

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE INGENIERÍA**

### **APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN PROCESOS DE ESTAMPADO UTILIZANDO EL PROGRAMA COMPUTACIONAL “STAMPACK”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**CARLOS LENIN MALLA CISNEROS**

**RICARDO JAVIER SARANGO JIMBO**

**DIRECTOR: ING. IVÁN ZAMBRANO**

**Quito, Mayo 2006**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Carlos Lenin Malla Cisneros, y Ricardo Javier Sarango Jimbo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento

A través de la presente declaración cedemos 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.

---

Carlos Malla C.

---

Ricardo Sarango J.

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Malla C. y Ricardo Sarango J., bajo mi supervisión.

---

Ing. Iván Zambrano  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## AGRADECIMIENTOS

A Dios y a Nuestros Padres, quienes nos han apoyado para la culminación de este trabajo.

A la Carrera de Ingeniería Mecánica, que en sus aulas nos ha formado no solo a nivel profesional sino también, a nivel personal.

Al Ing. Iván Zambrano por su acertada dirección en la realización de este proyecto y a todos los profesores y personas que de una u otra manera han colaborado con sus opiniones y experiencia.

Carlos Malla.  
Ricardo Sarango.

## DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María, quienes han sido mi apoyo, refugio y guía en todos los momentos de mi vida; a mis papacitos Maximiliano y Carmen por su amor, dedicación, esfuerzo y bendición; a mis hermanos Silvia, Eduardo, Edison y Jorge, gracias por su apoyo y ejemplo; para Angélica y Janeth; para Ian “mi mejor amigo”, quien es un aliciente en mi vida.

A mis abuelitos, tíos, primos, y demás familiares y amigos; gracias por sus anhelos y consejos. A mis compañeros de promoción en especial a Carlos gracias por el apoyo, paciencia y amistad.

Gracias de corazón a todas las personas que me ayudaron y alentaron a conseguir este nuevo triunfo.

Ricardo Javier.

Este trabajo va dedicado al papi Marcelo y a la mami Marcela por todo el amor, cuidados, apoyo y ejemplo que siempre me han dado en la vida, a mis hermanas Vicky, Danny que las quiero mucho, a mis sobrinas Ema y Dayré.

A mis abuelos que siempre me acompañaron con sus oraciones.

A todos mis familiares que me apoyaron en todo en momento e hicieron posible culminar este trabajo.

A mis compañeros y amigos que estuvieron conmigo en cada una de las etapas de este proyecto especialmente a Ricardo mi compañero y amigo que con su ayuda hizo posible que alcancemos esta meta, a mis “hermanos” a todos gracias.

A las personas que directa o indirectamente colaboraron con el presente trabajo. A Dios y la Virgen María por ser Luz y Guía en mi camino.

Carlos Lenin.

# CONTENIDO

RESUMEN.....			
xvii			
PRESENTACIÓN.....			
xix			
CAPÍTULO I Deformación Plástica en Chapas Metálicas.....			
20			
1.1 Teoría de Deformación Plástica.....			
20			
1.1.1 Introducción a la plasticidad.....			
20			
1.1.1.1 Maclaje.....			
20			
1.1.1.2			
Deslizamiento.....	21		
1.1.2 Flujo			
plástico.....	22		
1.1.3 Endurecimiento			por
deformación.....	22		
1.2 Estudio de Esfuerzos y			
Deformaciones.....	23		
1.2.1 Curva		Esfuerzo	–
Deformación.....	23	1.2.1.1	Curva
Esfuerzo-Deformación real.....	23		
1.2.2 Criterios			de
Fluencia.....	24		
1.2.2.1			Esfuerzo
equivalente.....	24		
1.2.2.2		Criterio	de
Misses.....	24		Von

1.2.2.3	Superficie	de
fluencia.....		25
1.2.3	Límites de Deformación.....	26
1.2.3.1	Curva límite de deformación FLC.....	26
1.2.3.2	Diagrama límite de deformación FLD.....	27
1.3	Conformado Mecánico por Estampado.....	28
1.3.1	La operación de estampado.....	28
1.3.2	La deformación en el estampado.....	29
1.3.3	Cuantificación de la deformación en el estampado.....	32
1.3.3.1	Fuerza ejercida por el punzón.....	33
CAPÍTULO II Método de los Elementos Finitos.....		
36		
2.1	Descripción del Método de los Elementos Finitos.....	36
2.1.1	Ventajas de la aplicación del método de los Elementos Finitos.....	40
2.2	Procedimiento General para el Análisis con el Método de los Elementos Finitos .....	41
2.2.1	Preprocesamiento .....	42
2.2.2	Solución.....	42
2.2.3	Postprocesamiento.....	43

2.3 El Método de los Elementos Finitos en el Programa Computacional Stampack.....	43
2.3.1 Discretización Espacial.....	44
2.3.2 Tipos de Elementos.....	45
2.3.2.1 Elementos tridimensionales.....	45
2.3.2.2 Elementos bidimensionales.....	45
2.3.2.3 Elementos laminares.....	46

CAPITULO III Aplicación del Software Stampack en la Simulación de un Problema de Estampado.....  
47

3.1 Definición del Problema.....	47
3.2 Solución del Problema.....	49
3.2.1 Pre-Procesamiento.....	49
3.2.1.1 Creación de la geometría.....	49
3.2.1.2 Importación de la geometría- Matriz, chapa, frenos.....	55
3.2.1.3 Generación de las diferentes mallas.....	58
3.2.1.4 Caracterización de las herramientas.....	68
3.2.1.5 Detalle del historial de variación.....	77

3.2.1.6	Alineación de herramientas.....	78
3.2.1.7	Caracterización de los procesos.....	79
3.2.2	Post-Procesamiento.....	92
3.3	Análisis de Resultados Obtenidos.....	95
3.3.1	Interpretación de unidades y escalas de resultados.....	95
3.3.1.1	Forma final.....	95
3.3.1.2	Desplazamientos totales.....	96
3.3.1.3	Espesor relativo .....	97
3.3.1.4	Deformación principal mayor.....	97
3.3.1.5	Mapa FLD.....	98
3.3.1.6	Esfuerzo de Von Misses (superficie superior).....	99
3.3.1.7	Esfuerzo de Von Misses (superficie inferior).....	100
3.3.1.8	Calidad de conformado.....	100
3.3.1.9	Zonas de seguridad.....	101
3.3.1.10	Marcas en la chapa.....	102
3.3.1.11	Desgaste de herramientas.....	103
3.3.1.12	Efecto de los frenos.....	103

3.3.1.13	Animación.....	104
3.3.2	Análisis e Interpretación de Curvas Obtenidas.....	105
3.3.2.1	Curvas históricas.....	106
3.3.2.2	Curvas combinadas.....	109

CAPÍTULO IV Análisis y Comparación entre Modelos Simulados con  
Diferentes Variables

	.....	112
4.1	Comparación de modelos al variar el radio de acuerdo.....	112
4.1.1	Espesor Relativo.....	113
4.1.2	Mayor Deformación Principal.....	115
4.1.3	Maximo Esfuerzo de Von Misses (Superficie).....	116
4.1.4	Mapa FLD.....	118
4.1.5	Calidad De Conformado.....	119
4.2	Comparación de modelos al variar la velocidad de trabajo del punzón.....	120
4.2.1	Espesor Relativo.....	120
4.2.2	Mayor Deformación Principal.....	122
4.2.3	Maximo Esfuerzo de Von Misses (Superficie).....	124
4.2.4	Mapa FLD.....	125

4.2.5	Calidad De Conformado.....	127
4.3	Comparación de modelos al variar la fuerza del pisador.....	128
4.3.1	Espesor Relativo.....	128
4.3.2	Mayor Deformación Principal.....	130
4.3.3	Maximo Esfuerzo de Von Misses (Superficie).....	131
4.3.4	Mapa FLD.....	133
4.3.5	Calidad De Conformado.....	134
4.4	Comparación de modelos al variar el espesor de la chapa.....	135
4.4.1	Espesor Relativo.....	135
4.4.2	Mayor Deformación Principal .....	137
4.4.3	Maximo Esfuerzo de Von Misses (Superficie).....	139
4.4.4	Mapa FLD.....	140
4.4.5	Calidad De Conformado.....	142
4.5	Comparación de modelos al variar el material de la chapa.....	143
4.5.1	Espesor Relativo.....	143
4.5.2	Mayor Deformación Principal.....	145
4.5.3	Maximo Esfuerzo de Von Misses (Superficie).....	146

4.5.4	Mapa FLD.....	148
4.5.5	Calidad De Conformado.....	149
4.6	Comparación de modelos al realizar dos agujeros en las paredes del canal .....	150
4.6.1	Espesor Relativo.....	151
4.6.2	Mayor Deformación Principal.....	153
4.6.3	Maximo Esfuerzo de Von Misses (Superficie).....	154
4.6.4	Mapa FLD.....	156
4.6.5	Calidad De Conformado.....	157
4.7	Ejemplo de simulación de un proceso de estampado cuyo resultado es la falla del material .....	158
4.7.1	Forma Final.....	159
4.7.2	Espesor Relativo.....	160
4.7.3	Mayor Deformación Principal.....	160
4.7.4	Esfuerzo de Von Misses.....	161
4.7.5	Mapa FLD.....	161
4.7.6	Calidad de Conformado.....	161
4.7.7	Visualización Animada de la Simulación.....	162

CAPÍTULO V Conclusiones y Recomendaciones.....

165

5.1 Conclusiones.....

165

5.2 Recomendaciones.....

167

BIBLIOGRAFÍA.....

169

ANEXOS

Anexo 1. Manual del Usuario del Programa de Simulación "STAMPACK".....

172

Anexo 2. Base de datos de Materiales de Stampack.....

221

Anexo 3. Plano del Canal Estampado.....

224

Anexo 4. Representación de herramientas utilizadas en las simulaciones.....

226

Anexo 5. Reportes de Simulaciones.....

228

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Curva Esfuerzo – Deformación .....	20
Figura 1.2	Curva Esfuerzo – Deformación para diferentes materiales.....	23
Figura 1.3	Diagramas esfuerzo deformación para el acero.....	23
Figura 1.4	Esfuerzo Equivalente .....	24
Figura 1.5	Superficie de Fluencia .....	25
Figura 1.6	Curva Límite de Deformación.....	27
Figura 1.7	Ejemplo de “Diagrama Límite de Deformación” .....	27
Figura 1.8	Deformaciones y tensiones en un proceso de estampado.....	30
Figura 1.9	Variación de espesor como resultado de las deformaciones.....	31
Figura 1.10	Deformación en las tres direcciones principales de tensión .....	31
Figura 1.11	Gráficos de la fuerza de embutición en función de la carrera de estampado.....	34
Figura 2.1	Dominio bidimensional de la variable de campo $\Phi(x, y)$ .....	37
Figura 2.2	Elemento finito de tres nodos definido en el dominio .....	37
Figura 2.3	Nodos en el interior del elemento.....	38
Figura 2.4	Funciones de interpolación para un elemento de tres nodos.....	39
Figura 2.5	Conexión entre nodos.....	40
Figura 2.6	Representación de un cuerpo sometido a esfuerzos de deformación.....	44
Figura 2.7	Modelo discretizado.....	44
Figura 3.1	Forma final de la pieza a ser estampada.....	47
Figura 3.2	Diagrama esfuerzo-deformación.....	48
Figura 3.3	Creación del layer “Chapa” .....	50
Figura 3.4	Visualización geometría de la chapa .....	50
Figura 3.5	Creación de la superficie de la chapa.....	51

Figura 3.6	Geometría de freno1.....	51
Figura 3.7	Geometría Matriz-pisador.....	52
Figura 3.8	Líneas de contorno Matriz-punzón.....	52
Figura 3.9	Geometría Matriz-punzón.....	53
Figura 3.10	Creación de Radios de acuerdo.....	53
Figura 3.11	Geometría Matriz-radios.....	54
Figura 3.12	Visualización conjunto Matriz.....	54
Figura 3.13	Ventana Layers.....	55
Figura 3.14	Importación de matriz.....	55
Figura 3.15	Importación de la chapa.....	56
Figura 3.16	Importación de frenos.....	56
Figura 3.17	Ventana “Draw normals surfaces” .....	57
Figura 3.18	Ventana “Render flat lighting” .....	58
Figura 3.19	Caracterización de la malla de la Matriz.....	59
Figura 3.20	Ventana de ingreso de número de elementos.....	59
Figura 3.21	Ventana Mallado por error cordal.....	60
Figura 3.22	Caracterización para mallado de la chapa.....	61
Figura 3.23	Comando Generar Malla.....	61
Figura 3.24	Mallas generadas.....	62
Figura 3.25	Orientación de normales en la chapa.....	62
Figura 3.26	Inversión de normales en la chapa.....	63
Figura 3.27	Generación de la malla del pisador.....	63
Figura 3.28	Generación de la malla del punzón.....	64
Figura 3.29	Generación del layer “Matriz” .....	64
Figura 3.30	Matriz formada por el pisador, punzón y radios.....	65

Figura 3.31	Ubicación comando “Problem type” .....	65
Figura 3.32	Menú “Workshop” .....	66
Figura 3.33	Opción “Process type” .....	66
Figura 3.34	Opción “General” .....	67
Figura 3.35	Opción “Symmetries” .....	67
Figura 3.36	Ventana “Define tools” .....	68
Figura 3.37	Ventana “Define blank zone” .....	68
Figura 3.38	Ventana “Define sheet properties” .....	69
Figura 3.39	Ventana “Material properties” .....	70
Figura 3.40	Caracterización del material de la chapa.....	70
Figura 3.41	Asignación de un nombre a la chapa creada.....	71
Figura 3.42	Visualización en el menú del material asignado a la chapa.....	71
Figura 3.43	Caracterización de la herramientas.....	72
Figura 3.44	Ventana “Add a new tool”.....	72
Figura 3.45	Visualización en el menú principal de la nueva herramienta.....	73
Figura 3.46	Adición de la herramienta “pisador”.....	74
Figura 3.47	Visualización en el menú principal de la nueva herramienta.....	74
Figura 3.48	Definición de la fuerza de pisado.....	75
Figura 3.49	Asignación del layer a la matriz. ....	76
Figura 3.50	Definición del freno equivalente. ....	77
Figura 3.51	Accediendo al historial de variación. ....	77
Figura 3.52	Ventana “Define detailed history” .....	78
Figura 3.53	Ventana “Align tools”. .....	79
Figura 3.54	Opción “Operations”. ....	79
Figura 3.55	Ventana “Define operations”. ....	80

Figura 3.56	Ventana “Add a new operation”	80
Figura 3.57	Opción “Tools”	81
Figura 3.58	Opción “Gravity”	82
Figura 3.59	Opción “Holding”	82
Figura 3.60	Opción “Forming”	83
Figura 3.61	Definición del recorrido del punzón	83
Figura 3.62	Ventana “Contact”	84
Figura 3.63	Ventana “Special output”	85
Figura 3.64	Ventana “Check stroke”	86
Figura 3.65	Verificación del recorrido del punzón	87
Figura 3.66	Opción “Restore last movement”	87
Figura 3.67	Menú “Calculate”	88
Figura 3.68	Ventana “Calculate”	89
Figura 3.69	Opción “General options”	89
Figura 3.70	Ventana “Process window”	90
Figura 3.71	Ventana “View process info”	90
Figura 3.72	Ventana “Process info”	91
Figura 3.73	Apariencia del modelo antes cargar los resultados	92
Figura 3.74	Ventana “Load results”	92
Figura 3.75	“Final Shape”	93
Figura 3.76	“Relative thickness”	93
Figura 3.77	Ventana “Load history information”	94
Figura 3.78	Forma Final	95
Figura 3.79	Desplazamiento Total	96
Figura 3.80	Espesor Relativo	97

Figura 3.81	Mayor deformación principal.....	97
Figura 3.82	Mapa FLD.....	98
Figura 3.83	Esfuerzo de Von Misses.....	99
Figura 3.84	Esfuerzo de Von Misses.....	100
Figura 3.85	Calidad de conformado.....	100
Figura 3.86	Zonas Seguras.....	101
Figura 3.87	Marcas en la chapa.....	102
Figura 3.88	Desgaste de Herramientas.....	103
Figura 3.89	Simulación de frenos.....	103
Figura 3.90	Secuencia de animación.....	104
Figura 3.91	Ubicación de los nodos 1487 y 367.....	105
Figura 3.92	Curva Desplazamiento vs. Tiempo.....	106
Figura 3.93	Curva Desplazamiento vs. Tiempo.....	106
Figura 3.94	Curva Espesor Relativo vs. Tiempo.....	107
Figura 3.95	Curva Deformación Principal vs. Tiempo.....	108
Figura 3.96	Curva Deformación Principal vs. Tiempo.....	108
Figura 3.97	Curva Deformación Principal vs. Desplazamiento.....	109
Figura 3.98	Curva Espesor Relativo vs. Desplazamiento.....	110
Figura 3.99	Curva Deformación Principal vs. Desplazamiento.....	110
Figura 3.100	Curva Espesor Relativo vs. Desplazamiento.....	111
Figura 4.1	Espesor relativo: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm, (c) radio 20mm .....	113
Figura 4.2	Análisis: (a) máximo espesor, (b) mínimo espesor .....	114
Figura 4.3	Deformación principal: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm, (c) radio 20mm .....	115
Figura 4.4	Análisis máx. deformación principal.....	116

Figura 4.5	Esfuerzo Von Misses: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm, (c) radio 20mm .....	117
Figura 4.6	Análisis esfuerzo de Von Misses.....	117
Figura 4.7	Mapa FLD: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm, (c) radio 20mm .....	118
Figura 4.8	Curva FLD vs Radio de Curvatura.....	119
Figura 4.9	Calidad de conformado: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm, (c) radio 20mm .....	120
Figura 4.10	espesor relativo: (a) 0.01m/s, (b) 1m/s, (c) 2m/s.....	121
Figura 4.11	análisis: (a) máximo espesor, (b) mínimo espesor.....	122
Figura 4.12	Deformación Principal: (a) 0.01m/s, (b) 1m/s, (c) 2m/s .....	123
Figura 4.13	Análisis Máx. Deformación principal.....	123
Figura 4.14	Esfuerzo de Von Misses: (a) 0.01m/s, (b) 1m/s, (c) 2m/s .....	124
Figura 4.15	Análisis Máximo esfuerzo de Von Misses Vs Velocidad .....	125
Figura 4.16	Mapa FLD: a) 0.03m/s, b) 1m/s, c) 2m/s.....	126
Figura 4.17	Curva FLD vs Velocidad del punzón.....	126
Figura 4.18	Calidad de Conformado a) 0.03m/s, b) 1m/s, c) 2m/s.....	127
Figura 4.19	Espesor relativo: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton.....	128
Figura 4.20	Análisis Espesor Relativo a) Máximo espesor, b) Mínimo espesor .....	129
Figura 4.21	Deformación principal: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton.....	130
Figura 4.22	Curva Deformación principal vs Fuerza del pisador.....	131
Figura 4.23	Esfuerzo Von Misses: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton.....	132
Figura 4.24	Curva Esfuerzo Von Misses vs Fuerza del Pisador.....	132
Figura 4.25	Mapa FLD: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton.....	133
Figura 4.26	Curva Mapa FLD vs. Fuerza del pisador.....	134
Figura 4.27	Calidad de Conformado: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton.....	135

Figura 4.28	Variación de espesor: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm.....	136
Figura 4.29	Análisis espesor relativo: a) máxima variación, b) mínima variación .....	137
Figura 4.30	Deformación Principal: (a) 1mm, (b) 2mm, c) 4mm.....	138
Figura 4.31	Curva Deformación Principal vs Espesor de chapa.....	138
Figura 4.32	Esfuerzo de Von Misses: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm.....	139
Figura 4.33	Curva Esfuerzo de Von Misses vs. Espesor de la chapa .....	140
Figura 4.34	Mapa FLD: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm.....	141
Figura 4.35	Curva FLD vs Espesor de chapa.....	141
Figura 4.36	Calidad de formado: (a) 1mm, (b) 2mm, c) 4mm.....	142
Figura 4.37	Espesor relativo: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, c) Ac. Inoxidable .....	143
Figura 4.38	Análisis Espesor relativo: (a) Máxima variación, (b) Mínima Variación .....	144
Figura 4.39	Deformación principal: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable.....	145
Figura 4.40	Gráfico Deformación principal vs. Tipo de material .....	146
Figura 4.41	Esfuerzo de Von Misses: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable.....	147
Figura 4.42	Gráfico Esfuerzo de Von Misses vs Tipo de material.....	147
Figura 4.43	Mapa FLD: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable .....	148
Figura 4.44	Gráfico FLD vs. Tipo de Material.....	149
Figura 4.45	Calidad de formado: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable.....	150
Figura 4.46	Espesor relativo: a) rectángulo, b) círculo, c) rombo .....	151
Figura 4.47	Análisis espesor relativo: a) Máximo espesor, b) Mínimo espesor .....	152
Figura 4.48	Deformación principal: a) rectángulo, b) círculo, c) rombo.....	153

Figura 4.49	Gráfico Deformación principal vs. Tipo de agujeros.....	154
Figura 4.50	Esfuerzos de von mises: a) rectángulo, b) círculo, c) rombo.....	155
Figura 4.51	Gráfico Esfuerzo de Von Mises vs. Tipo de agujeros.....	155
Figura 4.52	Mapa FLD: a) rectángulo, b) círculo, c) rombo. ....	156
Figura 4.53	Gráfico FLD vs. Tipo de agujeros.....	157
Figura 4.54	Calidad de conformado: a) rectángulo, b) círculo, c) rombo.....	158
Figura 4.55	Visualización de la forma final.....	159
Figura 4.56	Espesor relativo.....	160
Figura 4.57	Mayor deformación principal .....	160
Figura 4.58	Esfuerzo de Von Misses.....	161
Figura 4.59	Mapa FLD.....	161
Figura 4.60	Calidad de conformado .....	161
Figura 4.61	Visualización de los pasos de la animación.....	164

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Criterios de falla para estampado.....	26
Tabla 1.2	Cuadro de deformaciones en procesos de Estampado.....	31
Tabla 2.1	<i>Elementos Finitos vs. Diferencias Finitas.....</i>	

## SIMBOLOGÍA

$S_y$	Límite de fluencia en tracción simple.
$\sigma_{xx}$ :	Esfuerzo en la dirección x
$\sigma_{yy}$ :	Esfuerzo en la dirección y
$\sigma_{zz}$ :	Esfuerzo en la dirección z
$\tau_{xy}$ :	Esfuerzo cortante en el plano xy
$\tau_{yz}$ :	Esfuerzo cortante en el plano yz
$\tau_{zx}$ :	Esfuerzo cortante en el plano zx
bo:	Espesor inicial
ho:	Altura inicial
l':	Longitudinal final
b':	Espesor final
h':	Altura final
$\varphi_1$ :	Deformación longitudinal
$\varphi_2$ :	Deformación del espesor
$\varphi_3$ :	Deformación de la altura
$d_0$ :	Diámetro inicial
D:	Diámetro del recorte en la chapa
d:	Diámetro del punzón
P:	Fuerza del punzón
s:	Espesor
$k_{fm}$ :	Resistencia media a la deformación
$\eta_{FORM}$ :	Coeficiente de cambio de forma
$\beta$ :	Relación diámetro del recorte sobre radio del punzón
$\sigma_1$ :	Mayor esfuerzo principal
$\sigma_2$ :	Esfuerzo principal
$\sigma_3$ :	Menor esfuerzo principal
$\Phi(x, y)$ :	Variable de campo bidimensional
$P(x, y)$ :	Punto cualquiera de un espacio bidimensional
$N(x, y)$ :	Función de interpolación
V:	Dominio de integración
S:	Superficie de contorno
b:	Fuerzas volumétricas
t:	Fuerzas de contacto
u:	Campos de desplazamiento
$\dot{u}$ :	Campos de velocidad
$\ddot{u}$ :	Campo de aceleración
$u^{(e)}$ :	Desplazamiento en cualquier punto dentro del elemento (e)
$N_i^{(e)}$ :	Función de interpolación asociada con el nodo i.
$\hat{u}_i$ :	Desplazamiento en el nodo i.
M:	Matriz de Masa
C:	Matriz de Amortiguamiento
$F^{int}$ :	Vectores de fuerzas internas
$F^{ext}$ :	Vectores de fuerzas externas

## RESUMEN

El presente proyecto abarca el análisis mediante elementos finitos en procesos de estampado, mediante el programa computacional Stampack; a través de simulaciones que representen estos procesos, con el fin de obtener la solución más adecuada para un determinado proceso, que garantice que al llevarlo a la práctica, el resultado final sea muy similar al obtenido mediante el programa.

En el capítulo primero se realiza una introducción a la deformación plástica analizando esfuerzos y deformaciones, luego se presenta los fundamentos del proceso de estampado en chapas metálicas, las variables y herramientas que influyen en el mismo, el proceso tecnológico del estampado y un estudio de las deformaciones en el estampado.

En el segundo capítulo se hace un estudio del Método de los Elementos Finitos, sus ventajas, campo de aplicación y procedimiento. Se empieza con una breve introducción a este método de cálculo, luego se analiza las ventajas que presenta frente a los métodos tradicionales de cálculo, y finalmente se revisa las ecuaciones base de este método. En esta parte se verá la necesidad que tiene el Método de los Elementos Finitos de las computadoras para poder resolver los problemas planteados, ya que las ecuaciones planteadas son muy difíciles de resolver por métodos tradicionales.

En el tercer capítulo, se procede a realizar una primera simulación detallada, es decir se ejecuta paso a paso cada una de las etapas de la simulación; la cual permitirá tener una idea clara del funcionamiento tanto en el preproceso como en el postproceso. Finalizado el proceso de cálculo, se analizan las diferentes visualizaciones de resultados, que pueden ser de forma gráfica o de forma numérica.

En el capítulo cuarto se realizan varias simulaciones, las cuales difieren unas de otras en uno o dos parámetros con el fin de realizar las comparaciones entre estas y obtener conclusiones que permitan un criterio de cual es el

comportamiento en las diferentes soluciones planteadas. Esta característica arrojará la información requerida para obtener la solución más conveniente a un determinado problema, luego de un análisis de los resultados de cada una de las simulaciones anteriores. Además en este capítulo se incluye una simulación de un ejemplo de falla, es decir un problema al cual deliberadamente se ha modificado ciertos parámetros con el fin de lograr la rotura del material durante el proceso de simulación.

Finalmente, como parte fundamental de este proyecto, se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes que se han recopilado durante la realización del proyecto; las cuales serán de gran ayuda para guiar futuros trabajos y proyectos relacionados con este interesante tema.

También se incluye en los anexos un documento guía del programa computacional Stampack, donde se hace un estudio de los módulos que dispone este programa; Pre-proceso y Post-Proceso y de las funciones que realiza cada uno de estos. También se revisan los comandos más importantes que poseen cada uno de estos módulos, como se aplican, bajo que condiciones, y obviamente el resultado que obtendremos con su utilización. Esta sección es una de las más importantes porque nos permitirá identificar cuales son las capacidades reales del programa.

## PRESENTACIÓN

El estampado de metales ha sido y es uno de los procesos más utilizados dentro de la industria metalmecánica, y, a pesar de los avances tecnológicos, no ha tenido un desarrollo significativo, es decir, el éxito de estos procesos depende en gran medida de la experiencia obtenida por procedimientos basados en “prueba y error”, que ocasionan un gasto considerable de recursos. Con la aparición del Método de los Elementos Finitos y con la utilización de herramientas computacionales, este proceso puede ser estudiado desde otro punto de vista, es decir, se puede analizar este proceso mediante simulaciones en computadora.

Estas simulaciones permitirán predecir el comportamiento de procesos de estampado antes de ejecutarlos en la práctica, y si es el caso corregir los parámetros necesarios para obtener un buen proceso. Esto significa una reducción de etapas previas a la ejecución del proceso, disminución de riesgo de productos defectuosos, ahorro de tiempo, ahorro de recursos; además los resultados obtenidos con estas simulaciones permitirán escoger los parámetros técnicos y económicos mas convenientes para ejecutar procesos de estampado con una alta probabilidad de éxito.

El presente proyecto pretende además, ser una referencia para la actualización y modernización tecnológica de la industria en nuestro país, siendo un punto de partida, que las empresas dedicadas a estos procesos de fabricación, se interesen en el programa ya que el mismo les ofrece ventajas considerables en comparación con sus actuales métodos de diseño y producción. Por otro lado, este proyecto busca implantar una nueva alternativa de diseño en el ámbito de la ingeniería, especialmente en el área de conformado mecánico; y ser además un incentivo para que la Universidad junto a los estudiantes, se interesen en el estudio y desarrollo de nuevos métodos de diseño, de acuerdo a la demanda y avance de la tecnología.

# CAPÍTULO I

## DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN CHAPAS METÁLICAS

### *TEORÍA DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA*

#### 1.1.1 INTRODUCCIÓN A LA PLASTICIDAD

El cambio de forma que se produce en una operación de conformado, en este caso por el trabajado en frío, debe ser permanente y al final la pieza no debe fallar como resultado de esta deformación. La plasticidad del material es la que hace posible aplicar una determinada deformación sin llegar a la falla, y ningún material puede ser sometido a un proceso de conformado mecánico si no ha llegado al estado plástico.

Este estado plástico, se lo ubica dentro de la curva esfuerzo-deformación entre los puntos 1 y 2, como se muestra en la figura:

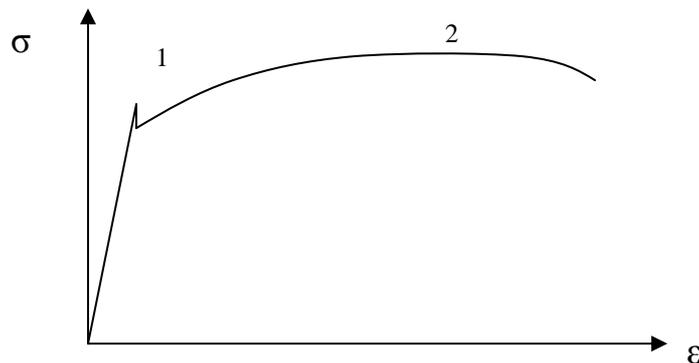


Figura 1.1 Curva Esfuerzo – Deformación

Los mecanismos por los cuales se hace presente la deformación plástica son: maclaje y deslizamiento.

##### 1.1.1.1 Maclaje

Se origina cuando un cristal al deformarse toma una orientación diferente, pero relacionada simétricamente con el resto de la estructura cristalina, originando nuevos sistemas de deslizamiento en una orientación favorable con respecto a la dirección del esfuerzo. A esta zona de diferente orientación se la denomina “macla”.

Los límites de grano son un obstáculo para el avance de la macla, es decir la deformación se detiene al llegar a estas zonas, debido a que el ordenamiento atómico en estos límites es aleatorio.

El lugar de mayor alteración de la red cristalina se llama “núcleo de dislocación”. Las causas de la aparición de las dislocaciones pueden ser microinclusiones en la masa fundida, defectos provocados por las tensiones, etc.

El mecanismo de movimiento de las dislocaciones puede ser comparado con el desplazamiento de una alfombra por el suelo de la manera siguiente: se desplaza un extremo de la alfombra formando una córcova y, después, desplazando esta última a lo largo de la alfombra, se desplaza toda la alfombra. El esfuerzo que se requiere para esta operación es mucho menor que el necesario para el desplazamiento simultáneo de toda la alfombra. De igual modo, las dislocaciones existentes en el cristal permiten realizar la deformación plástica a cuenta de los desplazamientos de los átomos y no de todo el plano cristalino.

### **1.1.1.2 Deslizamiento**

Se genera a través de los sistemas de deslizamiento, formados por los planos y direcciones de deslizamiento. Estos deslizamientos se producen por el movimiento de las dislocaciones, pues los esfuerzos necesarios para mover a una de estas, a través de un cristal, son muy pequeños comparados con los que se requieren para que se deslice un plano sobre otro.

Las dislocaciones incrementan el grado de ductilidad de los metales debido a que se introducen fácilmente en su estructura, se mueven libremente y se multiplican durante la deformación.

El mecanismo de deformación plástica de un policristal es mucho más complicado. Esta deformación puede efectuarse tanto dentro de las cristalitas como entre las mismas. La primera transcurre igual que en el monocristal, por medio del deslizamiento o maclación, la segunda, mediante el giro y el desplazamiento de unos granos respecto a otros.

La deformación dentro de las cristalitas es el proceso principal del estampado en frío porque a temperatura normal la resistencia de los límites intergranulares es mayor que la resistencia del propio grano. La deformación plástica del policristal va acompañada de la alteración de la forma de los granos. Los granos se alargan en dirección del flujo de metal formando una estructura fibrosa. Durante grandes deformaciones los planos de deslizamiento de los granos coinciden con la dirección del flujo.

Así, con la deformación plástica se logra obtener la forma final deseada y además un mejoramiento de las propiedades del material debido al endurecimiento por deformación.

### **1.1.2 FLUJO PLÁSTICO**

La deformación de un metal es un proceso atómico. Las dislocaciones existentes en la estructura cristalina de los metales permiten que se produzca la deformación, mediante el deslizamiento, bajo tensiones muy pequeñas comparadas con tensiones de una estructura cristalina perfecta (sin dislocaciones).

La deformación plástica de un material significa que este ha sobrepasado su límite de fluencia sin llegar a su límite de rotura.

Durante el estampado se producen grandes deformaciones que requieren de grandes fuerzas. Los desplazamientos en la zona elástica son pequeños, por lo tanto prácticamente la totalidad de las deformaciones se producen en la zona plástica.

### **1.1.3 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN**

En casi todos los materiales, desde que se empieza la deformación hasta la destrucción del mismo, se observa que existe un aumento de la resistencia del material relacionado con el grado de deformación.

Este endurecimiento se produce por la restricción del movimiento de las dislocaciones a través del cristal, producidas por la interacción con los bordes de grano o con otras dislocaciones.

Cuanto más difícil es el desplazamiento de las dislocaciones en el material, tanto mayor es el coeficiente de endurecimiento del mismo, y después de la deformación en frío las características de solidez del material aumentan.

## 1.2 ESTUDIO DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

### 1.2.1 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN.

Es un diagrama convencional o ingenieril que explica el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a un determinado esfuerzo. En este diagrama se indica la deformación teórica y no la deformación real del material, debido a que esta curva se halla relacionada con las dimensiones iniciales de la probeta, que varían durante el ensayo (la curva esfuerzo-deformación real si toma en cuenta las variaciones de la probeta, obteniéndose así resultados mas reales).

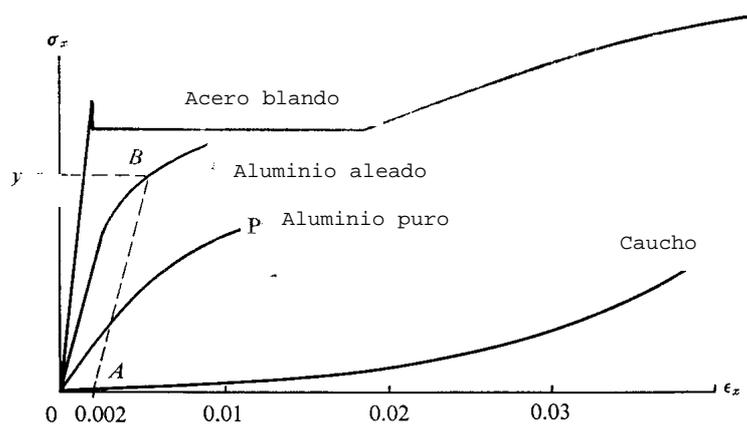


Figura 1.2 Curva Esfuerzo – Deformación para diferentes materiales.

#### 1.1.1.1 Curva Esfuerzo-Deformación Real

Muestra el comportamiento del material para un esfuerzo y deformación verdaderos, ya que considera la variación de las dimensiones de la probeta que se producen durante el ensayo.

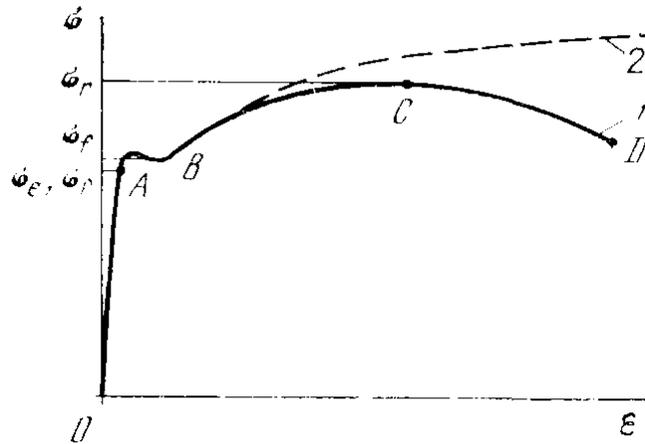


Figura 1.3: Diagramas esfuerzo deformación para acero <sup>1</sup>  
 1.- Convencional 2.- Real

## 1.2.2. CRITERIOS DE FLUENCIA

1. FUENTE: ELENEV, Estampado en Frío, 1981, Pág. 22.

Generalmente en los materiales viene la especificación del valor de límite de fluencia por parte del fabricante, pero este valor es resultado del ensayo de tracción del material. En casos que se presenten esfuerzos más complejos (biaxiales o triaxiales), este valor de límite de fluencia no es aplicable, por lo que es necesario analizar el mismo bajo otros criterios. El estado esfuerzo deformación es siempre tridimensional, por lo tanto requiere de la introducción del concepto de esfuerzo uniaxial equivalente en el sentido de modelar fácilmente el comportamiento del material.

### 1.1.1.3 Esfuerzo Equivalente.

El objetivo del esfuerzo equivalente es usado para definir una función matemática que transforme cualquier estado de esfuerzo en un estado de esfuerzo uniaxial con el mismo grado de carga.

El esfuerzo equivalente es una aproximada pero completa función matemática que puede ser expresada en términos de esfuerzos y parámetros del material.

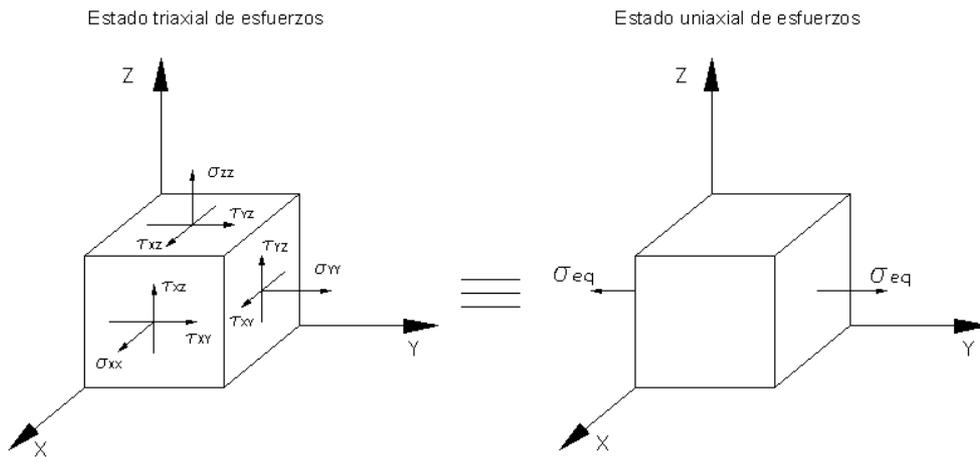


Figura 1.4. Esfuerzo Equivalente

#### 1.1.1.4 Criterio de Von Mises

El criterio más utilizado para un material isotrópico es el de Von Mises. Conocido también como el Criterio de la Energía de Distorsión Máxima, se lo define en base a los esfuerzos principales de la siguiente manera:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2S_y^2 \quad (1.1)$$

Donde :

$S_y$  : es el esfuerzo de fluencia en tracción simple.

$\sigma_1$  : Es el Mayor esfuerzo en una de las direcciones principales (x, y, z)

$\sigma_3$  : Es el Menor esfuerzo en una de las direcciones principales

$\sigma_2$  : Es el esfuerzo en la restante dirección principal.

#### 1.1.1.5 Superficie de fluencia

La superficie de fluencia o "Yield Surface" determina cuando el material está en la zona elástica y cuando en la zona plástica.

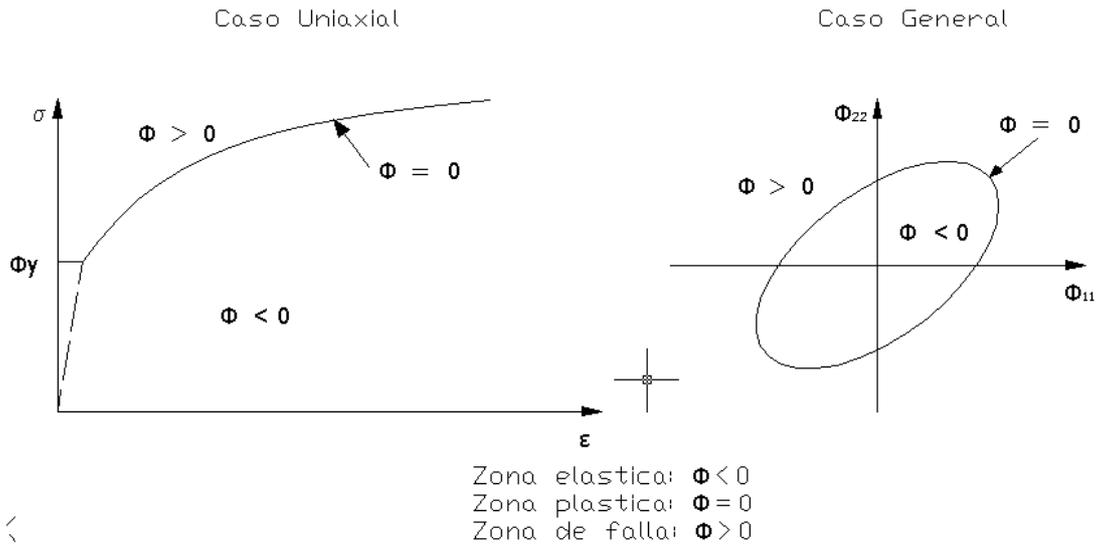


Figura 1.5. Superficie de Fluencia. <sup>2</sup>

Conceptualmente, la superficie de fluencia es usada para definir el comportamiento plástico del material y su forma depende de la definición de esfuerzo equivalente. A su vez el tamaño depende del límite elástico del material. La forma, tamaño y evolución de la superficie de fluencia es característica de cada material y puede ser isotrópico o anisotrópico, dependiendo de la existencia de direcciones preferenciales (como en la dirección de laminado en frío que es usada para estampado)

A continuación se presentan otros criterios de fluencia del material utilizados en el Estampado.

<p>2. FUENTES VON MISES</p>	<p>STAMPACK Sheet stamping and forming analysis, Quantech, Barcelona, 2003.  <math display="block">\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + 3\sigma_{12}^2}</math></p>
<p>Hill 48</p>	$\sigma_{eq} = \left[ \sigma_{11}^2 + \frac{r_0(1+r_0)}{r_0(1+r_0)} \sigma_{22}^2 - 2 \frac{r_0}{1+r_0} \sigma_{11} \sigma_{22} + \frac{(1+2r_0)(r_0+r_0)}{r_0(1+r_0)} \sigma_{12}^2 \right]^{1/2}$
<p>Hill 79</p>	$\sigma_{eq} = \left[ \frac{1}{2(1+r)}  \sigma_{11} + \sigma_{22} ^m + \frac{1+2r}{2(1+r)} ((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2)^{m/2} \right]^{1/m}$

Tabla 1.1 Criterios de falla para estampado. <sup>3</sup>

Donde:

$r_0, r_{45}, r_{90}, r$  son los coeficientes de Lankford (significan la capacidad del material a “transportar” material desde el espesor al interior del plano de la chapa).

$m$  y  $\sigma$  son parámetros del material.

### 1.2.3 LÍMITES DE DEFORMACIÓN

Para que una operación de estampado tenga éxito, se debe controlar tres variables: las características del material, la geometría del punzón y matriz, y la lubricación. El manejo adecuado de estas variables permitirá establecer los límites máximos de deformación que garantice no llegar a la falla del material.

Al emplear cálculos matemáticos basados en modelos de esfuerzo simple y al asumir propiedades ideales para calcular la deformación de un material, los resultados que se obtienen no son muy aceptables, ya que la deformación ocurre en diversas maneras y en distintas zonas y direcciones en el material. Por este motivo, se ha optado por un método alternativo para el estudio de deformaciones denominado “Curva Límite de Deformación”, que es de mucha utilidad especialmente para la industria del estampado en serie.

#### 1.1.1.6 Curva Límite de Deformación (FLC)

Esta curva representa el límite de deformaciones máximas admisibles para un material. Si los valores de deformación sobrepasan esta curva, el material falla y si están bajo la curva, el material está en una zona segura. Este límite práctico de deformación se alcanza cuando la deformación se localiza ~~representando las deformaciones~~ superficiales límites correspondientes a varios estados de tensión en las coordenadas de deformaciones principales. Esta técnica se basa en la determinación de las máximas deformaciones ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) admitidas por el material en los diversos estados de esfuerzos.

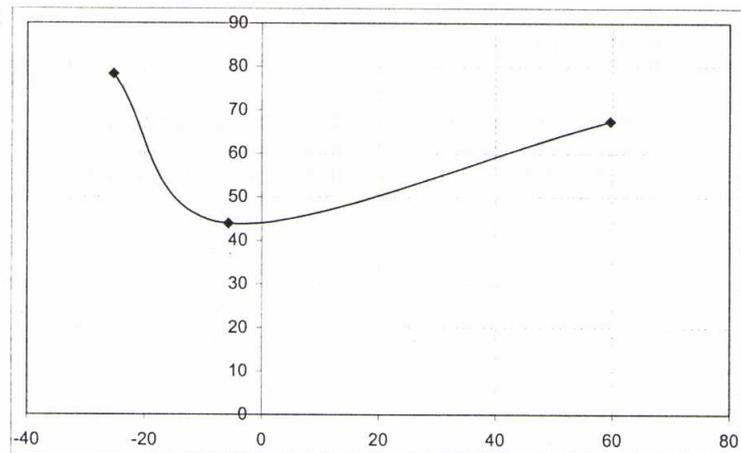


Figura 1.6 Ejemplo de "Curva Límite de Deformación." <sup>4</sup>

### 1.1.1.7 Diagrama Límite de Deformación (FLD)

Este representa el estado mecánico de conformado de un material indicando las deformaciones que están presentes y su nivel de seguridad. Un conjunto de puntos es representado en este diagrama, cada uno de los cuales corresponde a un nodo de la malla en la chapa. Generalmente se dibuja en conjunto con la curva FLC ("Forming Limit Curve"), y dependiendo de la ubicación de la nube de puntos con respecto a esta curva, se obtiene la información del estado de deformaciones de la chapa, así como se observa en la siguiente figura:

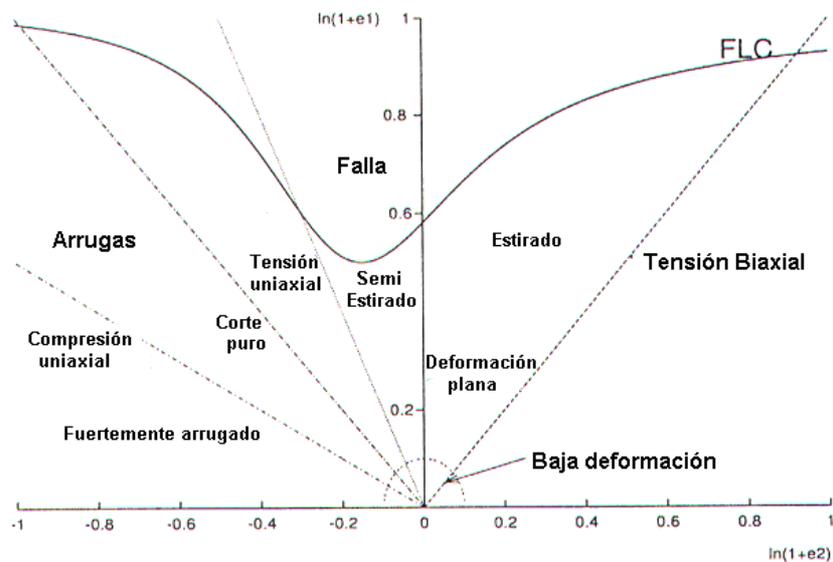


Figura 1.7 Ejemplo de "Diagrama Límite de Deformación" <sup>5</sup>

## 1.3 CONFORMADO MECÁNICO POR ESTAMPADO

4. FUENTE: STAMPACK Sheet stamping and forming analysis, Quantech, Barcelona, 2003.
5. FUENTE: [www.cimne.upc.es/projects/stamping/intro/default.html](http://www.cimne.upc.es/projects/stamping/intro/default.html).

El estampado en frío es uno de los métodos de conformado mecánico sin arranque de viruta de los metales por presión, en el que el metal frío se deforma plásticamente hasta adquirir una forma final deseada.

La deformación plástica en frío altera las propiedades físico-mecánicas del metal: aumentan la resistencia mecánica y la dureza y al mismo tiempo disminuye el alargamiento relativo, se reduce la resistencia a la corrosión y aumenta la resistencia eléctrica; permitiendo, por lo tanto, hacer las piezas más ligeras, más resistentes al desgaste y con menos material. Este conjunto de fenómenos que acompaña la deformación plástica se denomina endurecimiento por deformación.

### **1.3.1 LA OPERACIÓN DE ESTAMPADO.**

La operación de estampado mecánico consiste dar una forma final determinada a una pieza en bruto, generalmente una chapa metálica, como resultado de la deformación plástica de la misma. Esta deformación se produce por la acción de una prensa que genera la fuerza necesaria para lograr la transformación, mediante la interacción entre una matriz, la chapa y herramientas especiales para dicho trabajo, entre las cuales se tiene punzones, sujetadores o prensachapas y frenos.

Dentro de la operación de estampado, se debe tener en cuenta varios parámetros que influyen en el proceso de conformado, como el tipo y espesor del material, el factor de fricción, tipo de lubricación, velocidad de estampado, fuerza del punzón, fuerza del prensachapas y frenos, geometría de la matriz, entre otros; factores que decidirán el éxito o fracaso de la operación.

La fabricación de las piezas estampadas incluye una serie de operaciones tecnológicas (por ejemplo, corte, punzonado, embutición, recorte). El orden de estas operaciones se reglamenta por un proceso tecnológico previamente definido.

El proceso tecnológico del estampado en frío comprende las operaciones de preparación del material (limpieza, lubricación), operaciones previas de

fabricación (corte de chapas), las de deformación (las de separación y de alteración de la forma), las de tratamiento térmico (recocido intermedio para quitar el endurecimiento por deformación, temple, y el revenido para otorgarle las propiedades necesarias), las de acabado (desbarbado, lavado, pintado, recubrimiento, etc.). A veces, en la tecnología del estampado en frío se introducen operaciones de montaje y soldadura.

En la tecnología deben ser previstas también las operaciones de control necesarias para comprobar las dimensiones y la calidad de las piezas semiacabadas y acabadas. Las operaciones de control suelen ser: intermedias (comprobación de la calidad de la pieza semiacabada después de cada operación) y definitivas (comprobación de la calidad del artículo). Las operaciones de acabado son: desbarbado, pulido, pintado o aplicación de revestimiento de decoración y protección.

Antes de elaborar el proceso tecnológico de fabricación de una pieza, se debe comprobar su capacidad tecnológica, es decir, determinar la combinación de sus elementos constructivos, el material y su calidad, para la cual la fabricación de la pieza será la más simple y económica, siendo, al mismo tiempo, los índices de explotación de la misma los más altos.

### **1.3.2 LA DEFORMACIÓN EN EL ESTAMPADO.**

En operaciones de conformado sin arranque de viruta se considera que el volumen del cuerpo antes de la deformación es igual a su volumen después de la misma. La deformación permanente máxima a que se somete un material dado, caracteriza la plasticidad tecnológica del mismo. Esta última depende no sólo de las propiedades del material, sino también de la temperatura, velocidad de deformación y el tipo de carga. Como regla, la plasticidad crece al subir la temperatura y disminuye, al aumentar la velocidad de deformación.

En una operación de estampado, surgen tres tipos de tensiones según la zona de deformación. Se muestra en la siguiente figura, las deformaciones y tensiones que sufre un sector de un disco inicial al someterse al proceso de estampado.

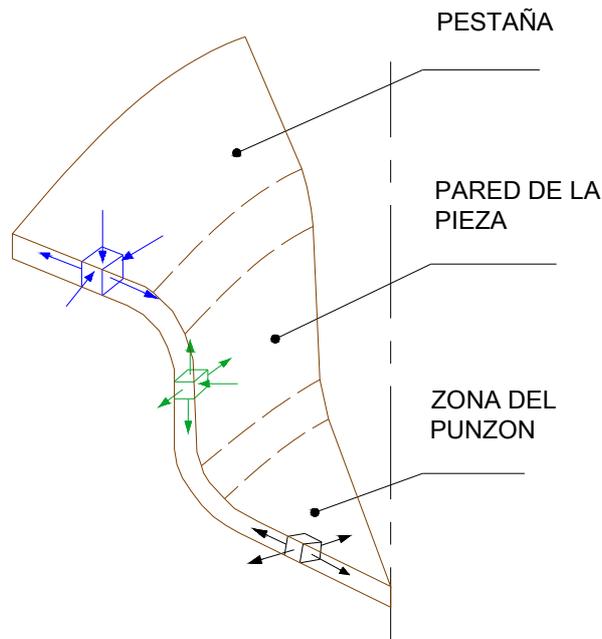


Figura 1.8 Deformaciones y tensiones en un proceso de estampado. <sup>6</sup>

La parte central de la chapa que está en contacto con el punzón, se adapta a la forma de éste mediante estirado donde se tiene un estado biaxial de tensiones y deformaciones bastante bajas, en esta zona se produce un ligero adelgazamiento del espesor original del metal.

La zona de la chapa que aún no entra en contacto con el punzón empieza su ingreso a la matriz, y como consecuencia de esto, la circunferencia externa disminuye gradualmente. Este comportamiento se presenta como resultado de una deformación tractiva en la dirección radial y una deformación de compresión en dirección anular, lo que genera que en esta zona de la chapa exista un aumento continuo del espesor en su desplazamiento hacia el centro. Cuando la chapa empieza a fluir por la arista de la matriz es primeramente doblada y luego es enderezada y en estos dos cambios de forma está sometida a esfuerzos de tracción.

En el siguiente cuadro se resumen las principales zonas de deformación en cualquier proceso de estampado:

6. FUENTE: CARDENAS V, Fundamentos Generales del Conformado de los Metales, 1983.

CUADRO DE DEFORMACIONES EN PROCESOS DE ESTAMPADO			
	ESTADO DE TENSIONES	DEFORMACIÓN	VARIACION ESPESOR

<b>PARTE CENTRAL (Zona contacto punzón)</b>	Biaxial. Tracción radial y tangencial.	Baja	Baja disminución de espesor
<b>PARED</b>	Triaxial. Tracción radial y tangencial. Contracción anular	Alta	Disminución considerable de espesor
<b>PESTAÑA</b>	Biaxial. Tracción radial y contracción tangencial.	Baja	Incremento de espesor

Tabla 1.2 Cuadro de deformaciones en procesos de Estampado.

En las Figuras siguientes se muestra la variación de espesor, como resultado de las deformaciones, en un proceso de estampado. En la primera figura (1.9a) se observa la ubicación de los lugares donde se realizó la medición de espesores y en la siguiente (1.9b) la variación del espesor.

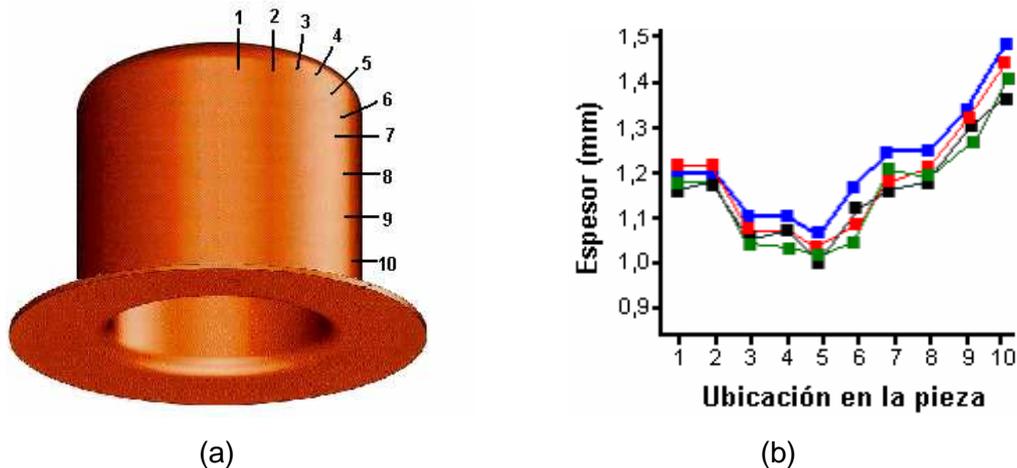


Figura 1. 9 Variación de espesor como resultado de las deformaciones.<sup>7</sup>  
a. Lugares donde se realizó la medición.  
b. Curva variación de espesor.

Como se puede observar, la variación de espesor es mayor en las paredes de la pieza final ya que esta zona existe un mayor estiramiento de material, y se presenta el efecto contrario en la zona del punzón (en menor grado) y en la pestaña de la chapa.

El pisador o prensachapas cumple una función muy importante durante el proceso ya que una adecuada presión evita la formación de arrugas, debido a la contracción circular de la corona externa, en las paredes de la pieza final. La fuerza necesaria para deformar la zona lateral es transmitida desde la parte central de la chapa que está en contacto con el punzón, a través de las

7. FUENTE: <http://www.dim.udec.cl/cursos/pdp/embutido/embutido1.htm>

paredes de ésta; si esta fuerza sobrepasa el límite de rotura del material de la chapa, el metal falla cerca del fondo de la pieza final.

### 1.3.3 CUANTIFICACIÓN DE LA DEFORMACIÓN EN EL ESTAMPADO

En la figura 1.10 se representa un cuerpo con forma de un paralelepípedo de longitud  $l_0$ , ancho  $b_0$  y altura  $h_0$  (espesor). Si este cuerpo se alarga en sentido longitudinal, su longitud  $l_0$ , aumenta hasta alcanzar el valor  $l'$ , pero, debido a que su volumen permanece invariable, disminuyen el ancho  $b_0$ , hasta tomar el valor  $b'$  y el espesor  $h_0$ , hasta el valor  $h'$ . En este caso, la variación de forma  $\varphi_1$  es positiva y las variaciones  $\varphi_2$  y  $\varphi_3$  son negativas. La primera significa un alargamiento, mientras que las dos restantes corresponden a una reducción de dimensiones.

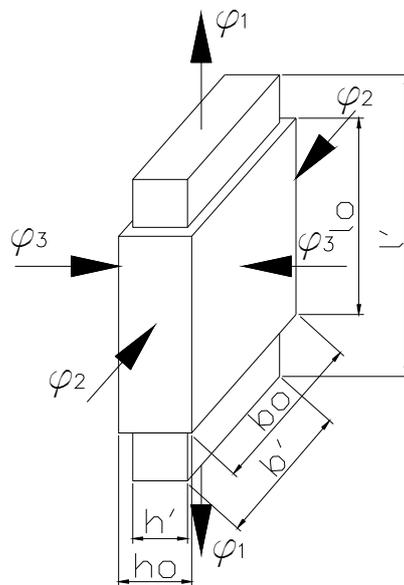


Figura 1.10 Deformación en las tres direcciones principales de tensión.

Para estas variaciones de forma  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  y  $\varphi_3$  según los tres planos principales, basándose en la invariabilidad del volumen, se cumple las relaciones:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (1.2)$$

$$\varphi_1 = \int_{l_0}^{l'} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l'}{l_0} \quad (1.3)$$

$$\varphi_2 = \int_{b_0}^{b'} \frac{db}{b} = \ln \frac{b'}{b_0} \quad (1.4)$$

$$\varphi_3 = \int_{h_0}^{h'} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h'}{h_0} \quad (1.5)$$

Por tanto, la primera ecuación puede también escribirse de la forma siguiente:

$$\ln \frac{l'}{l_0} + \ln \frac{b'}{b_0} + \ln \frac{h'}{h_0} = 0 \quad (1.6)$$

Una vez sacados los logaritmos se obtiene la ecuación:

$$\frac{l'}{l_0} \cdot \frac{b'}{b_0} \cdot \frac{h'}{h_0} = 1 \quad (1.7)$$

En la conformación se conoce que es muy difícil obtener el espesor de la chapa sin contar con la dispersión de los resultados de medición originada por las diferencias de grosor de la misma. Precisamente en los puntos críticos situados en la zona media es en donde este tipo de mediciones resulta más difícil de realizar. El cambio de forma en la superficie de la chapa puede calcularse rápidamente, ya que se desplaza poco material por encima de la arista de embutición, con ello, el adelgazamiento de la chapa en los puntos críticos puede determinarse de forma más exacta que solamente por simple estimación.

#### 1.3.3.1 Fuerza ejercida por el punzón.

La fuerza ejercida por un punzón depende principalmente de la resistencia media a los cambios de forma, de las dimensiones del punzón, y del espesor del material. Distintos trabajos de investigación han puesto de manifiesto que la forma, la presión del pisador, la velocidad de la operación, el redondeado de la arista de la matriz (radio de acuerdo), y aún el tipo de lubricante tienen una influencia insignificante sobre la magnitud de la fuerza que ha de ejercer el punzón.

La fuerza de deformación crece con bastante rapidez al iniciarse la carrera del punzón y alcanza su valor máximo cuando este queda introducido hasta una profundidad determinada (ver siguiente figura), la misma que corresponde a la

suma del radio de la arista del alojamiento de la matriz con el radio de la arista del punzón. Esto se debe a que, al inicio de la operación, la relación de diámetro  $D/d$  (ver figura) y, por tanto, también la resistencia al cambio de forma, tienen su valor máximo, que luego decrece a medida que avanza la operación.

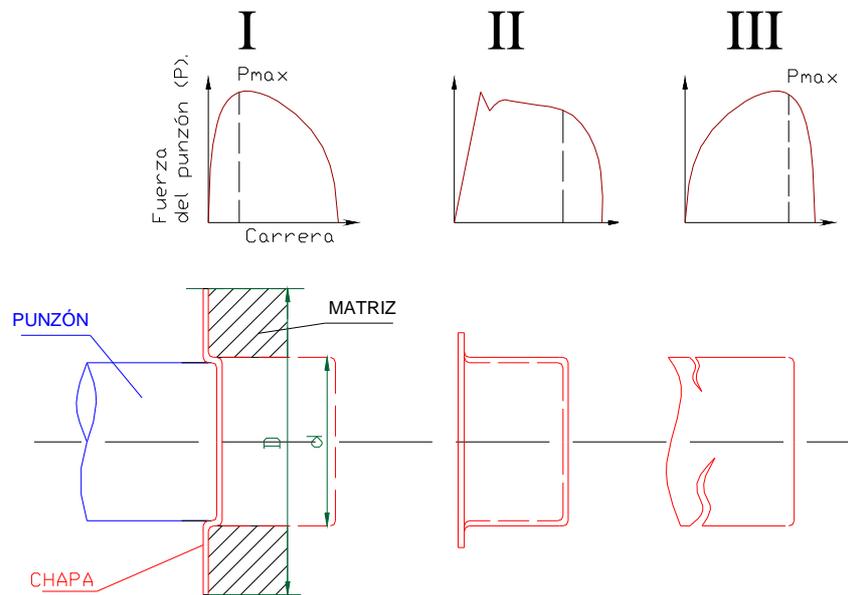


Figura 1.11 Gráficos de la fuerza de embutición en función de la carrera de estampado.

Como se observa en la figura 1.11, cuando se inicia la operación (diagrama I) aparecen de un modo instantáneo solicitaciones y esfuerzos pico, este tipo de fenómenos se presentan exclusivamente en trabajos realizados en chapas de acero.

En una pieza de estampado de poca altura, pero en la que los radios de acuerdo de la arista de la matriz y del punzón son grandes, no presenta su fuerza máxima al principio, sino por la mitad del diagrama. Debido a que la reducción de dimensiones en la parte inferior de las paredes del material durante la operación de estampado origina un aumento del espesor de la chapa hacia el borde o parte superior de la pared lateral, con lo que el material tiene mayor dificultad para ingresar en la matriz y, en consecuencia puede romperse (diagrama II).

Las roturas originadas por este motivo aparecen en la parte superior de la pared lateral, en las proximidades del borde. En estos casos, el valor máximo de la fuerza del punzón está situado al final de la carrera (diagrama III).

La fuerza de deformación  $P_z$  para piezas sencillas puede calcularse con la siguiente expresión:

$$P_z = \frac{d \cdot \pi \cdot s \cdot k_{tm}}{\eta_{form}} \left[ \ln \frac{D}{d} - c \right] \quad (1.8)$$

Donde:

$d$  es el diámetro del punzón.

$D$  el diámetro del recorte.

$S$  el espesor de la chapa (mm).

$k_{tm}$  la resistencia media a la deformación.

$\eta_{FORM}$  es el coeficiente de cambio de forma.

$c$  constante de seguridad.

El coeficiente de cambio de forma  $\eta_{FORM}$  es un valor que determina la facilidad de un material para amoldarse a la forma de la matriz y punzón, se recomienda un valor comprendido entre 0.5 y 0.65; (este valor puede ser 0.628), es función del radio  $r_m$  de la arista de la matriz y su valor, en el caso de que  $r_m$  sea grande, puede ser de 0.6 a 0.8, mientras que, si  $r_m$  es pequeño, vale de 0.55 a 0.7.

La resistencia media a la deformación  $k_{tm}$  es una propiedad intrínseca de cada material y representa la oposición del material a esfuerzos de deformación.

El valor  $c$  es el que determina que la fuerza máxima no se encuentre en el principio del diagrama carrera-fuerza de estampado, pudiendo suponérsele un valor máximo de 0,25.

En el caso en que la relación  $D/d$  fuera pequeña (menor a 1.3), se tendrían valores de  $c$  demasiado pequeños; y este valor no influiría prácticamente en el resultado final. Por tanto, puede expresarse como:

$$P_z = 5 \cdot d \cdot s \cdot k_{tm} \cdot \ln \frac{D}{d} \quad (1.9)$$

Esta ecuación se puede utilizar para calcular la máxima fuerza que necesita el punzón para realizar el proceso de estampado.

## **CAPÍTULO II**

### **MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

El cálculo de las deformaciones y esfuerzos con los métodos clásicos de análisis es logrado a través de soluciones analíticas tediosas de las ecuaciones que los rigen y las condiciones de borde que describen el problema. El uso de los métodos clásicos es probablemente la mejor forma para analizar estructuras simples, sin embargo, su uso está limitado cuando el sistema físico es complejo. En tales casos la mejor alternativa es una solución obtenida con el Método de los Elementos Finitos.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es una herramienta computacional que permite obtener soluciones aproximadas de problemas de valor en la frontera (ecuaciones diferenciales en derivadas parciales). Un problema de valor en la frontera es un problema matemático en el cuál una o más variables dependientes deben satisfacer una ecuación diferencial en todas las partes dentro de un dominio determinado de variables independientes y que deben satisfacer las condiciones específicas en el límite o frontera del dominio. También se llaman a veces problemas de Valor Límite o problemas de Variable de Campo. El campo es el dominio de interés y a menudo representa una estructura física. Las variables de campo son las variables dependientes gobernadas por la ecuación diferencial. Las condiciones de límite son los valores especificados de las variables del campo (o variables relacionadas como sus derivadas) en los límites del campo. Dependiendo del tipo de problema físico que se analiza, las variables de campo pueden incluir desplazamiento físico, temperatura, flujo de calor, velocidad de flujo, entre otros.

## ***1.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS***

La figura 2.1 muestra un volumen de algún material del cual se conocen las propiedades físicas. El volumen representa el dominio de un problema de valor en la frontera a ser resuelto. Por facilidad, se asume un caso bidimensional con una sola variable de campo  $\Phi(x, y)$  que satisfaga a cada punto  $P(x, y)$  tal que una ecuación gobernante conocida (o ecuaciones) satisfaga exactamente a cada punto. Esto implica obtener una solución matemática exacta; es decir, la solución debe ser una expresión algebraica de las variables independientes.

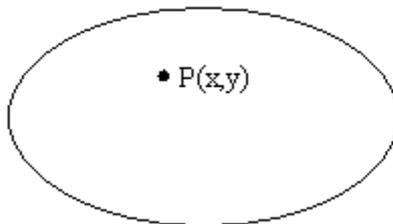


Figura 2.1. Dominio bidimensional de la variable de campo  $\Phi(x, y)$ .

En los problemas prácticos, el dominio puede ser geoméricamente complejo, como lo es a menudo, la ecuación gobernante y las probabilidades de obtener una solución exacta son muy bajas. Por consiguiente, se obtienen más a menudo soluciones aproximadas basadas en técnicas numéricas y el cómputo digital diseñando análisis de problemas complejos. El análisis del elemento finito es una técnica poderosa para obtener tales soluciones aproximadas con buena exactitud.

Un elemento triangular pequeño que encierra un subdominio finito del área de interés se muestra en Figura 2.2. Este elemento no es un elemento diferencial de tamaño  $(dx \times dy)$ . Cuando se trata este ejemplo como un problema bidimensional, se supone que el espesor en la dirección  $z$  es constante y la dependencia de  $z$  no se indica en la ecuación diferencial. Se numeran los vértices del elemento triangular para indicar que estos puntos son los nodos. Un nodo es un punto específico en el elemento finito en que el valor de la variable del campo será calculado explícitamente. Se localizan los nodos

exteriores en los límites del elemento finito y pueden usarse para conectar un elemento a los elementos finitos adyacentes.

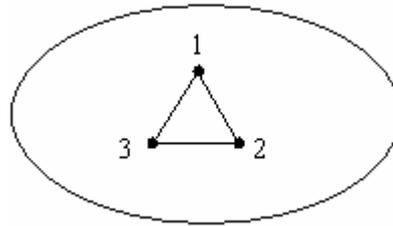


Figura 2.2. Elemento finito de tres nodos definido en el dominio.

Los nodos que no pertenecen a los límites del elemento se los conoce como nodos interiores y no pueden conectarse a cualquier otro elemento. El elemento triangular de Figura 2.2 tiene sólo nodos exteriores.

Como solo se calculan los valores de la variable de campo en los nodos, los valores en puntos dentro de un elemento finito, se obtienen usando funciones de interpolación que utilizan los valores ya calculados en los nodos para aproximar la solución a los puntos no nodales, es decir, en el interior del elemento.

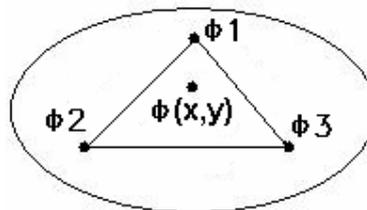


Figura 2.3 Nodos en el interior del elemento.

Para el ejemplo del elemento triangular de la figura anterior, para obtener el valor de la variable de campo en un punto en el interior del elemento, se debe partir de los valores conocidos en los nodos y mediante interpolación calcular el valor de la variable en el punto requerido según la siguiente relación aproximada:

$$\Phi(x, y) = N_1(x, y)\Phi_1 + N_2(x, y)\Phi_2 + N_3(x, y)\Phi_3 \quad (2.1)$$

Donde,  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  y  $\Phi_3$  son los valores de la variable de campo en los nodos, y  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_3$  son las funciones de interpolación, también conocidas como funciones de forma. En las cercanías del elemento finito, se tratan los valores nodales de la variable del campo como constantes desconocidas que serán

determinadas. Las funciones de interpolación son a menudo formas polinómicas de las variables independientes, derivadas para satisfacer ciertas condiciones requeridas en los nodos.

El punto más importante aquí es que las funciones de interpolación son predeterminadas, son funciones conocidas de las variables independientes; y estas funciones describen la variación de la variable de campo dentro del elemento finito.

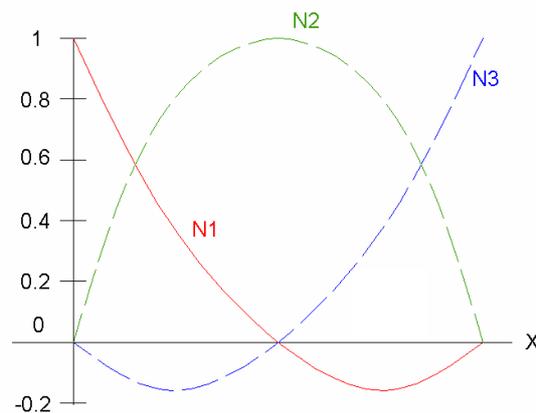


Figura 2.4 Funciones de interpolación para un elemento de tres nodos.<sup>8</sup>

Se dice que el elemento triangular descrito por la ecuación 2.1 tiene 3 grados de libertad, ya que se necesitan tres valores nodales para describir la variable de campo en cualquier parte del elemento. Éste sería el caso si la variable de campo representa un campo escalar, como la temperatura en un problema de transferencia de calor. Si el dominio de la figura 2.1 representa un cuerpo delgado, sujeto a una tensión planar, la variable de campo se vuelve el vector de desplazamiento y los valores de dos componentes deben quedar calculados en cada nodo. En el último caso, el elemento triangular tiene 6 grados de libertad. En general, el número de grados de libertad asociado con un elemento finito es igual al producto del número de nodos y el número de valores de la variable de campo (y posiblemente sus derivadas) que deberían calcularse en cada nodo.

Como se muestra en la figura 2.5, cada elemento se conecta en sus nodos exteriores a otros elementos. Las ecuaciones finitas del elemento se formulan tal que, en las conexiones nodales, el valor de la variable de campo en

cualquier conexión es el mismo para cada elemento conectado al nodo. Así se asegura la continuidad de la variable de campo en los nodos. De hecho, las formulaciones del elemento finito son tales que la continuidad de la variable de campo por los límites del elemento también se asegura. Este rasgo evita la posibilidad, físicamente inaceptable, de huecos o vacíos en el dominio. En los problemas estructurales, tales vacíos representarían separación física del material. En transferencia de calor, un vacío se manifestaría en forma de temperaturas diferentes en un mismo punto físico.

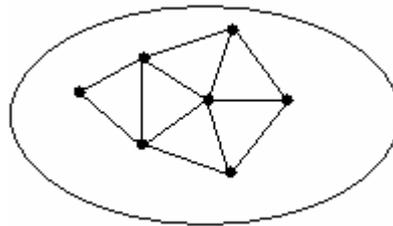


Figura 2.5 Conexión entre nodos.

Aunque la continuidad de la variable de campo de elemento a elemento es inherente a la formulación del elemento finito, la continuidad de gradientes (es decir, derivadas) de la variable del campo generalmente no existe. Ésta es una observación crítica. En la mayoría de los casos, tales gradientes son de mayor interés que los valores de las variables de campo. Por ejemplo, en los problemas estructurales, la variable de campo es el desplazamiento pero el mayor interés es el cálculo de tensiones y deformaciones. Cuando la tensión se define en términos de primeras derivadas de componentes de desplazamiento, la tensión no es continua a través de los bordes de los elementos. Sin embargo, las magnitudes de discontinuidades de derivadas pueden ser usadas para evaluar con exactitud la solución y convergencia cuando el número de elementos aumenta.

### **2.1.1 VENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

- En lugar de resolver un problema muy complejo como un todo, lo divide en muchos problemas de simple solución y la solución general se obtiene como un conjunto de soluciones simplificadas.

- Permite la solución de problemas ingenieriles con materiales que presentan propiedades no isotrópicas asignando diferentes propiedades a cada elemento.
- Permite obtener la solución general mediante la resolución de sistemas de ecuaciones lineales o ecuaciones diferenciales de primer orden no muy complicadas
- Se puede automatizar el cálculo y optimizar el tiempo de solución mediante el uso de paquetes computacionales.
- Se obtiene una solución más aproximada a la realidad en comparación con aquellos que hacen ciertas suposiciones o idealizaciones para obtener la solución.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de las características que ofrecen el Método de los Elementos Finitos y el Método de las Diferencias Finitas, con el fin de conocer cuales son las ventajas del primer método sobre el segundo.

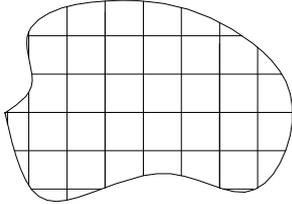
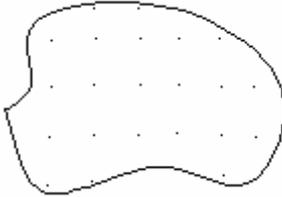
<b>ELEMENTOS FINITOS</b>	<b>DIFERENCIAS FINITAS</b>
<p>Modelación de un sistema físico.</p> <p>(Forma "fuerte" a Forma "debil")</p>	<p>"Simulación" de una ecuación diferencial</p> $\frac{df}{dx} = g \longrightarrow \frac{\Delta f}{\Delta x} = g \longrightarrow \frac{f_{i+1} - f_i}{x_{i+1} - x_i} = g$
<p>Elementos que sumados son iguales al dominio</p> 	<p>Puntos que definen una malla</p> 
<p>Se puede obtener la solución en cualquier punto del dominio (Funciones de interpolación)</p>	<p>Soluciones solo en los puntos</p>

Tabla 2.1 Elementos Finitos vs. Diferencias Finitas.

## **1.5 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL ANÁLISIS CON EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Ciertos pasos formulados para el análisis por elementos finitos de un problema físico son comunes en todos los análisis, sea; de tipo estructural, de transferencia de calor, flujo de fluido, aerodinámica, etc. Estos pasos están incluidos en todos los paquetes de software basados en elementos finitos.

Los pasos generales para un análisis se describen a continuación:

### **2.1.2 PREPROCESAMIENTO**

En el preprocesamiento se describe el problema y se define el modelo, e incluye:

- Definición del dominio geométrico del problema.

- Definición del tipo del elemento a ser usado.
- Definición de las propiedades del material de los elementos.
- Definición de las propiedades geométricas de los elementos (longitud, área, etc.).
- Definición de conectividades de los elementos (mallado del modelo).
- Definición de las restricciones físicas (condiciones de borde).
- Definición de las cargas.

El preprocesamiento (la definición del modelo) es un paso crítico. En ningún caso se debe introducir información incorrecta o inapropiada, ya que los resultados obtenidos serían erróneos. Una solución por elementos finitos perfectamente calculada no es posible, si los valores de entrada corresponden a un problema mal planteado.

### **2.1.3 SOLUCIÓN**

Durante la fase de solución, el software de elementos finitos congrega las ecuaciones algebraicas gobernantes en forma matricial y calcula los valores desconocidos de las variables del campo primarias. Una vez obtenidos los valores anteriores, se usan entonces para calcular por sustitución variables adicionales, variables secundarias como fuerzas de la reacción, esfuerzos, y flujo de calor.

Comúnmente un modelo de elementos finitos se representa por decenas de miles de ecuaciones, se usan técnicas de solución especiales que reducen los requisitos de almacenamiento de datos y tiempo de cálculo. Para la estática, se usan normalmente problemas lineales, basados en la eliminación de Gauss.

### **2.1.4 POSTPROCESAMIENTO**

El postprocesamiento se refiere al análisis y evaluación de los resultados obtenidos. El software para Postprocesamiento contiene rutinas sofisticadas usadas para ordenar, imprimir, y trazar los resultados seleccionados de una

solución por elementos finitos. Los ejemplos de operación que pueden lograrse incluyen:

- Información de esfuerzos en orden de magnitud
- Verificar el equilibrio.
- Calcular los factores de seguridad.
- Graficar deformaciones.
- Animaciones dinámicas del comportamiento del elemento.
- Representación de temperaturas mediante un código de colores.

Pueden manipularse los datos de la solución de muchas maneras en el postprocesamiento, pero el objetivo más importante es aplicar el juicio de la ingeniería para determinar si los resultados de la solución son físicamente razonables.

## ***1.6 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN EL PROGRAMA COMPUTACIONAL STAMPACK.***

El punto de partida para la solución de un problema usando el Método de los Elementos Finitos es la ecuación de equilibrio dinámico descrita en la Mecánica del Medio Continuo por el Principio de Trabajo Virtual.

$$\underbrace{\int_V \delta \varepsilon^T \cdot \sigma dV}_{\text{Fuerzas Internas}} - \underbrace{\int_V \delta u^T \cdot [-\rho \ddot{u} - c \dot{u}]}_{\text{Inercia}} - \underbrace{\int_V \delta u^T \cdot b dV}_{\text{Fuerzas Volumétricas}} - \underbrace{\int_S \delta u^T \cdot t dS}_{\text{Fuerzas de Contacto}} = 0 \quad (2.2)$$

**FUENTE:** Stampack Sheet Stamping and Forming Analysis, Quantech, Barcelona, 2003.

Donde  $V$  es el dominio de integración,  $S$  la superficie de contorno,  $\varepsilon$  las deformaciones,  $\sigma$  los esfuerzos,  $b$  las fuerzas volumétricas,  $t$  las fuerzas de contacto y  $u$ ,  $\dot{u}$  y  $\ddot{u}$  los campos de desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente (según indica la figura 2.6). Las propiedades mecánicas del material están contenidas en el término de la fuerza interna, el cual especifica como se redistribuyen las fuerzas al interior del objeto analizado.

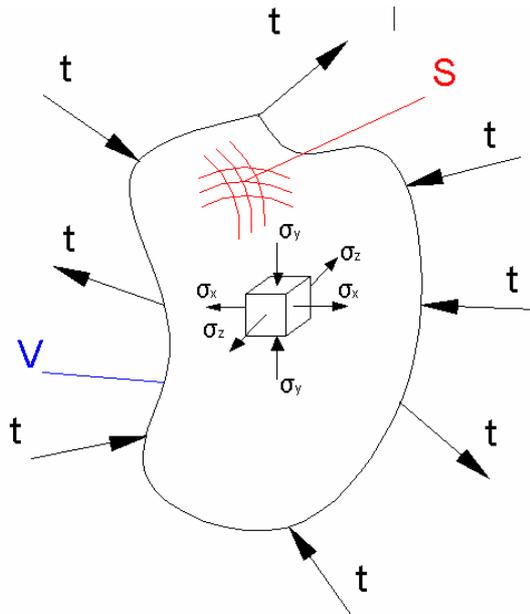


Figura 2.6 Representación de un cuerpo sometido a esfuerzos de deformación.

En general el problema se resuelve cuando se calcula el campo de desplazamientos  $u$ , satisfaciendo la ecuación 2.2. La solución numérica del problema entonces queda reducida a determinar el campo de desplazamientos a un finito número de puntos en diferentes instantes de tiempo.

### 2.1.5 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

La esencia de la discretización espacial es dividir la geometría original en un número de subdominios no traslapados entre sí llamados elementos. El conjunto de todos los elementos que definen la geometría se llama malla.

A su vez los elementos son definidos por puntos en el espacio llamados nodos, en los cuales se encuentran las incógnitas del problema.

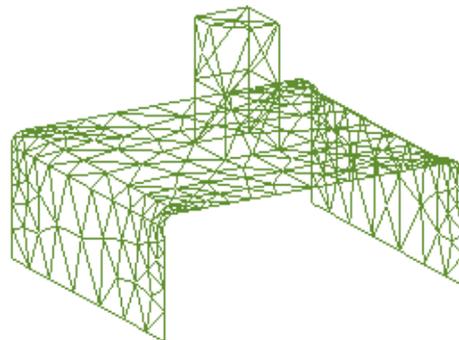


Figura 2.7 Modelo discretizado.<sup>9</sup>

El comportamiento dentro de los elementos está totalmente definido por medio de los nodos. 9. FUENTE: GID 7.2, Tutorials, Meshing. Los valores de los desplazamientos en los nodos dependen de las condiciones de contorno y de las propiedades de los elementos.

de la topología del elemento. Además, el campo de desplazamientos en cualquier punto en el espacio es determinado por medio de los desplazamientos nodales y las funciones de interpolación.

$$u^{(e)} \equiv \sum_{i=1}^{n_d} N_i^{(e)} \hat{u}_i \quad (2.3)$$

Donde  $u^{(e)}$  es el desplazamiento en cualquier punto dentro del elemento (e),  $n_d$  es el número de nodos del elemento,  $N_i^{(e)}$  es la función de interpolación asociada con el nodo  $i$  evaluada en ese punto, y  $\hat{u}_i$  es el desplazamiento en el nodo  $i$ .

Una vez que se ha completado la discretización, la ecuación 2.2 puede representarse de la siguiente manera.

$$\underbrace{M \cdot \ddot{\hat{u}} + C \cdot \dot{\hat{u}}}_{\text{Inercia}} \equiv \underbrace{F^{\text{int}}}_{\text{FuerzasInternas}} - \underbrace{F^{\text{ext}}}_{\text{FuerzasExternas}} \quad (2.4)$$

Donde  $M$  es la matriz de Masas,  $C$  es la matriz de Amortiguamiento mientras que  $F^{\text{int}}$  y  $F^{\text{ext}}$  son los vectores correspondientes a las fuerzas internas y externas respectivamente, la cual depende del campo de desplazamiento nodal.

## 2.1.6 TIPOS DE ELEMENTOS

Dependiendo de la geometría y las condiciones de trabajo, existen diferentes tipos de elementos que amplían las diferentes formas de integrar la ecuación 2.2.

### 2.3.2.1 Elementos Tridimensionales

Esta es conceptualmente la forma más simple de discretizar la geometría e integrar la ecuación 2.2. Se componen de hexaedros tridimensionales y el campo de desplazamiento nodal está definido en el espacio.

### 2.3.2.2 Elementos Bidimensionales.

Estos elementos son usados para deformaciones planas y problemas simétricos con respecto a un eje. El campo de desplazamiento nodal está

localizado en el plano del elemento, esto significa que los nodos tienen dos grados de libertad. La integral volumétrica de la ecuación 2.2 es reducida a una integral de área en el caso de deformación plana, y la integración de un sólido de revolución en el caso de simetría respecto a un eje.

#### **2.3.2.3 Elementos Laminares.**

Estos son elementos delgados localizados en el espacio tridimensional. El campo de desplazamiento nodal está definido en las tres dimensiones del espacio por lo tanto los nodos tienen tres grados de libertad. Estos elementos son usados en geometrías en las cuales una dimensión es mucho menor que las otras dos.

## **CAPÍTULO III**

### **APLICACIÓN DEL SOFTWARE STAMPACK EN LA SIMULACIÓN DE UN PROBLEMA DE ESTAMPADO**

#### **3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Como aplicación del programa se va a simular un problema sencillo de estampado, considerando que el objetivo de este proyecto es familiarizarse con el manejo y características del Stampack y teniendo en cuenta que es el primer trabajo de investigación y aplicación en el cual se utiliza este programa.

La finalidad de este proyecto es predecir la forma final, la localización de zonas de variación de espesor, la determinación de zonas que presenten defectos como arrugas, grietas o rotura del material.

El ejemplo consiste en la simulación de un canal cuya geometría y dimensiones se representan en la figura 3.1, en base a esta figura se generarán luego en el

programa Stampack la geometría de la matriz, punzón, pisador y demás herramientas necesarias para la simulación. Se ha escogido esta geometría ya que aparte de ser sencilla nos permite variar con facilidad los parámetros de simulación.

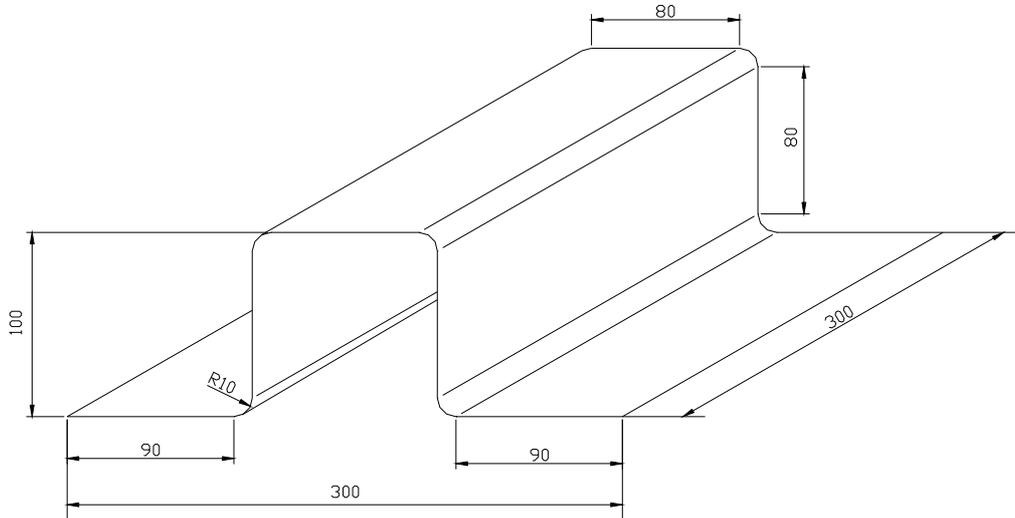


Figura 3.1 Forma final de la pieza a ser estampada.

El material utilizado es un acero de alta deformación cuyas propiedades son:

Módulo de Young:	210 GPa
Coefficiente de Poisson:	0.3
Densidad:	7800 Kg/m <sup>3</sup>
Límite Elástico:	680 MPa
Espesor:	2 mm

El diagrama Esfuerzo-Deformación para este material es generado por el programa Stampack.

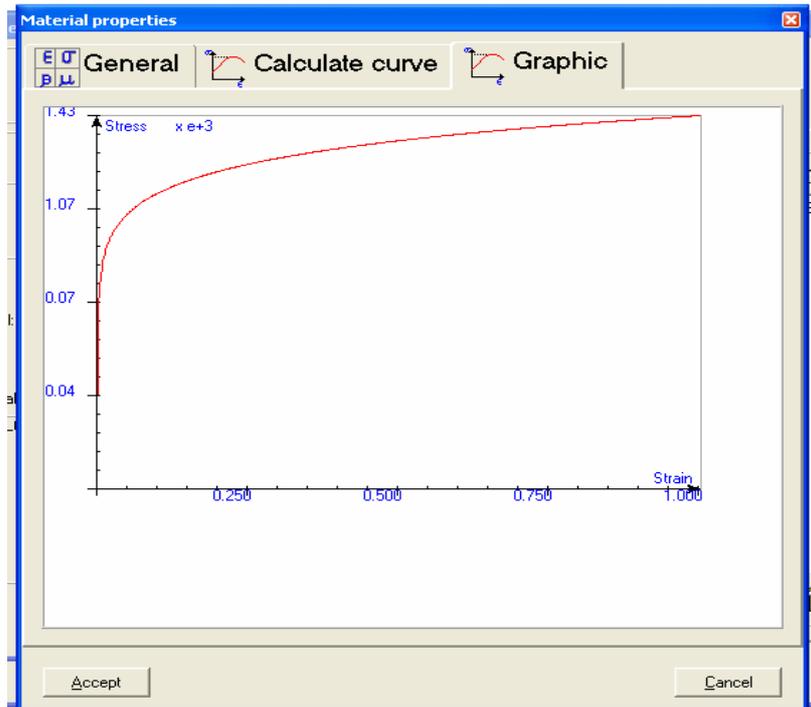


Figura 3.2 Diagrama esfuerzo-deformación.

El movimiento del punzón es vertical y actúa sobre la chapa, mientras que la matriz permanece inmóvil. El punzón se desplaza una distancia de 100 mm con una velocidad constante de 1 m/s. El coeficiente de fricción entre todas las superficies (herramientas y chapa) es de 0.15. Sobre el pisador se ha aplicado una fuerza constante de 4 Ton.

## 3.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Una vez definido el problema, se procede a la simulación del mismo. En esta sección se indicará los pasos a seguir para la obtención de resultados en un problema de estampado.

### 3.2.1 PRE-PROCESAMIENTO

#### 3.2.1.1 Creación de la Geometría

Para definir la geometría que se va utilizar en Stampack se tiene dos posibilidades: puede ser creada en el mismo entorno del programa o ser creada en otros programas compatibles con las siguientes extensiones .gid “.iges”, “.dxf”, “.sat”, etc., cuya geometría puede ser luego importada al programa Stampack.

Es preferible definir la geometría en Stampack, ya que, al importar desde otros programas se pueden presentar errores en la geometría, como discontinuidades que presentarían problemas en las etapas de simulación.

Una vez ingresado al entorno de Stampack, el usuario puede dibujar la geometría directamente utilizando los comandos y herramientas disponibles para este fin. La geometría puede ser dibujada y guardada como un todo en un mismo proyecto, o puede dibujarse cada parte que la constituye en diferentes archivos en Stampack que luego se importarán una por una en un proyecto final.

En este caso en particular se va a dibujar la geometría por partes en diferentes archivos, con el fin de facilitar el trabajo en las simulaciones que se realizarán en el siguiente capítulo. Las partes que conforman la geometría son: Chapa, Frenos y Matriz, esta última compuesta por tres archivos Matriz-Punzón, Matriz-Pisador y Matriz-Radio. Los elementos de la matriz se dibujan por separado porque a partir de estos, se crearán por copia las herramientas Punzón y Pisador, procedimiento que se detallará más adelante.

Para empezar a dibujar primero se debe crear un layer para cada parte de la geometría, por ejemplo para dibujar la chapa se debe crear el layer “chapa”. Desde el menú “Utilities” se escoge la opción “Layers” en cuya ventana se ingresa el nombre del layer y se selecciona “New”, como consecuencia aparecerá el layer recién creado en la lista de layers.

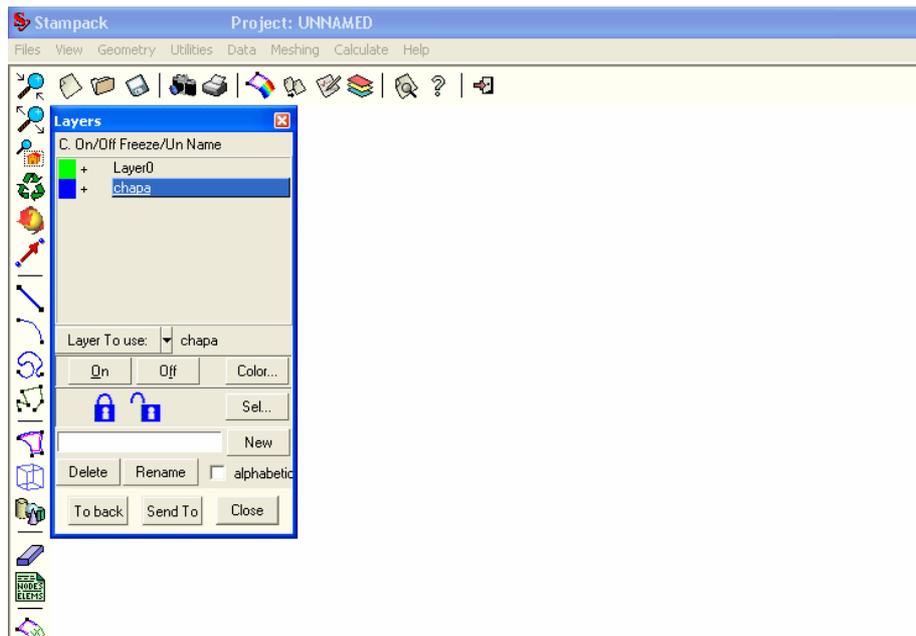


Figura 3.3 Creación del Layer “Chapa”.

Una vez creado el layer se empieza a dibujar la geometría, se escoge la opción línea y se crea un rectángulo con las dimensiones de la chapa, en este caso de 500mm en el eje X y de 300mm en el eje Y, se dibuja en estas direcciones ya que el estampado se lo realizará en la dirección del eje Z.

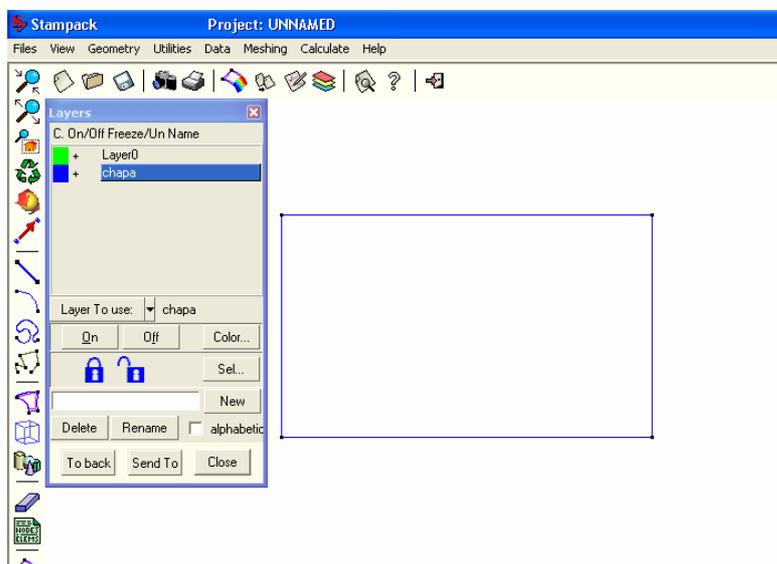


Figura 3.4 Visualización geometría de la chapa.

Finalmente se debe crear una superficie a partir del rectángulo, con la opción Utilities>Create>NURB Surface>By line points, se seleccionan las líneas que forman el rectángulo, y al dar clic derecho se selecciona “Escape” para obtener la superficie que se representará mediante líneas de color morado.

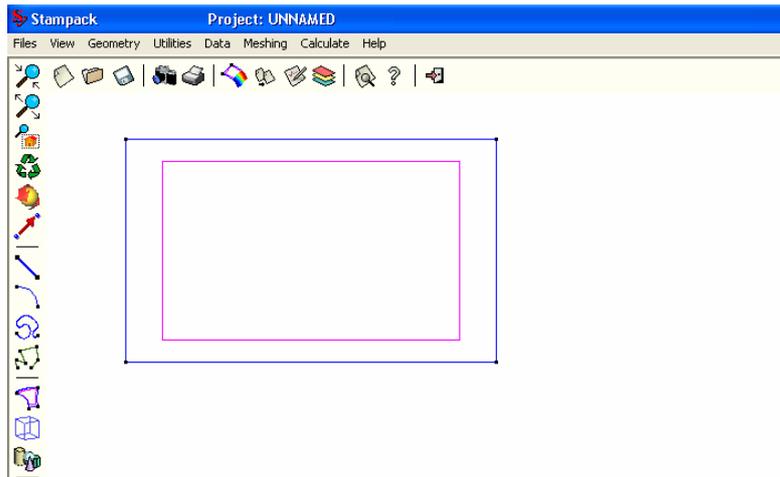


Figura 3.5 Creación de la superficie de la chapa.

De esta se obtiene un elemento de la geometría el cual se lo guardará en un archivo con el nombre “chapa” el cual tendrá extensión “.gid”.

Para crear los frenos primeramente se crea el layer llamado “freno1” y en este se crea la línea que modelará al primer freno, luego se lo guarda con el nombre “freno1”. Para crear el segundo freno se procede de la misma forma.

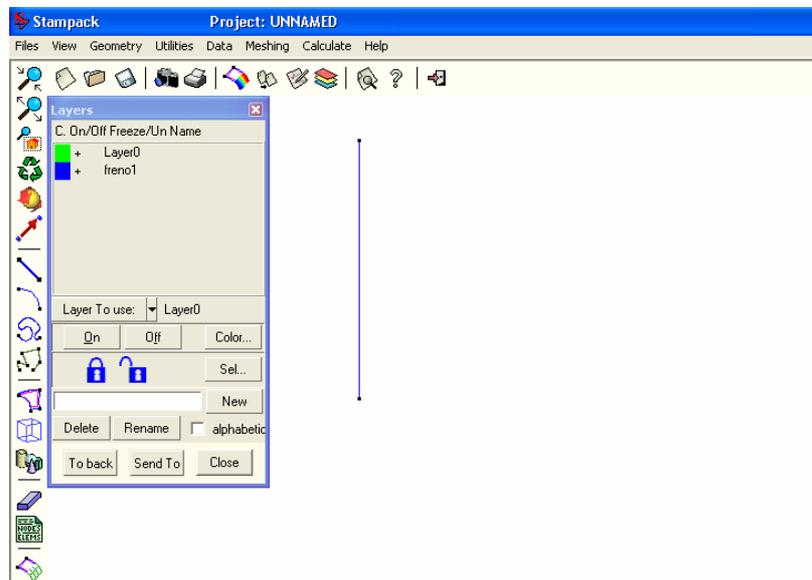


Figura 3.6 Geometría de freno1.

El primer elemento de la matriz a dibujar será el Pisador, para el cual se debe crear un layer con el nombre “Matriz-pisador”, se dibuja la geometría representada en este caso por dos superficies rectangulares y se guarda con el mismo nombre.

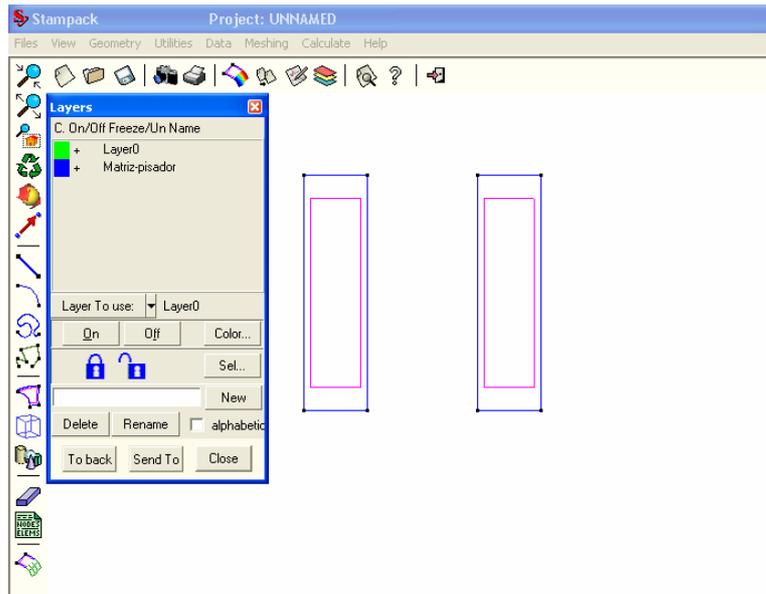


Figura 3.7 Geometría Matriz-pisador.

El segundo elemento de la matriz a crearse será el punzón, en este caso se crea un layer con el nombre “Matriz-punzón”, se dibujan las líneas de contorno del punzón, cabe anotar que las formas curvas del punzón en este caso se dibujaron con el comando “Utilities>Create>Arc>By Tangents “, esta opción pide que se ingrese primeramente el valor del radio de curvatura que este caso es 10mm y posteriormente la selección de las líneas que van a formar el arco.

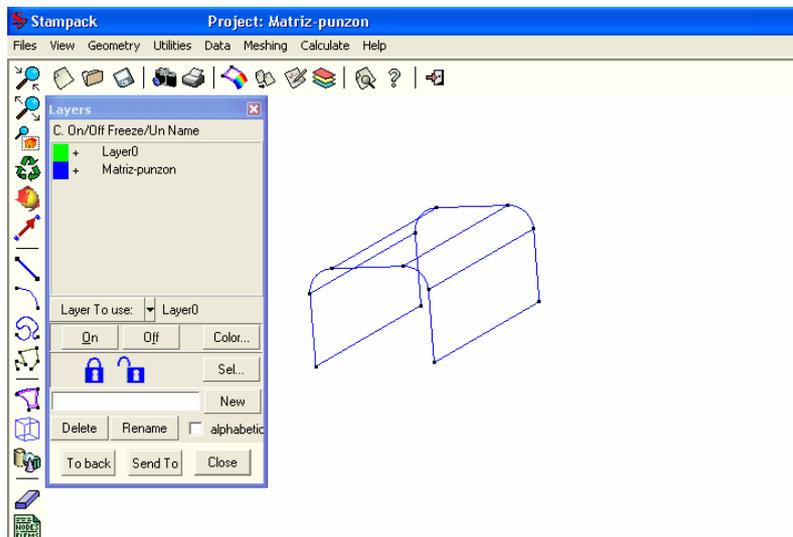


Figura 3.8 Líneas de contorno Matriz-punzón.

A continuación se crean las superficies con el comando Utilities>Create>NURB Surface>By line points y finalmente se guarda este archivo con el nombre “Matriz-punzón”.

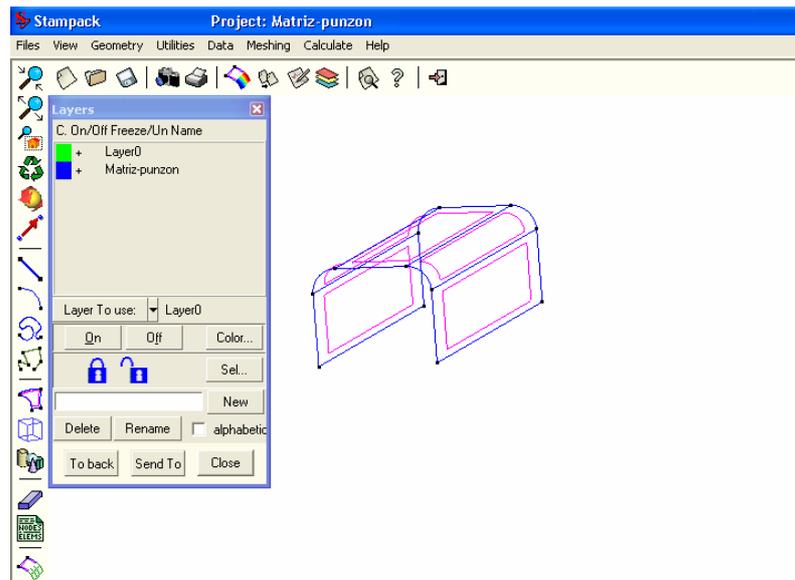


Figura 3.9 Geometría Matriz-punzón.

El tercer y último elemento de la matriz es la parte que forman los radio de acuerdo para lo cual se crea en primer lugar un layer con el nombre “Matriz-radios”, luego con los comandos “Line” y “Arc”, se dibujan las líneas de contorno de esta sección.

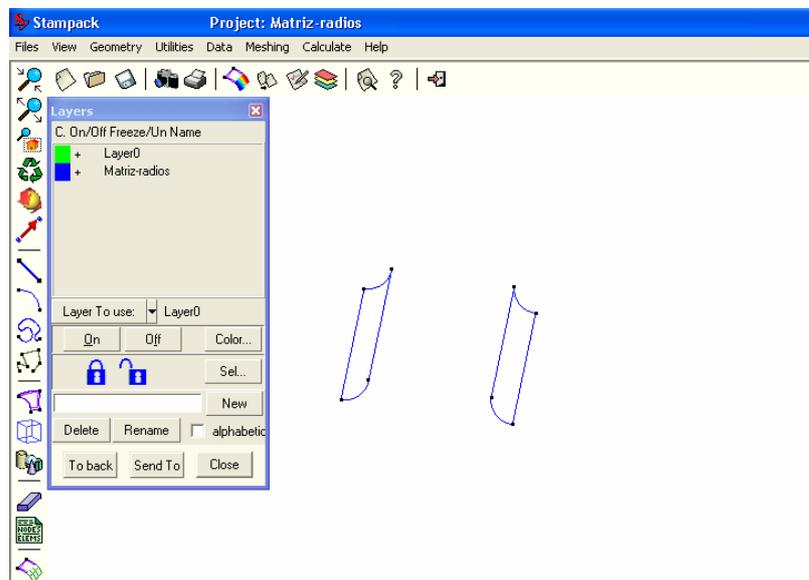


Figura 3.10 Creación de Radios de acuerdo.

Para finalizar esta geometría solo hace falta formar una superficie a partir de estas líneas, para lo cual se utiliza la opción Utilities>Create>NURB Surface>By line points y se guarda el archivo con el nombre “Matriz-radios”.

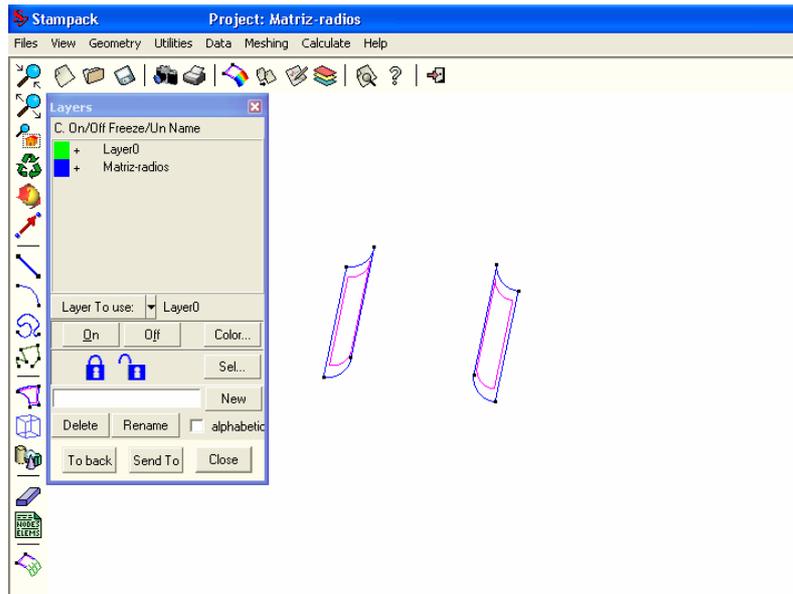


Figura 3.11 Geometría Matriz-radios.

Una vez obtenidas las tres partes que conforman la Matriz, se visualizan en un mismo conjunto para comprobar el correcto posicionamiento de las partes.

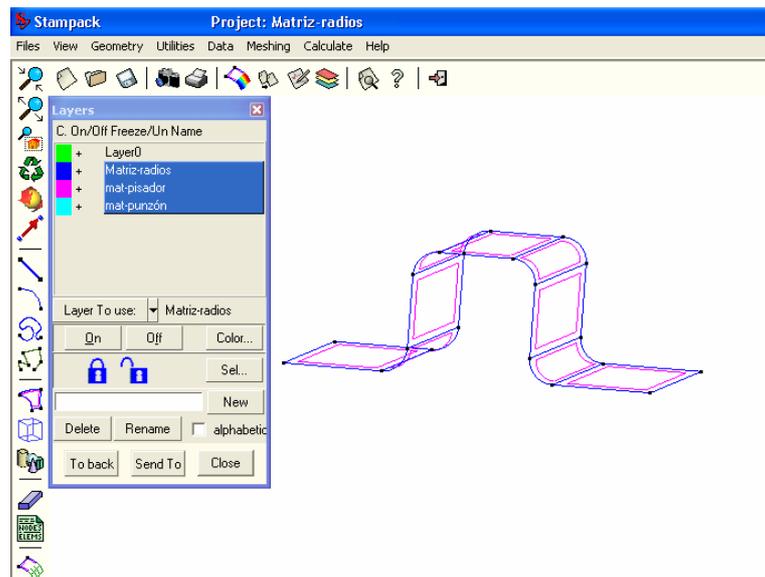


Figura 3.12 Visualización conjunto Matriz.

Con esto quedan listos los archivos que contienen la geometría para la importación, esto se explicará en el siguiente paso.

### 3.2.1.2 Importación de la geometría- Matriz, chapa, frenos

Para la realización de este ejemplo se partirá de la geometría en formato \*.igs de matriz, chapa y frenos.

Una vez accedido al entorno Stampack, se prepara el programa para la lectura de dichos archivos \*.igs, se crean las capas (layers) donde quedarán contenidas las geometrías importadas y se generan las capas: *Matriz-punzón*, *Matriz-radio*, *Matriz-pisador*, *Chapa*, *Freno1*, *Freno2*. Sucesivamente se importan: la matriz, la chapa y los frenos. Se utiliza la opción: Files>Import/Export>IGES read. Cuando se importa una geometría debe ubicarse en su capa correspondiente. En la ventana “Layers” se asigna “Layer to use” a la herramienta que se vaya a importar.

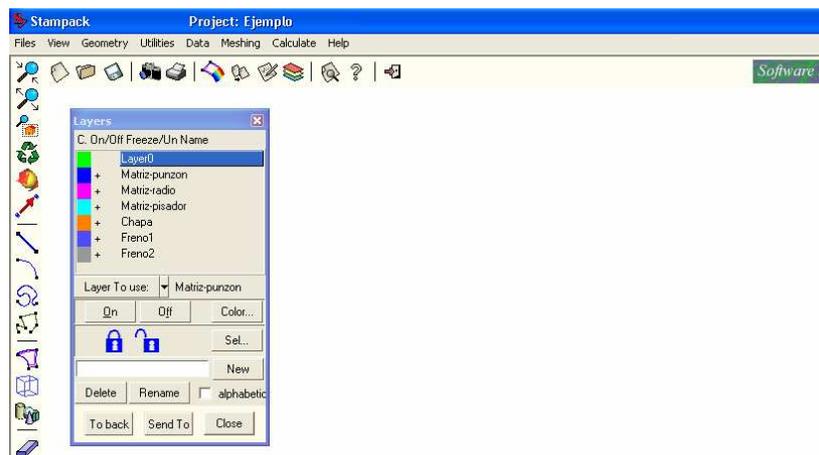


Figura 3.13 Ventana Layers.

Primero se importa los componentes de la matriz. La matriz está definida por tres archivos \*.igs que están ubicados en tres capas diferentes para la posterior creación por copia de las mallas del pisador y del punzón.

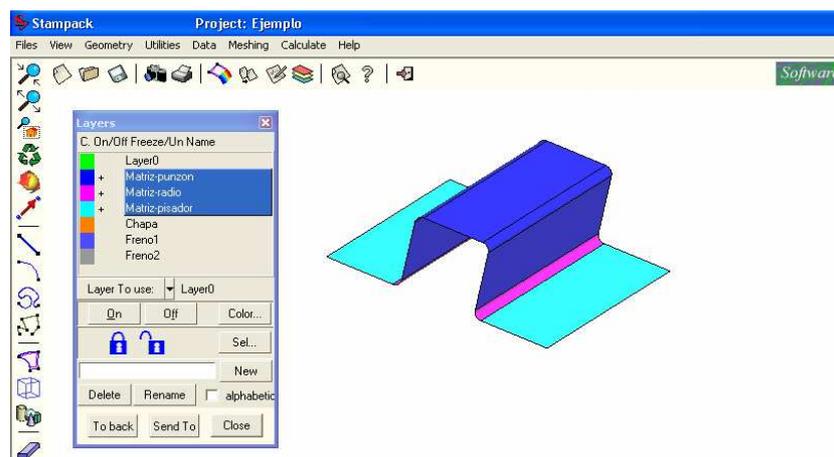


Figura 3.14 Importación de matriz.

Luego se importa la chapa y se ubica en su layer.

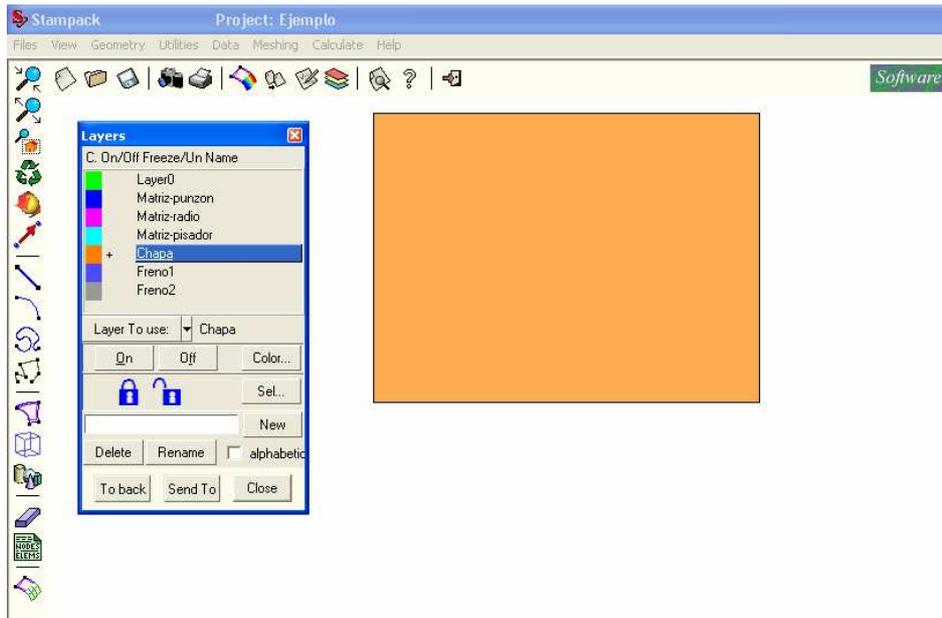


Figura 3.15 Importación de la chapa.

Se importan las líneas que modelan los frenos y se ubican en sus dos capas correspondientes.

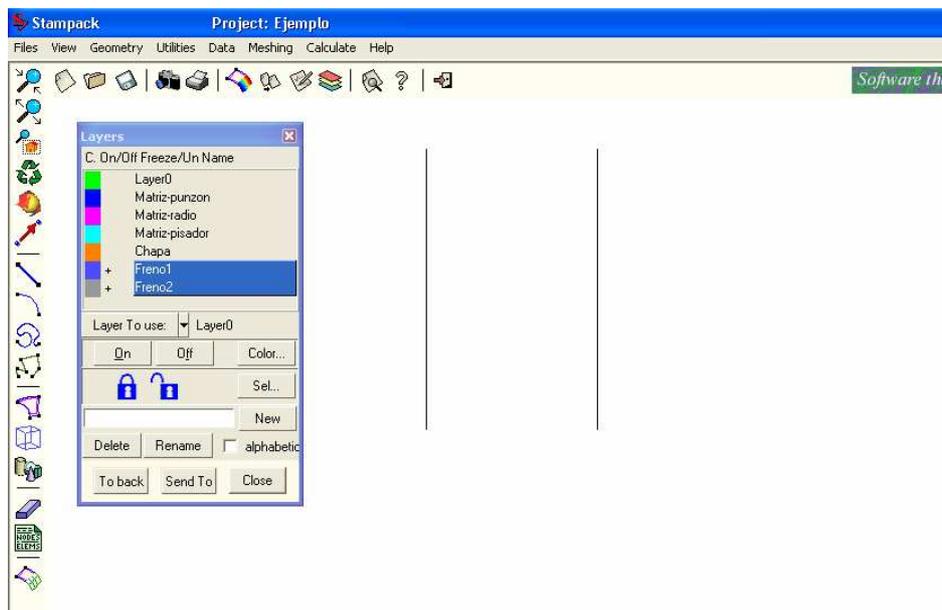


Figura 3.16 Importación de frenos.

Si al importar una geometría no ha sido insertada en su capa correspondiente, deberá ser cambiada de capa mediante la opción "Send To", seleccionando la geometría respectiva y enviándola a su nueva capa.

Una vez importada toda la geometría debe asegurarse una correcta orientación de las superficies. La orientación inicial viene determinada por la creación de la superficie. Para visualizar la orientación de las Normales se utiliza la opción: *Utilities>Draw Normals>Surfaces*, seleccionando las superficies.

Si las superficies no están correctamente orientadas, deben orientarse correctamente. Para unificar la dirección de las normales se procede de la siguiente manera:

- o visualizar en pantalla las normales: “Utilities>Draw Normals>Surfaces”

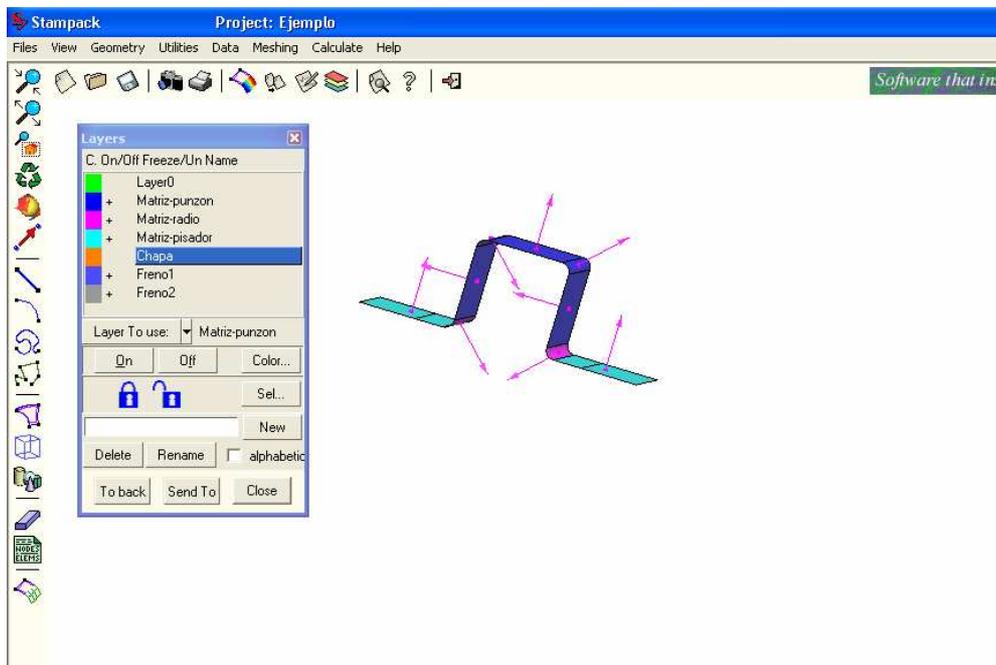


Figura 3.17 Ventana “Draw normals surfaces”.

- o haciendo un clic en el botón derecho del Mouse, se escoge: *contextual>swap group*, que orienta todas las normales hacia el mismo sentido. Si están orientadas hacia la chapa, es correcto, en caso contrario (*mouse-contextual>swap all*). Con esto se define correctamente la orientación de las superficies.

Como resultado, con la visualización “Render” (Render>flat lighting) deben aparecer en amarillo todas las caras opuestas a la chapa y en el color de la capa las caras orientadas a la chapa.

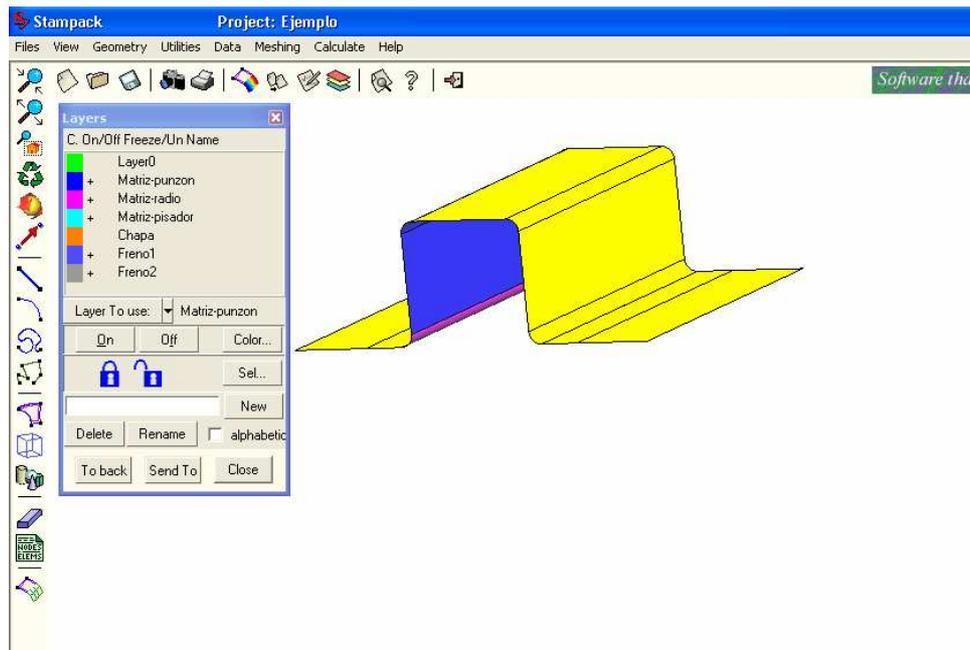


Figura 3.18 Ventana "Render flat lighting".

### 3.2.1.3 Generación de las diferentes mallas

En esta etapa se va asignar y generar un tipo de mallado a cada parte que interviene en el proceso de simulación de estampado, de tal manera que represente con mayor precisión al proceso real.

En el módulo de mallado, debe generarse la malla de la matriz (de superficie), la malla de la chapa (de superficie) y la malla de los frenos (lineal). Se utilizará mallado automático (por error cordal), mallado estructurado (asignando un número de elementos a los lados de las superficies) y mallado por asignación de tamaño. Para iniciar este proceso, solo deben estar visibles las capas a las cuales se asignarán condiciones.

Para la matriz se utilizará un mallado estructurado, que se aplica solo para superficies de cuatro lados. Para hacer esto, desde el menú principal: *Meshing>Structured>Surfaces...*, se seleccionan en la pantalla las superficies.

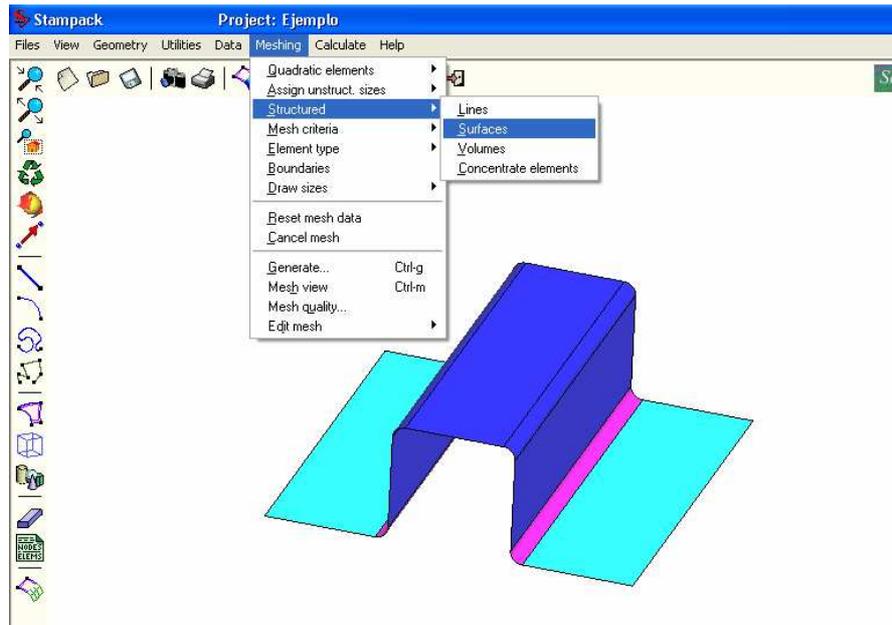


Figura 3.19 Caracterización de la malla de la Matriz.

Después debe asignarse el número de elementos a disponer sobre cada lado de la superficie escogida. Este número depende del criterio del usuario, a mayor valor se crea un mayor número de elementos, por consiguiente más nodos y mayor tiempo de cálculo. Para este caso el número asignado será 10 que es un valor adecuado para las dimensiones de la matriz.

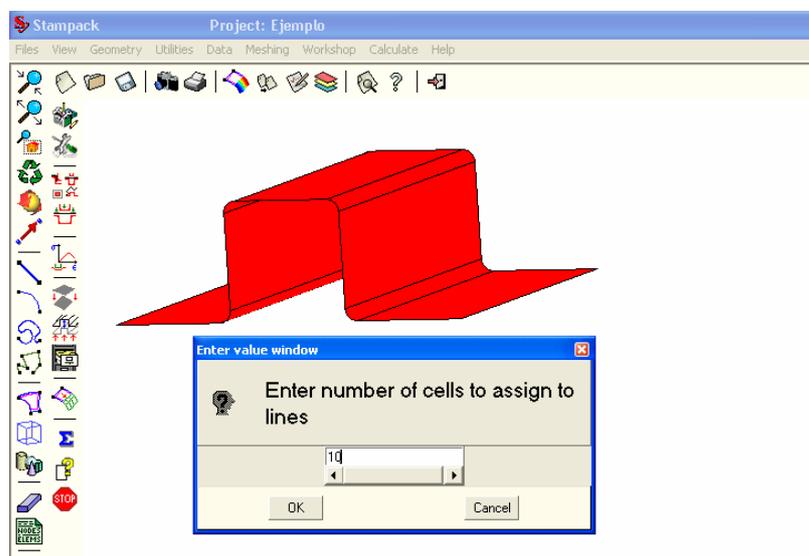


Figura 3.20 Ventana de ingreso de número de elementos.

Una vez acabada esta selección, desde el menú principal se tiene que especificar el tipo de elemento que se utilizará, para este caso se escogerá cuadriláteros en el Menú: *Meshing>Element type>Quadrilateral*.

Para realizar el mallado de los frenos se utilizará el criterio de error cordal que es un criterio que escoge el tamaño de los elementos en base a la distancia máxima entre la geometría real y el elemento generado, se utiliza la opción: *Meshing>Assign unstruc. Sizes>By Cordal Error....* Para este caso se asignarán los siguientes parámetros:

Tamaño mínimo: *Automatic*, Tamaño máximo: 37, Error cordal: 0.1

Esta condición queda asignada también a cualquier entidad geométrica sin condición previa como en este caso los frenos.

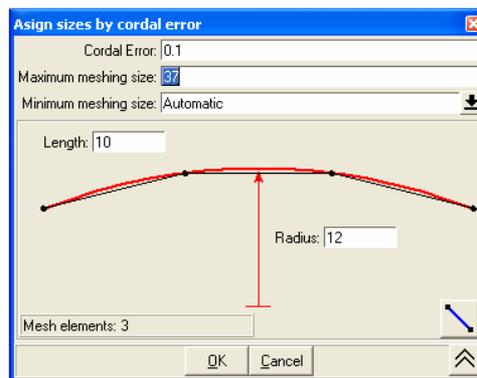


Figura 3.21 Ventana Mallado por error cordal.

Muchas veces, la malla estructurada es difícil de generar, según el tipo de superficie que interviene en la geometría de la herramienta. Por lo tanto lo usual es utilizar la malla automática con criterio de error cordal.

La chapa metálica será mallada con el criterio de Asignación de Tamaño: *Meshing>Assign unstruc. Sizes> Surfaces....* En este caso se asigna un tamaño de malla a la chapa de 4 mm. Se tiene que marcar sobre la superficie de la chapa para asignarle este valor. Esta condición, al haber sido aplicada posteriormente a la de malla por error cordal, es la que el programa considerará para la generación del mallado. A continuación, desde el menú principal se debe especificar el tipo de elemento para la chapa: *Meshing>Element type>Triangle.*

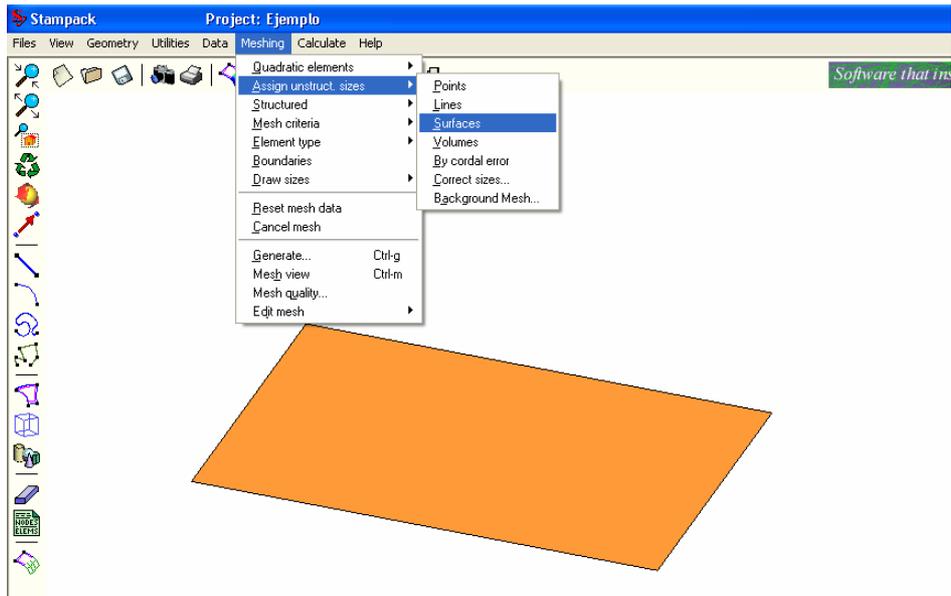


Figura 3.22 Caracterización para mallado de la chapa.

Una vez definidos los parámetros de mallado de cada uno de los elementos de la geometría, se puede pasar a generar la malla. Stampack genera el mallado de todos y cada uno de los elementos de la geometría con el comando: *Meshing>Generate*.

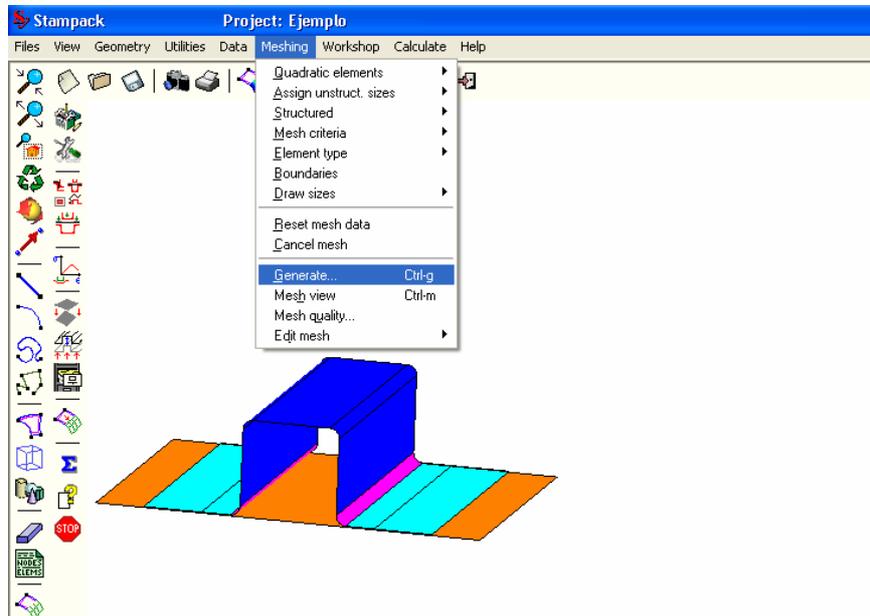


Figura 3.23 Comando Generar Malla.

Cuando se manda a mallar aparece una ventana pidiendo el tamaño de los elementos, esto es de ayuda en caso existir partes de la geometría que no hayan sido caracterizados previamente.

Como resultado se dispone de la malla que discretiza las entidades geométricas definidas.

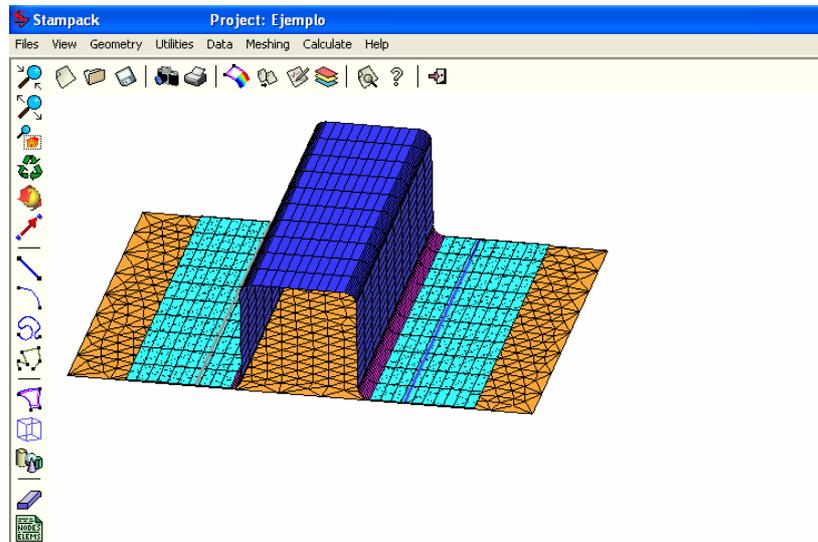


Figura 3.24 Mallas generadas.

Después de generar el mallado, se recomienda un control de la orientación de las normales. Este control debe asegurar que existe una orientación continua, es decir que no haya zonas de la chapa con distintas orientaciones de las normales. Desde el menú principal seleccionar: *Utilities>Draw Normals>Elements* y luego marcar todos los elementos de la chapa.

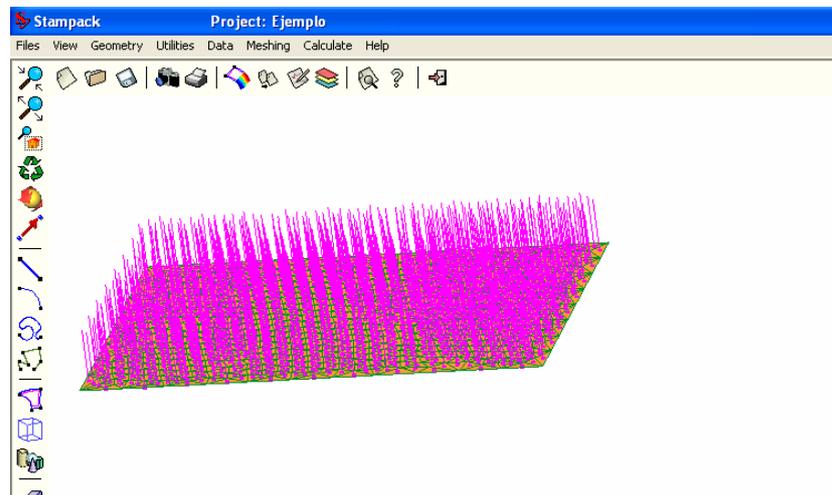


Figura 3.25 Orientación de normales en la chapa.

Se nota, a través de los tipos de visualización (Elements y Color), que el sentido de las normales está invertido, ya que, estas deben apuntar hacia las herramientas (punzón y pisador en este caso), según los requerimientos de los algoritmos internos de cálculo del Stampack. Desde el botón derecho del ratón

seleccionar: *Contextual>Swap Group*, para lograr una continuidad del sentido de las normales de la chapa.

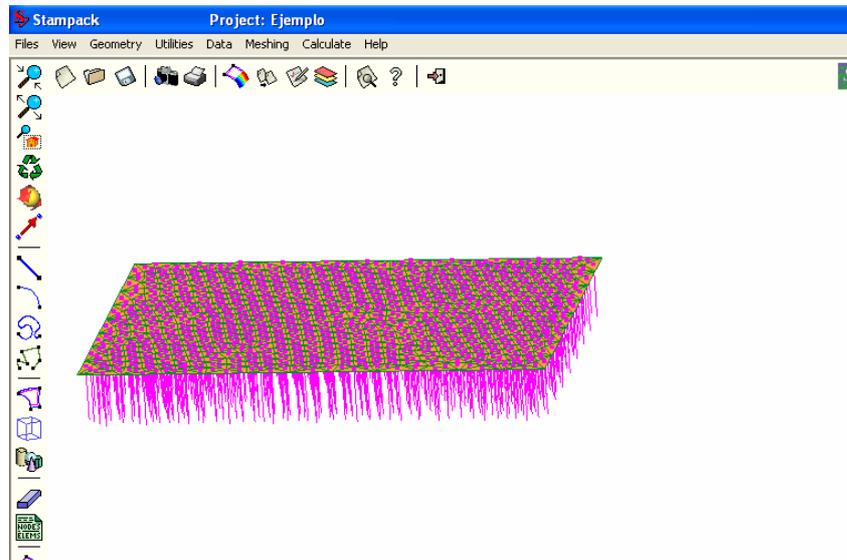


Figura 3.26 Inversión de normales en la chapa.

Una vez generadas las mallas de matriz, frenos y chapa deben generarse por copia las mallas del pisador y del punzón.

Primero se crea la capa "Pisador" y se define como *Layer to use*, con la opción *Utilities>Copy>Elements>Translation*, se obtiene la malla del pisador. Una vez obtenida la malla deben invertirse sus normales con la opción *Utilities>DrawNormals>Elements (mouse-Contextual>Swap group)*.

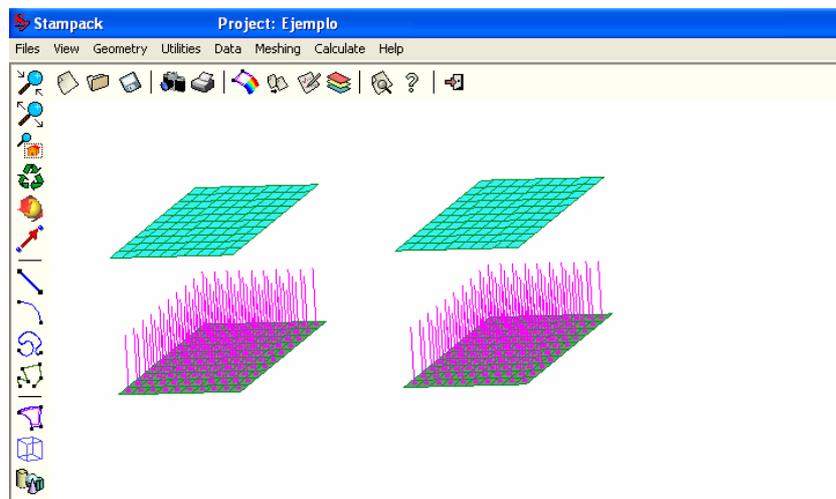


Figura 3.27 Generación de la malla del pisador.

Para generar la malla del punzón se sigue el mismo procedimiento.

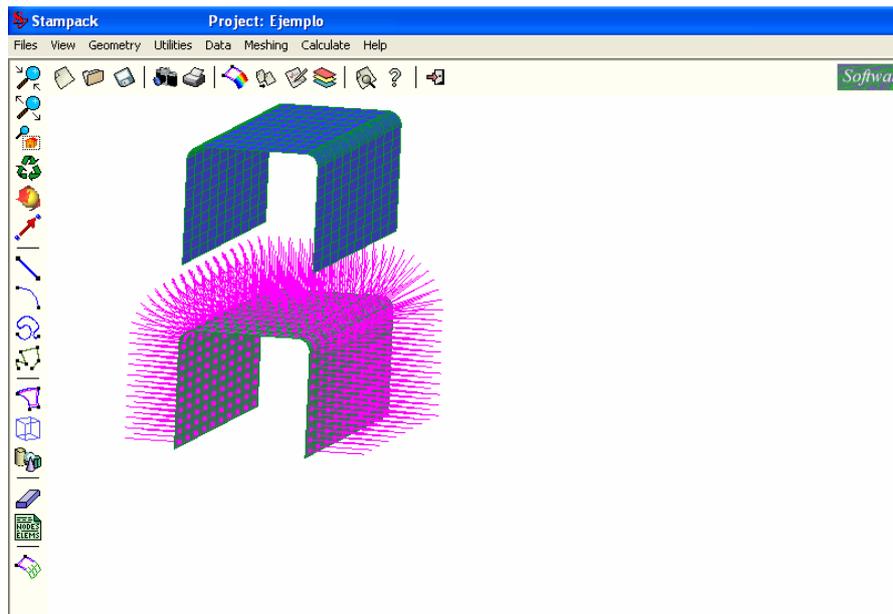


Figura 3.28 Generación de la malla del punzón.

Una vez generadas las mallas de todos los elementos presentes en la simulación, solo falta agrupar los elementos que forman la Matriz (Matriz-punzón, Matriz-radio, Matriz-pisador) en una misma capa con la finalidad que estos elementos formen uno solo y poder posteriormente asignarlos como una sola herramienta. Primero se genera una nueva capa que en este caso se llamará "Matriz".

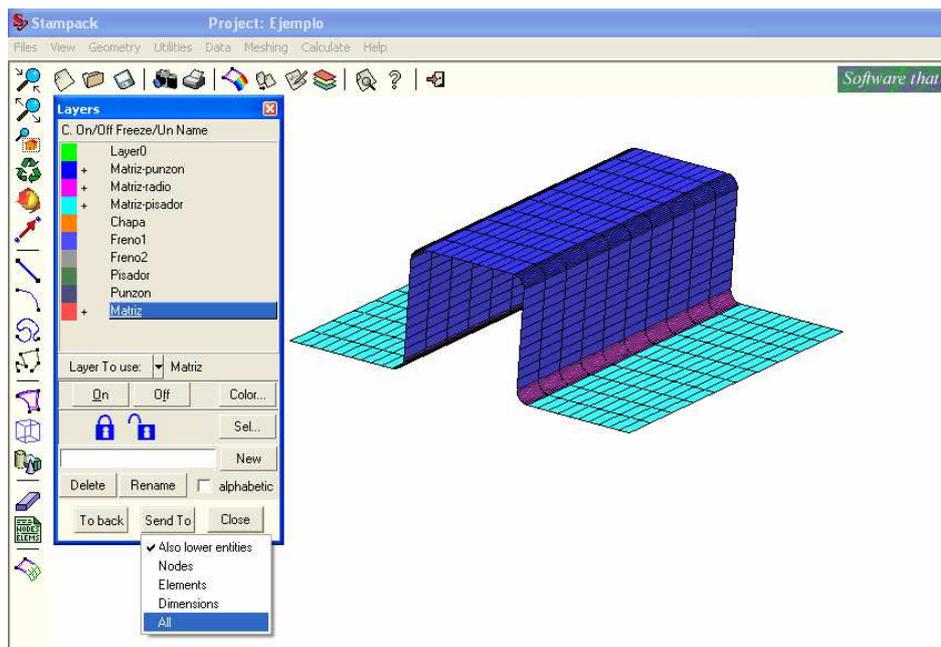


Figura 3.29 Generación del layer "matriz"

Luego se activa la nueva capa como *Layer to use*, y con la opción *Send To*, se seleccionan los elementos de las tres capas que contienen elementos de la matriz. Se puede notar un cambio de color de los componentes de la matriz al color de la capa a la cual se envían estos elementos agrupados en uno solo.

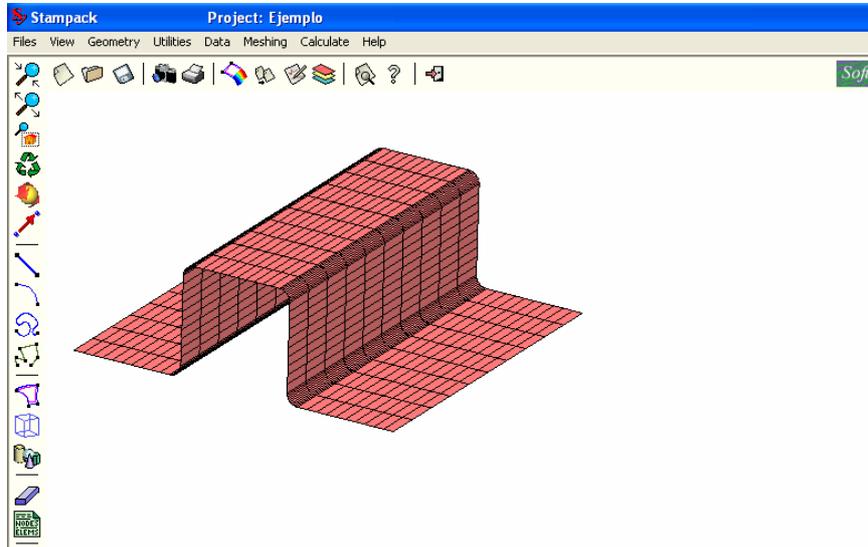


Figura 3.30 Matriz formada por el pisador, punzón y radios.

Como resultado se dispone del modelo enteramente discretizado.

Una vez discretizado el problema, se puede pasar a la completa caracterización del proceso de estampación. A través del menú principal, se declara el tipo de problema como "*Stampack55 : Data>Problem type*",

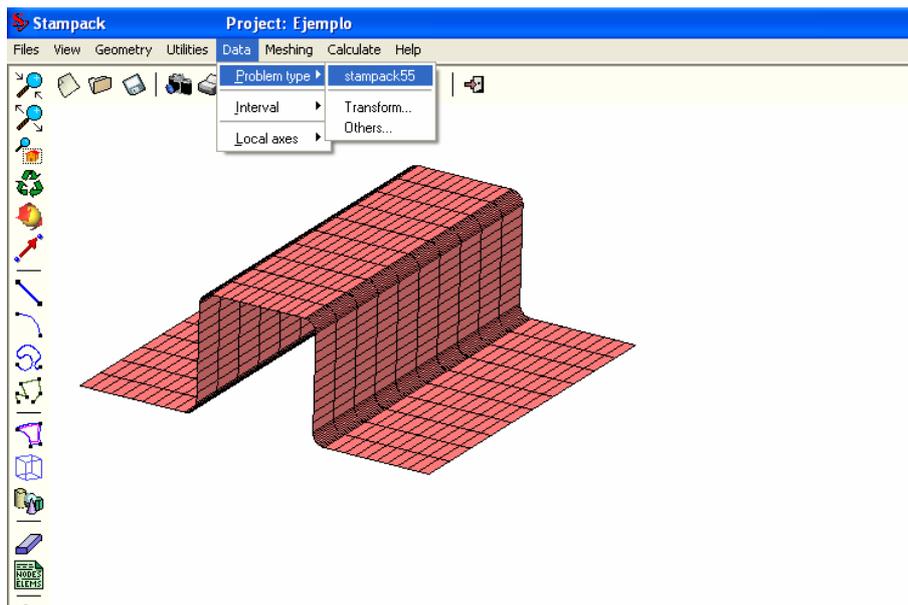


Figura 3.31 Ubicación comando "problem type".

Como consecuencia de esta acción, se activa el menú “*Workshop*” que será el que permitirá a continuación la definición completa del proceso.

Se accede ahora al recién creado menú *Workshop>Problem characteristics*.

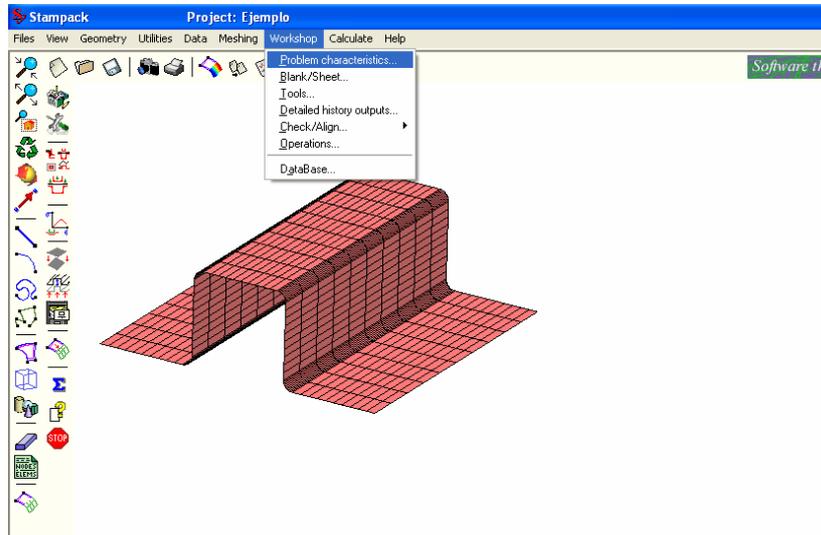


Figura 3.32 Menú “Workshop”.

El menú *problem characteristics* consta de tres submenús:

- *Process Type*: Menú donde se selecciona el tipo de proceso. Stampack dispone de diferentes módulos dependiendo del proceso a simular. En este ejemplo, el proceso será una estampado.



Figura 3.33 Opción “Process type”.

- *General*  
*Gravity Direction*.- Debe especificarse la dirección y sentido en el que actúa la gravedad. Se recomienda la utilización del eje Z como eje de estampación.

*Problem dimension.*- El programa automáticamente detecta la topología del problema estudiado, 2D o 3D. Automáticamente queda seleccionado 3D.

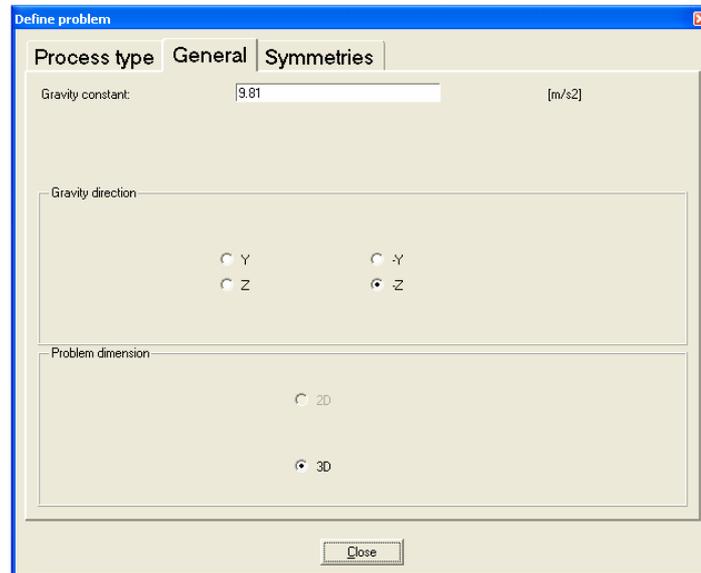


Figura 3.34 Opción "General".

- *Symmetries*

El programa puede trabajar con uno o dos planos de simetría. Para este ejemplo, no se dispone de ningún plano de simetría. *Number of planes: No planes*

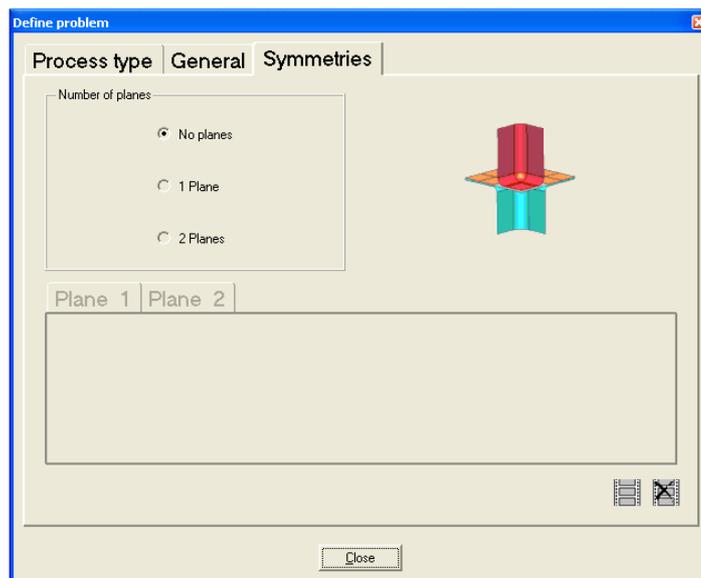


Figura 3.35 Opción "Symmetries".

### 3.2.1.4 Caracterización de las herramientas.

El menú “Tools” es el que permite definir y caracterizar todas las herramientas y chapas del proceso. Para este ejemplo, se dispone de una chapa y de diferentes herramientas que habrá que definir para una correcta modelización del problema.

Herramientas: Punzón, Pisador, Matriz y Frenos.

Primero se caracteriza la chapa, en el menú Define tools se selecciona “Añadir chapa” y aparece el menú *Define Blank Zone*.

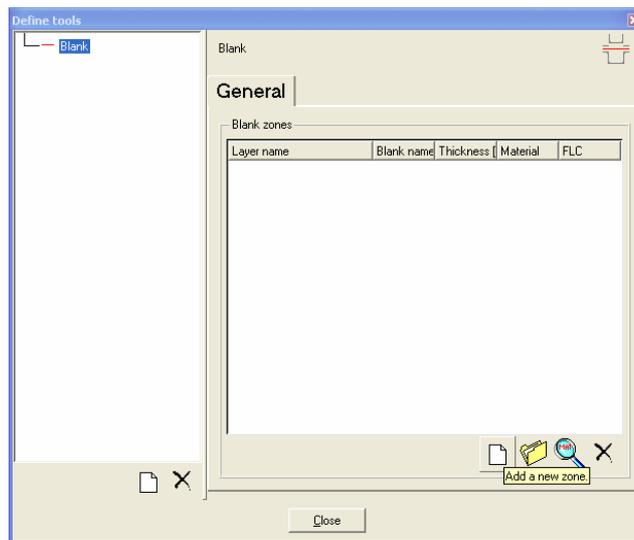


Figura 3.36 Ventana “Define tools”.

Se selecciona la capa que contiene la chapa y se asignan las propiedades “properties”.

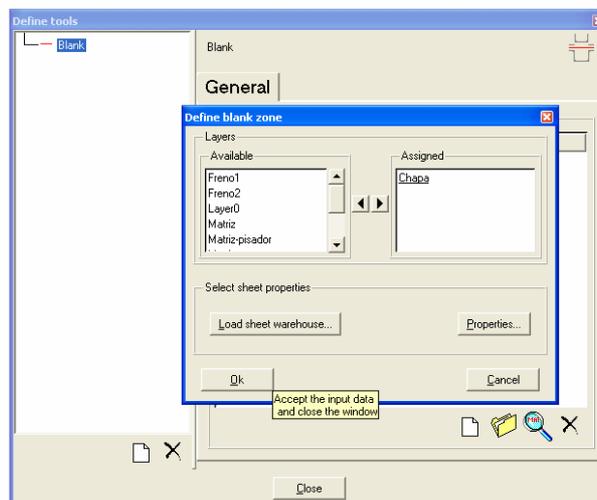


Figura 3.37 Ventana “Define blank zone”.

El menú *Define sheet properties* recoge información básica de la chapa. Para este ejemplo se especifica el espesor (2 mm), se selecciona el grupo del material “High strength steel” (debido a las propiedades adecuadas para este ejemplo) y se escoge un material de la base de datos del programa.

Es necesario también, asignar una curva FLC al material asignado a la chapa que, que al igual que el diagrama esfuerzo-deformación, indica cuanta deformación puede soportar el material durante el proceso de estampado en base a las deformaciones principales, tal como se explicó en la sección “1.2.3 Límites de Deformación”. En este ejemplo se utilizará la curva FLC asociada al material escogido: FLCQStE6092 existente en la base de datos. La asignación de la curva FLC se la hace en la misma ventana “Define sheet properties”.

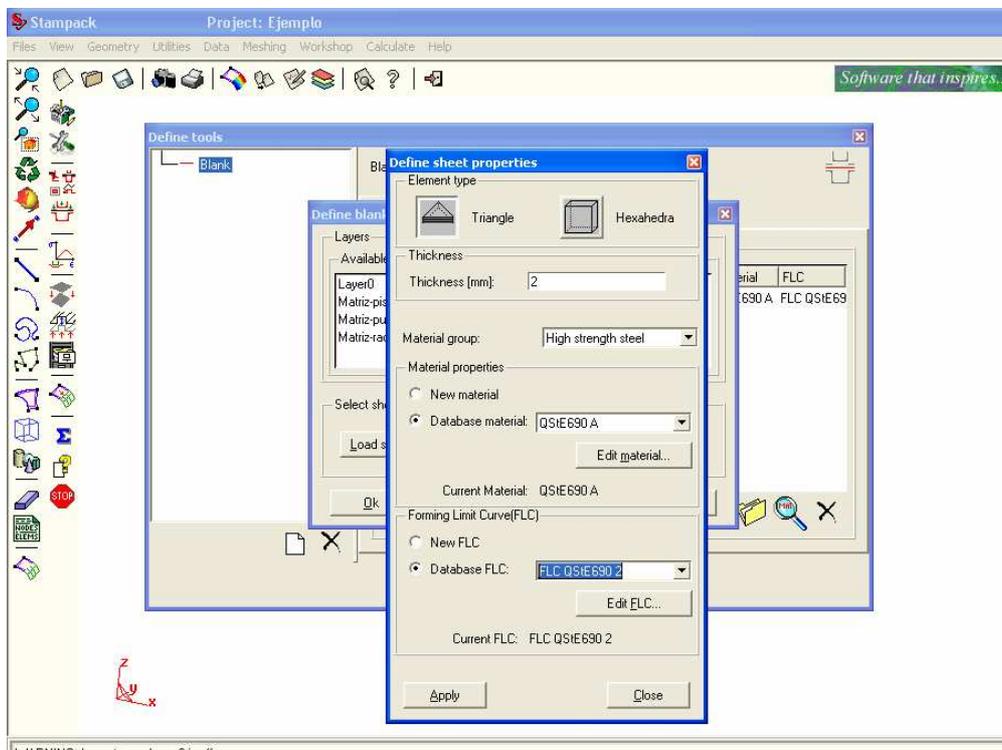


Figura 3.38 Ventana “Define sheet properties”.

Cuando se trate de un material que no conste en esta base de datos, el usuario puede ingresar el mismo con la opción “*New material*”, y editar el material ingresando las propiedades respectivas en “*edit material*”. Antes de editar el material se tiene que especificar un nombre y seleccionar el tipo de entrada de datos, analítico o por puntos.

Se muestran las propiedades mecánicas del material.

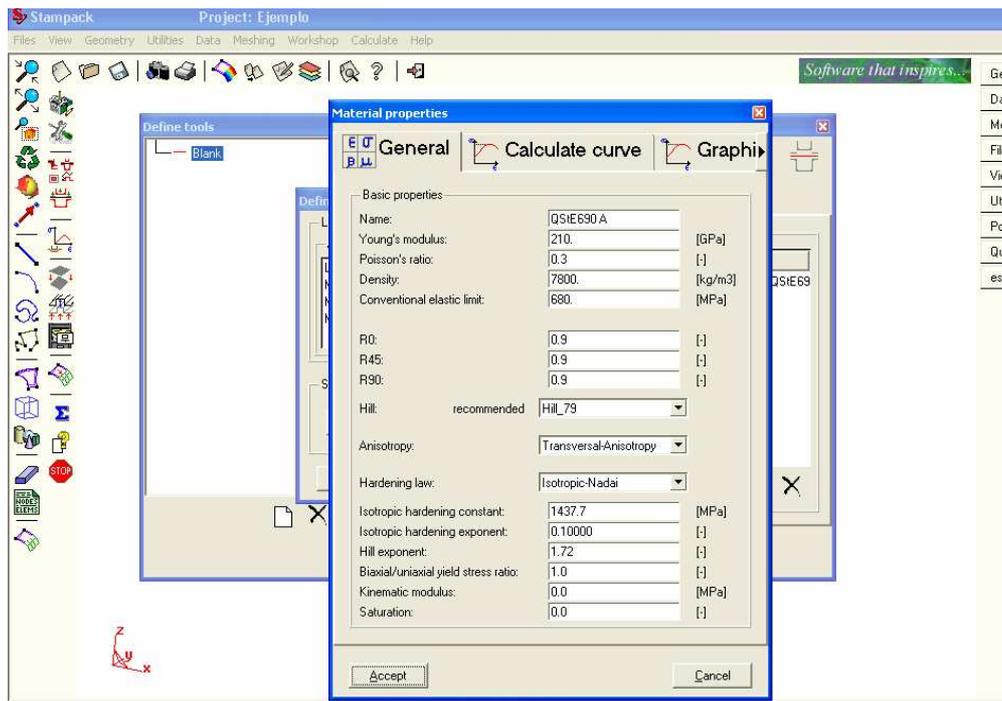


Figura 3.39 Ventana "Material properties".

Una vez seleccionado el material, ya se puede definir correctamente la chapa para la simulación.

*Material: blank*

*Espesor: intrínscico a la chapa de estudio, en este caso 2 mm.*

El conjunto caracteriza la chapa creada.

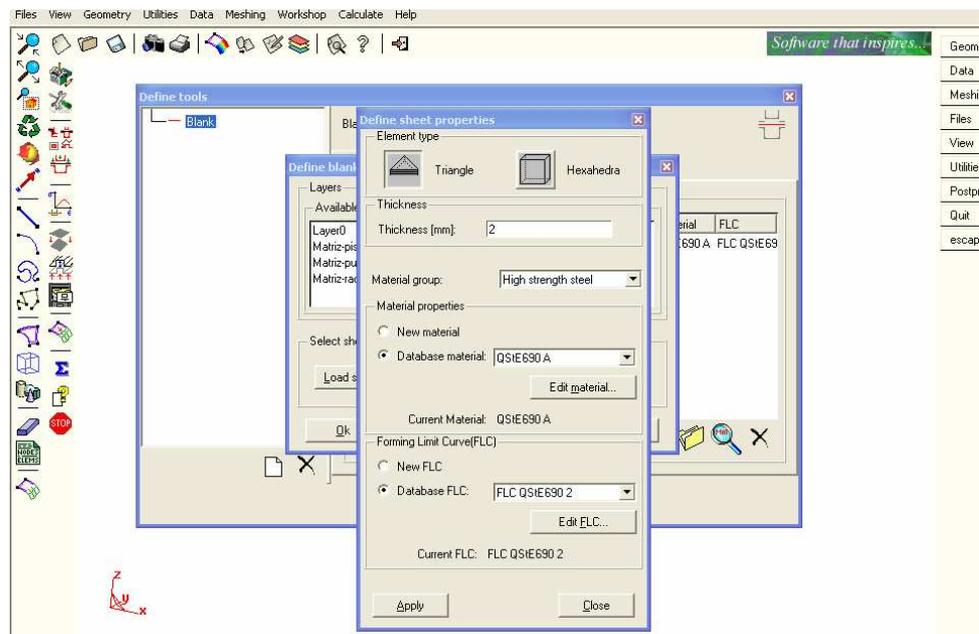


Figura 3.40 Caracterización del material de la chapa.

Se aplican estas características (espesor, material y curva FLC) a la chapa y se le da un nombre de referencia: *Chapa*.

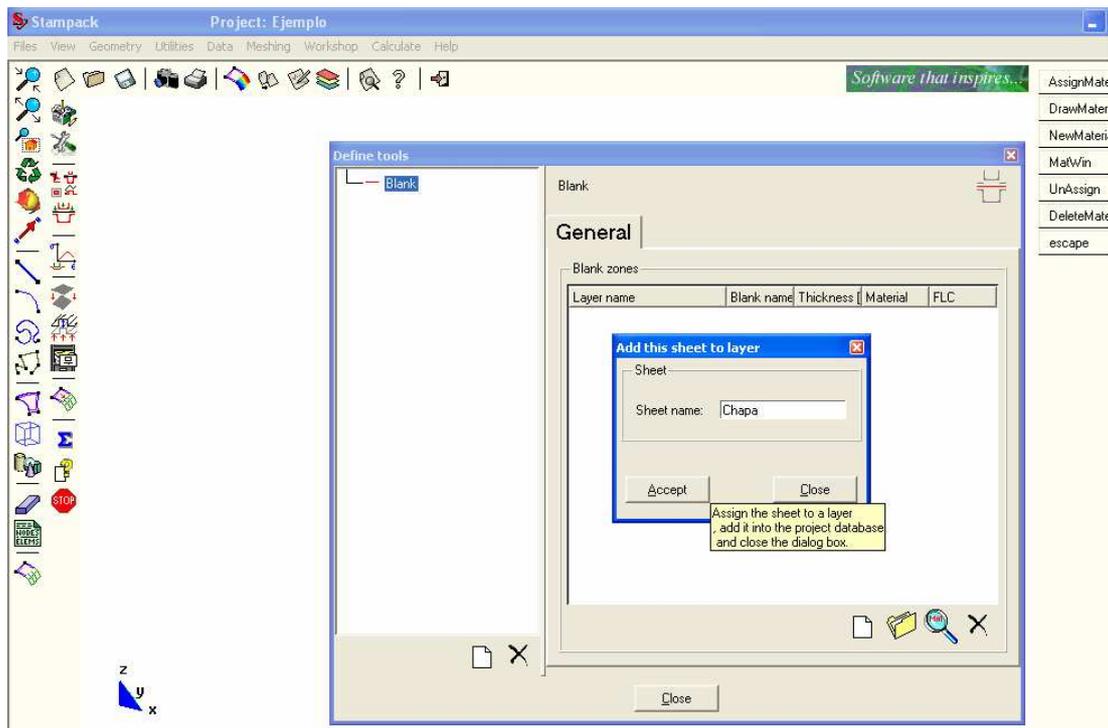


Figura 3.41 Asignación de un nombre a la chapa creada.

Una vez hecho todo esto, se puede ver en el menú principal la chapa con sus características.

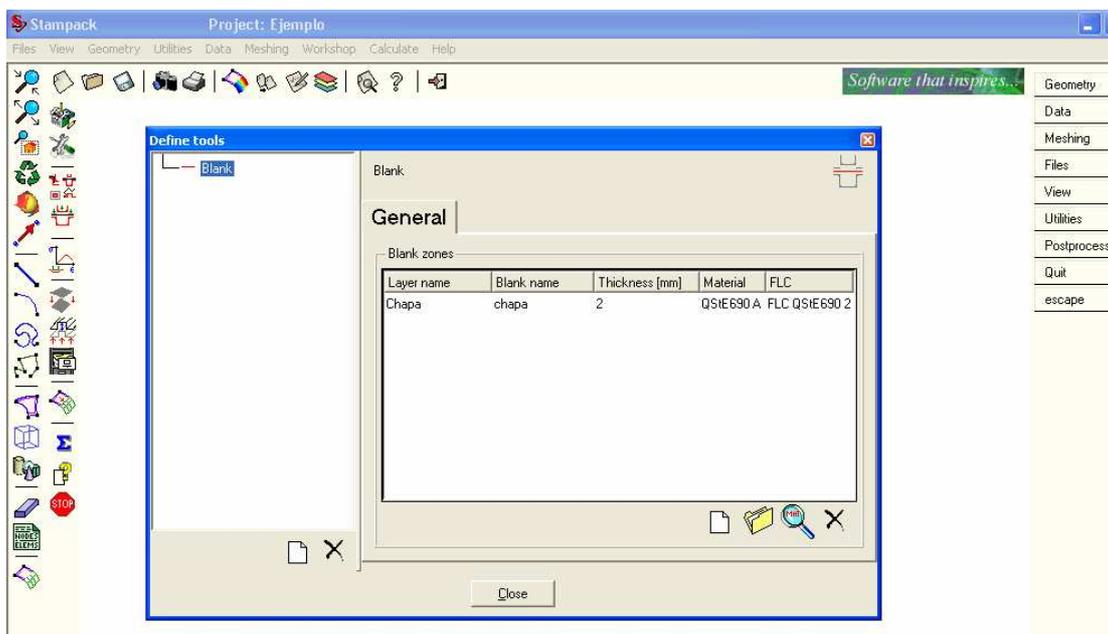


Figura 3.42 Visualización en el menú del material asignado a la chapa.

Definida la chapa, es necesario informar del tipo de herramientas que están presentes en el problema. Las herramientas están disponibles en capas, pero esta información no es suficiente para la caracterización del modelo. Se debe especificar las características de cada herramienta.

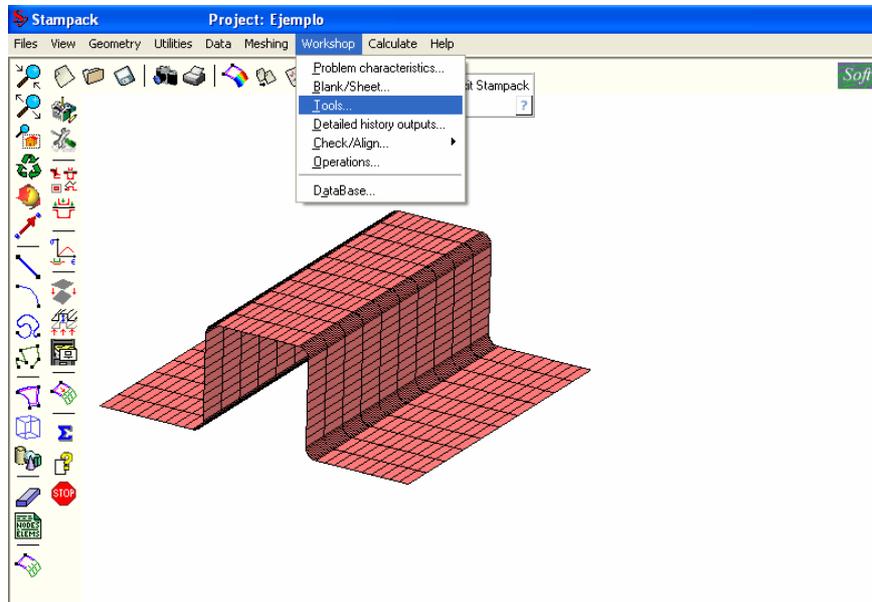


Figura 3.43 Caracterización de la herramientas.

Primero se activa la opción "Add a new tool". Para cada herramienta se repite esta operación. Seguidamente aparece el menú con las diferentes herramientas que el programa puede modelar.



Figura 3.44 Ventana "Add a new tool".

Se escoge en la sección “Select tool type” la herramienta “Punch” y se le asigna el nombre “punzón”. En el menú de herramientas aparece la nueva herramienta introducida. Al seleccionar el nombre de la nueva herramienta, aparece el menú donde se caracteriza. Se le asigna la layer geométrica correspondiente, es decir “punzón”. Más tarde, al definir las operaciones, se asignará la carrera y la dirección de estampación.

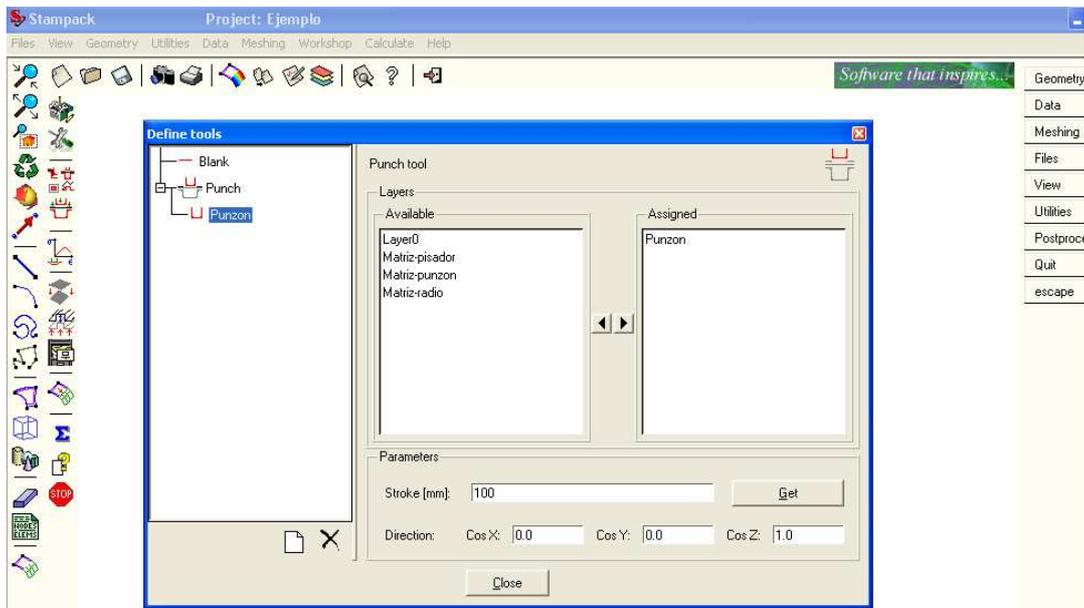


Figura 3.45 Visualización en el menú principal de la nueva herramienta.

Para cada herramienta debe repetirse el proceso de informar al programa de la presencia de cada elemento del cálculo. Una vez introducida la herramienta, dependiendo del tipo, se deberán informar unas propiedades u otras. En este caso para el punzón en la casilla “Stroke” se deberá asignar el valor de 100mm que es la carrera del punzón y la dirección se asigna mediante cosenos directores, en este caso, como el punzón tiene solo movimiento vertical ascendente en la casilla “Cos Z” se asigna el valor “1”.

Para el caso del pisador, es necesario definir:

- Pisador deformable o rígido, para este ejemplo *rígido*.
- Fuerza de pisado y dirección.

Primero se activa la opción *Add a new tool*. Para cada herramienta se debe repetir esta operación. Luego aparece el menú con las diferentes herramientas

que el programa puede modelar. Seguidamente se añade la herramienta “blankholder” y se le asigna el nombre “pisador”.

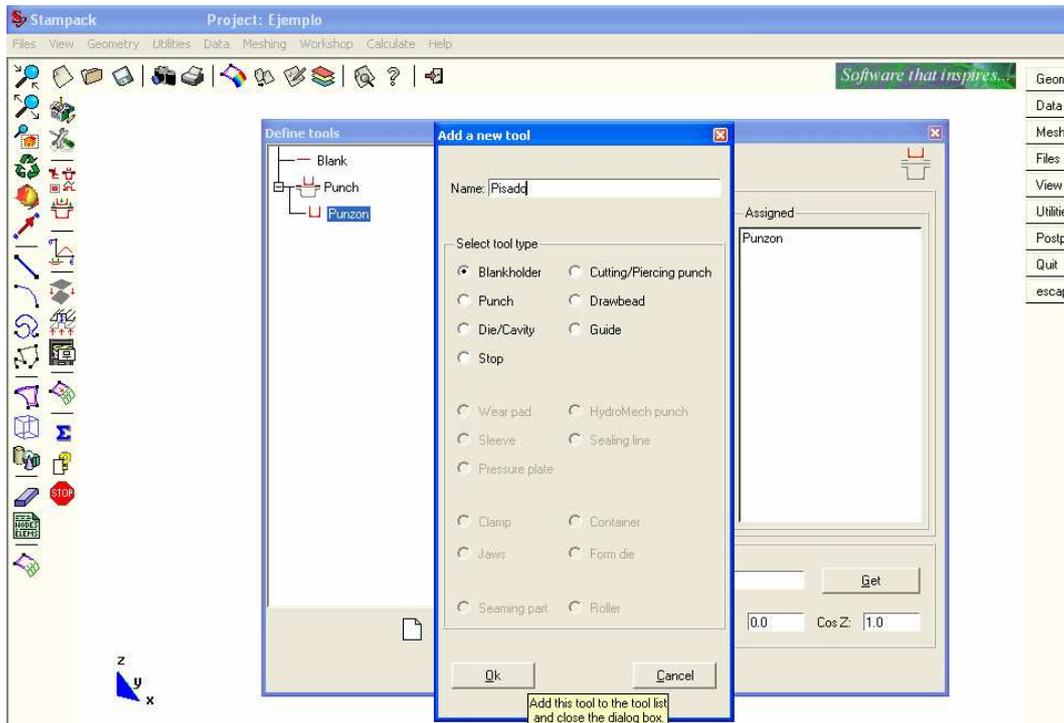


Figura 3.46 Adición de la herramienta “pisador”.

Se asocia la capa a la herramienta, marcando sobre la nueva herramienta introducida.

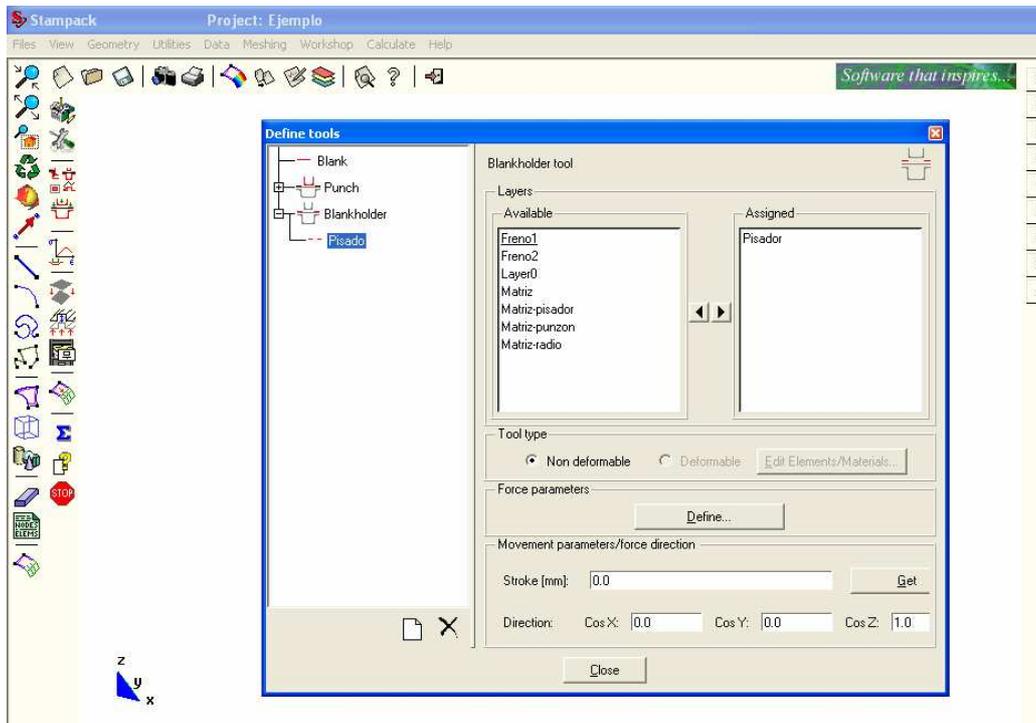


Figura 3.47 Visualización en el menú principal de la nueva herramienta.

Para conseguir la descripción completa de la fuerza de pisado se utiliza el botón *Define*. La dirección de aplicación de la carga y la carrera (si existe) se asignarán más tarde, cuando se defina la operación.

Finalmente se caracteriza la nueva herramienta.

### *Definición de la fuerza de pisado*

Al apretar el botón *Define* se abre una nueva ventana desde donde se puede describir la manera de actuar y el valor de la fuerza de pisado.

Existen dos posibilidades: fuerza uniforme o distribución basada en el uso de los cilindros de gas.

En este caso se utilizará una fuerza uniforme, por lo tanto deben introducirse los límites de variación de esta fuerza, para este caso se utilizará una fuerza constante de una tonelada.

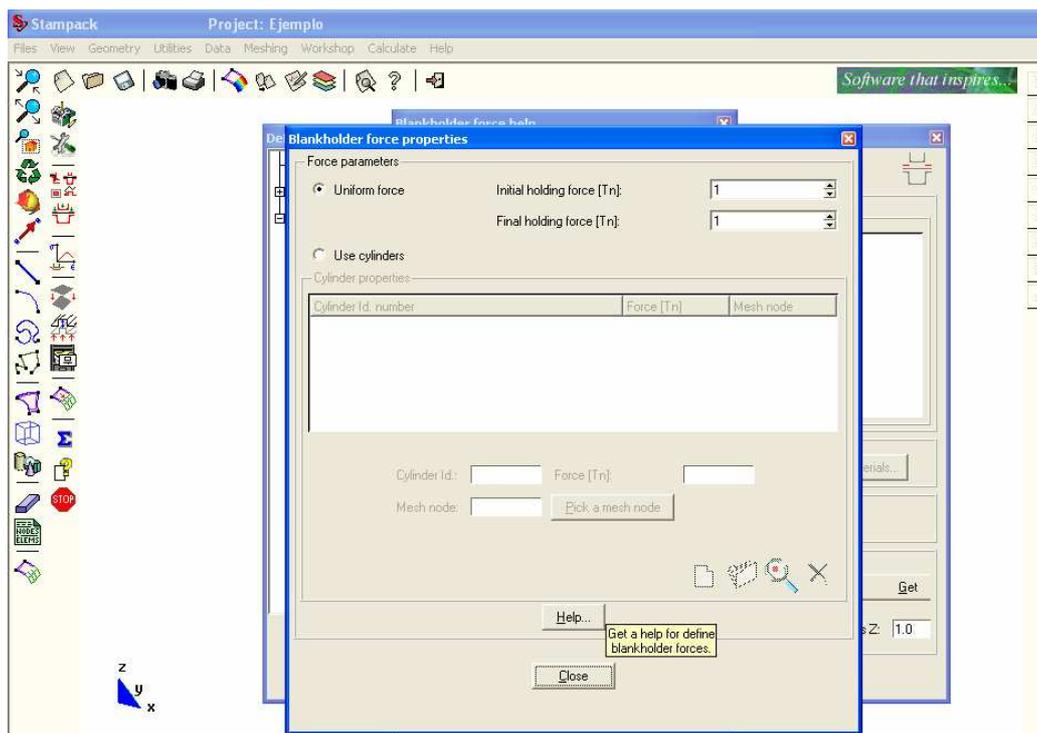


Figura 3.48 Definición de la fuerza de pisado.

### *Caracterización de la matriz*

Unicamente se debe especificar la capa que contiene la descripción de la matriz.

Se activa la opción *Add a new tool*. Aparece el menú con las diferentes herramientas que el programa puede modelar.

Se añade la herramienta “*die*” (matriz).

Luego se asocia la capa a la herramienta, marcando sobre la nueva herramienta introducida.

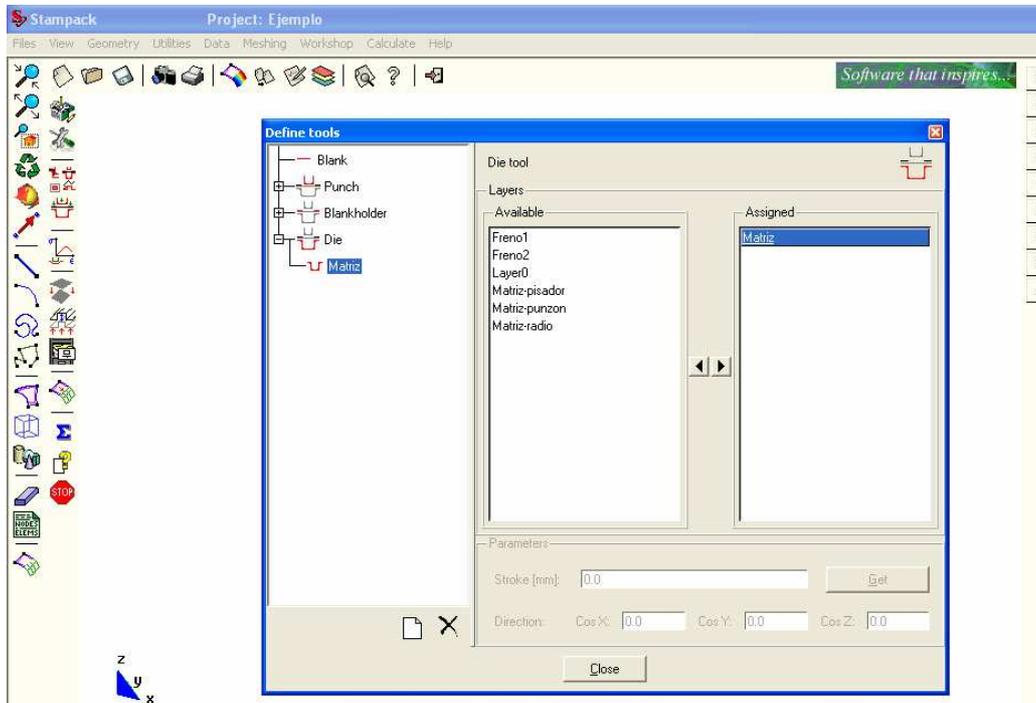


Figura 3.49 Asignación del layer a la matriz.

La caracterización de los frenos requiere de dos parámetros.

- La fuerza equivalente
- Pendiente de aplicación.

Nota: cada segmento de freno ha de pertenecer a un layer y a una herramienta diferente.

Se activa la opción “*Add a new tool*”. Para cada freno se repite el proceso.

Aparece el menú con las diferentes herramientas que el programa puede modelar.

Se añade la herramienta “*draw*” y se le asigna el nombre “*freno1*”, los valores, que definen el freno equivalente son: fuerza de 1 tonelada y pendiente de aplicación de esta fuerza de 1.

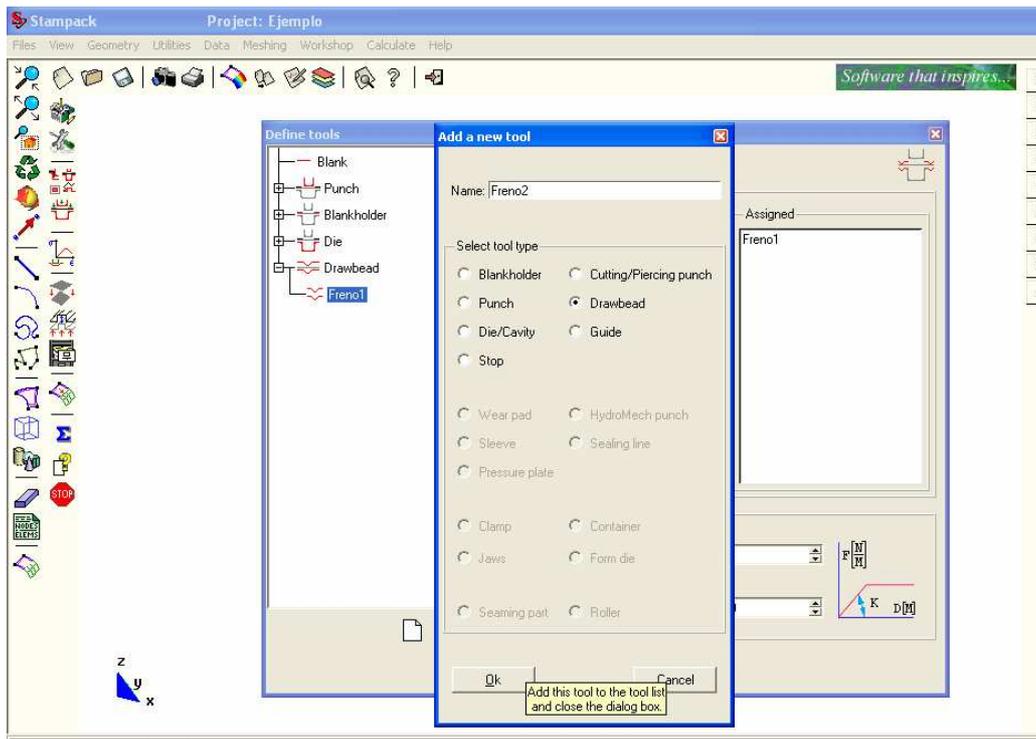


Figura 3.50 Definición del freno equivalente.

### 3.2.1.5 Detalle del historial de variación.

Se puede preparar la simulación en vista de sacar el historial de variación para una variable en particular, a lo largo del proceso.

Primeramente desde el menú de “Workshop” se accede a la opción “Detailed history outputs”, aparecerá una ventana con las variables cuyo historial de variación puede calcular el programa.

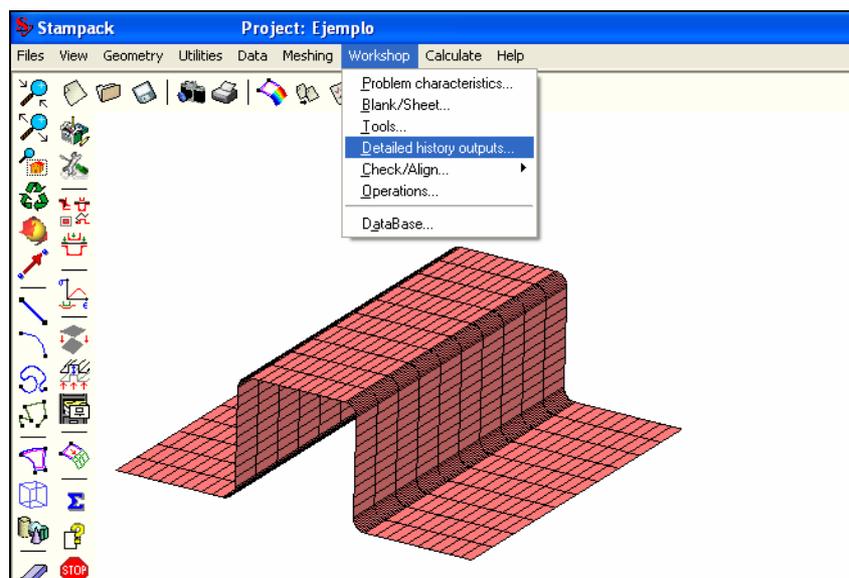


Figura 3.51 Accediendo al historial de variación.

Luego se seleccionan los parámetros deseados; se puede preparar la simulación en vista de sacar el historial de variación para una variable en particular (velocidad, desplazamiento, variación de espesor), a lo largo del proceso.

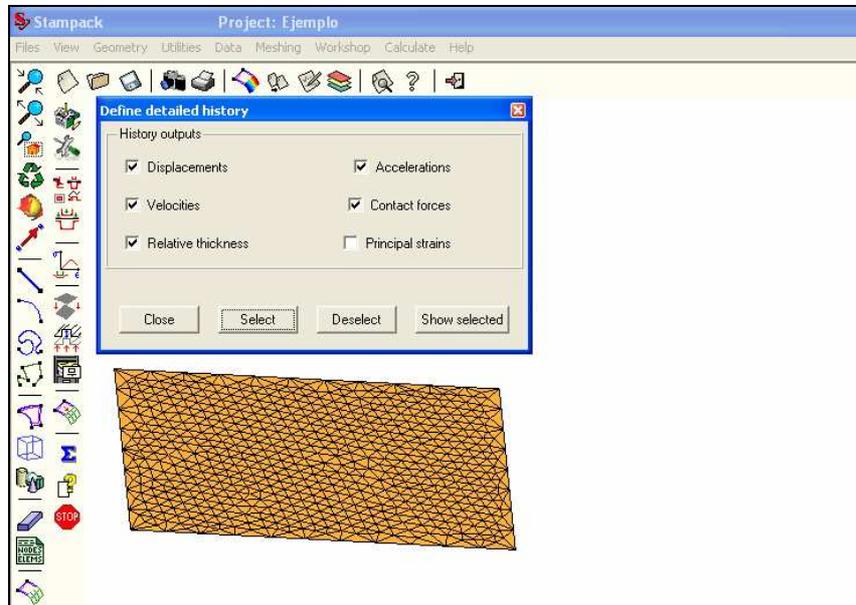


Figura 3.52 Ventana "Define detailed history".

Finalmente se debe seleccionar la zona o los nodos donde se necesita esta información.

### 3.2.1.6 Alineación de herramientas.

Esta operación es útil para ahorrar tiempo de cálculo. La utilización de esta ventana es sencilla. Se define una herramienta de referencia, que por norma general ha de ser la chapa. A continuación se elige la herramienta que se quiere alinear respecto a la de referencia y se debe indicar si está en cota negativa respecto a la herramienta de referencia (abajo), o si está en cota positiva (arriba), así como la dirección. Por ejemplo, para alinear punzón con chapa, se elige chapa como elemento de referencia, punzón como herramienta a alinear, y como está en la cara inferior de la chapa, se elige dirección -z. La distancia es calculada automáticamente por el programa.

Esta operación debe repetirse para todas las herramientas. En caso de equivocación, se puede anular la última acción con la opción "Restore".

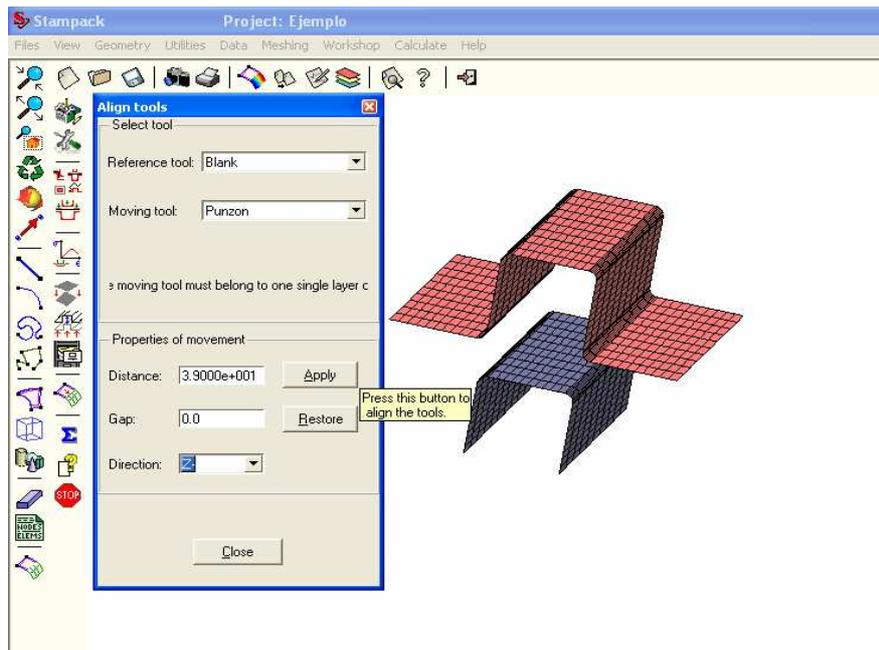


Figura 3.53 Ventana "Align tools".

### 3.2.1.7 Caracterización de los procesos

El menú "Operation" es el que permite caracterizar los procesos a simular.

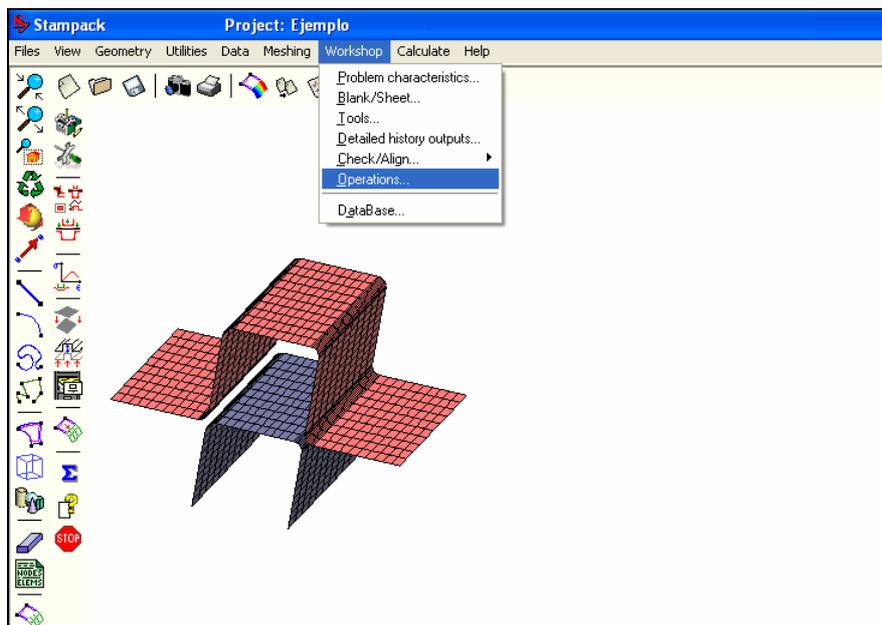


Figura 3.54 Opción "Operations".

El programa ofrece una amplia posibilidad de procesos a modelar. Este ejemplo trata de un estampado (Mechforming). Cada operación consta a su vez de diferentes etapas.

Al abrir el menú “Operation” aparece la ventana de control de operaciones en blanco.

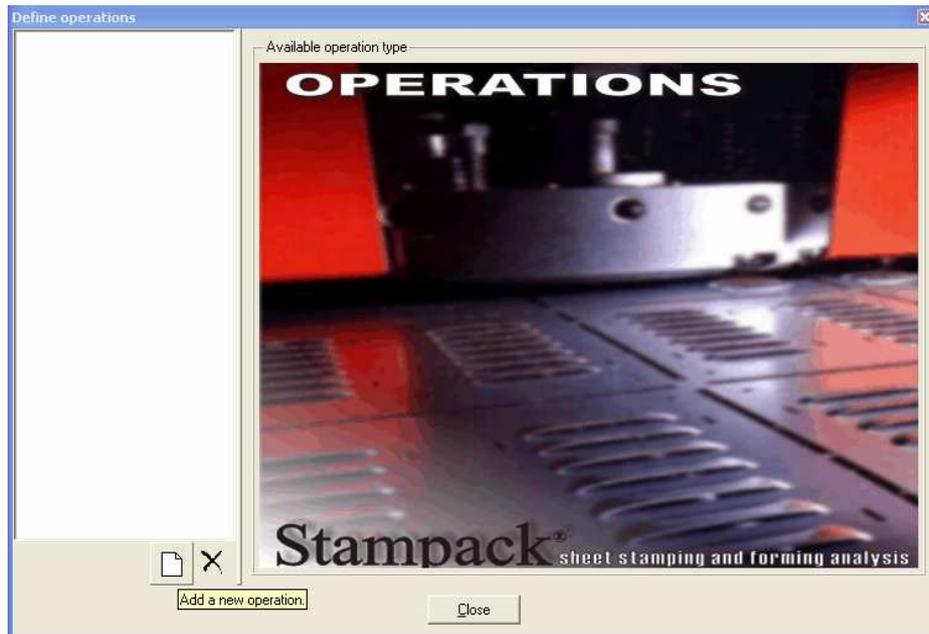


Figura 3.55 Ventana “Define operations”.

Se debe añadir una operación a realizar con la opción “Add a new operation” y aparecerá el menú de operaciones disponibles.



Figura 3.56 Ventana “Add a new operation”.

Se selecciona el tipo de operación y se le da un nombre. En este caso se escoge la operación “Mechforming” que es la que se refiere a Estampado y se

la da un nombre en este caso se escoge el nombre “Estampado”. Una vez creada la operación, se activa el menú que caracteriza este proceso. Seguidamente del menú “Tools”, se seleccionan las herramientas que están presentes en esta operación. Se seleccionan todas las necesarias para este proceso.

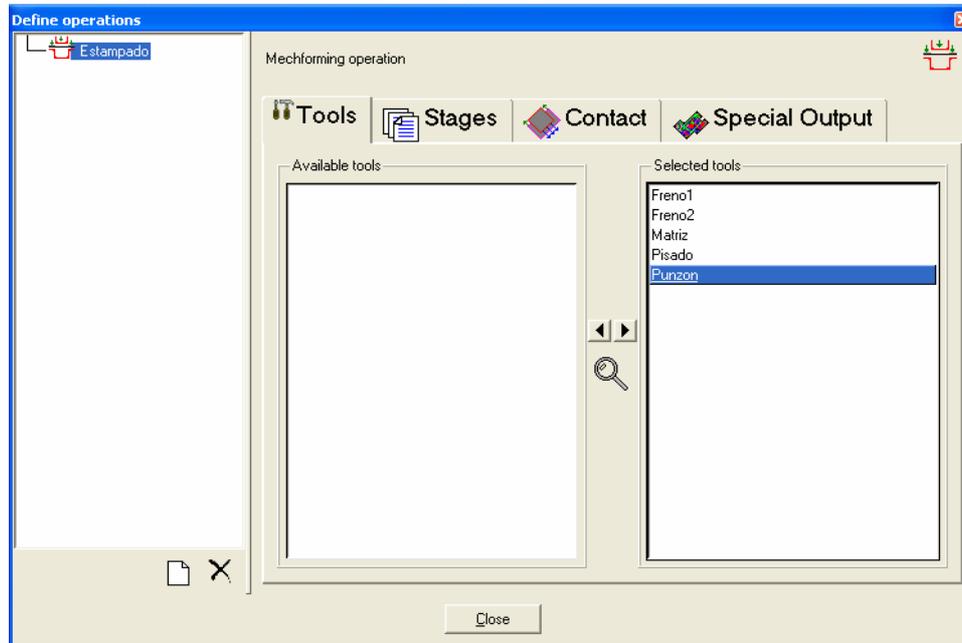


Figura 3.57 Opción “Tools”.

Una vez seleccionadas las herramientas, se debe caracterizar las etapas. Para una operación de estampación, existen tres etapas: Gravedad (Gravity), Pisador (Holding) y Conformado (Forming).

En este ejemplo, se omite la etapa de gravedad puesto que el peso propio de la chapa es insignificante y la gravedad tendría un despreciable efecto sobre la chapa. El menú de gravedad, por defecto está desactivado, como todos los menús de etapas. En este ejemplo no se activará. Si fuera necesario activar esta etapa, se tendría que introducir una serie de parámetros propios del efecto de la gravedad.

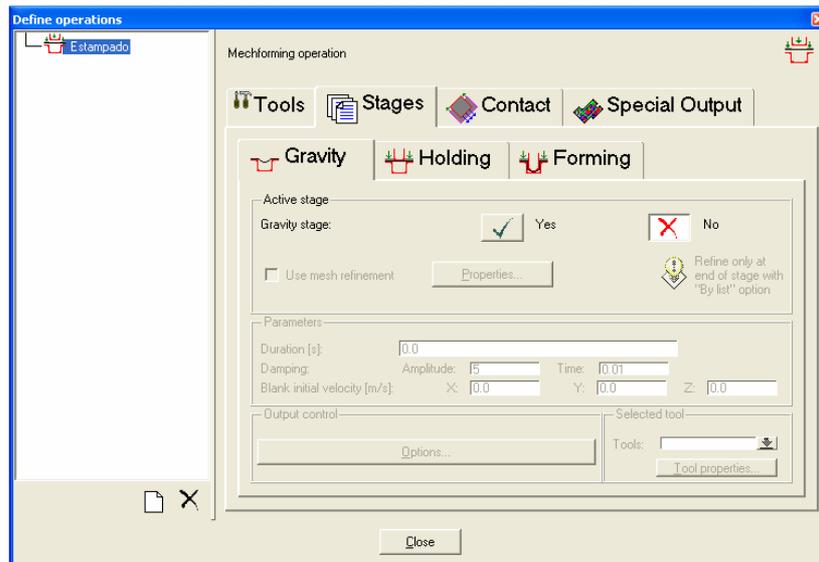


Figura 3.58 Opción "Gravity".

En la etapa siguiente que es Pisador (Holding) que está presente en este proceso, se debe activar siempre que exista pisador. En este caso el pisador es plano y en la alineación de herramientas se ha alineado con la chapa por lo tanto se debe activar la opción "closed" ya que el pisador no tiene que efectuar ninguna carrera de desplazamiento, por lo que únicamente se tiene que especificar la fuerza de pisado.

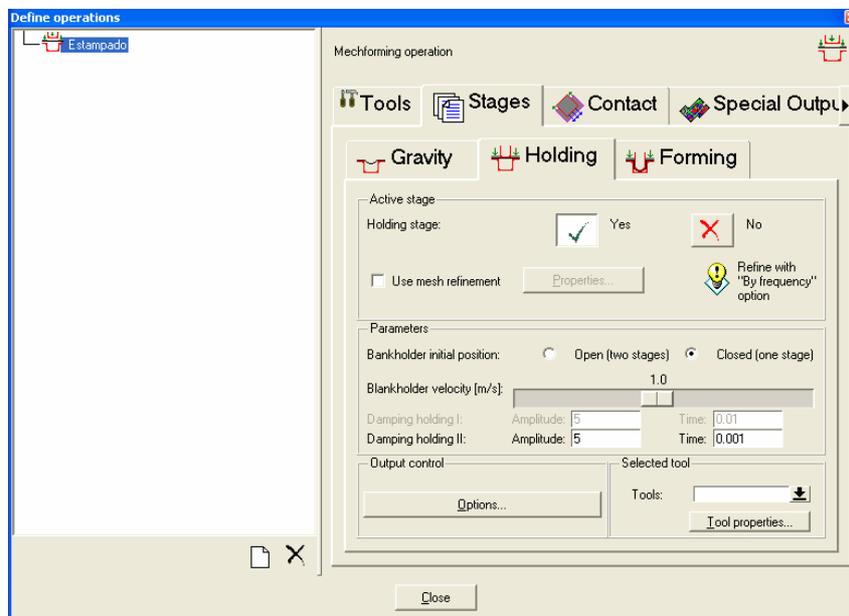


Figura 3.59 Opción "Holding".

Cuando el pisador no es plano, es necesario especificar la velocidad de cierre.

En la etapa de Conformado (Forming), se especifica la velocidad de estampado, y la carrera del punzón.

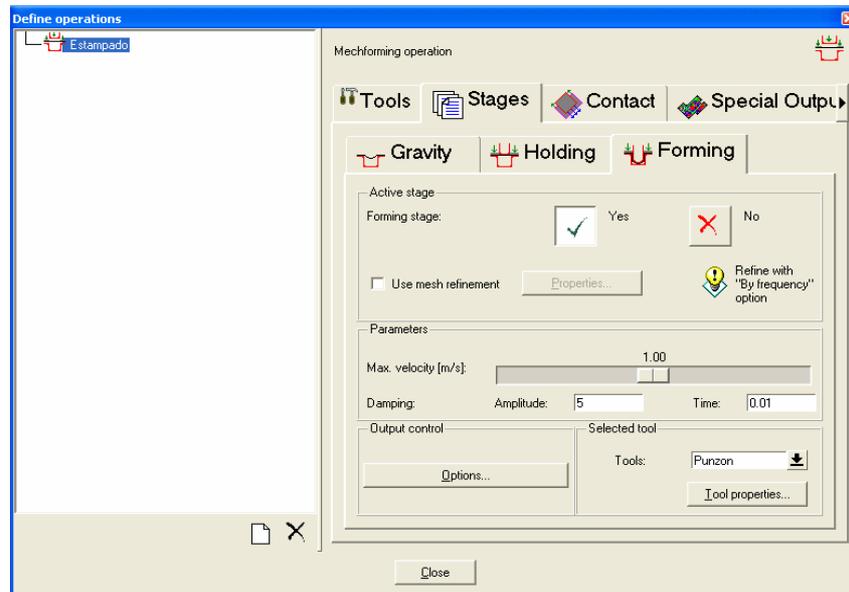


Figura 3.60 Opción "Forming".

En la ventana "Forming", se asigna como velocidad del punzón 1m/s que es un velocidad moderada para el estampado, desde esta ventana se puede acceder a la ventana "Define Tools" seleccionar el punzón "punch" en la sección "Selected tool". Luego hacer clic en "Tool properties". En la ventana "Define tool" que resulta, hacer clic en "Get".

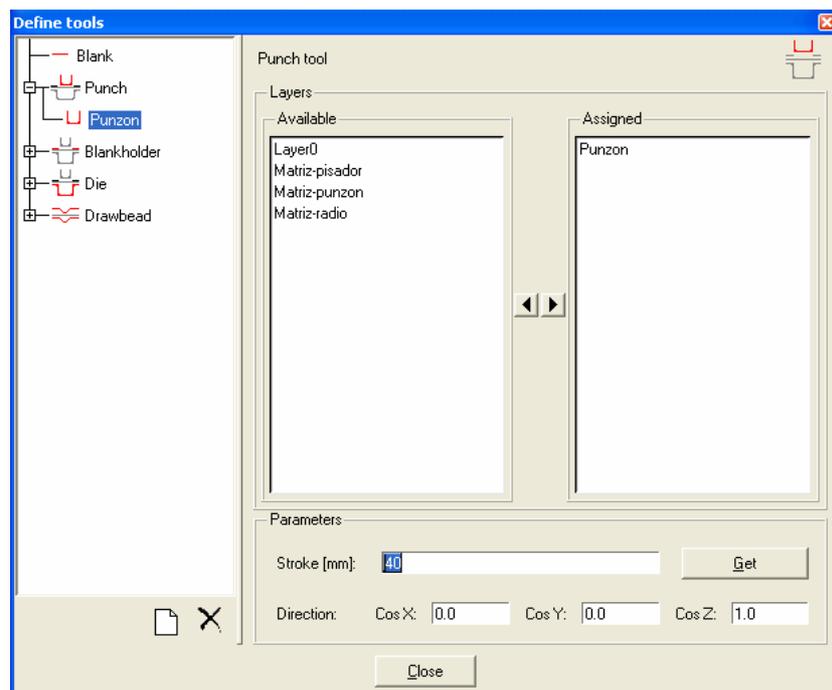


Figura 3.61 Definición del recorrido del punzón.

En la pantalla, se selecciona un nodo sobre la malla de la matriz y luego el correspondiente sobre la malla del punzón. El programa calcula de manera automática la distancia entre los dos puntos y la visualiza en “Stroke”.

El acceso al apartado “Contact” es opcional y solo hace falta en casos particulares. El programa asigna automáticamente todos los parámetros sin la intervención expresa del usuario.

Sin embargo, cuando se trata de simulaciones más complejas o se quiere aplicar el contacto con la chapa por separado en las dos caras (y no en el plano medio, que es la opción por defecto), Stampack ofrece la posibilidad de que el usuario pueda especificar los cálculos que requiere accediendo a este mismo apartado.

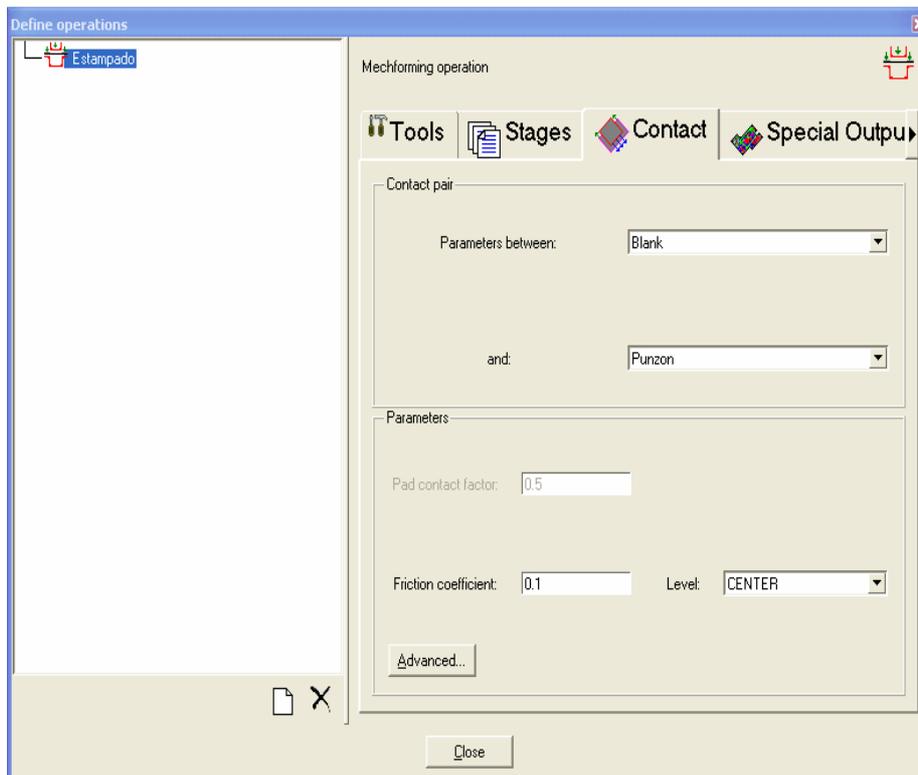


Figura 3.62 Ventana “Contact”.

El coeficiente de fricción por defecto está en 0.1, que es un valor medio en el contacto acero-acero. El usuario puede modificar este valor según las condiciones específicas del caso que simula:

- -superficies bien lubricadas: 0.01 - 0.1
- -superficies lubricadas: 0.1 - 0.15

- o -superficies no lubricadas: 0.2 - 0.35

El nivel (level) “Top” y “Bottom” se refieren únicamente a la chapa (blank). El usuario tiene que seleccionar alguna de estas opciones solo cuando necesite que el contacto no se realice en el plano medio de la chapa (que es por defecto Center) sino que, en una de las dos caras: “Top” para la cara superior y “Bottom” para la cara inferior. La cara superior, y por lo tanto el nivel “Top”, se identifica por ser el lado por donde sale la normal al plano de la chapa. La cara “Bottom” es la parte por donde entra la normal al plano de la chapa.

Si se considera oportuno el usuario puede pedir más información, en el post-proceso, relacionada con el desgaste de las herramientas, marcas en la chapa o la distribución de la presión del pisador. Para conseguir esta información se tiene que entrar en el apartado “Special Output” y seleccionar los resultados que interesan.

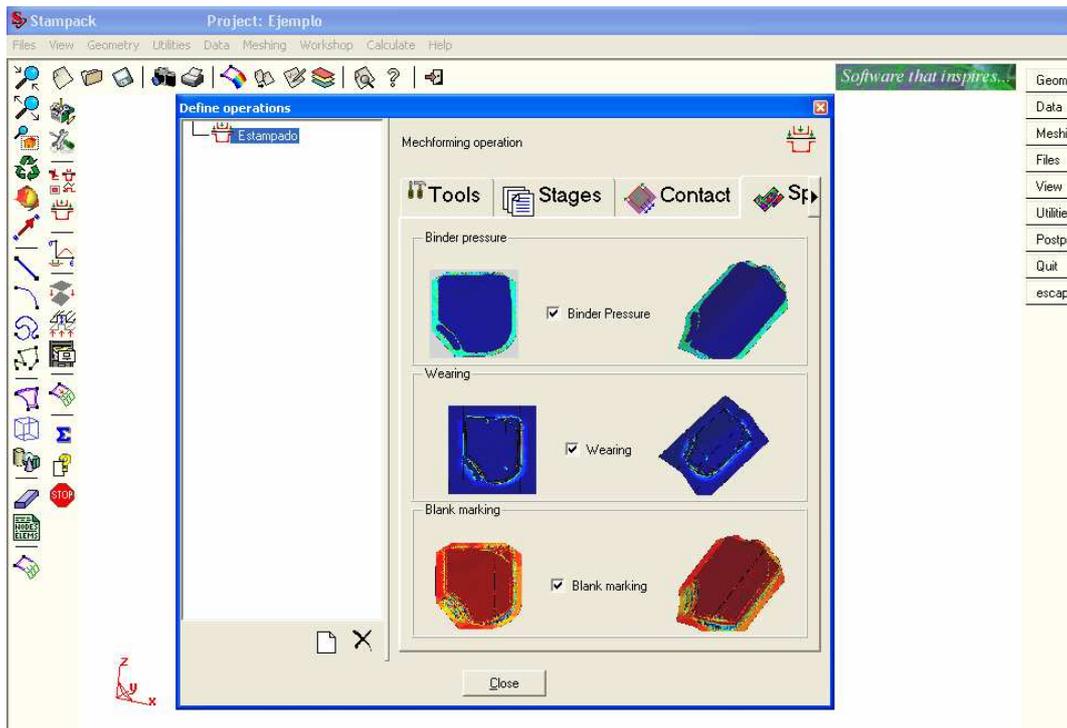


Figura 3.63 Ventana “Special output”.

Con la opción “Binder Pressure” se pide información acerca de la presión que ejerce el pisador y de cómo esta se reparte sobre la chapa, la escala en la que se presentan los resultados es en Newtons por metro cuadrado ( $N/m^2$ ).

Seleccionando la opción “Wearing” se pide información relacionada con las zonas con probabilidad de desgaste de las herramientas como consecuencia del rozamiento con la chapa, los valores de la escala de resultados no cuantifican directamente el desgaste sino que indican una mayor o menor probabilidad que se produzca un desgaste.

Finalmente con “Blank Marking” se pide información acerca de las marcas que podrían aparecer en la chapa como producto del estampado, no obstante, esta variable no puede utilizarse directamente para predecir si aparecerá o no una marca, sino para definir las zonas en la que existe mayor riesgo.

Además de la posibilidad de alinear las herramientas, el usuario puede comprobar de manera rápida si las carreras asignadas a distintas herramientas son o no correctas, antes de empezar el cálculo. Así, se debe seleccionar desde el menú principal la opción: “Workshop>Check/Align>Check”, se puede entonces comprobar la carrera del punzón mediante la opción “Apply”, se abre una ventana donde el usuario tiene que especificar la herramienta, el tipo de movimiento y el identificador (si existe) para que el programa presente de manera automática la descripción de la carrera.

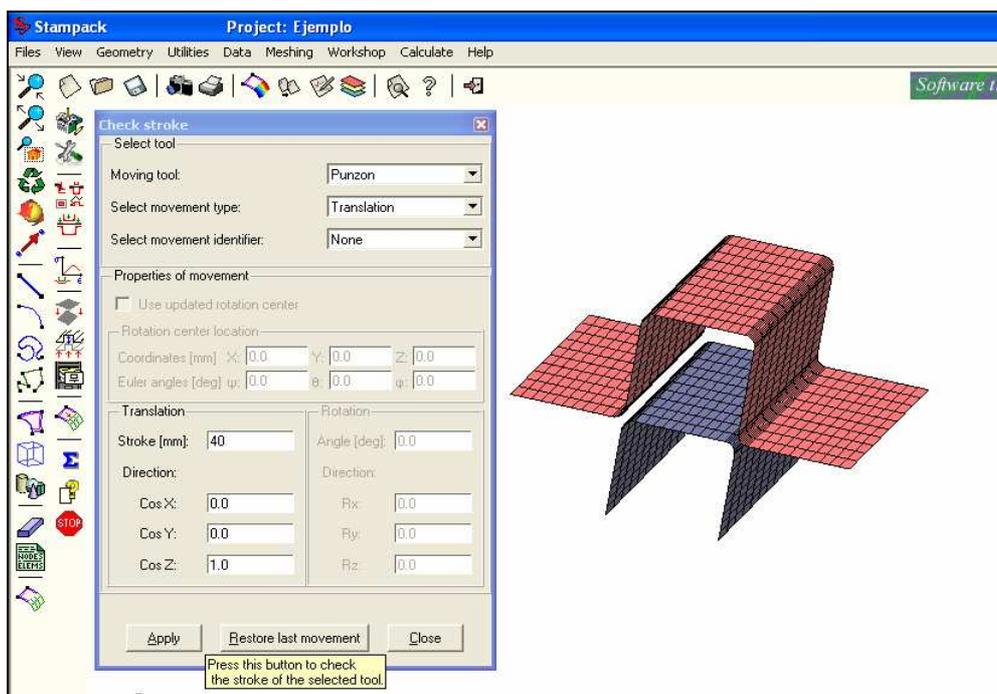


Figura 3.64 Ventana “Check stroke”.

Como se puede ver en la figura 3.64 el punzón ha recorrido su carrera vertical, ingresando en la matriz y prácticamente desapareciendo en esta, lo que indica que se encuentra en la posición final correcta.

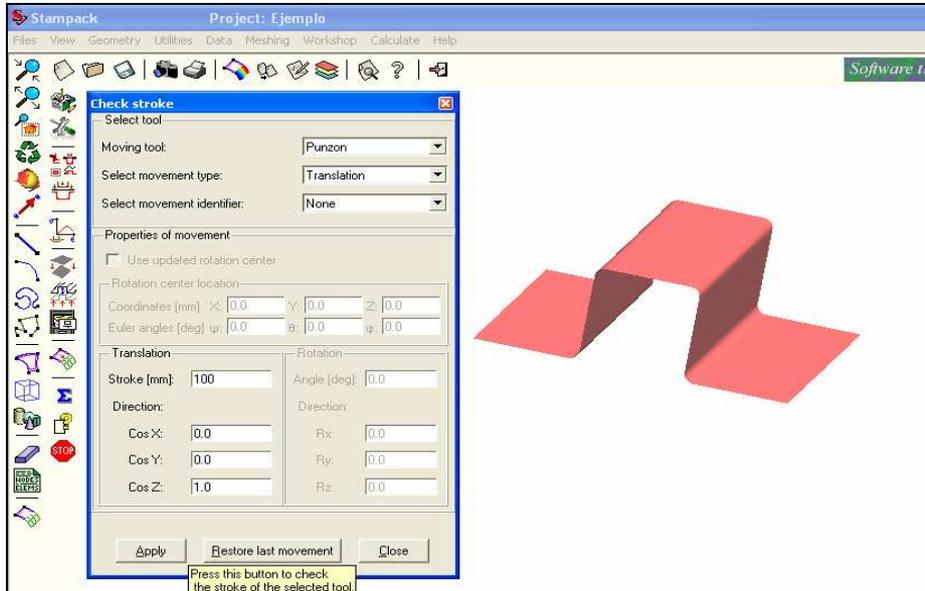


Figura 3.65 Verificación del recorrido del punzón

Para regresar la herramienta a su posición inicial se hace clic en “Restore last movement”.

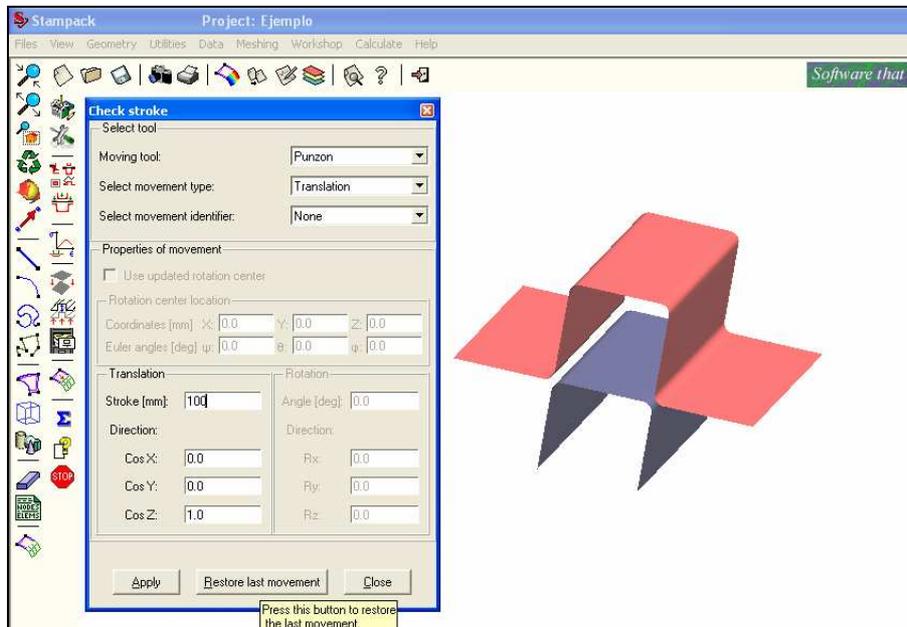


Figura 3.66 Opción “Restore last movement”.

Se debe tomar en cuenta que en la versión actual de Stampack el botón “*Restore last movement*” solo permite restaurar el ultimo movimiento aplicado. Es decir que si el usuario selecciona varias veces la opción “*Apply*”, la herramienta solo podrá recuperar su posición inicial a través del botón “*Restore last movement*” si todos los movimientos han sido idénticos. Si se da el caso de que se ha olvidado los movimientos hechos, la mejor manera de solucionar el problema es de cerrar primero la ventana “*Check stroke*” y luego volver a leer el proyecto en curso, pero sin guardar los cambios. En el caso de que el usuario recuerde la secuencia de todos los movimientos aplicados, antes de salir de la ventana de “*Check stroke*” tiene que recolocar la herramienta en su ubicación original aplicando la secuencia inversa de movimientos. De lo contrario es muy posible olvidar las herramientas ubicadas en posiciones equivocadas.

Una vez caracterizado el problema, ya se puede ejecutar el cálculo.

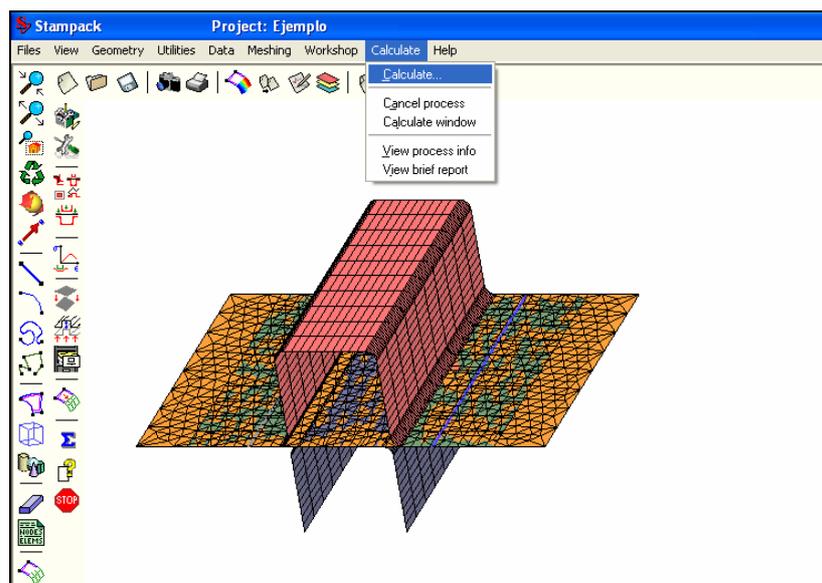


Figura 3.67 Menú “Calculate”.

Se selecciona el intervalo que se quiere calcular. En este caso hay dos etapas, Pisado (Holding) y Conformado (Forming).

Se debe activar la opción “*Acurate mode*” o modo de cálculo Preciso para obtener resultados con la mayor precisión posible. En el caso que se quiera obtener resultados en el menor tiempo posible se deberá escoger la opción “*Fast*” pero con una consecuente pérdida de precisión en los resultados.

Con la opción “Local” se informa al programa que el módulo de cálculo se ejecutará en la misma computadora en la que se está trabajando. Con la opción “Remote” se puede ejecutar el módulo de cálculo en otra computadora mediante una conexión en red. Seguidamente se especifica la primera y la última etapa de cálculo.

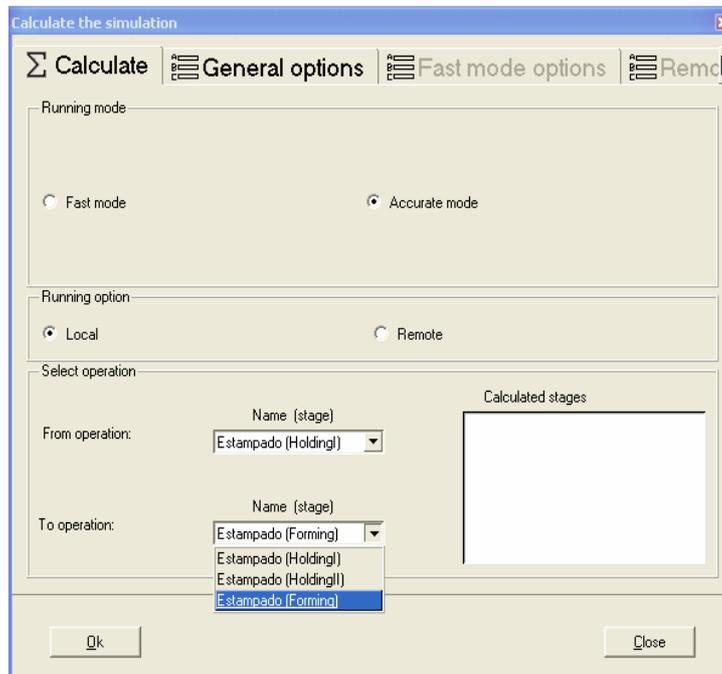


Figura 3.68 Ventana “Calculate”.

Finalmente se puede ejecutar el cálculo con la opción “OK”. Los cálculos se pueden personalizar. Primero se debe seleccionar “General Options” para personalizar los cálculos.

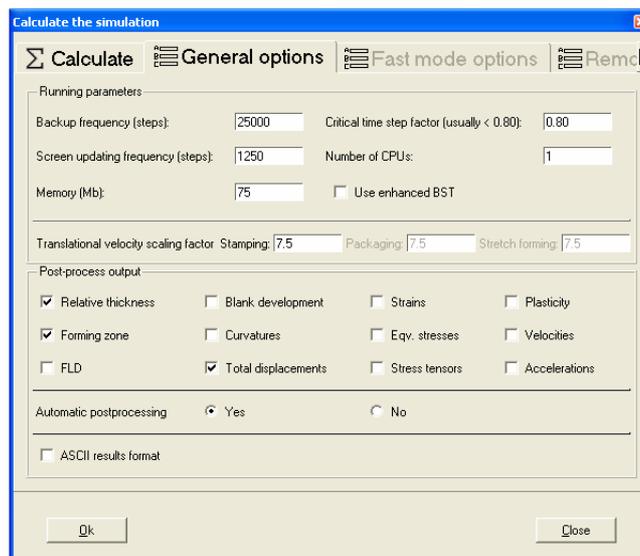


Figura 3.69 Opción “General options”.

Durante los cálculos, aparece una ventana con información sobre las etapas calculadas y el tiempo de cálculo restante.

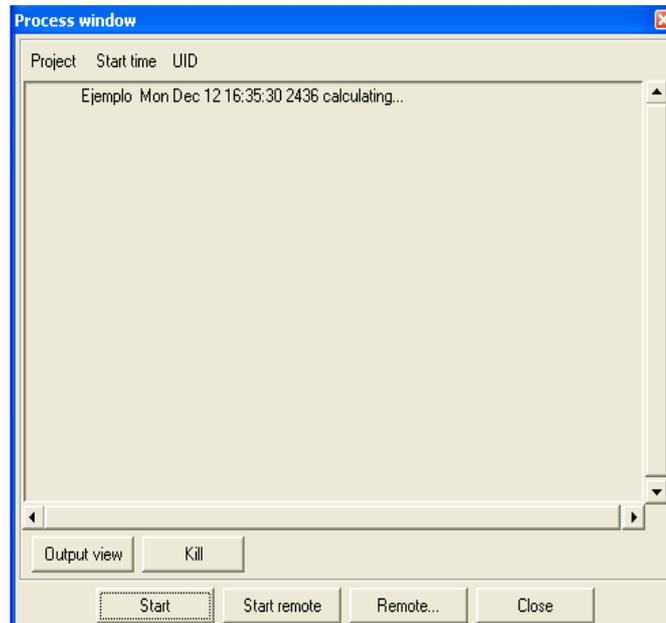


Figura 3.70 Ventana "Process window".

Cuando el proceso termina, una ventana informa sobre el hecho. Durante los cálculos se puede pedir información relacionada con el estado de la simulación. Al seleccionar la opción: "View process info" se abre una ventana con información sobre las etapas calculadas y el tiempo restante para finalizar el cálculo.

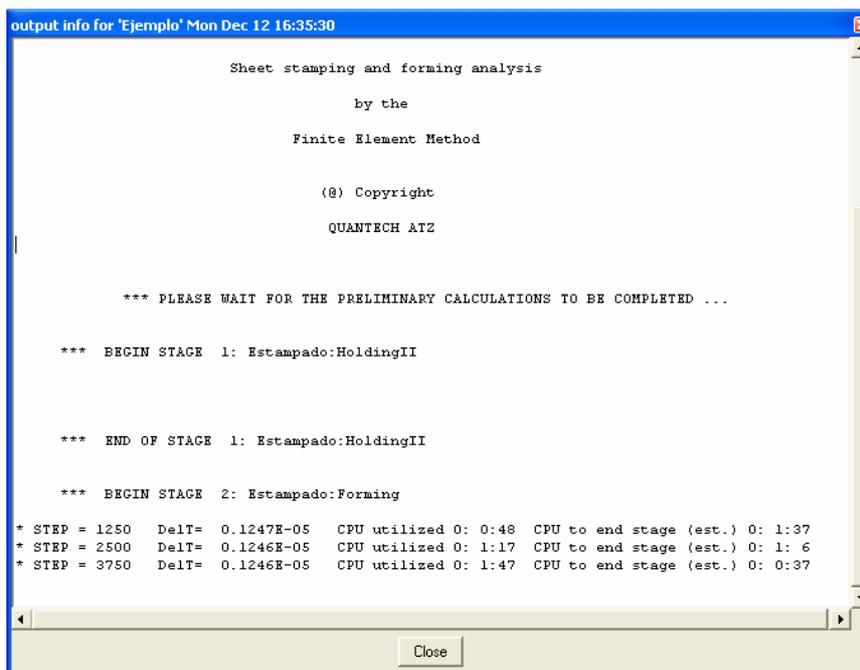


Figura 3.71 Ventana "View process info".

Al seleccionar la opción: “View brief report” se abre una ventana con un breve informe sobre los parámetros de cálculo, las etapas calculadas y la duración de cada una, el número de nodos y elementos, tiempo restante y las posibles incidencias que puede que hayan ocurrido durante el cálculo.

Se pueden detener los cálculos, si así se desea, antes de que estos acaben en el caso en cual se detectan resultados erróneos o si se ha equivocado en los parámetros del proceso.

En el caso que quiera detener el proyecto en curso, se tiene que seleccionar desde el menú principal la opción: “Calculate>Cancel process”. El resultado es la aparición de una ventana en cual se pide la confirmación sobre detener el cálculo. Al seleccionar el usuario la opción “Yes”, Stampack detiene los cálculos e informa el usuario al respecto a través de una nueva ventana.

Si se trata de parar los cálculos de un proyecto distinto del proyecto en curso, el usuario tiene que seleccionar la opción “Calculate>Calculate window”. Como consecuencia se abre una ventana con todos los procesos que tienen cálculos en curso. Dentro de esta ventana, el usuario tiene que seleccionar el proyecto cuyos cálculos quiere parar y luego la opción “Kill”. Se repiten luego los pasos anteriores. Una vez terminados los cálculos una ventana informa sobre el hecho.

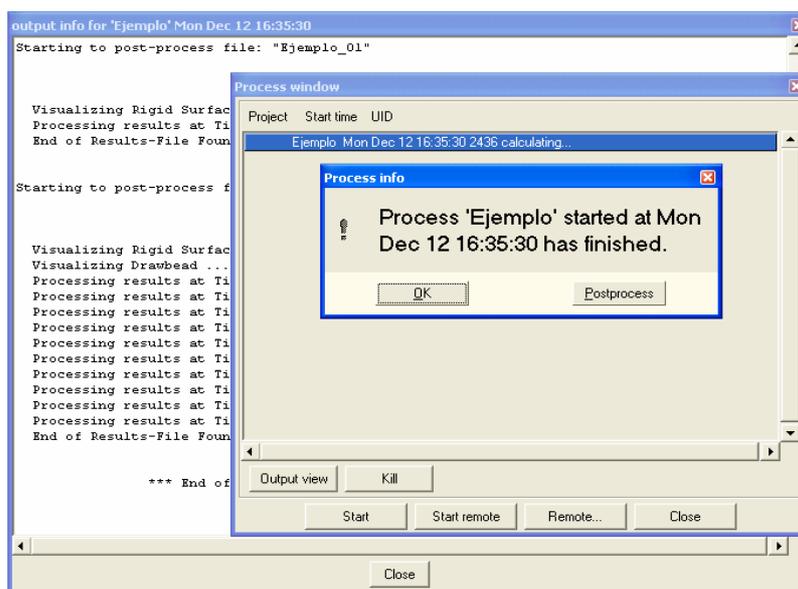


Figura 3.72 Ventana “Process info”.

Finalizada la etapa de cálculo, se puede visualizar los resultados accediendo a las ventanas del post-proceso.

### 3.2.2 POST-PROCESAMIENTO

Los resultados solo son visibles en el post-proceso. Una vez accedido al post-proceso, aparecerá la geometría, pero aún sin resultados.

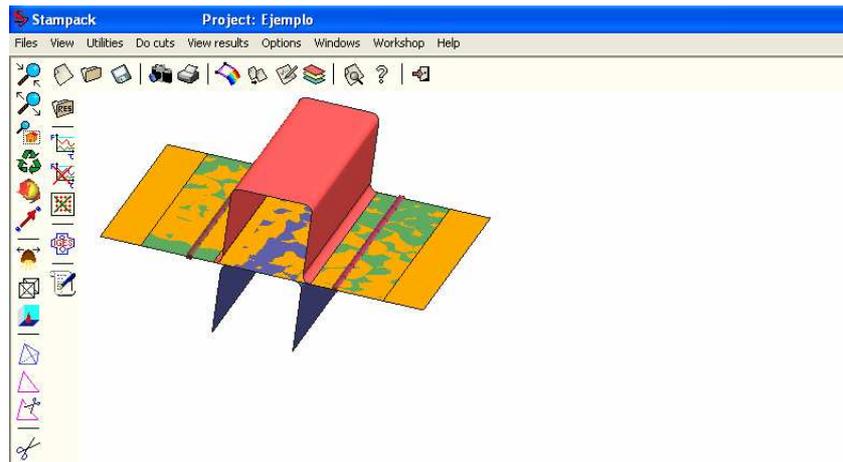


Figura 3.73 Apariencia del modelo antes de cargar los resultados

Para poder visualizar los resultados es necesario haber cargado una etapa de cálculo. Los resultados de cada etapa se visualizan independientemente. Se deben cargar los resultados a partir del menú “Workshop>Load results” de post-proceso.

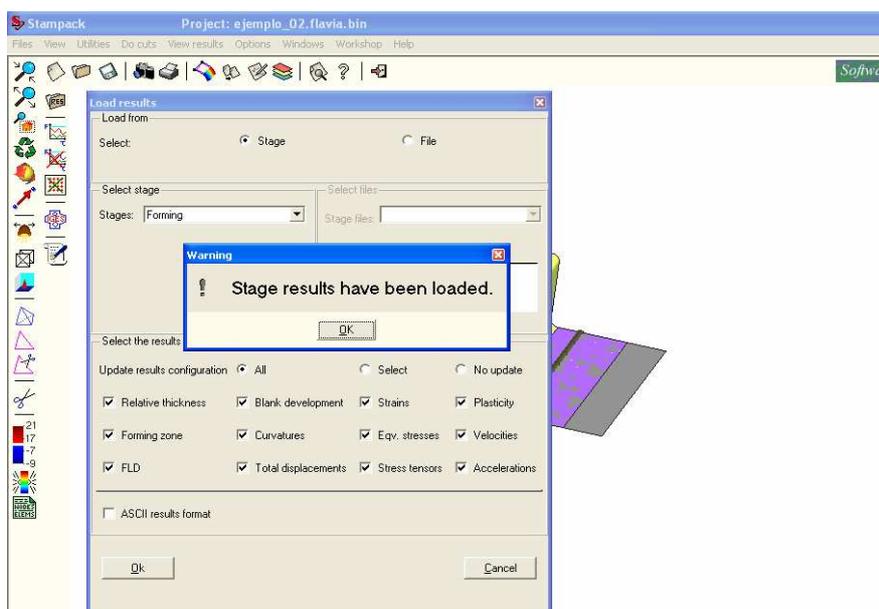


Figura 3.74 Ventana “Load results”.

En la ventana que aparece, seleccionar la etapa que interesa, en este caso “Estampado-Forming” y actualizar o no la lista de resultados que interesan. Como resultado se dispone de la etapa seleccionada cargada en el post-proceso, lista para la visualización de los resultados. Una vez cargado los resultados, se los puede visualizar a través de los diferentes menús del post-proceso. Se accede a las ventanas de resultados. “Workshop>View standars results” y se seleccionan el tipo de resultado que se quiere visualizar.

Accediendo a “Workshop>View standars results>final shape”, se visualiza la pieza en deformada, producto de la estampación

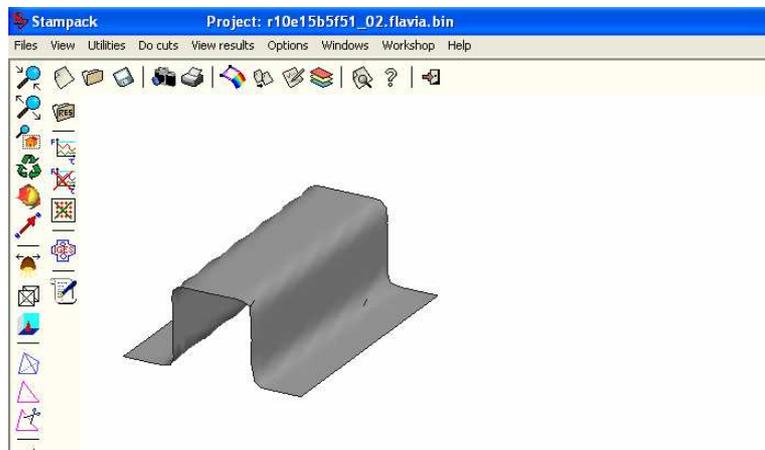


Figura 3.75 “Final Shape”.

Accediendo a “Workshop>View standars results>relative thickness”, se visualiza el mapa de espesores relativos.

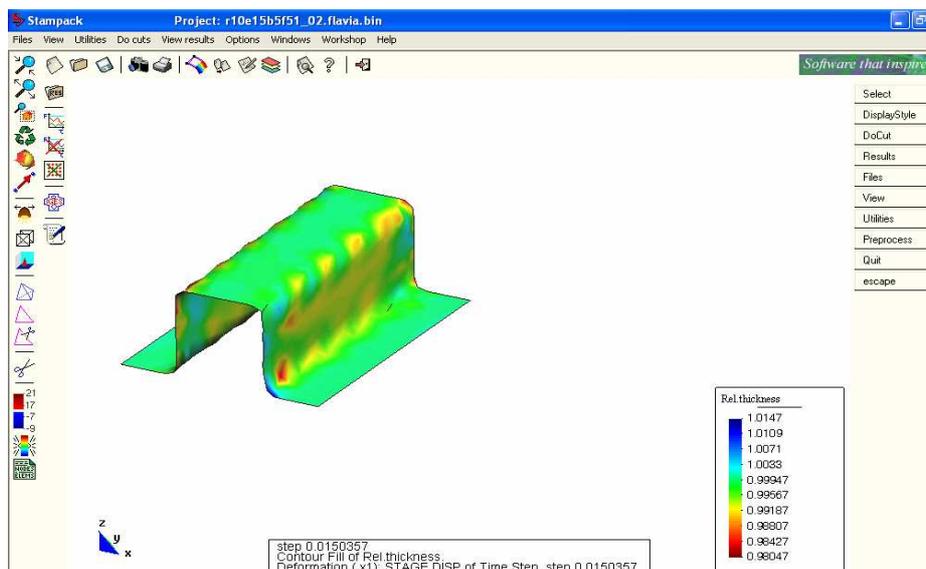


Figura 3.76 “Relative thickness”.

Después de haber cargado la etapa, se puede pasar a visualizar gráficas de variación histórica de las variables en los nodos seleccionados en el preproceso.

En el menú principal “Workshop>Detailed history outputs”, aparece la ventana que pide la información necesaria para elaborar la gráfica.

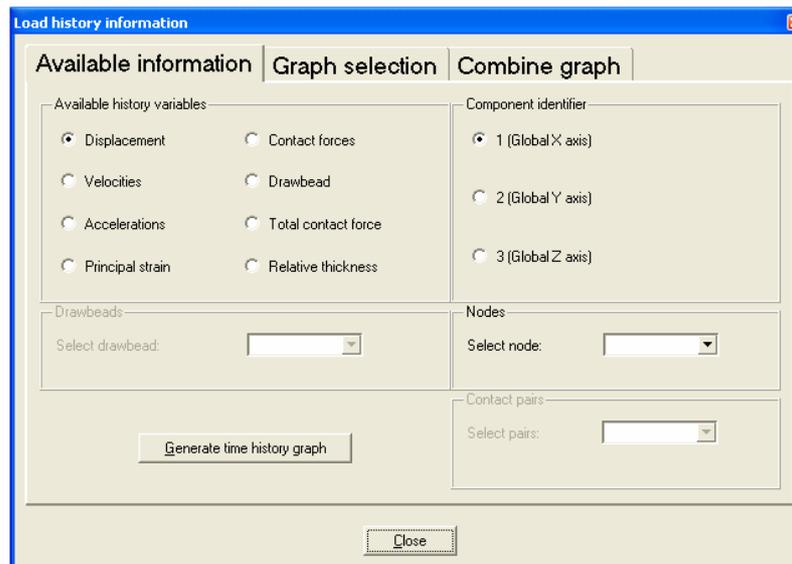


Figura 3.77 Ventana “Load history information”.

En la sección “*Available information*”, se selecciona la variable deseada, la componente y el nodo donde se ha pedido la variación.

En el caso de la variación de la fuerza total de contacto (Total contact force), en lugar de seleccionar un nodo, se selecciona el par de contacto que interesa. Seguidamente se selecciona la opción “*Generate time history graph*” y se pasa al siguiente submenú “*Graph selection*”.

La información que se requiere para generar el gráfico que fue ingresada en la sección “*Available information*” está disponible ahora en un archivo y se puede visualizar mediante la opción “View graph”.

El nombre del archivo se genera automáticamente por Stampack y está compuesto por lo siguiente:

- el nombre del proyecto;

- el nombre de la etapa;
- identificador de la variable (D; desplazamiento, I; deformación principal, K; espesor relativo, etc.)
- etiqueta del nodo;
- componente

El procedimiento se puede repetir, para el resto de variables.

Las graficas se pueden combinar, de manera que se pueden conseguir variaciones de un parámetro en función de otro. Primero se accede al submenú “*Combine graph*”. En esta se tiene que indicar las graficas que se quieren combinar. Luego hacer clic en “Combine”. Con esto un tercer archivo se genera, con el nombre compuesto por los dos nombres de los archivos anteriores. Para visualizar la nueva gráfica se escoge la opción “View graph”.

### 3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez obtenidos los resultados del problema de estampado, se procede a realizar un análisis de los mismos ya que estos vienen dados por escalas, y la correcta interpretación de los mismos es el éxito de una simulación. Se puede acceder a estos resultados mediante la opción “View results” del menú “Workshop” en el post-proceso.

#### 3.3.1 INTERPRETACIÓN DE UNIDADES Y ESCALAS DE RESULTADOS.

##### 3.3.1.1 Forma Final

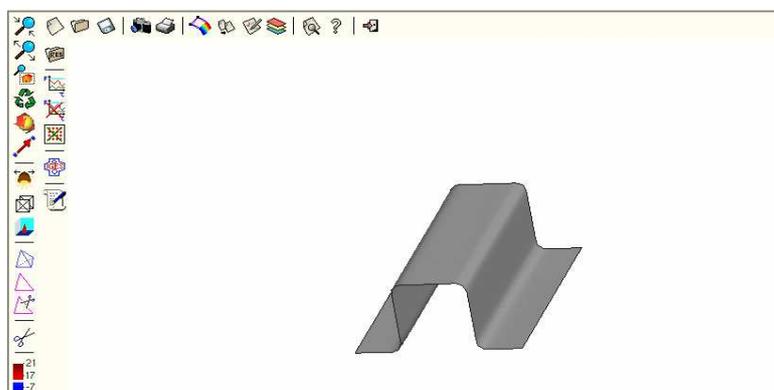


Figura 3.78 Forma Final.

Primeramente se debe hacer una revisión de la forma de la pieza, a simple vista se puede apreciar que la forma que adquirió la chapa es muy similar a la forma de la matriz, que es justamente lo que se esperaba.

### 3.3.1.2 Desplazamientos Totales

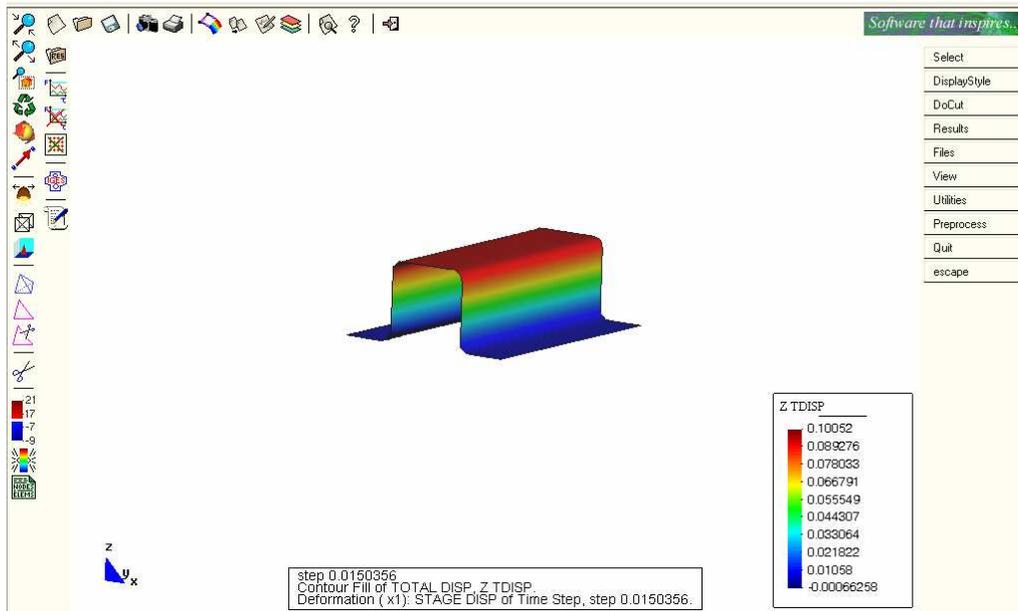


Figura 3.79 Desplazamiento Total.

La figura 3.79, representa los desplazamientos totales, se debe confirmar si los mismos están dentro de los rangos indicados. Como se puede ver los desplazamientos a lo largo del eje Z están dentro del rango de 0 a 100mm y se representan mediante una escala de colores y sus valores numéricos correspondientes, se puede observar que existen ligeras desviaciones de -0.66258mm en la parte inferior y 0,52mm en la parte superior, debido a la interacción chapa-herramientas, y a que la representación por medio del mallado no es completamente exacta en relación a la forma real, pero estas desviaciones son despreciables en relación a la geometría de la pieza.

### 3.3.1.3 Espesor Relativo

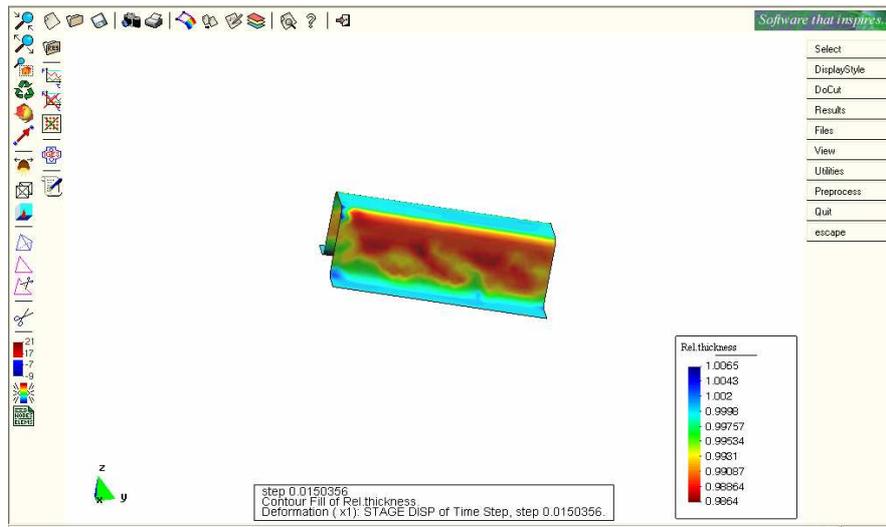


Figura 3.80 Espesor Relativo.

La figura 3.80 representa los resultados de variación de espesor relativos al espesor original de la chapa que se muestran en una escala cuyo valor de referencia es 1, así las zonas con valores mayores a 1 indican un incremento de espesor y las zonas con valores menores a 1 indican una reducción del espesor. Como se puede ver las zonas más afectadas son las paredes laterales del canal debido a que estas están sometidas al mayor cambio de forma por la curvatura de la matriz y por el mayor tiempo de interacción Matriz-placa-punzón.

### 3.3.1.4 Deformación Principal Mayor

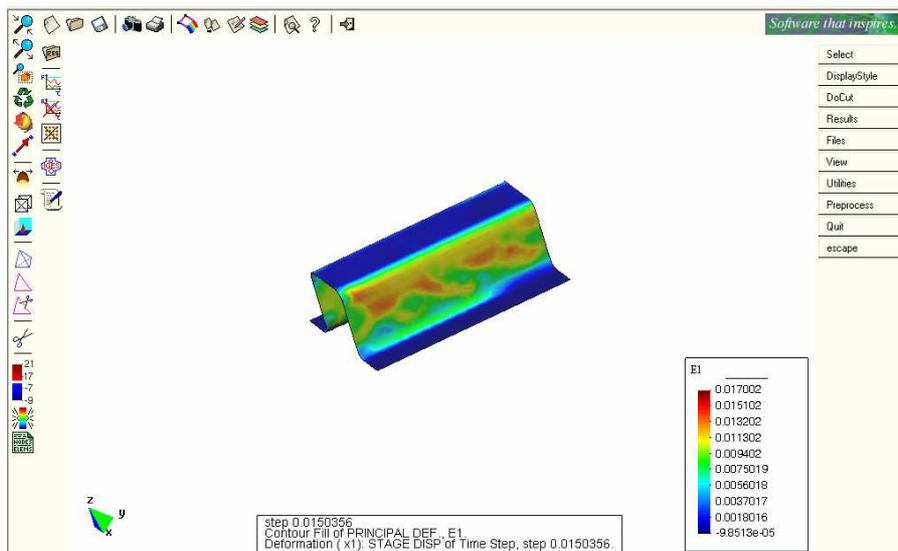


Figura 3.81 Mayor deformación principal.

La figura 3.81 presenta los valores de la mayor deformación principal en el plano de la chapa, estos valores son adimensionales ya que por definición son una relación entre las longitudes iniciales y finales.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) \quad (3.1)$$

Donde:

$\varepsilon$  es la deformación;

$l_o$  es la longitud inicial, y;

$l$  es la longitud final.

Se observa que las mayores deformaciones se generan en las paredes laterales con un valor máximo de 0.017002 el mismo que se encuentra en el inicio de la zona plástica y lejos de la zona de rotura, según el diagrama esfuerzo deformación para este material (Grafico 4.1), lo cual garantiza que el material no falla. Las zonas de color azul presentan las menores deformaciones debido a que no sufren cambios de forma así sus valores de deformación son despreciables.

### 3.3.1.5 Mapa FLD

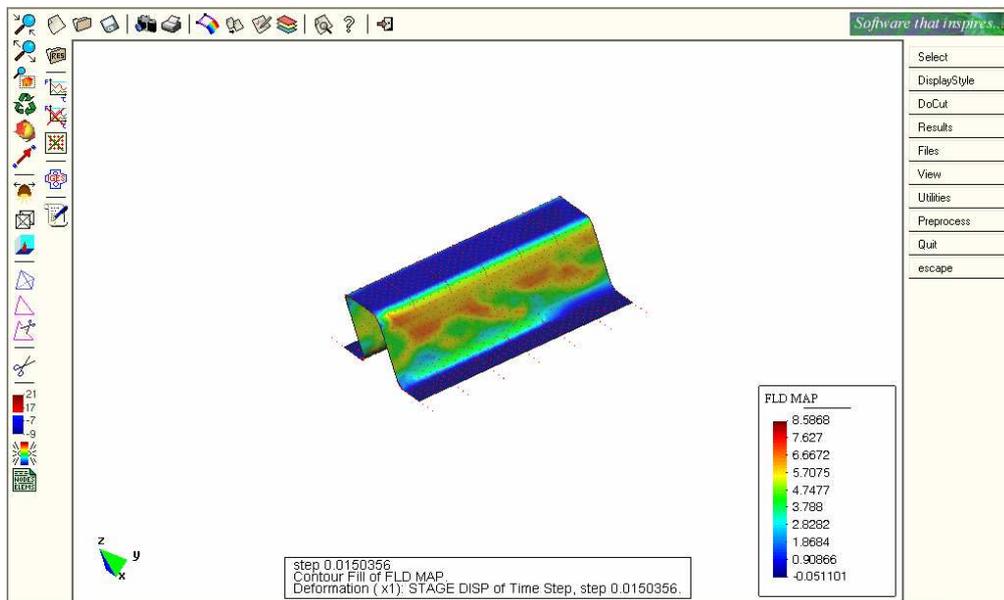


Figura 3.82 Mapa FLD.

La figura 3.82, representa el mapa del coeficiente FLD (Forming Limit Diagram). Este parámetro adimensional indica si el estado de deformación de un punto en particular es crítico, es decir, con una alta probabilidad de rotura de acuerdo a la curva FLC (Forming Limit Curve). “Este parámetro está representado como un porcentaje de probabilidad: un valor sobre 100 indica probable ruptura, y un valor bajo 100 indica que el límite definido por la curva FLC no ha sido alcanzado.”<sup>10</sup> Como se puede observar el valor máximo es de 8.5868 y se encuentra ubicado en las paredes laterales del canal; este valor está muy por debajo del valor crítico (100) por lo que se concluye que el material no presentará fallas.

### 3.3.1.6 Esfuerzo de Von Mises (superficie superior)

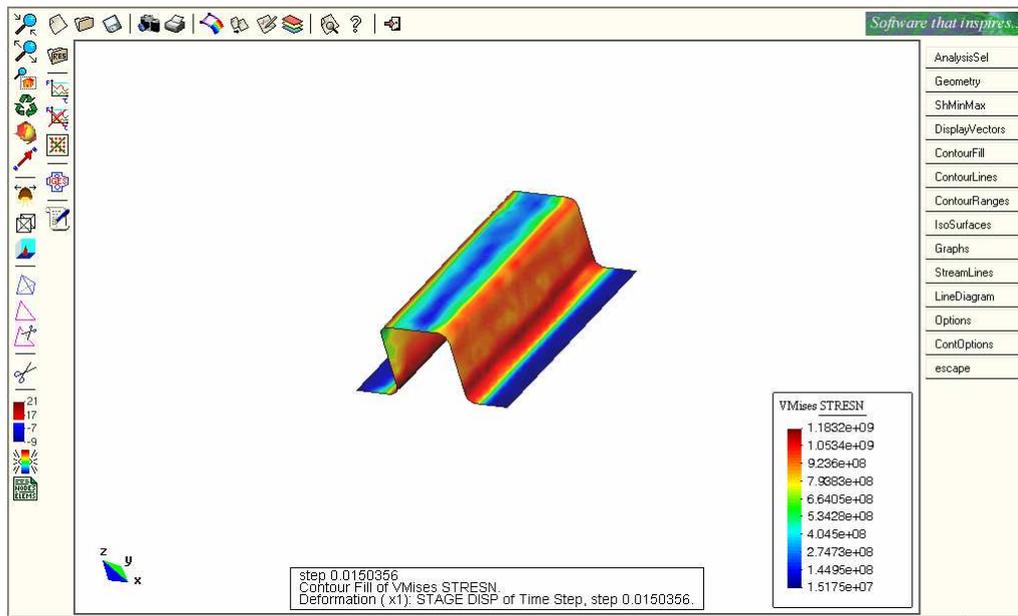


Figura 3.83 Esfuerzo de Von Mises.

La figura 3.83, representa el esfuerzo equivalente según la teoría de Von Mises en la capa superior del canal. Los resultados vienen dados en pascales así el color rojo representa las zonas que se encuentran con la mayor sollicitación de carga, mientras que el color azul indica las zonas donde el material no está cargado. Como se observa el máximo valor 1183.2 MPa no excede del valor máximo de rotura de 1430.7 MPa, por lo que se concluye que el material no fallará según esta teoría.

10. FUENTE: Stampack Sheet Stamping and Forming Analysis, Quantech, Barcelona, 2003

### 3.3.1.7 Esfuerzo de Von Mises (superficie inferior)

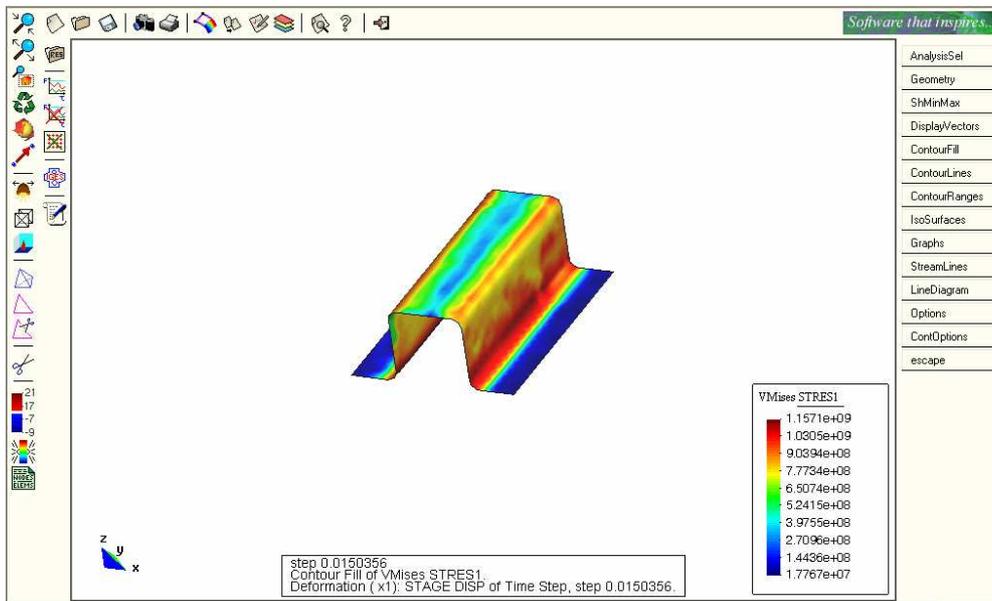


Figura 3.84 Esfuerzo de Von Mises.

La figura 3.84, representa el esfuerzo equivalente según la teoría de Von Mises en la capa inferior del canal. La interpretación de estos resultados es similar que en el caso anterior, debido a que la tensión equivalente no distingue entre cargas a tracción y compresión. Como se observa el máximo valor 1157.2 MPa no excede del valor máximo de rotura de 1430.7 MPa, por lo que se concluye que el material no fallará según esta teoría.

### 3.3.1.8 Calidad de Conformado

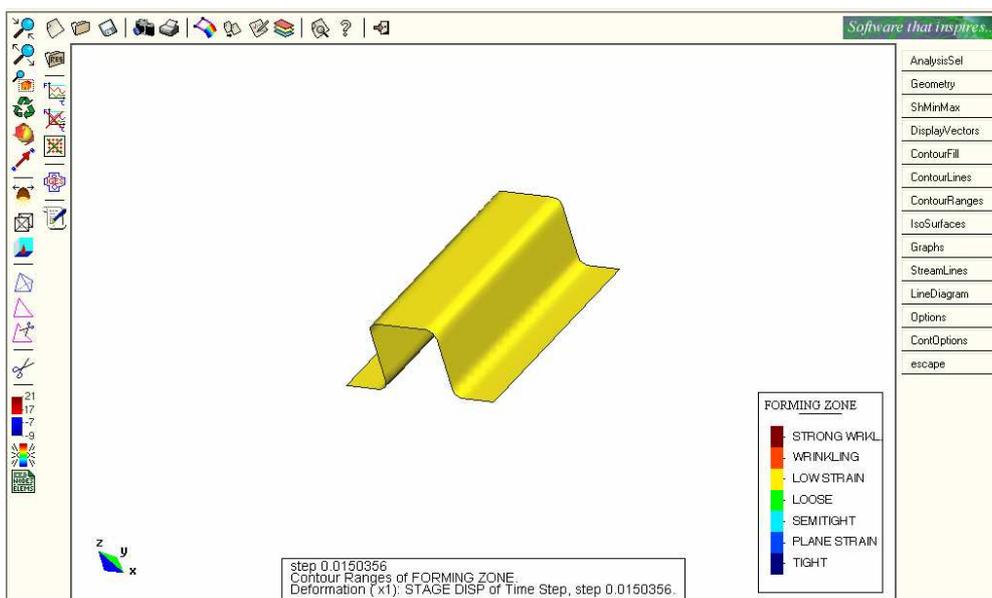


Figura 3.85 Calidad de conformado.

La figura 3.85, representa la calidad de conformado es decir la calidad del estado de las deformaciones. “Este diagrama permite identificar las zonas que tienden estar fuertemente estiradas (Tight), las que tienen tendencia a formar arrugas (Wrinkling) o fuertes arrugas (Strong Wrinkling) y las que apenas sufren deformaciones (Low Strain). En las restantes zonas (Loose, Semitight y Plane Strain) la chapa tiende a estar estirada en una dirección y comprimida (Semitight) o sin deformación en la otra dirección (Plane Strain)” <sup>11</sup>. Así en este ejemplo la chapa tiene una calidad de conformado “Low Strain”, es decir apenas sufre deformaciones, lo cual confirma los resultados anteriores.

### 3.3.1.9 Zonas de Seguridad

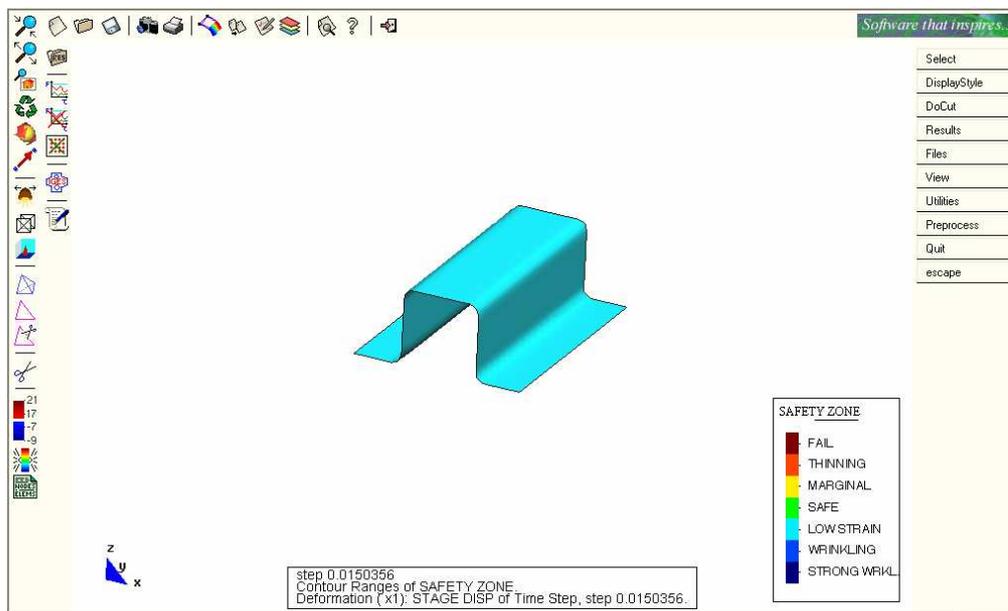


Figura 3.86 Zonas Seguras.

La figura 3.86 al igual que la ventana anterior (Forming Zones) indica las zonas donde se pueden presentar posibles problemas en base al diagrama FLD. Los problemas que se pueden presentar son: “Fail” cuando se supera el límite de la curva FLC del material, “Marginal” cuando se encuentra muy cerca de la curva FLC, “Wrinkling” cuando existe la posibilidad de arrugas debido al estado de deformaciones del material, “Low Strain” si el material presenta bajas deformaciones. Además se incluye una región denominada “Thinning”, la cual representa las zonas que han sufrido un adelgazamiento severo considerado como inadmisibles (por encima del 20%), a pesar de no ser representado por la

11. FUENTE: Stampack Sheet Stamping and Forming Analysis, Quantech, Barcelona, 2003

curva FLC, y finalmente “Safe” que representa las zonas en donde el material no presenta problemas.

Como se puede observar el resultado indica un estado de baja deformación (Low Strain) en todo el material, lo que garantiza la ausencia de problemas. De esta manera se confirma, mediante esta información, los resultados de la ventana “Forming Zone”.

### 3.3.1.10 Marcas en la chapa

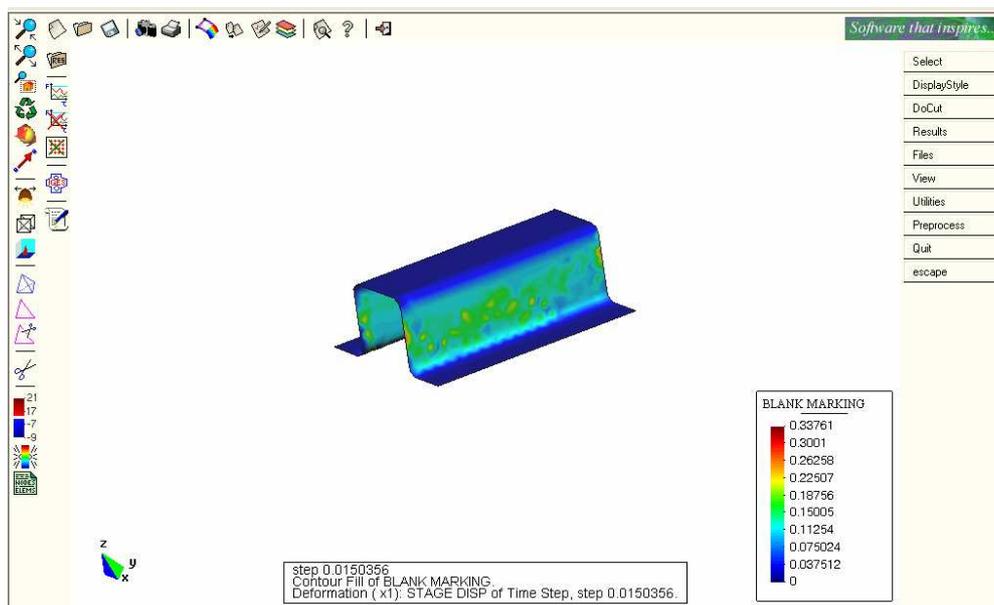


Figura 3.87 Marcas en la chapa.

La figura 3.87 representa las zonas de posibles marcas (Blank Marking) debido al rozamiento entre las herramientas y la chapa. Sin embargo esta variable no predice la presencia de marcas, sino las zonas donde es mayor el riesgo de presencia de estas.

### 3.3.1.11 Desgaste de herramientas

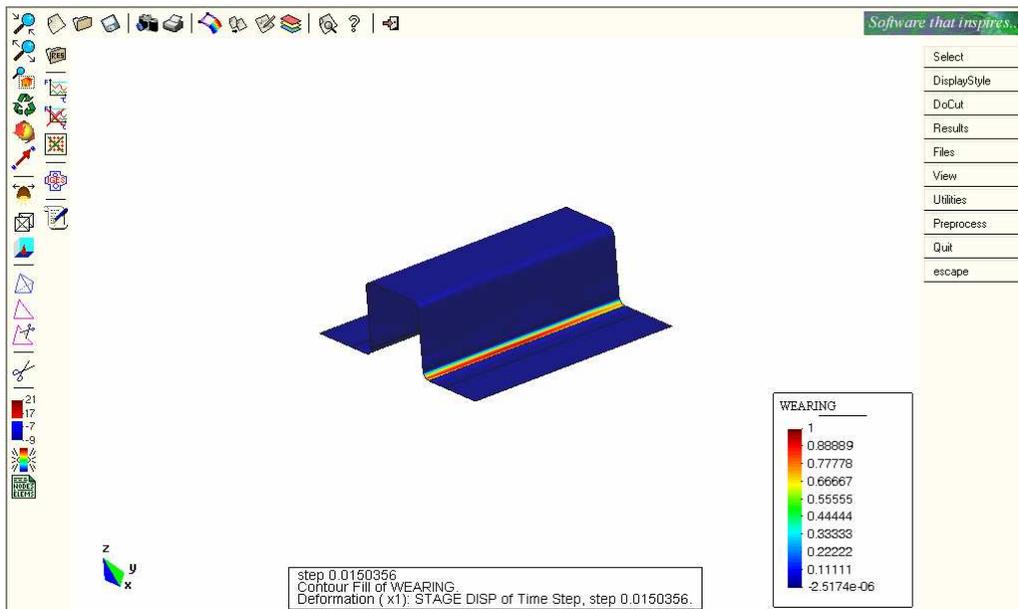


Figura 3.88 Desgaste de Herramientas.

La figura 3.88 representa el desgaste de las herramientas, como consecuencia también del rozamiento entre estas y la chapa.

### 3.3.1.12 Efecto de los frenos

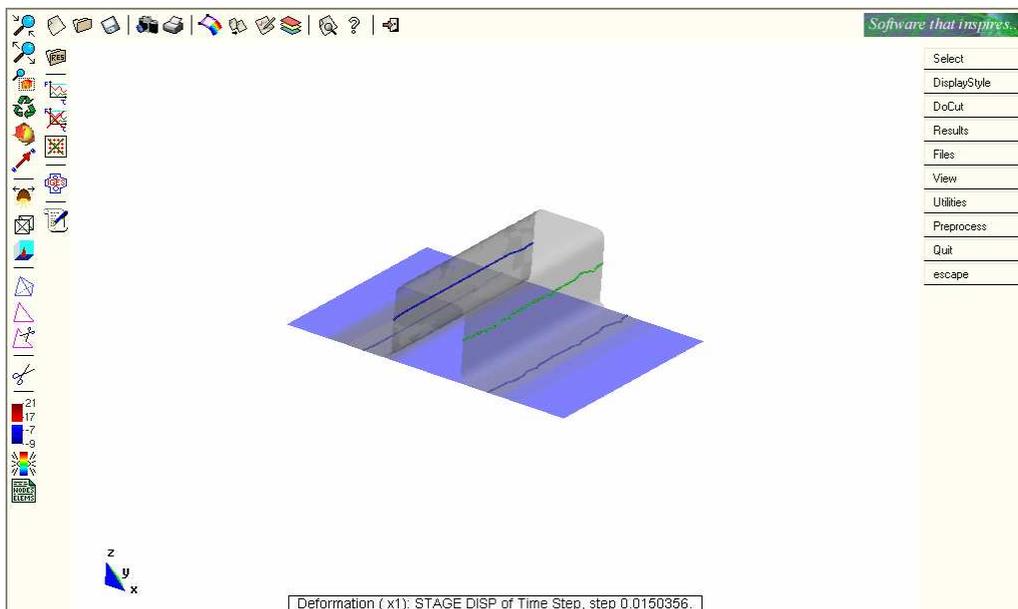


Figura 3.89 Simulación de frenos.

La figura 3.89 representa el efecto de los frenos sobre la chapa (drawbead effect). Aquí se presenta la posición final de la línea en la que se encontraban originalmente los frenos sobre la chapa, sin ninguna otra herramienta visible.

### 3.3.1.13 Animación

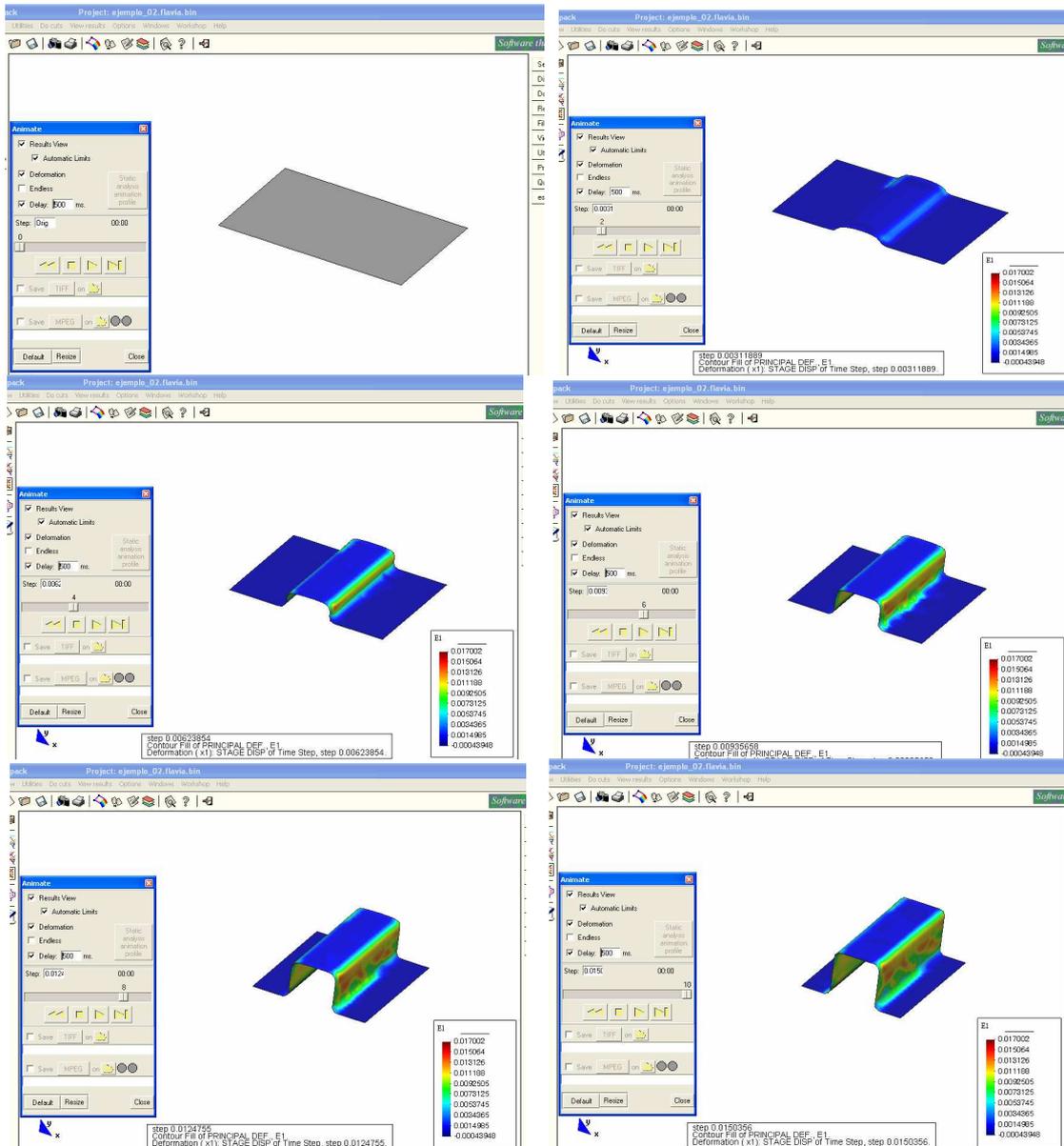


Figura 3.90 Secuencia de animación.

Las 6 figuras anteriores, muestran una secuencia de animación, en este caso en particular, de la deformación principal. Esta opción permite observar paso a paso, el conformado del material, así como el estado de deformación en cada uno de estos pasos. Se puede utilizar la animación para observar el desarrollo y evolución de cualquier resultado (espesor, velocidad, esfuerzos, forma final, etc).

### 3.3.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE CURVAS OBTENIDAS.

Una de las características de este programa es que permite visualizar los resultados mediante curvas en función del tiempo de conformado. Esta opción es importante para conocer el comportamiento de una sola variable durante todo el proceso de conformado ya que facilita el análisis en las zonas en las que se requiere mayor información y de esta manera obtener las conclusiones necesarias para la toma de decisiones en el diseño. Otra característica principal es que se puede realizar combinaciones entre estas curvas, las mismas que pueden ser de fundamental importancia para la optimización de procesos.

Para el análisis se han tomado dos zonas en particular; la primera que corresponde a la parte superior del canal del cual se ha escogido el nodo 1487, y la segunda correspondiente a la parte lateral representada por el nodo 367.

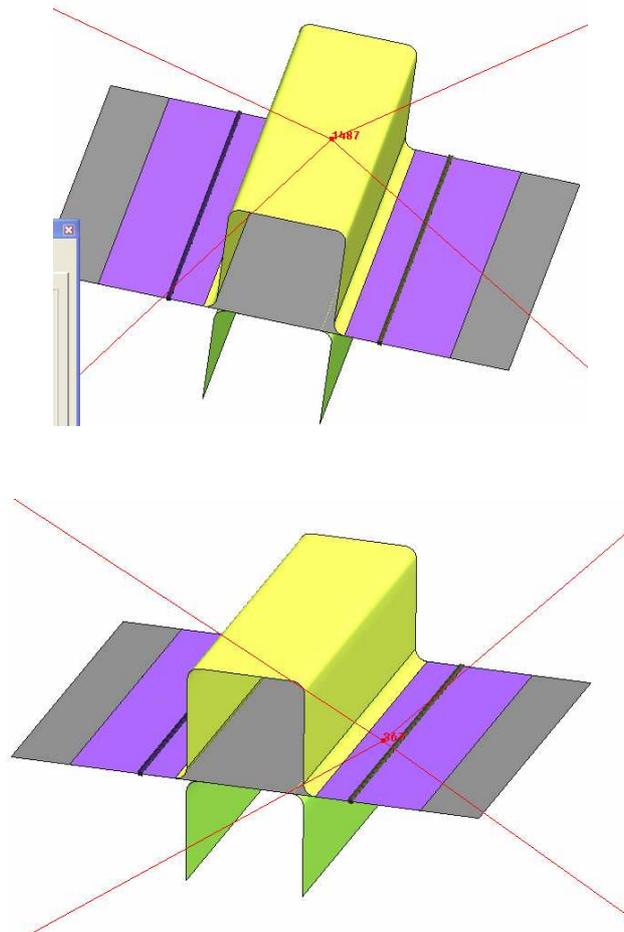


Figura 3.91 Ubicación de los nodos 1487 y 367.

Los parámetros que se van a analizar mediante curvas en función del tiempo son: Desplazamiento, Espesor Relativo y Deformación Principal. Además se presentan varias curvas combinadas de estos parámetros.

### 3.3.2.1 Curvas Históricas

#### Desplazamiento

#### Nodo 1487

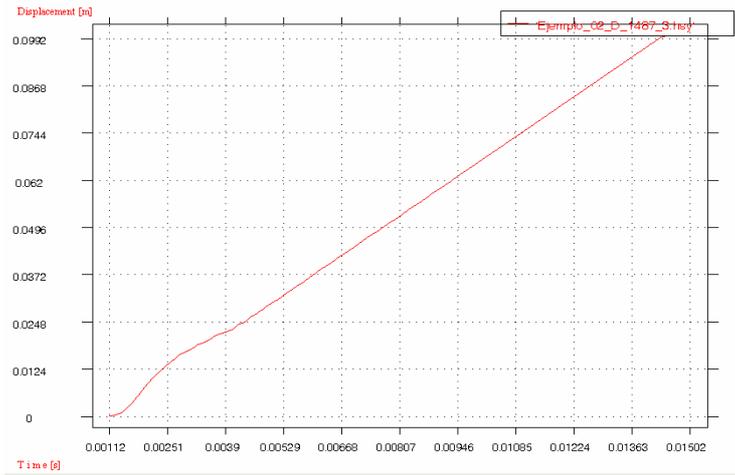


Figura 3.92 Curva Desplazamiento vs. Tiempo.

La figura 3.92 muestra el desplazamiento en el eje Z, se puede observar que la variación del desplazamiento es de forma lineal y cuya pendiente comprueba el valor de la velocidad constante del punzón. Al tratarse de un nodo ubicado en la parte superior del canal, el máximo valor del desplazamiento de este nodo debe ser igual a la carrera del punzón lo que se puede observar en esta figura.

#### Nodo 367

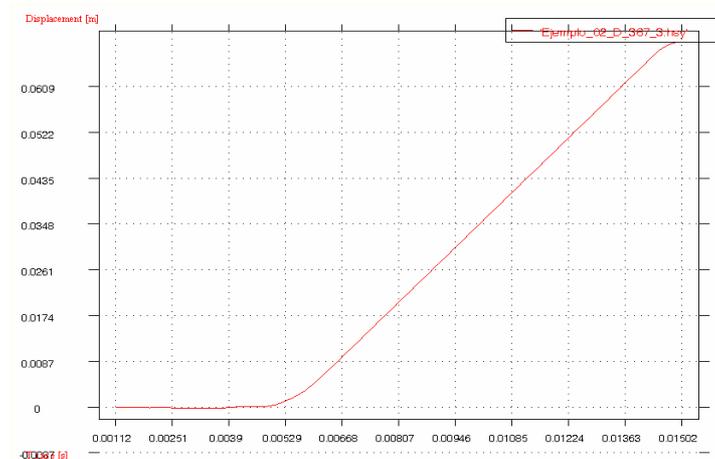


Figura 3.93 Curva Desplazamiento vs. Tiempo.

En la figura 3.93 se tiene una curva diferente a la anterior ya que se trata de un nodo que se desplaza de una manera en particular: al inicio del conformado se desplaza en la dirección del eje X hasta que llega a la zona del radio de acuerdo, en esta zona el nodo se desplaza en las direcciones X y Z, finalmente al salir de esta zona el nodo toma la dirección del eje Z hasta que el proceso termina. Por este motivo esta figura presenta un valor de desplazamiento cero por un corto intervalo de tiempo, ya que, todavía no hay desplazamiento en el eje Z, y luego el desplazamiento tiene un comportamiento de forma lineal hasta el término del proceso.

### Espesor Relativo

#### Nodo 367

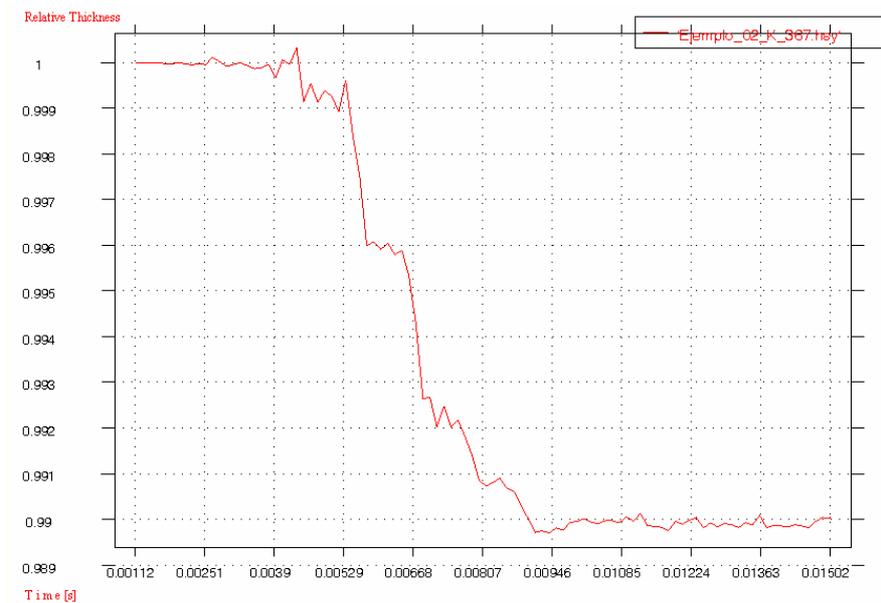


Figura 3.94 Curva Espesor Relativo vs. Tiempo.

Como se puede ver, el espesor en este nodo varía en tres etapas: al inicio del proceso no existe una variación considerable (antes del radio de acuerdo), luego el espesor tiende a disminuir de manera brusca debido a que los esfuerzos aumentan por el estiramiento del material (interacción punzón-chapa-matriz), y finalmente el material llega a un punto en el cual se mantiene el espesor final hasta el término del proceso.

## Deformación principal

### Nodo 1487

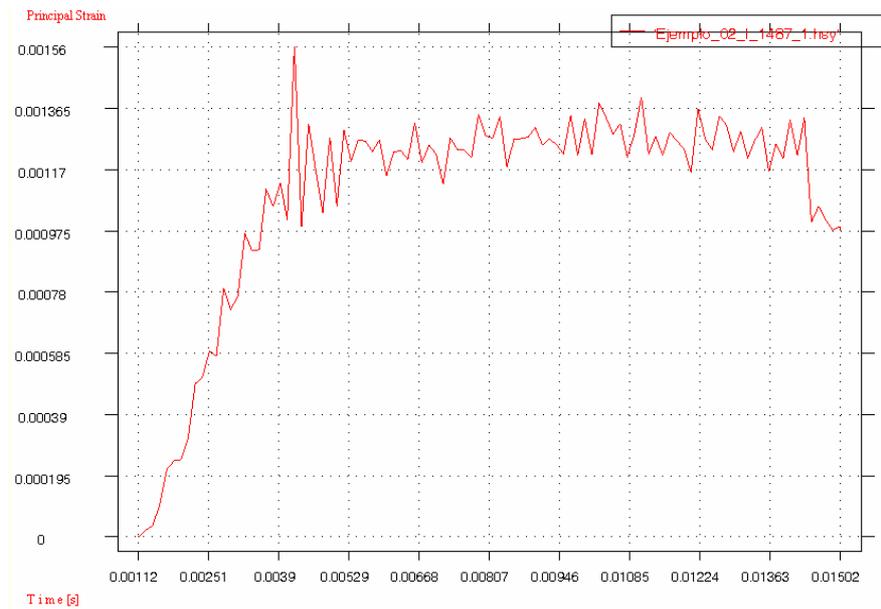


Figura 3.95 Curva Deformación Principal vs. Tiempo.

En la presente curva se puede observar que la deformación en el nodo 1487 se presenta desde el inicio del proceso, y alcanza el valor máximo en corto tiempo, para mantenerse después fluctuando alrededor de un valor constante muy cercano al máximo. Los valores que se observan en esta curva, son muy pequeños comparados con valores de deformación en otras zonas, como por ejemplo en las paredes del canal.

### Nodo 367

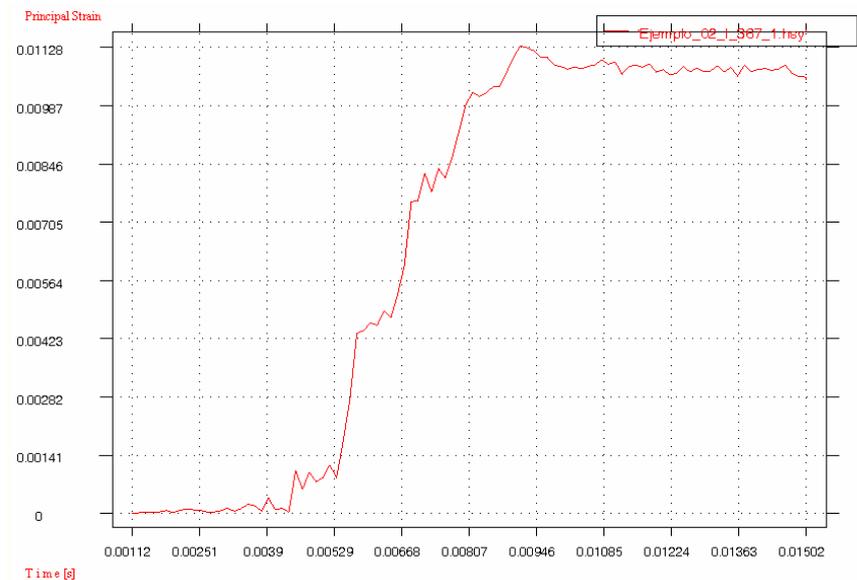


Figura 3.96 Curva Deformación Principal vs. Tiempo.

Como se puede observar en la figura 3.96 la deformación en este nodo, al inicio del proceso, es casi nula hasta llegar a la zona del radio de acuerdo, al entrar en esta zona las deformaciones aumentan significativamente, debido al incremento de esfuerzos, hasta un determinado valor, el cual se mantendrá hasta el final del conformado.

### 3.3.2.2 Curvas Combinadas

*Deformación principal vs. Desplazamiento (nodo 1487)*

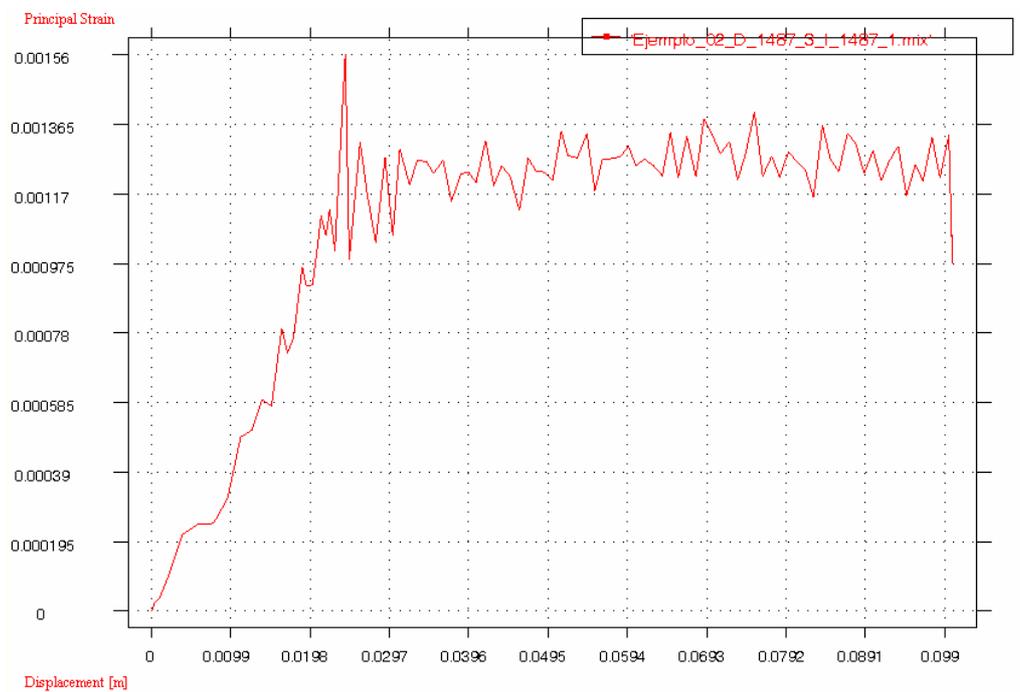


Figura 3.97 Curva Deformación Principal vs. Desplazamiento.

Como se observa, la deformación en este nodo aumenta cuando el desplazamiento también aumenta. En este punto el valor máximo de deformación se alcanza cuando el desplazamiento es apenas de un 20% y se mantiene en un valor menor al máximo, pero no tan alejado, hasta el final del proceso. Es decir que la deformación se da antes de que el desplazamiento supere el 20% de su recorrido total y luego se mantiene constante.

### Espesor Relativo vs. Desplazamiento (nodo 1487)

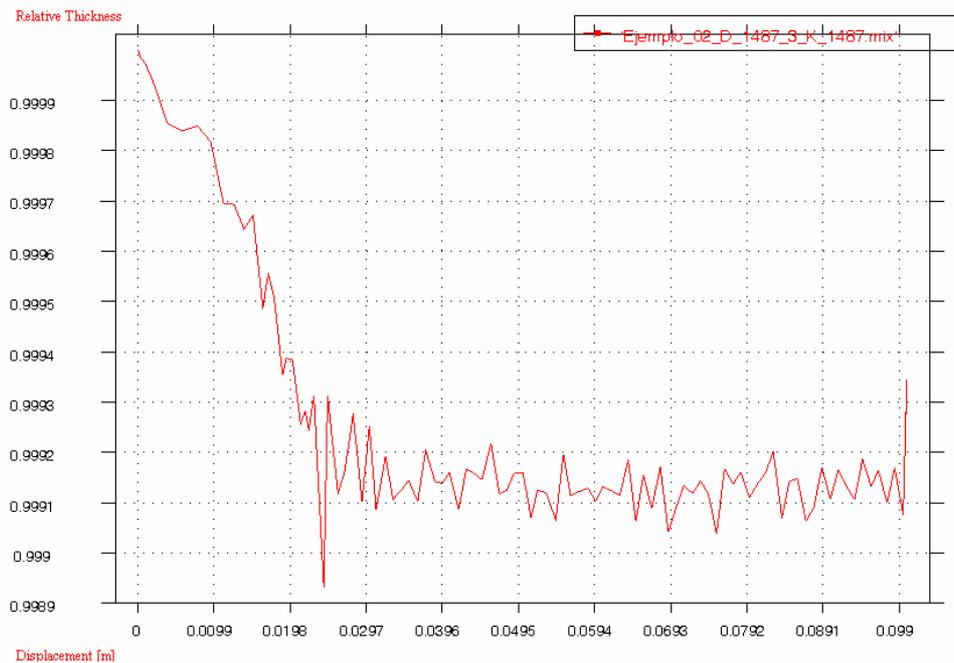


Figura 3.98 Curva Espesor Relativo vs. Desplazamiento.

En este caso cuando el desplazamiento aumenta, el espesor relativo disminuye, pero esta reducción de espesor es despreciable con respecto a otras zonas del canal (por ejemplo las paredes). Además como sucede con la deformación, el espesor disminuye y alcanza su valor mínimo en los primeros momentos del desplazamiento, luego esta variación tiende a ser constante.

### Deformación principal vs. Desplazamiento (nodo 367)

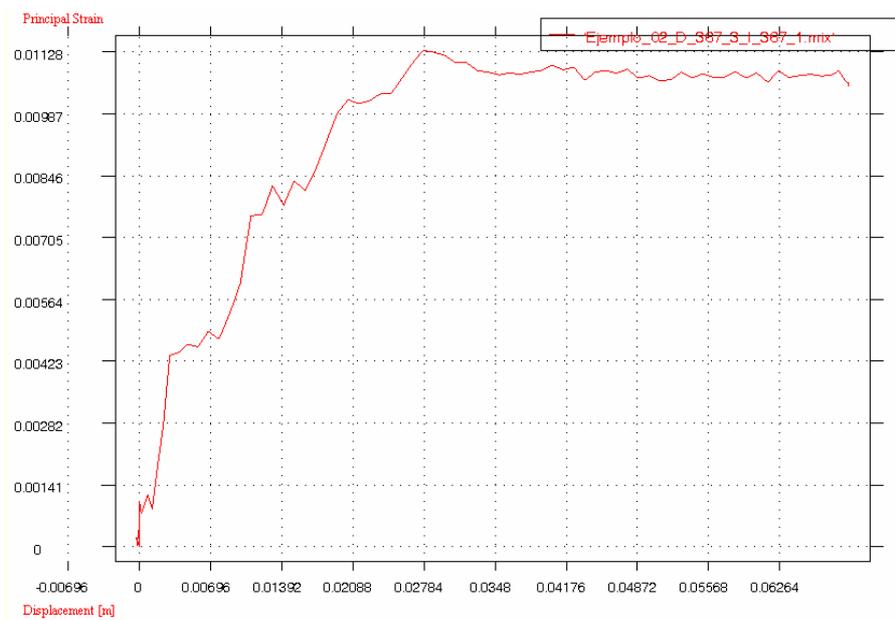


Figura 3.99 Curva Deformación Principal vs. Desplazamiento.

En el gráfico 3.99 se puede apreciar que la deformación en este nodo aumenta cuando el desplazamiento también aumenta. Este aumento de deformación no es lineal, sino que alcanza el valor máximo en un tiempo relativamente pequeño y se mantiene en un valor cercano a este hasta cuando termina el desplazamiento total del nodo.

### Desplazamiento Vs. Espesor Relativo (nodo 367)

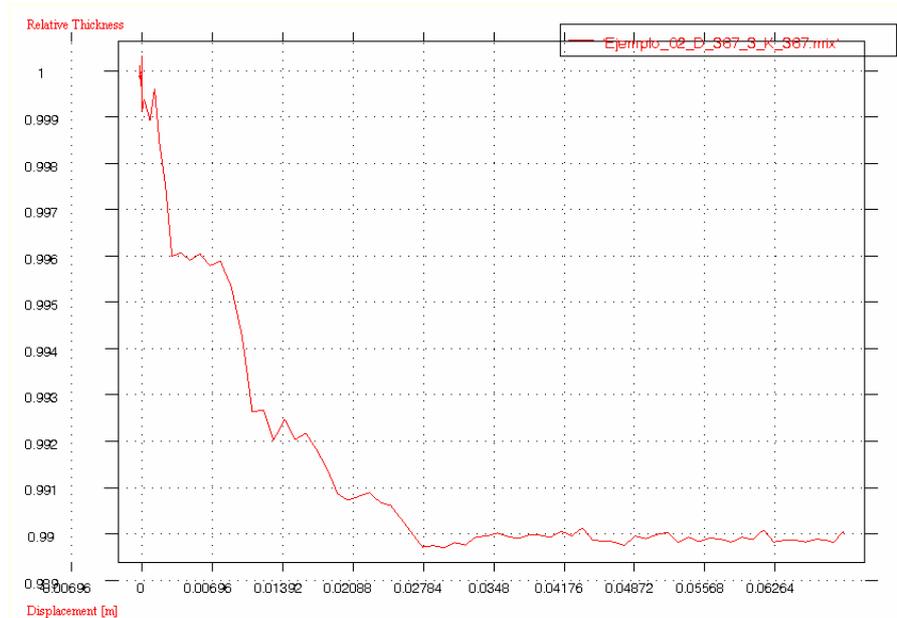


Figura 3.100 Curva Espesor Relativo vs. Desplazamiento

Mediante el gráfico 3.100 se puede comprobar una vez más que a medida de que el desplazamiento aumenta en este nodo, el espesor relativo disminuye y esta reducción de espesor se da al empezar el desplazamiento, alcanzando el valor mínimo de forma rápida y manteniendo este valor hasta el final.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y COMPARACIÓN ENTRE MODELOS SIMULADOS CON DIFERENTES VARIABLES**

Una vez adquiridos los conocimientos básicos en cuanto al manejo, características y análisis mediante el programa Stampack, se puede pasar a una nueva etapa en la que se analiza la influencia de cada una de las variables del proceso de estampado en un ejemplo determinado, para lo cual se va a realizar simulaciones basadas en este ejemplo cambiando cada una de las variables y al final realizar un análisis comparativo de los resultados que arrojen dichas simulaciones.

El objetivo de este capítulo es el obtener conclusiones acerca de cuales son las variables que tienen mayor o menor influencia en el proceso de estampado, con el fin de seleccionar las variables con las que se obtendrá una óptima solución en este tipo de procesos.

Las variables con las que se va a trabajar son: espesor de la chapa, radio de acuerdo, velocidad de trabajo del punzón, fuerza del pisador, tipo de material de la chapa, y se va a analizar el comportamiento al alterar la geometría, en este caso al hacer agujeros en la chapa.

Se va a analizar los resultados más significativos para cada una de las variables, y para este caso en particular se ha escogido los siguientes: espesor relativo, mayor deformación principal, esfuerzos de Von Misses, zonas de seguridad, y el diagrama límite de deformación FLD.

## 4.1 COMPARACIÓN DE MODELOS AL VARIAR EL RADIO DE ACUERDO.

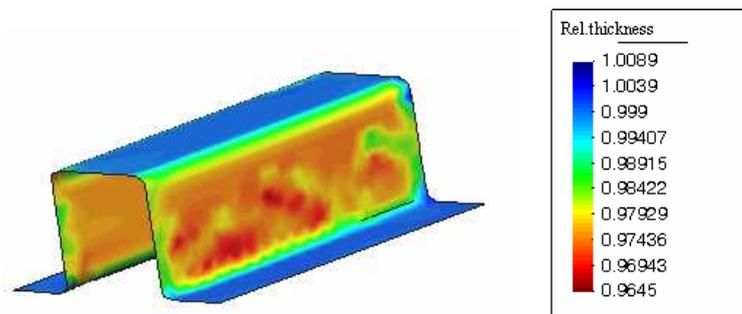
### ACUERDO.

Para analizar el comportamiento de la chapa al variar el radio de acuerdo, se ha escogido los siguientes valores: radio de 5mm, radio de 10mm y radio de 20mm.

Luego de las simulaciones respectivas, se obtienen los siguientes resultados:

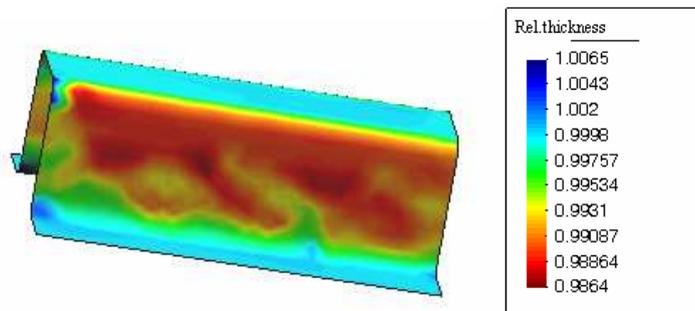
#### 4.1.1 ESPESOR RELATIVO

Radio 5mm



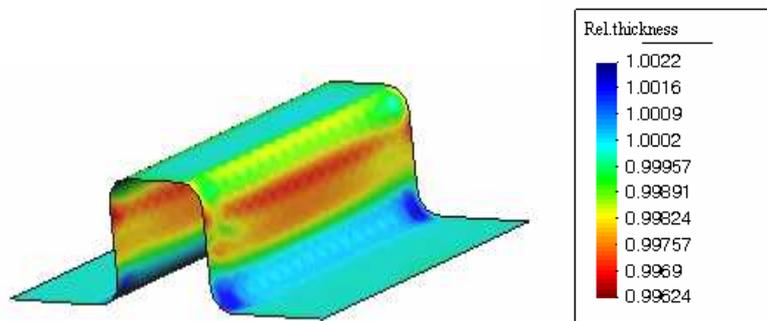
(a)

Radio 10mm



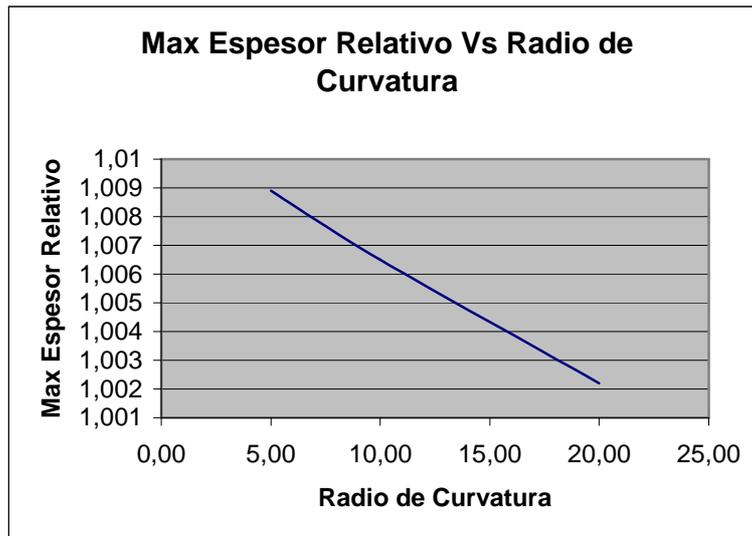
(b)

Radio 20mm

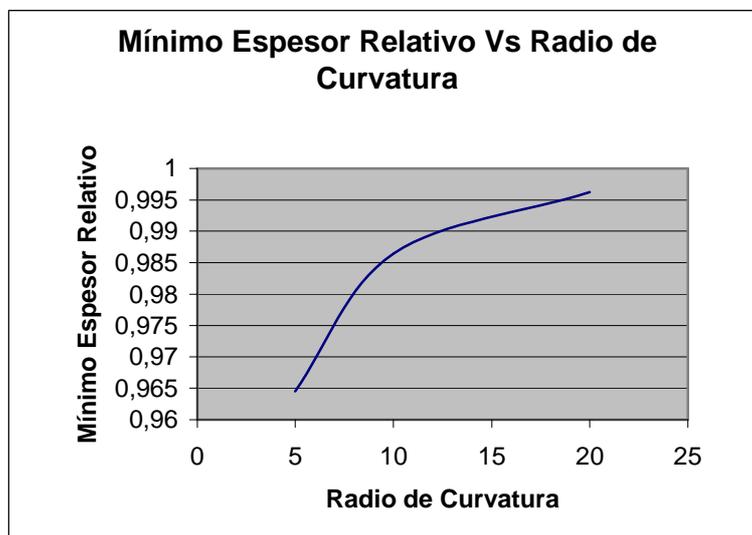


(c)

Figura 4.1 Espesor Relativo: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm  
(c) radio 20mm



(a)



(b)

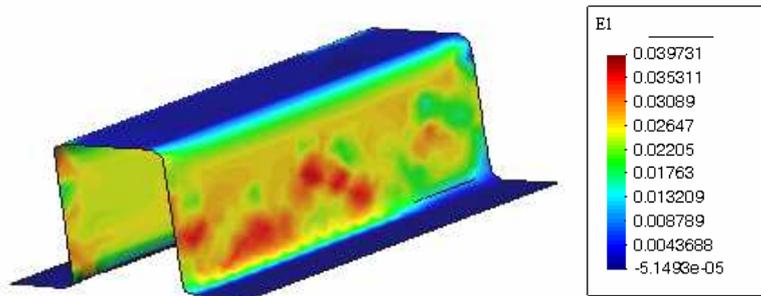
Figura 4.2 Análisis: (a) máximo espesor, (b) mínimo espesor

Como se puede observar al aumentar el radio de curvatura, la variación de espesor de la chapa es menor, es decir, cuando se trabaja con un radio de 20mm los valores de espesor relativo se encuentran más cercanos al valor de referencia 1 en comparación con los valores obtenidos con radio de 10mm y mayor aún con los valores correspondientes al radio 5mm.

Este comportamiento se debe a que al disminuir el radio de acuerdo, el material es forzado de una manera más brusca al cambio de dirección de flujo que cuando se tiene un radio de acuerdo mayor, lo que origina mayores variaciones del espesor.

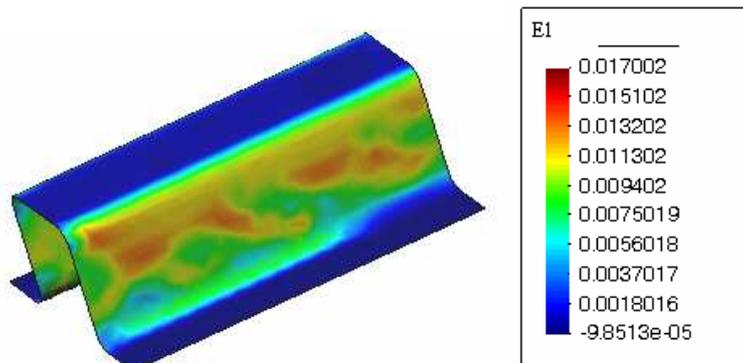
## 4.1.2 MAYOR DEFORMACIÓN PRINCIPAL

Radio 5mm



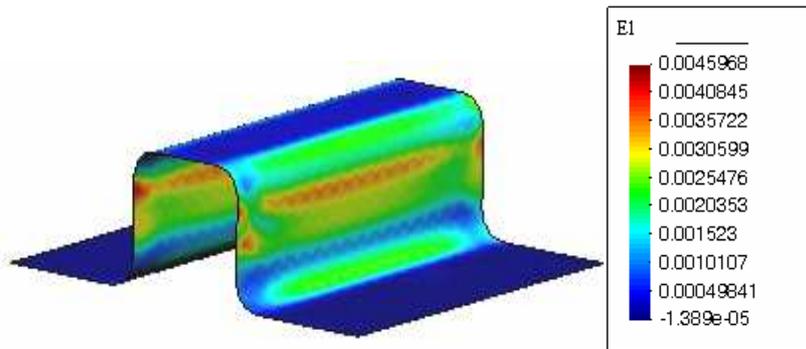
(a)

Radio 10mm



(b)

Radio 20mm



(c)

Figura 4.3 Deformación principal: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm  
(c) radio 20mm

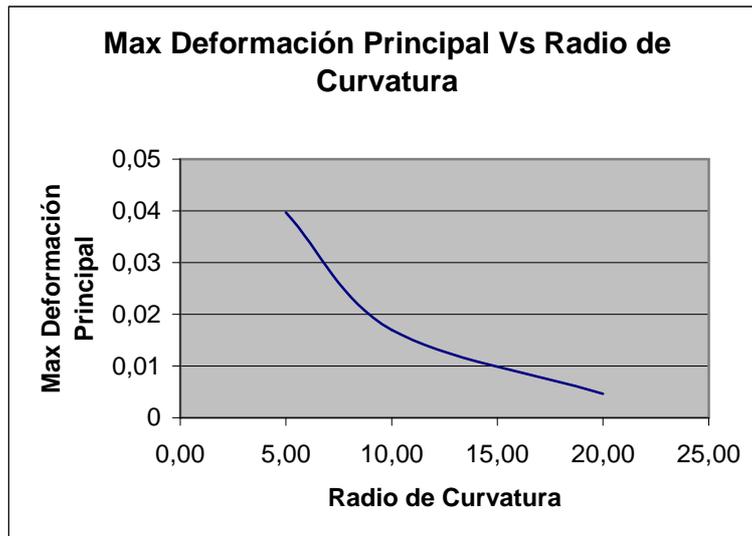
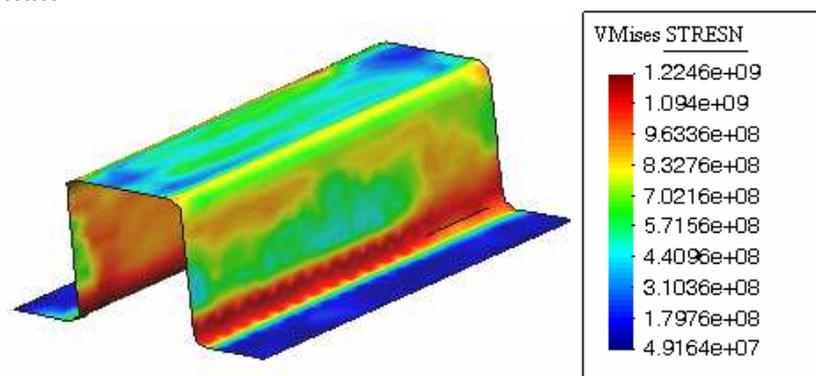


Figura 4.4 Análisis máx. deformación principal

En la presente figura al aumentar el radio de curvatura el valor de la máxima deformación principal disminuye, esto se debe, como anteriormente se dijo, a que un radio de mayor dimensión ofrece mayores facilidades de flujo de material que un radio de menor dimensión. Como consecuencia de esto, los esfuerzos y las deformaciones también disminuyen a medida que se incrementa el radio de acuerdo.

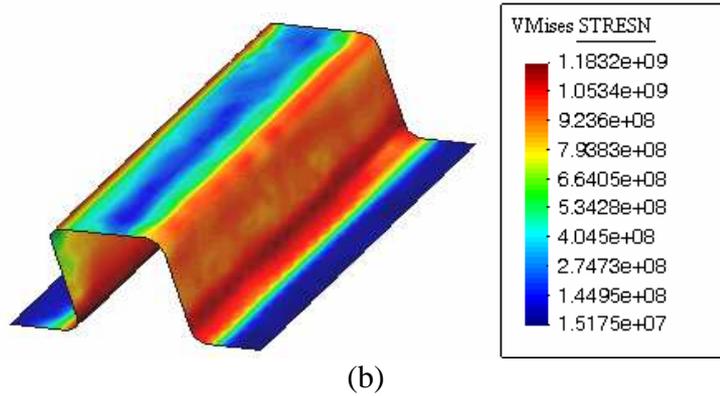
#### 4.1.3 MÁXIMO ESFUERZO DE VON MISSES (Superficie)

Radio 5mm



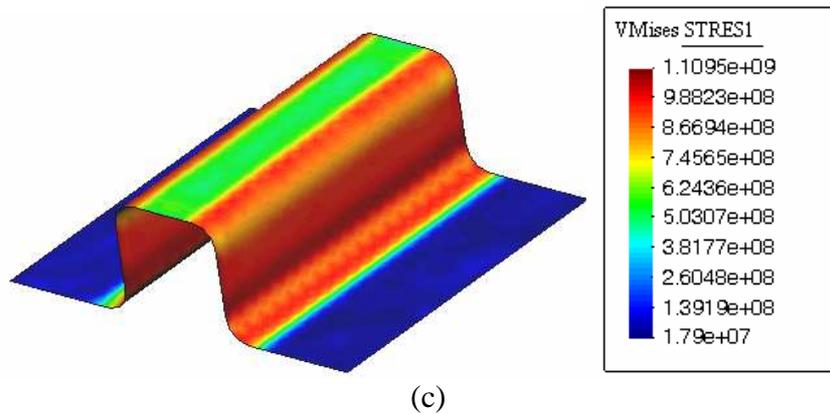
(a)

Radio 10mm



(b)

Radio 20mm



(c)

Figura 4.5 Esfuerzo de Von Mises: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm (c) radio 20mm

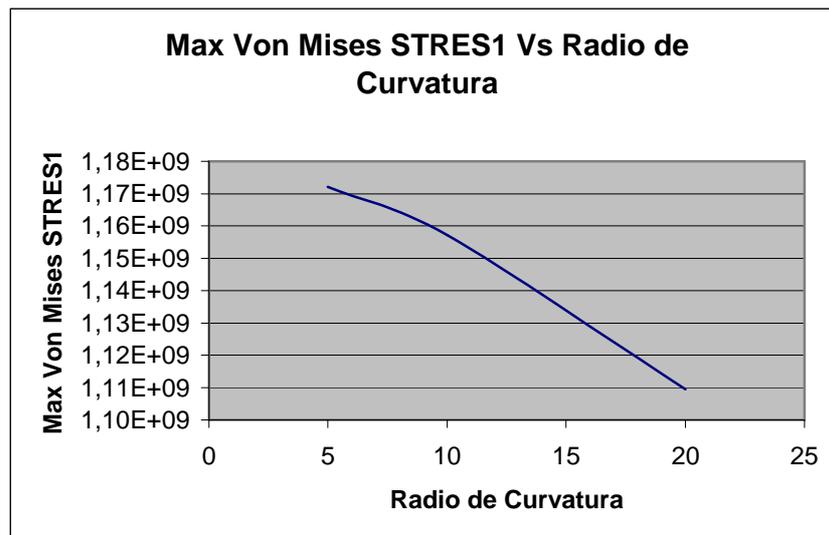


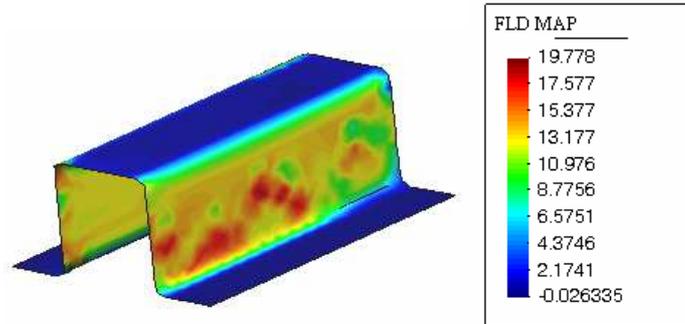
Figura 4.6 Análisis esfuerzo de Von Mises

En esta curva se puede ver que mientras el valor del radio de acuerdo aumenta, el esfuerzo de Von Mises disminuye; de esta manera se comprueba

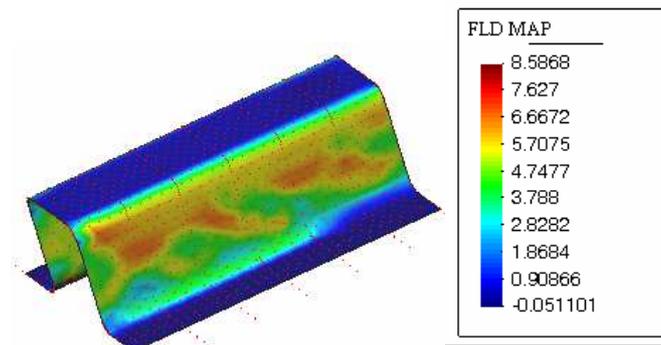
una vez más que se presentan menores esfuerzos cuando se ofrece mayor facilidad de flujo a la chapa.

#### 4.1.4 MAPA FLD

Radio 5mm



Radio 10mm



Radio 20mm

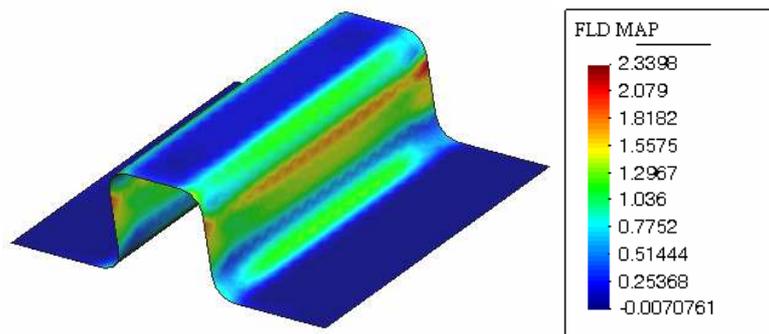


Figura 4.7 Mapa FLD: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm  
(c) radio 20mm

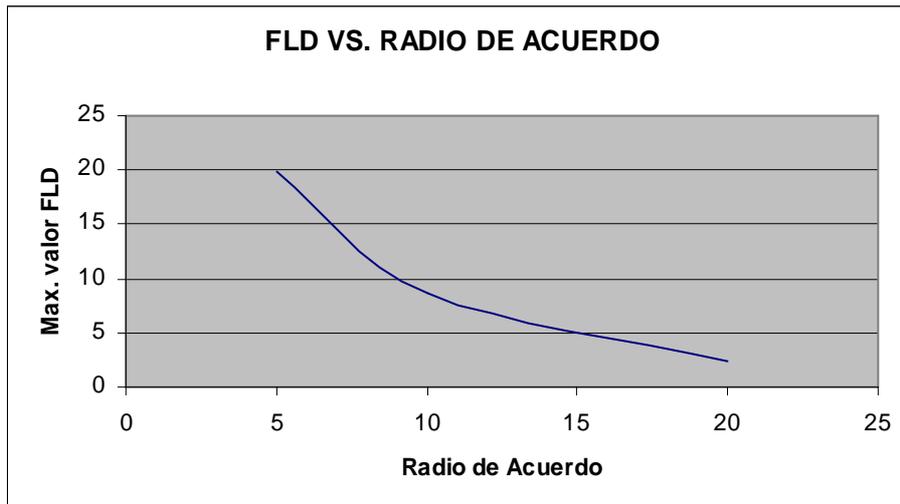
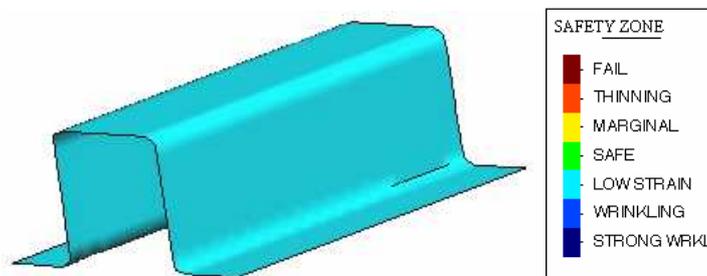


Figura 4.8 Curva FLD vs Radio de Curvatura

En este caso, al aumentar el radio de acuerdo el máximo valor de este parámetro disminuye. Esto es lógico, ya que a medida de que los esfuerzos y las deformaciones son menores, el comportamiento del material tiende a alejarse del valor límite, en este caso 100.

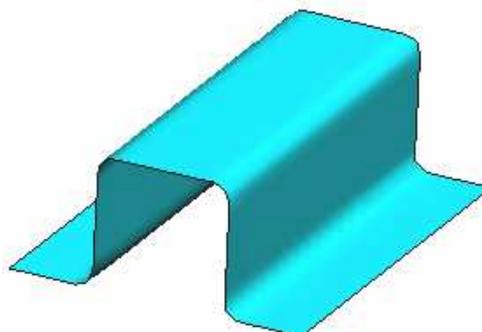
#### 4.1.5 CALIDAD DE CONFORMADO

Radio 5mm



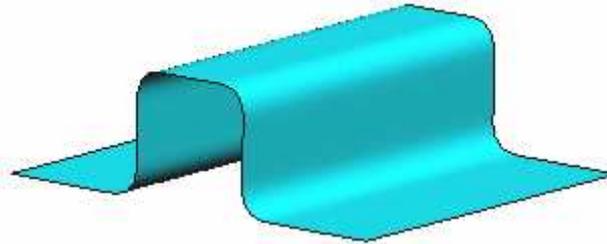
(a)

Radio 10mm



(b)

Radio 20mm



(c)

Figura 4.9 Calidad de conformado: (a) radio 5mm, (b) radio 10mm  
(c) radio 20mm

Como se observa, en los tres casos se tiene una calidad de conformado que se encuentra en la zona de bajos esfuerzos. Esto significa que no se tendrá problemas de falla del material como roturas, arrugas o excesiva disminución de espesor.

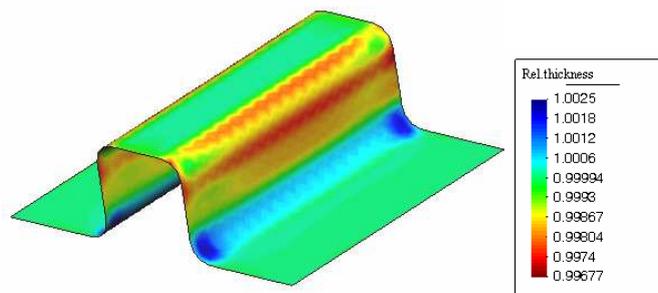
## 4.2 COMPARACIÓN DE MODELOS AL VARIAR LA VELOCIDAD DE TRABAJO DEL PUNZÓN.

Para analizar el comportamiento de la chapa al variar la velocidad de desplazamiento del punzón, se ha escogido los siguientes valores: 0.03m/s, 1m/s y 2m/s (máx).

Luego de las simulaciones respectivas, se obtienen los siguientes resultados:

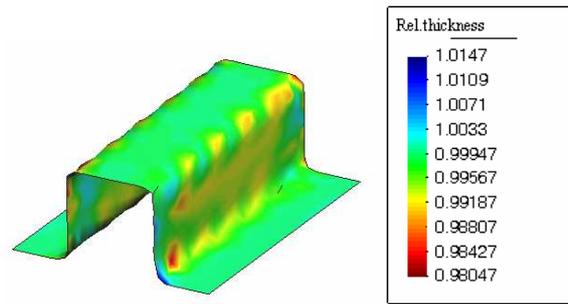
### 4.2.1 ESPESOR RELATIVO

0.03m/s



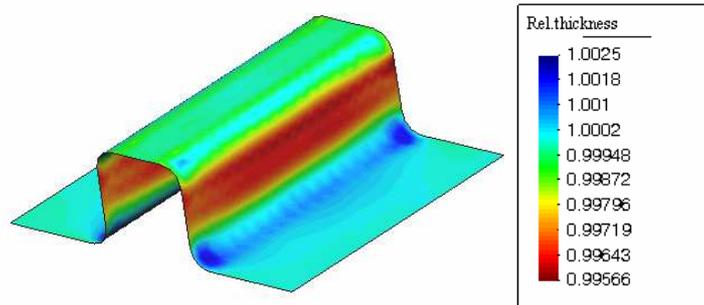
(a)

1m/s



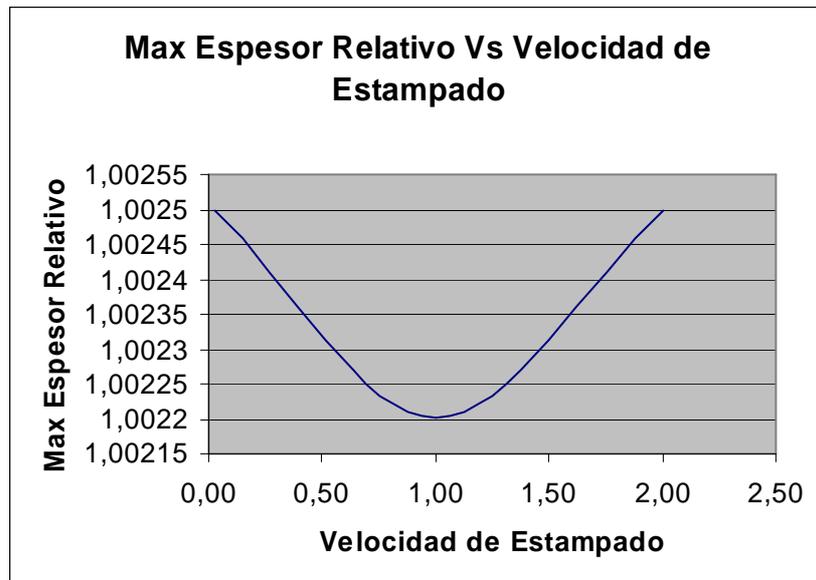
(b)

2m/s

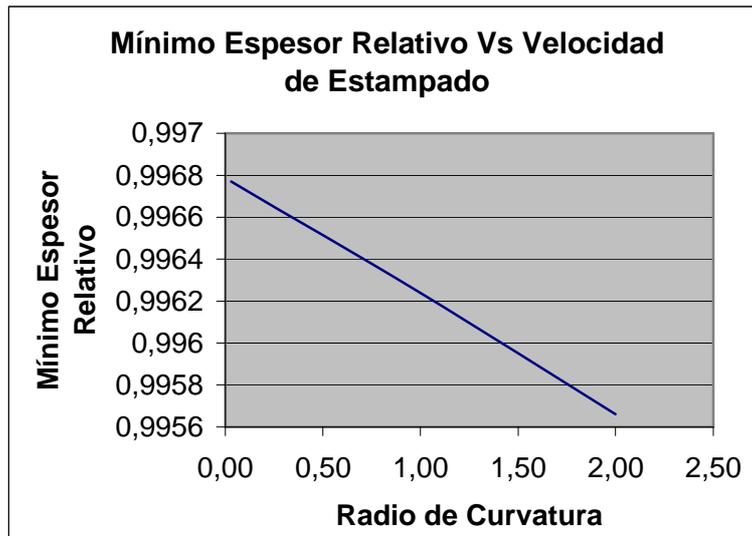


(c)

Figura 4.10 Espesor Relativo: (a) 0.01m/s, (b) 1m/s  
(c) 2m/s



(a)



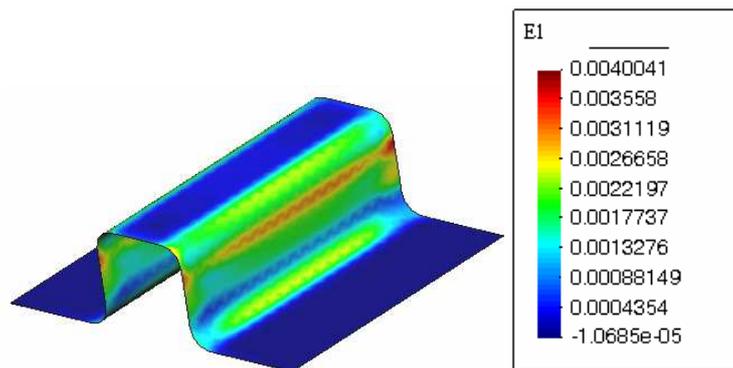
(b)

Figura 4.11 Análisis: (a) máximo espesor, (b) mínimo espesor

Se puede apreciar en los gráficos anteriores la tendencia que presenta la variación del espesor de la chapa conformada al cambiar la velocidad de estampado, los gráficos indican; en forma general que a medida que se incrementa la velocidad de estampado la variación del espesor será mayor.

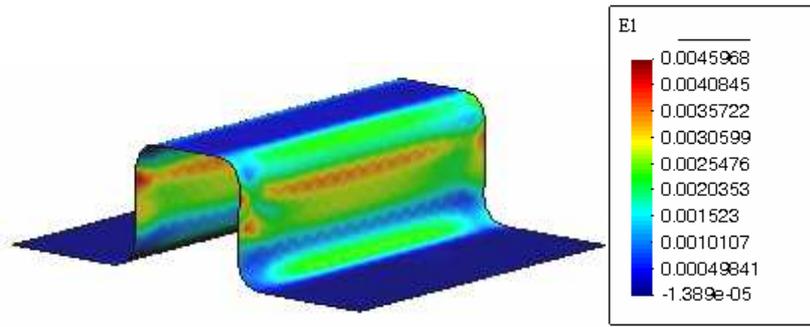
#### 4.2.2 MAYOR DEFORMACIÓN PRINCIPAL

0.03m/s



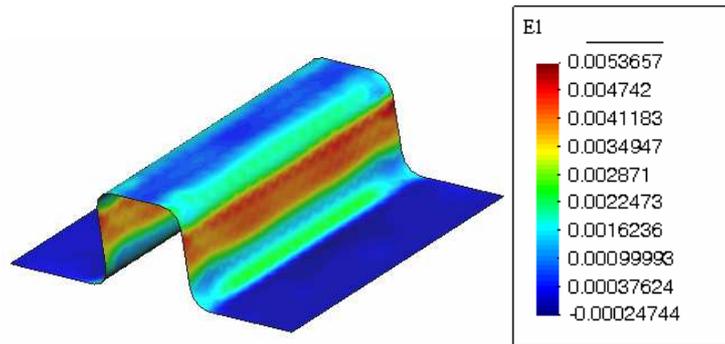
(a)

1m/s



(b)

2m/s



(c)

Figura 4.12 Deformación Principal: (a) 0.01m/s, (b) 1m/s  
(c) 2m/s

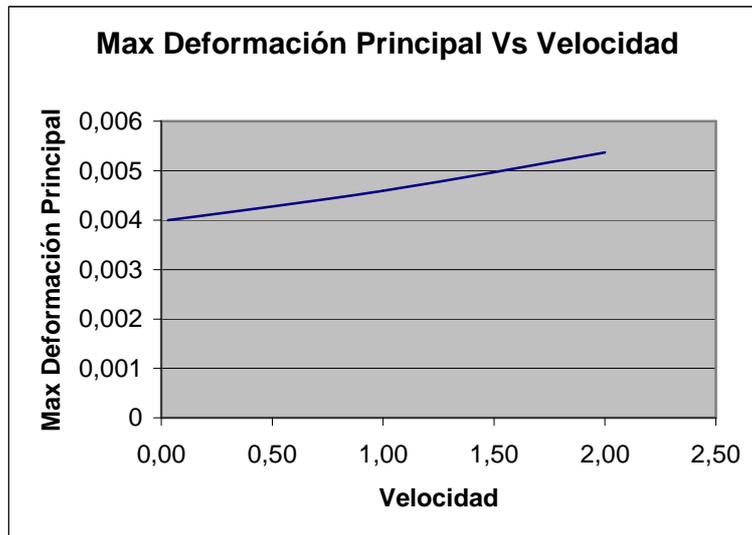


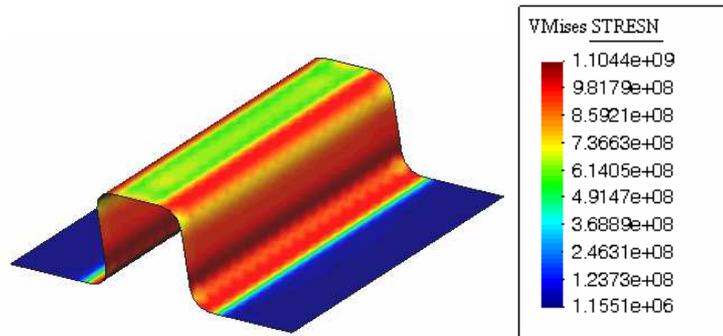
Figura 4.13 Análisis Máx. Deformación principal

En este caso se puede observar claramente que las mayores deformaciones se presentan cuando se trabaja con altas velocidades de estampado y además que disminuyen gradualmente cuando se disminuye la velocidad de

estampado, cabe anotar también que la zona lateral en la que se presentan las mayores deformaciones también aumenta.

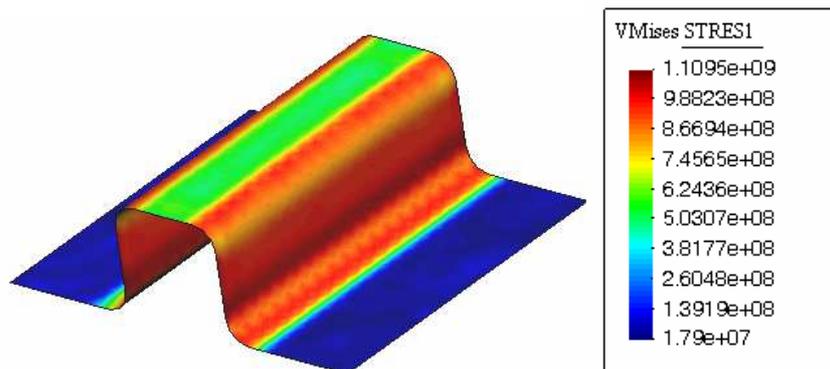
#### 4.2.3 MAXIMO ESFUERZO DE VON MISSES (Superficie)

0.03m/s



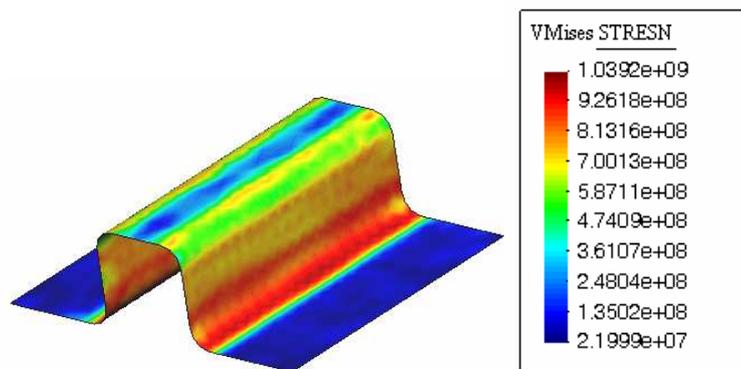
(a)

1m/s



(b)

2m/s



(c)

Figura 4.14 Esfuerzo de Von Mises: (a) 0.01m/s, (b) 1m/s  
(c) 2m/s

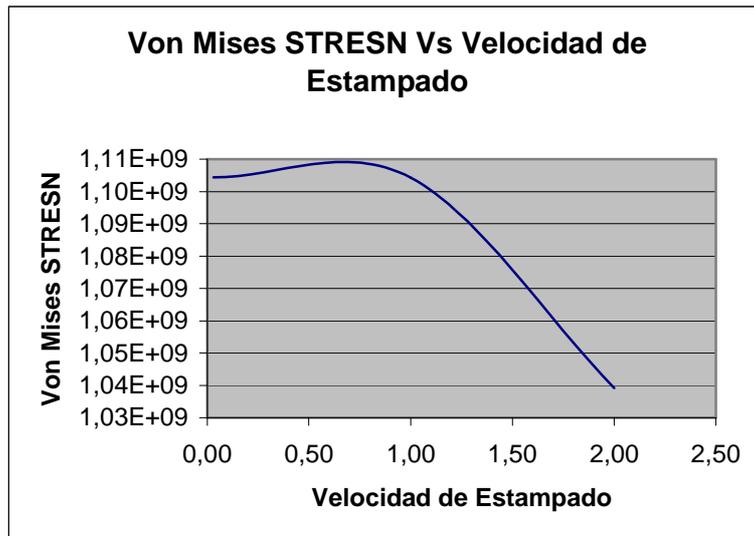
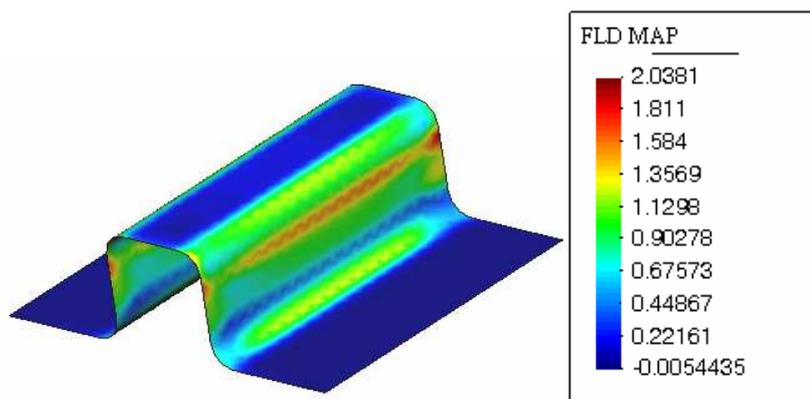


Figura 4.15 Análisis Máximo Esfuerzo de Von Misses

Como se puede apreciar en estos gráficos la velocidad de estampado influye en el esfuerzo máximo según la teoría de Von Misses. Se observa que existe un ligero incremento del esfuerzo máximo a medida que la velocidad aumenta desde su mínimo valor de 0.01 m/s hasta que alcanza la velocidad de 1m/s a partir de este valor se nota una disminución considerable del esfuerzo. Estos valores hacen pensar en que la velocidad máxima es la apropiada para hacer este tipo de trabajo, pero no es la única variable que se analiza, por lo tanto para poder tomar una decisión acertada se debe comprobar este resultado con las demás variables del proceso.

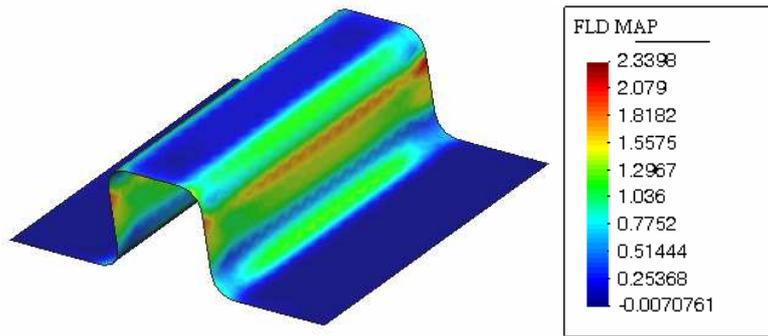
#### 4.2.4 MAPA FLD

0.03m/s



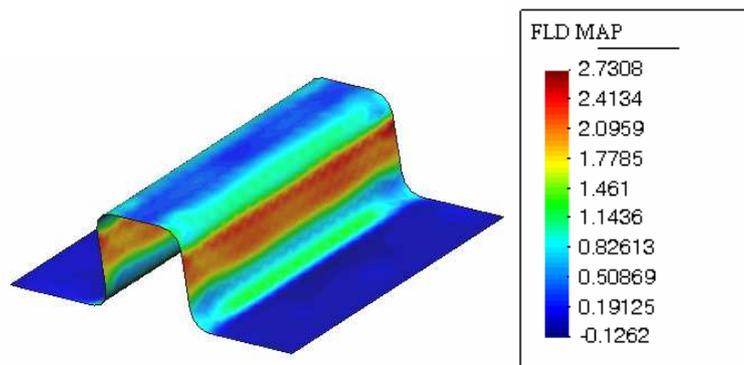
(a)

1m/s



(b)

2m/s



(c)

Figura 4.16 Mapa FLD: a) 0.03m/s, b) 1m/s, c)2m/s

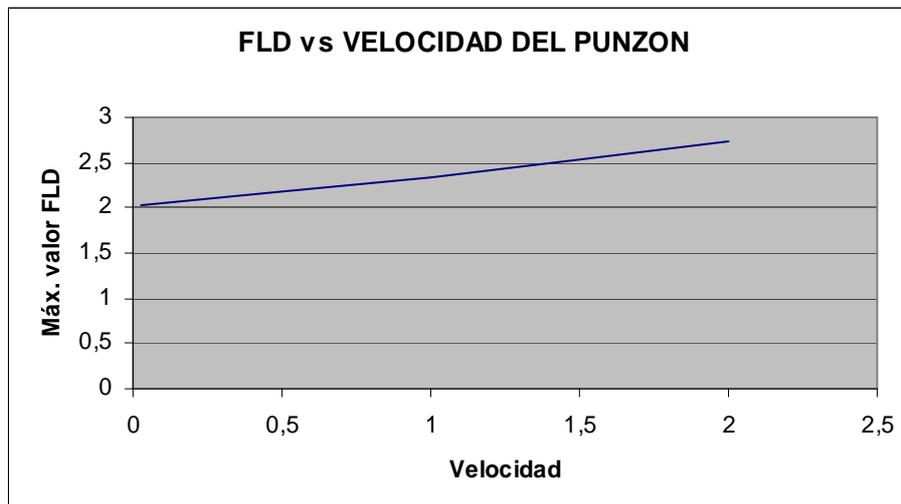


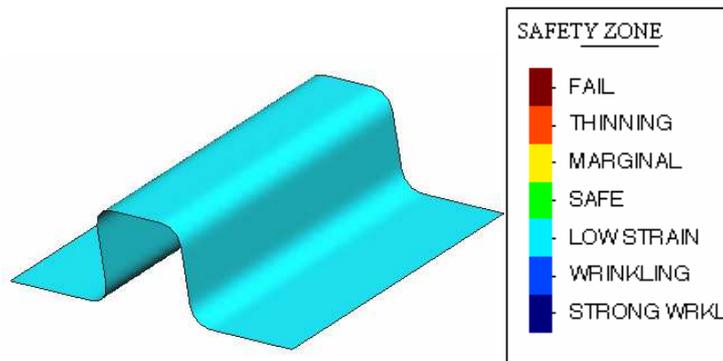
Figura 4.17 Curva FLD vs Velocidad del punzón

Como se puede ver en estos gráficos, los valores de este parámetro son muy similares para los tres casos de velocidad, con una ligera tendencia a aumentar cuando se incrementa la velocidad de estampado, esta puede ser la razón por

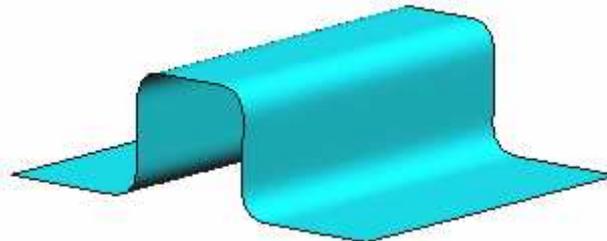
la que el esfuerzo de Von Mises no tiene una tendencia clara al aumentar la velocidad de estampado.

#### 4.2.5 CALIDAD DE CONFORMADO

0.03m/s



1m/s



2m/s

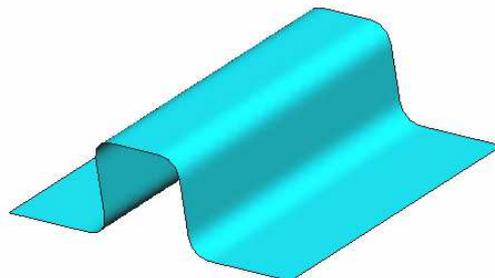


Figura 4.18 Calidad de Conformado a) 0.03m/s, b)1m/s, c)2m/s

En este caso se puede apreciar que para todos los casos de velocidad analizados, la calidad de conformado se encuentra en la zona de bajas deformaciones, conjuntamente con el parámetro FLD se puede concluir que el proceso de estampado para los tres casos se puede ejecutar sin problemas.

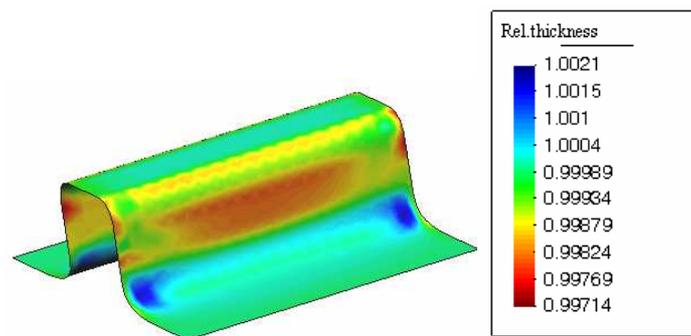
### 4.3 COMPARACIÓN DE MODELOS AL VARIAR LA FUERZA DEL PISADOR

Para analizar el comportamiento de la chapa al variar la fuerza del pisador se ha escogido los siguientes valores: 1 Ton, 4 Ton y 10 Ton.

Luego de las simulaciones respectivas, se obtienen los siguientes resultados:

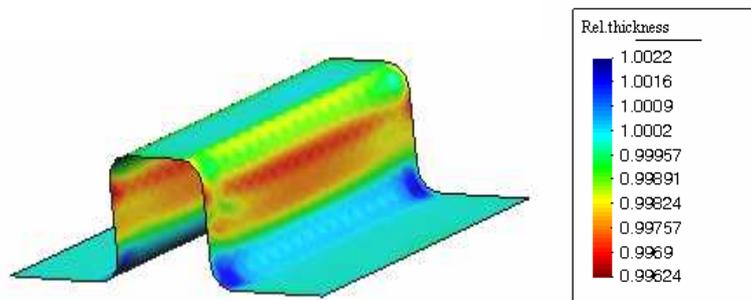
#### 4.3.1 ESPESOR RELATIVO

1 Ton



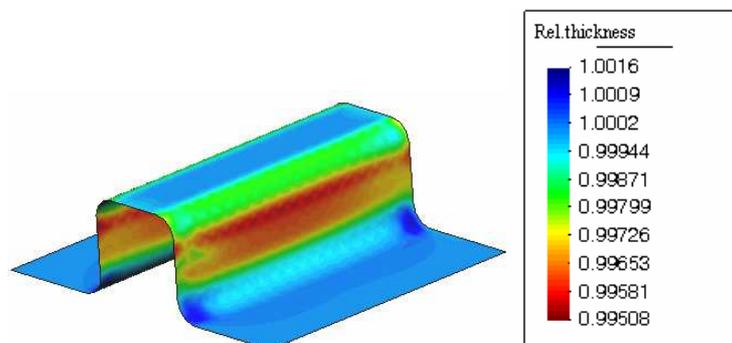
(a)

4 Ton



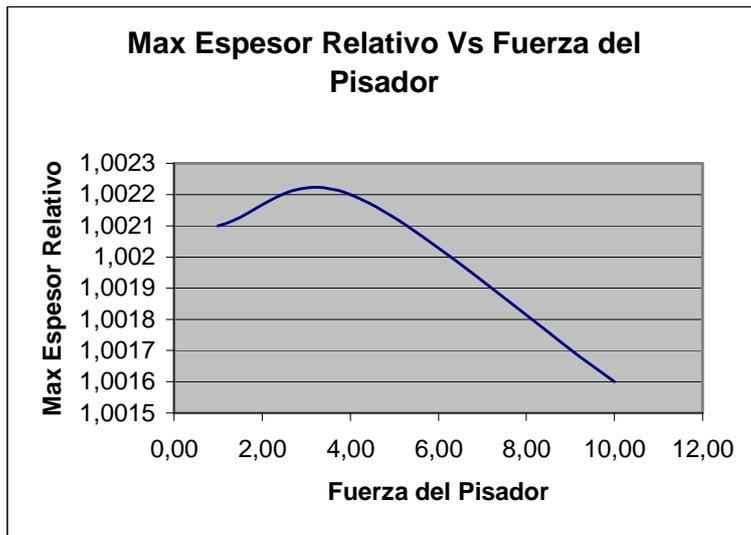
(b)

10 Ton

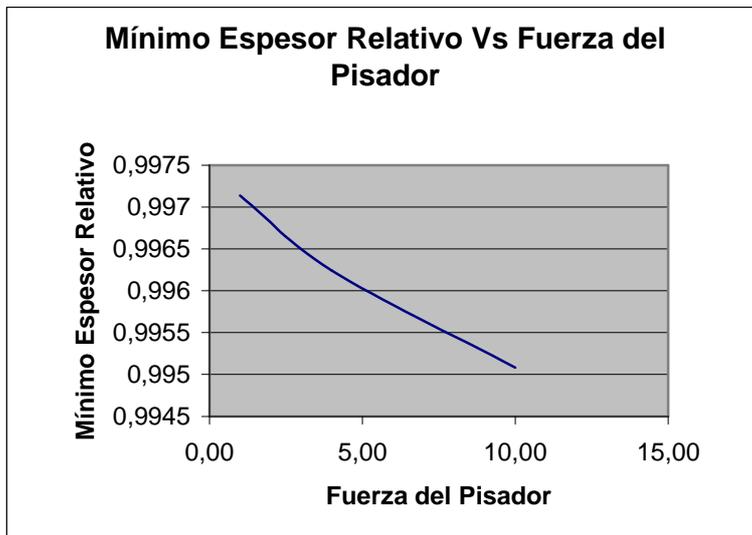


(c)

Figura 4.19 Espesor relativo: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton.



(a)



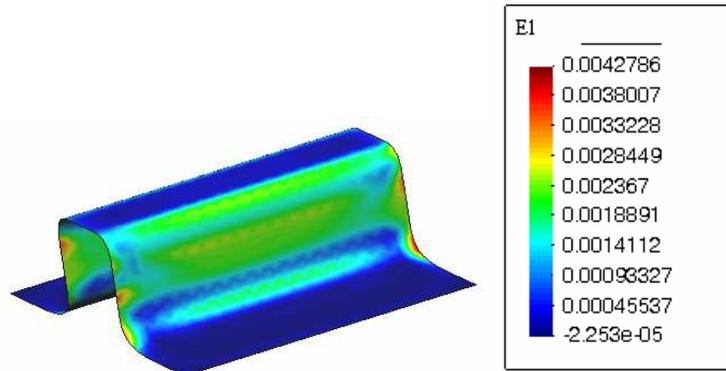
(b)

Figura 4.20 Análisis Espesor Relativo a) Máximo espesor  
b) Mínimo espesor

Estos gráficos muestran que al aumentar la fuerza del pisador el espesor de la chapa en las paredes del canal disminuye y además la chapa presenta un ligero aumento del espesor en la base del canal en una zona que crece a medida que esta fuerza aumenta.

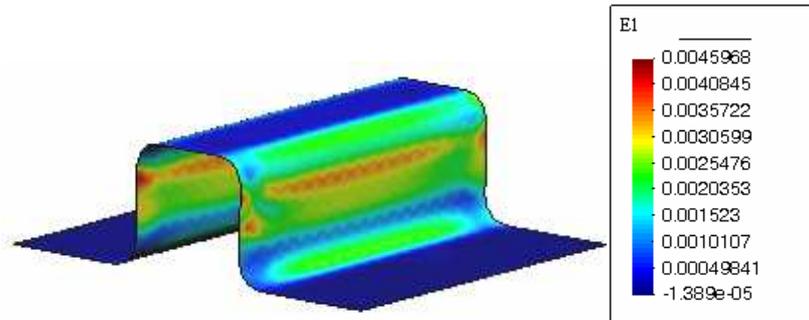
### 4.3.2 MAYOR DEFORMACIÓN PRINCIPAL

1 Ton



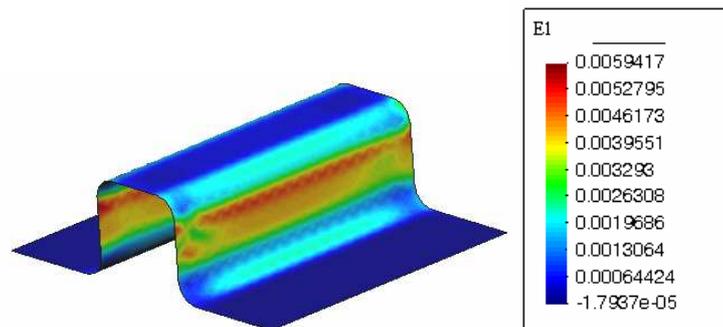
(a)

4 Ton



(b)

10 Ton



(c)

Figura 4.21 Deformación principal: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton

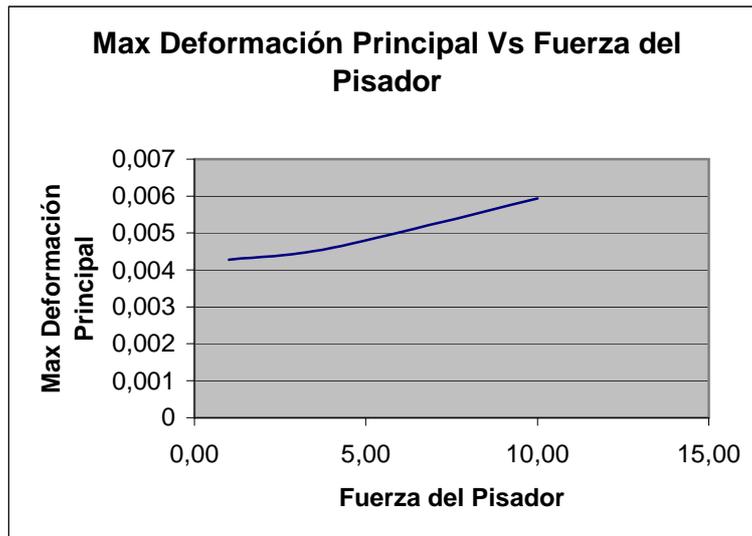
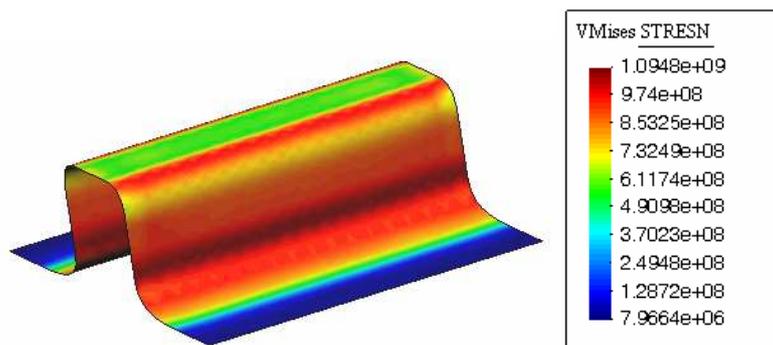


Figura 4.22 Curva Deformación principal vs Fuerza del pisador

Los gráficos anteriores indican que al aumentar la fuerza del pisador, el valor de las deformaciones también aumenta, así como también las zonas en las que las deformaciones son mayores en este caso las de color rojo que en su mayoría se encuentran en las paredes laterales del canal.

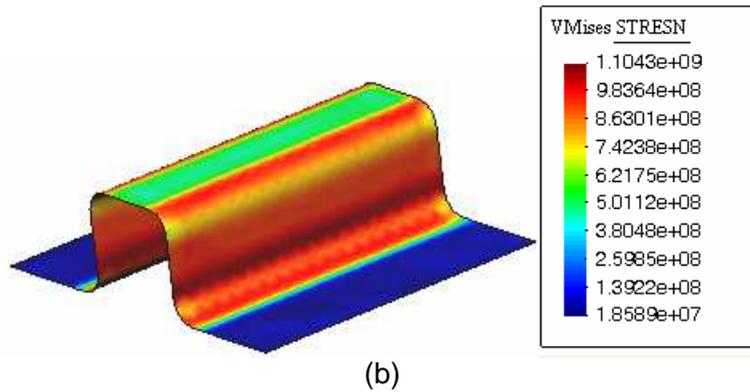
### 4.3.3 MAXIMO ESFUERZO DE VON MISSES (Superficie)

1 Ton



(a)

4 Ton



10 Ton

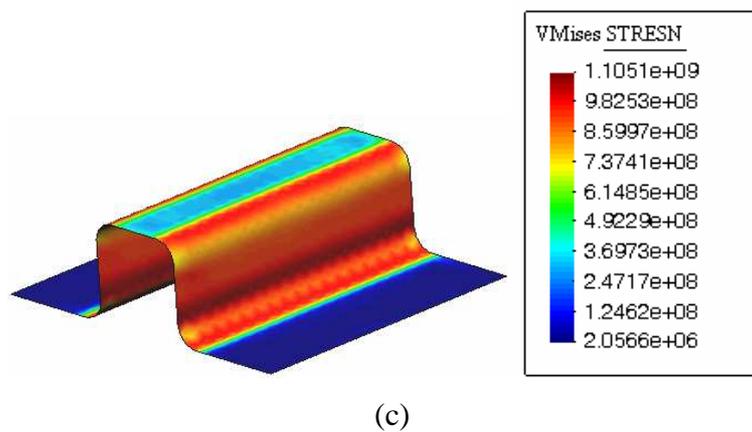


Figura 4.23 Esfuerzo Von Mises: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton

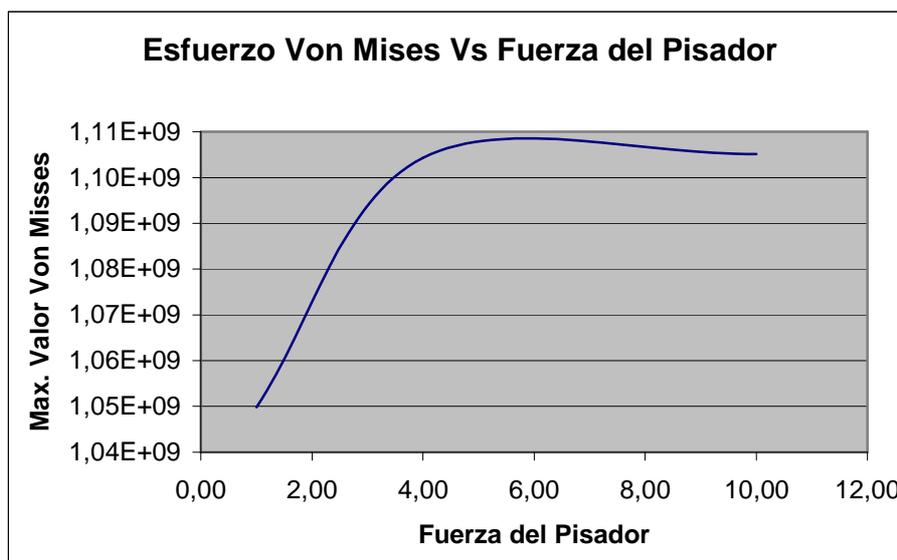


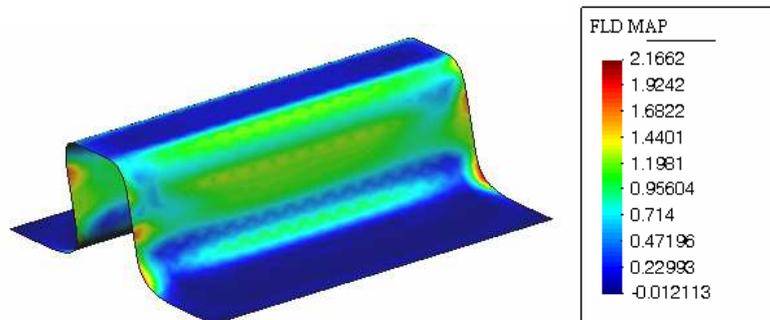
Figura 4.24 Curva Esfuerzo Von Mises vs Fuerza del Pisador

En la figura 4.24, a medida que se incrementa la fuerza del pisador el esfuerzo de Von Mises también aumenta, esto se debe a que existe una mayor

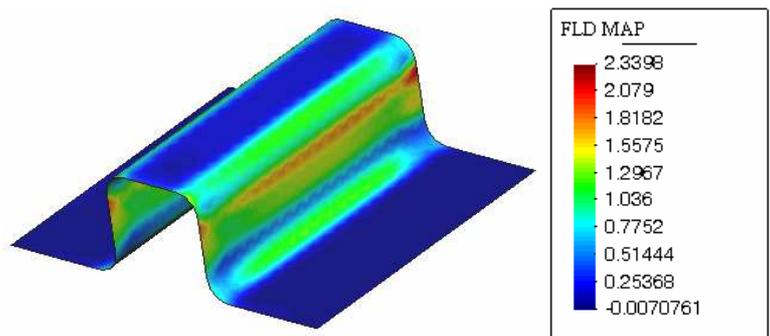
resistencia al flujo del material y por lo tanto el estiramiento es mayor al aumentar la fuerza del pisador.

#### 4.3.4 MAPA FLD

1 Ton



4 Ton



10 Ton

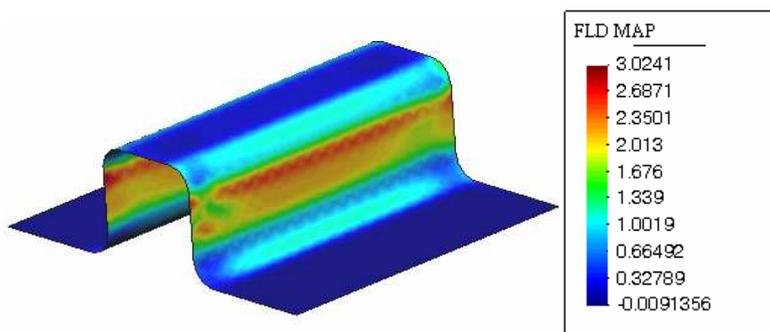


Figura 4.25 Mapa FLD: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton

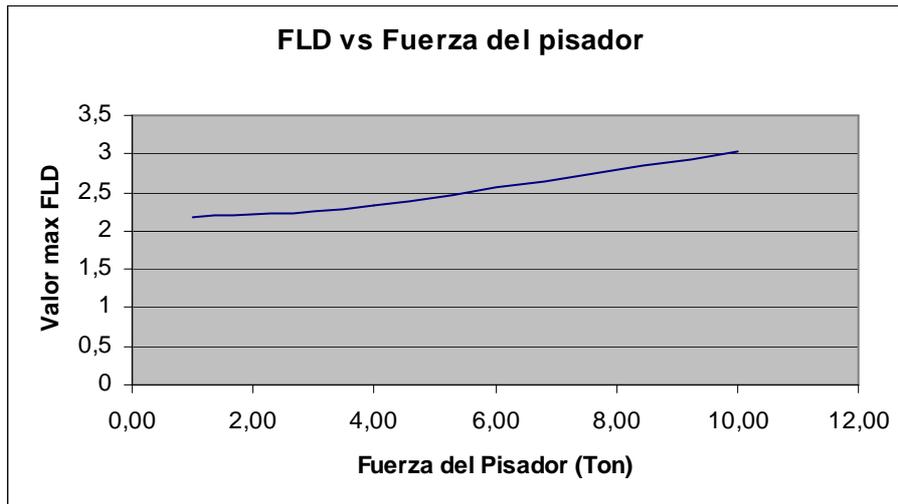
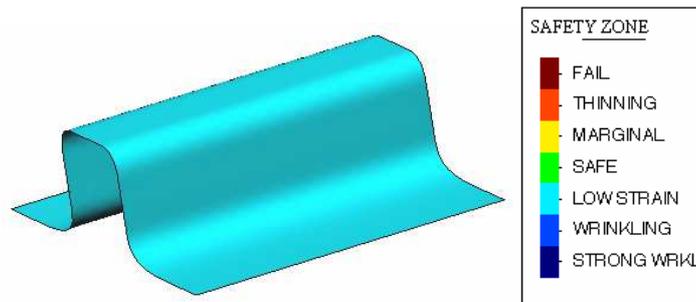


Figura 4.26 Curva Mapa FLD vs. Fuerza del pisador

Este parámetro muestra la tendencia de incrementar su valor con el aumento de la fuerza del pisador y como en los casos anteriores, se puede ver que los valores máximos se encuentran en la parte lateral del canal, es decir, esta es la zona crítica del canal y es donde se presentarían las fallas en caso de que hubieran.

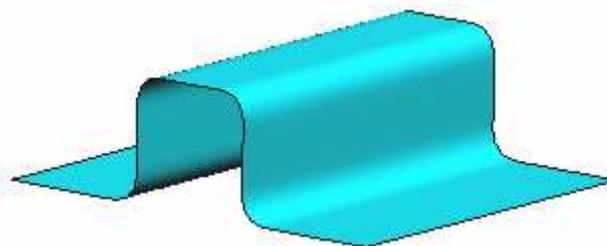
#### 4.3.5 CALIDAD DE CONFORMADO

1 Ton



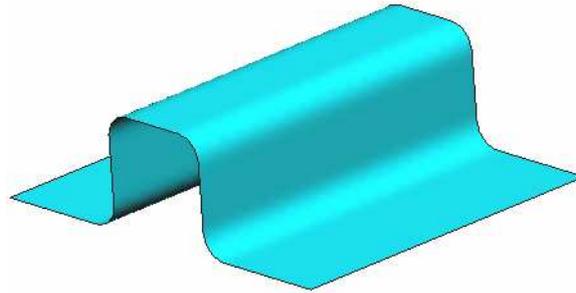
(a)

4 Ton



(b)

10 Ton



(c)

Figura 4.27 Calidad de Conformado: a) 1Ton, b) 4Ton, c) 10Ton

En este caso se puede apreciar que los canales se encuentran con un conformado de baja deformación lo que indica que se podrá realizar el estampado sin problemas ya que no se presentarán fallas en el material. Para los tres casos de la fuerza del pisador se presenta la misma situación con ciertas variaciones en los valores de esfuerzos y deformaciones pero sin problema para realizar el proceso.

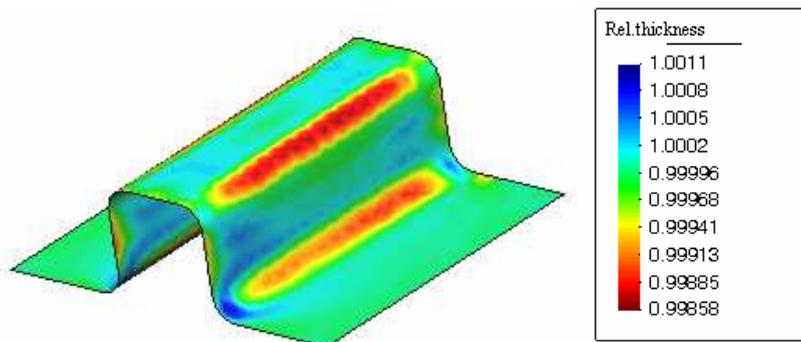
#### 4.4 COMPARACIÓN DE MODELOS AL VARIAR EL ESPESOR DE LA CHAPA

Para analizar el comportamiento de la chapa al variar el espesor de la chapa, se ha escogido los siguientes valores: 1mm, 2mm, 4mm.

Luego de las simulaciones respectivas, se obtienen los siguientes resultados:

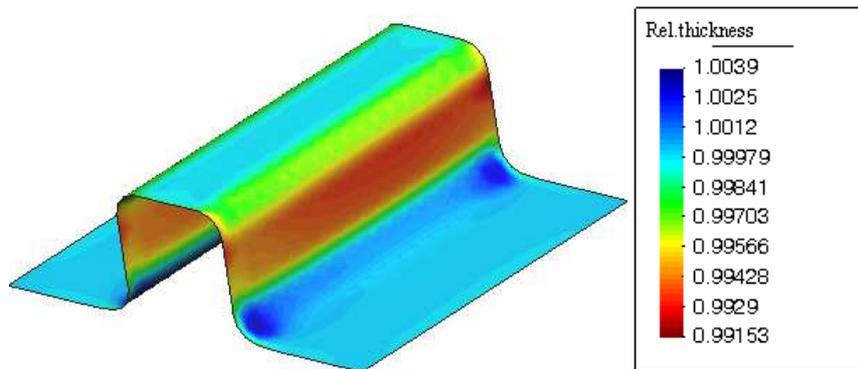
##### 4.4.1 ESPESOR RELATIVO

Espesor 1mm



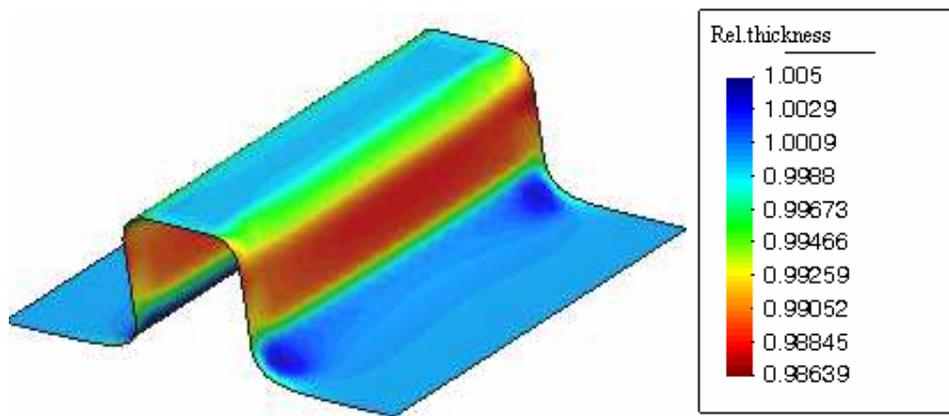
(a)

Espesor 2mm



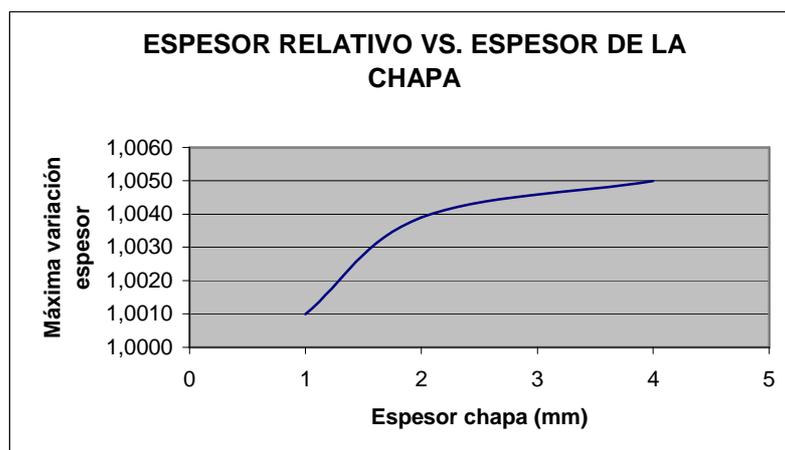
(b)

Espesor 4mm

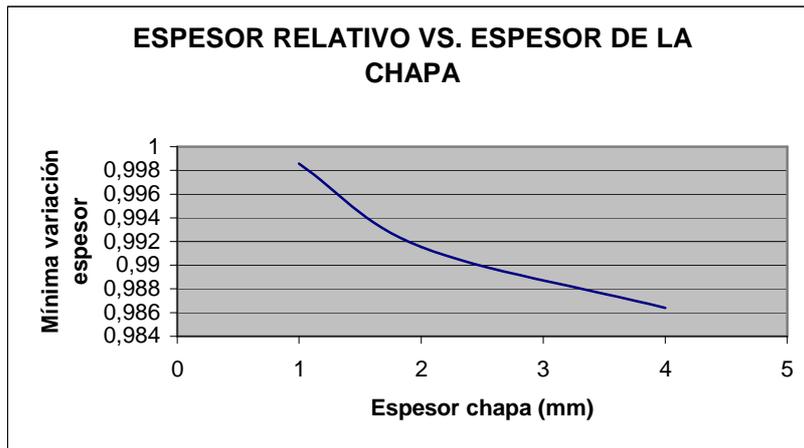


(c)

Figura 4.28 Variación de espesor: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm



(a)



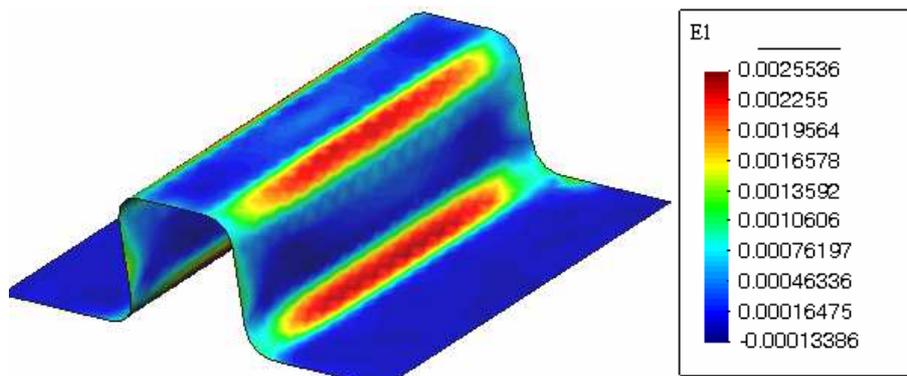
(b)

Figura 4.29 Análisis espesor relativo: a) máxima variación  
b) mínima variación

Como se observa en la figura 4.29b, cuando el espesor de la chapa tiende a ser menor, la variación del espesor relativo es mucho menor, es decir cuando la chapa es más delgada, el espesor relativo es más uniforme en comparación con una chapa de mayor grosor.

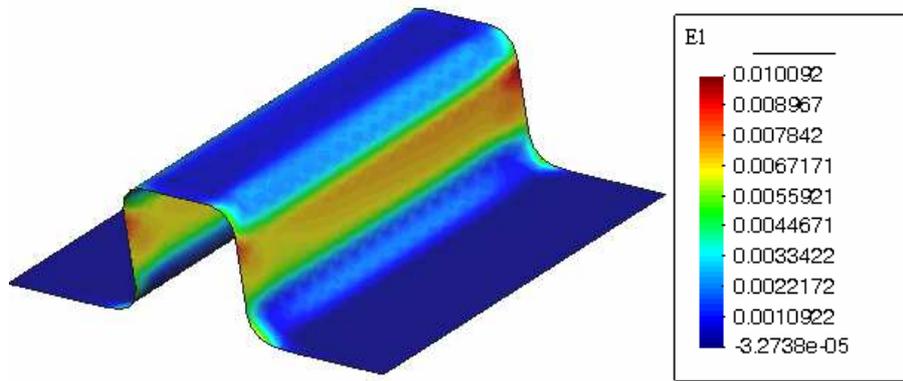
#### 4.4.2 MAYOR DEFORMACION PRINCIPAL

Espesor 1mm



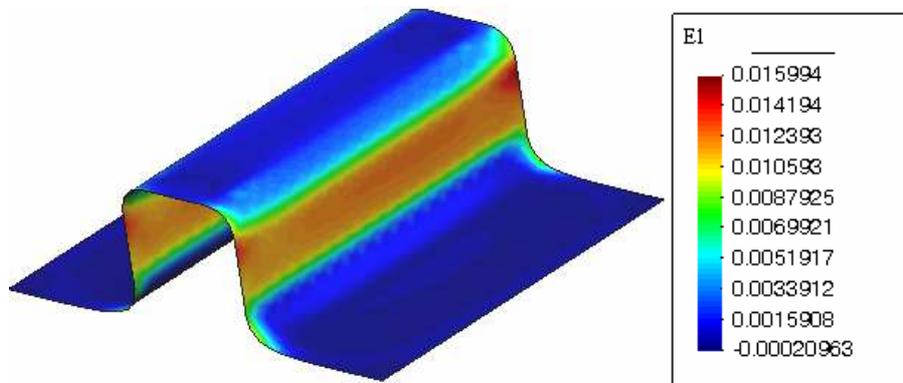
(a)

Espesor 2mm



(b)

Espesor 4mm



(c)

Figura 4.30 Deformación Principal: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm

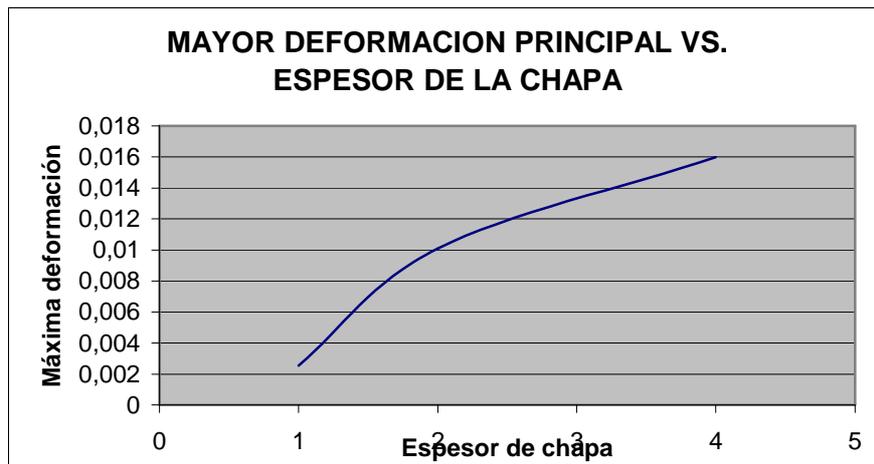
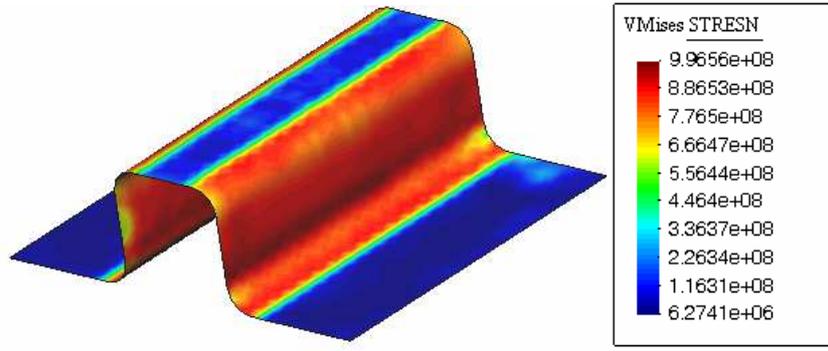


Figura 4.31 Curva Deformación Principal vs Espesor de chapa

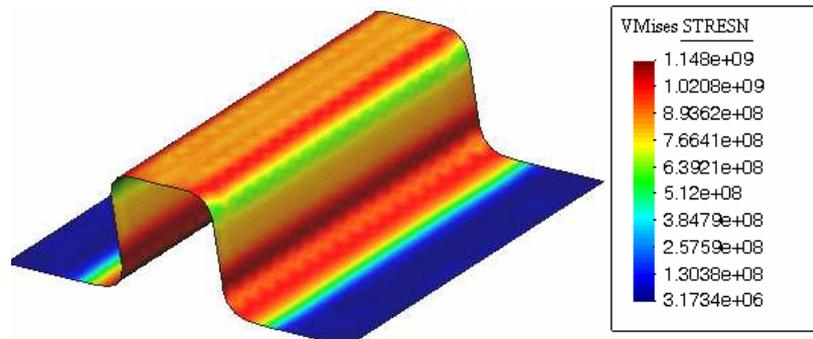
En esta figura, se puede observar que al aumentar el espesor de la chapa, las deformaciones son mayores, esto concuerda con la figura 4.29.

### 4.4.3 ESFUERZO DE VON MISSES

Espesor 1mm



Espesor 2mm



Espesor 4mm

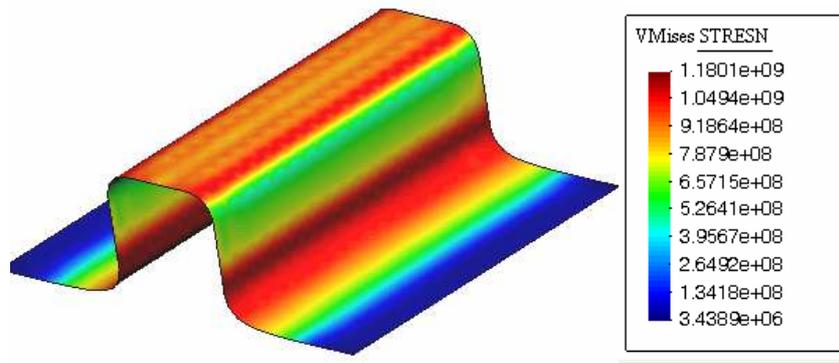


Figura 4.32 Esfuerzo de Von Mises: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm

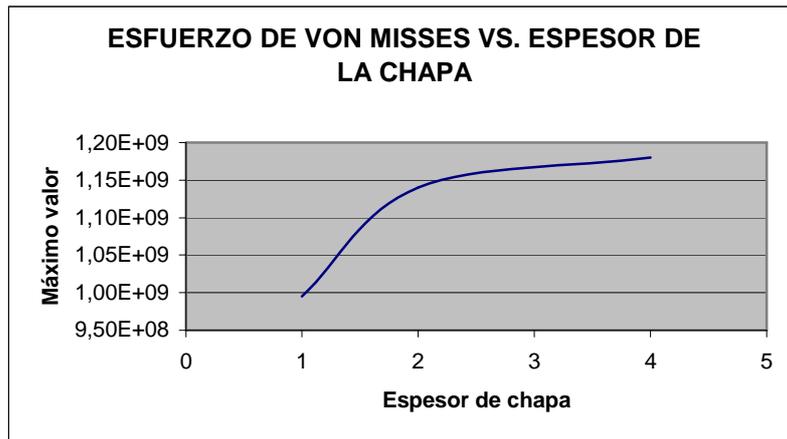
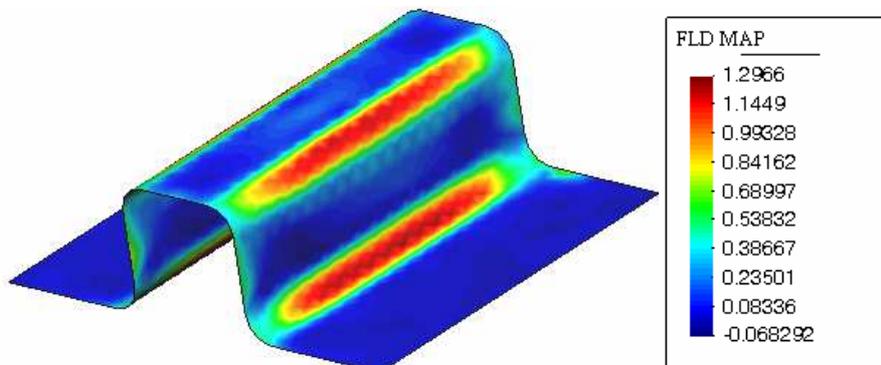


Figura 4.33 Curva Esfuerzo de Von Misses vs. Espesor de la chapa.

En esta figura se comprueba una vez más que al aumentar el espesor de la chapa aumentan los esfuerzos. En este caso, los esfuerzos de Von Misses, ofrecen una información confiable de cuales son las condiciones más propensas a fallas.

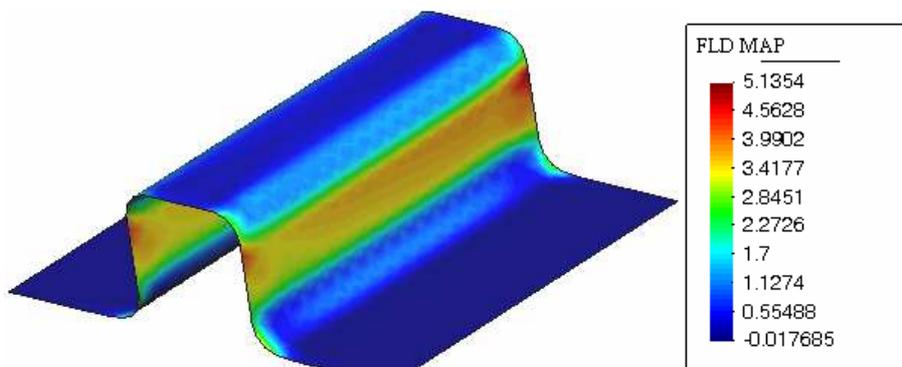
#### 4.4.4 MAPA FLD

Espesor 1mm



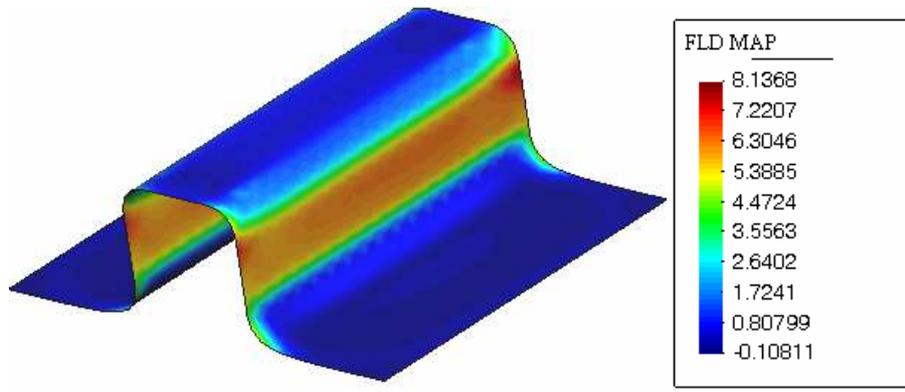
(a)

Espesor 2mm



(b)

Espesor 4mm



(c)

Figura 4.34 Mapa FLD: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm

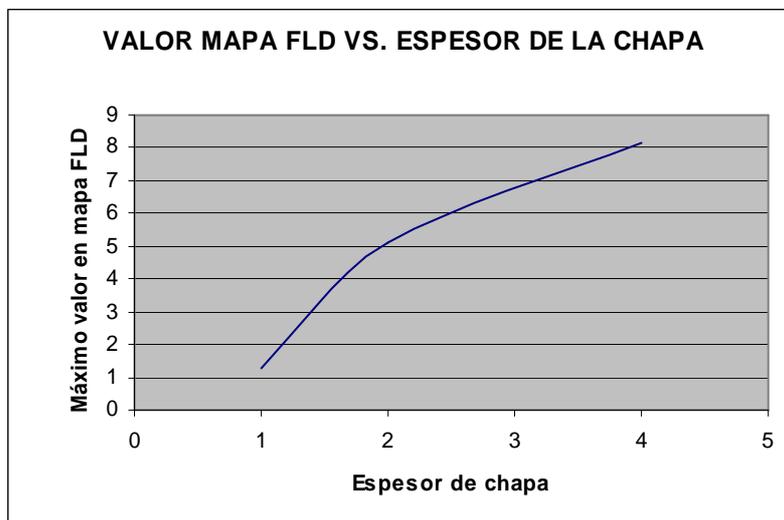
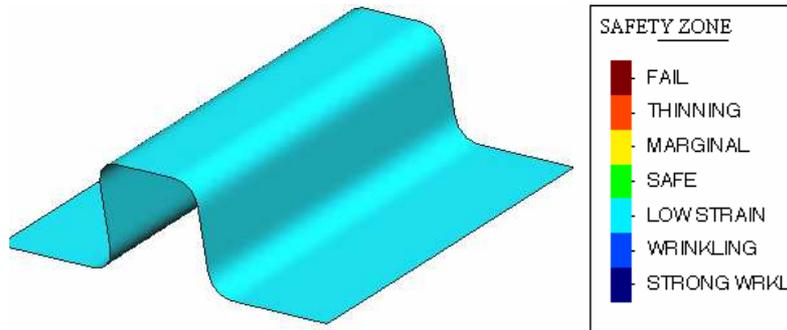


Figura 4.35 Curva FLD vs Espesor de chapa

En la figura 4.35 al aumentar el espesor de la chapa, el máximo valor del límite FLD aumenta. Como las deformaciones son mayores, al aumentar el espesor, estas tienden a acercarse al límite de deformación FLD.

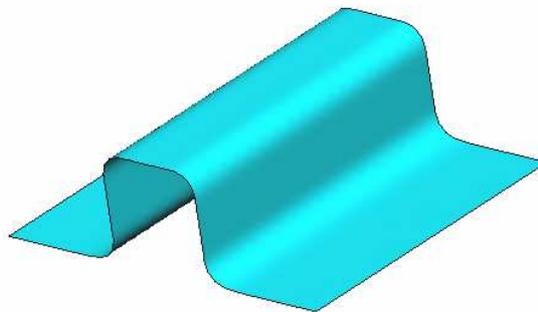
#### 4.4.5 CALIDAD DE CONFORMADO

Espesor 1mm



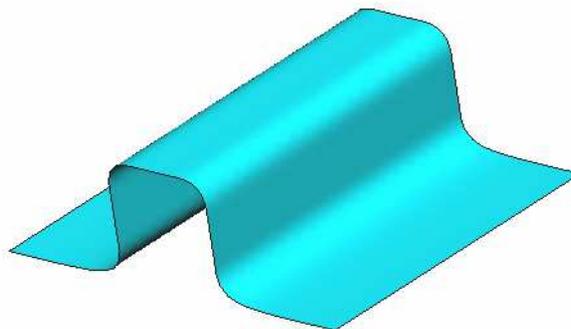
(a)

Espesor 2mm



(b)

Espesor 4mm



(c)

Figura 4.36 Calidad de formado: (a) 1mm, (b) 2mm, (c) 4mm

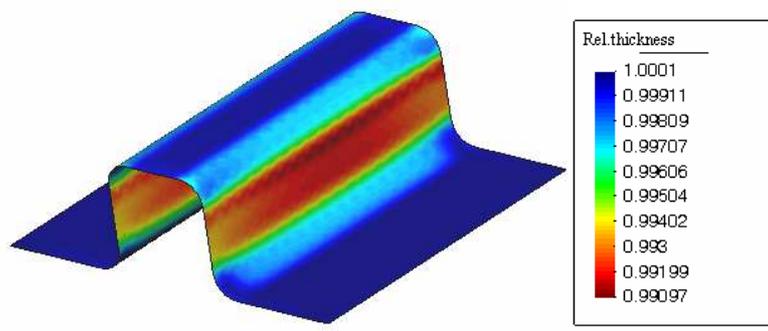
Como se observa en la figura 4.36, la calidad de conformado para los tres casos es aceptable, es decir al final del proceso no se va a tener fallas en el material. El estado de bajos esfuerzos garantiza que no se presenten fallas, ni fisuras, ni arrugas en la forma final.

## 4.5 COMPARACIÓN DE MODELOS AL VARIAR EL TIPO DE MATERIAL DE LA CHAPA.

Para analizar el comportamiento de la chapa al variar el tipo de material se ha escogido los siguientes: Aluminio, Acero de Bajo Carbono y Acero Inoxidable. Luego de las simulaciones respectivas, se obtienen los siguientes resultados:

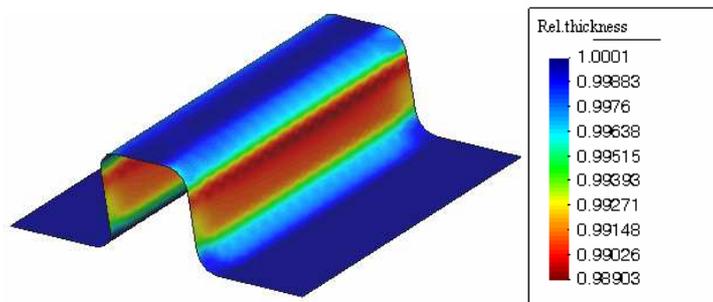
### 4.5.1 ESPESOR RELATIVO

Aluminio



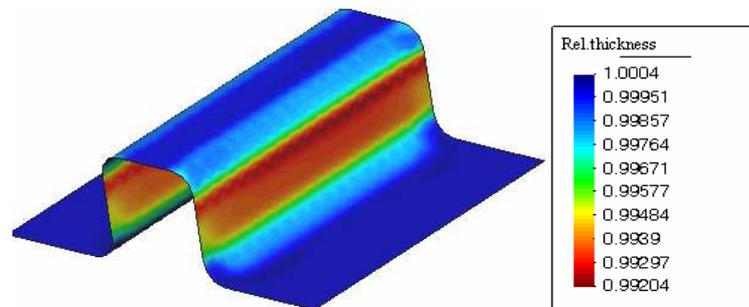
(a)

Acero de bajo carbono



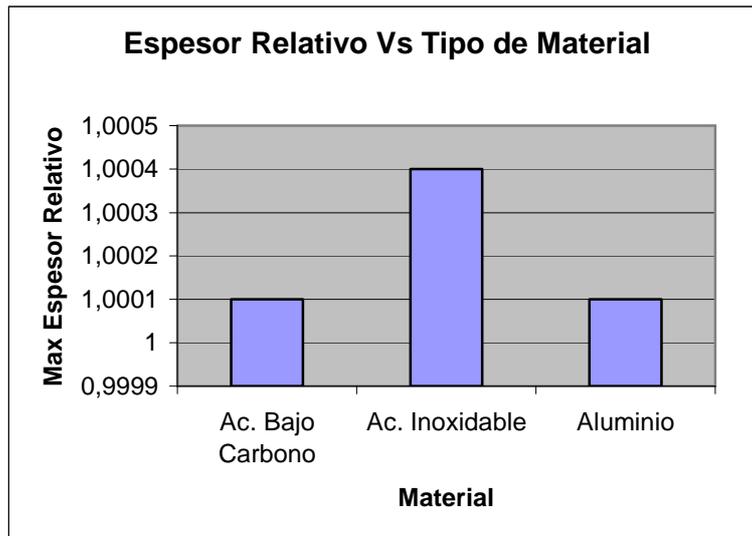
(b)

Acero Inoxidable

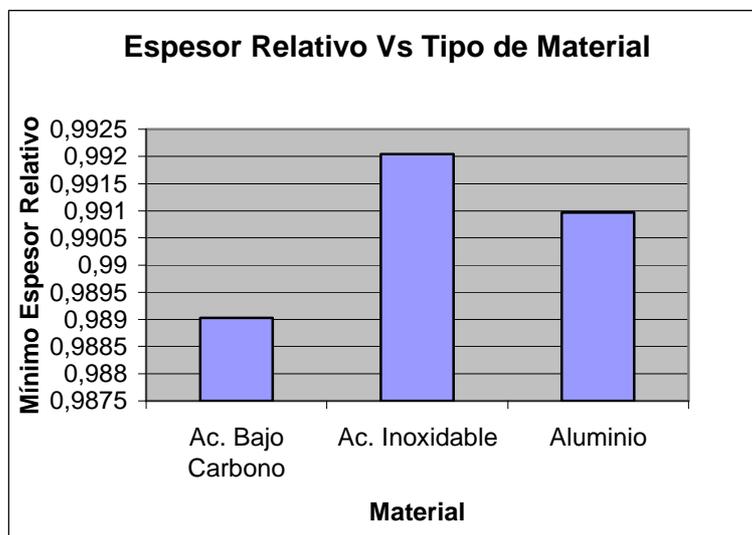


(c)

Figura 4.37 Espesor relativo: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable



(a)



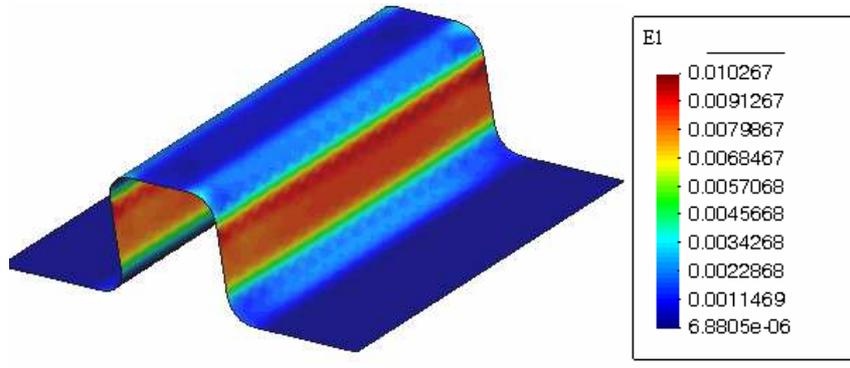
(b)

Figura 4.38 Análisis Espesor relativo: (a) Máxima variación, (b) Mínima variación

Como se puede observar en la figura 4.38, el material que presenta la menor reducción de espesor de estos tres materiales, es el acero inoxidable (fig 4.38b) pero tiene un alto nivel de zonas con espesores mayores a 1, el acero de bajo carbono presenta mayores zonas con espesores menores a 1, es un comportamiento contrario al del Ac. Inoxidable; finalmente el aluminio es el material que tiene una superficie más homogénea, es decir la diferencia entre los valores máximo y mínimo de variación es menor en comparación con los anteriores materiales.

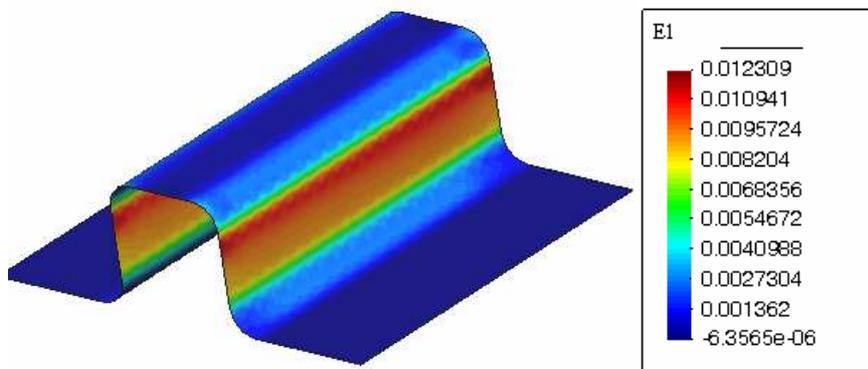
## 4.5.2 MAYOR DEFORMACION PRINCIPAL

Aluminio



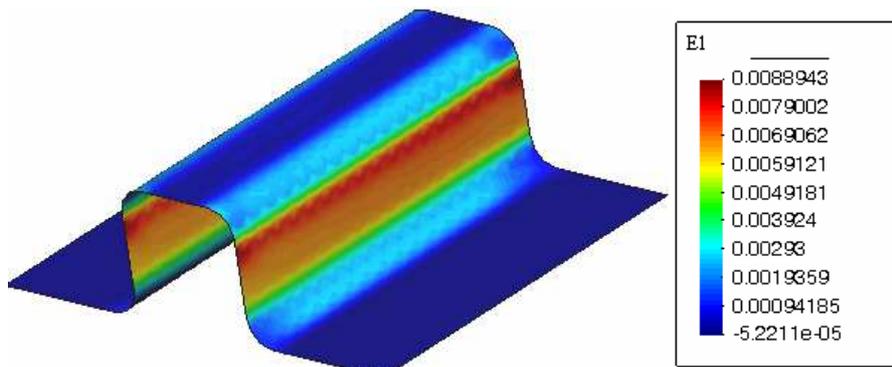
(a)

Acero de bajo carbono



(b)

Acero inoxidable



(c)

Figura 4.39 Deformación principal: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable

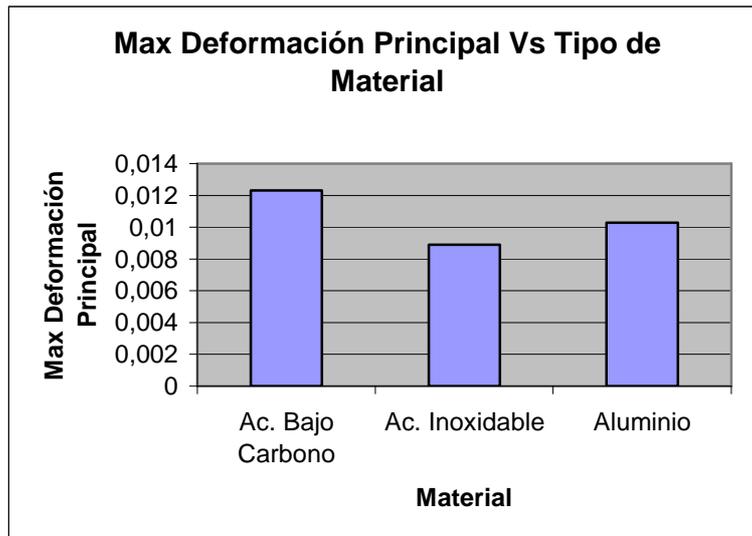
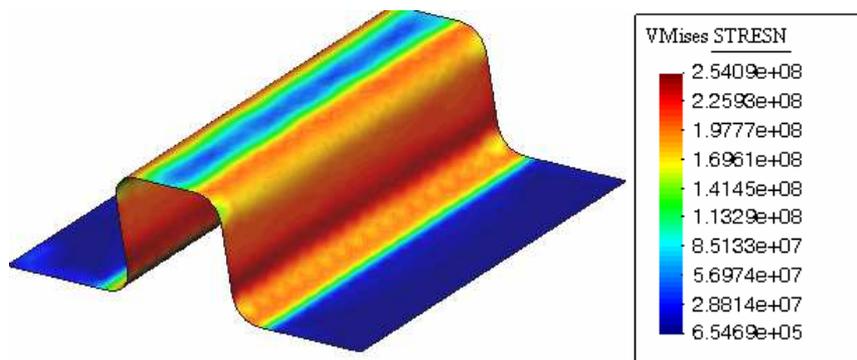


Figura 4.40 Gráfico Deformación principal vs. Tipo de material

En este gráfico, se puede ver que el material que presenta mayor deformación es el acero de bajo carbono en comparación con los dos restantes materiales cuando se someten a las mismas condiciones de trabajo. Esto puede ser resultado de la ductilidad de cada material y como se pudo ver en la fig. 4.38b, el acero de bajo carbono presenta el menor espesor lo que significa una mayor deformación.

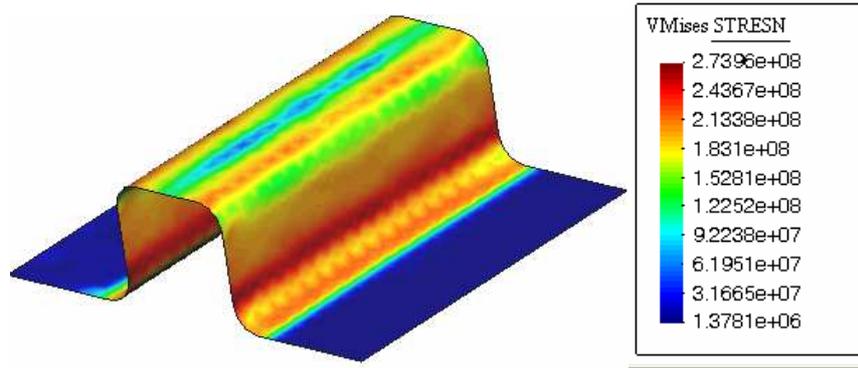
#### 4.5.3 ESFUERZO DE VON MISES

Aluminio



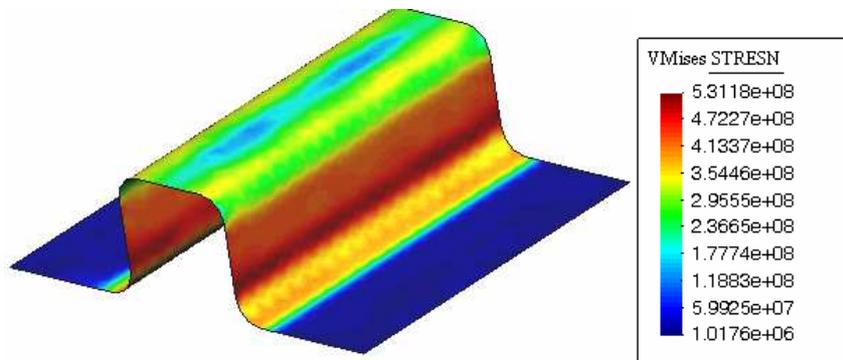
(a)

Acero de bajo carbono



(b)

Acero inoxidable



(c)

Figura 4.41 Esfuerzo de Von Mises: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable

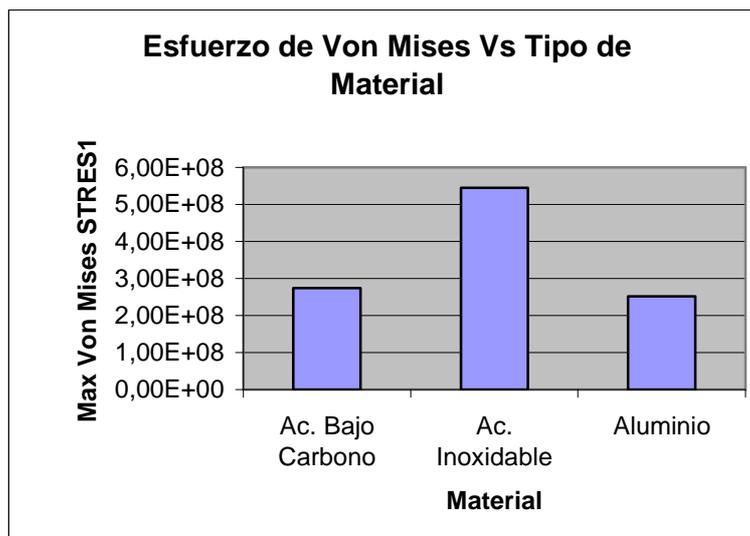


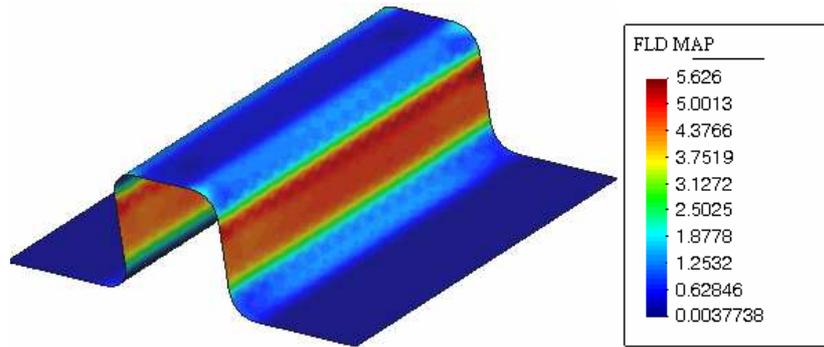
Figura 4.42 Gráfico Esfuerzo de Von Mises vs Tipo de material

En la figura 4.42 se puede ver que el material que presenta un esfuerzo de Von Mises mayor a los dos restantes es el acero inoxidable, esto debido a que este

acero, por sus propiedades, es el que presenta mayor resistencia a la deformación, por lo que los esfuerzos para lograr esto deben ser mayores que el acero de bajo carbono y del aluminio en ese orden. Estos valores de esfuerzo mayores no significan necesariamente una mayor deformación.

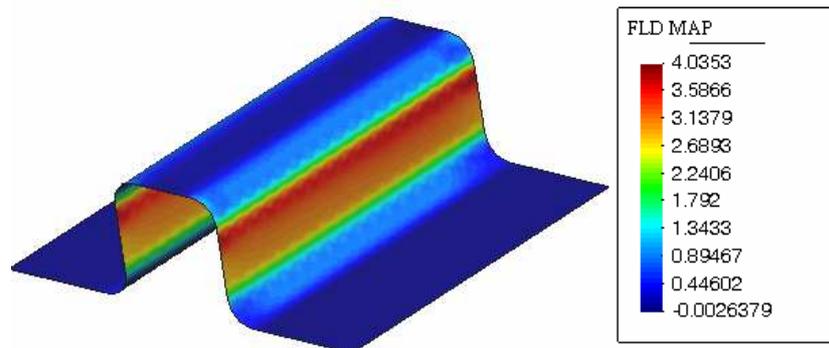
#### 4.5.4 MAPA FLD

Aluminio



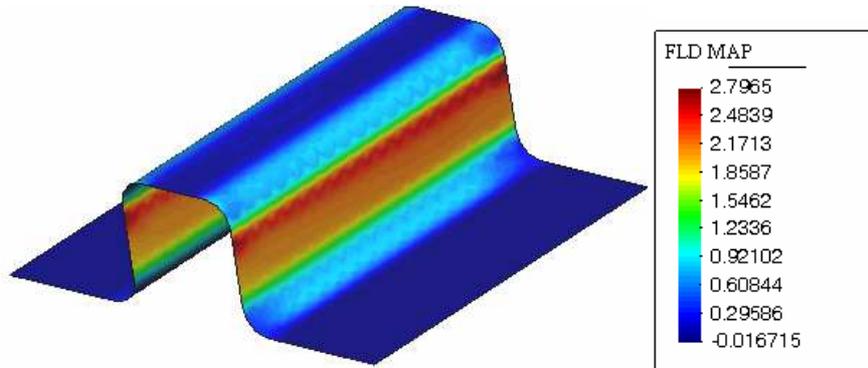
(a)

Acero de bajo carbono



(b)

Acero inoxidable



(c)

Figura 4.43 Mapa FLD: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable

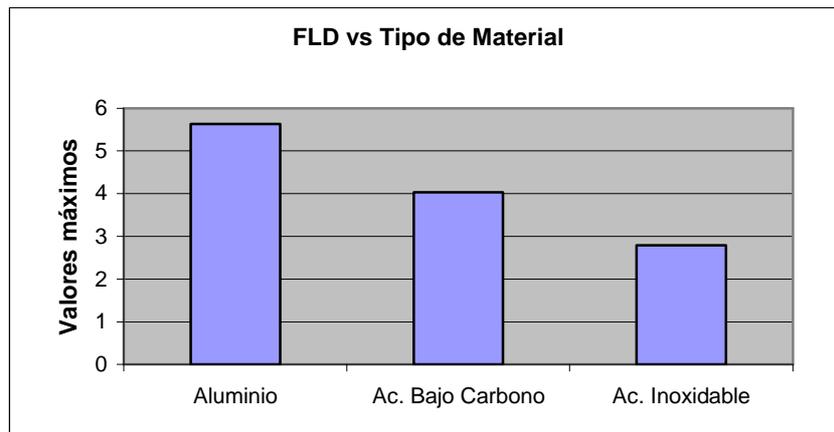
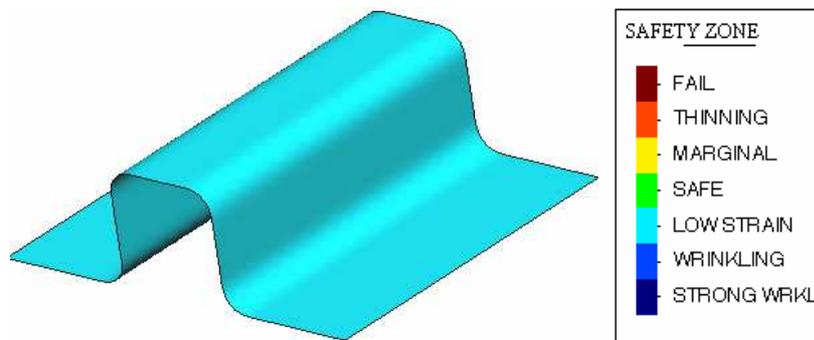


Figura 4.44 Gráfico FLD vs. Tipo de Material

La figura 4.44 muestra que el aluminio tiende a acercarse más al límite de deformación que los dos materiales restantes ya que este material tiene menor resistencia a la deformación que los otros dos.

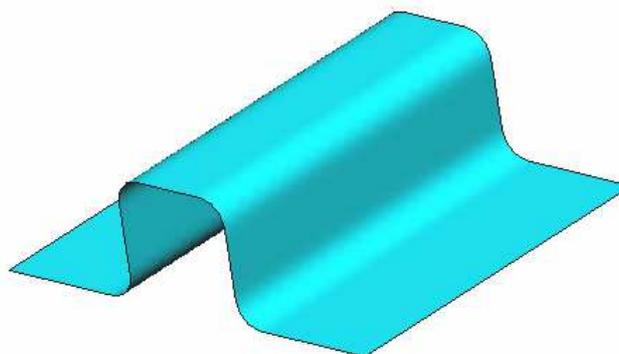
#### 4.5.5 CALIDAD DE CONFORMADO

Aluminio



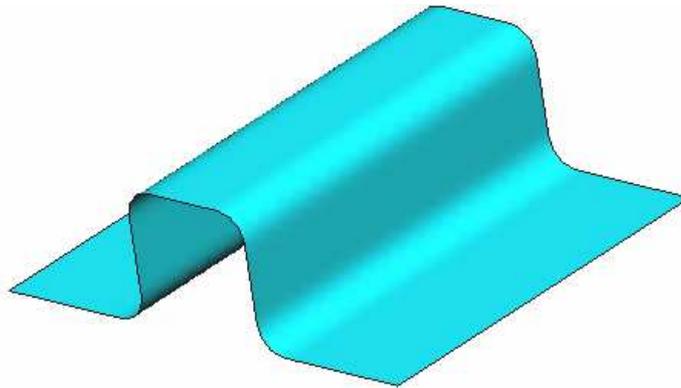
(a)

Acero de bajo carbono



(b)

Acero inoxidable



(c)

Figura 4.45 Calidad de formado: (a) Aluminio, (b) Ac. Bajo carbono, (c) Ac. Inoxidable

Como se observa en la figura 4.45, la calidad de conformado para los tres casos es la misma, es decir al final del proceso no se va a tener fallas en el material independientemente del tipo de material que se utilice en la chapa y a las mismas condiciones de conformado. Los tres materiales presentan un estado de bajos esfuerzos lo que garantiza que no se presenten fallas, ni arrugas al final del proceso.

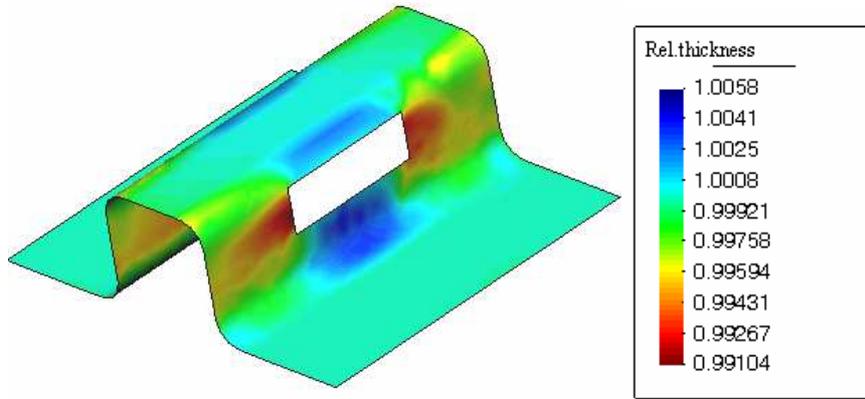
#### **4.6 COMPARACIÓN DE MODELOS AL REALIZAR DOS AGUJEROS EN LAS PAREDES DEL CANAL.**

Para analizar el comportamiento de la chapa se han escogido los siguientes cambios en la geometría de la misma: se ha perforado la chapa con diferentes figuras geométricas como; un rectángulo de 120 X 40mm, un agujero circular de diámetro 60mm y un rombo de 30 x 30mm, los cuales se ubicarán en las paredes del canal.

Luego de las simulaciones respectivas para cada uno de los casos, se obtienen los siguientes resultados:

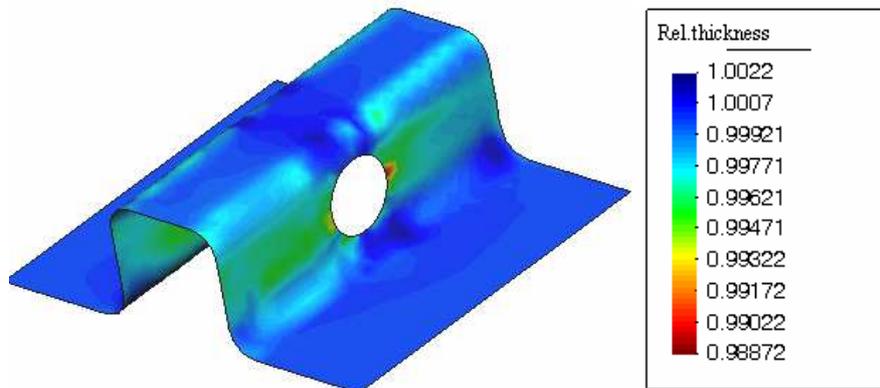
#### 4.6.1 ESPESOR RELATIVO

Agujero rectangular



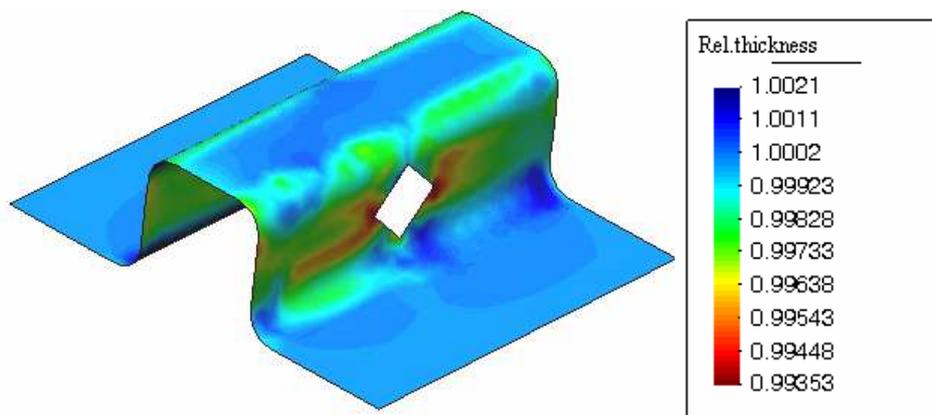
(a)

Agujero circular



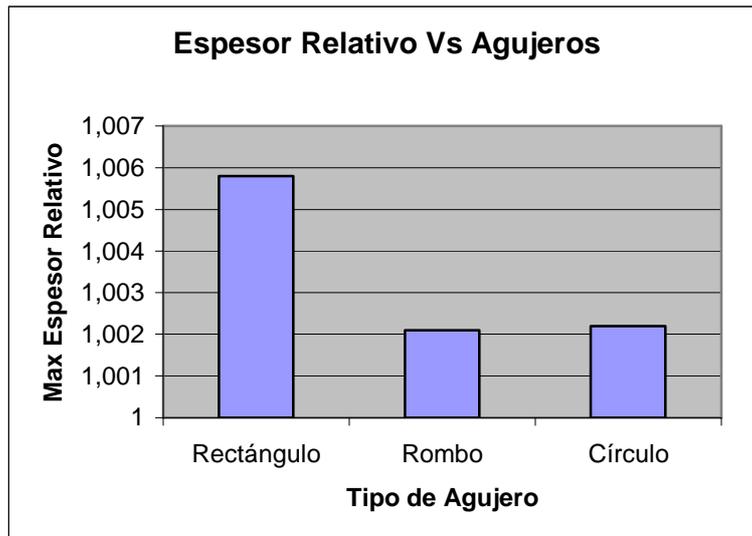
(b)

Agujero romboidal

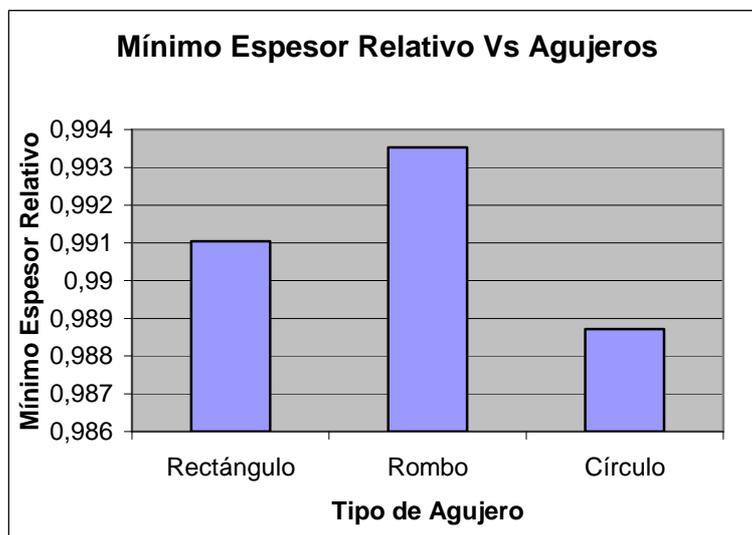


(c)

Figura 4.46 Espesor relativo: a) rectángulo, b) círculo  
c) rombo.



(a)



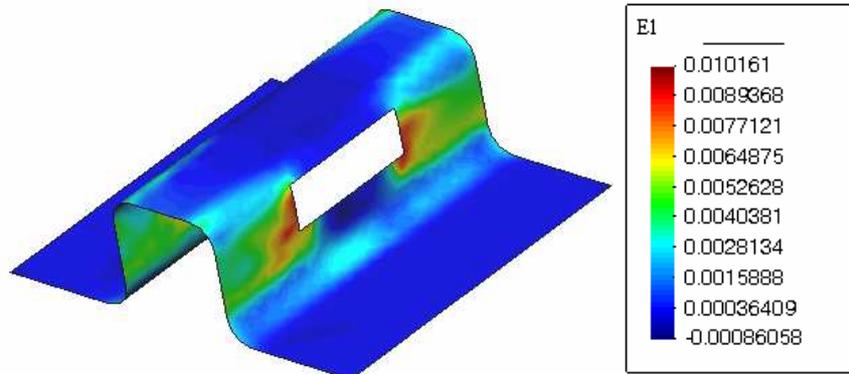
(b)

Figura 4.47 Análisis espesor relativo: a) Máximo espesor  
b) Mínimo espesor

La figura 4.47 muestra que en el caso del agujero circular se presenta mayor reducción de espesor en comparación con los dos restantes que presentan concentradores de esfuerzos, al analizar esta situación nos valemos de la figura 4.46, y se tiene que la figura (b) presenta una pequeña zona con este valor mínimo de espesor, en cambio en la figura (a) las zonas con este valor mínimo son mucho más grandes en comparación con las figuras (b) y (c). Por esta razón, no se puede confiar solo por esta variable para la toma de decisiones, sino que se debe tener en cuenta otros resultados.

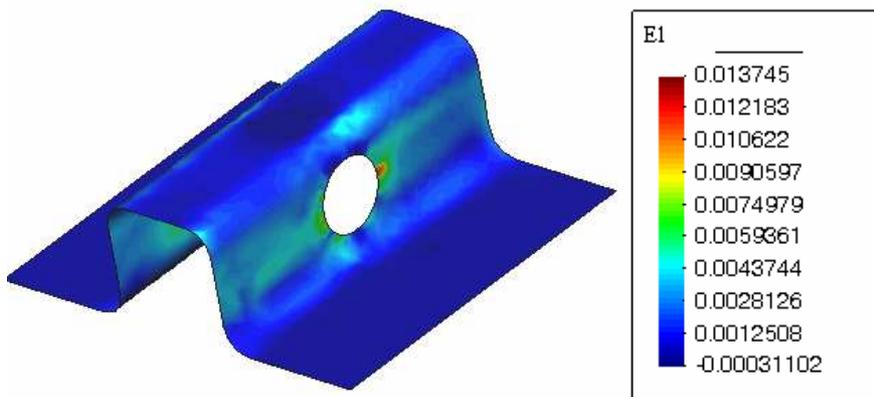
## 4.6.2 DEFORMACION PRINCIPAL

Agujero rectangular



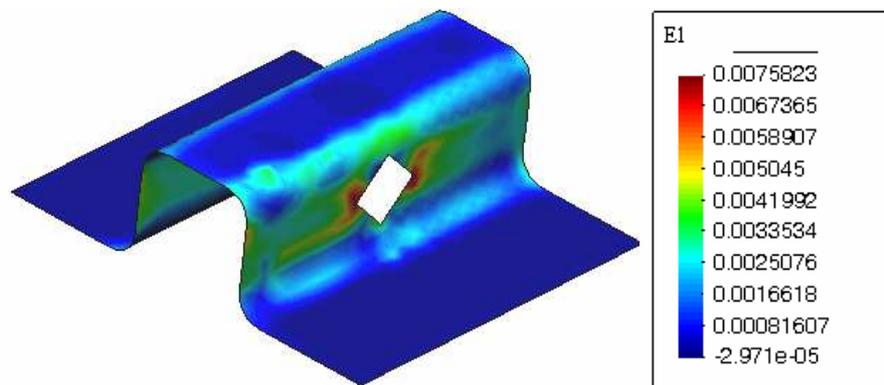
(a)

Agujero circular



(b)

Agujero romboidal



(c)

Figura 4.48 Deformación principal: a) rectángulo, b) círculo, c) rombo.

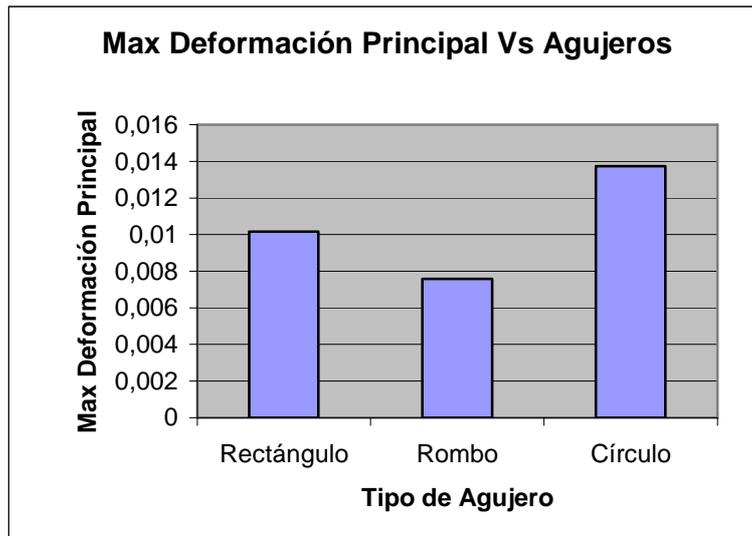
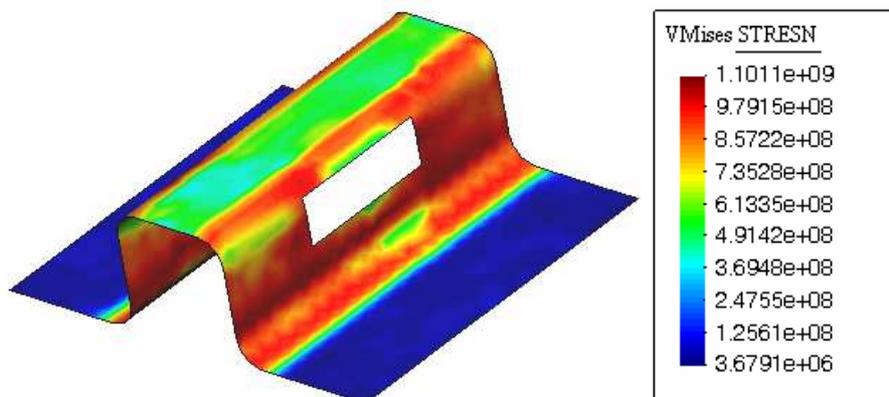


Figura 4.49 Gráfico Deformación principal vs. Tipo de agujeros

En la figura 4.49 se puede observar que la mayor deformación principal se presenta cuando se tiene un agujero circular, como se observa en la fig. 4.48, la zona de mayor deformación es mínima en el caso (b) comparado con las figuras (a) y (c). Para este caso muy en particular, estos resultados no son los que se esperaba, esto puede deberse a las dimensiones de los agujeros y al cambiar estas también pueden cambiar los resultados.

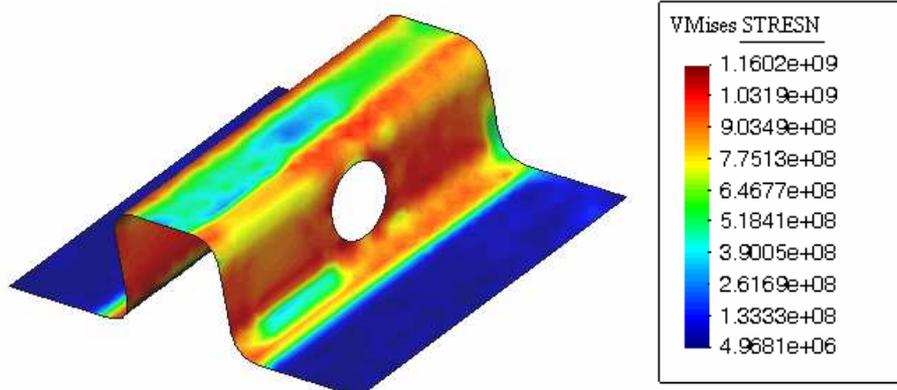
#### 4.6.3 ESFUERZOS DE VON MISES

Agujero rectangular



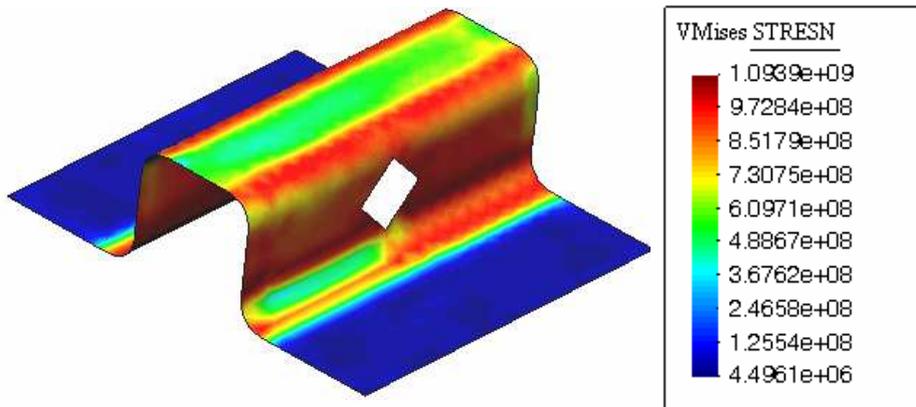
(a)

Agujero circular



(b)

Agujero romboidal



(c)

Figura 4.50 Esfuerzos de Von Mises: a) rectángulo, b) círculo  
c) rombo.

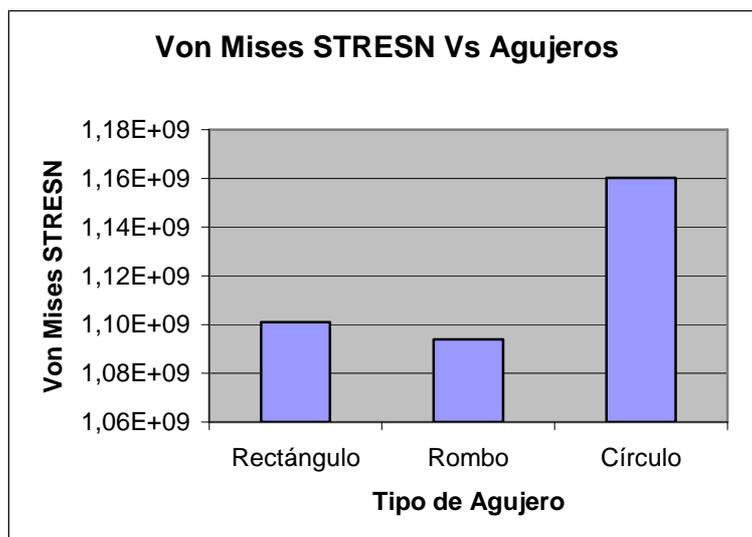
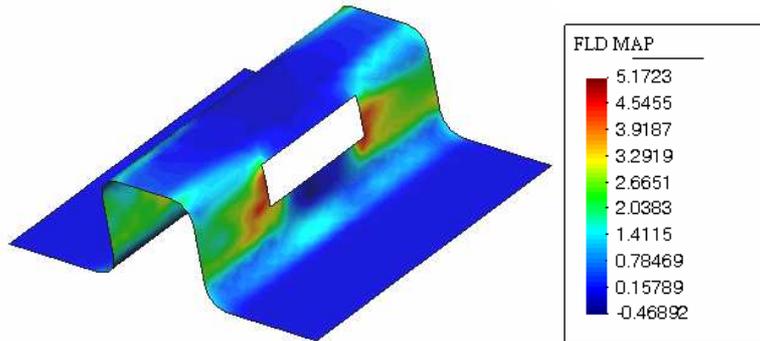


Figura 4.51 Gráfico Esfuerzo de Von Mises vs. Tipo de agujeros

En la figura 4.51 se observa que los esfuerzos de Von Mises son mayores en el caso del canal con agujero circular, esto se debe a que como se observó en los casos anteriores, las dimensiones del agujero circular permiten este comportamiento.

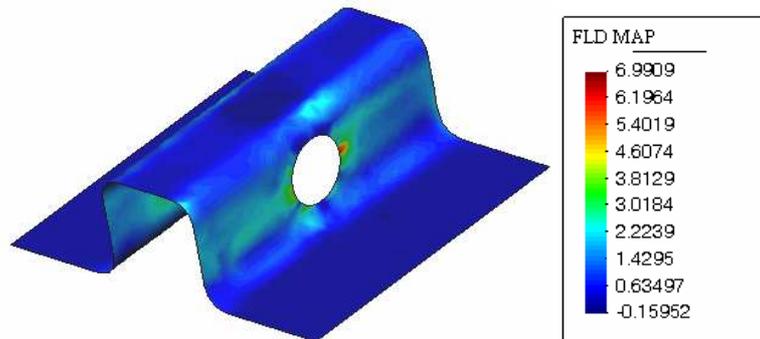
#### 4.6.4 MAPA FLD

Agujero rectangular



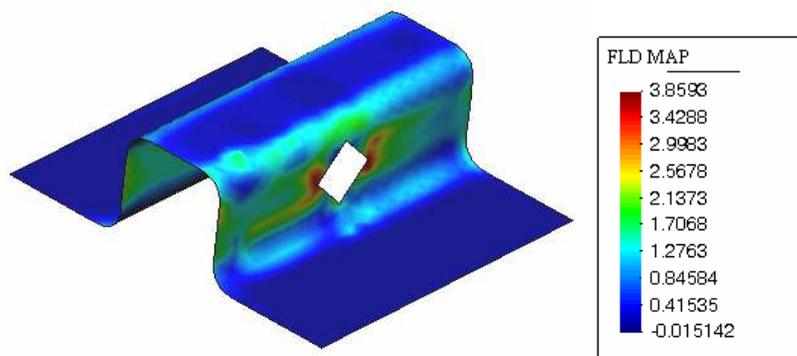
(a)

Agujero circular



(b)

Agujero romboidal



(c)

Figura 4.52 Mapa FLD: a) rectángulo, b) círculo  
c) rombo.

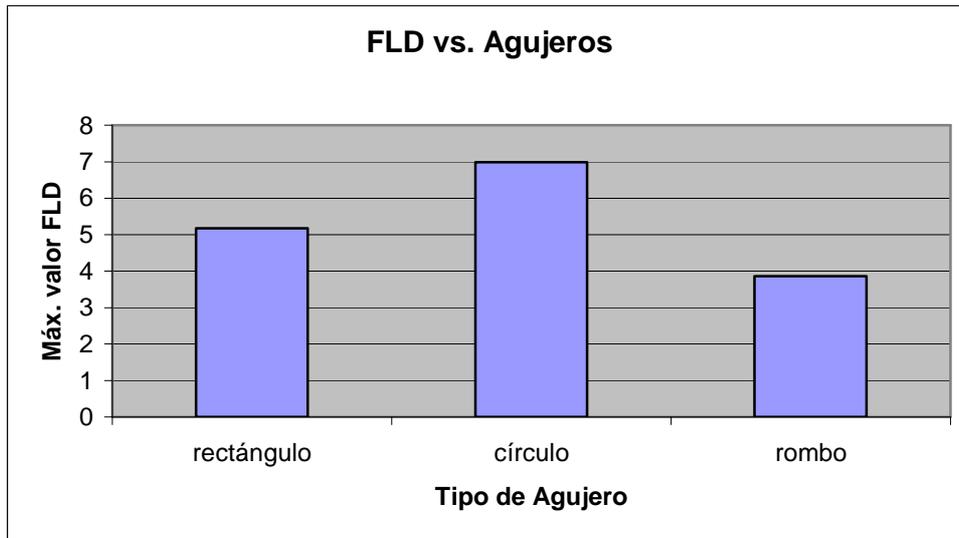
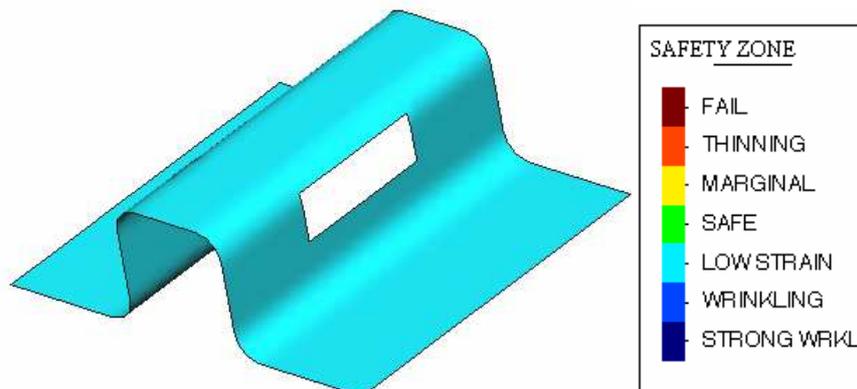


Figura 4.53 Gráfico FLD vs. Tipo de agujeros

Como se observa en la figura 4.53 el valor que más se aproxima al límite FLD es en el caso del agujero circular, esto significa que presenta mayores deformaciones y esfuerzos en comparación con los dos casos restantes, confirmando una vez más los resultados obtenidos en la figura 4.51.

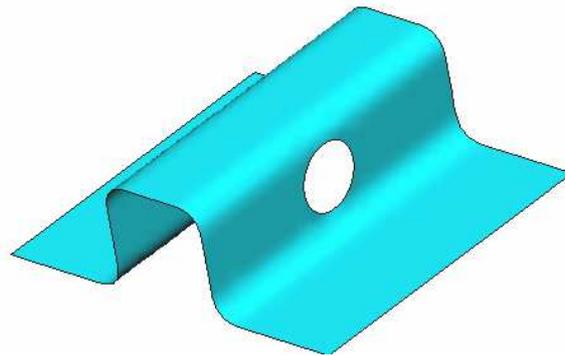
#### 4.6.5 CALIDAD DE CONFORMADO

Agujero rectangular



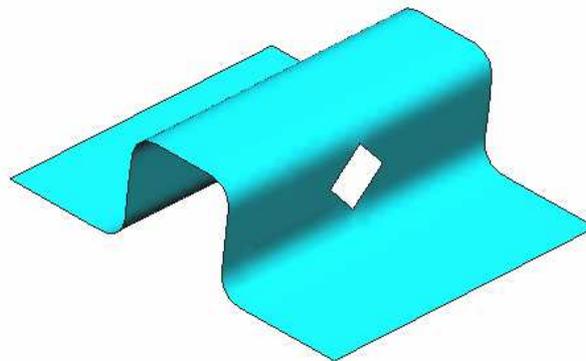
(a)

Agujero circular



(b)

Agujero romboidal



(c)

Figura 4.54 Calidad de conformado: a) rectángulo, b) círculo  
c) rombo.

Para los tres casos se tiene un estado de bajos esfuerzos (Low strain), lo que significa que a las mismas condiciones de conformado, no se va presentar fallas en ninguna de las tres simulaciones.

#### **4.8 EJEMPLO DE SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE ESTAMPADO CUYO RESULTADO ES LA FALLA DEL MATERIAL**

El objetivo de este tema es mostrar como aparecen los resultados de una simulación, cuyos parámetros han sido modificados de manera que al final, el proceso de estampado no sea exitoso.

Esto se realiza con el fin de observar y comparar estos resultados con otros donde no se presenten fallas de ninguna índole y, consecuentemente obtener las conclusiones que permitan tomar las mejores decisiones en cualquier proceso de simulación

Para llevar a cabo dicho propósito, se ha tomado una geometría similar a la planteada en los capítulos 3 y 4; y se han modificado ciertos parámetros con el fin de lograr que el material falle, los cuales se presentan a continuación:

Espesor:	2mm
Velocidad:	1 m/s
Fuerza del pisador:	15 Ton
Radio de curvatura:	5mm
Fuerza frenos:	$3 \times 10^4$ N/m
Material:	Acero de Bajo Carbono. (FeP04 A)
Propiedades del material:	Módulo de Young: 210 GPa
	Densidad: 7800 Kg/m <sup>3</sup>
	Coefficiente de Poisson: 0.3
	Límite elástico: 177 MPa.

Con estos parámetros se logra que el material falle durante la simulación. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

#### 4.8.1 FORMA FINAL

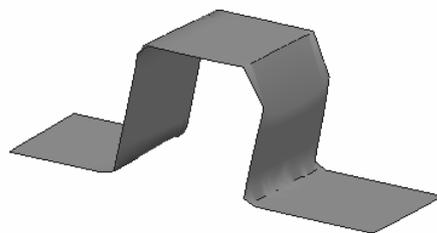


Figura 4. 55 Visualización de la forma final.

Como se observa, el programa realiza un ligero cambio de forma en el sitio donde se ubica la falla. Como falla se entiende la fractura o rotura del material durante la conformación. En este caso, este cambio de forma está dado por una inclinación ubicada en la parte superior derecha del canal.

#### 4.8.2 ESPESOR RELATIVO

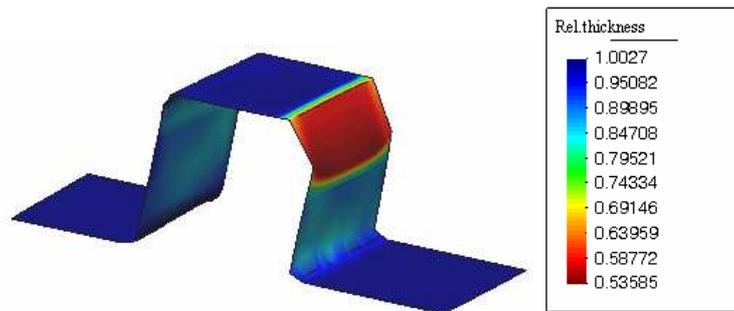


Figura 4.56 Espesor relativo.

En la tabla de valores se observa que el mínimo valor en color rojo es 0.53585, lo que significa una pérdida de espesor de cerca del 50% en este sector, y debido a los esfuerzos que actúan sobre toda la chapa, el material no resiste y se rompe (falla) en esta zona.

#### 4.8.3 MAYOR DEFORMACIÓN PRINCIPAL

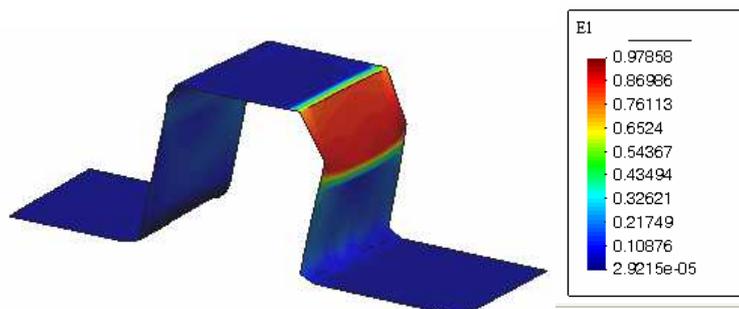


Figura 4.57 Mayor deformación principal.

En la figura 4.57, se puede ver que estos valores difieren mucho de los valores que se presentan en los procesos que no fallan. Así, los máximos valores en esta figura oscilan entre 0.76113 y 0.97858, y en los demás casos (ver figuras 4.3, 4.12, entre otras) oscilan entre 0.03089 y 0.039731.

#### 4.8.4 ESFUERZO DE VON MISSES

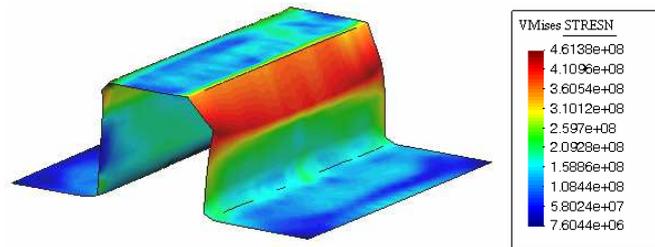


Figura 4.58 Esfuerzo de Von Mises.

#### 4.8.5 MAPA FLD

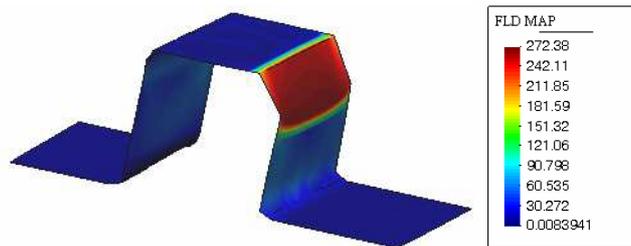


Figura 4.59 Mapa FLD.

En este caso, como se observa los valores de la zona crítica superan el valor límite (100), por lo que se demuestra que el material falla en esta zona.

#### 4.8.6 CALIDAD DE CONFORMADO

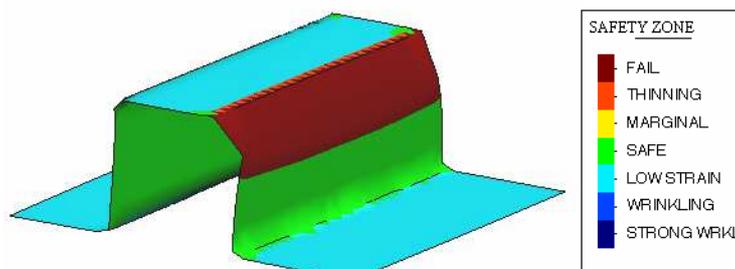


Figura 4.60 Calidad de conformado.

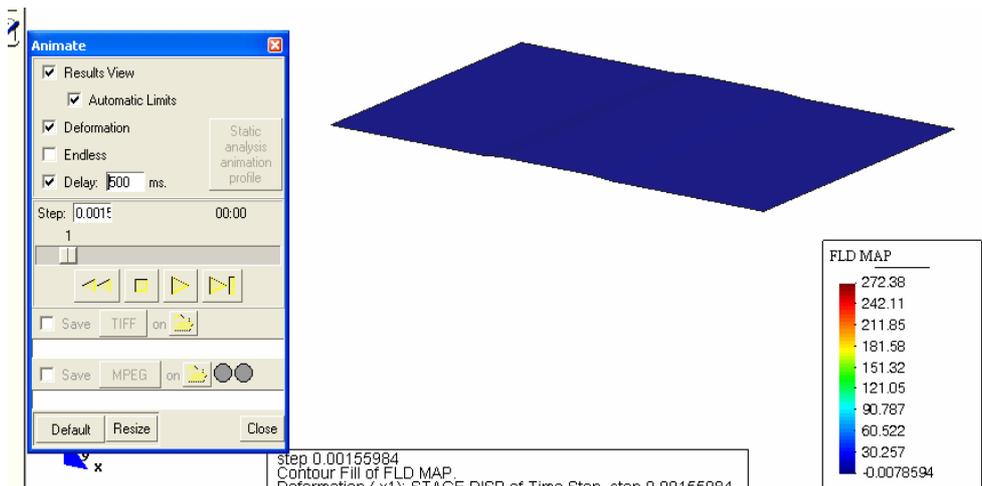
Como se puede observar, en esta figura el programa confirma la zona de falla (en color marrón), es decir la que no soportó los mayores esfuerzos y por lo tanto presentó las mayores deformaciones. Las zonas en color verde (Safe) soportan grandes esfuerzos, pero estos no son suficientes para hacer fallar al material.

#### 4.8.7 VISUALIZACIÓN ANIMADA DE LA SIMULACIÓN.

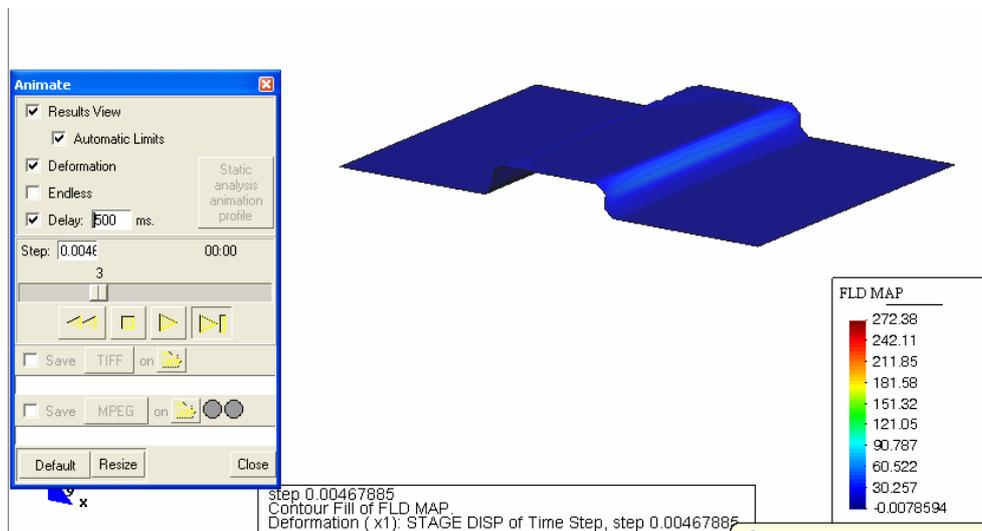
A continuación se detalla paso a paso, una animación que permite observar como se desarrolló la simulación durante el proceso de estampado, en este ejemplo de falla.

Esta animación fue dividida en “10 pasos”, con el fin de poder identificar el momento en el cual el material falla, que en este caso se presenta cerca del final del proceso.

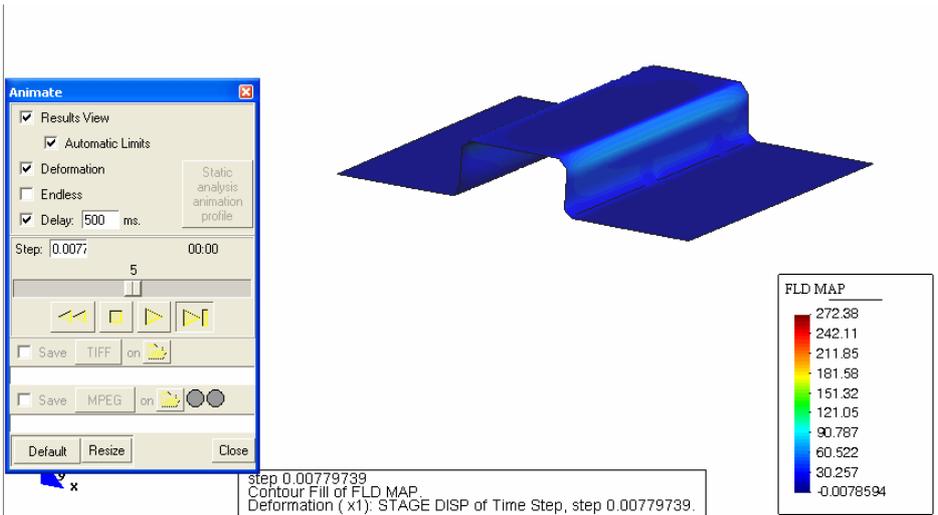
NOTA: Como en los primeros siete pasos no ocurre la falla, se ha prescindido de algunos de ellos: el segundo, cuarto y sexto pasos, con motivo de tener una mejor visualización.



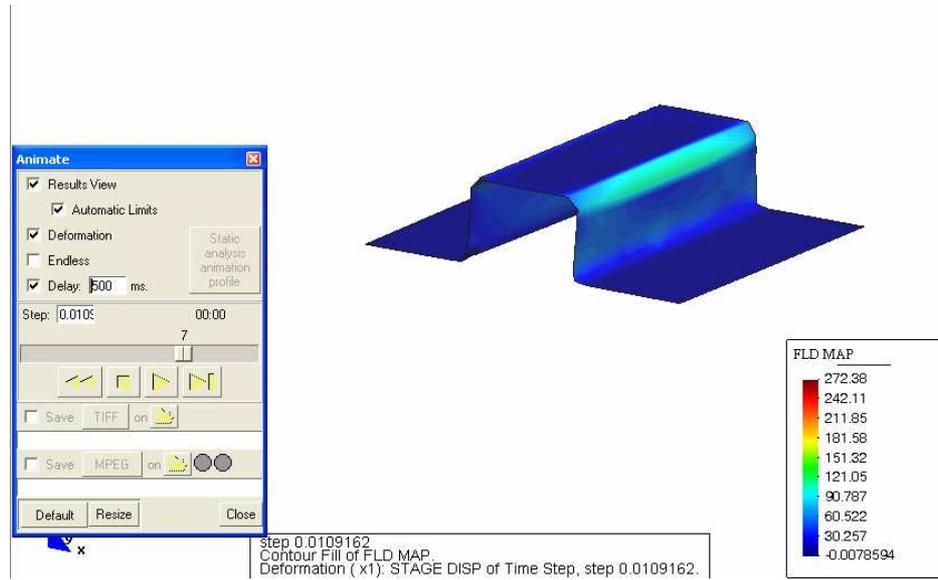
Primer Paso



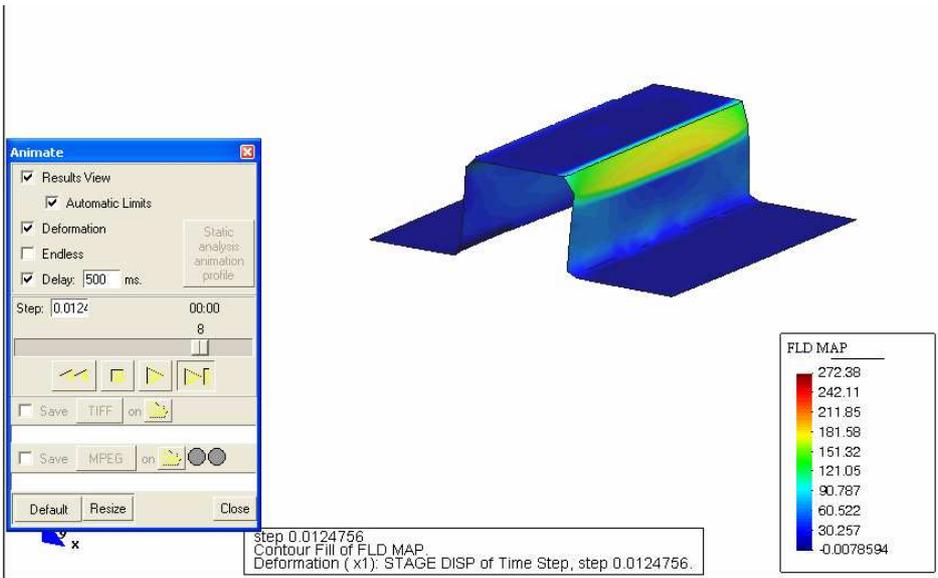
Tercer Paso



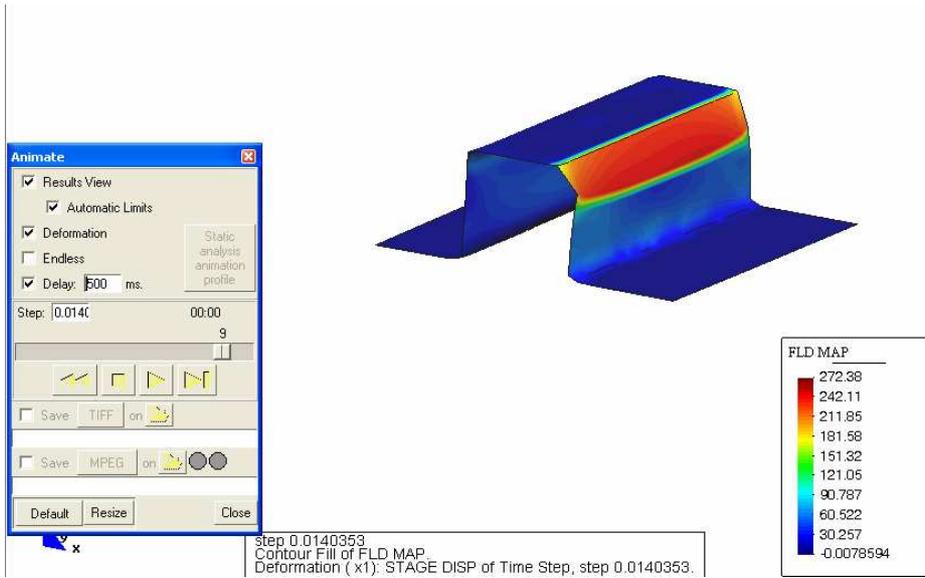
Quinto Paso



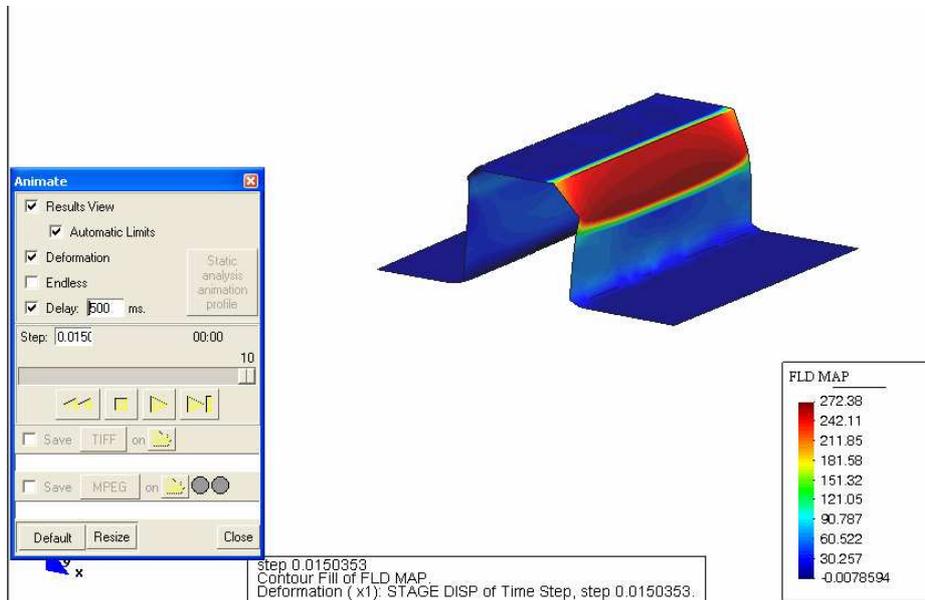
Séptimo Paso



Octavo Paso



Noveno Paso



Décimo Paso

Figura 4.61 Visualización de los pasos de la animación.

# CAPITULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- El uso de programas computacionales basados en el Método de los Elementos Finitos, facilita el cálculo de deformaciones y esfuerzos en comparación con los métodos de cálculo analíticos, que aparte de ser complicados y tediosos, ocupan un tiempo considerable para la resolución de problemas de ingeniería. En este caso Stampack ofrece una gran ayuda en procesos de conformado mecánico como son el estampado y la embutición.
- Una de las principales ventajas, y quizás la más poderosa de este programa, es que permite realizar cuantas simulaciones se requieran para satisfacer la necesidad de optimizar un proceso. Variando todos o algunos de los parámetros que caracterizan al problema, se llega a predecir de una manera casi exacta el comportamiento del material a ser conformado, y de esta manera obtener una solución que permita ejecutar un proceso de estampado con mayores probabilidades de éxito.
- El programa Stampack ofrece una interfaz gráfica que facilita el entendimiento y manejo de sus funciones, así como una adecuada visualización de resultados. Esta ventaja del programa que viene dada en gran medida a la funcionalidad de sus comandos y opciones de trabajo permite modelar el problema de una forma sencilla y eficaz.
- La visualización de resultados permite analizar la información de manera general y específica de zonas críticas, ya que al existir varios formatos de resultados como valores numéricos, escalas de color, y curvas con

respecto al tiempo y combinaciones de estas, ayudan a obtener una adecuada concepción del problema.

- Stampack permite además, reducir el número de intentos experimentales con un mínimo riesgo de que se produzcan fallas en la forma final del material como roturas, arrugas o disminución excesiva del espesor. Como consecuencia de esto, los costos de investigación y desarrollo previos para la elaboración de un producto disminuirán de forma considerable.
- En cuanto tiene que ver a costos, la inversión para la adquisición de este software por parte de una empresa o industria, parecería en principio relativamente considerable. Sin embargo el ahorro de recursos a largo plazo, que se lograría por la sustitución de métodos nada económicos como el de prueba y error, que generan grandes pérdidas, justificaría dicha inversión. Además, el trabajo en conjunto de la industria con la Universidad, mediante convenios, permitiría reducir aún más los costos y lograr grandes beneficios para ambas partes.
- El potencial de estos programas basados en Elementos Finitos permite realizar proyectos de investigación en diferentes áreas; a nivel académico, como parte de la formación de los estudiantes, y a nivel industrial, como un apoyo para el desarrollo de nuevas tecnologías.
- El presente trabajo pretende ser una base para el desarrollo de proyectos futuros, con el objetivo de que se utilice y aproveche todas las ventajas y bondades del programa Stampack; en simulaciones de proyectos más complejos o en combinación con otros procesos. Estos procesos podrían ser Embutición, Hidroconformado, Estirado y Plegado, los cuales forman parte de muchos procesos de producción de la industria de nuestro país.

- Es importante que la Universidad reconozca la importancia de los proyectos relacionados con este tipo de paquetes computacionales y se interese por su desarrollo, ya que el conocimiento y aplicación de este y otros programas, brindarán un valor agregado en la formación profesional de los estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional, ofreciendo así una ventaja competitiva con respecto a otras universidades del país.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

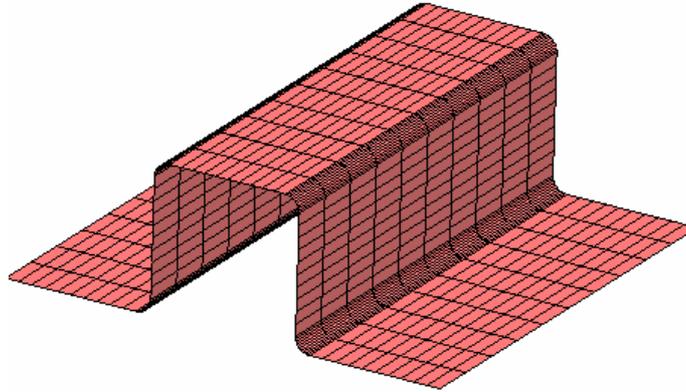
- Se recomienda continuar con el estudio, desarrollo y aplicación de este programa en otros procesos de conformado mecánico como: Hidroconformado, Estirado y Embutición Profunda, los cuales también se pueden simular en este programa y así obtener el máximo provecho de esta herramienta computacional.
- La universidad debe poner a disposición de los estudiantes y profesores cursos y seminarios relacionados con el estudio de este programa, con el fin de dar a conocer las ventajas que ofrece este paquete computacional y motivar la utilización de nuevas tendencias en la resolución de problemas de ingeniería.
- Se recomienda que para lograr mejores resultados de la investigación, desarrollo y aplicación de este tipo de programas computacionales, trabajen en conjunto Universidad e Industria, logrando de esta manera la optimización de recursos cuyo resultado será no solo el beneficio económico y académico, sino que también la Universidad tendrá la posibilidad de llevar a la práctica sus estudios e investigaciones y la Industria se beneficiará de una modernización en sus procesos y procedimientos. Y claro, todo esto en bien del progreso de la sociedad.
- Para encontrar la solución más adecuada a un problema de estampado se recomienda realizar la mayor cantidad de simulaciones cambiando

parámetros tanto de operación, geometría, y de diseño, con la finalidad que el resultado final sea un compendio de todos los resultados obtenidos con estas simulaciones.

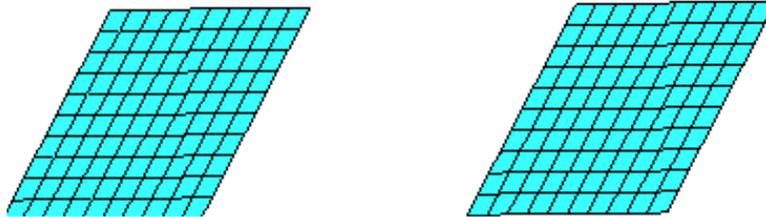
- Finalmente se recomienda a la Carrera de Ingeniería Mecánica utilizar este tipo de programas computacionales como herramientas auxiliares de las materias tradicionales y optativas, ofreciendo de esta manera nuevas técnicas de análisis y nuevos puntos de vista para la solución de problemas en ingeniería.

## REPRESENTACIÓN DE HERRAMIENTAS

FORMA MATRIZ



FORMA PISADOR



FORMA PUNZÓN

