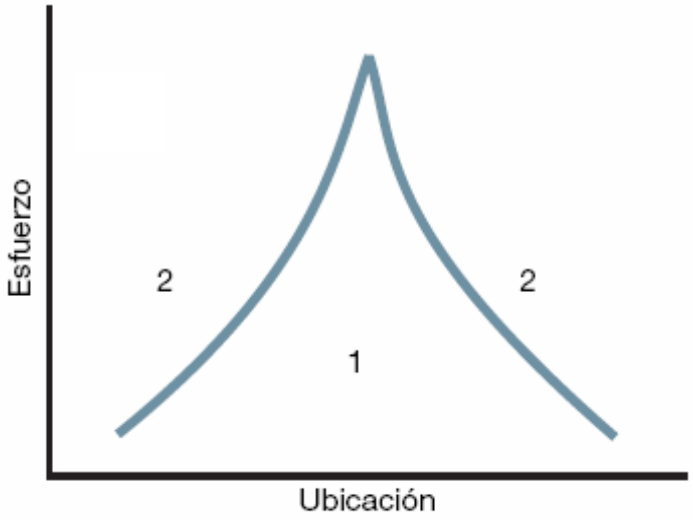


Figura 4.6.a Gradiente de deformación localizado

[18]**FUENTE:** La Ciencia del Formado,STUART KEELER

Figura 4.6.b Un cuello localizado en la zona 1 por una mayor velocidad de deformación y con una menor velocidad de deformación en la zona 2.

Al examinar la zona 1 y la zona 2 de la figura 4.6a y la figura 4.6.b, se puede notar inmediatamente que el material en el gradiente o en el cuello de la zona 1, se ha deformado más que el material que se encuentra en la zona 2. Por lo tanto, la tasa de deformación del material en la zona 1 es mayor a la tasa de deformación en la zona 2.

4.3.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN

El rozamiento en el estampado de chapas metálicas influye en la calidad superficial del producto obtenido. La fricción que actúa durante la operación de estampado depende de la presión ejercida sobre la chapa, de la viscosidad del lubricante empleado y de la velocidad relativa de la chapa con respecto a la herramienta.

Para poder evaluar el coeficiente de fricción entre chapa y herramienta, se analiza con ensayos de fricción tipo Inland, que obliga a una probeta plana a deslizar entre una herramienta y otra de perfil cilíndrico mientras es sometida a una fuerza normal **N**. Se mide la fuerza de tiro **F** necesaria para hacer deslizar la probeta y se calcula el coeficiente de fricción m (Figura 4.7).[19]

[19] **FUENTE:** Influencia de La Velocidad de Deslizamiento en El Ensayo de Fricción de Chapas Entre Herramientas Plana e Cilíndrica, Insausti J. W, Universidad Nacional del Sur, Argentina

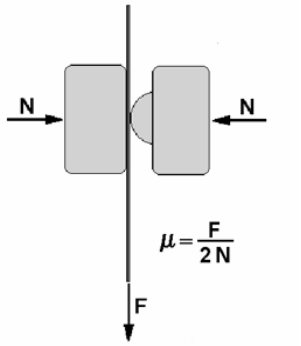


Figura 4.7 Esquema del ensayo de Inland

El ensayo descrito se usa además para calificar lubricantes y determinar posibles daños superficiales en la chapa, luego de una o varias pasadas por el equipo de ensayo.

Con el mismo ensayo se puede estudiar la relación entre la velocidad de deslizamiento entre ambas superficies (chapa y herramental) y el coeficiente de fricción medido. También se analiza la calidad superficial obtenida.

El estado superficial de la chapa influye en la separación entre las superficies deslizantes, y por lo tanto en la mayor o menor facilidad de obtener una componente hidrodinámica en la lubricación, a través de la relación:

$$h/Ra \qquad (4.1)$$

Donde:

h: es el espesor de la película de lubricante y

Ra: es la rugosidad de la chapa

Los coeficientes de fricción se obtienen mediante la relación

$$\mu = F/2.N \qquad (4.2)$$

En este esquema de razonamiento se supone que la herramienta es lisa, en otros casos, se toma un valor medio de las rugosidades de ambas superficies en contacto.

4.3.3 LUBRICACIÓN

La lubricación es importante para la mayoría de procesos de conformado mecánico, por lo que dependiendo de las especificaciones del material y el tipo de conformado a realizarse, el lubricante para chapas metálicas debe contener mezclas de 25% de grafito, 25% de grasa animal y 50% de aceite mineral; aunque para las industrias en el país no siempre es aplicable, porque generalmente estas buscan el máximo ahorro a través de ensayos, por lo que no se obtienen resultados óptimos ante este tipo de estampado.

Para el estampado del parachoques el lubricante utilizado se ha determinado en función a experiencias anteriores realizadas mediante ensayos de prueba y error en el troquel real de la empresa que se dedica a la construcción de estos, determinándose como el más adecuado y económico al cebo animal de res.

4.4 IMPORTACIÓN DE UNA GEOMETRÍA COMPLEJA REAL (PARACHOQUES) AL PROGRAMA STAMPACK

La importación de la geometría al software Stampack se puede realizar en formatos estándar de programas CAD como:

- DXF
- VDA
- PARASOLID
- IGES
- ACIS

La importación en estos programas no esta libre de errores, no es completamente compatible con el formato que requiere el Stampack, estos pueden ser corregidos por el mismo programa de forma automática y luego de forma manual, dejando la geometría importada libre de incompatibilidades para la creación de la malla necesaria previa a ingresar al módulo de cálculo.

La geometría importada se utiliza para generar posteriormente una malla de elementos finitos, además se puede importar directamente mallas de programas de elementos finitos en formato NASTRAN ó STL.

4.4.1 PROCESO DE IMPORTACIÓN DE UN ARCHIVO IGES

La geometría del guardachoque es importada del software Solidworks, debido a la complejidad de su diseño. En la importación de geometrías creadas en un programa CAD como el SOLIDWORKS que guarda el archivo automáticamente con la extensión ***.sldprt** se debe guardar con la extensión ***.iges** para poder importar al programa Stampack.

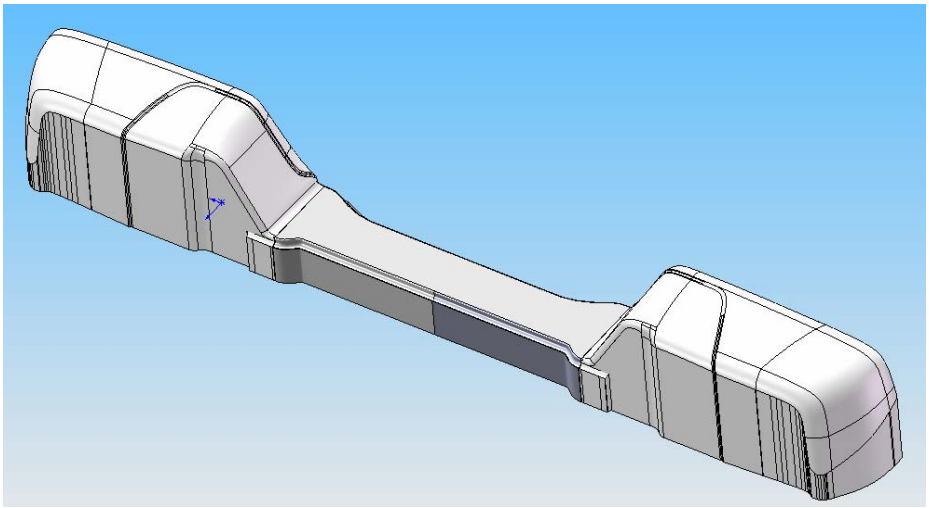


Figura 4.8 Geometría original en el programa SOLIDWORKS

4.4.2 PARÁMETROS DE IMPORTACIÓN

Para importar un archivo IGES se revisa los parámetros de importación, para ello se realiza el colapsado como una operación previa para proceder a la lectura de un fichero de geometría. El colapsado es una operación previa donde dos entidades se convierten en una sola debido a que la distancia de separación es inferior al valor del parámetro de tolerancia de importación.

Existen dos formas para colapsar el modelo:

a. Al abrir el programa Stampack se utiliza la opción:

Utilities > Preferentes

Se Ingresa al colapso automático del modelo

En la ventana **Preferences** seleccionar: **Import**

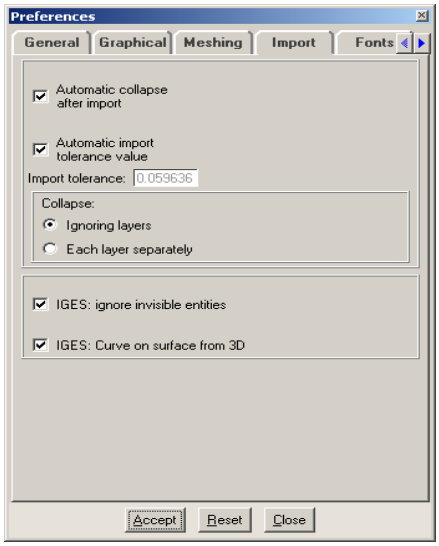


Figura 4.9 Ejecución del colapso automático

- **Colapsado automático después de la importación**

La opción ***Automatic collapse after import*** es seleccionada para dar un colapsado inicial de entidades seguido de la lectura del modelo.

- **Valor automático de tolerancia de importación**

La opción ***Automatic import tolerance value*** es seleccionada para hacer un cálculo en función del tamaño de la geometría y escoger un valor adecuado automáticamente para el parámetro de tolerancia de importación:
Import Tolerance.

En el colapsado se ignoran los layers, las entidades invisibles y se considera las curvas en las superficies 3D en IGES.

b. La geometría se puede colapsar también de forma manual, se utiliza la opción:

Utilities>Collapse>Model

La ventana de diálogo indica la tolerancia de importación de colapsado en el modelo la misma que puede ser aceptada o modificada.

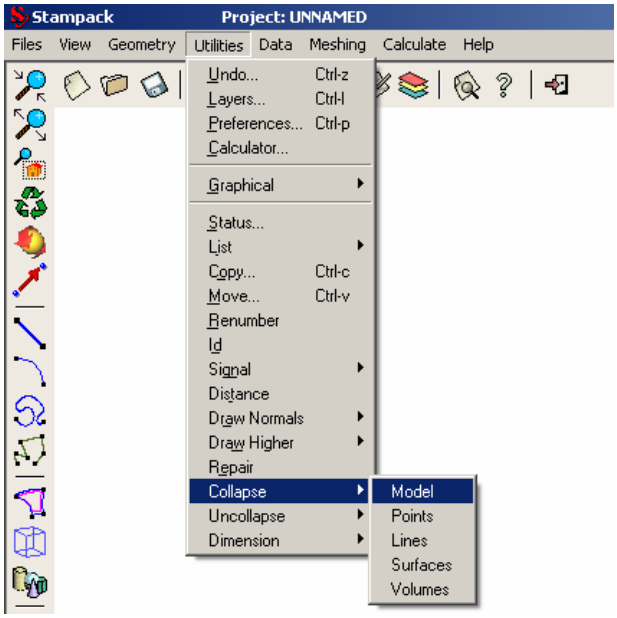


Figura 4.10 Ingreso al colapso manual del modelo

4.4.3 PROCESO DE IMPORTACIÓN DE GEOMETRÍAS

Para importar la geometría de una pieza al programa Stampack se utiliza la opción de preproceso:

Files >Import >IGES

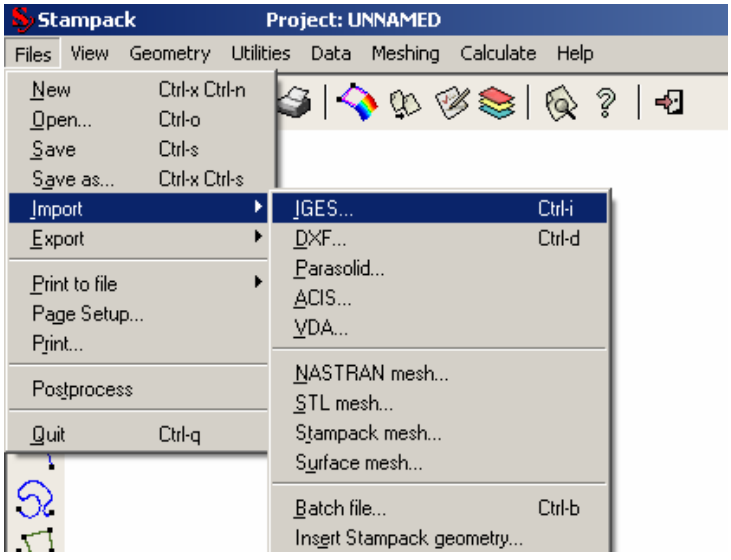


Figura 4.11 Importación de IGS.

Se busca en la ubicación correspondiente al problema a seguir, en este caso el **CUERPO CENTRAL PARACHOQUES .IGS**

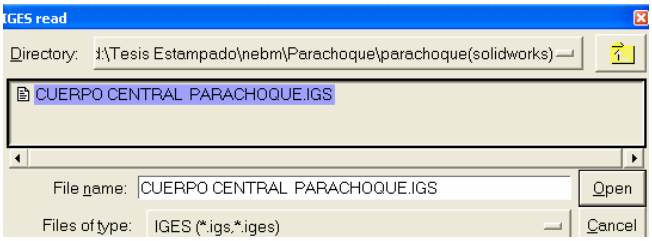


Figura 4.12 Cuerpo central parachoques.Igs

Al seleccionar el ejemplo Stampack genera la importación en cuatro procesos que son:

1. *Proceso de la lectura del fichero*

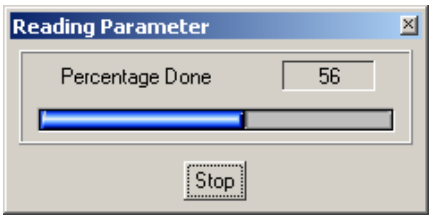


Figura 4.13 Lectura de parámetros

2. *Proceso de la traducción del formato IGES al formato geométrico interno de Stampack*

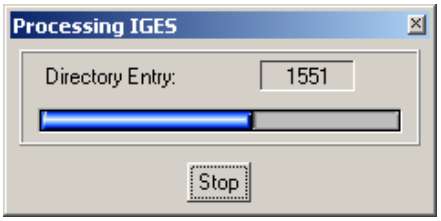


Figura 4.14 Traducción del formato IGES.

3. *Proceso del colapso del modelo*

En la importación el proceso de colapsado el programa Stampack calcula automáticamente el parámetro Import Tolerance para unir dos entidades.

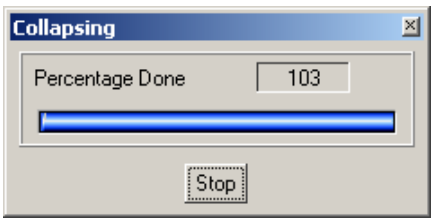


Figura 4.15 Colapso del modelo

4. *Proceso de reparación del modelo*

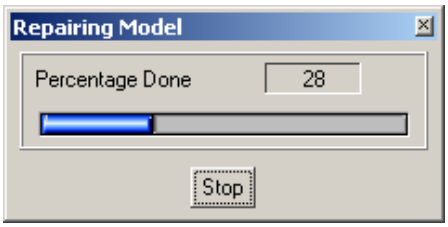


Figura 4.16 Reparación del modelo

El programa abre una ventana de información del resultado del proceso de importación dando el tiempo de lectura del formato, puntos, líneas y superficies creadas, dando además la tolerancia de separación que se genera automáticamente en el colapsado.

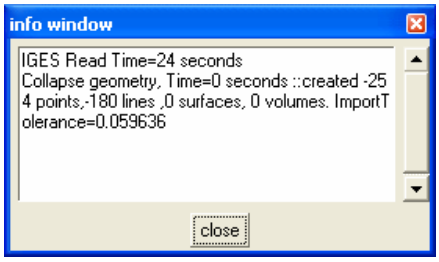


Figura 4.17 Ventana de información

El resultado de la importación es una geometría visualizada con Stampack del ***cuerpo central. IGES***, las líneas internas a las del contorno de la geometría indican las superficies creadas.

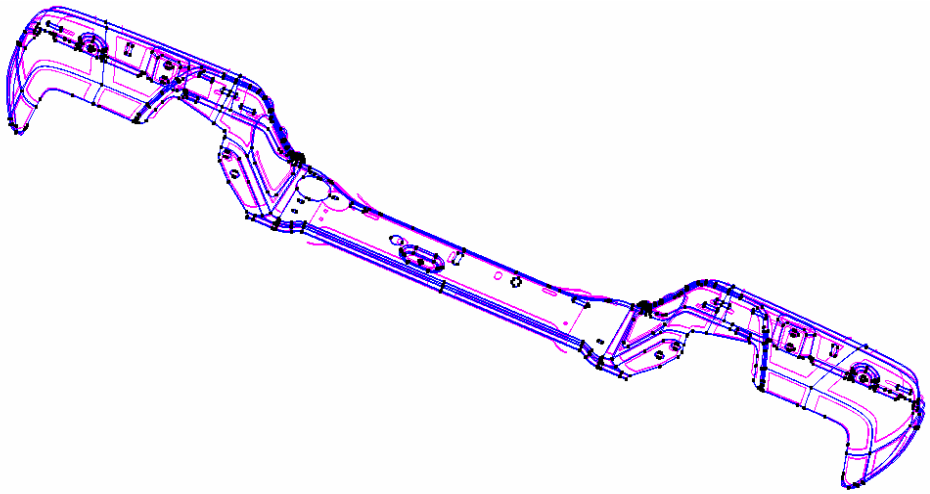


Figura 4.18 Vista normal del cuerpo central .Iges

Una vista renderizada de la figura de la geometría indica mejor la importación realizada.

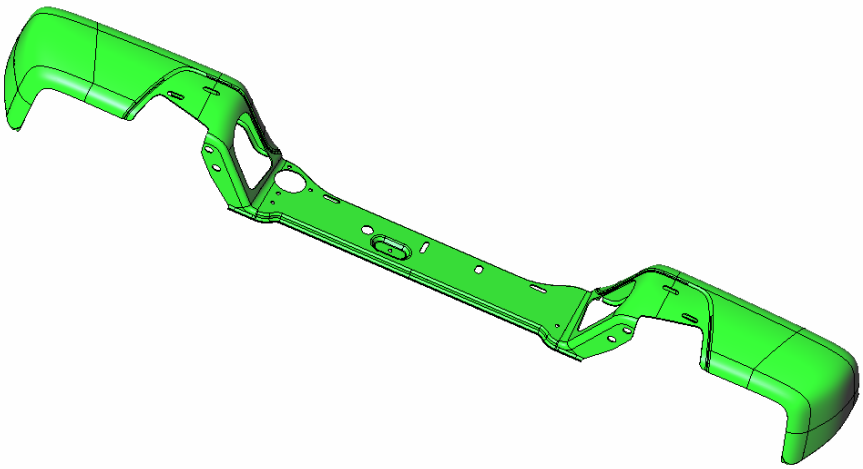


Figura 4.19 Vista renderizada del cuerpo central .Iges

4.4.4 GENERACIÓN DE UNA MALLA PRELIMINAR

4.4.4.1 MALLADO POR DEFECTO

El paso siguiente a la importación de la geometría es la generación de mallas con el objetivo de verificar si hay o no problemas al transformar la geometría del formato original al formato del Stampack, en caso de existir problemas la generación de la malla puede ser incorrecta y en ocasiones imposible de realizar.
Para detectar errores de la geometría importada se utiliza la opción:

Meshing > Generate

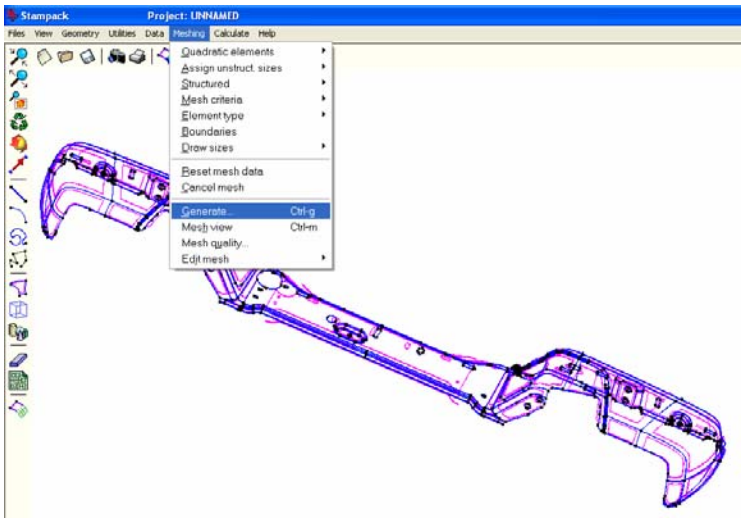


Figura 4.20 Creación de malla

En la ventana ***enter value window***, aparecera el tamaño máximo de elementos de la malla a ser generados**,** el Stampack por defecto asigna un valor.
Pulsar OK.

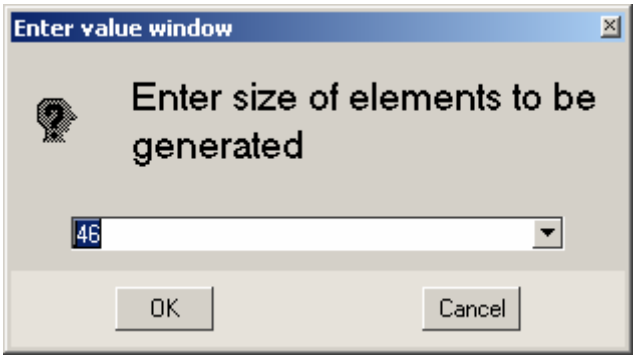


Figura 4.21 Ventana de información

Aparecerá la ventana que muestra el progreso de mallado donde se determina el número de superficies creadas.

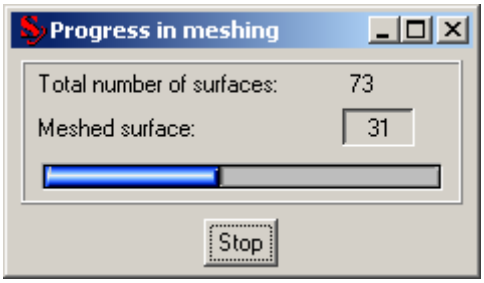


Figura 4.22 Ventana de progreso de mallado

Aparece una ventana de diálogo donde informa el número de elementos y nodos creados.

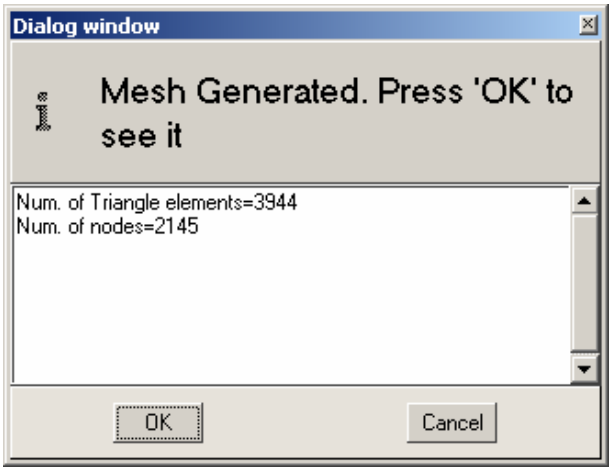


Figura 4.23 Ventana de diálogo

Para observar la malla generada:

Presionar ***OK***.

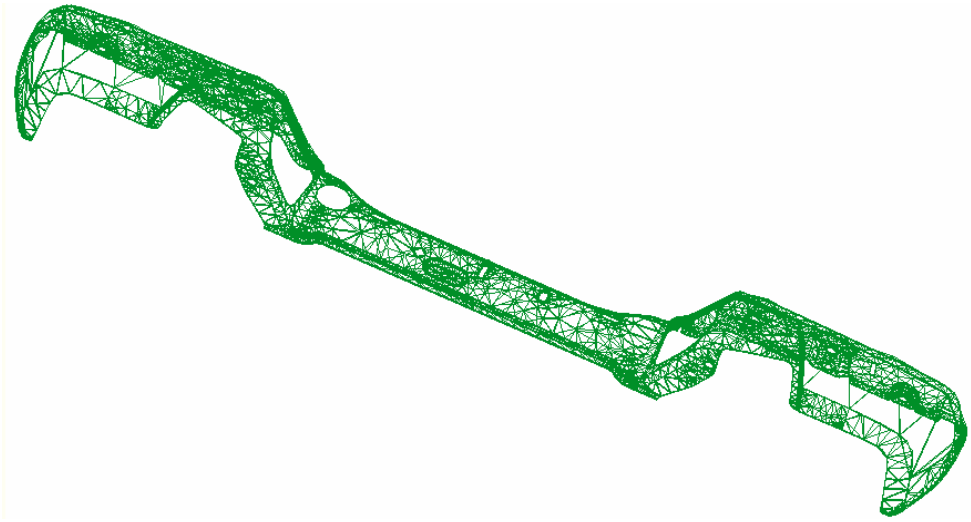


Figura 4.24 Malla generada

Si se presiona Cancel no se observa la malla generada y al volver a generar se pregunta si se borra la antigua malla, se debe aceptar, caso contrario no se genera.

Figura 4.25 Ventana de diálogo

4.4.4.2 GENERACIÓN DE UNA MALLA CONFORME

La malla conforme generada se utiliza para ejecutar el módulo de cálculo, esta malla hace que sus elementos compartan nodos y caras, para ello las superficies debe compartir líneas y puntos con los elementos.

4.4.4.3 COLAPSO GENERAL DEL MODELO

Se colapsa la malla:

Utilities > collapse> mesh

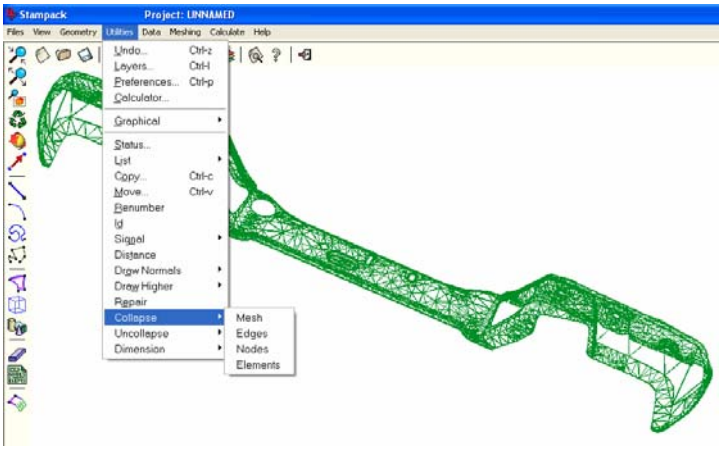


Figura 4.26 Ingreso al colapsado general

Aparece la ventana de diálogo, dando al colapsado de malla y la tolerancia de importación a ser aceptada.

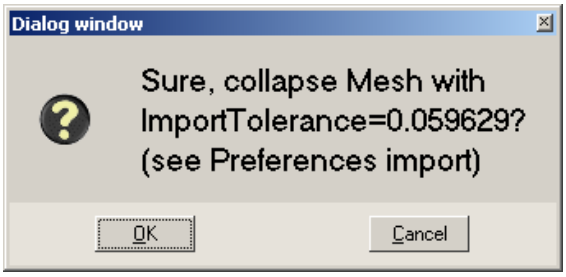


Figura 4.27 Ventana de diálogo.

Para mostrar el contorno de los conjuntos de superficies que son conformes se escoje: ***Meshing > Boundaries***.

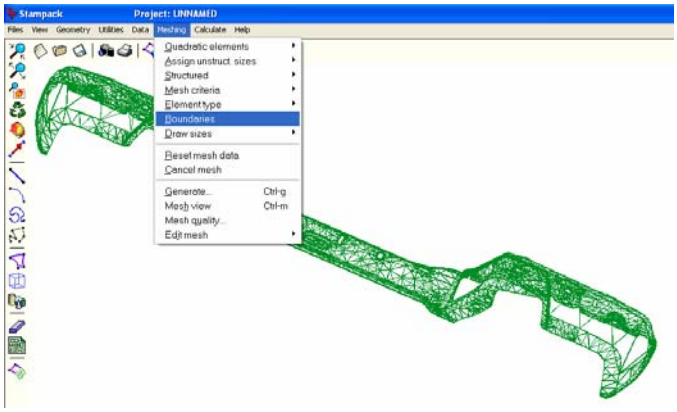


Figura 4.28 Ingreso a contornos de superficies.

La malla obtenida de la geometría importada no es conforme porque sus elementos no comparten nodos y caras, lo cual en la figura 4.27 se observa como superficies que no comparten líneas y puntos con las contiguas entonces se aprecia que no es una malla conforme y para el cálculo es necesario que lo sea.

La ventana de diálogo de la Figura 4.29 muestra si se mantienen los bordes en la visualización.

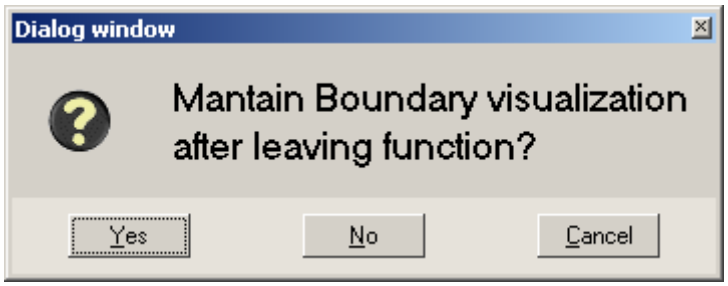


Figura 4.29 Ventana de diálogo

La visualización de los contornos muestra que en el interior de las piezas algunas superficies están inconexas, porque existen líneas que no comparten superficies.

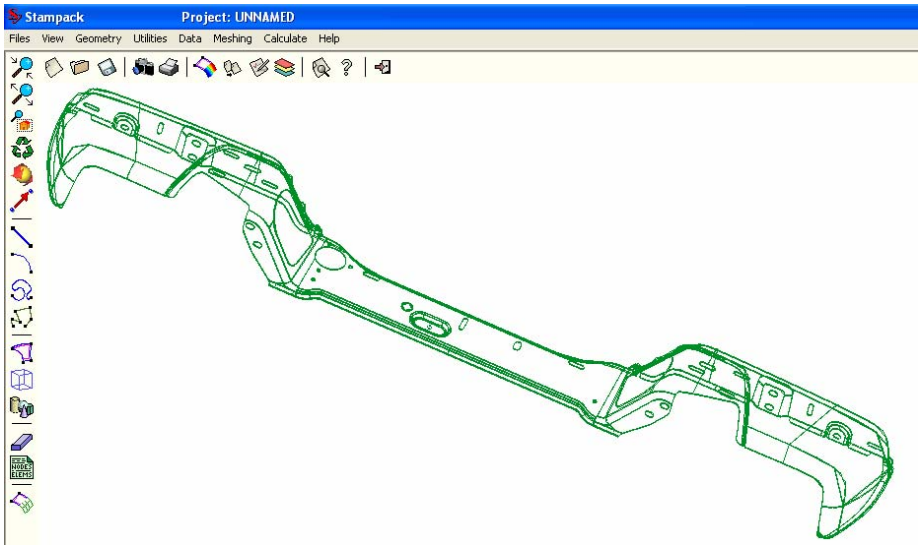


Figura 4.30 Visualización de contornos

Para generar una malla conforme primero se hace un colapso general del modelo cambiando el parámetro de tolerancia de importación a un valor de 0.015 (debido que si se el mínimo valor es de 0.01 y si disminuye no se puede ejecutar el colapsado) y aceptar.

Utilities>Preferences> Import

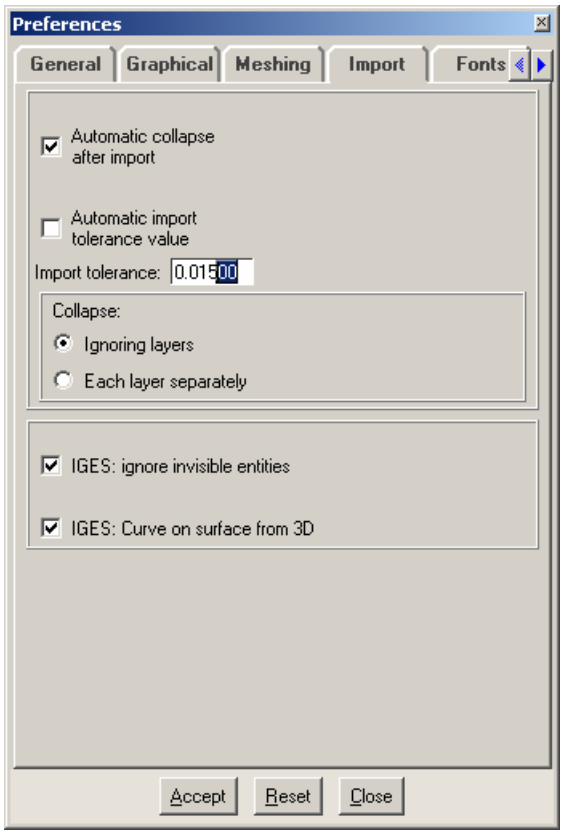


Figura 4.31 Cambio del parámetro de tolerancia

Para llevar a cabo el colapsado con la nueva tolerancia escoger la opción.
Utilities > Collapse > Model

En la ventana de diálogo se confirma la tolerancia de importación**.** Seguidamente volver a generar la malla con ***Meshing > Generate*** donde se visualiza el resultado logrando que varias superficies del interior del modelo queden unidas con las contiguas.

Sin embargo aún quedan algunas superficies que impiden que la malla sea conforme y para observar la nueva visualización de los contornos de la malla: ***Meshing > Generate***

Esta nueva visualización tiene todavía errores que deberán ser analizados manualmente corrigiendo las superficies.

4.4.4.4 CORRECCIÓN DE SUPERFICIES

Cuando el proceso de mallado no se puede llevar a cabo aparece una ventana en la que se informa el número de las superficies en las que el mallado no se puede realizar.

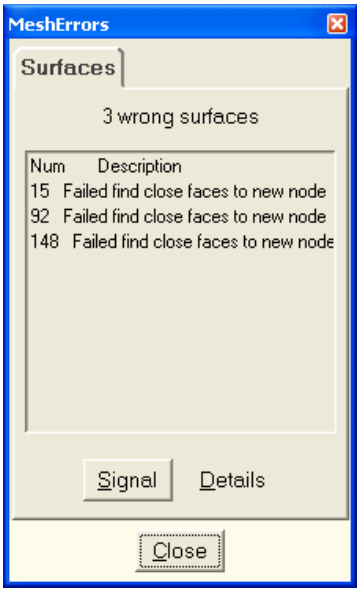


Figura 4.32 Errores en el proceso de mallado

Al seleccionar uno de los errores y marcar SIGNAL, se puede ir a la superficie en la que se encuentra el error.

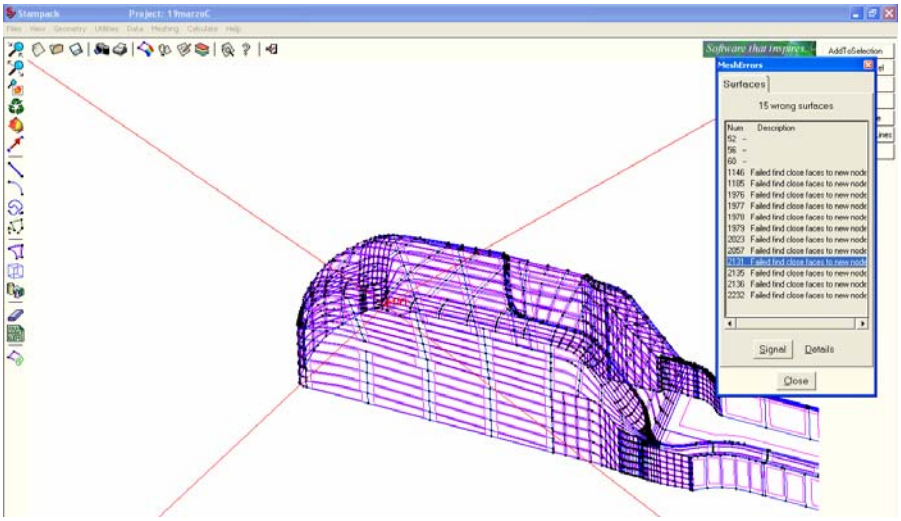


Figura 4.33 Error localizado a través de la ventana de diálogo

Para corregir el error es necesario aumentar el tamaño de la imagen con la opción ***Zoom in*** para visualizar el tipo de error, que pueden ser: líneas sobrepuestas,

superficies montadas, puntos faltantes o espacios vacíos como se indica en la figura 4.34, y se corrige cada error de forma manual.

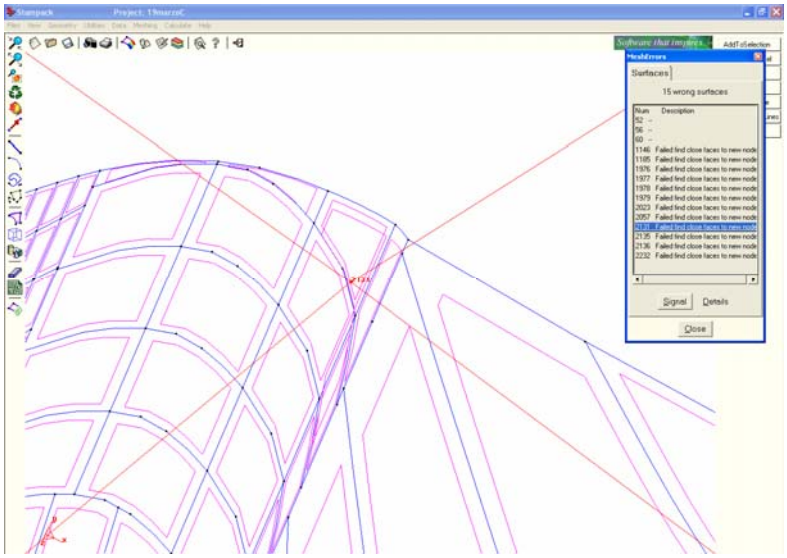


Figura 4.34 Error localizado para corregirlo

Para realizar las correcciones de forma manual de los errores se utiliza las herramientas del programa Stampack y se vuelve a generar el mallado hasta que la ventana de información de errores no aparezca y en su lugar aparece la ventana de diálogo que muestra que la malla se ha generado exitosamente (figura 4.35).

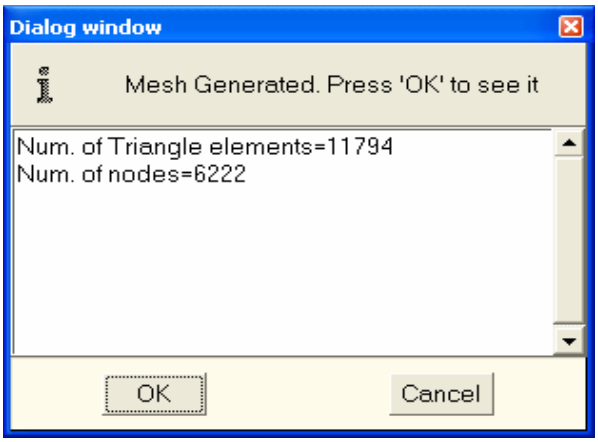


Figura 4.35 Información de generación de malla exitosa

Seguidamente se ve la geometría con la malla creada como indica la figura 4.36

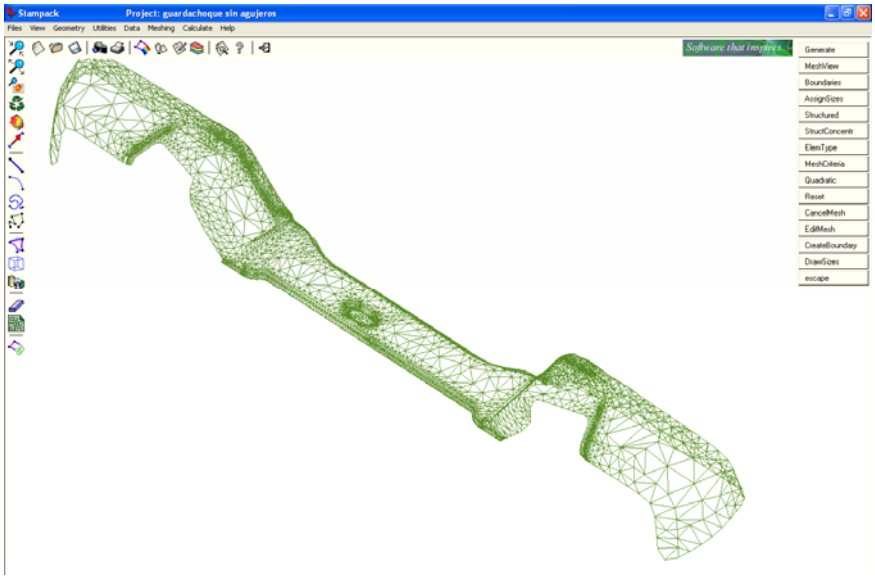


Figura 4.36 Malla conforme de la geometría a simular.

Una malla conforme es aquella en la que cada uno de sus nodos es compartido por los miembros adyacentes y las superficies no se encuentran posicionadas una sobre otra.

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DEL SOFTWARE STAMPACK EN LA SIMULACIÓN INCLUYENDO EL MÓDULO DEL SPRINGBACK EN UNA GEOMETRÍA IMPORTADA REAL (PARACHOQUES)

5.1 HERRAMIENTAS PARA LA SIMULACIÓN DEL PARACHOQUES EN EL SOFTWARE STAMPACK

Para realizar esta etapa de cálculo se debe recordar que solo se puede usar la geometría que tiene el mallado conforme, es decir que se debe seguir los pasos descritos en el capítulo anterior.

Se omite la descripción detallada del preproceso para la simulación, que es la comprobación de la orientación de las fuerzas de cada herramienta que actúa sobre la chapa estampada y la generación del mallado de las mismas para el cálculo de estampado, debido a que ya se han desarrollado tesis de descripción del preproceso en el software Stampack y además no es el propósito de este tema.

Las herramientas que se necesitan para realizar un proceso de estampado son:

- ✓ Punzón
- ✓ Matríz
- ✓ Pisador
- ✓ Chapa
- ✓ Frenos

El punzón tiene un movimiento vertical 197.3 mm a una velocidad de 0.12 m/s y actúa bajo la chapa, al subir estira el material. La matríz se encuentra sobre la chapa y permanece inmóvil. El pisador aprieta la chapa con la matríz de estampado con la finalidad de que no se produzcan pliegues, para que el punzón suba formando a la chapa.

El juego que queda entre el punzón y la matríz de embutir tiene que ser mayor que el espesor de la chapa. En el acero es conveniente holguras de 1,12 a 1,30 veces el espesor de la chapa.[20]

Cada una de estas geometrías son creadas en capas denominadas Layer, donde se asigna el nombre de cada herramienta. El conjunto de herramientas graficados o importados al software Stampack del parachoques se indica en la figura 5.1, donde se diferencia por colores a cada herramienta.

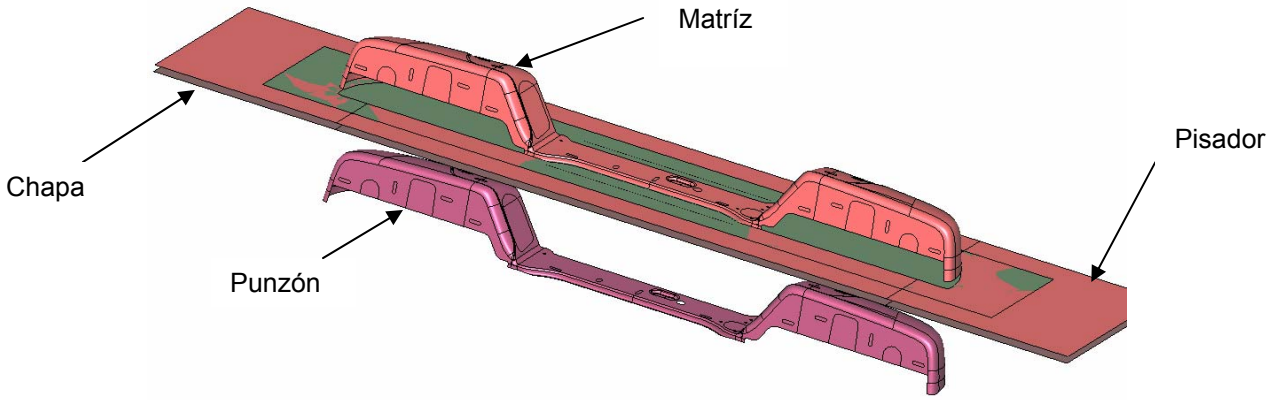


Figura 5.1 Conjunto armado de herramientas para estampado del PARACHOQUES en el software Stampack

La figura 5.2 muestra el cuerpo central del parachoques real estampado en el troquel original y que es uno de los productos que no se rompen y sirven para la entrega.

Figura 5.2 Cuerpo Central estampado original

[20] **FUENTE**: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, López Navarro, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1981.

El propósito es simular el cuerpo central del parachoques con el mismo diseño y parámetros en el que se construye, para determinar las zonas mas afectadas que provocan la rotura por medio de la aplicación del software Stampack y buscar soluciones al problema que se describe en el capítulo IV

5.2 EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN EN EL PARACHOQUES

Los parámetros que se requieren para correr la simulación son tomados de la prensa en la que se realiza el estampado del parachoques y son los siguientes:

- ✓ Velocidad de estampado = 0.12 m/s
  (Velocidad del punzón, es constante y es de efecto global en el formado).
- ✓ Presión de prensachapas= 65 bar/ vela. Aproximadamente 2000 kg/ cilindro.
- ✓ Presión total sobre el pisador = 40000 kg (40 Tn)
  (Fuerza constante durante todo el proceso de estampado)
- ✓ Espesor = 2mm (Según especificaciones del diseño)
- ✓ Dimensiones= 1765x350 (Según especificaciones de diseño)
- ✓ Coeficiente de fricción = 0.05 (cebo animal).
- ✓ Material= SAE JI 392050 (Chapa de acero común)
  (Las propiedades son: Módulo de Young 206 Gpa,
  Límite de fluencia: 250Mpa, Densidad 7800kg/m^3)

En la figura 5.3 se indica la gráfica esfuerzo-deformación para el acero de la chapa a simular en el software stampack.

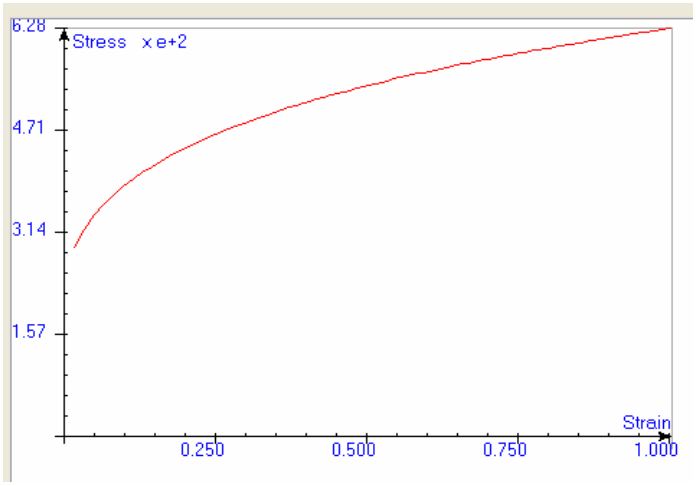


Figura 5.3 Diagrama de esfuerzo – deformación

5.2.1 ETAPA DE PREPROCESO

El conjunto de herramientas se dibujó en el programa Stampack en base a la matríz importada y corregida en el software Solidworks.

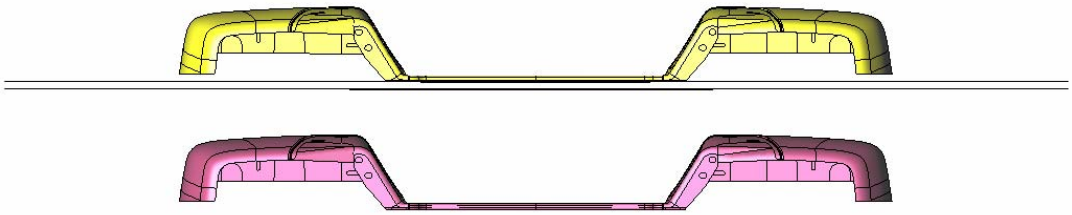


Figura 5.4 Conjunto de herramientas en el software Stampack

Se realiza la visualización de las normales de cada herramienta, para verificar la correcta orientación de las fuerzas que deben estar en dirección a la chapa, (excepto la chapa que va cualquier dirección)

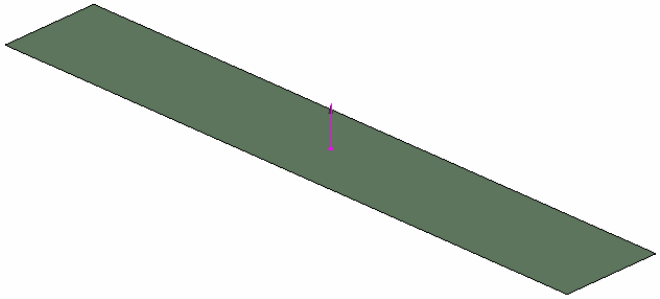


Figura 5.5 Verificación de las normales en la chapa

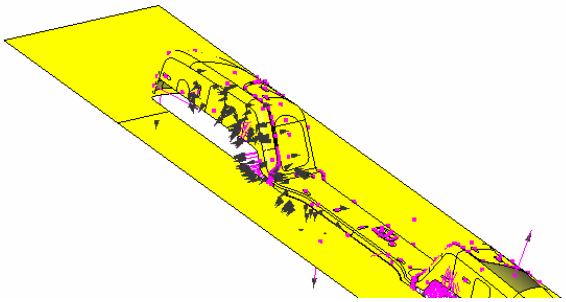


Figura 5.6 Verificación de las normales en la matríz

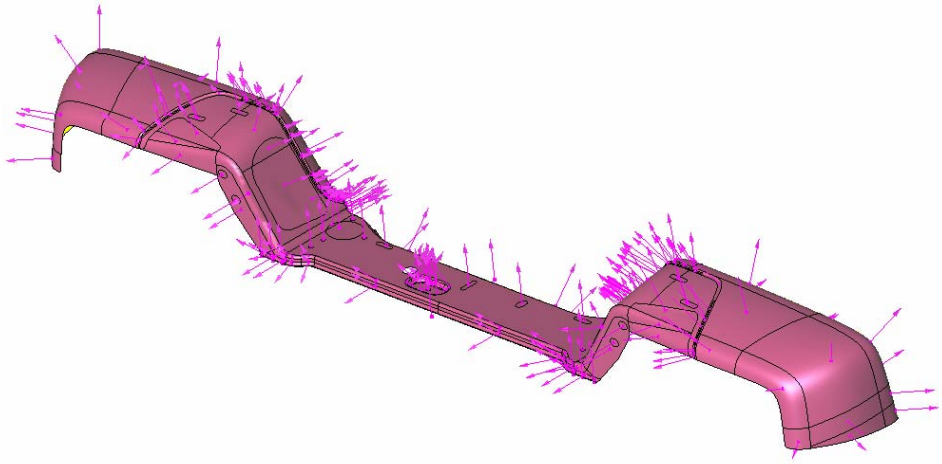


Figura 5.7 Verificación de las normales en el punzón

Una vez realizada la verificación de las normales se realiza el mallado de cada una de las herramientas por la opción: Meshing >*Assing unstruc. Sizes*>*Cordal Error* debido que las superficies no son polígonos regulares a excepción de la chapa que se realiza Meshing >*Assing unstruc. Sizes*> *Surfaces.*

El tipo de elemento son cuadriláteros en todas las herramientas menos en la chapa que es triangular, se asigna el número de elementos de cada lado de la superficie escogida, este número depende del mallado que se quiera obtener, a mayor número de elementos se tiene mayor número de nodos y mayor tiempo de cálculo; el más recomendable es 10.

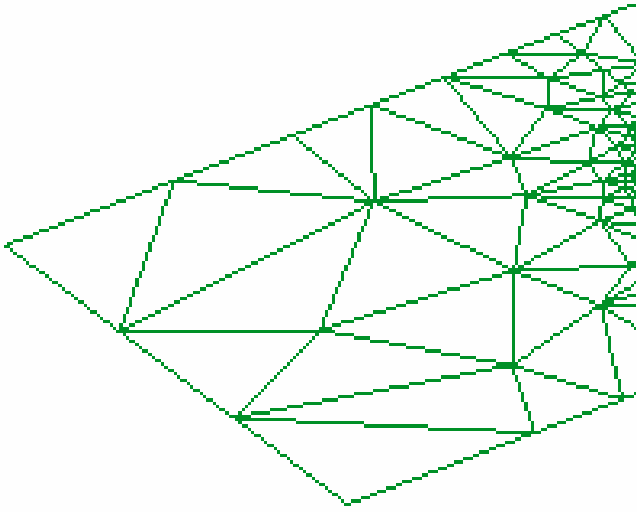


Figura 5.8 Mallado triangular en la chapa

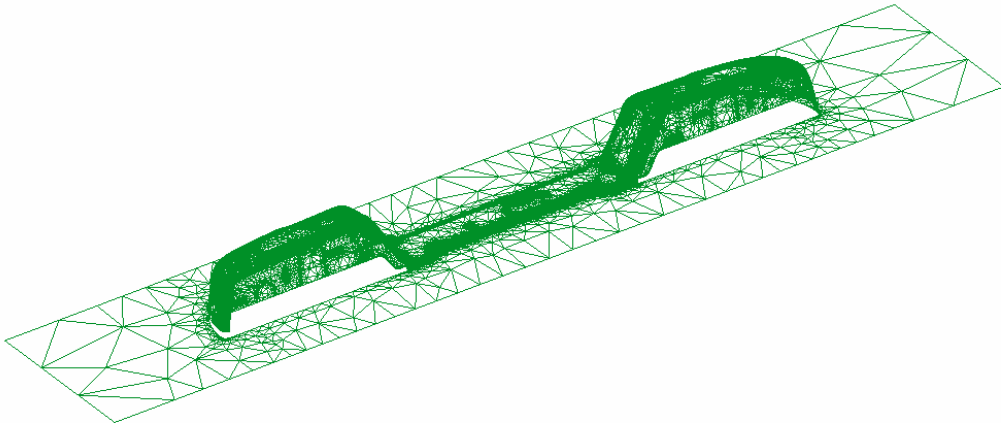


Figura 5.9 Mallado de la matríz

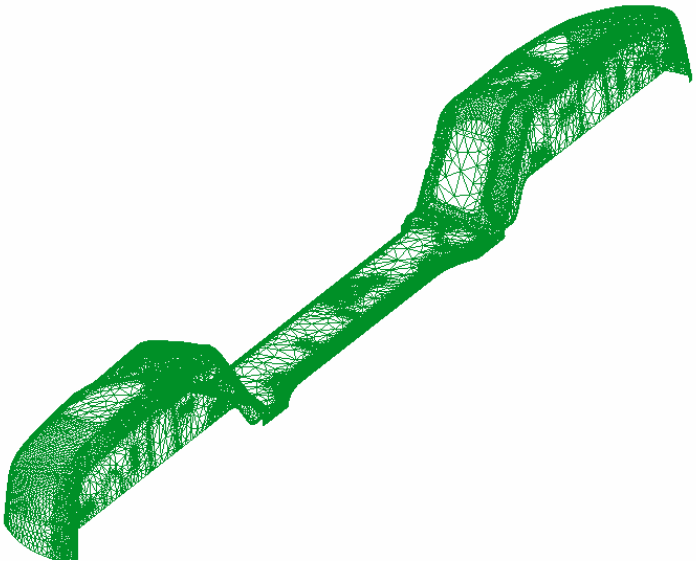


Figura 5.10 Mallado del punzón

El conjunto de herramientas de mallado previo a la etapa de cálculo se indica en la figura 5.11, con la cual se procede a definir el problema, caracterizando las herramientas, definiendo sus propiedades y la operación a realizar en el menú *Workshop*.

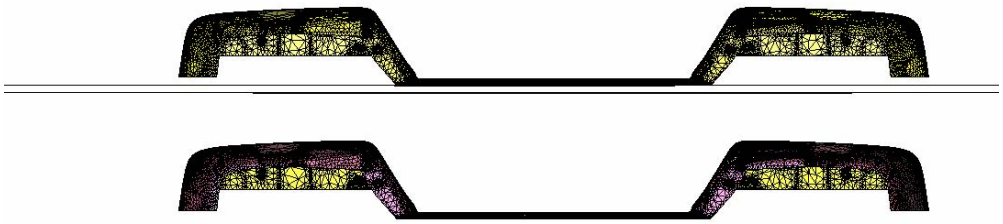


Figura 5.11 Conjunto de herramientas malladas previo a la etapa de cálculo

Finalmente se ingresa en la etapa de cálculo por medio de la opción del menú principal: ***Calculate***, en la que se selecciona dos operaciones Holding que es el pisado y el Forming que es el conformado. Se activa la opcion: *Acurate mode* para que el cálculo sea lo más preciso posible o *fast mode* para acelerar la simulación aunque se pierde la presición pero que se recomienda cuando la simulación es compleja como en este caso.

5.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ETAPA DE CÁLCULO (ETAPA DE POST-PROCESO)

La Figura 5.12 indica la apariencia del modelo del conjunto de herramientas cuando la etapa de cálculo finaliza, en *Workshop >Load results*.

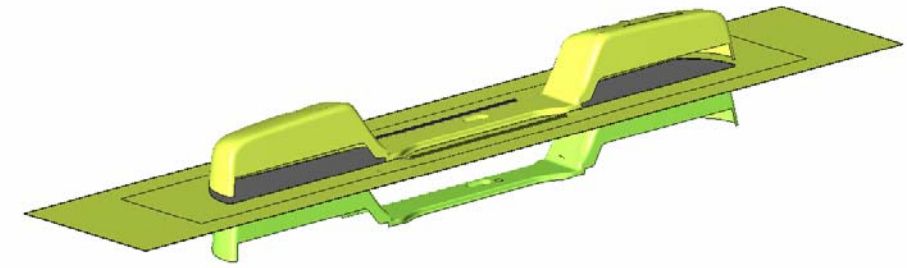


Figura 5.12 Conjunto de herramientas después de la etapa de cálculo

Los resultados solo se puede observar accediendo al post- proceso: *Workshop >View Standard results*, (Figura 5.13).

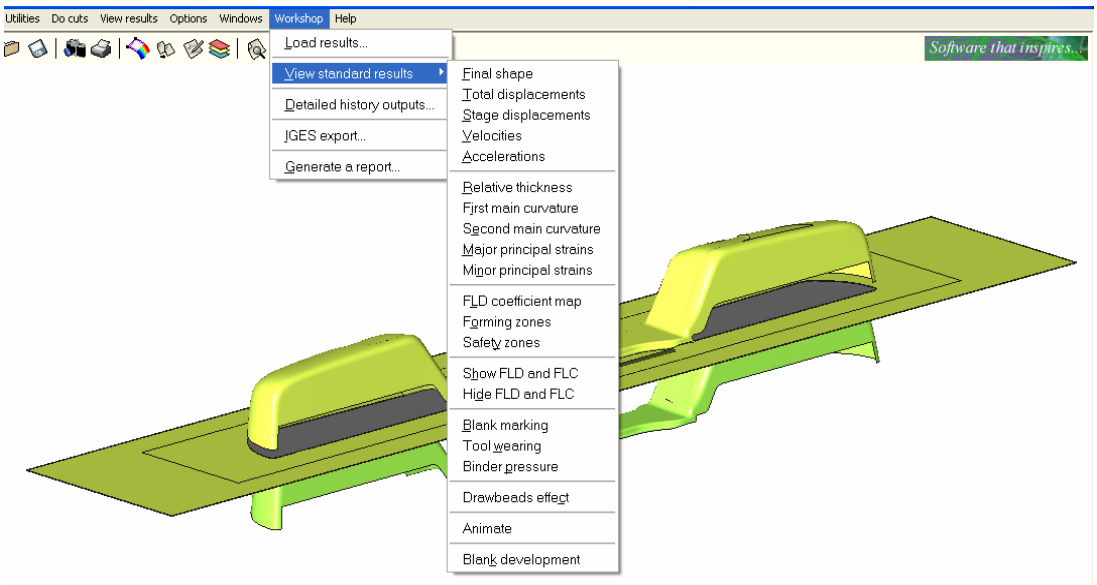


Figura 5.13 Resultados que se obtienen en la simulación del software Stampack

En la Figura 5.14 se indica la forma final del parachoques en la simulación, en el cual se puede observar que tiene una gran similitud con el parachoques que se estampa en el troquel original de la figura 5.2.

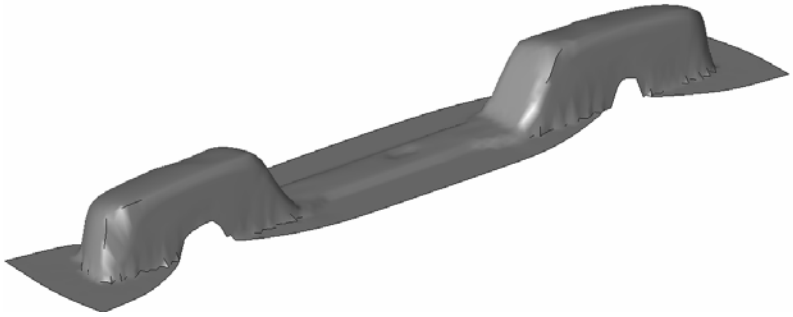


Figura 5.14 Forma final de la chapa luego del cálculo del estampado (FINAL SHAPE)

El software Stampack proporciona gran información en cada uno de los resultados, muestra una gráfica con un despliegue de colores y valores que permite ver e interpretar las zonas de problema que puede tener el elemento estampado en la simulación.

A continuación se indica las figuras de los resultados obtenidos de forma general, para posteriormente **(capítulo VI)** analizar cada una de las figuras de la simulación de una manera detallada en la mitad de la geometría del parachoques, para obtener una mejor visualización de los resultados a ser analizados.

Espesor Relativo (Relative Thickness). Representa la variación del espesor de la chapa.

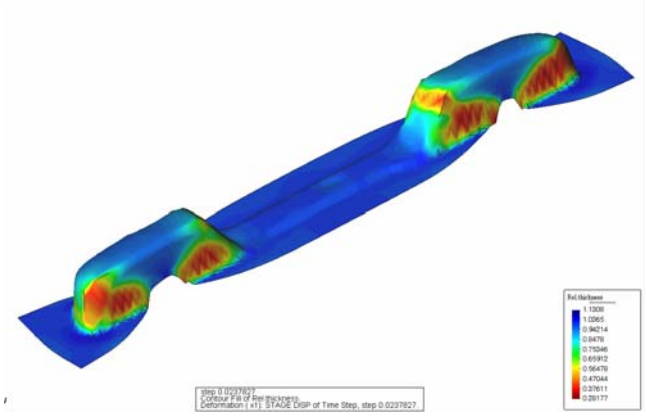


Figura 5.15 Espesor relativo de la chapa estampada

Probabilidad de rotura de la chapa (FLD MAP): Cuantifica la posición relativa del estado de deformaciones respecto a la curva FLD.

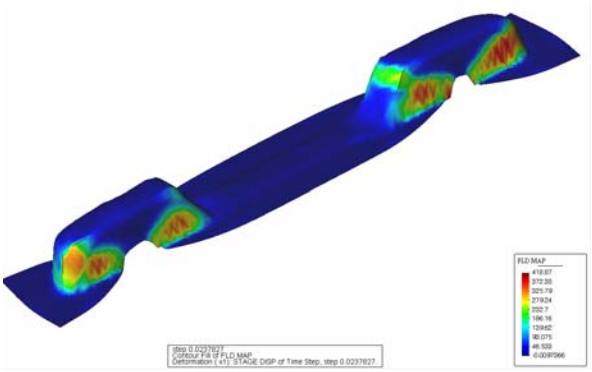


Figura 5.16 Probabilidad de rotura de la chapa

Zonas de seguridad:

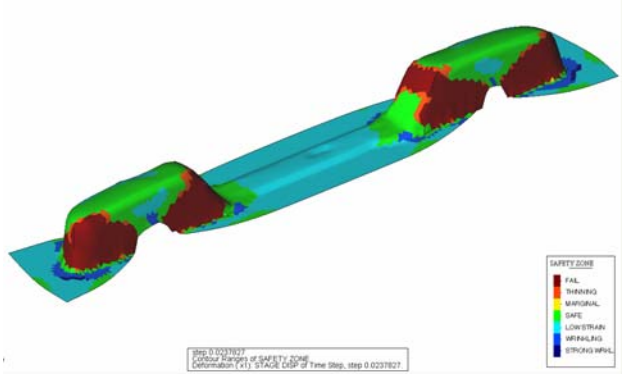


Figura 5.17 Zonas de seguridad

Zonas de formación de arrugas: muestra la calidad de estampado a través de colores que representan arrugas, estiramientos y bajas deformaciones en la chapa.

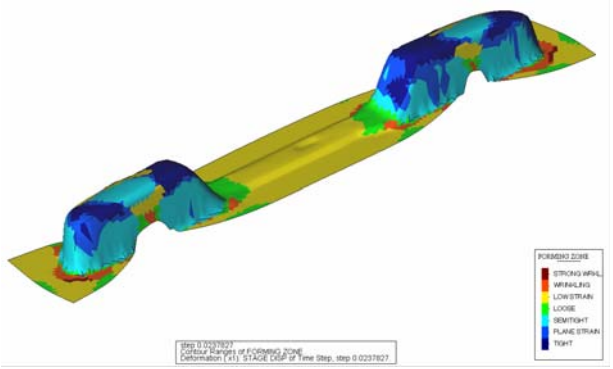


Figura 5.18 Zonas de formación de arrugas

Deformación de la chapa (vista superior): muestra la forma en que la chapa se ha desplazado hacia el interior de la matríz.

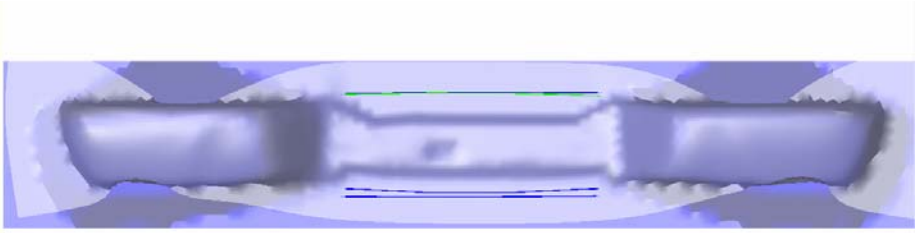


Figura 5.19 Deformación de la chapa

5.3 APLICACIÓN DEL MÓDULO SPRINGBACK IMPLICITO

La simulación en la etapa de Springback se la realiza solo cuando se ha obtenido los resultados de la etapa de estampado, nunca una etapa de Springback puede realizarse sin esta condición.

La función de una etapa de Springback es la de calcular la recuperación elástica de la chapa una vez que ha sido estampada, en donde el resultado de esta etapa será la forma definitiva o final de la chapa.

5.3.1 PRE-PROCESO DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA

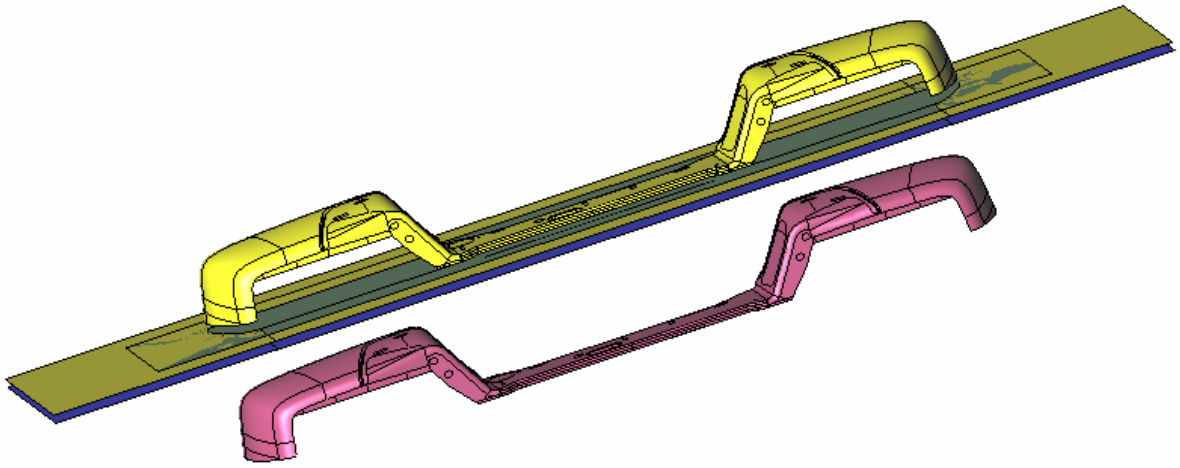


Figura 5.20 Vista Renderizada del modelo para iniciar la etapa del Springback

Para realizar el pre- proceso de la recuperación elástica, primero se debe visualizar en el modo de mallado revisando que no exista errores en el mismo.

Ingresar al Workshop desde el menú de operación:

Worshop > Operation

Se crea una nueva operación utilizando el comando:

Add a new operation

Se ingresa el nombre de la operación a realizar *Springback* y se selecciona el tipo de operación: ***Fast Springback.***

La operación de fast Springback resuelve una simulación casi estática que proporciona la forma final de la chapa sin tener en cuenta efectos inerciales esto implica que es mucho mas rápido que el método explicito y por ello mas recomendable.[21]

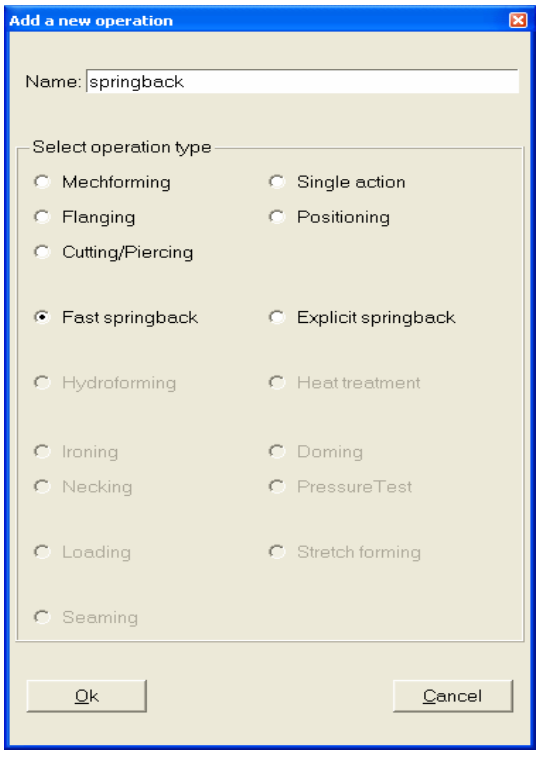


Figura 5.21 Selección del tipo de Springback

Una vez creada la nueva operación, se hace ***clic*** en el proceso *spring* donde aparece la ventana para especificar la caracterización del mismo.

[21] FUENTE: Guía de funcionamiento y descripción de la interfaz gráfica del programa Stampack-Z versión 5.5.3

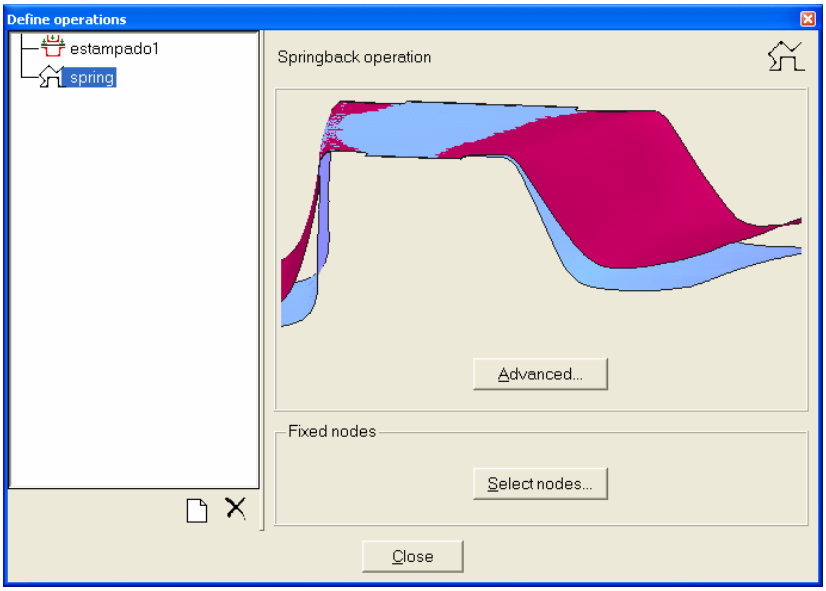


Figura 5.22 Ventana para caracterizar al Springback

Al aplicar el método rápido se obliga a inmovilizar una zona de la chapa. Para caracterizar esta etapa, se debe restringir el movimiento de tres nodos no alineados debido a que la geometría esta en 3D. Antes de seleccionar los nodos que se quieren restringir, se ocultan todos los “layers”, excepto el que contiene la chapa, de lo contrario el programa da error.

La elección de los puntos se realiza con detenimiento pues puede variar la forma final. Hacer *clic* en ***Select nodes***

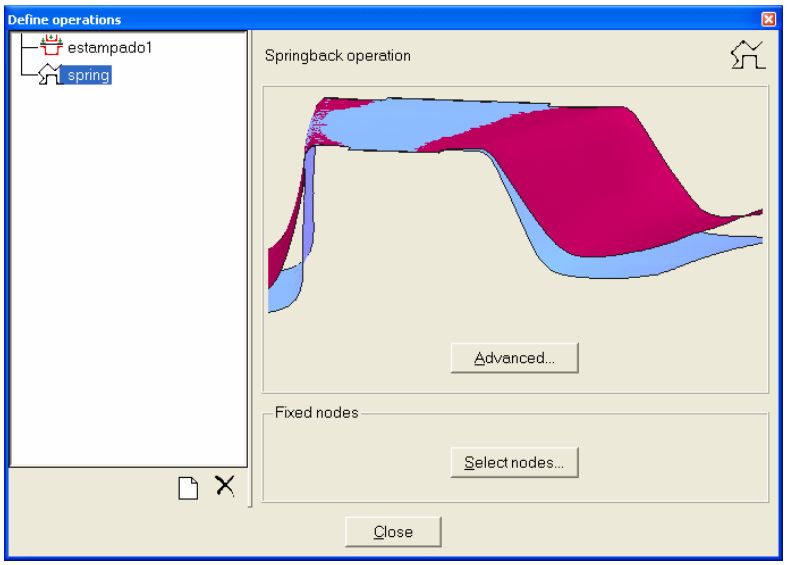


Figura 5.23 Ingreso a la selección de nodos para el Springback

En la sección *Select nodes for Fast Springback*, para seleccionar los nodos de la chapa se hace *clic* en el botón ***Pick node***

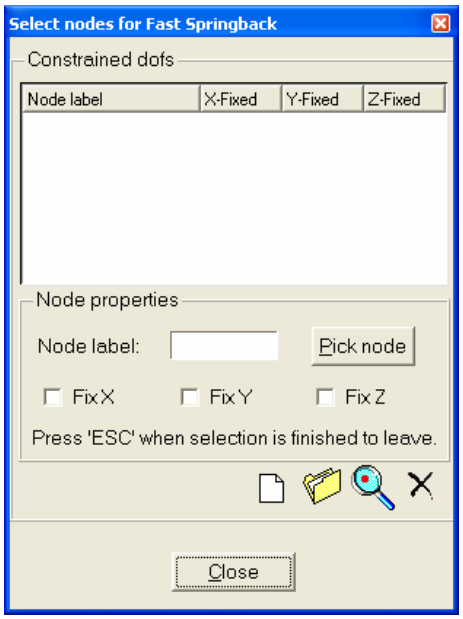


Figura 5.24 Selección de nodos para el Springback

Al seleccionar el nodo, apretar la tecla Esc para hacer efectiva la selección. Luego seleccionar los grados de libertad cuya restricción se quiere imponer y hacer clic en: .

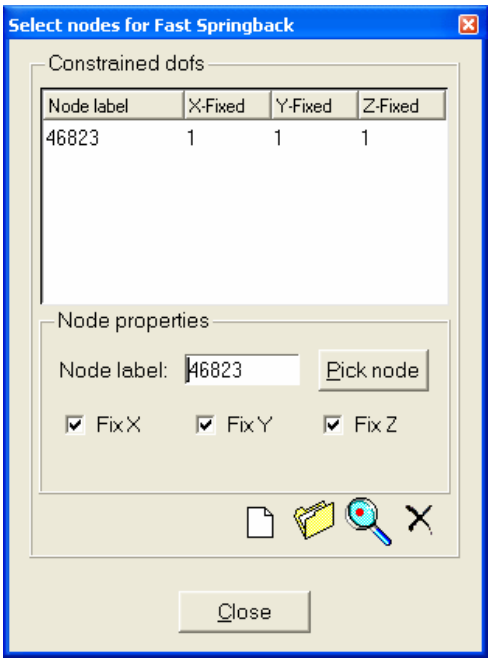


Figura 5.25 Selección de grados de libertar para los nodos

El resultado se observa en un listado donde aparece la etiqueta del nodo y las restricciones impuestas en los ejes X, Y, Z. Se repite el procedimiento hasta que todos los nodos necesarios y sus restricciones de movimiento están metidos en el listado.

Se debe asegurar que se han seleccionado un mínimo de 3 nodos no colineales. Dentro del listado, el valor 1 indica restricción de movimiento mientras que el 0 equivale a libertad del movimiento.

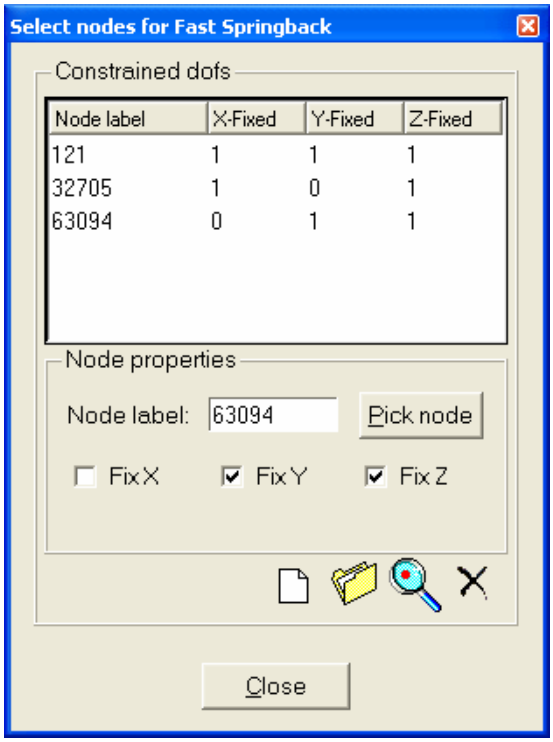


Figura 5.26 Selección de los tres nodos no colineales

Hacer clic en para visualizar y comprobar cada uno de los nodos seleccionados. En el caso de que se quiere eliminar algún nodo de la lista, se selecciona primero dicho nodo y luego se hace clic en .

Para cambiar el tipo de restricción para un nodo de la lista, se selecciona primero dicho nodo, se hace clic en las casillas de las restricciones requeridas y luego se aprieta en para guardar todo y volver a la ventana de operación se hace clic en ***close***.

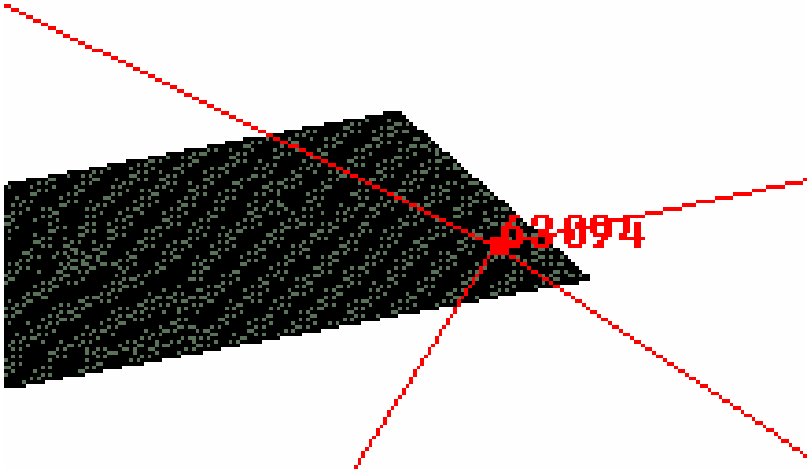


Figura 5.27 Visualización de los nodos en la geometría

NOTA. La selección de los nodos de apoyo se puede escoger en el post- proceso de la etapa previa al Springback, analizando los resultados del estampado se decide sobre la chapa deformada, la localización de los puntos de apoyo, es decir identifica las etiquetas de tales nodos.

Cuando la recuperación elástica de la chapa deformada puede llegar a sufrir una gran deformación. Esta situación puede provocar inestabilidades numéricas. Por lo tanto algunos parámetros avanzados se tendrían que modificar en ***Advanced.***

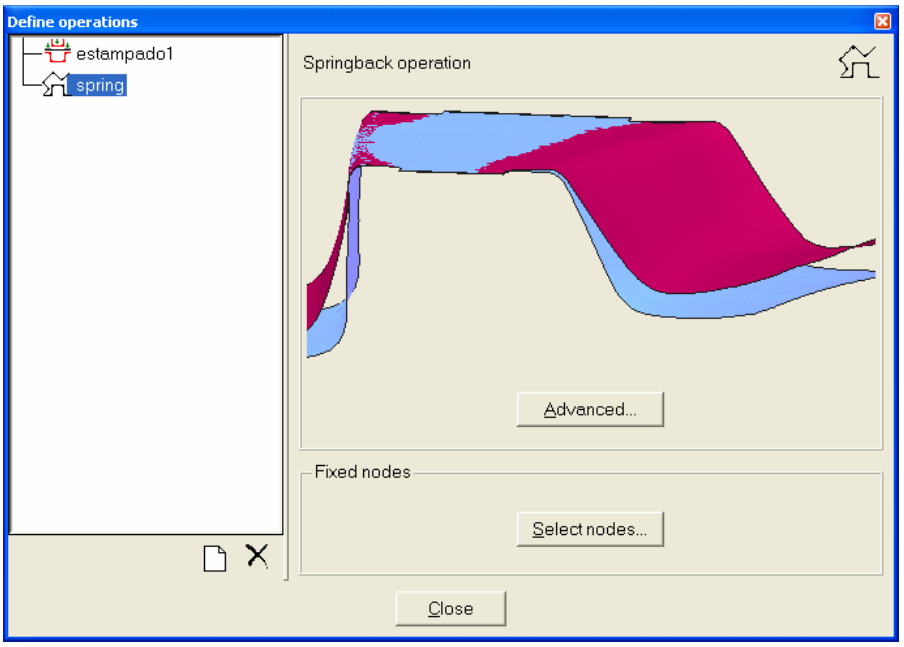


Figura 5.28 Ejecución del Advanced para modificar parámetros

En la ventana *Define advance parameters* se editan los parámetros del método de resolución implícito (considera la recuperación elástica casi estática, proporcionando la forma final de la chapa sin tomar en cuenta efectos inerciales). Por regla general los valores por defecto son validos.

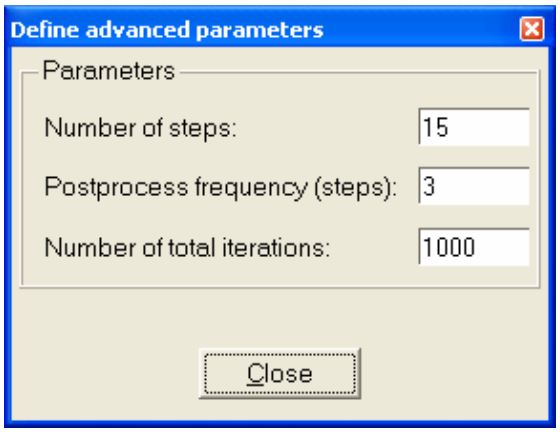


Figura 5.29 Definición de parámetros avanzados

Number of steps: número de pasos utilizados para disipar el potencial elástico. Este valor por defecto es 15 (considerándose el uso del elemento de lámina) pero se puede subir hasta 30, dependiendo si existen problemas en el cálculo.

Postprocess frequency: la frecuencia en pasos de post-proceso para los resultados del Springback. Por defecto se coloca 1 y significa el post-proceso de cada paso. Si en lugar de 1 se da un valor de 2, entonces el post-proceso se efectuar de dos en dos pasos.

Number of total iterations*:* El número máximo de iteraciones dentro de cada paso para mantener el equilibrio. El valor por defecto es 1000 y aunque posible, no se necesita cambiar.

5.3.2 CÁLCULO

Una vez preparada la etapa se puede realizar el cálculo del Springback implícito.

5.3.2.1 CALCULATE

Al hacer clic en ***calculate***, se ingresa a la ventana de cálculo de la simulación ***Calculate the simulación,*** donde se activan las opciones:

- modo de corrido: ***Accurate mode***
- opción de corrido: ***local***

En la selección de operación, Stampack indica sobre las etapas calculadas previamente y se observan en ***Calculated stages*** las dos etapas calculadas anteriormente en el estampado. Se escoge en la selección de operación del Springback que es la etapa que falta calcular.

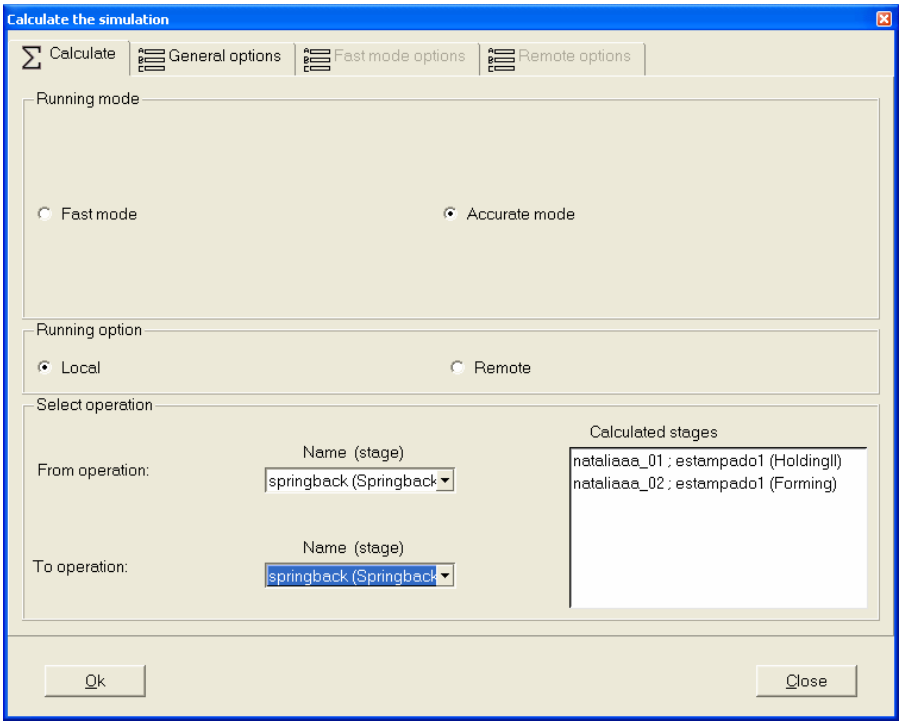


Figura 5.30 Selección de la operación de cálculo

5.3.2.2 GENERAL OPTIONS

Indica los parámetros del corrido de la simulación y selecciona el resultado que interesa en el post-proceso que es el de plasticidad. La velocidad y aceleración no se considera debido a que no es posible observar en la simulación de la operación Springback.

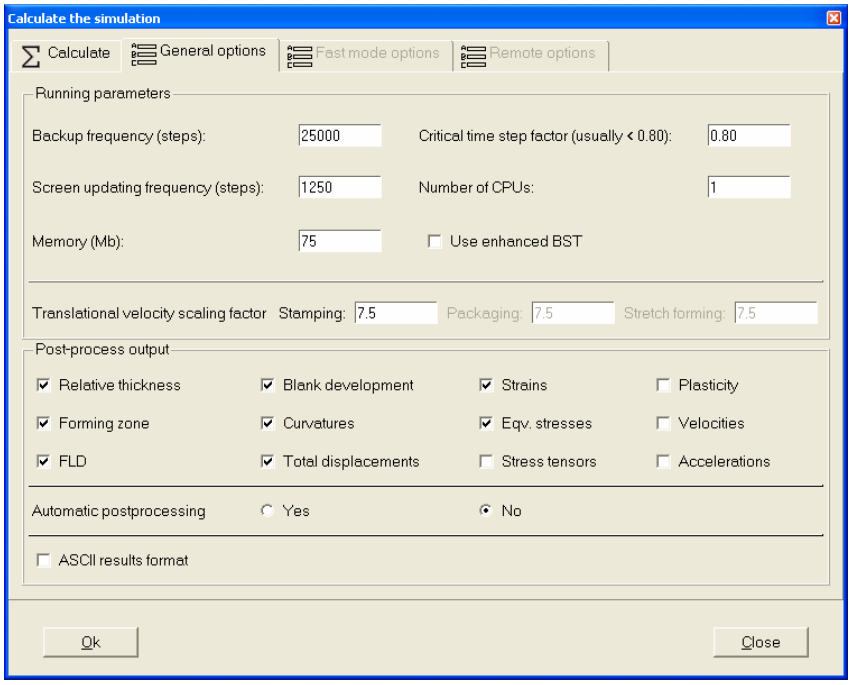


Figura 5.31 Parámetros de corrido de la simulación

5.3.3 POST- PROCESO DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA

Al finalizar la operación de cálculo de la simulación de la recuperación elástica se accede al post-proceso:

Files > PostProcess

Workshop>*Load stages*>*Springback*-*Springback*

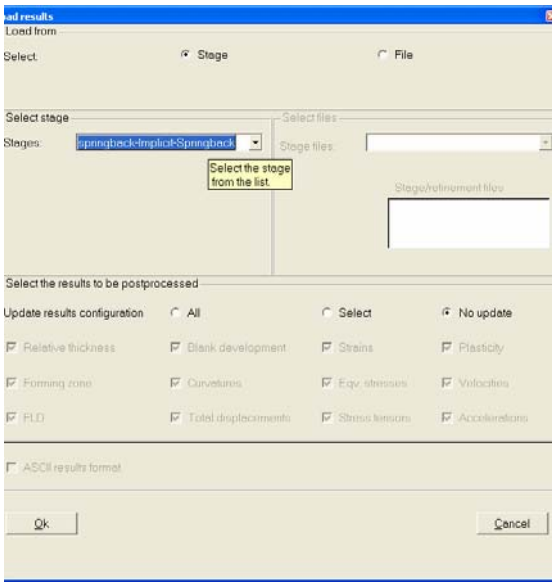


Figura 5.32 Ingreso al post- proceso del Springback

Se visualiza los resultados del parachoques deformado aún sin la recuperación elástica.

Workshop>final shape

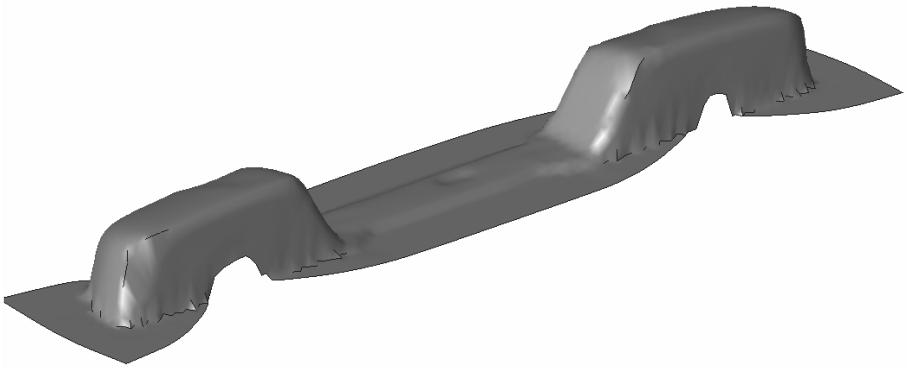


Figura 5.33 Parachoques deformado

En esta etapa de cálculo es importante visualizar conjuntamente la pieza antes del Springback (etapa de forming) junto a su deformada, para así poder apreciar mejor los efectos del proceso.

a) Stampack permite la visualización conjunta de la recuperación elástica final e inicial (después de la etapa de forming). Se debe acceder al menú que controla la visualización de deformada e inicial:

   Windows>deform Mesh

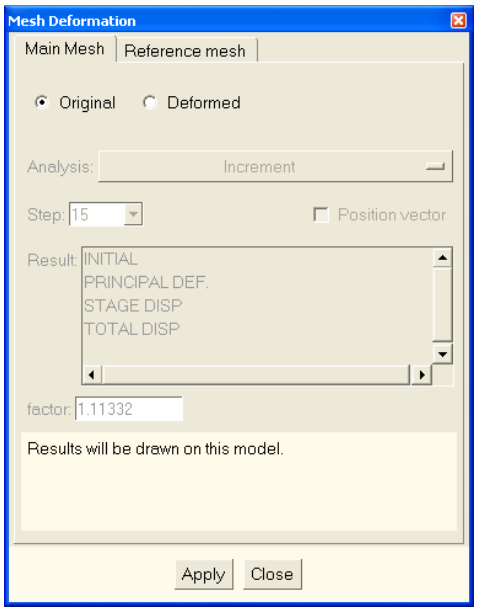


Figura 5.34 Visualización de la deformación del Springback.

b) El menú ***Mesh deformation***, tiene dos zonas: *Main mesh y Reference mesh*

En **Main Mesh** se selecciona el tipo de resultados, en este caso es la deformación del Springback, el programa selecciona automáticamente el análisis incremental (Analisys increment) y *step* 15 que es el numero de análisis que realiza la simulación, y finalmente el tipo de resultado en este caso *Stage Disp.*

Si se desea visualizar mejor la deformación se puede aplicar un factor de escala, solo es necesario cambiar el factor de referencia por el deseado, pero es preferible mantener el factor escogido por el programa, para evitar errores.

En **reference mesh,** malla de referencia, se escoge la original, es decir la malla realizada inicialmente, marcando en *Original.*

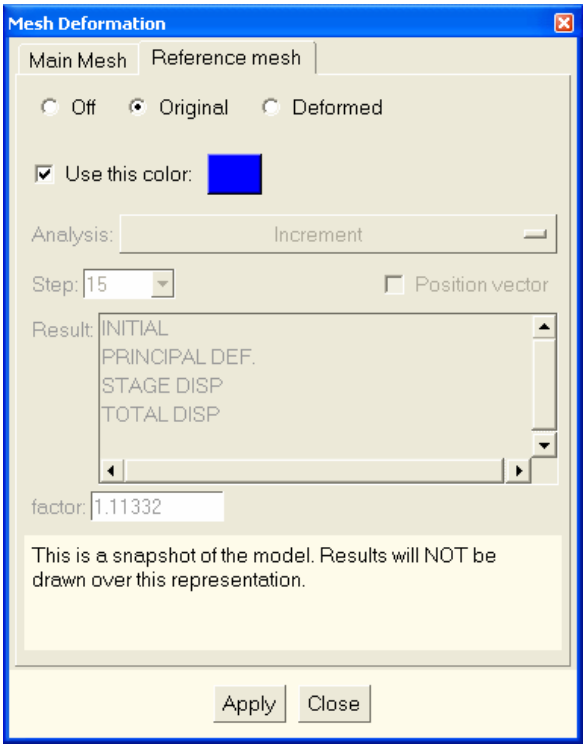


Figura 5.35 Selección de las referencias para la malla de referencia

Al aplicar el postproceso se logra tener la visualización antes y después del Springback en un mismo plano como indica la figura 5.36 donde el color gris es la chapa deformada y lo azul es la recuperación elástica producida en el conformado de la chapa.

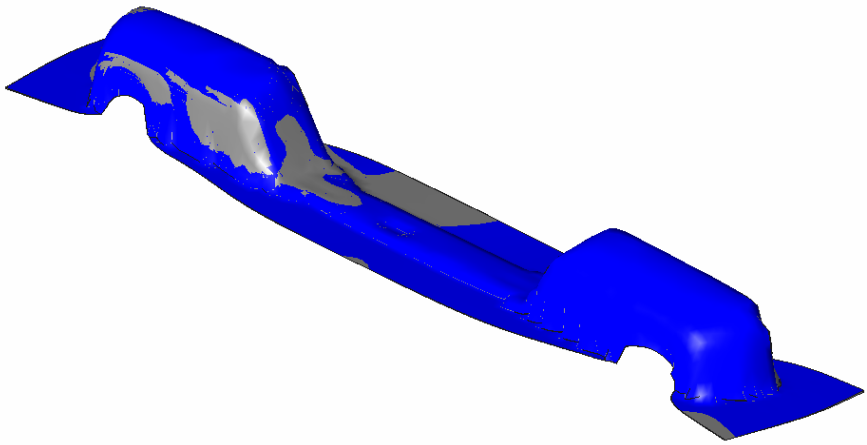


Figura 5.36 Visualización antes y después del Springback

El post- proceso posibilita la exportación en formato IGES del contorno de la chapa y realizar distintas secciones de corte en diferentes ubicaciones a lo largo de la chapa deformada. A continuación se presenta esta última facilidad.

Desde el menú principal seleccionar: **Docuts>Succession**

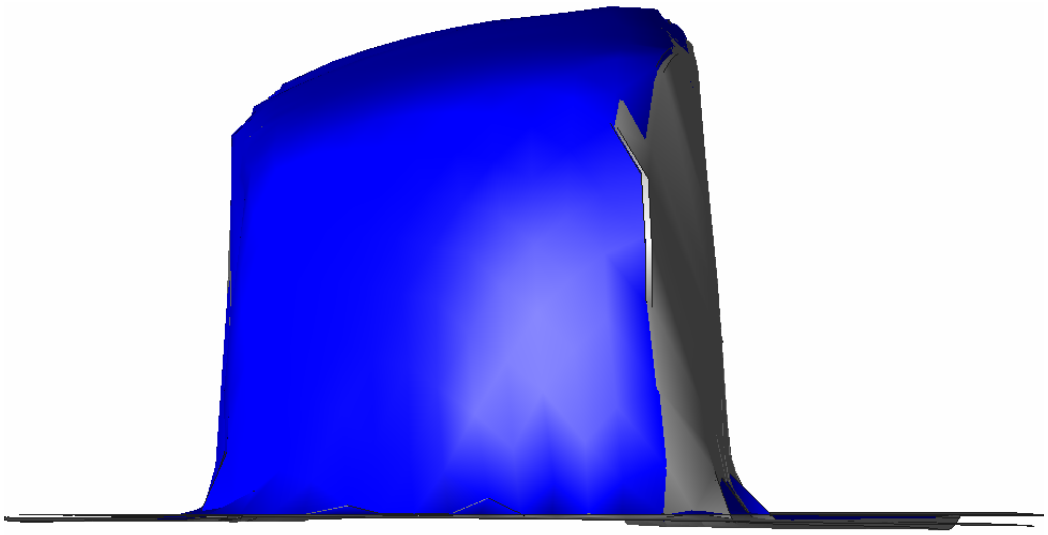


Figura 5.37 Visualización de la inclinación en los bordes por el Springback

Se traza con el mause el eje de referencia, sobre el cual se va a aplicar las secciones deseadas, y se introduce el número de cortes. Si el eje resulta más largo que la chapa, se tienen que contar dos cortes más para cada una de las dos extremidades del eje. Por lo tanto, para conseguir 8 secciones en la chapa introducir el número 10.

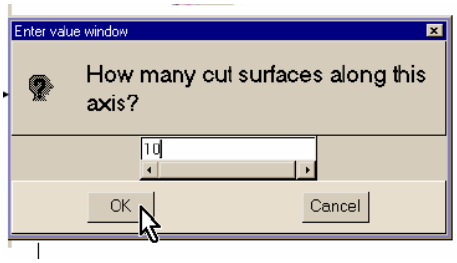


Figura 5.38 Cortes a realizar a la chapa para mejorar la visualización

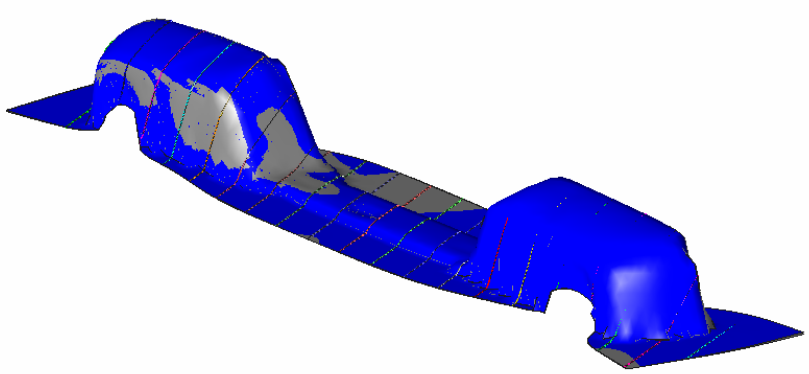


Figura 5.39 Vista de las secciones divididas

Se exporta las secciones desde el menú vertical izquierdo; hacer *clic* en el botón: y aparece una nueva ventana donde se tiene que especificar el corte que se necesita exportar y la escala de unidades deseadas.

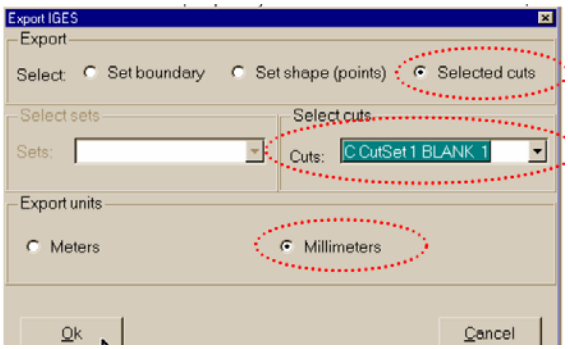


Figura 5.40 Exportación de los cortes al formato IGES

Se exporta en formato Iges. Cada corte a un archivo perteneciente al Stampack y se repite el procedimiento para cada una de las 8 secciones generadas, para luego pasar al preproceso y volver a importar los cortes.

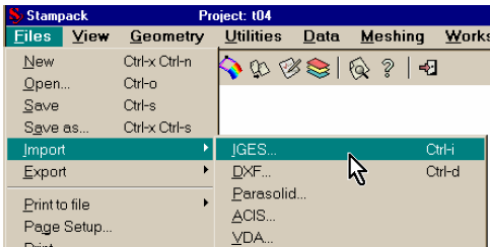


Figura 5.41 Importación de cortes a Iges.

Finalmente se pasa a importar los cortes como indica la figura 5. 41, repitiendo el mismo procedimiento para los 8 cortes, para obtener la visualización de las líneas de corte a través de la geometría y observar la existencia de la recuperación elástica en el material.

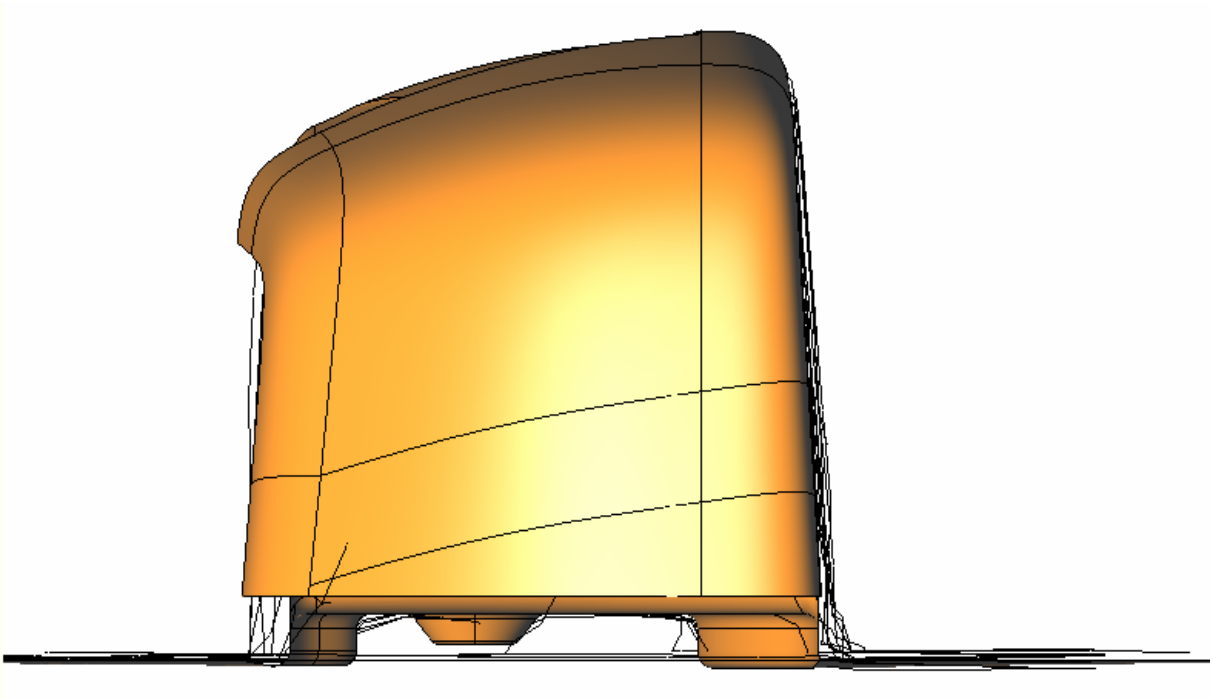


Figura 5.42 Chapa recuperada elásticamente sobrepuesta con la matríz

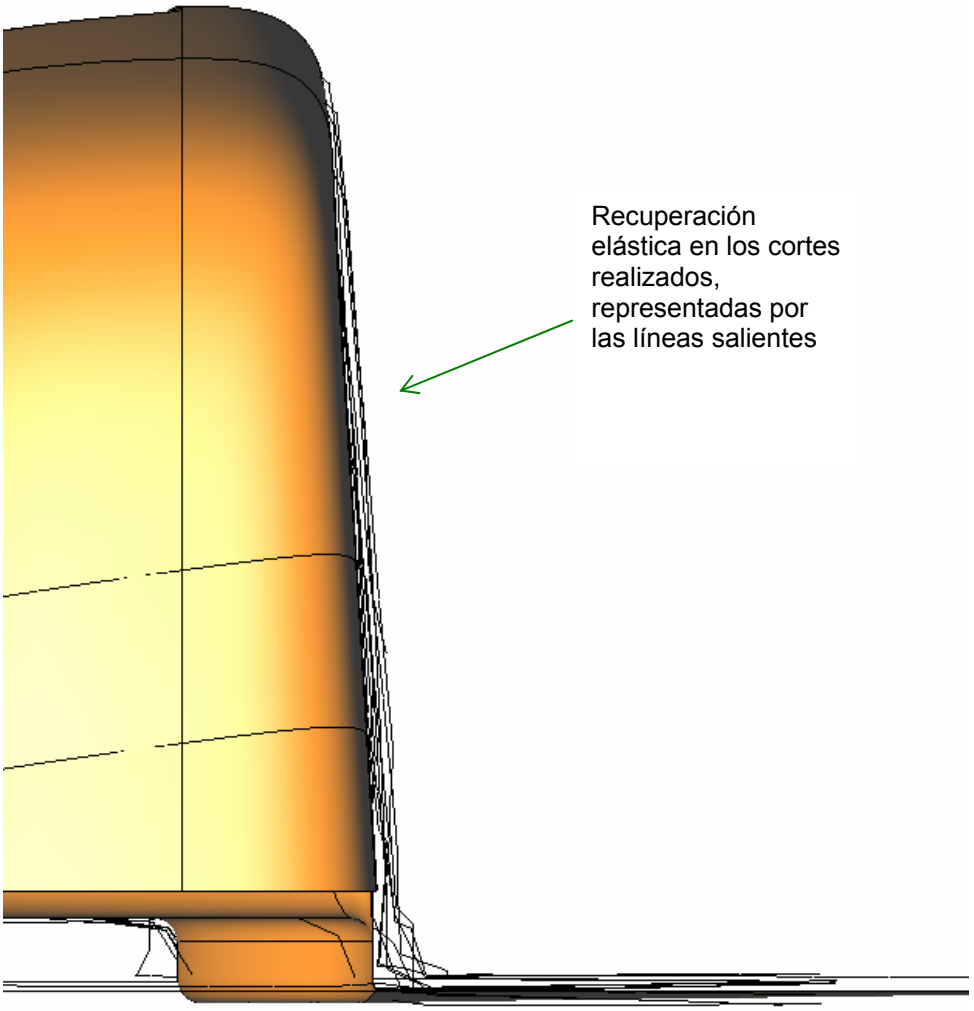


Figura 5.43 Vista de los cortes que son la recuperación elástica en la chapa en conjunto con la matríz

En la figura 5.39 y figura 5.40 se puede ver las líneas de corte que indica la recuperación elástica del material, se puede medir a escala, pero la recuperación elástica en este diseño se produce donde hay desperdicio de material, además se puede pasar al AutoCAD para medir pero es muy complejo, por lo tanto en el Anexo A se realiza una simulación del Springback de una geometría menos complejas para indicar las valores finales obtenidos luego del estampado.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE REDISEÑO

6.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA GEOMETRÍA ORIGINAL DEL PARACHOQUES

6.1.1 RESULTADOS DEL POST-PROCESO

Para analizar los resultados obtenidos y tener una mejor visualización en los nodos, se realiza la simulación del diseño original del parachoques sobre la mitad de la geometría. Los resultados del post-proceso se presentan mediante gráficas de colores para identificar las zonas de posibles fallas, además, se obtienen curvas del desplazamiento y espesor relativo en función del tiempo que tarda la operación del estampado.

6.1.1.1 FORMA FINAL

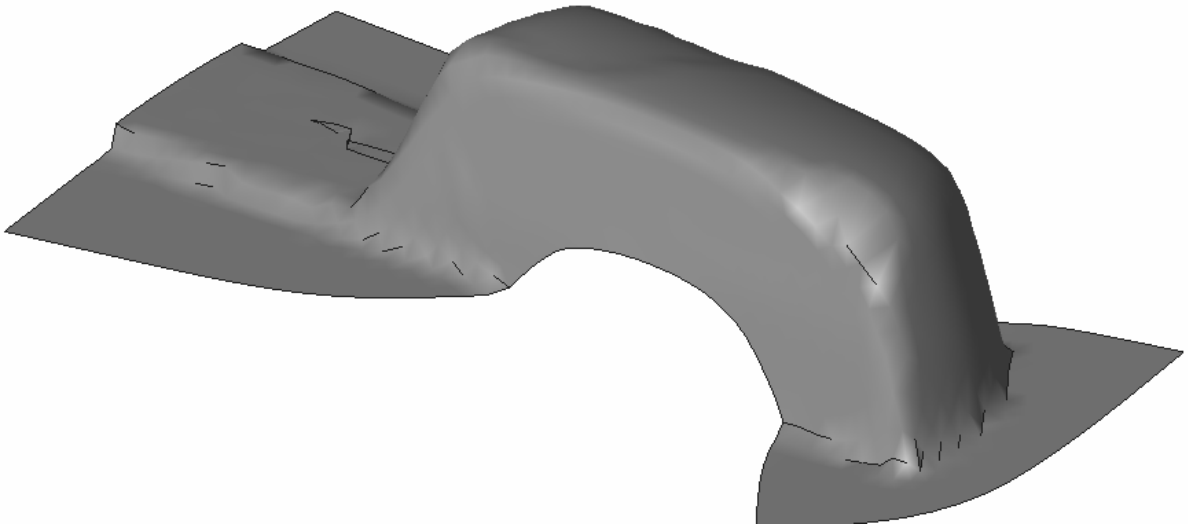


Figura 6.1 Forma final del parachoques

6.1.1.2 DESPLAZAMIENTO

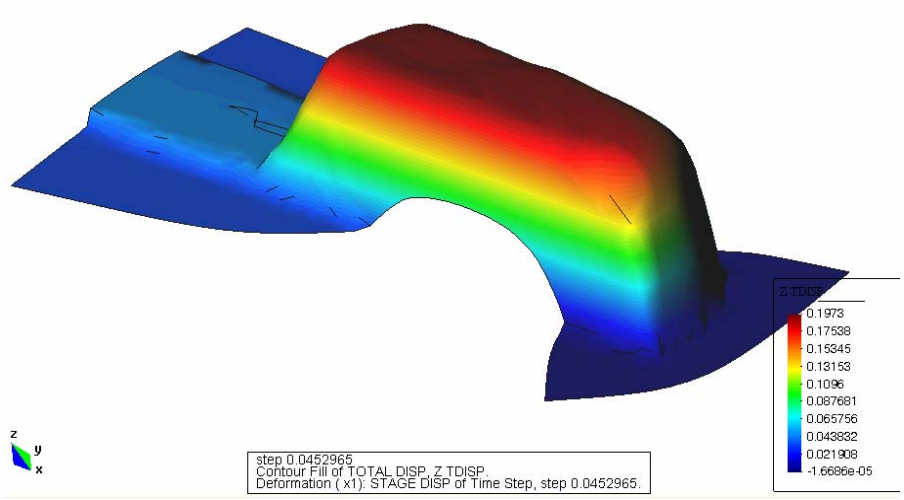


Figura 6.2 Desplazamiento en el eje Z de la chapa estampada

La figura 6.2 muestra el desplazamiento en el eje Z de la chapa estampada, este parámetro muestra que la chapa ha llegado a tocar el fondo de la cavidad de la matríz, ya que el valor máximo de 0.1973m que se muestra en la tabla al extremo derecho de la figura 6.2, corresponde al valor dado para el desplazamiento del punzón introducido en la casilla **stroke**(avance) en la etapa de preproceso, para realizar la simulación durante el tiempo de estampado.

6.1.1.3 ESPESOR RELATIVO

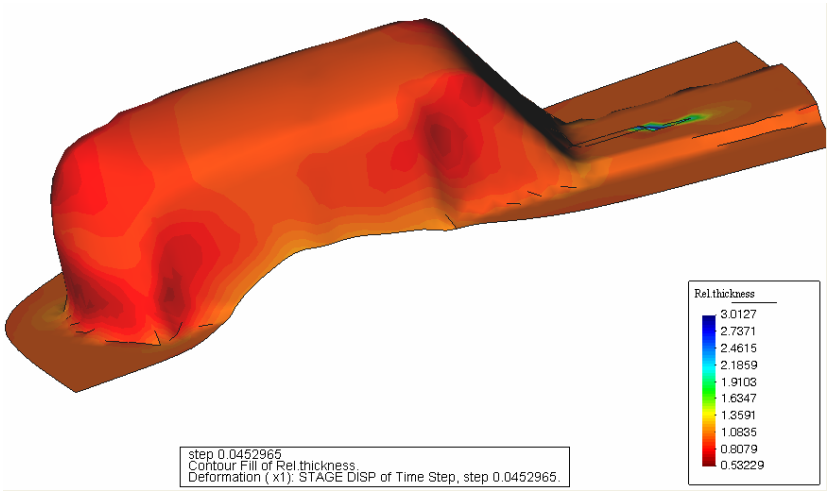


Figura 6.3 Espesor Relativo de la chapa estampada

La figura 6.3 muestra el espesor relativo de la chapa luego de haber llevado a cabo la operación de estampado. El espesor relativo de la chapa llega a un valor mínimo de 0.53 (zona de color marrón), lo que significa que el material llega a tener la mitad de su espesor original, el cual corresponde a las zonas de rotura del parachoques; el valor máximo que alcanza es de 3.01 (zona de color azul) lo que indica que el espesor se incrementa.

6.1.1.4 CALIDAD DE ESTAMPADO

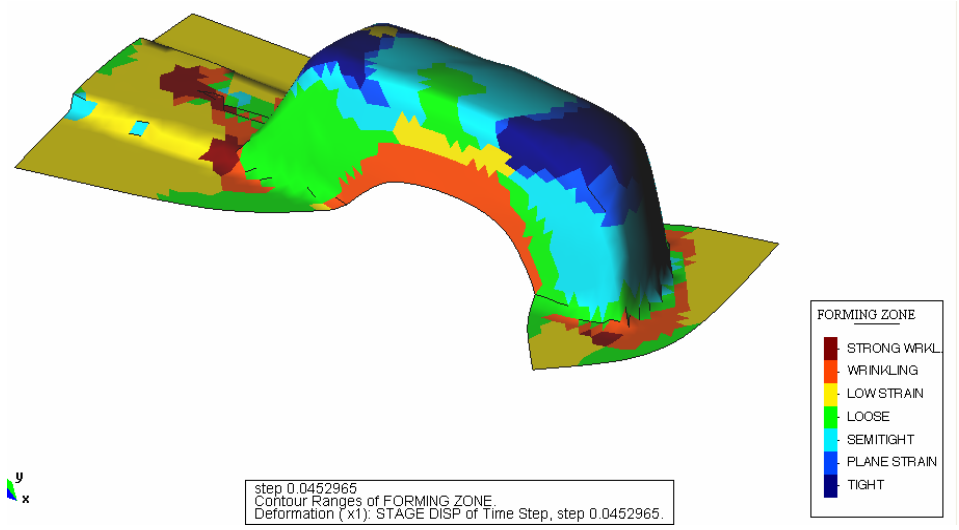


Figura 6.4 Zonas de formación de arrugas, estiramientos y deformaciones

Las deformaciones que se muestran en la figura 6.4 de describen a continuación:

Strong Wrinkling.- Zonas de formación de arrugas severas.
Wrinkling.- Zonas de formación de arrugas leves.
Low Strain.- Las zonas que están sometidas a bajas deformaciones.
Loose, Semitight y Plane Strain.- Son zonas en las que el material tiende a estar estirado en una sola dirección.
Tight.- Muestra las zonas de la chapa estampada que se encuentran fuertemente estiradas.

En este ejemplo se tienen zonas de formación de arrugas (***Wrinkling***) en los contornos del parachoques estampado, esta zona coincide con las arrugas que se muestran en la figura 4.2, así como zonas que se encuentran fuertemente

estiradas (***Tight***), lo cual ayuda a entender el motivo de la rotura que se muestra en las figura 4.2. La arrugas formadas en el estampado son provocadas por la falta de presión en el prensachapas y su rigidez en el contorno impide el flujo de material hacia el interior de la matríz, el punzón sigue su desplazamiento, el material debe seguir deformándose y la única manera es disminuyendo su espesor, para que su espesor disminuya este debe estirarse, el estiramiento producido hace que el material supere el límite de rotura con lo cual el material falla.

6.1.1.5 ZONAS DE SEGURIDAD

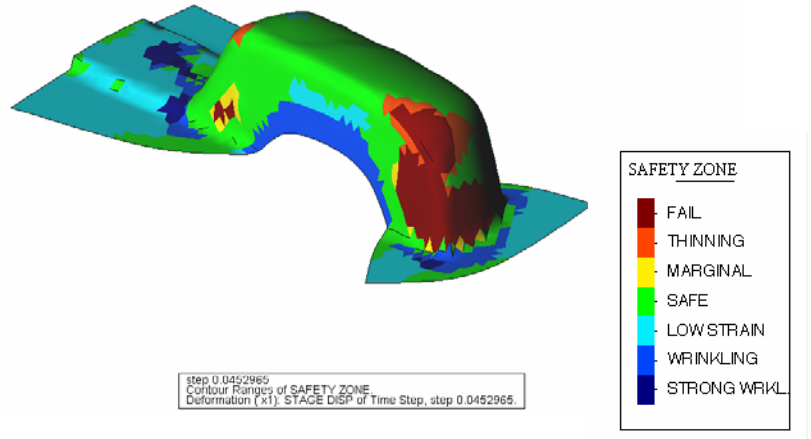


Figura 6.5 Zonas de posible falla del material (Vista izquierda)

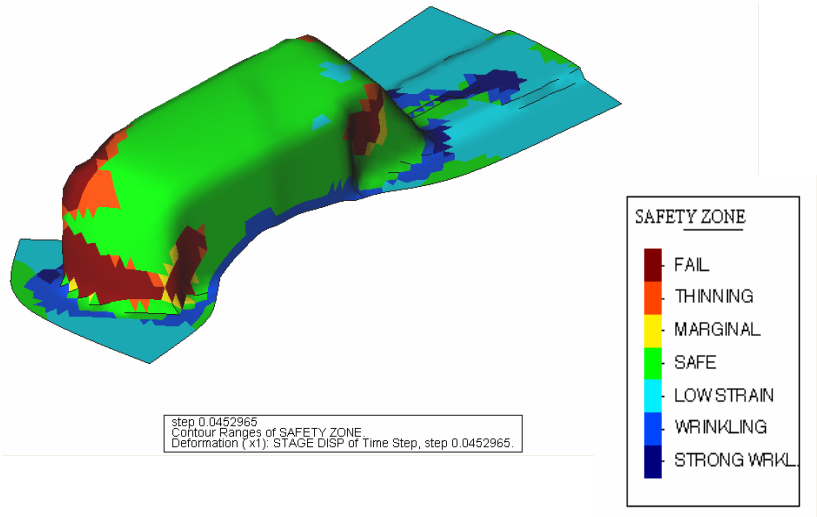


Figura 6.6 Zonas de posible falla del material (Vista derecha)

La figura 6.5 y la figura 6.6 muestran las zonas en las que se pueden tener problemas debido a las deformaciones que ha sufrido el material. Se describe a continuación el significado de cada una de ellas:

Fail.- Muestra las zonas del material que ha superado el límite de deformación, este límite es una propiedad que depende de cada material.
Thinning.- Muestra las zonas en las que la variación del espesor ha sido severa, y se considera como inadmisible.
Marginal.- Cuando el material esta en el límite de deformación.
Safe.- Son zonas en las que el material tiene bajas deformaciones.
Low Strain.- Las zonas que están sometidas a bajas deformaciones.
Wrinkling.- Zonas de formación de arrugas leves.
Strong Wrinkling.- Zonas de formación de arrugas severas, como las que se muestran en la figura 4.2.

6.2 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

El programa entrega un informe de los resultados obtenidos una vez finalizada la simulación del proceso de estampado a través del menú: historial de resultados (history output) de la variable que se requiere analizar, en este caso es muy importante la variación de espesores para analizar las zonas que tienden a estirarse demasiado y por lo tanto a romperse, la figura 6.7 indica mediante colores mas densos las zonas de la geometría simulada donde se tiene problemas.

Se presenta un informe de los valores de desplazamiento, espesor relativo y velocidad de deformación del nodo 3867, en el cual se ve que el valor del espesor relativo es 0.53. Este comportamiento es similar a lo que ocurre en el diseño real, motivo por el cual es necesario plantear alternativas de solución.

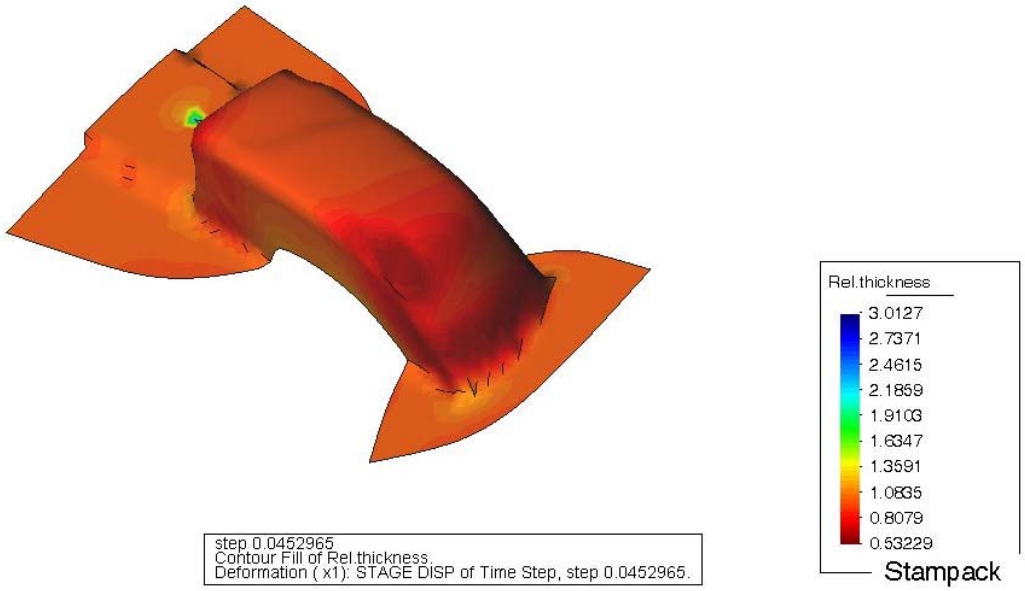


Figura 6.7 Variación de espesores en la geometría original

Project	finalmodify4_03.flavia.bin
Num. nodes	38489
Num. lines	4770 (233)
Num. triangle elm.	75198

Node number	X coordinate	Y coordinate	Z coordinate
3867	0.335503	0.031583	0.145156

Relative thickness	0.532295

CURVATURES

Curv 1	Curv 2	Z-Curvatures	Module
0.0295256	0.0116319	0	0.0317342

INITIAL

X init	Y init	Z init	Module
0.00143138	-9.57412e-07	0.000298499	0.00146217

PRINCIPAL DEFORMATION

E1	E2	E3	Module
0.628533	0.0517297	-0.68026	0.927622

SHELL FORCES

Nxx Stress	Nyy Stress	Nxy Stress	Module
331916	551406	38649.4	644756

STAGE DISPLACEMENTS

X SDisp	Y SDisp	Z SDisp	Module
0.0388706	0.00557289	0.153426	0.158371

TOTAL DISPLACEMENTS

X TDisp	Y TDisp	Z TDisp	Module
0.0374393	0.00557385	0.153128	0.157736

VELOCITIES

X Vel.	Y Vel.	Z Vel	Module
0.300704	-0.0643531	0.174376	0.353513

Las alternativas de solución tienen como objetivo disminuir la deformación que se muestra en la zonas donde se produce la rotura (color marrón) de los resultados que entrega la simulación de la geometría original en la figura 6.7, que resume a las figuras 6.2 que indica el desplazamiento a través del eje z, la figura 6.4 que muestra las zonas de arrugas y las figuras 6.5 y 6.6 que indican donde puede producirse la posible falla, se observa que las graficas coinciden en las mismas zonas criticas, donde existe la rotura por la formación de arrugas y el excesivo estiramiento en el material de la geometría simulada.

Una vez conocido el problema del parachoques se presentan dos opciones:

- Seguir produciendo parachoques con defectos, continuando así con las pérdidas económicas y la posibilidad de perder futuros proyectos de nuestros clientes.

- Asumir la responsabilidad de investigar alternativas que permitan disminuir las perdidas económicas y mejorar la calidad de los productos.

Ante la segunda opción se dan dos alternativas que puedan dar solución al problema de una manera accesible a la empresa, en función de las especificaciones del cliente.

Las alternativas son:

- Realizar un modelo que reemplace en su totalidad al existente.
- Estudiar la posibilidad de hacer mejoras sobre la matríz de estampado actual.

6.2.1 PRIMERA ALTERNATIVA

Pisador Ondulado y Nueva Matríz

Considerando que se tiene demasiado material deformado en el la cara lateral y en la cara plana, la alternativa planteada es crear una matríz en la que la chapa

metálica adopte el perfil del cuerpo central con el objetivo de tener sujetado al material durante el tiempo de estampado. La figura 6.8 muestra la geometría de la nueva matríz de estampado del parachoques creada en el software SolidWorks.

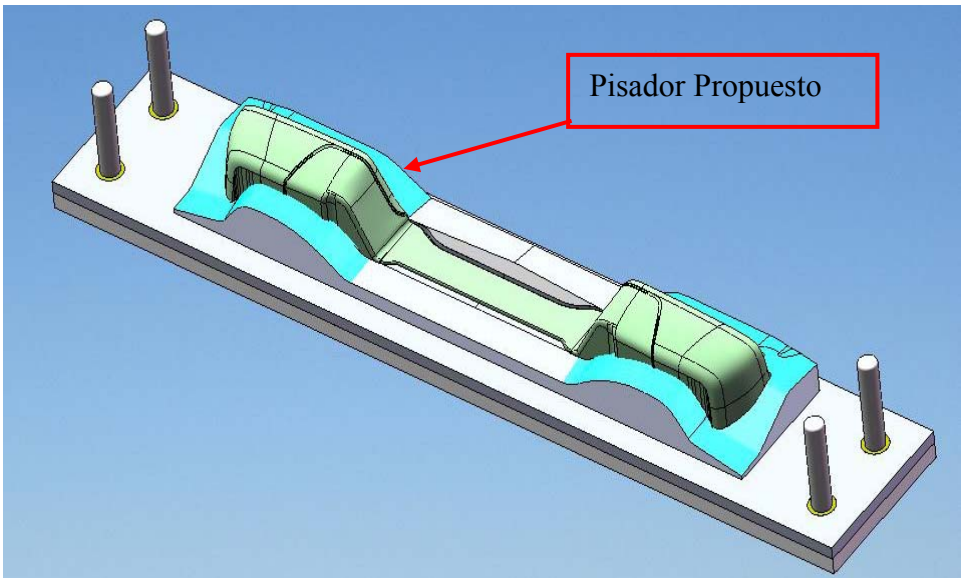


Figura 6.8 Pisador Ondulado

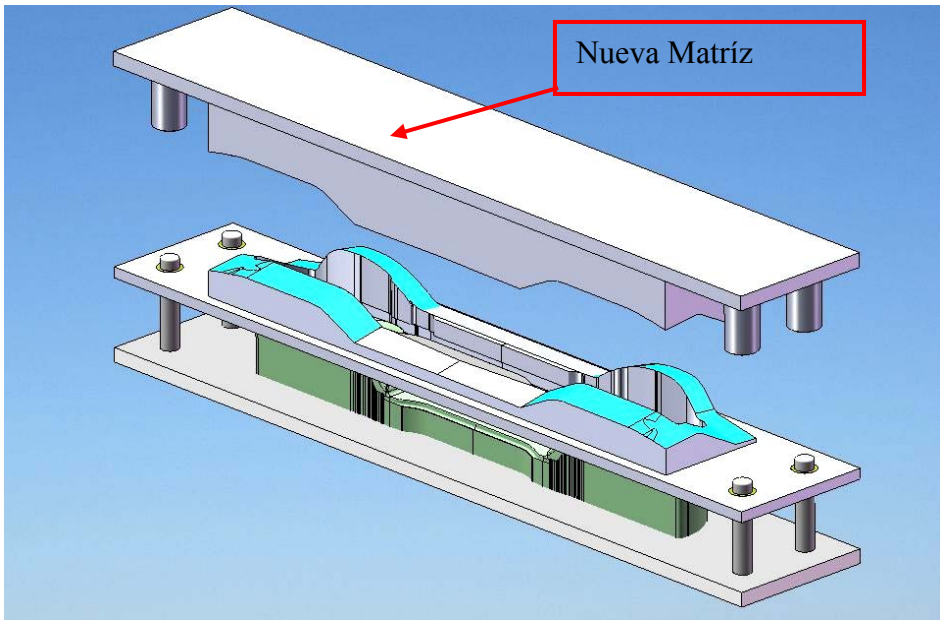


Figura 6.9 Troquel con el pisador nuevo

De acuerdo a la forma que se da a la chapa es necesario fabricar completamente un pisador y una matríz, lo cual implica altos costos de material y de tiempo de maquinado. Los detalles de los costos se adjuntan en el anexo B, no se elaboran

planos de la nueva matríz, sin embargo en el anexo C se adjuntan las dimensiones generales del modelo, ya que se utiliza el software Solidworks para elaborar el diseño, a través de este software se crean cada una de las partes como sólidos independientes y posteriormente se crea un nuevo archivo en el cual se ensamblan cada una de las partes que conforman el troquel de estampado, una de las ventajas de realizar diseños mediante sólidos es que se puede añadir propiedades a los diferentes materiales que conforman el troquel, para el caso del troquel de estampado del parachoques el material a usar es el acero A - 36, con lo cual el software Solidworks calcula el peso de cada componente del troquel, de ésta manera es muy fácil predecir el costo de la materia prima multiplicando este peso por el precio que tiene el acero en el mercado, también se considera el costo del maquinado de cada una de las piezas, este valor también se puede calcular haciendo la simulación del maquinado mediante el software de las maquinas de control numérico(CNC), de la simulación del maquinado se obtiene el tiempo que tardará la máquina en realizar la operación, este tiempo se multiplica por el costo de la hora de trabajo de la maquina, la suma de ambos costos permite tener el costo total de fabricación de la matriz de estampado.

6.2.2 SEGUNDA ALTERNATIVA

Pisador Plano

La segunda alternativa consiste en modificar la forma del pisador existente, debido a que no involucra demasiados costos y tomando en cuenta el tiempo que se puede tener disponible en el taller de maquinado para modificar la matríz de estampado. Esta modificación incrementa el espesor de las partes móviles de las placas que sostienen al material en el momento del estampado.

En las figuras 6.10 y 6.11 se muestra la modificación con las placas añadidas en el pisador y la matríz respecto a los originales que se indican en la figura 4.1. El objetivo de añadir dos placas en los lados es disminuir la profundidad de estampado en la cara lateral y plana del parachoques, reduciendo de esta manera la deformación innecesaria que sufre el material en esta zona.

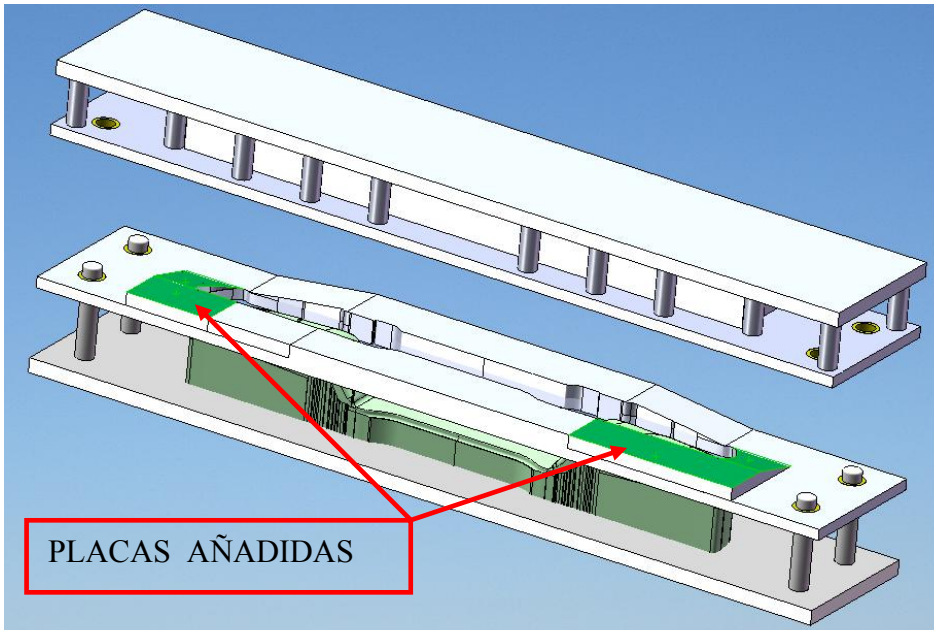


Figura 6.10 Troquel de estampado modificado (Placas en el pisador)

De esta manera el trabajo que se hace es realizar los planos de las placas que se montan en el pisador y en la matríz, con lo cual el tiempo de maquinado y los costos de materia prima son sumamente mas bajos. Los datos de los costos de la segunda alternativa se presentan en el anexo B y los planos de los cambios realizados se adjuntan en el anexo C.

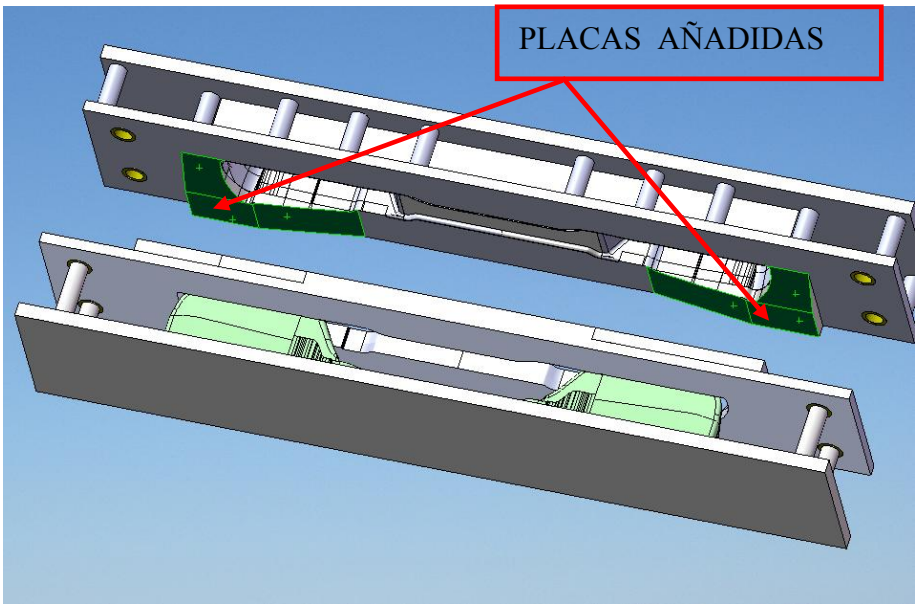


Figura 6.11 Troquel de estampado modificado (Placas en la matríz)

6.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA MEJORAR LA SIMULACION CON PLACAS AÑADIDAS

La forma propuesta para la mejora del parachoques considera la disminución de la altura H estampada mostrada en la figura 4.3, la cual hace que el material no se deforme innecesariamente, los resultados obtenidos serán comparados con los resultados de la simulación de parachoques original y para ello se ubicarán los nodos en las mismas zonas de la simulación anterior.

Se puede observar en el Anexo B que el costo de la primera alternativa (pisador curvo) es de 8.495,98 USD y el costo de la segunda alternativa (pisador con las placas añadidas) es de 3.492,86 USD, lo que demuestra que la mejora seleccionada es muy económica en relación a la primera alternativa.

6.3.1 FORMA FINAL

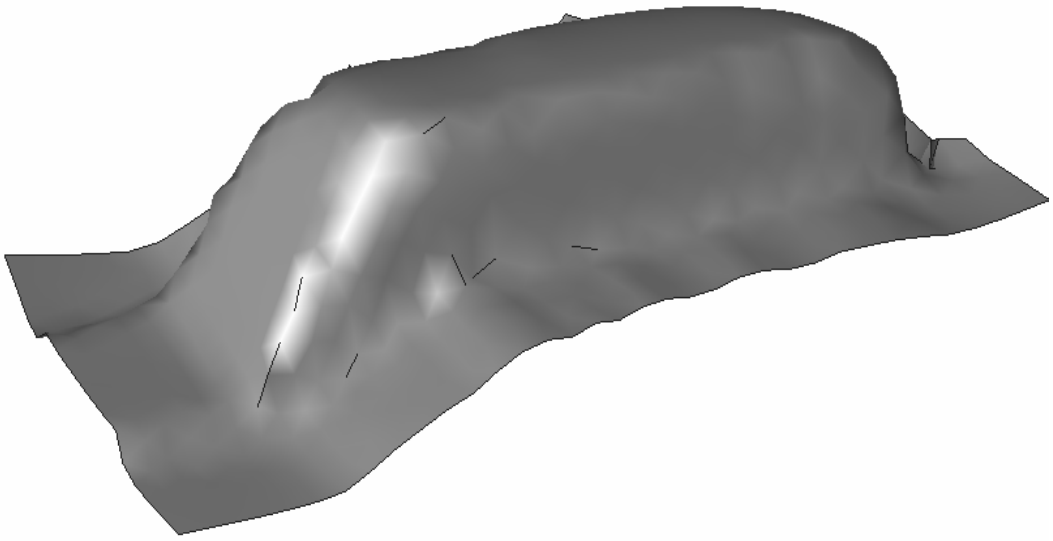


Figura 6.12 Forma Final de la Geometría

6.3.2 ESPESOR RELATIVO

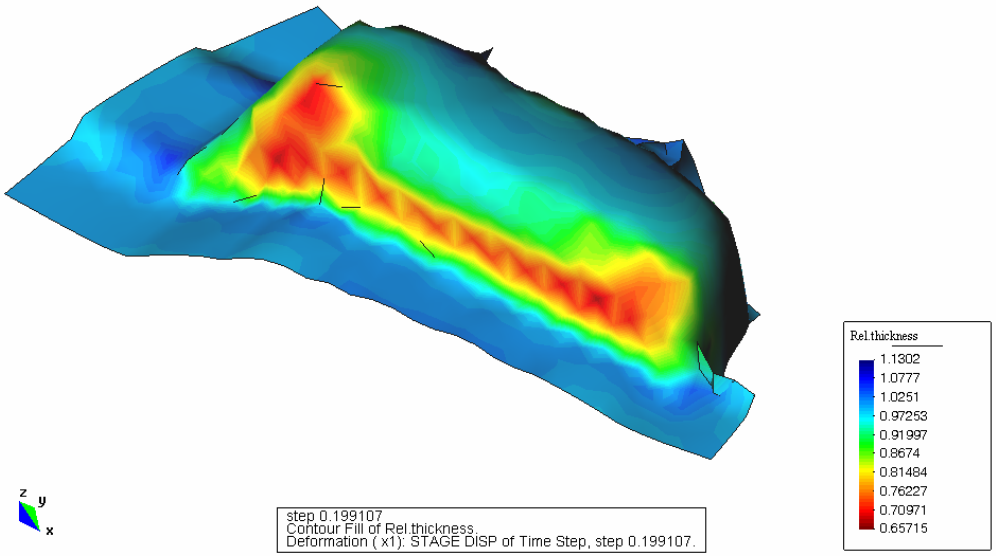


Figura 6.13 Espesor Relativo de la chapa estampada propuesta

La figura 6.13 muestra los resultados de la simulación de la geometría planteada como alternativa de solución, se tiene un valor del espesor relativo mínimo de 0.65 y 1.13 como valor del espesor relativo máximo, con respecto al espesor relativo del estampado original mostrado en la figura 6.3, el cual es de 0.5, esto significa una mejora considerable en el espesor final de la chapa.

6.3.3 CALIDAD DE ESTAMPADO

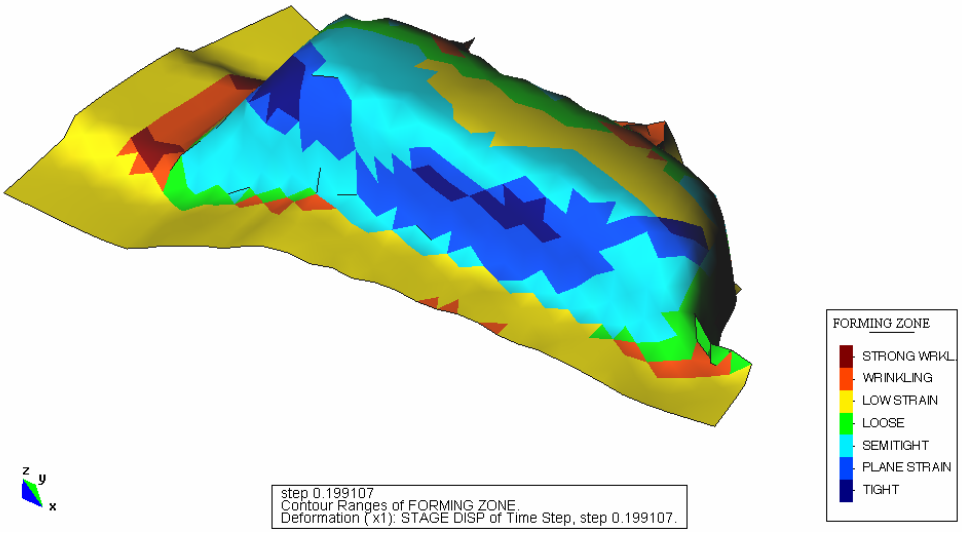


Figura 6.14 Zonas de formación de arrugas, estiramientos y deformaciones

La figura 6.4 muestra una zona altamente estirada (***tight***), lo cual contrasta con la figura 6.14 ya que en esta no se presentan zonas altamente estiradas, la chapa en este caso se encuentra en la zona de bajas deformaciones, con lo cual se ve que la alternativa planteada ha mejorado el estampado del parachoques.

6.3.4 ZONAS DE SEGURIDAD

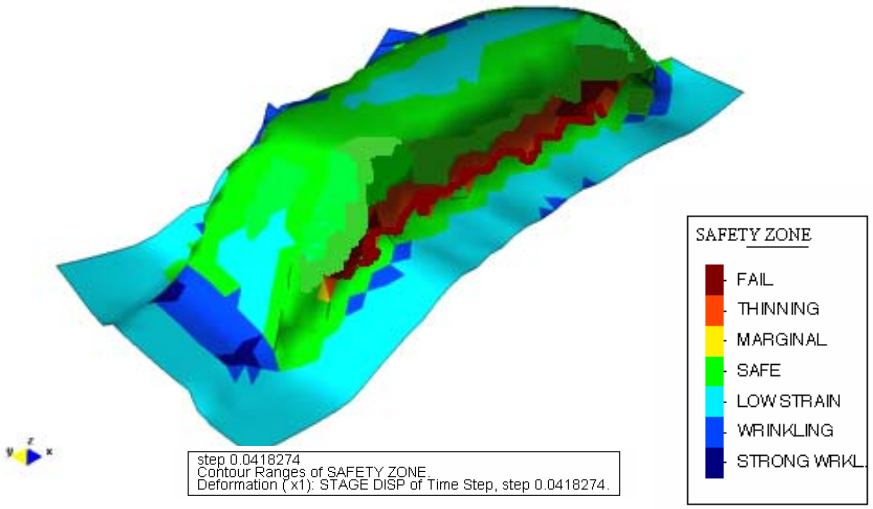


Figura 6.15 Posible falla del material en la geometría planteada

La figura 6.15 muestra pequeñas zonas marcadas con THINNING lo que significa que están estiradas pero no llegan a ser un peligro para el producto final estampado, las demás zonas se encuentran seguras.

6.3.5 DESPLAZAMIENTO

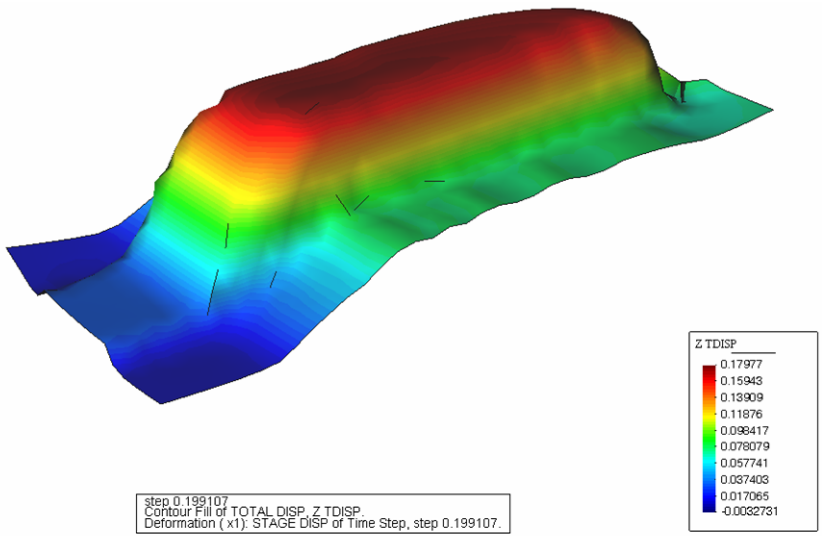


Figura 6.16 Desplazamiento total la geometría planteada

La figura 6,16 indica el desplazamiento de la geometría donde los niveles de colores representa las posiciones a las que a llegado la chapa durante el proceso de estampado, el material que se encuentra en la zona de color rojo se ha desplazado 179,7 mm, el material que se encuentra en esta zona tiene mas probabilidades a estar sometida a fuertes estiramientos, la zona amarrilla y verde indican que partes de la chapa estampada se han desplazado hasta la mitad del recorrido total del punzón. Los niveles de color azul representan las zonas donde el material no se desplaza y por lo tanto estas zonas no se estiran.

6.4 COMPARACION DE RESULTADOS

INTERPRETACION DE LAS CURVAS OBTENIDAS

El software Stampack en la etapa post-proceso ofrece la posibilidad de mostrar los resultados respecto al tiempo de los siguientes parámetros: espesor relativo y los desplazamientos a partir de gráficos. Estas variables son nodales, por lo que la variable histórica que se grafica es la de un nodo que se escoge según la sección de la geometría simulada que se busca analizar.

La simulación en el software Stampack con parámetros reales requiere un número de pasos muy elevados y en consecuencia también los tiempos de cálculo son elevados, lo que significa que los procesos de estampado actúan a velocidades relativamente bajas. El software Stampack ofrece la ventaja de disminuir este tiempo de simulación sin afectar los resultados; al definir las operaciones a realizar durante la etapa de preproceso, donde se introduce una solución equivalente para reducir tiempos de cálculo reduciendo la duración de la simulación. En este caso el valor de la velocidad real en el estampado es de 0.1 m/s, pero se utiliza un valor de 1m/s al definir los parámetros para la simulación en el formado, por lo que también disminuye el tiempo significativamente sin afectar en los resultados y economizando tiempo de CPU.

Para realizar este análisis se toman como referencia diferentes nodos de las diferentes caras de la geometría para observar el comportamiento del material en

las áreas críticas. Se obtiene una curva que indica el comportamiento de la variable durante la simulación en el contorno del nodo seleccionado a través del tiempo para la simulación del parachoques estampado.

Se obtienen curvas combinadas para utilizar como parámetro el desplazamiento en lugar del tiempo, comparando de mejor manera los resultados obtenidos y tener la seguridad de que la alternativa de solución es viable en el diseño.

6.4.1 FINAL SHAPE (FORMA FINAL)

En la forma final del parachoques estampado se describe los excesos de material, los recortes que se deben realizar en el material y la forma que tiene el parachoques terminado. La figura 6.17 muestra la forma final del parachoques original luego de haber terminado la simulación, aquí se muestra el parachoques con todos los excesos de material, estos excesos son recortados en las etapas siguientes del proceso de fabricación del parachoques y finalmente se llega a tener un parachoques terminado como el que se muestra en la figura 6.18. Al comparar la figura 6.17 y la figura 6.18 y observar los recortes que se deben realizar al material para obtener el parachoques terminado aparece una altura H que tiene un valor de 80 mm, este valor es medido directamente del sólido que se tiene en el software Solidworks, la altura H es la cota en la que se debe realizar el recorte en la cara plana del parachoques, la figura 6.19 muestra la cara lateral del parachoques, en esta cara se debe realizar un corte diagonal hasta el nivel inferior de estampado. La cota H1 corresponde a la altura máxima que tiene la cara plana del parachoques estampado luego de realizar el corte de la cota H= 80mm. La suma de las cotas H Y H1 dan el valor del recorrido del punzón durante el estampado, es decir 197.3 mm, este valor es el que se introduce en el parámetro STROKE(avance) del punzón en la etapa de preproceso del programa Stampack.

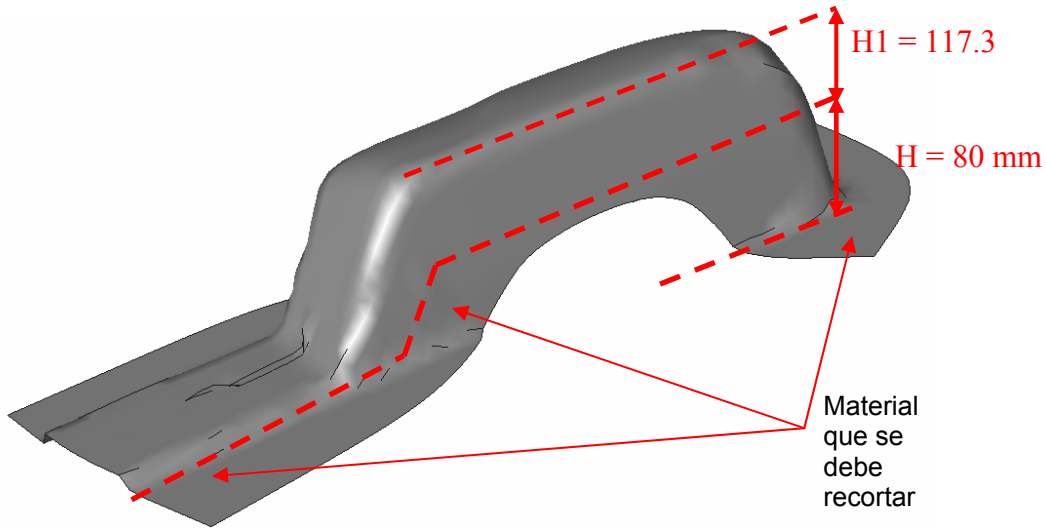


Figura 6.17 Corte del exceso de material en la Geometría Original

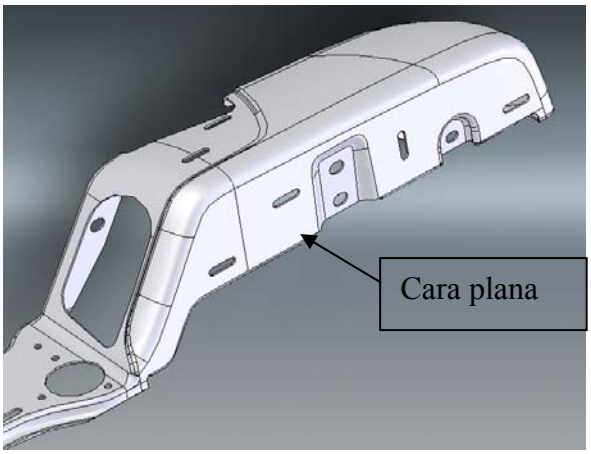


Figura 6.18 Cara plana del Parachoques Terminado

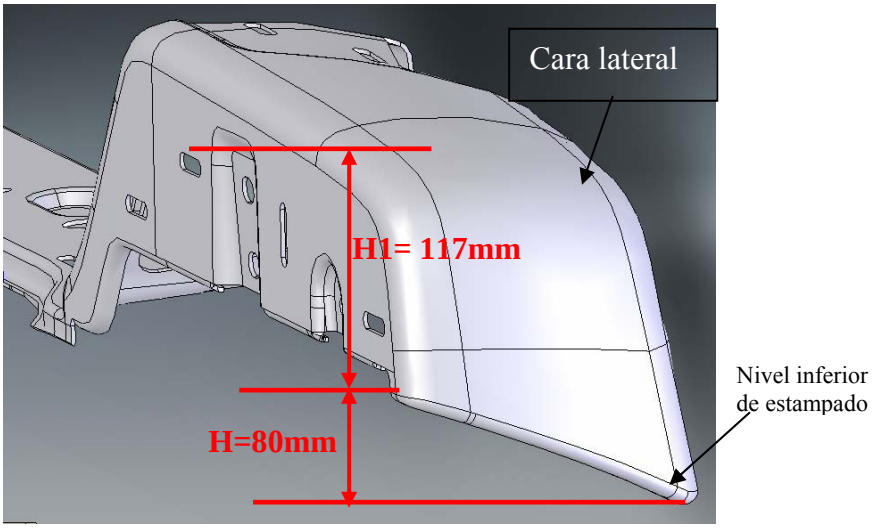


Figura 6.19 Altura H en la cara lateral del Parachoques Terminado,

La figura 6.19 muestra la forma que adquiere el parachoques luego de realizar el recorte del material en la cara plana y en la cara lateral. El diseño original del troquel de estampado deforma el material de la cara plana hasta el nivel inferior que se muestra en la figura 6.19, el objetivo de la mejora es realizar el estampado del parachoques disminuyendo la altura H de 80mm a una altura L de 44 mm, para cumplir con este objetivo se colocan placas de 36mm de espesor en el prensachapas y en la matríz, las placas añadidas se muestran en las figuras 6.10 y 6.11 y los planos para construcción de estas placas se encuentran en el anexo C.

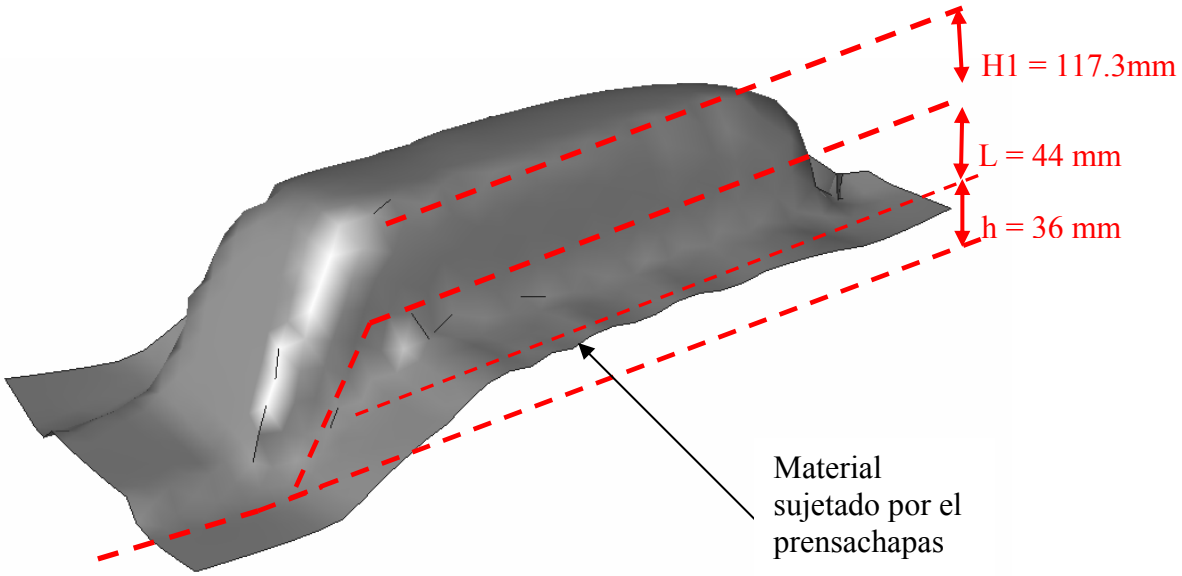


Figura 6.20 Geometría de la solución

La figura 6.20 muestra la forma final de la geometría planteada como alternativa de solución luego del cálculo del estampado, esta figura muestra como en la cara plana se tiene un ala de material que se encuentra sujetado por el prensachapas hasta el final del estampado, la altura **h** corresponde al espesor de las placas añadidas en el prensachapas y en la matríz, el valor de **L** es la altura a la que se reduce la cota **H** mostrada en la figura 6.17 y 6.19 y la cota H1 corresponde a la altura máxima que tiene la cara plana del parachoques estampado luego de realizar el corte de la cota L = 44mm.

Es necesario aclarar que el valor del recorrido (STROKE) del punzón en el software Stampack, no siempre corresponde al recorrido real que se da en la

prensa en la que se realiza el estampado debido a que en este caso siempre se coloca respecto a un plano de referencia como se muestra en la figura 6.21(a), este recorrido considera el desplazamiento del punzón sin carga lo que significa que durante unos segundos el punzón baja hasta hacer contacto con el material a ser conformado, en el ejemplo de la figura 6.21(a) se muestra que el recorrido del punzón tiene un valor de 14.13mm, en la figura 6.21(b) el punzón hace contacto con la chapa y desde aquel punto se considera el recorrido del punzón en el software Stampack, el software permite alinear al punzón respecto a la chapa metálica, de esta manera el software elimina el tiempo que le tomaría calcular el recorrido del punzón en vacío o sin carga, si con el ejemplo de las figuras 6.21(a) y 6.21(b) se realizara una simulación del estampado, el dato del recorrido que en el programa se debe introducir es 13.49mm, esto no quiere decir que el software no realice el cálculo con el dato de 14.13mm, lo que quiere decir es que el software ahorra tiempo en el cálculo del desplazamiento de 0.62mm que es la carrera en vacío del punzón. Se tiene el caso en que la carrera del punzón del troquel real es igual a la carrera que se debe introducir en el software Stampack cuando la chapa metálica se encuentra en posición horizontal. En la simulación del parachoques original la chapa se encuentra en posición horizontal y por lo tanto el punzón debe desplazarse una longitud de 197.3mm, en la simulación de la geometría propuesta como alternativa de solución se realizan modificaciones en el prensachapas y la matríz, estas modificaciones son las placas de 36mm de espesor que se añaden a la matríz y al prensachapas, estas hacen que la chapa que va a ser conformada quede inclinada respecto al eje del punzón como se muestra en la figura 6.21(b), el software permite alinear el punzón respecto a la chapa inclinada, motivo por el cual el recorrido disminuye a 179.9.

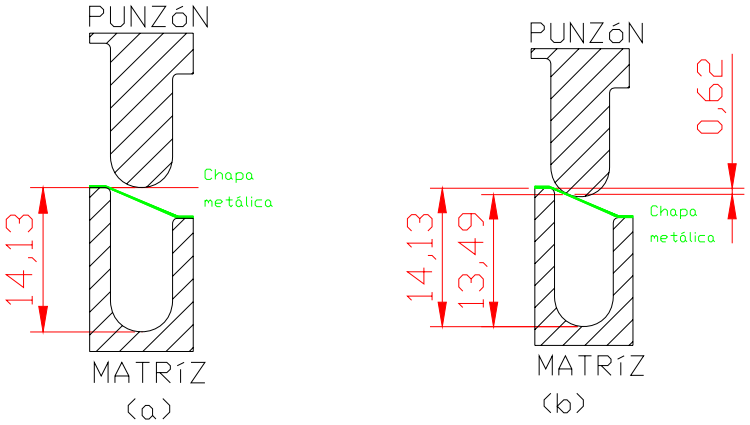


Figura 6.21 (a) Recorrido del punzón en una prensa real, (b) Recorrido de punzón en el software Stampack.

6.4.2 DESPLAZAMIENTO

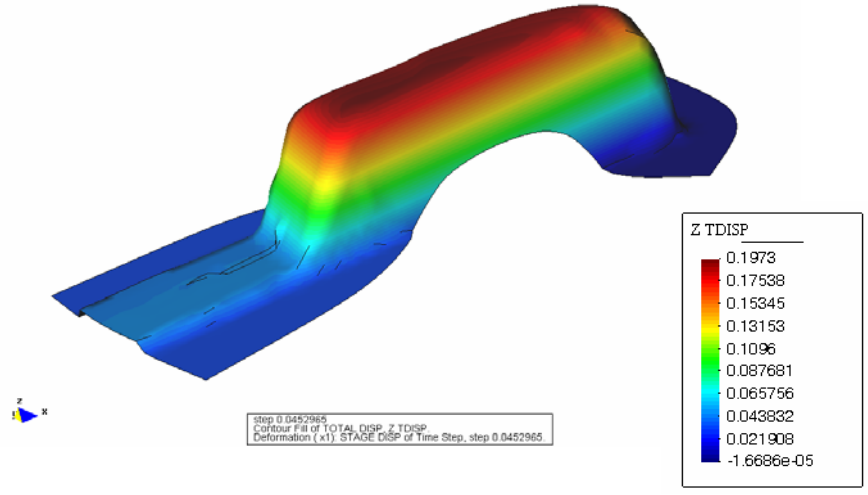


Figura 6.22 Desplazamiento total de la geometría original

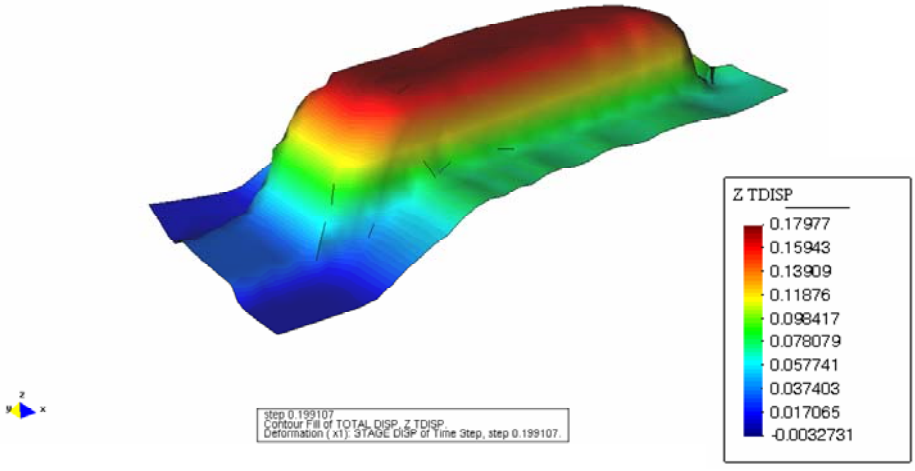


Figura 6.23 Desplazamiento total de la alternativa de solución

Las figuras 6.22 y 6.23 muestran el desplazamiento total de la chapa durante el estampado, estas figuras tienen el propósito de comprobar que el punzón llega al fondo de la matríz y que los recorridos introducidos en la etapa de preproceso del software Stampack son correctos, el recorrido del punzón de la geometría original es mayor debido a que el plano de la chapa que va a ser conformado encuentra en posición perpendicular al eje del punzón de estampado, le recorrido de la alternativa de solución es 17.4mm menor al recorrido de la geometría original debido a que las placas añadidas provocan que la chapa se posicione en un plano inclinado.

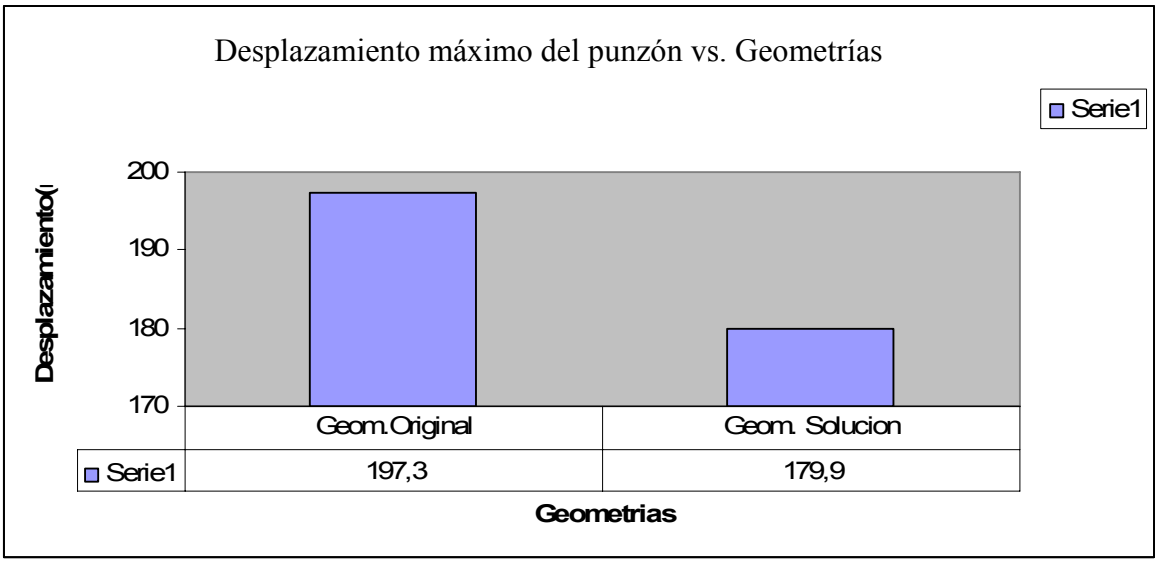


Figura 6.24 Geometrías vs. Desplazamiento del punzón durante el estampado

6.4.2.1 DESPLAZAMIENTO VS TIEMPO DE LA GEOMETRÍA ORIGINAL. RESULTADOS EN LA ZONA A COMPARAR (NODO 5422)

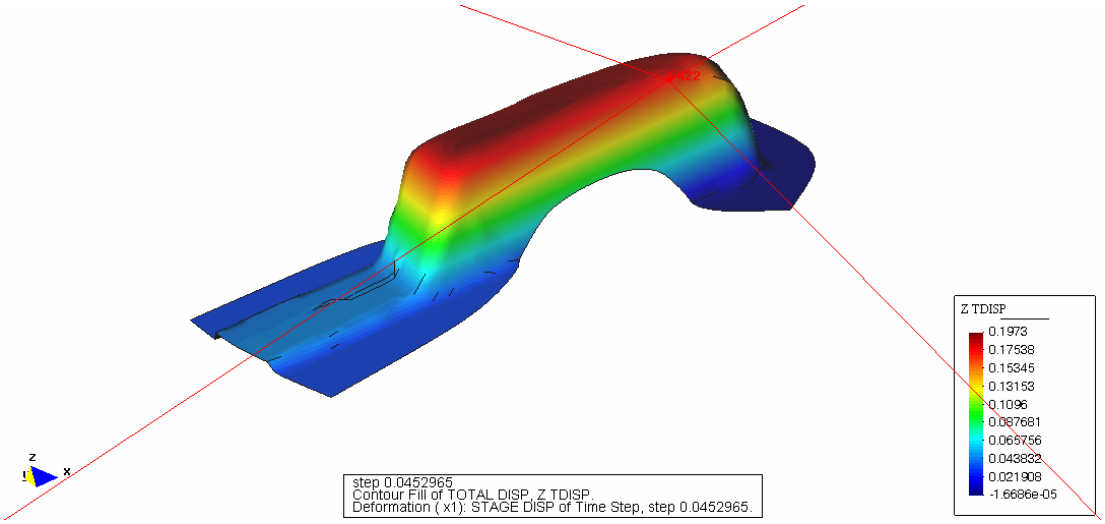


Figura 6.25 Posición del Nodo 5422

DESPLAZAMIENTO EN ***X, Y , Z*** VS TIEMPO DEL NODO 5422

Desplazamiento en x (color amarillo), desplazamiento en y(color verde), desplazamiento en el eje z(color rojo).

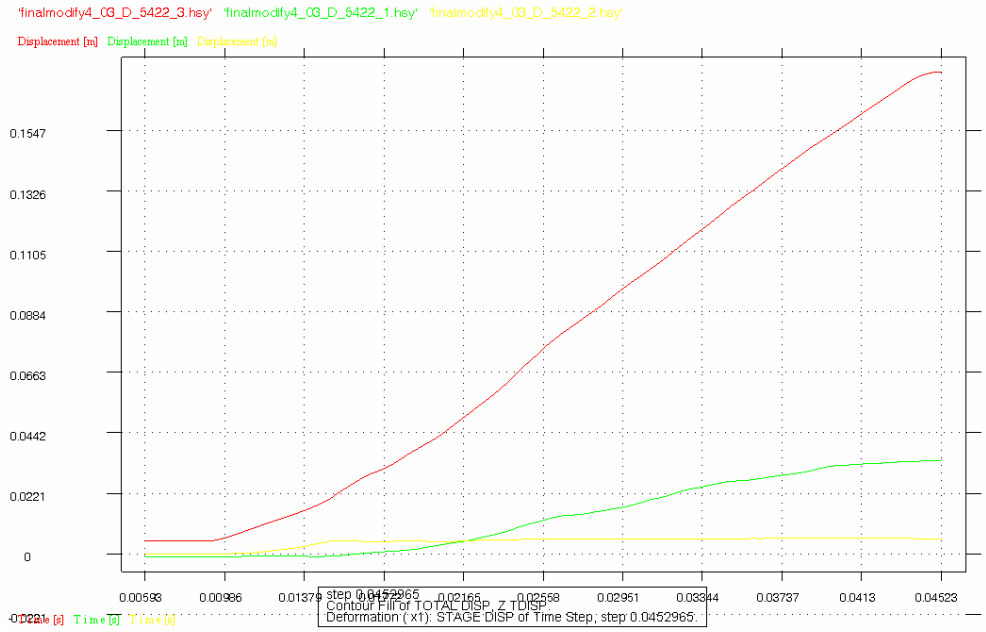


Figura 6.26 Curva Desplazamiento en x,y,z vs Tiempo del Nodo 5422

En la figura 6.25 se muestra el desplazamiento a través del eje z, donde se observa los valores que indican que la simulación se ha realizado dentro del rango introducido en la etapa de pre-proceso del software Stampack en el parámetro STROKE(avance), el desplazamiento máximo que se muestra en la

figura 6.25 es 0.1973 m ó 197.3 mm, este valor corresponde a la suma de los valores de H y H1 mostrados en la figura 6.17. En el software Stampack es posible obtener información acerca del desplazamiento de cada nodo en función del tiempo durante el estampado a lo largo de cualquiera de los tres ejes cartesianos, pero es importante seleccionar un nodo que permita obtener la mayor cantidad de información. La figura 6.26 muestra el desplazamiento del nodo 5422 que se elige porque es uno de los que llega al fondo de la matríz. En la figura 6.26 se tienen tres curvas de colores diferentes; la curva de color rojo muestra el desplazamiento en el eje ***z*** del nodo 5422**,** donde se observa que la curva en el eje z parte del punto cero, manteniéndose constante es decir, que no se desplaza durante el inicio del estampado que es aproximadamente un segundo, para luego desplazarse con una velocidad constante hasta completar su recorrido.

Las curvas de desplazamiento a través del eje z en el nodo de la figura 6,26 de la chapa metálica, indica que se encuentra sujeta a la sección entre el prensachapas y la matriz no tiene desplazamiento en el eje z, si el nodo de esta sección se desplaza hacia el punzón, es decir, cuando se introduce a la cavidad de la matriz su desplazamiento comienza a describir una curva suave mantiene constante hasta llegar a completar el desplazamiento de 197.3mm, el desplazamiento en el eje z; esta grafica.

La curva en color amarillo representa el desplazamiento del nodo 5422 a lo largo del eje y, esta curva no tiene pendiente por lo cual se sabe que dicho nodo no se ha desplazado en la dirección del eje y. La curva en color verde representa el desplazamiento del nodo 5422 a lo largo del eje x, y se observa que este nodo empieza a desplazarse luego de aproximadamente en la mitad del tiempo de haber iniciado el proceso de estampado para luego desplazarse a velocidad relativamente constante hasta finalizar el proceso de estampado, el desplazamiento máximo aproximado al que llega en el eje y es de 0.035 m ó 35mm, este desplazamiento se indica en la figura 6.26.

El desplazamiento del nodo 5422 en los tres ejes confirma que los metales tienen la propiedad de fluir, bajo la acción de diversos esfuerzos desiguales, ejercidos en

distintas direcciones, semejantes a los líquidos. Solamente en virtud de esta propiedad es posible deformar convenientemente los metales sometidos a procedimientos tales como el estampado y la extrusión[22].

6.4.2.2 DESPLAZAMIENTO VS TIEMPO DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCION RESULTADOS EN LA ZONA A COMPARAR (NODO 5850)

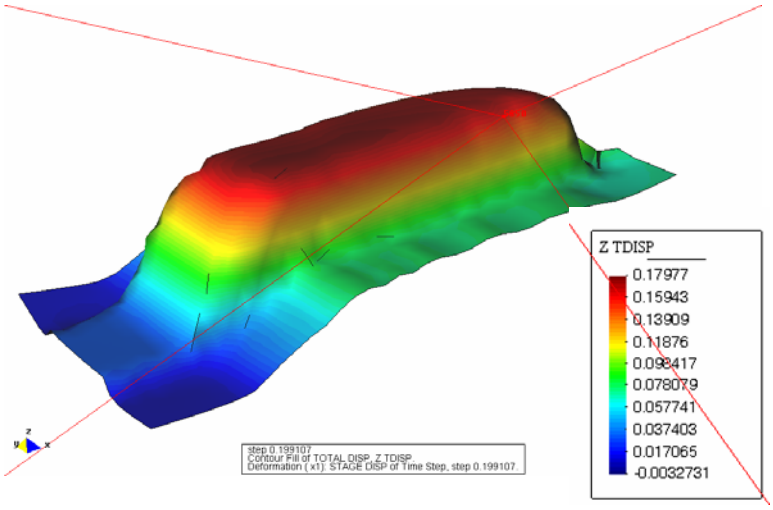


Figura 6.27 Posición del Nodo 5850

DESPLAZAMIENTO EN X, Y , Z. (NODO 5850)

Desplazamiento en z (color amarillo), desplazamiento en x(color verde), desplazamiento en el eje y(color rojo).

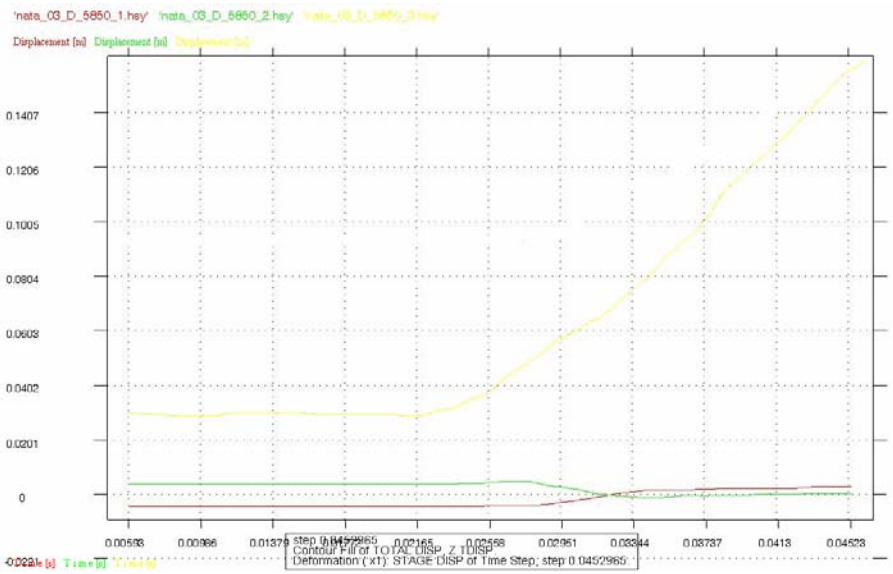


Figura 6.28 Curva Desplazamiento en x,y,z vs Tiempo

[22]**FUENTE:** LOPEZ Navarro, Troquelado y Estampación

La figura 6.25 (nodo 5422) y la figura 6.27(nodo 5850) tienen en común la zona a la que se requiere analizar el desplazamiento, el objetivo es realizar una comparación del problema y la solución de alternativa para analizar estos resultados. El nodo 5850 parte de la base con placas añadidas de 36 mm (posición inicial del nodo), en la figura 6.28 la curva de color amarillo muestra la trayectoria que describe el nodo en el eje z hasta finalizar la carrera de estampado, la curva se mantiene constante durante la mitad del tiempo de estampado, lo que significa que el material no se desplaza en el eje z ya que se encuentra sujeto entre el prensachapas y la matriz, a medida que transcurre el tiempo de estampado el nodo empieza a describir una curva suave indicando que se desplaza a velocidad constante por el interior de la cavidad de la matriz hasta llegar a una distancia de 0.17977 m, al comparar las graficas en el problema la figura 6.26 se observa que el nodo comienza a desplazarse tres veces mas rápido en relación al nodo de la figura 6,27, debido a que se requiere mas material para llegar al fondo de la matriz en el mismo tiempo que la simulación con placas añadidas, mientras que en la solución propuesta(placas añadidas) la profundidad de la cavidad es menor y el material a introducirse es menor.

6.4.3 ESPESOR RELATIVO

6.4.3.1 ESPESOR RELATIVO DE LA GEOMETRIA ORIGINAL

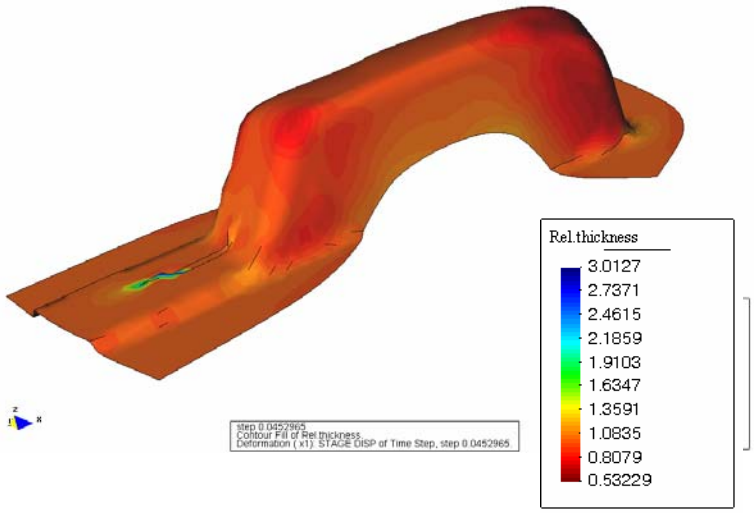


Figura 6.29 Espesores relativos máximos y mínimos en la geometría original

CURVAS DE ESPESOR RELATIVO VS. DESPLAZAMIENTO (NODO 5422)

Espesor relativo en z (color amarillo), espesor relativo en y(color verde), espesor relativo en x(color rojo).

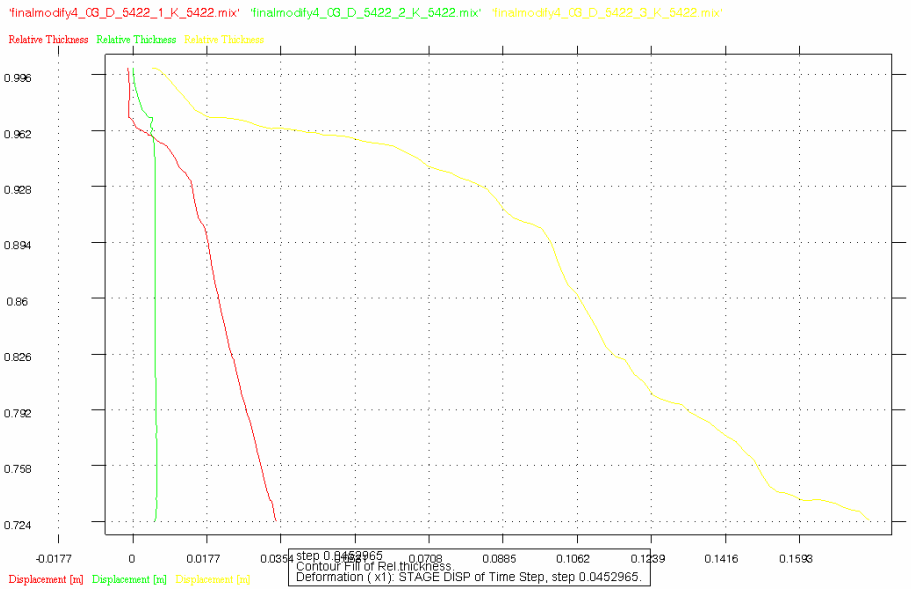


Figura 6.30 Curva Espesor Relativo vs Desplazamiento en x, y *y* z

En la figura 6.30 se observa la gráfica de la variable histórica de la variación de los espesores relativos de la chapa estampada respecto al desplazamiento en los ejes x, y, *y* z del nodo 5422 que se hace referencia en la figura 6,25; donde la curva en color amarillo representa la variación del espesor de la chapa estampada a través del desplazamiento en el eje z; se observa la disminución del espesor de 0.996 hasta 0,5322 conforme avanza el desplazamiento desde 0 m a 0,17977m, en esta grafica se observa que el desplazamiento en z avanza más que en los otros ejes, por lo tanto, este influye más en la disminución del espesor debido al que el estampado es producido en esta dirección.

La curva de color verde muestra la variación del espesor de la chapa en el eje y donde se observa que el espesor relativo en la zona del nodo 5422 disminuye de 0.996 a 0.96, (espesor de 2 mm a 1.9 mm) en un desplazamiento de 0,004 m aproximadamente, para luego disminuir hasta 0.724 (1.42 mm) manteniéndose en el mismo desplazamiento, y la curva de color rojo muestra la variación de espesor relativo en el eje x, el la cual se observa que el nodo 5422 tiene un decrecimiento del espesor relativo de 0.996 a 0.96, (espesor de 2 mm a 1.9 mm)

sin desplazarse, para luego iniciar a desplazarse de 0 a 0.0354 m (35 mm) conjuntamente con el espesor relativo que llega a 0.5322(espesor de1,06 mm).

6.4.3.2 ESPESOR RELATIVO DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

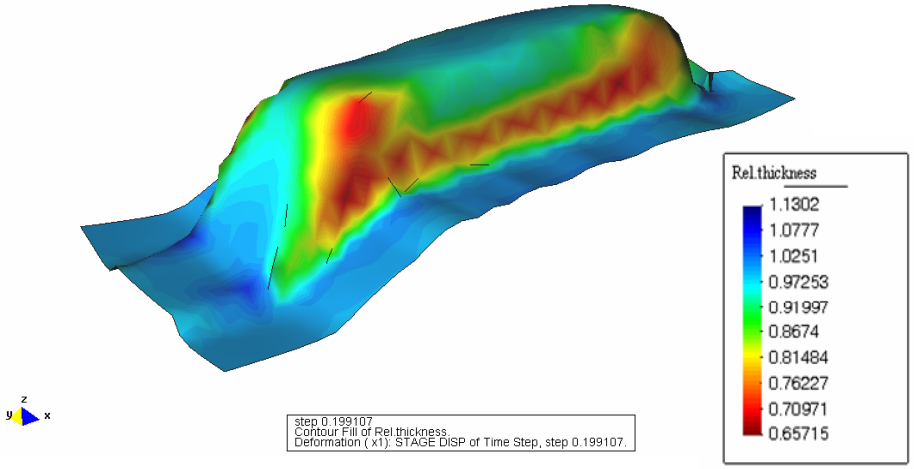


Figura 6.31 Espesores relativos en la alternativa de solución

En la Figura 6,31 se observa como varían los espesores en la chapa estampada, planteada como alternativa de solución, por lo que se observa en la tabla que la variación de espesores van de máximo(azul) a mínimo(rojo) mostradas en las diferentes zonas de la gráfica. Se observa una gran diferencia en comparación con la gráfica 6,29; donde se observa que el espesor relativo disminuye en todas sus áreas, mientras que en la gráfica 6,31, la disminución del espesor no es critica en especial en la zona superior y frontal que es la sección utilizada para el parachoques, las secciones laterales tienen una disminución en el espesor pero es menor que en el problema, además estas zonas no influyen en la construcción del parachoques.

La figura 6.32 muestra la variación del espesor relativo respecto al tiempo, la variación del espesor ocurre en dos etapas, hasta la mitad del tiempo de estampado el espesor no varia, esto significa que el material no se deforma porque este se encuentra entre la matriz y el prensachapas, luego el espesor relativo empieza a disminuir de una forma rápida hasta llegar al final del proceso de estampado.

ESPESOR RELATIVO VS. TIEMPO (NODO 5850)

Espesor relativo (color rojo).

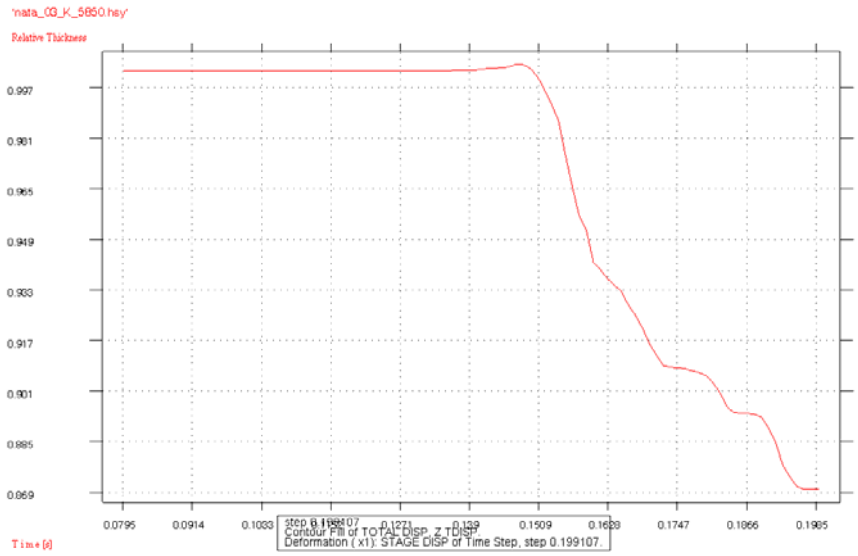


Figura 6.32 Curva Espesor Relativo vs Tiempo

CURVAS DE ESPESOR RELATIVO VS. DESPLAZAMIENTO (NODO 5850)

Espesor relativo en z (color amarillo), espesor relativo en y(color verde), espesor relativo en x(color rojo).

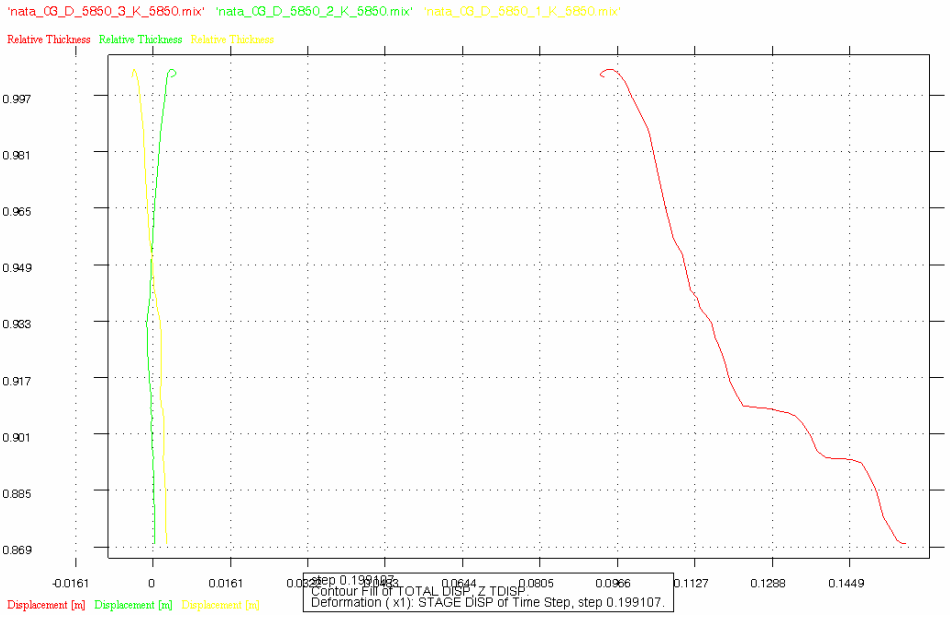


Figura 6.33 Curva Espesor Relativo vs Desplazamiento en x, y *y* z

El espesor relativo máximo que se tiene en la simulación de la alternativa de solución es 1.13 y el espesor mínimo es 0.66, con estos valores se puede saber el espesor máximo y mínimo que tiene la chapa estampada, así como las zonas en las que el espesor ha disminuido mediante el gráfico de colores de la figura 6.33.

La figura 6.33 muestra la variación del espesor relativo en los tres ejes cartesianos, la línea de color amarillo muestra la variación del espesor relativo en el eje x, la curva de color verde muestra la variación del espesor relativo en el eje *y* y la curva de color rojo muestra la variación de espesor en el eje z, la variación del espesor en el eje x y el eje y ocurren prácticamente sin desplazamiento en sus respectivos ejes, y la variación del espesor en el eje z ocurre cuando el punzón se ha desplazado a la mitad de su recorrido total.

Comparación de resultados en el espesor relativo

Análisis del espesor relativo máximo y mínimo entre la geometría original y la geometría de solución:

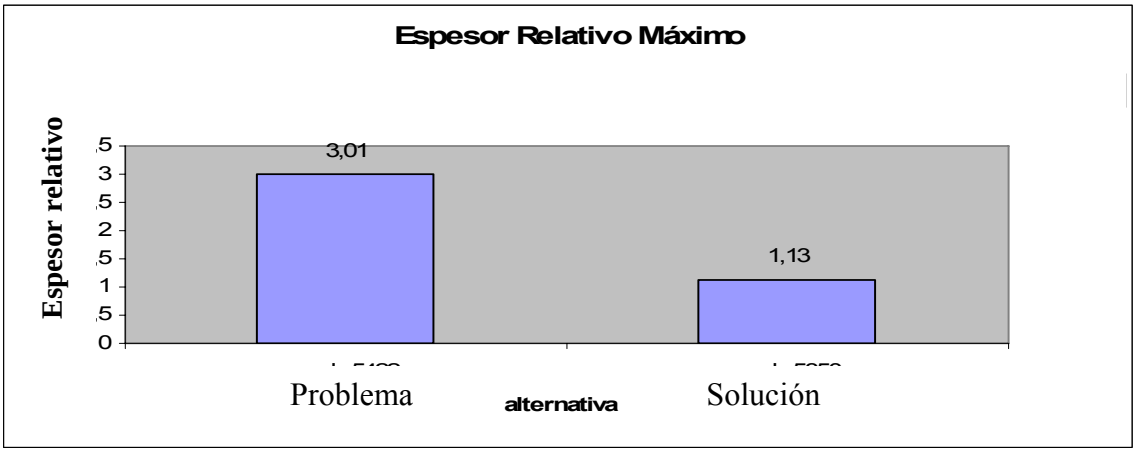


Figura 6.34 Espesor Relativo Máximo vs Alternativa

En la figura 6,34 se muestra el espesor relativo máximo entre el troquel original (Problema) y la alternativa de solución planteada (Solución), donde se observa en la figura 6,29 que en el problema el espesor tiene una zona pequeña donde el espesor aumenta exageradamente tres veces su espesor original y en el resto de las zonas tiene una disminución de espesor de 0.807 a 0.53229 (1,6 a 1.06 mm de espesor). En la alternativa de solución el espesor se mantiene alrededor de 2 mm y en las secciones laterales disminuye hasta un 0,657 (1.3 mm) su espesor relativo, pero esta disminución ocurre en la sección que no influye en la construcción del guardachoque.

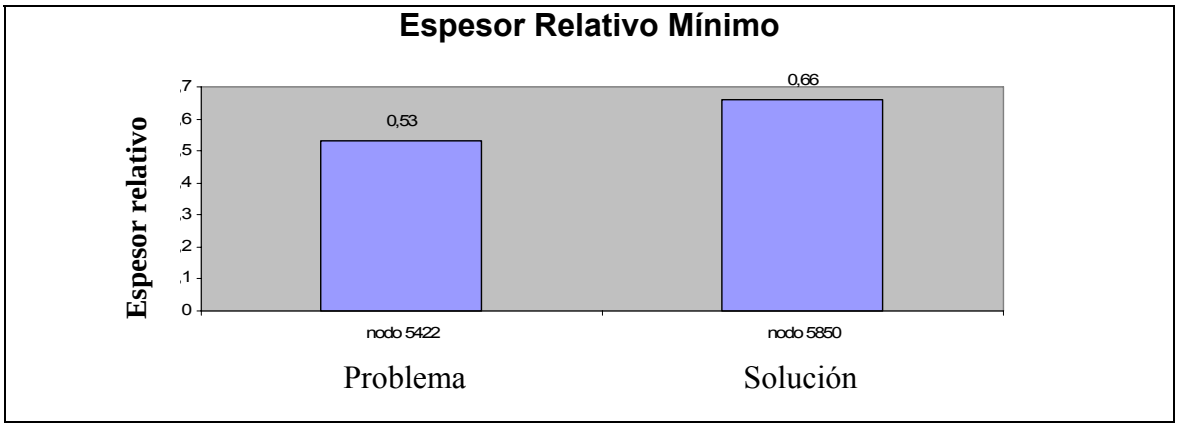


Figura 6.35 Espesor Relativo Mínimo vs nodos de comparación

En la figura 6,35 se compara el nodo 5422 corresponde a la geometría original y el nodo 5850 a la geometría planteada como solución. En el primer caso el espesor relativo mínimo es 0.53, esto significa que la chapa metálica llega a tener un espesor de 1.06 mm de espesor, en el segundo caso se tiene un espesor relativo mínimo de 0.66, con lo cual la chapa metálica al final del estampado llega a tener un espesor final de 1.32mm.

6.4.4 RESULTADOS EN LA ZONA CRÍTICA DE LA GEOMETRIA ORIGINAL

Se analiza la zona de la geometría original en la que la chapa tiende a romperse y se compara con los resultados de la alternativa de solución, los parámetros que se comparan son: el espesor relativo y las zonas de seguridad.

6.4.4.1 ESPESOR RELATIVO DE LA GEOMETRIA ORIGINAL (NODO 3867)

En la figura 6.36 se indica la posición del nodo 3867, este nodo esta ubicado en la zona de mayor deformación, la zona de mayor deformación se identifica en base a la escala de valores y su respectivo color mostrado en la figura 6.36

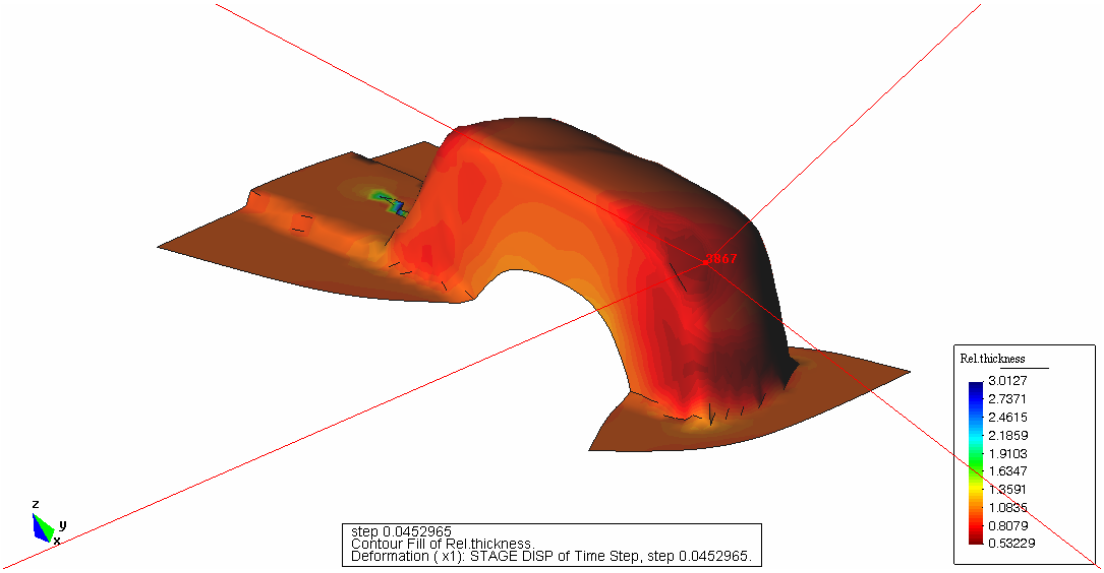


Figura 6.36 Posición del Nodo 3867

CURVA ESPESOR RELATIVO VS TIEMPO. (NODO 3867)

Espesor relativo (color rojo).

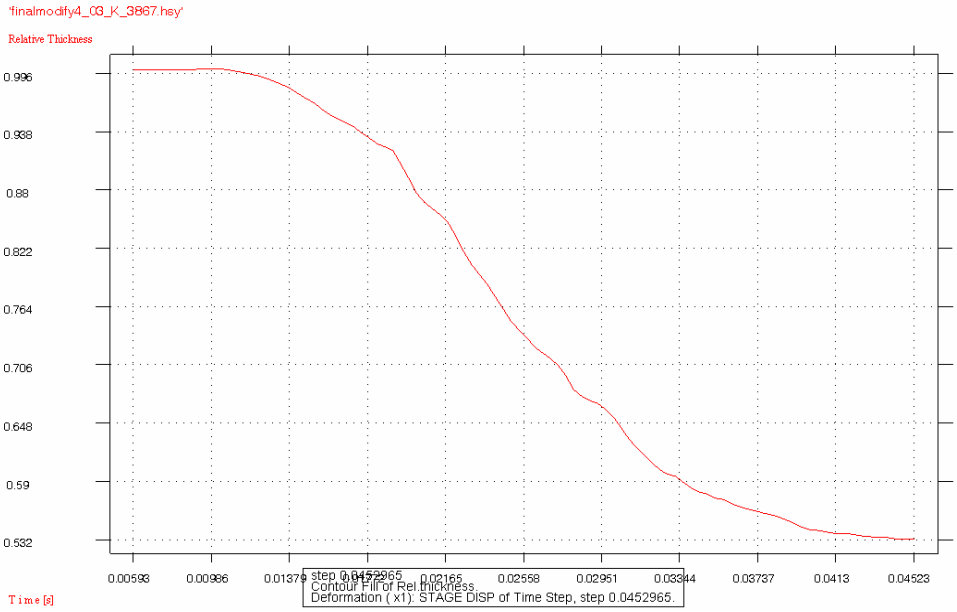


Figura 6.37 Curva Espesor Relativo vs Tiempo

La figura 6.37 muestra la curva de variación del espesor relativo en función del tiempo de estampado, en esta gráfica se muestra que material en la zona del nodo 3867 de la figura 6.36 empieza a variar su espesor lentamente disminuyendo de 1 a 0,532, es decir, que su espesor relativo decrece hasta la mitad del espesor original es decir de un 2 mm a 1 mm al final del estampado.

CURVAS DE ESPESOR RELATIVO VS. DESPLAZAMIENTO (NODO 3867)

Espesor relativo en x (color amarillo), espesor relativo en y(color verde), espesor relativo en z(color rojo).

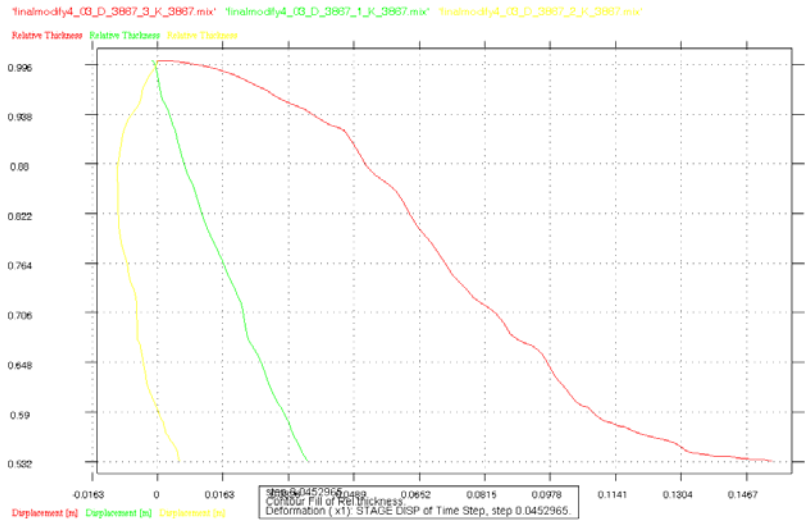


Figura 6.38 Curva Espesor Relativo vs Desplazamiento en x, y *y* z

Las curvas marcadas de la figura 6.38 indican como varia el espesor relativo con respecto al desplazamiento en cada eje, se observa que mientras el desplazamiento aumenta, el espesor relativo disminuye.

La gráfica amarilla muestra que alrededor del eje x existe una disminución en el espesor relativo que ocurre mientras el desplazamiento tiende a retroceder. Cuando el espesor relativo es de 0.822 el desplazamiento en el eje x a retrocedido la máxima distancia de -10mm, finalmente el nodo se detiene al iniciar su avance a través del eje positivo x, llegando a obtener un espesor de 0.532 en una distancia aproximada de 10 mm.

La curva de color verde indica la disminución del espesor relativo en el nodo a través del desplazamiento positivo en el eje y, es decir la variación del espesor va de 1 en la posición inicial antes de iniciar la deformación hasta 0,53 cuando el proceso de estampado a concluido, lo cual significa que de un espesor inicial de 2mm llega a tener un espesor final de 1.06mm, en 45mm de desplazamiento en el eje y, esta variación ocurre de manera constante debido a que la pendiente de la curva que describe la variación del espesor tiende a ser una recta.

La curva de color rojo muestra la variación del espesor relativo del nodo 3867 a través del eje z positivo, se observa que la deformación ocurre desde el inicio del desplazamiento y finaliza cuando la operación de estampado concluye, a medida que el desplazamiento aumenta el espesor relativo disminuye, en este caso, el espesor relativo disminuye de 1, que es cuando la chapa aun no se deforma, hasta un valor de 0.53 cuando se ha terminado el estampado del parachoques.

6.4.4.2 ESPESOR RELATIVO DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCION (NODO 5230)

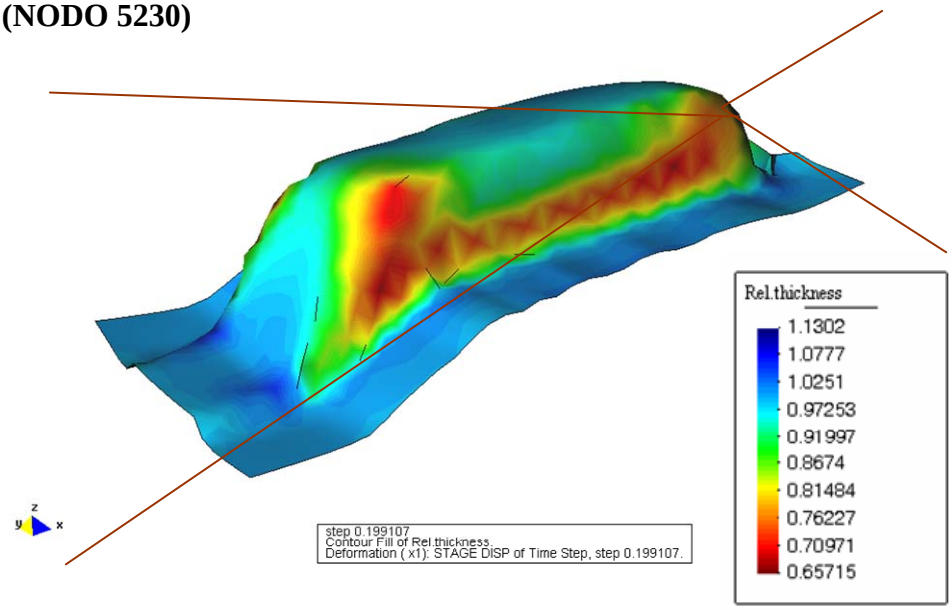


Figura 6.39 Espesores relativos en la alternativa de solución

En la figura 6.39 se muestra la posición del nodo 5230, el cual se intenta ubicar en la misma zona donde se ubica el nodo 3867 de la figura 6.36, para realizar las evaluaciones del espesor relativo y de las zonas de seguridad en estos nodos para poder realizar una comparación entre los resultados obtenidos en la geometría original y en la geometría planteada para mejora.

ESPESOR RELATIVO VS TIEMPO (NODO 5230)

Espesor relativo en z(color rojo).

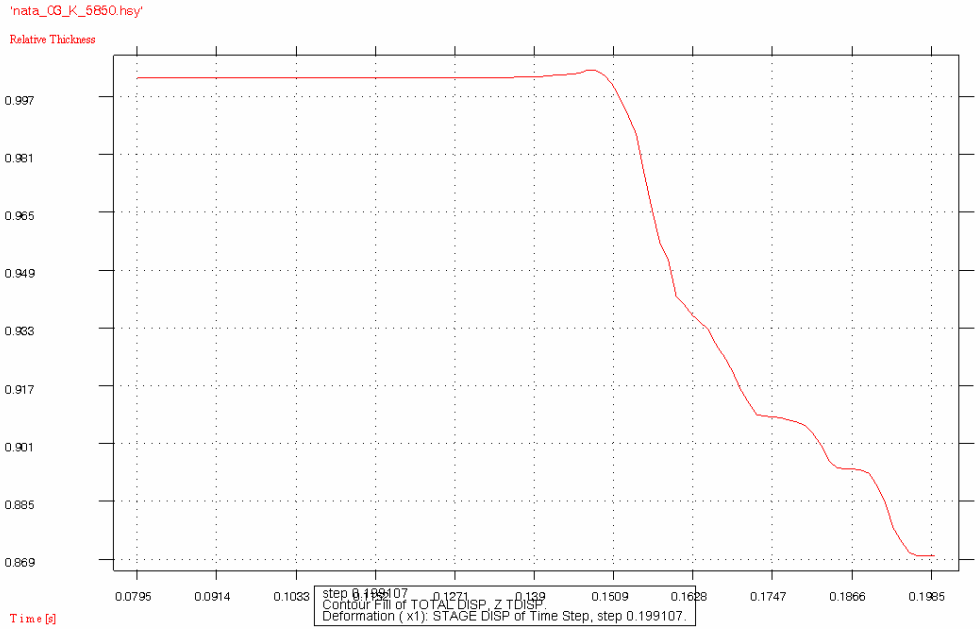


Figura 6.40 Curva Espesor Relativo vs Tiempo

La curva de la figura 6.40 muestra que el material no se deforma desde el inicio de la operación de estampado como es el caso de la deformación de la geometría original de parachoques mostrado en la figura 6.37. Para describir el comportamiento del nodo 5230 se divide la curva de la figura 6.40 en dos etapas; en la primera se observa que la deformación del nodo 5230 no ocurre, esto se debe al incremento de la altura del prensachapas y de la matriz a través de las placas añadidas(figura 6.10 y figura 6.11), en el literal 6.4.1 de la pagina 97 se hace referencia a la altura H = 80mm, esta cota es la que queda como exceso de material luego del estampado de la geometría original, el exceso de material es deformado desde el inicio de la operación de estampado, entonces; en la primera etapa de la alternativa de solución el material que antes se deformaba ya no se deforma porque el prensachapas que se encuentra a una altura de 36mm sobre el prensachapas original mantiene sujeta al material mientras el punzón se desplaza hacia el interior de la matriz. En la segunda etapa; el espesor relativo de la chapa disminuye rápidamente hasta un valor de 0.86, este es el valor mínimo del espesor relativo obtenido en la alternativa de mejora.

CURVAS DE ESPESOR RELATIVO VS. DESPLAZAMIENTO (NODO 5230)

Espesor relativo en x (color amarillo), espesor relativo en y(color verde), espesor relativo en z(color rojo).

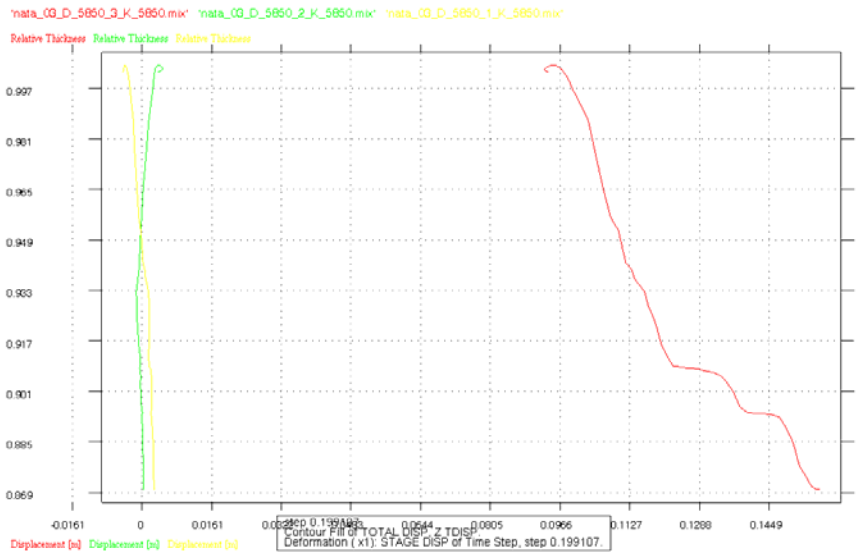


Figura 6.41 Curva Espesor Relativo vs. Desplazamiento en x, y *y* z

Las curvas de la figura 6.41 indican la variación del espesor relativo del nodo 5320 respecto al desplazamiento en cada eje, se observa que a medida que el desplazamiento aumenta el espesor relativo disminuye, por ejemplo la curva de color amarillo describe el desplazamiento en el eje x, este se desplaza en torno a un intervalo de –2 a 2 mm, mientras ocurre este desplazamiento, el espesor relativo del material llega a un valor mínimo de 0.86, igual comportamiento se tiene en la curva de color amarillo. La curva de color rojo muestra una variación del espesor relativo desde el punto en el cual el material es liberado por el prensachapas, ya que en la alternativa de mejora el material se encuentra sujetado por las placas añadidas al prensachapas.

Comparación de resultados en el espesor relativo de la zona critica

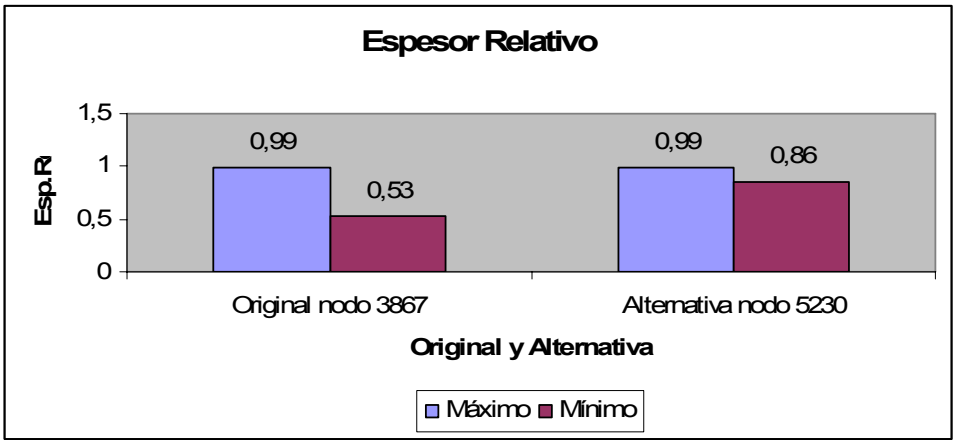


Figura 6.42 Espesor Relativo del la geometría original y de la alternativa de mejora

En la figura 6.42 se presenta un resumen de los valores de los espesores relativos máximos y mínimos obtenidos para el nodo 3867 perteneciente a la geometría original y para el nodo 5230 de la alternativa de mejora. El espesor relativo máximo tiene un valor de 0.99, este valor es igual para la geometría original y para la alternativa de mejora. Al finalizar el estampado se observa que en la geometría original el espesor relativo tiene un valor mínimo de 0.53, mientras que en la alternativa de mejora se tiene un espesor relativo mínimo de 0.86, la diferencia encontrada en esta sección esta relacionada con la altura a la que se sujeta al material para iniciar el estampado, en la geometría original el prensachapas sujeta al material una altura mas baja para iniciar el estampado del parachoques como indica la figura 6,17, existe una altura H de 80mm que no es necesaria para deformar ya que en la siguiente etapa del proceso de fabricación del parachoques este exceso de material es recortado. Esta deformación excesiva del material en la zona en la que no es necesario provoca que el parachoques estampado disminuya mas su espesor relativo y falle, como se confirma en al figura 6.43, en donde se muestra las zonas de falla del material, estas zona de falla coincide con la zona en la que se encuentra el nodo 3867.

En la alternativa de mejora la forma del prensachapas evita que el material se deforme hasta el nivel mas bajo, el prensachapas sujeta al material 36 mm mas arriba de lo que ocurre en la geometría original, en la figura 6.44 se muestra la posición del nodo 5230, se puede ver que el nodo esta ubicado en la zona segura;

el espesor relativo de 0,86 de la alternativa de solución es mayor al espesor relativo de la geometría original que es de 0,53, esta es una mejora considerable por lo que es viable realizar esta mejora en el troquel, considerando que tampoco existen fallas en el material estampado, en la zona estampada que sirve para la fabricación del parachoques.

6.4.4.3 ZONA DE SEGURIDAD DE LA GEOMETRIA ORIGINAL (NODO 3867)

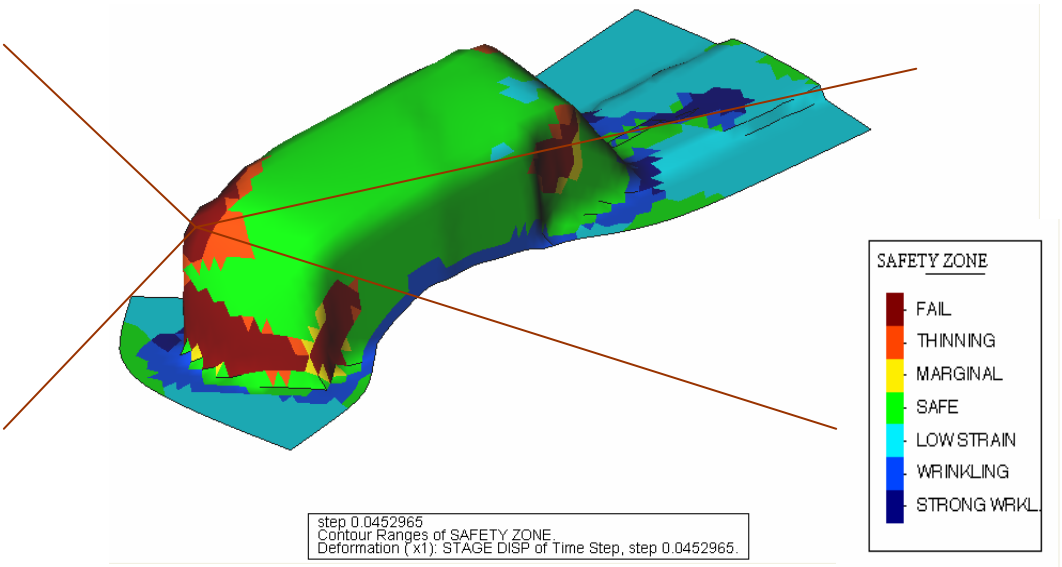


Figura 6.43 Zona de seguridad en la geometría original (Nodo 3867)

La figura 6.43 indica las zonas en la que se pueden presentar posibles problemas en base al diagrama FLD, se observa claramente las zonas donde el material falla (FAIL) debido a que se supera el límite de la curva FLC del material ya que las arrugas formadas en la zona (WRINKLIN) rigidizan el material haciendo que no se desplace y este se estire sufriendo un adelgazamiento severo (THINNING) para finalmente provocar la rotura (FAIL).

En la figura 6,43 se observa el nodo 3867, donde se observa que la zona falla (FAIL) y se rompe, esta sección y todas las que tienen este color se rompen en la geometría original real que se puede apreciar por la fotografía de la figura 4.2.

6.4.4.4 ZONA DE SEGURIDAD DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCION (NODO 5230)

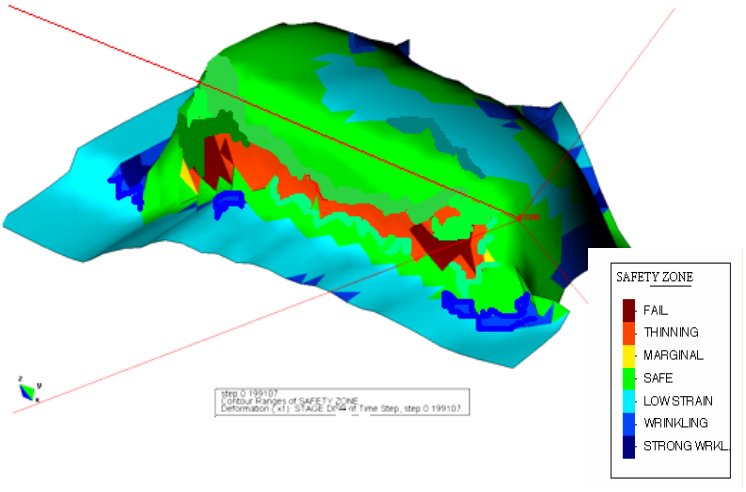


Figura 6.44 Zona de seguridad en la alternativa de solución (Nodo 5230)

Al plantear la solución lo que se busca es eliminar la zona de falla (FAIL) de la geometría original, para lo cual en la alternativa de solución seleccionada se busca disminuir la profundidad de estampado innecesaria, para que el material no tenga tiempo a rigidizarse durante el desplazamiento del material hacia el interior de la matriz en el estampado, evitando así la disminución severa del espesor del material que puede provocar la rotura.

CONCLUSION DE LA COMPARACION DE RESULTADOS EN LA ZONA CRÍTICA

En la Figura 6.44 se confirma que la alternativa de solución es válida, ya que disminuye la zona de riesgo (Fail) que se indica en la figura 6.43, para que esta zona sea segura debe ser de color verde, lo que indica que es una zona completamente libre de riesgos de rotura (Safe) o estar en Low Strain que significa que el material tiene bajas deformaciones para que la zona no tenga problemas y no se rompa. Se puede observar claramente que la zona de rotura (Fail) de la figura 6.43 desaparece en la figura 6.44, ya que en esta se vuelve completamente segura (Safe), por lo que se puede concluir la alternativa de solución cumple con los requerimientos de mejora para realizar un estampado sin riesgos a roturas en la zona requerida para el parachoques.

Al añadir las placas se cambia la forma de sujetar la chapa para disminuir la altura en el proceso de estampado, reduciendo la profundidad de la cavidad en el estampado del parachoques, por lo que el material disminuye el estiramiento y la distancia del recorrido del material en el punzón es menor, la zona donde se produce la formación de arrugas por la profundidad de estampado casi no existe, por lo que el material ya no se rigidiza en el contorno permitiendo que se pueda deformar hasta el final del estampado sin que exista rotura.

En la figura 6.44 se observa una zona de riesgo (Fail), la cual no influye en la sección que se necesita para la obtención del parachoques ya que es cortada en un proceso posterior al estampado como se muestra en la figura 6,17.

CONCLUSION DE LA RECUPERACION ELASTICA EN EL ESTAMPADO DEL PARACHOQUES.

Al realizar el estudio de la recuperación elástica se concluye que no influye. La elasticidad del metal depende de las características del material a estampar y es corregida modificando los radios o ángulos de doblado en la matriz. Para realizar este cálculo se analiza mediante un diagrama que indica las correcciones de ángulo y radio a realizar en función del espesor y naturaleza del material en la figura 3.11. En el problema se toma de referencia los radios de la matriz original y al simular la recuperación elástica en la chapa metálica indica que es mínima y no afecta al estampado, por lo tanto la recuperación del material en este procedimiento de la alternativa no influye. Además, las piezas que al ser embutidas sufren un adelgazamiento de sus paredes no muestran el efecto de recuperación o reacción elástica.[23] El fenómeno de la reacción elástica también queda notablemente reducido por medio la existencia de paredes laterales verticales notables (como en el guardachoques), acanaladuras estampadas o cualquier tipo de estampado, así como con radios de redondeado pequeños en las esquinas del contorno del borde.[24]

[23] FUNDACION ASCAMM, Centre Tecnology, Defectos en piezas matrizadas, pag.34.
[24] FUNDACION ASCAMM, Centre Tecnology, Defectos en piezas matrizadas, pag.35.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- El software Stampack es muy útil para simular el estampado de chapas metálicas, ya que se obtienen resultados de forma grafica, permitiendo tener una idea clara de los problemas que se pueden presentar y corregirlos modificando los parámetros como son el espesor de la chapa, la ubicación de las herramientas, el tiempo y la velocidad de conformado entre otros y repetir las simulaciones que sean necesarias para predecir los diferentes comportamientos en el material, con la mejor alternativa de solución; evitando así perdidas económicas tanto en tiempo como en materia prima.

- El software Stampack presenta una etapa fundamental para complementar el análisis de la simulación del conformado como es la recuperación elástica (Springback). El Software muestra la forma final de la geometría estampada e incluye la recuperación que sobreviene cuando se retiran las cargas aplicadas en el material deformado, este parámetro debe ser tomado en cuenta para el correcto diseño de la matriz y el punzón que conforman el troquel de estampado.

- Los cambios en el troquel de estampado, realizados por medio de la simulación en el software Stampack demuestran una considerable mejora ante las deformaciones de la pieza estampada, por lo cual se concluye que la alternativa realizada variando los parámetros de estampado en el programa ofrece mejores resultados ante las deformaciones de la chapa metálica.

- El software Stampack permite importar geometrías creadas en otros programas de CAD (AutoCAD, SOLIDWORKS, AUTODESK INVENTOR) mas fáciles de utilizar permitiendo disminuir el tiempo de dibujo, ya que el software si bien es de gran ayuda en las simulaciones de conformado, presenta limitaciones al realizar geometrías complejas como la de un parachoques.

- Al importar la geometría dibujada en el programa de Solidworks al software Stampack, esta presenta una serie de errores en el contorno de las superficies, para lo cual el software presenta una opción de corrección, las mismas que dependiendo la complejidad de la geometría puede convertirse en un trabajo laborioso que requiere demasiado tiempo (aunque no mas que el de dibujar en el mismo software), pero permitiendo obtener de igual forma los resultados finales del cálculo.

- El tiempo transcurrido en una simulación de una geometría grande es demasiado largo en la etapa del formado, aunque puede disminuir un poco si se agranda el mallado y se incrementa la velocidad de formado pero los resultados son menos precisos.

- El software Stampack permite adquirir experiencia a estudiantes de diseño interesados en el área de matriceria permitiéndoles conocer mas los diferentes parámetros que se utilizan en el estampado de chapas metálicas para el manejo de otros programas; haciendo mas fácil su aplicación tanto en su trayectoria académica como laboral.

- El presente trabajo es una muestra del vínculo que debe existir entre la Universidad y el campo laboral ya que de esta manera es posible caminar hacia el desarrollo tecnológico.

RECOMENDACIONES

- Para realizar la importación de una geometría de estampado de un programa CAD al software Stampack es importante tener presente que esta debe ser realmente compleja, debido a que la eliminación de errores por la importación de la geometría que se generan en el software Stampack resulta un proceso largo y requiere de paciencia; por lo que se recomienda en lo posible realizar o diseñar las geometrías de estampado en el mismo software.

- Se recomienda buscar alternativas en programas CAD que permitan una modificación rápida de las geometrías importada al software Stampack, ya que el presente trabajo se lo realizo en el programa de Solidworks que aunque es de fácil uso, presenta muchos errores en la importación de la geometría haciendo que la corrección de la misma sea demasiado larga.

- Se recomienda realizar un estudio profundo del planteamiento del problema de estampado que se requiere simular, para tener presentes los parámetros a los que se debe limitar como son el espesor y geometría de la placa a simular, el tipo de material y la operación a realizar para que la solución sea valida, ya que si bien, el software Stampack presenta una gran amplitud para cambiar los diferentes parámetros, los problemas que se presentan en las industrias generalmente tienen especificaciones a las que se deben someter.

- Se recomienda que se hagan diseños donde la recuperación elástica se haga mas evidente e influya en el problema, ya que Software Stampack es de los pocos que presenta esta operación y puede ser de gran ayuda en simulaciones como canales o doblados en V.

- Es importante que la universidad facilite el uso y aprendizaje de este tipo de programas a los profesores y estudiantes para que puedan conocer de nuevas técnicas computacionales de análisis y solución de problemas que se presentan en la carrera de ingeniería mecánica.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ LIVESLEY R. Elementos Finitos: Introducción para Ingenieros. Limusa. México, 1994.

- ✓ MALLA C., RICARDO S. Aplicación del Método de Elementos Finitos en Procesos de Estampado Utilizando el Programa Computacional Stampack, Quito, EPN, Tesis, 2006

- ✓ OEHLER-KAISER. Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir. Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1977.

- ✓ ROSSI MARIO. Estampado en Frío de la Chapa. Novena Edición. Ed. Dossat. España, 1979.

- ✓ NAVARRO LOPEZ T. Troquelado y Estampación. Quinta Edición Ampliada, Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1976.

- ✓ J. E. SHIGLEY Y L. D. MITCHELL, Manual de Diseño Mecánico, Cuarta Edición, McGraw-Hill, México, 1989.

- ✓ T. BAUMEISTER Y E. A. AVALLONE, Marks Manual del Ingeniero Mecánico, Octava Edición, McGraw-Hill, Nueva York, 1992.

- ✓ LEYENSETTER, Tecnología de los Oficios Metalúrgicos, Primera Edición, Reverte, Barcelona, 1979.

- ✓ BÖHLER, Manual de Aceros, Quito, 2004.

- ✓ ELENEV, Estampado en frío, MIR, Moscú, 1983.

- ✓ HUTTON D, Fundamentals of Finite Element Análisis, Mac-Graw Hill, Washington, 2004

- ✓ STAMPACK, Sheet Stamping and Forming Analysis, Quantech, Barcelona, 2003

- ✓ SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, Fundamentals of Tool Design, Fifth Edition, 2003.

- ✓ VANA SUCHY, Handbook of Die Design, Mac-Graw Hill, 2006

- ✓ ANTONIO FLORIT, Fundamentos de Matricería, Ediciones CEAC, 2005

INTERNET

- http://www.lacan.upc.es/research/fundamentals/mesh_generation/index.html
- http://www.dim.udec.cl/cursos/elefin/practico/index.htm
- http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=9&pageid=1005920572

ANEXOS

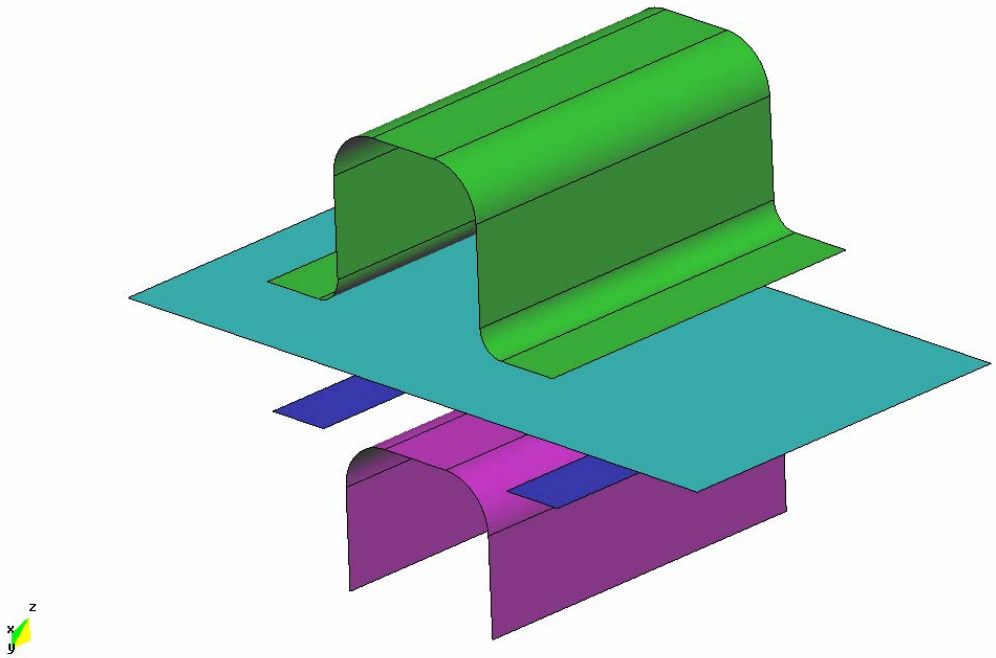
ANEXO A

SIMULACIÓN DEL SPRINGBACK DE UN CANAL ESTAMPADO

ANEXO A

SIMULACIÓN DEL SPRINGBACK DE UN CANAL ESTAMPADO

El presente anexo muestra la geometría en la que se realiza la simulación de la recuperación elástica, el cálculo de la deformación del radio de doblado, el coeficiente de recuperación elástica y el ángulo final de doblado.



La geometría generada en el software Stampack se importa al software ACAD para ser acotada y poder determinar las dimensiones obtenidas luego del estampado.

Para el espesor de la chapa de 2mm

El límite de fluencia es de 250 Mpa

El módulo de elasticidad es de 203 Gpa

Se calcula el ángulo de recuperación y la deformación de la fibra externa de la chapa estampada.

Para calcular la deformación de la capa externa se utiliza la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\frac{s}{2}}{r_i + \frac{s}{2}} \qquad (3.1)$$

s = 2 mm

ri = 4.2mm (Radio exterior de doblado)

$$\varepsilon = \frac{\frac{2}{2}}{4.3 + \frac{2}{2}} = 0.18$$

El coeficiente de recuperación elástica se calcula con la ecuación escrita en el capítulo 3.

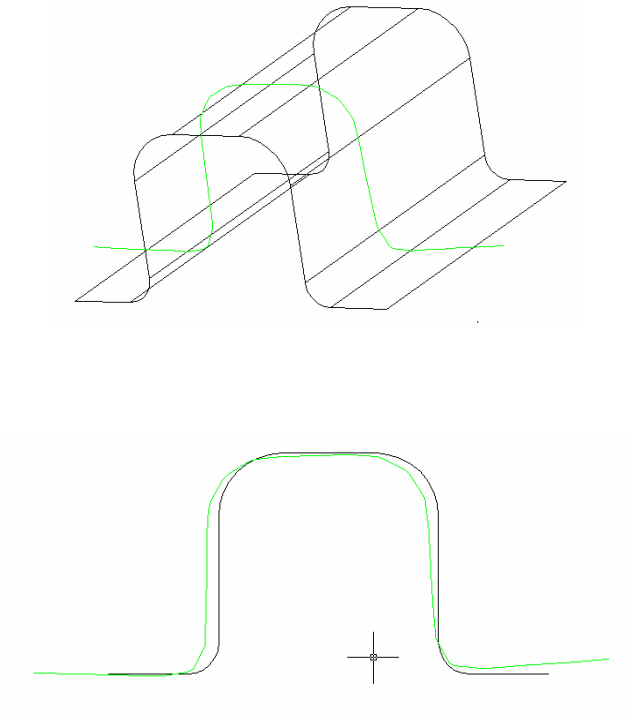
Coeficiente de “springback” = Θf / Θo = 88/90 = 0.97

Θf = 88

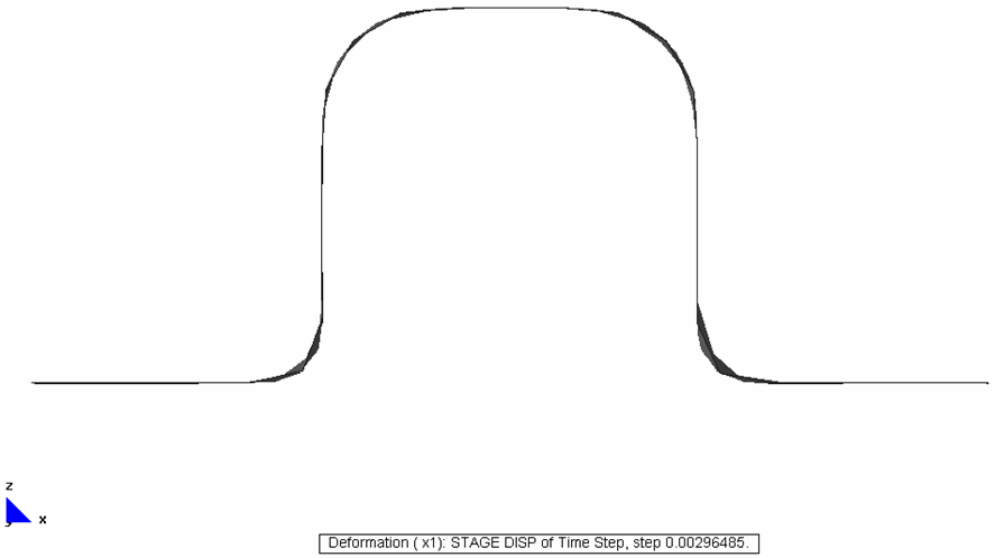
Θo = 90

El valor del ángulo final de estampado se obtiene importando la geometría en formato DXF hacia el AutoCAD.

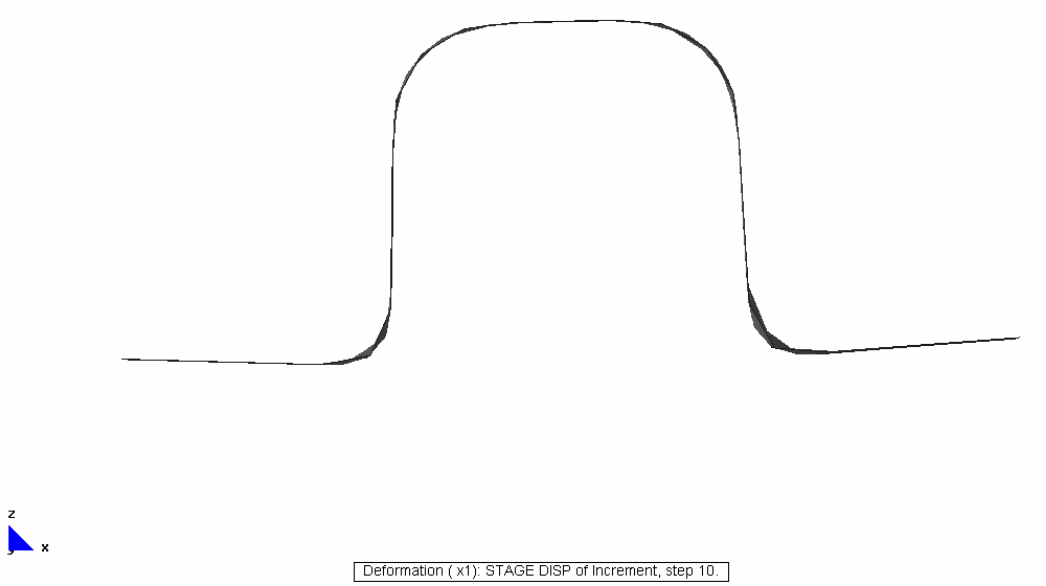
El Software Stampack permite importar el perfil de la geometría generada debido a la recuperación elástica e incorporarle a la geometría original para comparar las sus dimensiones finales.



Perfil de la recuperación elástica visualizada en el software STampack



Perfil de la geometría sin recuperación elástica



Recuperación elástica de la Chapa Estampada

ANEXO B

COSTOS DE FABRICACIÓN

ANEXO B

COSTO DE LOS CAMBIOS REALIZADOS EN LA MATRÍZ DE ESTAMPADO

COSTO DE LOS CAMBIOS REALIZADOS EN LA MATRÍZ DE ESTAMPADO

Fecha: 2007-06-24

ELABORADO POR: Wilson Guaranda/Natalia Bahamonde

DISEÑO Y DIRECCION TECNICA	Tiempo empleado y costo total		
	Horas	Costo	
		Por hora	Total
Diseño	40,0	11,02	440,80
Análisis Dimensional	1,0	16,53	16,53
Dirección técnica	3,0	16,53	49,59
COSTO 1	**44,0**		**506,92**

OPERACIONES	Tiempo empleado y costo total		
	Horas	Costo	
MAQUINA		Por hora	Total
Fresadora	40,0	14,88	595,20
Torno	0,0	14,77	0,00
Sierra elec.	1,0	6,14	6,14
Taladro Col.	0,0	7,47	0,00
Electrohilo	20,0	15,00	300,00
Oxicorte	1,0	7,47	7,47
CNC VF-3	0,0	24,00	0,00
Montaje CNC VF-3	0,0	24,00	0,00
CNC VF-3	2,0	30,00	60,00
Montaje CNC VF-3	0,5	30,00	15,00
Rectificadora	21,0	15,00	315,00
Manual	27,0	5,51	148,77
COSTO 2	**112,5**		**1.447,58**

MATERIA PRIMA

		Costo	
Material	Cantidad(kg)	Unitario(usd/kg)	Total
Acero K100 (para tratamiento tèrmico)	100,13	11,76	1.177,58
COSTO 3			**1.177,58**

INSUMOS

		Costo	
Insumos	Cantidad	Unitario	Total
Perno Allen M10 x 1,5 x 30	15	0,26	3,97
Perno Allen M12 x 1,75 x 40	15	0,60	9,00
Lija Velcro D. 5" No. 8	10	0,22	2,20
COSTO 4			**15,17**

TRABAJOS DE TERCEROS

			Costo
Proveedor / Servicio	Unitario(usd/kg)	Cantidad(kg)	Total
Tratamiento térmico	4,45 usd/kg	100,13	445,60
COSTO 5			**445,60**

PRECIO 5

COSTO POR CAMBIOS REALIZADOS	
	COSTO
DISEÑO, ANALISIS DIMENSIONAL Y DIRECCIÓN TÉCNICA	506,92
OPERACIONES	1.447,58
MATERIA PRIMA	1.177,58
INSUMOS	15,17
TRABAJOS DE TERCEROS	445,60
COSTO TOTAL	3.592,86

COSTO DE LA NUEVA DE LA MATRÍZ DE ESTAMPADO

COSTO DE LA NUEVA MATRÍZ DE ESTAMPADO

Fecha:	2007-06-24
ELABORADO POR:	Wilson Guaranda/Natalia Bahamonde

DISEÑO Y DIRECCION TECNICA	Tiempo empleado y costo total		
	Horas	Costo	
		Por hora	Total
Diseño	90,0	11,02	991,80
Análisis Dimensional	1,0	16,53	16,53
Dirección técnica	3,0	16,53	49,59
COSTO 1	**94,0**		**1.057,92**

OPERACIONES	Tiempo empleado y costo total		
	Horas	Costo	
MAQUINA		Por hora	Total
Fresadora	120,0	14,88	1.785,60
Torno	3,0	14,77	44,31
Sierra elec.	3,0	6,14	18,42
Taladro Col.	0,0	7,47	0,00
Electrohilo	20,0	15,00	300,00
Oxicorte	4,0	7,47	29,88
CNC VF-9	30,0	24,00	720,00
Montaje CNC VF-3	5,0	24,00	120,00
CNC VF-3	2,0	30,00	60,00
Montaje CNC VF-3	0,5	30,00	15,00
Rectificadora	40,0	15,00	600,00
Manual	60,0	5,51	330,60
COSTO 2	**287,5**		**4.023,81**

MATERIA PRIMA

Material		Costo	
Acero K100 (para tratamiento tèrmico)	Cantidad(kg)	Unitario(usd/kg)	Total
COSTO 3	250,00	11,76	2.940,00
			2.940,00

INSUMOS

Insumos		Costo	
Perno Allen M10 x 1,5 x 30	Cantidad	Unitario	Total
Perno Allen M12 x 1,75 x 40	30	0,26	7,95
Lija Velcro D. 5" No. 8	30	0,60	18,00
COSTO 4	15	0,22	3,30
			29,25

TRABAJOS DE TERCEROS

Proveedor / Servicio			Costo
Tratamiento térmico	Unitario(usd/kg)	Cantidad(kg)	Total
COSTO 5	4,45 usd/kg	100,00	445,00
			445,00
PRECIO 5			

COSTO POR CAMBIOS REALIZADOS	
	COSTO
DISEÑO, ANALISIS DIMENSIONAL Y DIRECCIÓN TÉCNICA	1.057,92
OPERACIONES	4.023,81
MATERIA PRIMA	2.940,00
INSUMOS	29,25
TRABAJOS DE TERCEROS	445,00
COSTO TOTAL	8.495,98

ANEXO C

PLANO DE MEJORAS EN EL TROQUEL