

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Análisis numérico de procesos de conformado  
incremental monopunto en chapas de aluminio  
AA 7075-O

Autor: Francisco José Ruiz Ferrete

Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Análisis numérico de procesos de conformado  
incremental monopunto en chapas de aluminio  
AA 7075-O**

Autor:

Francisco José Ruiz Ferrete

Tutor:

Andrés Jesús Martínez Donaire

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2014

Trabajo Fin de Grado: Análisis numérico de procesos de conformado incremental monopunto en chapas de aluminio AA 7075-O

Autor: Francisco José Ruiz Ferrete  
Tutor: Andrés Jesús Martínez Donaire

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2014

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*



# Agradecimientos

Me gustaría agradecer de manera especial a mis padres, hermana, y familia en general, ya que sin su ayuda, confianza y apoyo nada habría sido posible.

A mis amigos de confianza y a todo aquel que me aguantó en mi trato diario, por apoyarme y entenderme en cada paso dado.

En tercer lugar y también de forma importante a mi tutor y profesor Andrés, quien me ha ayudado, enseñado y facilitado todo lo necesario en la realización de este proyecto, tratándome desde el principio más que como alumno como a un amigo.

Finalmente, a los profesores e integrantes del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, por prestarme toda la ayuda necesaria y por su cordialidad.



## Resumen

Este trabajo trata sobre la creación de una serie de modelos numéricos de procesos de conformado incremental en chapas de aluminio 7075-O mediante un software basado en el método de los elementos finitos de carácter robusto, de gran aplicación industrial y de cálculo implícito; DEFORM<sup>TM</sup>-3D, que a su vez sirvan para caracterizar la influencia del diámetro de la herramienta de conformado en diferentes variables y en el aumento de la conformabilidad en el SPIF.

El proyecto está estructurado en cuatro capítulos de tal forma que en el primero se establecen los objetivos y se revisan los antecedentes y estudios acerca del SPIF, centrándonos en la creación de modelos numéricos, además de comentar los diferentes procesos de conformado incremental, las aplicaciones de éstos y hacer un breve análisis sobre la conformabilidad y el aumento de ésta en el proceso.

En una segunda parte se realiza una breve introducción al software elegido y se comenta todo el proceso hasta obtener resultados; diseño de modelos CAD, diseño de trayectoria de herramienta mediante programas CAM, implementación del material, condiciones de contorno y mallado, además de una breve exposición de todos los modelos previos a los finales.

En el tercer capítulo se resume de manera breve y concisa los diferentes aspectos experimentales usados en el proyecto y el desarrollo de un ensayo con el que comparar resultados.

Por último, se exponen los resultados en términos de fuerza, tensiones, deformaciones y diferentes variables geométricas tales como espesor y forma, realizando un análisis en cada apartado.

## **Abstract**

The main objective of this work is the creation of some numerical models about incremental sheet forming processes in aluminium 7075-O sheets through a software based on finite element method, DEFORM™-3D. This software is known for being robust, having a great industrial application and using implicit computation. These models also will be used to characterize the influence of forming tool diameter in different variables and in the enhancement of conformability in SPIF.

The work is structured in four sections so that in the first the objectives are established and the backgrounds and studies about SPIF are reviewed focusing on the creation of numerical models, also different ISF processes are commented, their applications and a brief review of conformability and his enhancement in this processes.

In the second section a brief introduction to the software is made and the complete process to obtain results is discussed, CAD models design, tool path design through CAM software, material implementation, boundary conditions and a brief exposition of all the previous models.

The third chapter resumes briefly different experimental aspects used in the work and the development of a test to contrast results.

Finally, the results in terms of force, stress, strains and different geometrical variables as thickness and form are exposed, carrying out an analysis in each section.





# Índice general

<b>1. Introducción .....</b>	<b>22</b>
<b>1.1. Antecedentes .....</b>	<b>23</b>
<b>1.2. Procesos de conformado incremental .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2.1. Spinning .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2.2. Conformado incremental monopunto o single point             incremental forming .....</b>	<b>26</b>
<b>1.2.3. Conformado incremental con herramienta opuesta .....</b>	<b>28</b>
<b>1.2.4. Two point incremental forming .....</b>	<b>28</b>
<b>1.2.5. Conformado incremental multietapa o multistage             Forming .....</b>	<b>29</b>
<b>1.3. Conformabilidad en el ISF .....</b>	<b>31</b>
<b>1.3.1. Diagrama límite de conformado o Forming Limit             Diagram (FLD) .....</b>	<b>31</b>
<b>1.3.2. Aumento de la conformabilidad en el ISF .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4. Aplicaciones del ISF .....</b>	<b>37</b>
<b>1.5. Objetivos .....</b>	<b>38</b>
<b>2. Herramientas numéricas y desarrollo computacional .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1. Implementación del modelo en DEFORM™-3D v10 .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1.1. Introducción a DEFORM™-3D v10 .....</b>	<b>40</b>
<b>2.1.2. Descripción del proceso completo .....</b>	<b>41</b>
<b>2.1.2.1. Material .....</b>	<b>42</b>
<b>2.1.2.2. Desarrollo CAD .....</b>	<b>43</b>
<b>2.1.2.3. Mallado .....</b>	<b>46</b>

2.1.2.4. Movimiento de la herramienta y desarrollo	
CAM .....	48
2.1.2.5. Condiciones de contorno .....	52
2.2. Modelos previos .....	53
3. Desarrollo experimental .....	57
3.1. Ensayo en SPIF .....	57
3.2. Medida de resultados .....	59
3.2.1. Medición de deformaciones por el método de patrón	
de círculos .....	59
3.2.2. Medición de características geométricas .....	61
4. Resultados y análisis .....	62
4.1. Fuerza en la herramienta .....	62
4.2. Tensiones .....	67
4.2.1. Tensiones principales y tensión equivalente .....	67
4.2.2. Tensión hidrostática .....	72
4.3. Deformaciones .....	78
4.4. Precisión geométrica .....	90
5. Conclusiones y desarrollos futuros .....	96
5.1. Conclusiones .....	96
5.2. Desarrollos futuros.....	97
6. Bibliografía .....	98

# Índice de figuras

<b>Figura 1.1- Spinning o conformado rotativo convencional</b> .....	<b>25</b>
<b>Figura 1.2- Shear spinning y deformación de un elemento siguiendo la Ley del seno.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 1.3- Representación del montaje en un proceso de conformado incremental monopunto</b> .....	<b>27</b>
<b>Figura 1.4- Esquema representativo del montaje en un proceso de IFWCT.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 1.5- Esquema representativo del montaje en los dos procesos de TPIF.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 1.6- Ejemplo de estrategia multietapa en un proceso de SPIF</b> .....	<b>30</b>
<b>Figura 1.7- Estrategia multietapa formulada por Skjoedt et al.(2008)</b> .....	<b>30</b>
<b>Figura 1.8- FLC de estricción para varios materiales</b> .....	<b>32</b>
<b>Figura 1.9- Curvas FLC para materiales dúctiles ( figura izquierda) y poco dúctiles (derecha). Vallellano et al.(2008)</b> .....	<b>32</b>
<b>Figura 10- Esquema de los ensayos de Marciniak (a), Nakazima (b), y diferentes geometrías de probetas en ensayos tipo Nakazima (c) Martínez Donaire (2012)...</b>	<b>33</b>
<b>Figura 1.11- Efectos de la cizalladura adicional en la conformabilidad. Línea inferior: tensión de fluencia normalizada. Línea inferior: deformación normalizada al inicio de la estricción. (n: coeficiente de endurecimiento). (Emmens et al. (2008)).....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 1.12- Ejemplo de deformaciones cíclicas dadas en un proceso de ISF (Emmens et al. (2008))</b> .....	<b>36</b>
<b>Figura 1.13- FLD para un proceso de embutición frente al de un proceso de SPI.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 1.14- Aplicaciones del ISF a la industria del automóvil. De izquierda a derecha: superficies reflexivas para faros, pieza anti vibraciones, silenciador. (Padrão et al. (2009))</b> .....	<b>37</b>
<b>Figura 1.15- Aplicaciones médicas del conformado incremental. (Padrão et al. (2009))</b> .....	<b>38</b>
<b>Figura 1.16- Geometría final de la chapa conformada.....</b>	<b>39</b>

<b>Figura 2.1- Interfaz gráfica correspondiente al pre-procesador de DEFORM-3D v10 .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 2.2- Esquema representativo del montaje experimental (DS Catia v5.20).....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 2.3- Brida Superior (DS Catia v5.20) .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 2.4- Matriz inferior o backing plate (DS Catia v5.20) .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 2.5- Montaje final en Deform 3D .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 2.6- Alzado de la geometría final de la chapa .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 2.7- Mallado en el primer modelo de herramienta de diámetro 10 mm....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 2.8- Modelo de la herramienta importado como archivo stl en Deform 3D tras la discretización .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 2.9- Modelo de trayectorias según: a) Máquina de control numérico de 2.5 ejes, b) máquina control numérico de 3 ejes (Lé Vãn Sỳ (2009)).....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 2.10- Generación de trayectoria de la herramienta mediante programa numérico en Matlab® .....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 2.11- Generación de trayectoria de la herramienta mediante z-level DS Catia v5.20 .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 2.12- Detalle del step down en la generación de la trayectoria de herramienta en DS Catia v5.20 .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 2.13- Resultados obtenidos suponiendo comportamiento plástico y material AA7075-T6 .....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 2.14- Desplazamientos y geometría final del modelo suponiendo comportamiento elastoplástico . .....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 2.15- Distribución de espesores en la geometría final del modelo con comportamiento elastoplástico .....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 2.16- Distribución de tensión media en la chapa en la interacción con la herramienta en el modelo elastoplástico.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 2.17- Muestra de fallo en el modelo simplificado de la chapa .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3.1- Montaje experimental en el ensayo .....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 3.2- Herramientas usadas en los ensayos de SPIF de 8 a 20 mm de diámetro.....</b>	<b>58</b>

<b>Figura 3.3- Centro de mecanizado vertical EMCOTRONIC TM02 VMC200</b>	<b>....59</b>
<b>Figura 3.4- Aplicación del tratamiento de grabado</b>	<b>.....60</b>
<b>Figura 3.5- Estado de los círculos grabados antes y después del proceso de deformación (Suntaxi(2013))</b>	<b>.....61</b>
<b>Figura 4.1- Evolución de la fuerza en la simulación con la herramienta de diámetro 10 mm</b>	<b>.....63</b>
<b>Figura 4.2- Evolución de la fuerza en la simulación con la herramienta de diámetro 20 mm</b>	<b>.....64</b>
<b>Figura 4.3- Comparación de fuerza vertical en ambos modelos; diámetro 10 mm y diámetro 20 mm</b>	<b>.....65</b>
<b>Figura 4.4- Fuerza vertical en el ensayo y en el modelo numérico en el caso de diámetro 10 mm</b>	<b>.....66</b>
<b>Figura 4.5- Direcciones principales en el proceso</b>	<b>.....67</b>
<b>Figura 4.6- Puntos seleccionados para estudiar la evolución de las tensiones principales</b>	<b>.....68</b>
<b>Figura 4.7- Tensión principal máxima en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y para el de 20 mm (derecha)</b>	<b>.....68</b>
<b>Figura 4.8- Tensión principal media en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y 20 mm (derecha)</b>	<b>.....69</b>
<b>Figura 4.9- Tensión mínima principal en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y 20 mm (derecha)</b>	<b>.....70</b>
<b>Figura 4.10- Tensión de Von Mises en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y 20 mm (derecha)</b>	<b>.....71</b>
<b>Figura 4.11- Representación del punto a estudiar en diferentes etapas</b>	<b>.....73</b>
<b>Figura 4.12- Evolución de la presión hidrostática en el punto de estudio para ambos modelos de diámetro de herramienta</b>	<b>.....74</b>
<b>Figura 4.13- Evolución de la presión hidrostática en el proceso completo en ambos modelos de diámetro de la herramienta</b>	<b>.....75</b>

<b>Figura 4.14- Evolución de la tensión hidrostática a través del espesor en la zona de contacto con la herramienta de 10 mm .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 4.15- Evolución de la presión hidrostática en el espesor ( Fang et al. (2014)).....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 4.16- Efecto del tamaño de la herramienta en el gradiente de deformaciones en la chapa .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4.17- Deformación principal máxima en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 4.18- Deformación principal máxima en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro .....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 4.19- Deformación principal media en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4.20- Deformación principal media en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4.21- Deformación principal mínima en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 4.22- Deformación principal mínima en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 4.23- Deformación de Von Mises en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 4.24- Deformación de Von Mises en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 4.25- Evolución de las deformaciones principales y de la suma de éstas en el modelo de 10 mm de diámetro de herramienta (izquierda) y 20 mm (derecha)..</b>	<b>85</b>
<b>Figura 4.26- Historia de las deformaciones principales máxima y media en los puntos mostrados para el caso de herramienta de diámetro 10 mm y curva orientativa FFL .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 4.27- Historia de las deformaciones principales máxima y media en los puntos mostrados para el caso de herramienta de diámetro 20 mm y curva orientativa FFL .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 4.28- Puntos de fallo en ambos modelos de herramienta .....</b>	<b>87</b>

<b>Figura 4.29- Deformación equivalente a lo largo de un intervalo de tiempo en el punto 3 .....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 4.30- Puntos seleccionados para medir deformaciones en el ensayo real.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 4.31- Evolución de espesor en el caso de herramienta de 10 mm de diámetro.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.32- Evolución de espesor en el caso de herramienta de 20 mm de diámetro.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.33- Comparación geométrica entre modelo CAD y FEM .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 4.34- Comparación geométrica entre modelo CAD y FEM .....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 4.35- Comparación geométrica de ambos modelos .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 4.36- Efecto de la torsión observada en la base de la geometría .....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 4.37- Geometría final en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 4.38- Geometría final en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 4.39- Comparación de curvatura generada en el modelo con la pieza real.....</b>	<b>95</b>







## **1. Introducción**

Los procesos de conformado de chapa convencionales tales como el estampado son usados en la producción en serie ya que requieren una alta inversión en equipos y herramientas, además de un alto coste energético, por ello se trata de una tecnología de fabricación caracterizada por su escasa flexibilidad. El conformado incremental (Incremental Sheet Forming, ISF), particularmente el conformado incremental monopunto (Single Point Incremental Forming, SPIF) es un proceso novedoso caracterizado por un alto potencial en cuanto a rentabilidad económica en aplicaciones de prototipado rápido y en pequeña producción en serie, destinado por tanto a abarcar este hueco existente en la fabricación. Además del aspecto económico, bien es sabido que dicho proceso mejora la conformabilidad del material debido a ciertas propiedades que lo caracterizan.

En consecuencia de todas estas ventajas, el interés por estudiar los distintos mecanismos que retrasan la aparición del fallo en el conformado incremental ha crecido notablemente. De hecho, se conoce que las principales características que intervienen en dicho aumento de la conformabilidad son el carácter local, incremental y cíclico de la deformación, el efecto de la flexión producido por la acción de la herramienta, la presión hidrostática, las deformaciones tangenciales o cortantes y la presión de contacto.

En relación con lo anterior, este trabajo trata de proporcionar un punto de vista basado en simulaciones numéricas acerca de alguno de los mecanismos anteriores; estudiando el estado de las deformaciones y tensiones, y centrándose en la presión hidrostática y su comportamiento en un punto a lo largo de todo el proceso, analizando su variación ante cambios en la herramienta y proporcionando además una comparación con ensayos experimentales. Por último, también se hará una serie de comprobaciones de la geometría final por medio de modelos teóricos y por mediciones en diferentes ensayos. Dicho estudio se realizará mediante el método de los elementos finitos, a través del software comercial DEFORM<sup>TM</sup>-3D teniendo en cuenta los diferentes parámetros de las pruebas experimentales tales como el material; aluminio recocido A7075-O, montaje y condiciones de contorno, dimensiones de la chapa y herramientas, condiciones de

rozamiento y velocidad y camino a recorrer por el punzón, teniendo siempre en cuenta que éste será un primer modelo y que contendrá simplificaciones que se tratarán a posteriori.

## **1.1. Antecedentes**

Desde hace unos años, el número de investigaciones y estudios acerca del conformado incremental ha crecido de forma exponencial, situados en este marco, el grupo de Ingeniería de los Procesos de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sevilla ha realizado numerosos ensayos experimentales centrándose en el estudio de las deformaciones en el proceso, en la evaluación de la estricción, la caracterización de la rotura y en alguno de los mecanismos de aumento de conformabilidad como es el caso de la flexión, el cual ya ha sido bien caracterizado por el grupo en varias tesis y artículos. Cabe destacar que el procedimiento usado para caracterizar los diagramas límite de conformado ha sido desarrollado en esta última etapa y se basa en un estudio para determinar deformaciones mediante unos sistemas ópticos conocidos como ARGUS® y ARAMIS®, además del uso del microscopio en las zonas cercanas a la aparición del fallo. Mediante ARGUS® se obtienen las deformaciones principales de las probetas y con ARAMIS® el diagrama límite de conformado del material a partir de otro tipo de ensayo.

Internacionalmente también se han llevado a cabo numerosos estudios y publicado cuantiosos artículos relacionados con esta tecnología; Emmens et al. (2009), Jeswiet et al. (2010), Silva et al. (2011) o M. Skjoedt et al. (2009) entre otros, estudiaron el aumento de la conformabilidad en dicho proceso, por ejemplo Emmens et al. (2009) se centró en el efecto de la flexión señalando que dicho fenómeno era el que principalmente prevenía la estricción, por otro lado Silva et al. (2011) concluyó la importancia que tiene la relación entre el espesor inicial de la chapa y el radio de la herramienta en este modo de fallo, mientras que M. Skjoedt et al. (2009) confirmó que la fractura no venía precedida por un previo necking. Centrándonos en la importancia de otros parámetros del proceso como la velocidad de la herramienta o el radio de ésta, otros muchos autores son destacados por analizar la influencia de éstos; G. Hussain et

al. (2010) estudió ambos y demostró que la variación en la velocidad de conformado no afecta la conformabilidad en chapas de aluminio recocido AA-2024, Durante et al. (2011) analizó cuatro condiciones diferentes de contacto herramienta-chapa y observó su influencia en características como la rugosidad de la superficie, la carga necesaria y por supuesto, la conformabilidad del material. Otros resultados relacionados con la geometría final de la pieza fueron expuestos por Jackson et al. (2009), o Fei HAN et al. (2012), quien trató el fenómeno conocido como recuperación elástica o springback en el SPIF.

En relación con la creación de modelos numéricos mediante el método de los elementos finitos sobre el conformado incremental destacan Pohlak et al. (2004); quien hizo hincapié en que el principal problema de dichos modelos es el tiempo requerido de cálculo, S. H. Wu et al. (2012) se centró en el estudio y simulación de la trayectoria de la herramienta y su efecto en el conformado, cabe destacar Callegari, Amodio et al. (2006), donde se simula el proceso mediante DEFORM™-3D y mediante PAMSTAMP® comparando el tiempo necesario en un programa de cálculo explícito y otro implícito. Otro punto de vista aportó Sena et al. (2011) analizando los resultados de un modelo realizado en ABAQUS® variando el tipo de elemento de mallado. En el caso del software usado en este documento; DEFORM™-3D, podemos nombrar varios artículos y proyectos en los que se ha elegido éste como programa para realizar simulaciones sobre diferentes procesos de conformado de chapa; Cho et al. (2004) en el caso del conformado orbital, o para procesos de extrusión típicamente como en Li et al. (2009), donde además se realizan pruebas con diferente mallado y se analizan los resultados en una aleación de aluminio AA-6061.

Llegados a este punto, se presenta el reto de crear un modelo numérico explícito e inicial de cálculo que nos sirva como objeto de comparación con la realidad y de estudio acerca de las características dadas en dicho proceso para ser capaces en un futuro de prever el fallo en éste.

## 1.2. Procesos de conformado incremental

Hay muchos procesos diferentes en el conformado de metales que utilizan un enfoque incremental. En ellos, la deformación del material se lleva a cabo incrementalmente y sólo en una pequeña porción de la chapa, como consecuencia de esto, se requieren cargas menores si las comparamos con los procesos convencionales. El conformado incremental monopunto o SPIF está basado en dichas tecnologías de fabricación, a continuación se comenta alguna de ellas junto con las diferentes variantes o tipologías del proceso.

### 1.2.1. Spinning

El spinning o conformado rotativo se caracteriza por la rotación de una pieza sujeta rígidamente contra un mandril mientras la herramienta se acerca progresivamente y va deformando la chapa con la forma requerida con respecto a dicho mandril. La herramienta usada tiene forma de rodillo y puede ser accionada manual o mecánicamente, el equipo necesario es similar a un torno. Éste es uno de los procesos más primitivos puesto que tiene sus orígenes en la Edad Media.

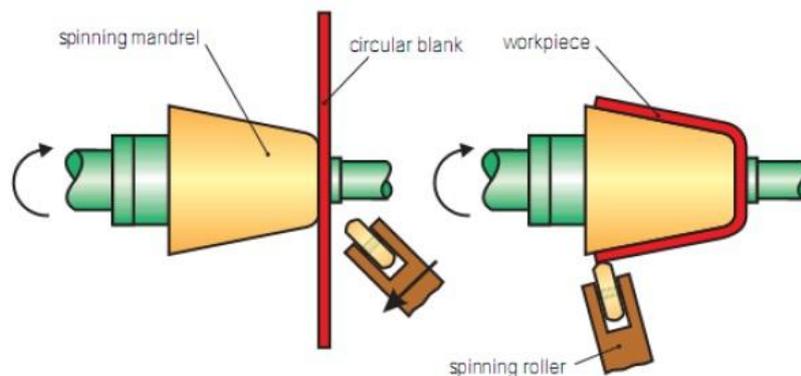


Figura 1.1- Spinning o conformado rotativo convencional

Existe una variante conocida como shear spinning y se diferencia del proceso convencional en que el mecanismo principal de actuación es el estirado en lugar del doblado de la chapa; este hecho tiene una gran importancia en la variación del espesor de ésta, que seguirá la comúnmente conocida como Ley del seno:

$$t_f = t_0 * \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right)$$

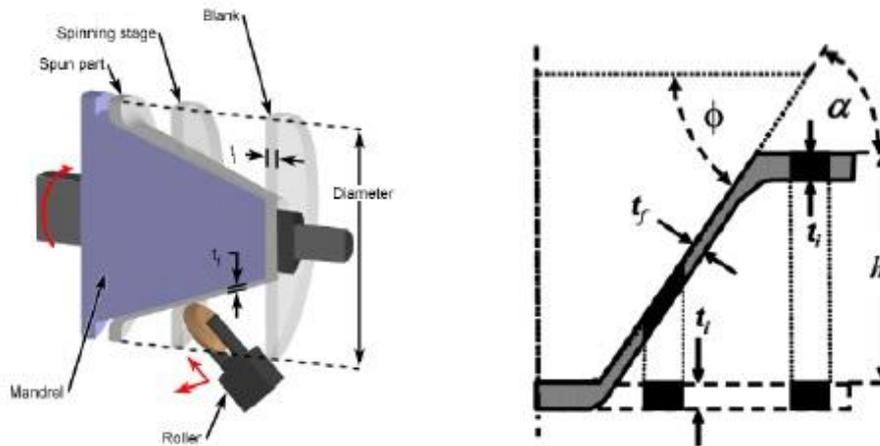


Figura 1.2- Shear spinning y deformación de un elemento siguiendo la Ley de los senos

### 1.2.2. Conformado incremental monopunto o *Single Point Incremental forming*

El conformado incremental monopunto o SPIF supone una importante contribución a los procesos de conformado incremental convencionales como el Spinning ya que permiten la creación de piezas con geometrías no axisimétricas. En este proceso la chapa queda empotrada en sus extremos gracias a un soporte o blank holder que la presiona contra una matriz inferior o backing plate, la herramienta, que normalmente tendrá forma de punzón circular, está controlada por una máquina de control numérico CNC y recorre la trayectoria diseñada de tal forma que vaya describiendo la forma final de la pieza requerida, ésta podrá o no tener restringida la rotación sobre sí misma (ver Figura 3).

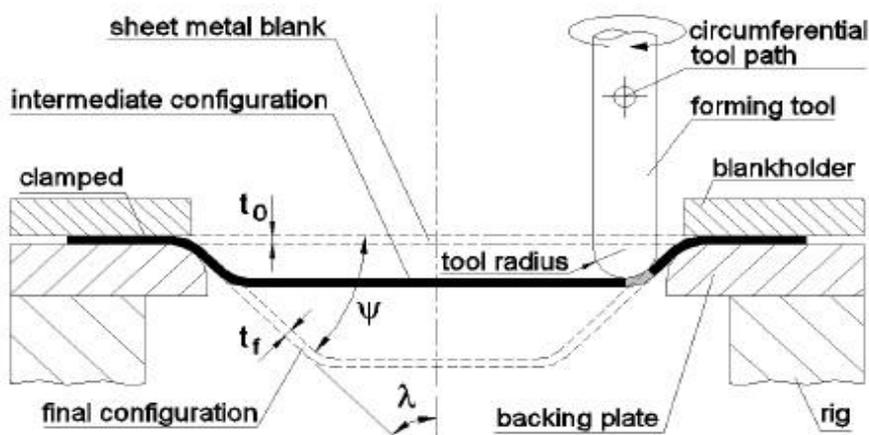


Figura 1.3- Representación del montaje en un proceso de conformado incremental monopunto

Las principales ventajas del SPIF son las siguientes:

- Producción de piezas directamente desde un archivo CAD
- No se requieren matrices positivas o negativas
- Gran flexibilidad ante cambios en el diseño, que serán fácilmente implementados
- Aumento en la conformabilidad del material
- Se puede realizar en una máquina convencional CNC
- Dado que las deformaciones son localizadas y se producen de forma incremental, las fuerzas requeridas son pequeñas
- La dimensión de las piezas solamente está limitada por el tamaño de la máquina CNC
- Se puede conseguir un buen acabado superficial

Por otro lado, los inconvenientes del proceso son los siguientes:

- Es más lento que los procesos convencionales como la embutición
- Está limitado a producciones de pequeños lotes
- La fabricación de piezas con ángulos rectos requiere estrategias formadas por varias fases

- Geometría final menos precisa debido al radio de la herramienta y al fenómeno de recuperación elástica o *springback*, aunque esto puede ser minimizado con algoritmos de corrección.

### 1.2.3. Conformado incremental con herramienta opuesta

El conformado incremental con herramienta opuesta (Incremental Forming with Counter Tool, IFWCT) es una variante del SPIF caracterizada por no necesitar la matriz inferior o backing plate debido a que existe una herramienta en el mismo punto pero en el lado opuesto de la chapa que recorrerá la misma trayectoria que el punzón principal (ver Figura 4).

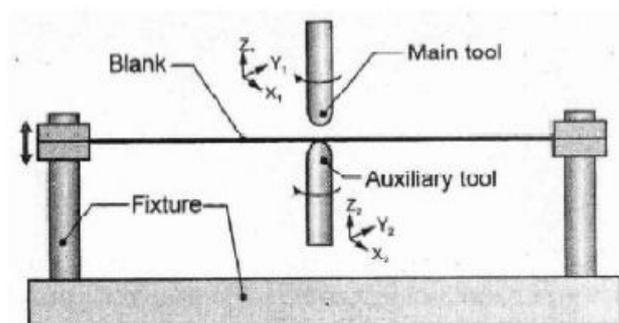


Figura 1.4- Esquema representativo del montaje en un proceso de IFWCT

### 1.2.4. Two point incremental forming

El proceso conocido como Two Point Incremental Forming o TPIF se caracteriza por, en contraposición al SPIF, la existencia de una matriz parcial o completa o una segunda herramienta que en este caso no sigue la trayectoria del punzón principal, sino que se ajustará en la dirección vertical según sea requerido y que en alguno de los casos tendrá una función similar a la que tenía el mandril en el Spinning. Se pueden distinguir dos categorías dentro de dicha tecnología; con matriz parcial y con matriz completa. En el caso de la existencia de una matriz parcial, ésta cumplirá la función de backing plate proporcionando una mejor precisión geométrica, si por el contrario existe una matriz completa, servirá de mandril o matriz positiva generando un mejor acabado final.

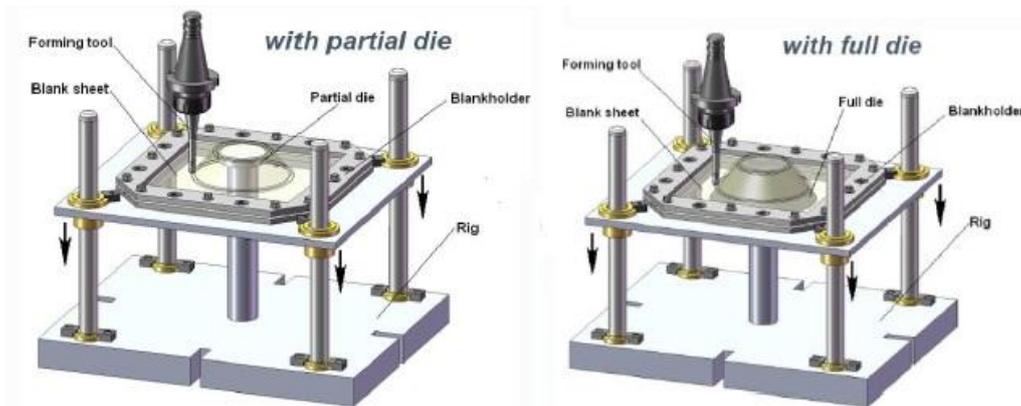


Figura 1.5- Esquema representativo del montaje en los dos procesos de TPIF

### 1.2.5. Conformado incremental multietapa o *Multistage Forming*

Para cada chapa de grosor y material específico el ángulo máximo con que se puede conformar puede ser experimentalmente hallado en un simple ensayo en el que la geometría final de la pieza sea un cono de ángulo variable manteniendo constantes los demás parámetros del proceso. Cuando el ángulo de sus paredes exceda este máximo valor se producirá el fallo. Es fácil comprobar que es imposible fabricar piezas con ángulos rectos en una etapa ya que según la Ley del seno el espesor final sería nulo. Otra forma de superar este máximo ángulo de conformado sería aumentar el espesor, pero obviamente esto traería problemas tanto de conformabilidad como de capacidad de carga de máquinas y herramientas. También es sabido que el radio de la herramienta y el incremento en cada bajada tienen influencia en dicho ángulo. Finalmente, algunos autores optaron por generar trayectorias formadas por varias etapas en las cuales se va aumentando el ángulo de las paredes, dichas pruebas fueron verificadas también de forma experimental (usando preformas o mandriles).

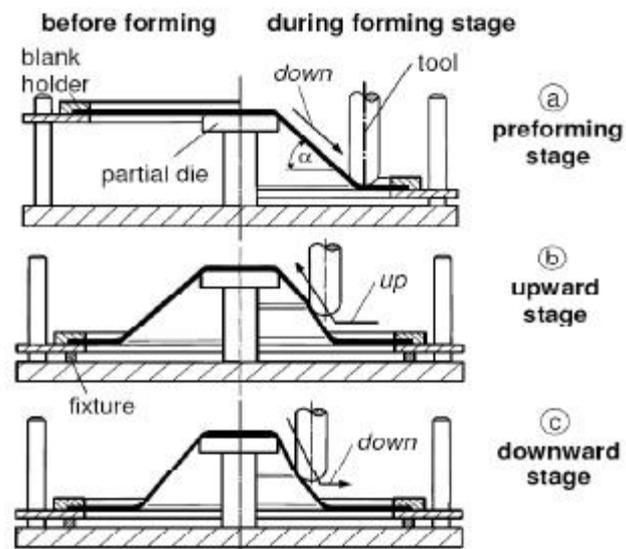


Figura 1.6- Ejemplo de estrategia multietapa en un proceso de SPIF

Recientemente Skjoedt et al.(2008) propusieron una solución para obtener conos con paredes verticales basado en dichas estrategias, más concretamente formada por 5 etapas (Figura 7).

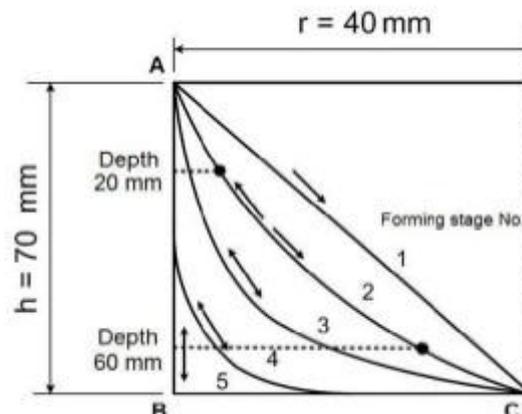


Figura 1.7- Estrategia multietapa formulada por Skjoedt et al. (2008)

## 1.3. Conformabilidad en el ISF

### 1.3.1. Diagrama límite de conformado o *Forming Limit Diagram (FLD)*

El principal instrumento existente para caracterizar la conformabilidad de una chapa metálica es el diagrama límite de conformado, propuesto por Keeler y Backhofen (1963) y Goodwin (1968). En este diagrama se representa la curva límite de conformado (*Forming Limit Curve, FLC*), la cual muestra los valores límite de deformación principal máxima y mínima en el plano de la chapa necesarios para producir el fallo de ésta bajo diferentes relaciones de deformación proporcionales.

Se asume que la suma de las tres deformaciones principales  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$  es igual a cero por conservación de volumen, además sólo se requiere conocer el estado de dos de ellas, relacionadas mediante la siguiente expresión

$$\varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1$$

Hay diversos estados de deformación de especial interés caracterizados por el valor de  $\beta$ , estados que se explican a continuación:

- $\beta = 1$ , en este caso  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ , la deformación es constante en todas las direcciones; estado equi-biaxial.
- $\beta = 0$ , en este caso no hay deformación en la segunda dirección principal:  $\varepsilon_2 = 0$  y se le conoce como deformación plana (*plane-strain*).
- $\beta = -0.5$ , este es el estado dado en los ensayos de tracción en materiales típicamente isótropos y se le denomina uniaxial.
- $\beta = -1$ , en este caso  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0$  y consecuentemente  $\varepsilon_3 = 0$ ; no hay cambio en el espesor. Este estado se presenta en las bridas de la embutición profunda, proceso que le da nombre a éste (*deep drawing*).

El FLC muestra generalmente una curva de fallo por estricción, el cual es el dado generalmente en materiales dúctiles. En la Figura 8 podemos observar la evolución de dicha curva para distintos tipos de materiales. Cabe destacar que el valor más bajo de la curva o FLC(0) es un dato característico del material, el cual sucede en condiciones de deformación plana.

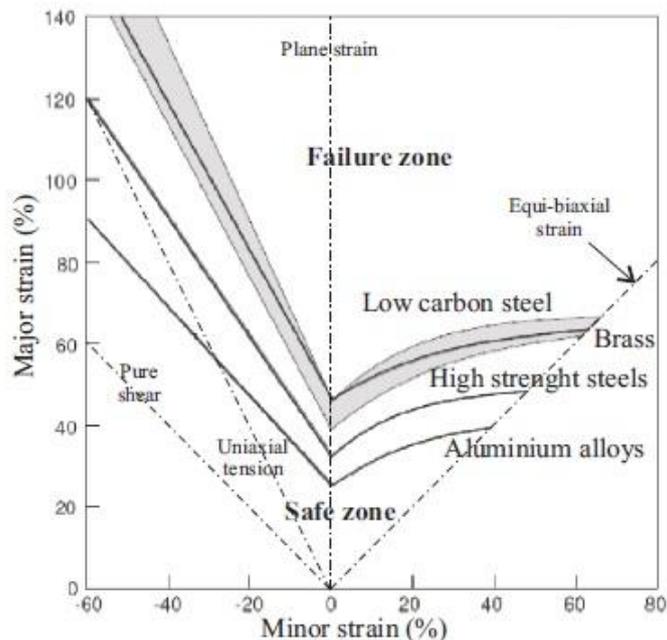


Figura 1.8- FLC de estricción para varios materiales

Además, también se le añade una curva de fractura dúctil, normalmente por encima de la curva de estricción. Teniendo en cuenta que dicha curva dependerá de la ductilidad del material, en materiales con gran ductilidad la curva tendrá forma recta decreciente, por otro lado, en los materiales de baja ductilidad la curva tenderá a ser de forma similar que la curva límite de conformado por estricción, acercándose a esta en condiciones de deformación equi-biaxiales y mostrando por tanto que el material llegará a la fractura casi sin producirse necking.

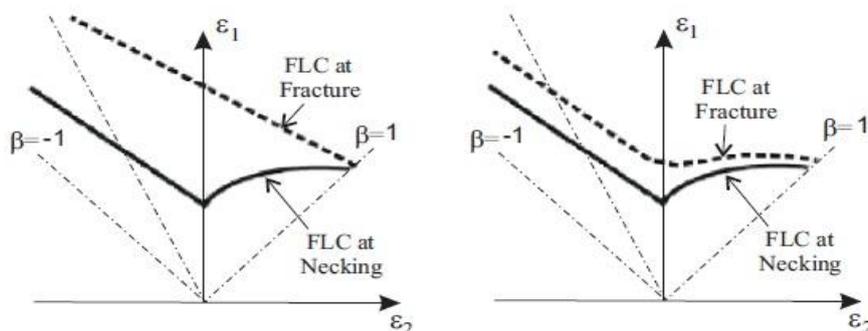


Figura 1.9- Curvas FLC para materiales dúctiles ( figura izquierda) y poco dúctiles (derecha).  
Vallellano et al.(2008)

La obtención del FLC se realiza normalmente de forma experimental, a pesar de haberse realizado numerosos trabajos teóricos para su predicción. La estimación experimental de la curva límite requiere la realización de ensayos bajo diferentes caminos de ensayos en los que las deformaciones principales son proporcionales. Los ensayos más habituales para la obtención del FLC son los ensayos tipo Marciniak (1967) y Nakazima (1968), caracterizados por ser ensayos en los que el estado tensional se mantiene generalmente plano y por generarse caminos de deformación proporcionales. En la Figura 10 se muestran esquemáticamente dichos ensayos además de diferentes probetas con las que se conseguirán diferentes caminos de deformación.

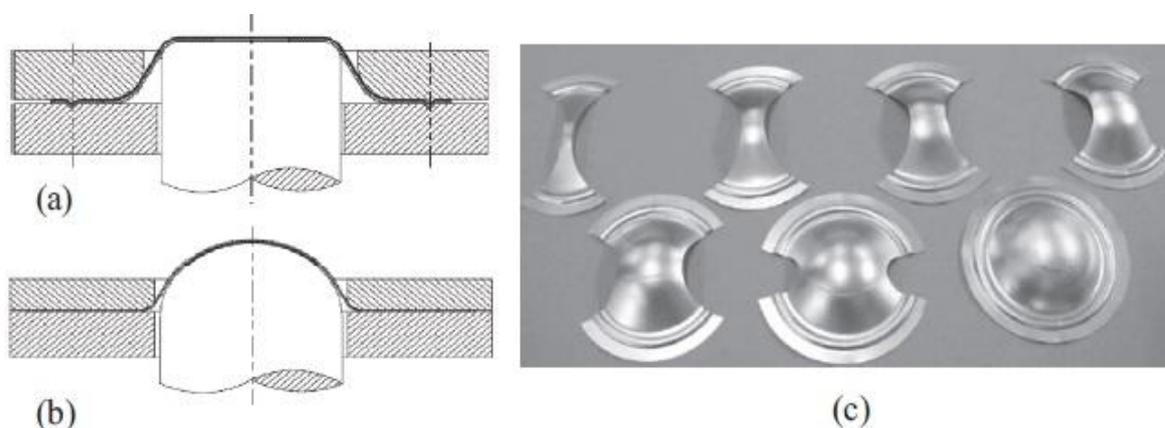


Figura 10- Esquema de los ensayos de Marciniak (a), Nakazima (b), y diferentes geometrías de probetas en ensayos tipo Nakazima (c) Martínez Donaire (2012)

En la obtención del FLC los ensayos siguen un proceso de carga proporcional en el que el parámetro  $\beta$  viene dado de forma aproximada por el estado de deformación final;  $\beta = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ , en esta situación la deformación seguirá un camino lineal en el FLD hasta el inicio de la estricción. El principal problema existente en la determinación del diagrama es la detección exacta del principio de la estricción y la medición de las deformaciones límite en ese preciso instante, este proceso se agilizó en 2008, cuando apareció la primera norma al respecto; la ISO 12004-2:2008.

### 1.3.2. Aumento de la conformabilidad en el ISF

Como ya se comentó anteriormente, bien es conocido que en el conformado incremental monopunto se dan una serie de factores que aumentan la conformabilidad del material en comparación con otros procesos convencionales como el estampado, dichos

fenómenos están bien caracterizados pero en cambio, aún no se conoce el por qué alguno de ellos interviene en esta mejora del conformado. Son muchos los autores que recogen estas causas, por ejemplo Emmens et al.(2008).

Para comprender adecuadamente algunos de estos mecanismos tendremos que tener en cuenta la siguiente expresión; formulación bien conocida y expuesta por Von Mises:

$$2\sigma_f^2 = (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)$$

Dicha ecuación nos da el valor de la tensión de fluencia,  $\sigma_f$ , en función de las tensiones normales principales y de las de cortadura. Cabe destacar que dicha ecuación no estará limitada por el valor de la tensión de fluencia de Von Mises, sino que nos servirá para hallar la tensión equivalente cuando el proceso ya ha superado con creces los límites de la elasticidad, esto será especialmente relevante teniendo en cuenta que para procesos elastoplásticos perfectos dicho límite se mantendrá constante.

Los principales mecanismos hasta ahora conocidos de mejora de la conformabilidad en el ISF son los siguientes:

- Efectos de la tensión tangencial; en el conformado incremental, al contrario que en la embutición, la pieza es fabricada sin el flujo de nuevo material debido al soporte o blank holder, esto significa que en el proceso se da un estiramiento en el que el material se alarga en al menos una dirección y que éste sufrirá una disminución de espesor. Sawada concluyó a través de una serie de simulaciones FEM que la principal cizalladura que ocurría se daba en la dirección de movimiento del punzón (Sawada et al. (2001)). Este efecto fue también observado en Bambach et al. (2003), quien además comprobó que dependía en gran medida del diámetro de la herramienta y del paso vertical de ésta. Por otro lado, algunos autores como Jackson detectaron experimentalmente dicha cortadura a través del espesor (*through-thickness shear*) en la dirección de movimiento del punzón, (Jackson et al. (2007)). Se concluye pues, que la existencia de una tensión tangencial a través del espesor causada por el movimiento de la herramienta ayudará a localizar la deformación y a estabilizar el proceso evitando la estricción, tal y como podemos observar en la siguiente figura.

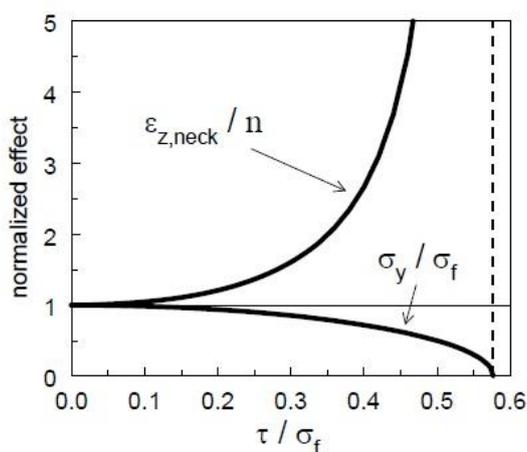


Figura 1.11- Efectos de la cizalladura adicional en la conformabilidad. Línea inferior: tensión de fluencia normalizada. Línea superior: deformación normalizada al inicio de la estricción. ( $n$ : coeficiente de endurecimiento). (Emmens et al. (2008))

- Tensión de contacto; este mecanismo se produce en cualquier proceso en el que la herramienta toca a la pieza ejerciendo presión. El efecto es equivalente al de la tensión tangencial ya que dicha presión producirá un estiramiento localizado de la chapa; en este caso en el punto de contacto se dará una deformación localizada ejerciendo además una compresión que retrasará la estricción.
- Presión hidrostática; este efecto se refiere a la triaxialidad de las cargas existente; a mayor triaxialidad de tensiones con valores positivos haya también habrá mayor probabilidad de que los huecos internos del material crezcan y se produzca *necking* y fractura dúctil, disminuyendo así su conformabilidad.
- Efecto de la flexión; la flexión causada por la acción de la herramienta provoca un gradiente de tensiones, y por tanto un gradiente de deformaciones, que será el responsable de no permitir el inicio del cuello en la chapa. Dicha causa puede ser entendida suponiendo que la chapa está formada por capas de fibras y que el fallo comenzará por la rotura de cualquier fibra, esta rotura solamente podrá ocurrir si la capa está sometida a una tracción suficientemente alta. Por tanto, si existe un gradiente de tensiones y algunas capas están trabajando a compresión o a un valor de tracción por debajo del necesario, el fallo no sucederá ya que todas las fibras no podrán romperse. Este hecho fue bien expuesto por Martínez (2012).

- Efecto cíclico de la deformación; la deformación dada en el proceso puede ocurrir de forma cíclica (Figura 12) debido a que la herramienta puede pasar por un punto material numerosas veces. Este efecto está relacionado con el comentado anteriormente, ya que la flexión también puede producirse en un punto de forma repetitiva aunque no necesariamente cíclica. Es importante mencionar que ésta es una de las causas del aumento de conformabilidad menos estudiadas debido a la dificultad y exactitud requerida en la creación de modelos numéricos.

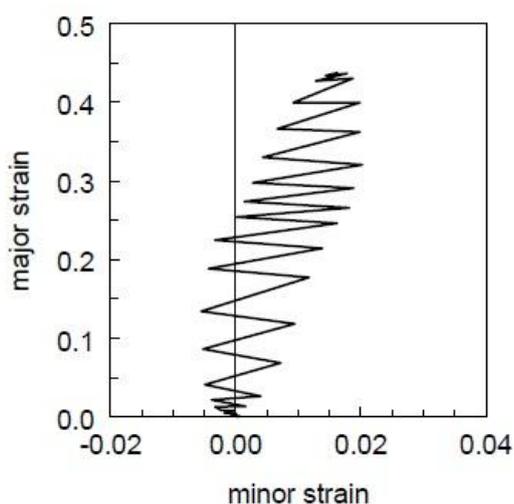


Figura 1.12- Ejemplo de deformaciones cíclicas dadas en un proceso de ISF (Emmens et al. (2008))

Como consecuencia de todo lo anterior y reafirmandonos en lo ya comentado en otros apartados, la conformabilidad en estos procesos aumenta de tal forma que los diagramas límite de conformado tienden a perder la curva límite por estricción, ya que en consecuencia de la actuación de los mecanismos aquí expuestos, dicho fenómeno no se produce normalmente en el ISF o lo hace mucho más tardíamente que en los procesos convencionales, por lo que la zona de inestabilidad suele ser pequeña o directamente nula. Además, de forma general, la curva límite de conformado en la fractura suele situarse por encima de la correspondiente a los demás procesos. En la siguiente figura se puede observar de forma gráfica una comparación entre las curvas de fallo del embutido convencional y del SPIF, señalando además algunos puntos de interés de este último según el estado de las deformaciones.

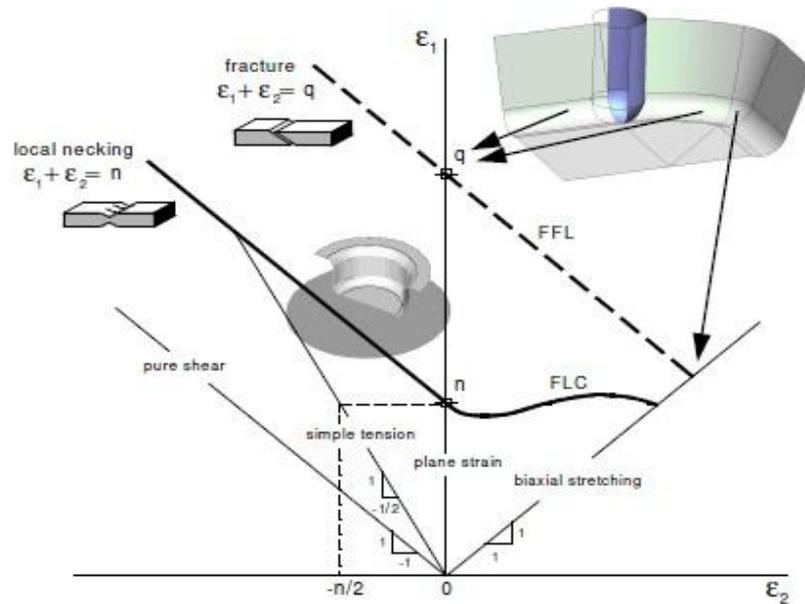


Figura 1.13- FLD para un proceso de embutición frente al de un proceso de SPIF

## 1.4. Aplicaciones del ISF

Las aplicaciones del conformado incremental pueden ser divididas en dos principales grupos:

- Prototipado rápido para la industria automovilística; por ejemplo superficies reflexivas para faros, piezas para evacuación del calor o para mejorar las vibraciones, silenciadores para camiones, etc (Figura 14).



Figura 1.14- Aplicaciones del ISF a la industria del automóvil. De izquierda a derecha: superficies reflexivas para faros, pieza anti vibraciones, silenciador. (Padrão et al. (2009))

- Aplicaciones fuera del mundo del automóvil: asientos de motocicletas, tanques de gasolina, moldes para producción de superficies, y sobre todo se está empezando a estudiar la aplicación del proceso para la creación de prótesis médicas, como podemos observar en la siguiente imagen.



Figura 1.15- Aplicaciones médicas del conformado incremental. (Padrão et al. (2009))

Por último, hay otros campos de aplicación como la arquitectura, electrodomésticos, náutica, y especialmente la industria aeronáutica; ya que uno de los principales objetivos de todos estos estudios es poder avanzar en dicho proceso para aplicarlo en piezas y componentes de aeronaves.

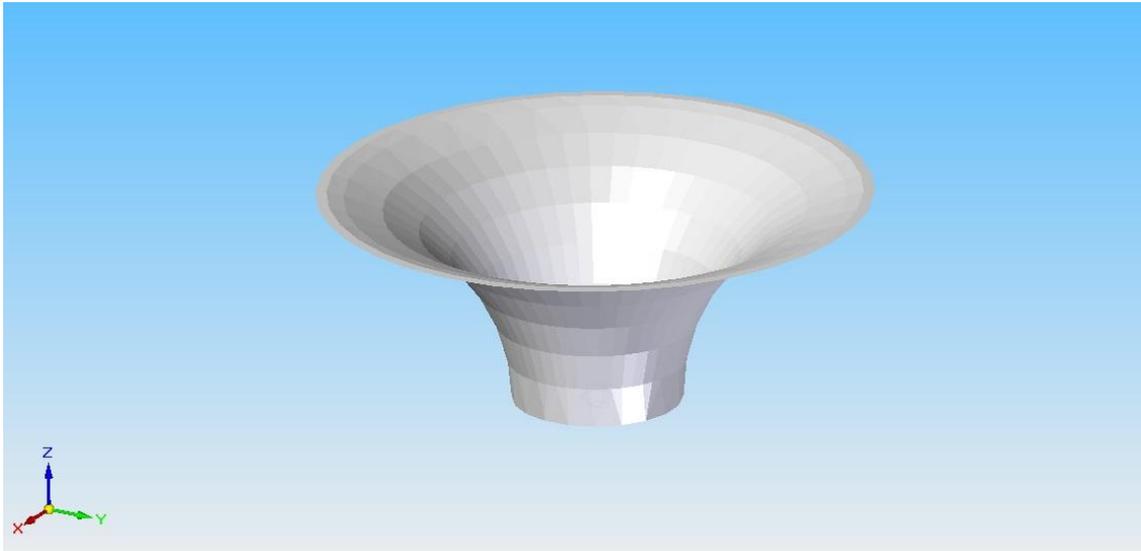
## 1.5. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo principal la creación y validación de un modelo numérico del proceso de conformado incremental monopunto mediante el método de los elementos finitos, el cual servirá como forma inicial de comparación con los ensayos realizados en probetas de aluminio A7075-O. Se analizará el estado tensional y de deformaciones durante el proceso, poniendo especial énfasis en la evolución de la presión hidrostática y deformaciones principales. Por último se harán una serie de comprobaciones geométricas evaluando diferentes parámetros como el espesor y geometrías finales con respecto a los modelos teóricos y pruebas experimentales. Cabe

destacar que se harán varios modelos en los que se variará el radio del punzón, lo que nos permitirá observar cómo afectan dichos cambios en la evolución de los resultados.

La geometría de estudio consiste en un cono de ángulo variable que será fabricado mediante este proceso (ver figura 1.16). El interés de dicha geometría reside en el espesor resultante de la chapa (el cual disminuye conforme aumenta el ángulo siguiendo la mencionada Ley del seno), la simetría geométrica en infinitos planos radiales y la relativa simetría en las variables de estudio también en dichos planos, además de todo lo que esto conlleva en el estado de deformaciones y tensiones a lo largo del proceso y de la chapa.

Como objetivo específico, es importante mencionar que se ha abierto camino en un software novedoso para el estudio de dicho proceso y la predicción del fallo en éste, y todo lo que ello conlleva en cuanto a aprendizaje y puesta a punto de éste, lo que nos permitirá realizar futuros trabajos usando dicha herramienta.



*Figura 1.16- Geometría final de la chapa conformada*

## **2. Herramientas numéricas y desarrollo computacional**

En este capítulo se hará una breve descripción de la metodología llevada a cabo en el desarrollo de los modelos numéricos y de las herramientas y software utilizados en dicho proceso. Se expondrán también los aspectos teóricos de cada punto del modelado explicando las diferentes simplificaciones realizadas y comparando con los parámetros dados en la realidad.

### **2.1. Implementación del modelo en DEFORM™-3D v10**

#### **2.1.1. Introducción a DEFORM™-3D v10**

DEFORM™-3D es un sistema de simulación de procesos basado en el Método de los Elementos Finitos que está diseñado para analizar el flujo tridimensional (3D) en procesos de conformado de metales, además provee información vital sobre el comportamiento de diferentes materiales y la transferencia de calor durante el proceso de conformado. Las aplicaciones típicas de DEFORM 3D incluyen forja libre, extrusión, recalcado, laminación, estampación con rebaba, doblado y muchos otros.

Este programa de simulación es capaz de analizar grandes deformaciones y comportamiento térmico de los múltiples objetos que interactúan durante el proceso de conformado, además de diferentes aspectos microestructurales y energéticos.

La razón de haber seleccionado éste como el programa en el que simular el proceso de estudio se basan en la facilidad y flexibilidad en su uso; gracias a una poderosa interfaz gráfica que permite de manera sencilla una rápida implementación de geometría y parámetros de entrada además de un atractivo post- procesador que facilita el análisis de resultados y da gran multitud de posibilidades, la integración de un sistema automático de mallado (AMG); el cual será capaz de generar un mallado de tamaño variable minimizando dicha magnitud en las zonas más complejas y remallando automáticamente cada vez que sea necesario o atendiendo a una serie de parámetros

especificados, ésta es una de las principales ventajas que dicho software presenta frente a otros programas de elementos finitos, por ello a pesar de estar basado en un cálculo implícito los tiempos de computación y los requerimientos numéricos serán mucho menores en este caso. Además, se tiene la posibilidad de importar y exportar datos tales como resultados, geometrías, rutinas, etc. Todos estos puntos serán analizados a continuación en la descripción del proceso completo de implementación.

### 2.1.2. Descripción del proceso completo.

En primer lugar entraremos en el pre-procesador (*pre-processor*), donde introduciremos las características del material, las diferentes geometrías del proceso, así como las condiciones de contorno y movimientos o trayectorias de cada elemento si lo hubiese. A continuación se muestra una imagen típica de esta interfaz donde se pueden observar los diferentes pasos a seguir para definir completamente el problema.

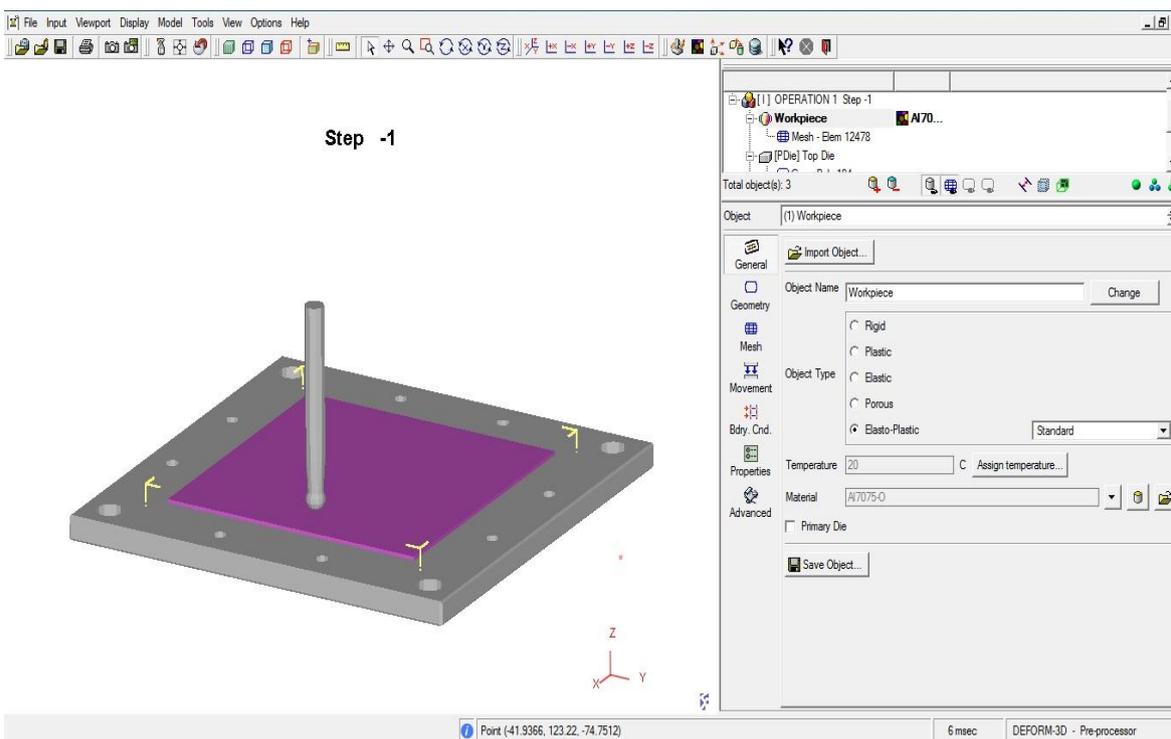


Figura 2.1- Interfaz gráfica correspondiente al pre-procesador de DEFORM-3D v10

### 2.1.2.1. Material

Dado que uno de los materiales de especial interés era el aluminio 7075 bajo tratamiento térmico de recocido, se implementaron de forma manual su curva de comportamiento y características del material dado que éste estaba bien caracterizado experimentalmente y era uno de los más usados en los ensayos del grupo debido a su relativamente alta ductilidad y aplicación tanto en la industria aeronáutica como en la automovilística.

Para empezar se ha supuesto una temperatura constante de 20 °C ya que no se abarcará ningún análisis térmico del proceso.

En cuanto al comportamiento, se trata de un material elastoplástico con endurecimiento por deformación; se despreciará la influencia de la velocidad de deformación en el endurecimiento ya que estamos en un proceso a temperatura constante y en frío, como mencionamos anteriormente. Por tanto, la ley que predice el comportamiento plástico de este material es la siguiente (*Martínez Donaire (2012)*), donde  $\bar{\sigma}$  es la tensión real y  $\bar{\epsilon}$  la deformación plástica

$$\bar{\sigma}(MPa) = 226.3 - 131.9e^{-32.23\bar{\epsilon}}$$

Por otro lado, la componente elástica del comportamiento de este aluminio vendrá definida por el módulo de Young;  $E = 66700$  Mpa y por el coeficiente de Poisson;  $\nu = 0.3$ .

Cabe destacar que para estos modelos se ha decidido optar por un criterio de plastificación de Von Mises ya que se supone un comportamiento isótropo del material; ésta ha sido una de las dos simplificaciones más importantes llevadas a cabo dado que teniendo en cuenta la anisotropía del material mediante un criterio como el cuadrático de Hill los tiempos de computación aumentaban de forma exponencial. El criterio de Von Mises se formula de la siguiente forma:

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_y$$

$\sigma_{VM}$  es la tensión de Von Mises y se obtiene de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\sigma_{VM} &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)} \\ &= \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}\end{aligned}$$

donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  son las tensiones principales. Dicha expresión se obtiene a partir de la energía de distorsión en función de estas tensiones principales.

La otra simplificación realizada se basa en el tipo de endurecimiento del material, el cual se ha tomado como isotrópico por la misma razón que antes; el endurecimiento cinemático elevaba los tiempos de cálculo numérico de forma muy severa. Por tanto, esta ley de endurecimiento tiene como consecuencia que la zona de plastificación se expande en vez de trasladarse en el espacio de las tensiones.

### 2.1.2.2. Desarrollo CAD

El modelado de las geometrías se ha realizado partiendo de los componentes del montaje real; se han modelado la *backing plate* o matriz inferior, los punzones de los diferentes diámetros considerados; en una primera prueba se modeló el punzon completo pero en los demás modelos solo se representó la herramienta de conformado como una simple esfera del diámetro correspondiente, ya que esta zona es la única que entrará en contacto con la chapa, y por último la chapa de dicho material y de dimensiones 165x165x1.6 mm. Esta tarea se desarrolló en los programas de CAD Solid Edge® v20 y en DS Catia® v5.20, donde también se contaba con la geometría del *blank holder* o matriz superior y algún componente más del montaje completo de la máquina de control numérico, esta última matriz se tendrá en cuenta en los modelos finales como una simple condición de contorno definida por un empotramiento de la chapa, como se verá en secciones posteriores. Dichas geometrías serán exportadas como archivos en formato stl e importadas finalmente en DEFORM™-3D.

En las siguientes figuras se muestran esquemáticamente las dimensiones y representaciones más relevantes.

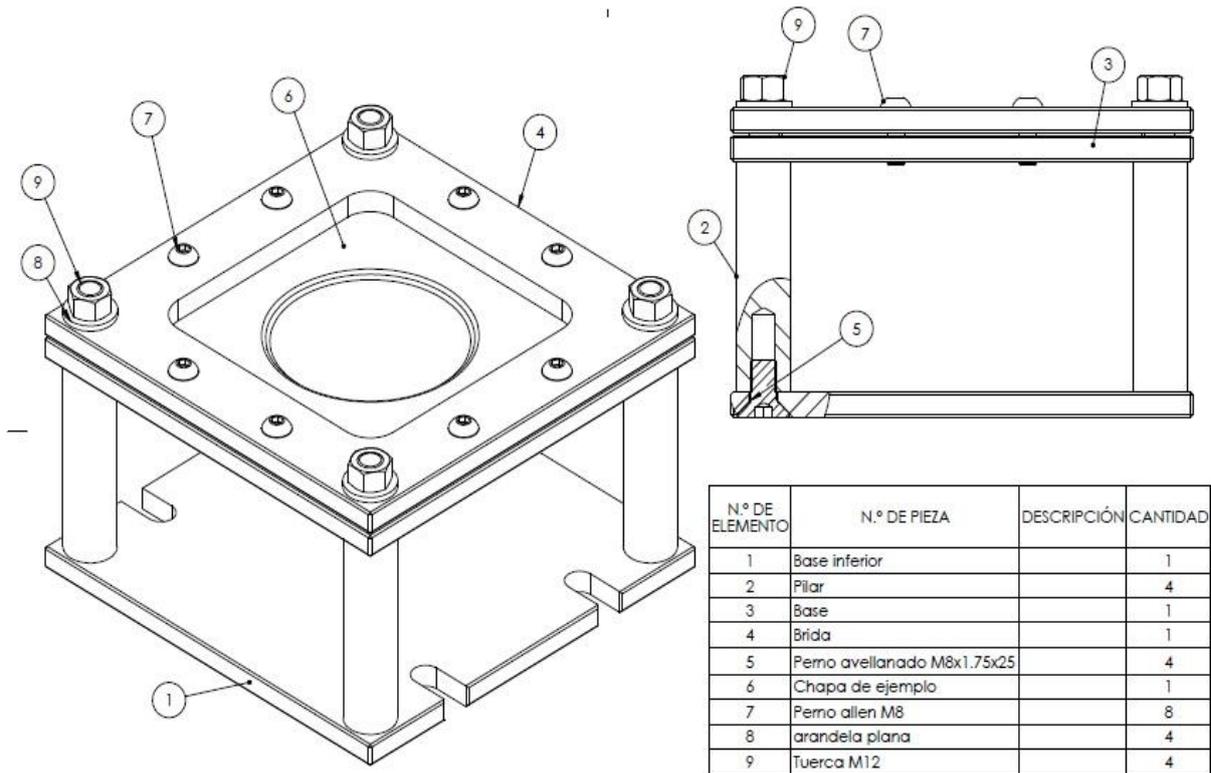


Figura 2.2- Esquema representativo del montaje experimental (DS Catia v5.20)

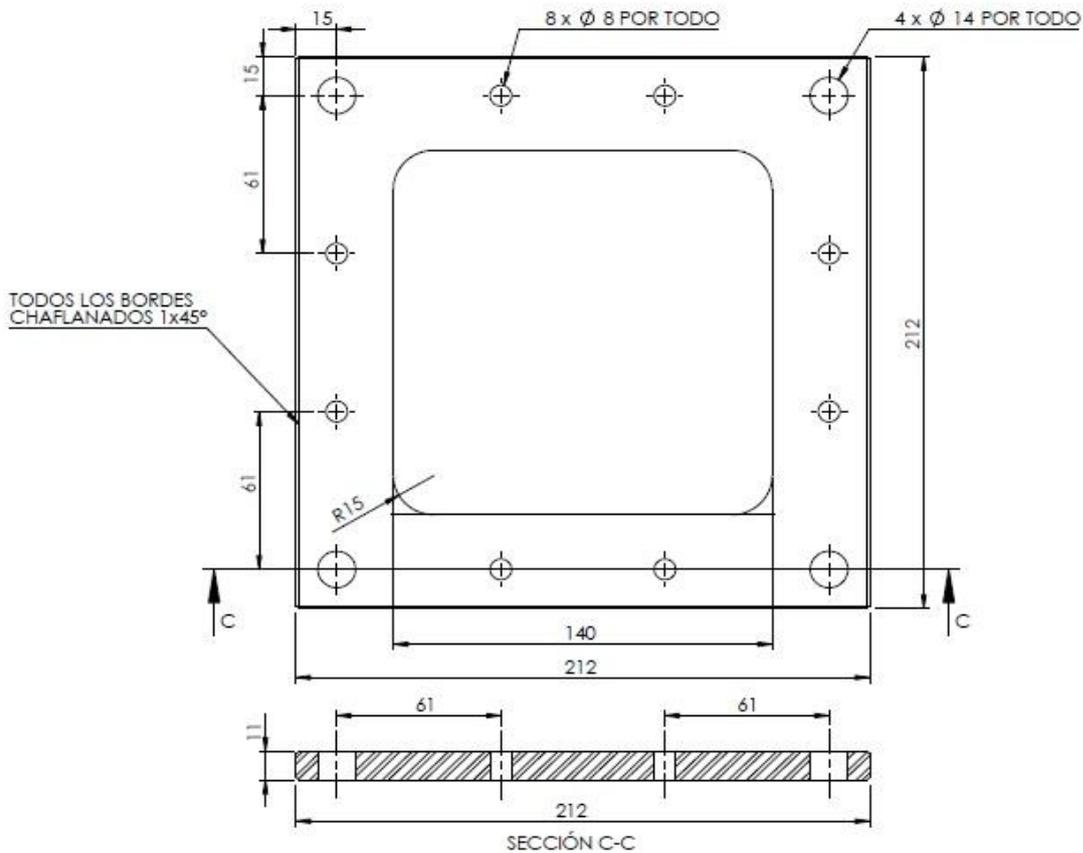


Figura 2.3- Brida Superior (DS Catia v5.20)

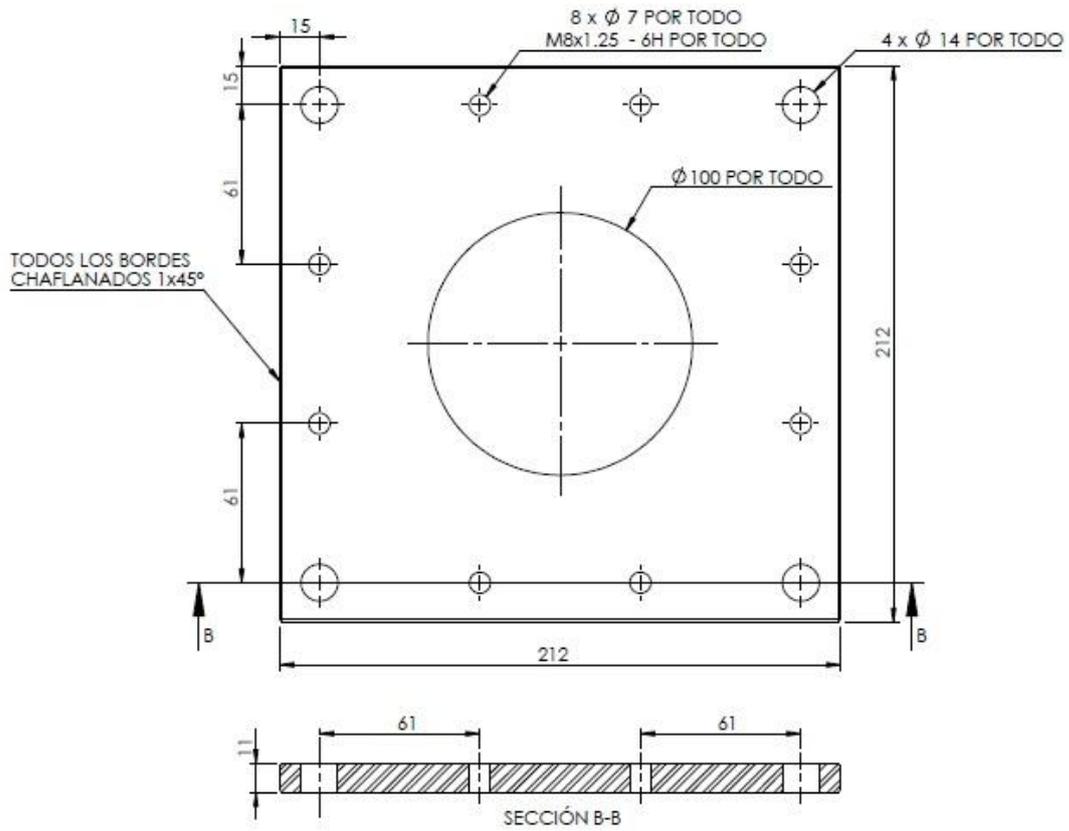


Figura 2.4- Matriz inferior o backing plate (DS Catia v5.20)

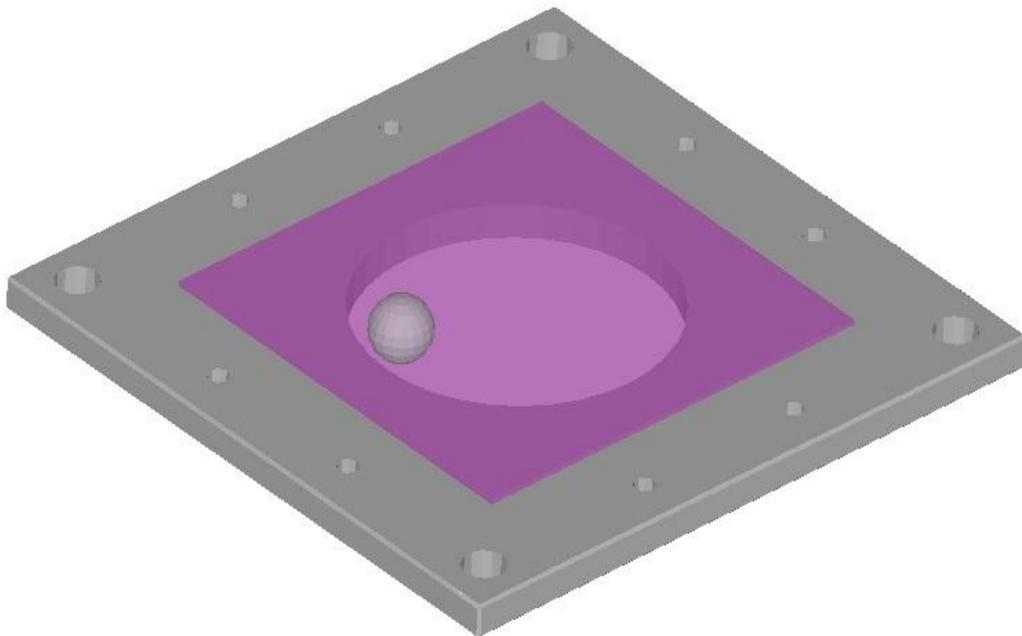


Figura 2.5- Montaje final en Deform 3D

Para la creación de trayectorias de la herramienta y análisis de geometrías obtenidas también se modeló la geometría final teórica que se pretende obtener una vez deformada la chapa en el proceso, sus dimensiones son las siguientes

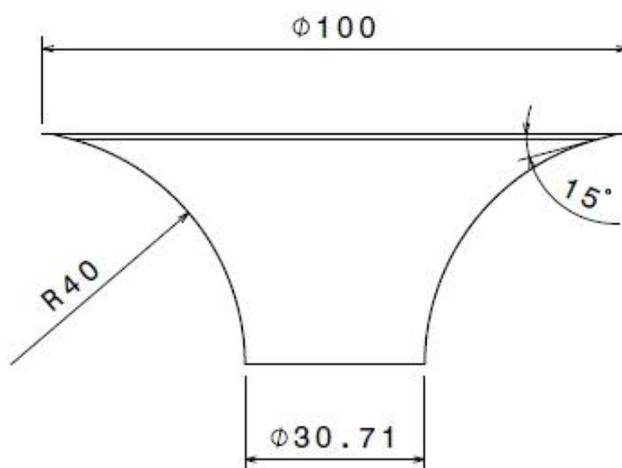


Figura 2.6- Alzado de la geometría final de la chapa

### 2.1.2.3. Mallado

Como ya se mencionó anteriormente, Deform incluye un sistema automático de mallado que distribuirá el tamaño de la malla según la geometría y según un ratio entre el elemento más pequeño que se requiera y el mayor, además será capaz de aplicar también el remallado de forma automática cuando los elementos se distorsionen un porcentaje determinado, cada cierto tiempo de cálculo que establezcamos o según un límite en función de algunas variables del problema como la carga aplicada.

Por otro lado, este software también nos permite la posibilidad de aplicar ventanas con determinadas formas en las que aplicar un tamaño diferente de malla, ya sean estáticas o dinámicas de forma que sigan a algún elemento.

Para el caso que nos ocupa se decidió usar en un principio tres tamaños de malla; un primer tamaño para los elementos que están fuera de la zona en la que el punzón interactúa con la chapa entre 2 y 4 mm aproximadamente ( $size\ ratio=2$ ), una malla relativamente gruesa dado que ésta no será la parte de la chapa que sufrirá grandes

deformaciones, en segundo lugar se dispone una malla de tamaño poco menor al espesor (en torno a 1.4 mm) de forma que haya al menos un nodo en la zona intermedia de dicho espesor, ésta se situará mediante una ventana fija con forma de cilindro hueco que ocupará la zona por la que se mueve la herramienta. Por último la malla más pequeña se sitúa en una ventana con forma cilíndrica que rodea y sigue a la herramienta en su trayectoria, esta malla se eliminó en los modelos finales ya que producía problemas en el remallado. Hay que mencionar que estos tamaños son orientativos y dependerán del radio del punzón como se explicará a continuación. A continuación se muestra una figura con el mallado para el caso de la primera simulación realizada con la herramienta de 10 mm de diámetro.

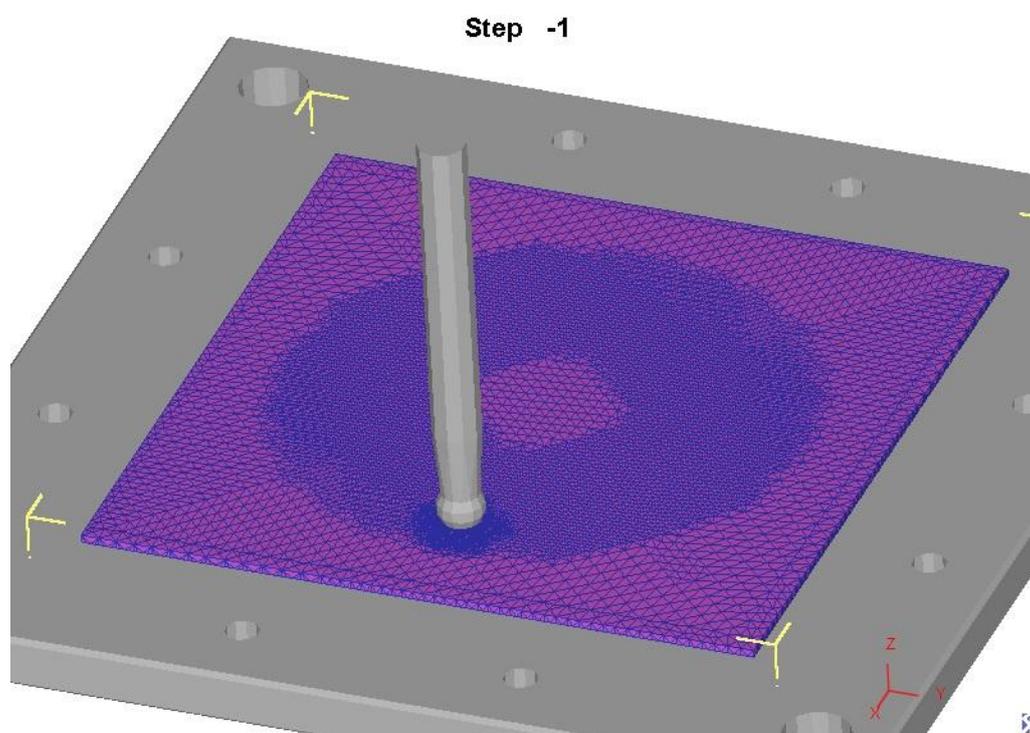


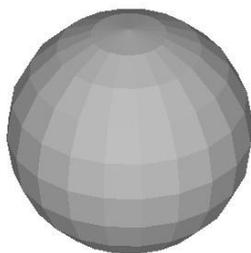
Figura 2.7- Mallado en el primer modelo de herramienta de diámetro 10 mm

El principal criterio que se ha tenido en cuenta para la malla más relevante, la de la zona central, se basa en el orden de magnitud de los elementos que forman el punzón; éste será un elemento rígido en las simulaciones y no se mallará, no obstante se discretiza con una cierta tolerancia al exportarlo como archivo stl como podemos observar en la figura 2.8, dicha discretización deberá ser tal que el tamaño de estos elementos sea del orden del tamaño de los elementos de la malla con la que interactúa con el fin de que no

se produzcan penetraciones en éstos, esta problemática ha sido motivo de estudio por diversos autores en diferentes programas, como por ejemplo en Abaqus® por King et al. (2013).

Por otro lado, hay que guardar un cierto equilibrio entre el tiempo de cálculo computacional requerido y la precisión, de forma que usando el criterio de tamaño de elementos anterior se mantenga en un nivel cercano al óptimo en cuanto a la compensación comentada entre tiempo y exactitud.

Deform 3D nos da la posibilidad de seleccionar dos tipos de elementos, el tipo *brick*, formado por 8 nodos y el *tetrahedral*, formado por 4 nodos, una vez seleccionando el proceso como elastoplástico y definiéndolo de forma completa sólo se permiten elementos de tipo tetraédricos por lo que éste será el elegido finalmente.



*Figura 2.8- Modelo de la herramienta importado como archivo stl en Deform 3D tras la discretización*

#### **2.1.2.4. Movimiento de la herramienta y desarrollo CAM**

Como ya se comentó en el apartado de introducción a los procesos de conformado incremental, en el SPIF la herramienta recorre una trayectoria en la máquina de control numérico generada por el usuario de forma que va conformando la chapa incrementalmente hasta lograr la geometría final. Dado que uno de los objetivos de este proyecto es la comparación de resultados con respecto a una serie de ensayos reales realizados por el grupo en el laboratorio de mecanizado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, se ha simulado el proceso con los mismos parámetros de los ensayos en esta máquina CNC suponiendo que la bola no tiene permitido el giro sobre sí

misma (en la actualidad se están llevando a cabo diversos avances acerca de dicho movimiento de la herramienta en los ensayos realizados en el taller), estos parámetros son la velocidad de avance del punzón, 1000 mm/min, y el *step down* o profundidad en cada bajada, 0.5 mm. Este último ocurre dado que la máquina CNC en la que se realizan estas pruebas es de 2.5 ejes, es decir, solamente es capaz de interpolar trayectorias en uno de los 3 planos (en este caso el horizontal) y realizar movimientos lineales en el eje restante, el vertical en nuestro problema, por tanto para conformar piezas con geometrías tridimensionales complejas la herramienta dividirá esta figura en diversos planos realizando bajadas entre cada uno de ellos, las diferencias pueden ser claramente observadas en la siguiente imagen

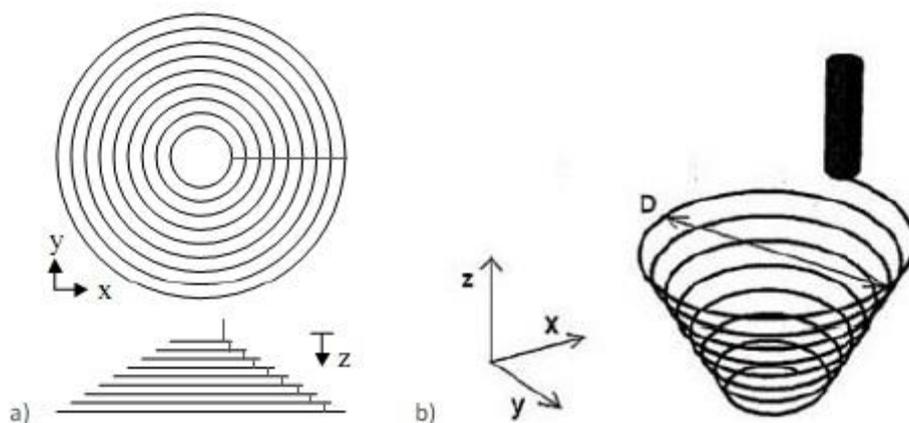


Figura 2.9- Modelo de trayectorias según: a) Máquina de control numérico de 2.5 ejes, b) máquina control numérico de 3 ejes (Lé Vãn Sÿ (2009))

En esta figura observamos como en la trayectoria tridimensional en la máquina de 2.5 ejes se usa el *step down* verticalmente en el ejemplo de un cono de ángulo constante a diferencia de la máquina de 3 ejes, en la que directamente se va describiendo la geometría tridimensional sin discretización en planos; en este caso gracias a una trayectoria helicoidal.

Para generar el movimiento de la herramienta en el programa de elementos finitos se ha seguido la misma metodología que para introducir el código de control numérico en el centro de mecanizado; se implementó el modelo CAD de la geometría final a obtener, la herramienta usada (un programa por cada diámetro), y se generaron las trayectorias

mediante la herramienta CAM de DS Catia® v5.20, en este caso el apartado *z-level* de mecanizado con que se ve provisto dicho software, definiendo las bajadas y el *tool path* de manera completa. Previamente a esta metodología se intentó realizar una primera tentativa a la generación de trayectorias definiéndose éstas mediante un programa numérico en Matlab®, lo que resulta demasiado complejo en el caso de geometrías tridimensionales arbitrarias; en las siguientes figuras se observan ambos métodos

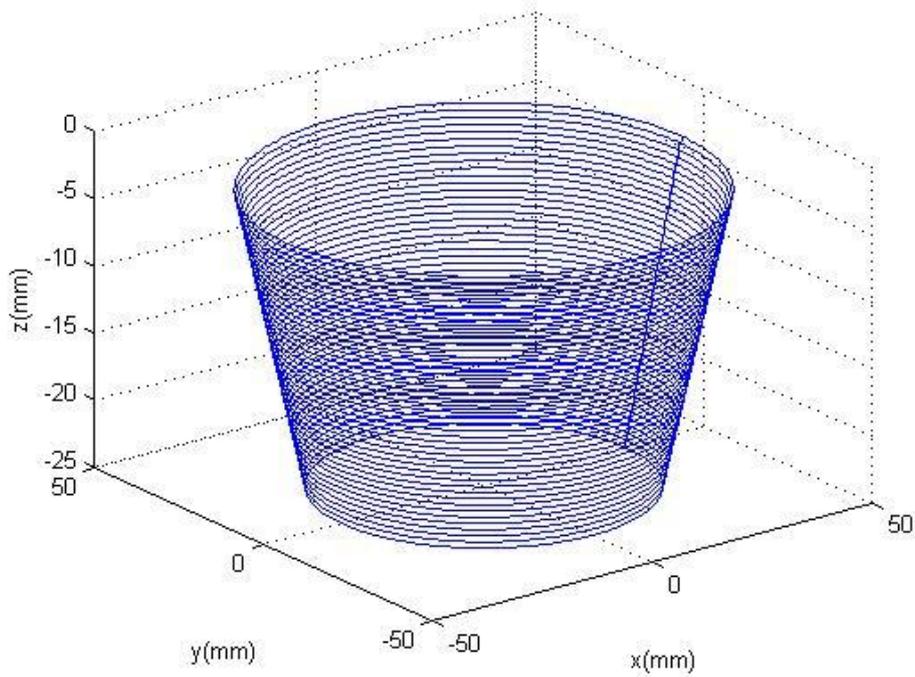


Figura 2.10- Generación de trayectoria de la herramienta mediante programa numérico en Matlab®

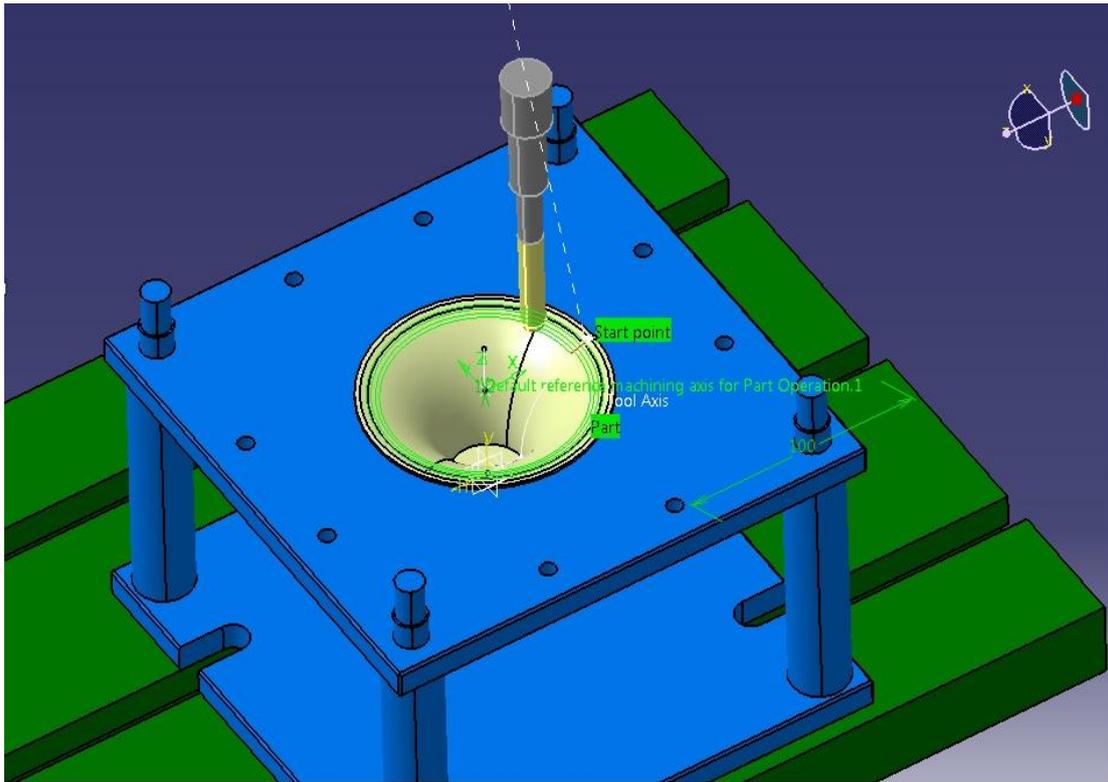


Figura 2.11- Generación de trayectoria de la herramienta mediante z-level DS Catia v5.20

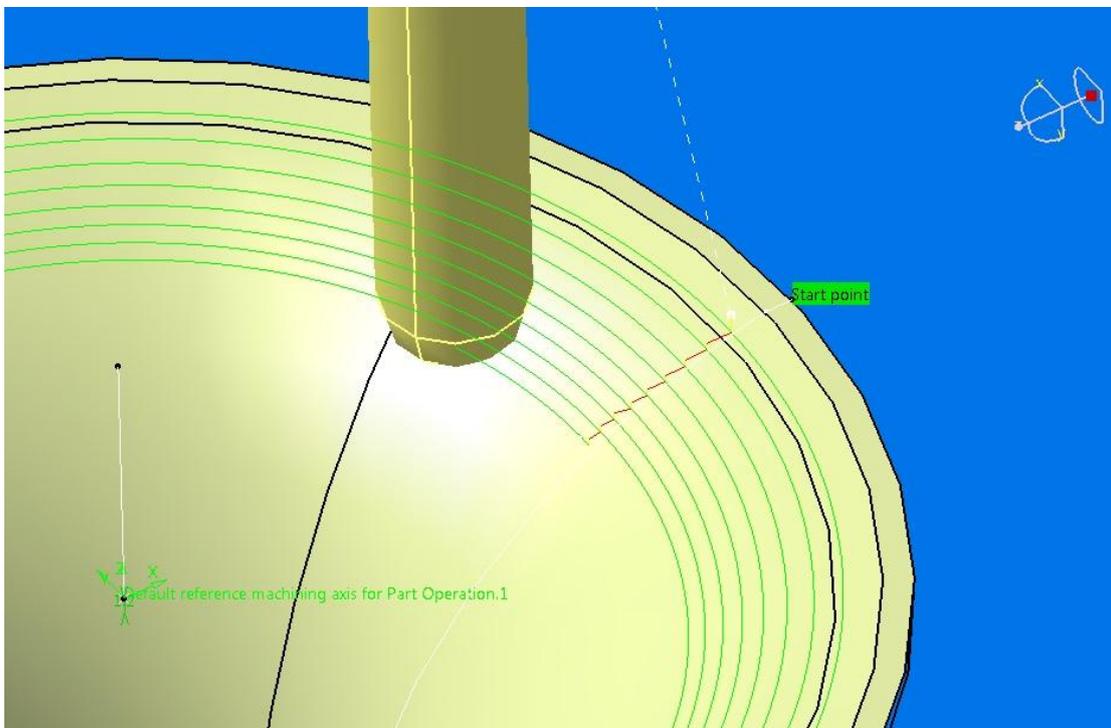


Figura 2.12- Detalle del step down en la generación de la trayectoria de herramienta en DS Catia v5.20

Finalmente, puesto que en Deform 3D hay que introducir una tabla con valores de tiempo y posición en coordenadas x, y, z del centro del punzón en cada instante (definido al modelarlo en el sistema CAD, Catia tendrá en cuenta compensaciones del radio de éste), deberemos realizar una especie de post-procesado con el archivo exportado de Catia; código de control numérico tipo APT. Para ello simplemente usamos un fichero Excel en el que se realizarán una serie de filtros y modificaciones para obtener la tabla de coordenadas de cada punto, cabe destacar que para poder conseguir esto hemos de eliminar la opción de interpolación circular en la generación de trayectorias (orden CIRCLE en código APT) e intentar discretizar estos caminos circulares con una tolerancia pequeña para tener una buena resolución de dicha trayectoria. Una vez obtenido todos los puntos por los que pasa la herramienta debemos generar la columna de tiempo, para ello hallamos el módulo de la distancia recorrida entre cada punto y el anterior y dividimos entre la velocidad de avance de ésta. Una vez realizada esta tarea ya seremos capaces de definir de manera completa el movimiento del punzón en Deform.

#### **2.1.2.5. Condiciones de contorno**

Para terminar de definir el proceso en las simulaciones se han establecido una serie de condiciones de contorno que tratan de asemejarlo aún más al desarrollo experimental de éste; en primer lugar, dada la existencia de la brida superior de sujeción de la chapa y para agilizar el proceso de cálculo se ha decidido sustituir por una condición de empotramiento de los extremos de la chapa en los planos verticales donde comienza la brida, es decir, se corta el trozo de la chapa en el que no actúa esta matriz superior y se empotran sus caras exteriores dando condiciones de velocidad nula en las tres direcciones. Por otro lado, se generan las condiciones de contacto entre sólidos; entre la herramienta y la chapa se decide establecer fricción tipo Coulomb con coeficiente constante e igual a 0.02, valor típico en condiciones de fricción baja con lubricación y que nos servirá para modelar la libertad de giro sobre sí misma de la herramienta, también se ha supuesto el mismo tipo de fricción pero con un valor menor del coeficiente, 0.01, para el contacto entre brida inferior o *backing plate* y chapa. El aceite lubricante usado en los ensayos es *Castrol Iloform TDN81*.

Cabe destacar que la fricción tipo Coulomb queda establecida mediante una ley que lleva este mismo nombre y que predice que la fuerza máxima de rozamiento es proporcional mediante el coeficiente de rozamiento  $\mu$  a la normal existente en el contacto entre los cuerpos:

$$F_R = \mu N$$

## 2.2. Modelos previos

En este sub apartado se pretende hacer una breve revisión de varias pruebas y modelos que se realizaron como primera tentativa de desarrollo del proceso de estudio y que sirvieron como puesta a punto hasta llegar a los modelos finales cuyas características y parámetros son los descritos en los anteriores puntos.

En primer lugar se realizó un modelo suponiendo como material el aluminio AA7075-T6 con comportamiento plástico y un diámetro de herramienta de 20 mm; la trayectoria de ésta fue simulada mediante el programa numérica en Matlab que mencionamos anteriormente y que formaba un cono de sección constante a ángulo  $60^\circ$ . La chapa fue deformada hasta una profundidad relativamente pequeña ya que se observaba que la zona central de ésta no bajaba con el material de su alrededor, una posible causa de este resultado es la combinación de un comportamiento perfectamente plástico y el estado del material supuesto.

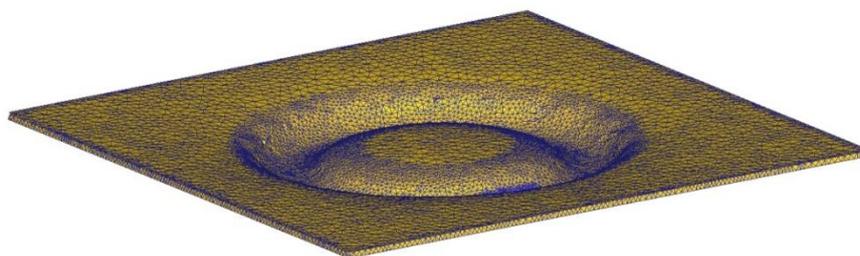


Figura 2.13- Resultados obtenidos suponiendo comportamiento plástico y material AA7075-T6

Tras esta primera simulación, cambiamos a un comportamiento elastoplástico del mismo material, describiendo aún la herramienta una trayectoria tronco cónica en la que el primer punzonamiento era de 1.5 mm de profundidad. Se decide adoptar este segundo comportamiento pensando en el hecho de que en la realidad la chapa sufrirá una cierta recuperación elástica una vez la herramienta se aleje de la zona a estudiada. Se simuló el proceso hasta una profundidad de aproximadamente 25 mm. Cabe destacar que este modelo no contemplaba la existencia de bridas o *plates* ni inferior ni superior, simplemente se añadían condiciones de empotramiento en sus extremos. Algunos de los resultados obtenidos son los representados en las siguientes figuras

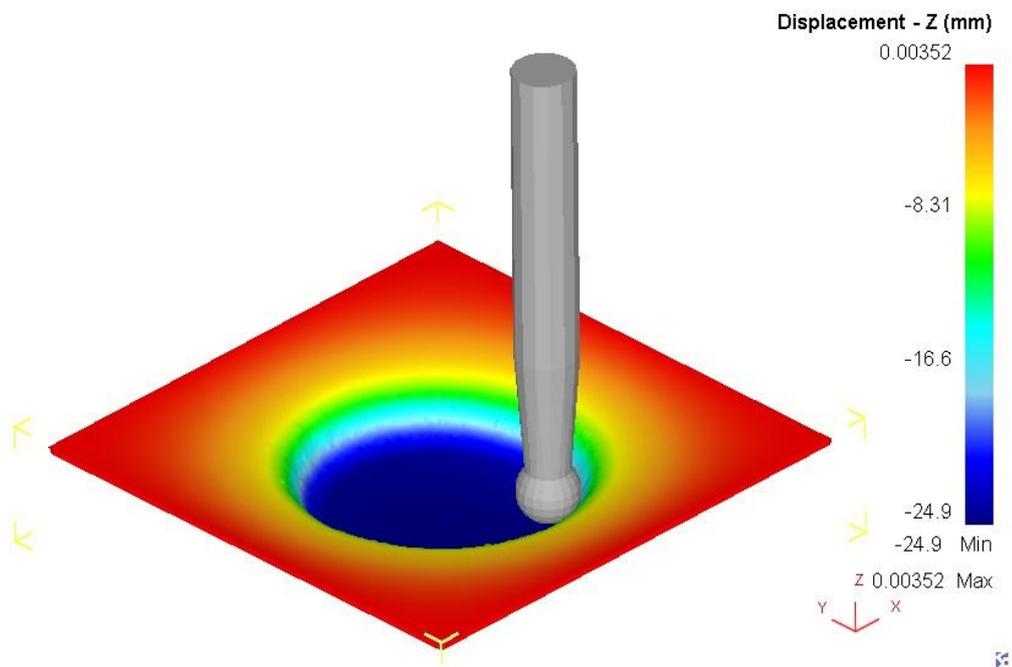


Figura 2.14- Desplazamientos y geometría final del modelo suponiendo comportamiento elastoplástico

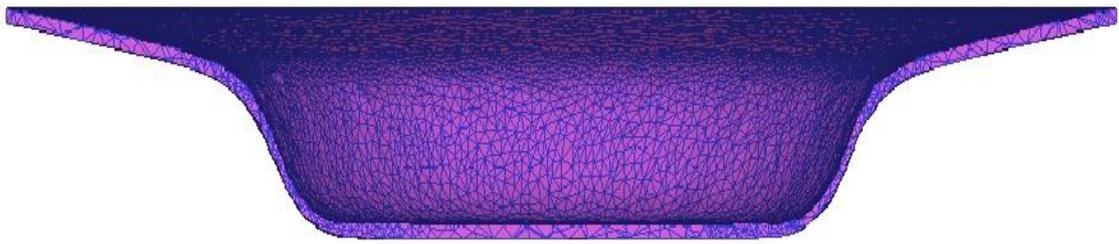


Figura 2.15- Distribución de espesores en la geometría final del modelo con comportamiento elastoplástico

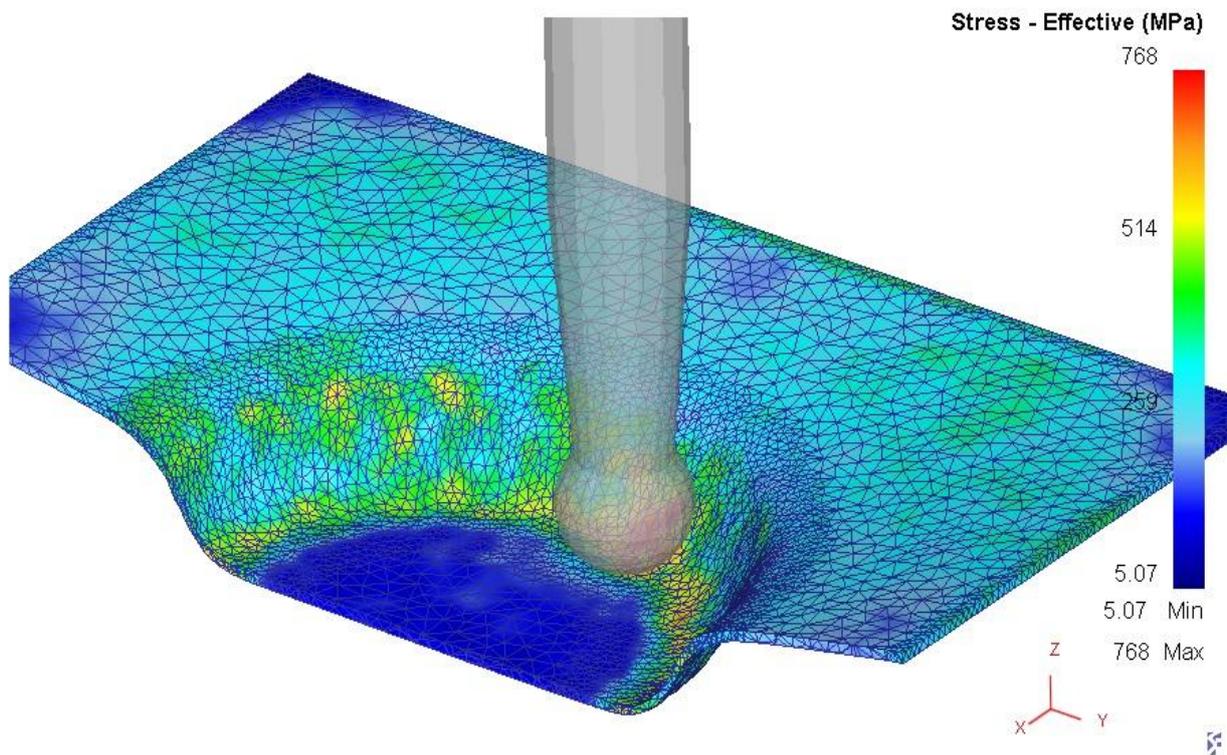
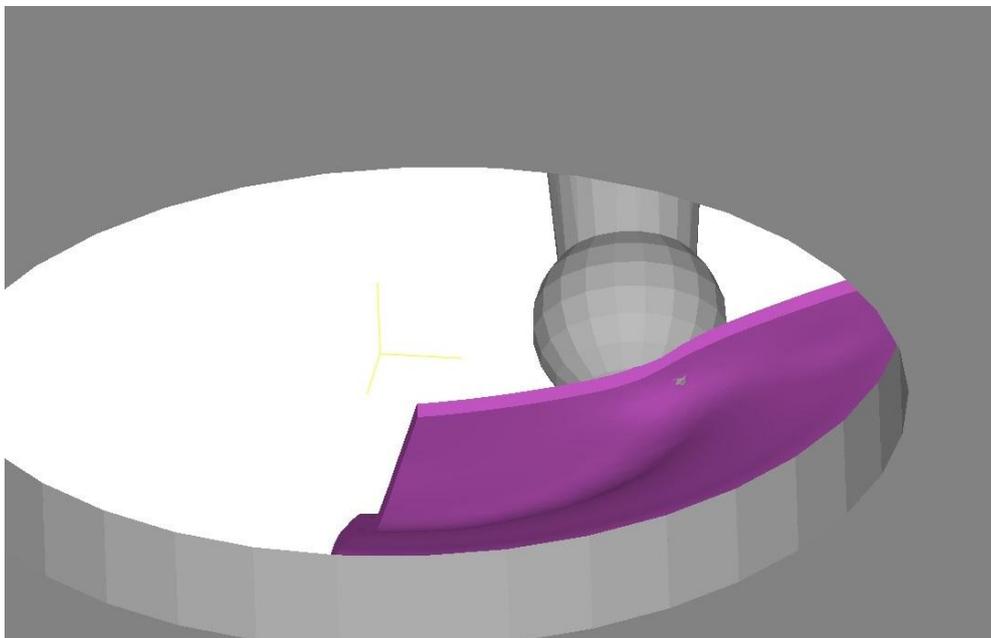


Figura 2.16- Distribución de tensión media en la chapa en la interacción con la herramienta en el modelo elastoplástico

Dado que no estábamos teniendo en cuenta el material de estudio ni el setup real del proceso y asumiendo de antemano el largo tiempo computacional requerido en las simulaciones de chapa completa se decidió recurrir a modelos en los que la chapa se recortaba en dos planos radiales formando varios ángulos, por ejemplo 90°, reduciendo así el tiempo de cálculo a partir de una simplificación basada en la supuesta simetría del proceso en infinitos planos radiales y asumiendo que la solución válida sería la de un plano medio de la porción de chapa suficientemente lejano a los extremos de ésta (en los que se establecían condiciones de simetría) como podemos obtener a partir del teorema de Saint-Venant. El principal problema observado se daba en la zona de bajada de la herramienta; la chapa era comprimida de tal forma que el espesor alcanzaba valores ínfimos y se agujereaba. La posible causa de este problema era la cercanía entre la zona donde se realizaban estas penetraciones del punzón y el borde de la sección de la chapa, plano que como ya hemos comentado se encontraba en condiciones de simetría establecidas.



*Figura 2.17- Muestra de fallo en el modelo simplificado de la chapa*

### **3. Desarrollo experimental**

Con el fin de comparar resultados en términos de deformaciones, fuerza ejercida por la herramienta y algunas características geométricas de la pieza final, se ha realizado un ensayo en el taller generando todo el proceso de forma experimental; tanto el conformado de la chapa como la medición de resultados una vez deformada hasta su estado final. En este capítulo describiremos de manera concisa todos los componentes del desarrollo experimental.

Hay que destacar también que alguno de los siguientes puntos ya fue descrito en apartados anteriores con el fin de modelar dicho proceso de forma numérica.

#### **3.1. Ensayo en SPIF**

El análisis de las deformaciones y las diferentes variables geométricas se han realizado sobre un ensayo de conformado incremental monopunto en una chapa de aluminio AA7075-O de 1.6 mm de espesor.

El montaje experimental fue el descrito en el capítulo 2; incluye una placa de sujeción o brida superior, una brida inferior o matriz de apoyo con un agujero circular de 100 mm, cuatro soportes y una base o placa de fondo. La chapa tiene un área de trabajo efectivo de 140x140 mm (superficie que queda libre por debajo de la brida superior) y unas dimensiones generales de 165x165 mm.

Como ya se ha comentado, la forma final de la chapa una vez conformada será un tronco de cono de ángulo variable (ver figura 2.6).



*Figura 3.1- Montaje experimental en el ensayo*

El proceso se llevó a cabo con un *step down* o bajada vertical por pasada de 0.5 mm con una herramienta de acero templado de punta esférica de 10 mm de diámetro que rotaba sobre sí misma de forma libre y con una velocidad de avance describiendo las trayectorias de 1000 mm/min. Se usó un aceite lubricante para conseguir condiciones de baja fricción; *Castrol Iloform TDN81*.



*Figura 3.2- Herramientas usadas en los ensayos de SPIF de 8 a 20 mm de diámetro*

El código de control numérico se convirtió a formato ISO y se introdujo en la máquina en la que se realizó el ensayo; un centro de mecanizado vertical convencional *EMCOTRONIC TM02 VMC200*.



*Figura 3.3- Centro de mecanizado vertical EMCOTRONIC TM02 VMC200*

Los valores de fuerza a los que se ve sometida la herramienta se pueden obtener de dos formas; mediante un plato dinamométrico *Kistler*.

## **3.2. Medida de resultados**

### **3.2.1. Medición de deformaciones por el método de patrón de círculos**

Este método consiste en grabar toda la chapa sin deformar con círculos de diámetro conocido  $d_0$  mediante un tratamiento superficial electroquímico. Cuando la chapa se deforma los círculos se convierten en elipses con ejes de tamaño  $d_1$  y  $d_2$ , como podemos apreciar en la figura 3.5.



Figura 3.4- Aplicación del tratamiento de grabado

Una vez medidos dichos parámetros por diferentes métodos que veremos a continuación podemos proceder a calcular las deformaciones principales de la siguiente forma

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right), \quad \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right), \quad \varepsilon_3 = t/t_0$$

Las principales ventajas de este proceso es que las operaciones de medición se pueden realizar en sitios diferentes a donde se lleva a cabo el ensayo sin tener que hacerlo en el propio acto, pero por otro lado tienen una principal desventaja, requieren de gran perfección en el grabado ya que cualquier pequeña irregularidad anula el proceso, por esta misma razón la resolución es limitada y pequeñas deformaciones serán difíciles de medir.

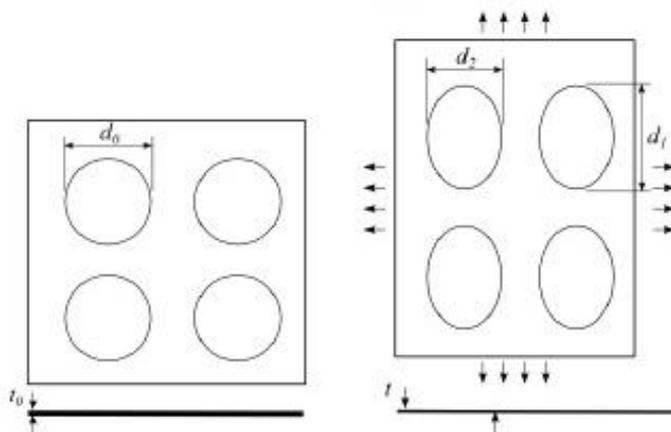


Figura 3.5- Estado de los círculos grabados antes y después del proceso de deformación (Suntaxi(2013))

A pesar de que la forma más usada de medir estas distorsiones de las circunferencias en otros proyectos e investigaciones del grupo ha sido mediante los sistemas Argus y Aramis descritos en el capítulo 1, en este trabajo simplificaremos el proceso haciéndolo mediante un microscopio conectado a una computadora en la que realizar estas mediciones a través de un software.

### 3.2.2. Medición de características geométricas

Como ya se mencionó en el primer capítulo, mediante Argus y Aramis podríamos medir características geométricas como el espesor final de la chapa deformada a lo largo de una sección, deformaciones en toda la chapa mediante procesamiento de imágenes, etc. En cambio, aquí lo haremos de una forma mucho más clásica; usando instrumentos de medición como el pie de rey, un medidor de espesor portátil y algún dispositivo visual.

## **4. Resultados y análisis**

En el presente capítulo mostraremos los resultados obtenidos en términos de fuerzas a las que se ve sometida la herramienta, deformaciones principales, a lo largo de todo el proceso en varios puntos de la pared interior y exterior de la chapa y la evolución de éstas en una sección de la geometría final además de la comparación con resultados experimentales, deformación equivalente o media, evolución de tensiones principales y tensión hidrostática en el proceso y en las zonas de interacción de la herramienta con la chapa y una variedad de comparaciones geométricas entre los diferentes modelos y con respecto a la geometría obtenida en el ensayo y el modelo CAD (espesores, precisión, etc.). Se pondrá especial énfasis en la comparación de estas variables entre los diferentes modelos atendiendo a la variación de éstas según el diámetro de la herramienta.

### **4.1. Fuerza en la herramienta**

Una vez finalizada la simulación hasta obtener una profundidad en la chapa de aproximadamente 28 mm (ésta es a la cual se produjo la fractura en el ensayo experimental y corresponde a  $72.5^\circ$ ) obtenemos los resultados de la fuerza a la que se ve sometida la herramienta en las tres direcciones durante todo el proceso, para ello tendremos que aplicar un cierto filtrado para eliminar ondas que no son de nuestro interés; en el caso experimental serán debidas al ruido de los dispositivos de medición y eléctricos y en el caso de los modelos FEM tendrán causa en la disposición y cambio de los elementos en la malla durante el proceso. Cabe destacar que en el instante inicial la herramienta está en contacto con la chapa justo en el punto donde realizará la primera bajada, por ello la fuerza no empezará desde un valor nulo.

En la siguiente figura se representa la evolución de la carga en las tres direcciones en la simulación con la herramienta de 10 mm de diámetro.

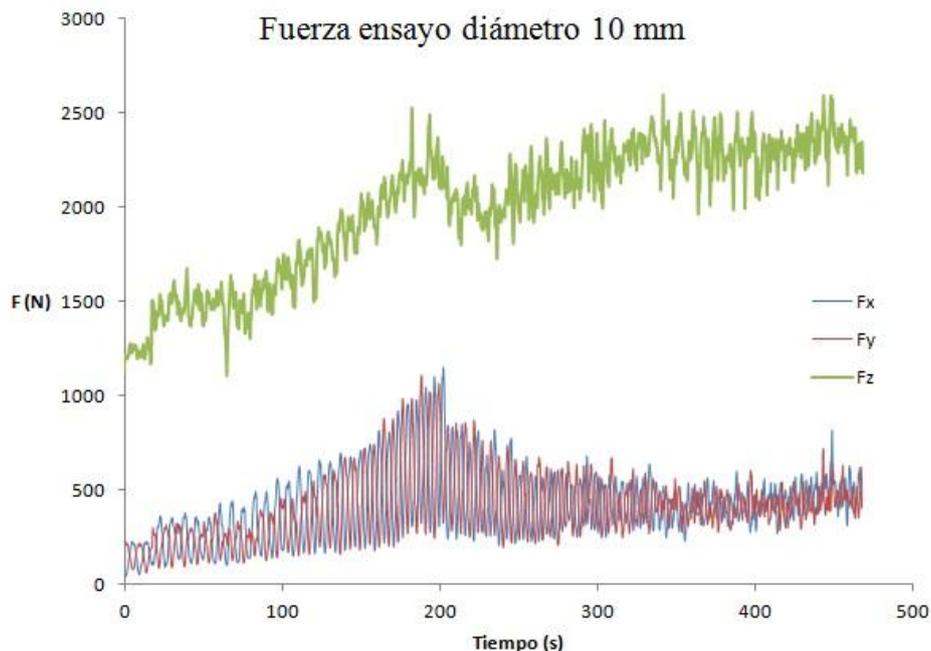


Figura 4.1- Evolución de la fuerza en la simulación con la herramienta de diámetro 10 mm

Como podemos apreciar la mayor carga a la que se somete a la herramienta es la vertical, llegando a un valor máximo que ronda los 2500 N. También observamos que la fuerza necesaria para conformar la chapa aumenta conforme vamos avanzando en el proceso, es decir; a mayores ángulos de inclinación de la pared la carga necesaria es mayor, este efecto se suaviza al llegar a un valor próximo al máximo dado debido, entre otras causas, a la ley de comportamiento del material; ésta alcanza un máximo que se mantiene a los 226.3 MPa en términos de tensión real, asemejándose a un comportamiento elastoplástico perfecto que a estas alturas de deformación no produce endurecimiento. Las tres curvas muestran una cierta periodicidad o forma senoidal, especialmente notoria en el caso de las fuerzas horizontales  $F_x$  y  $F_y$  debida a lo siguiente: cuando el punzón va recorriendo su trayectoria circular va encontrándose material aún no deformado por lo que tiene que ejercer mayor fuerza para continuar su camino hasta llegar al punto inicial, donde la evolución sufre un mínimo local y de nuevo vuelve a aumentar llegando a alcanzar un máximo, especialmente en el caso de la  $F_z$ , debido a la nueva bajada y penetración en la chapa.

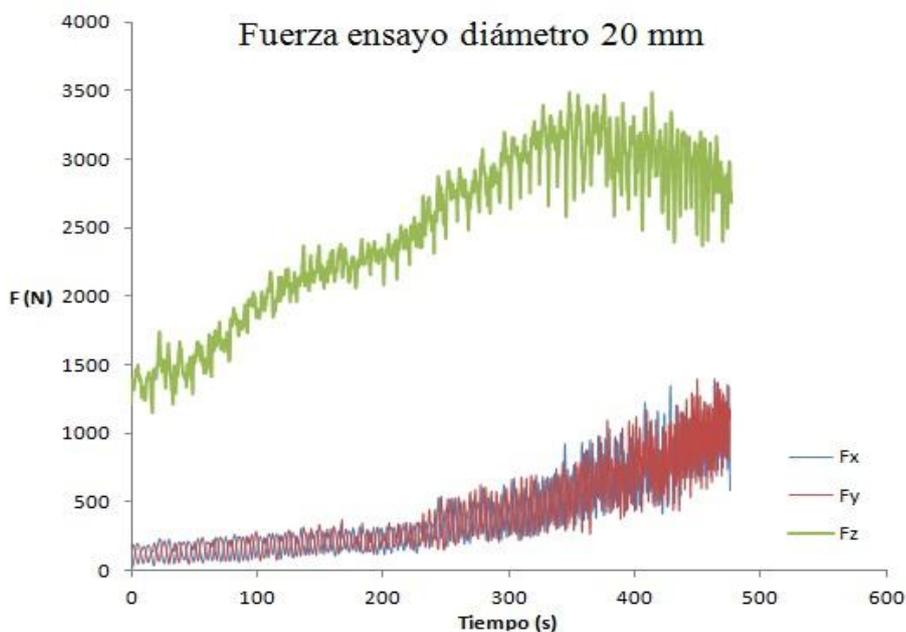


Figura 4.2- Evolución de la fuerza en la simulación con la herramienta de diámetro 20 mm

En este caso podemos apreciar las mismas características que comentamos en el modelo anterior, se aprecian unas subidas y bajadas correspondientes a la trayectoria circular de la herramienta y al *step down* en cada vuelta, ahora la fuerza máxima vertical se sitúa alrededor de 3500 N, las diferencias entre estos máximos serán comentados junto con la figura 4.3.

Otro punto a destacar en las dos figuras anteriores es la continua tendencia ascendente en las fuerzas en el plano horizontal, esto no es más que una consecuencia de la trayectoria de la herramienta; mientras más verticales son las paredes de la chapa mayor es la zona lateral del punzón que entra en contacto con ésta, dándose por tanto cada vez más empuje lateral.

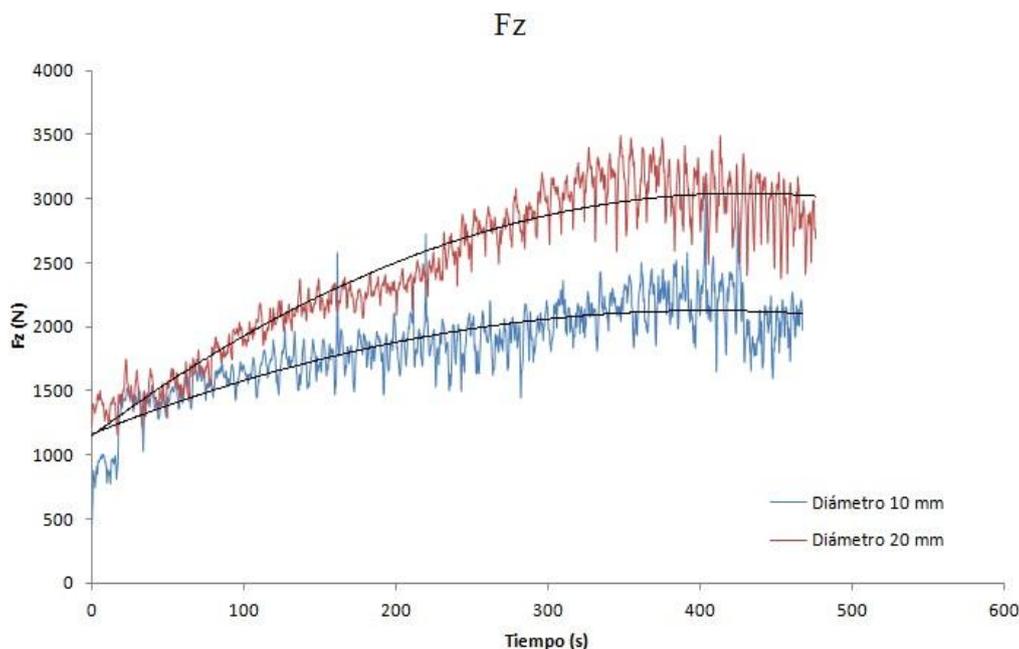


Figura 4.3- Comparación de fuerza vertical en ambos modelos; diámetro 10 mm y diámetro 20 mm

Como ya hemos comentado, la fuerza en el modelo de 20 mm de diámetro alcanza 1000 N por encima de la registrada en el modelo de 10 mm, esto se debe al hecho de que al tener un diámetro mayor la zona de contacto herramienta-chapa será también mayor, teniendo por tanto más zona de deformación local en cada instante.

Se puede observar también una ligera disminución en la evolución de la carga vertical en ambos casos, ésta puede ser debida entre otras causas a que conforme vamos bajando en dicho eje el punzón va deformando más lateralmente la chapa, aumentando por tanto la relación entre el material ya deformado previamente y el indeformado, disminuyendo la fuerza a ejercer por la herramienta.

En la siguiente figura apreciaremos mejor esta disminución de la fuerza necesaria para el conformado, en ella se compara el valor de la carga registrada experimentalmente en el ensayo con la obtenida por el método FEM en el caso de  $D = 10$  mm.

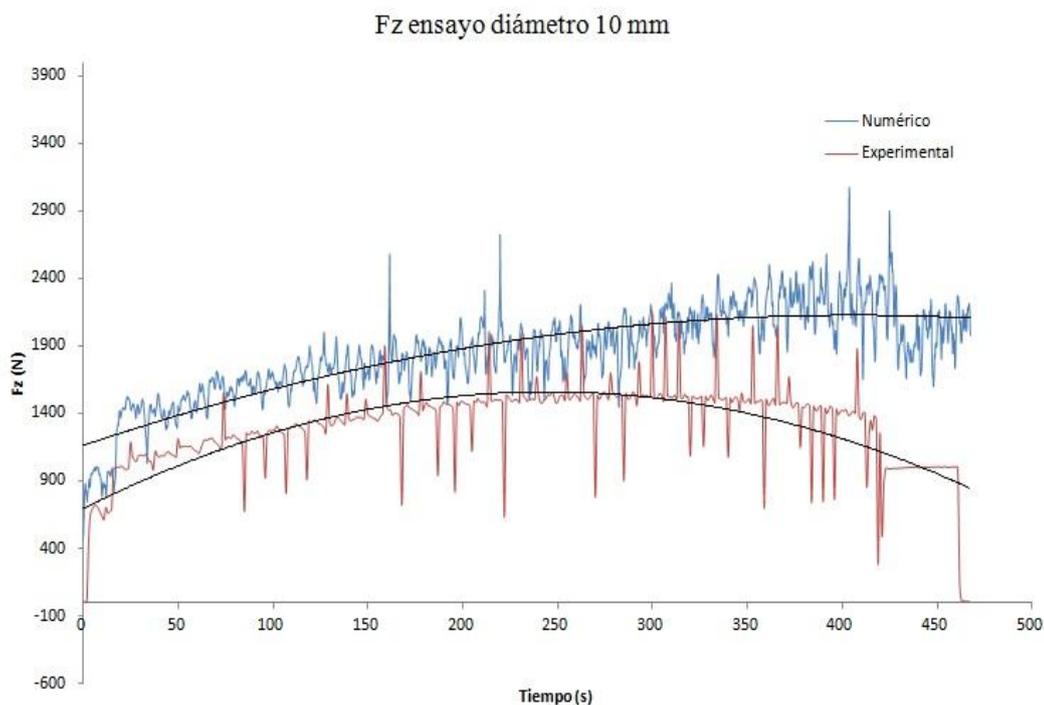


Figura 4.4- Fuerza vertical en el ensayo y en el modelo numérico en el caso de diámetro 10 mm

El principal hecho a destacar en cuanto a diferencia entre las evoluciones experimental y numérica es que en el caso del modelo de elementos finitos la curva de fuerza vertical está siempre por encima, esto es así debido al tipo de endurecimiento supuesto y comentado en el capítulo 2; endurecimiento isotrópico en vez de cinemático, este último más cercano a la realidad. En consecuencia de este hecho los valores serán de mayor magnitud.

En este gráfico también podemos validar lo comentado en las figuras anteriores en cuanto a las trayectorias circulares ya que podemos observar cómo el intervalo de tiempo entre picos y valles es cada vez menor conforme nos adelantamos en el proceso; esta explicación reside en el hecho de que al tratarse de un cono las circunferencias a describir por el punzón para ir conformando la chapa son cada vez de diámetro menor, teniendo que recorrer por tanto menor camino hasta llegar de nuevo al punto inicial ya deformado.

## 4.2. Tensiones

En este subcapítulo analizaremos el estado tensional en distintos puntos de la chapa a lo largo del proceso completo; desde que el punzón realiza la primera bajada hasta que se alcanza la profundidad considerada como final. Se estudiarán como variables las tres tensiones principales, la tensión de Von Mises, y por último se pondrá especial interés en la variabilidad de la tensión hidrostática ante diferentes diámetros de la herramienta.

### 4.2.2. Tensiones principales y tensión equivalente

En primer lugar estudiaremos el estado de las tensiones principales en la chapa, estas tensiones vienen definidas geoméricamente en el caso que nos ocupa de la siguiente forma:

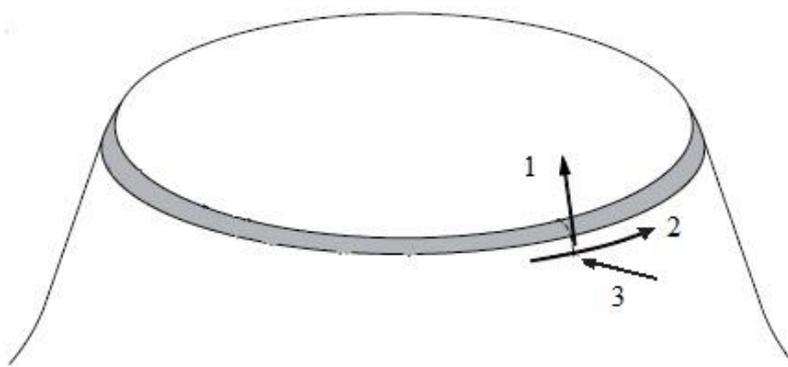


Figura 4.5- Direcciones principales en el proceso

En esta figura podemos observar las tres direcciones principales para el caso de tensiones y también para las deformaciones;  $\sigma_1$  es la tensión principal máxima y corresponde al esfuerzo que realiza la herramienta para estirar la chapa, va en dirección “longitudinal” con ésta,  $\sigma_2$  es la conocida como tensión media y es la que va en dirección circunferencial; como se puede deducir será de compresión en las zona que queda inmediatamente por delante del punzón y de tracción en la posterior,  $\sigma_3$  será la tensión de compresión que producirá la disminución del espesor en la chapa; es perpendicular a ésta en el punto de incidencia de la herramienta.

A continuación daremos la evolución de las tres tensiones principales en dos puntos de especial interés (figura 4.6) a lo largo de todo el proceso y para ambos modelos; diámetro 10 y 20 mm.

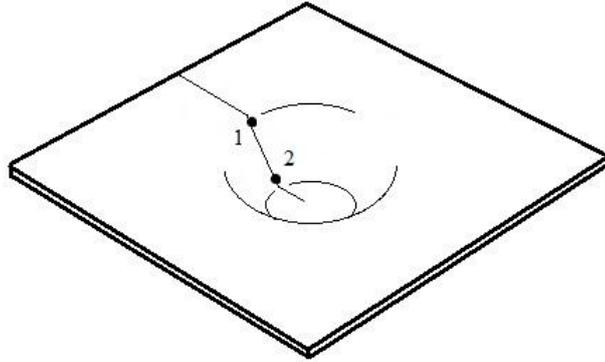


Figura 4.6- Puntos seleccionados para estudiar la evolución de las tensiones principales

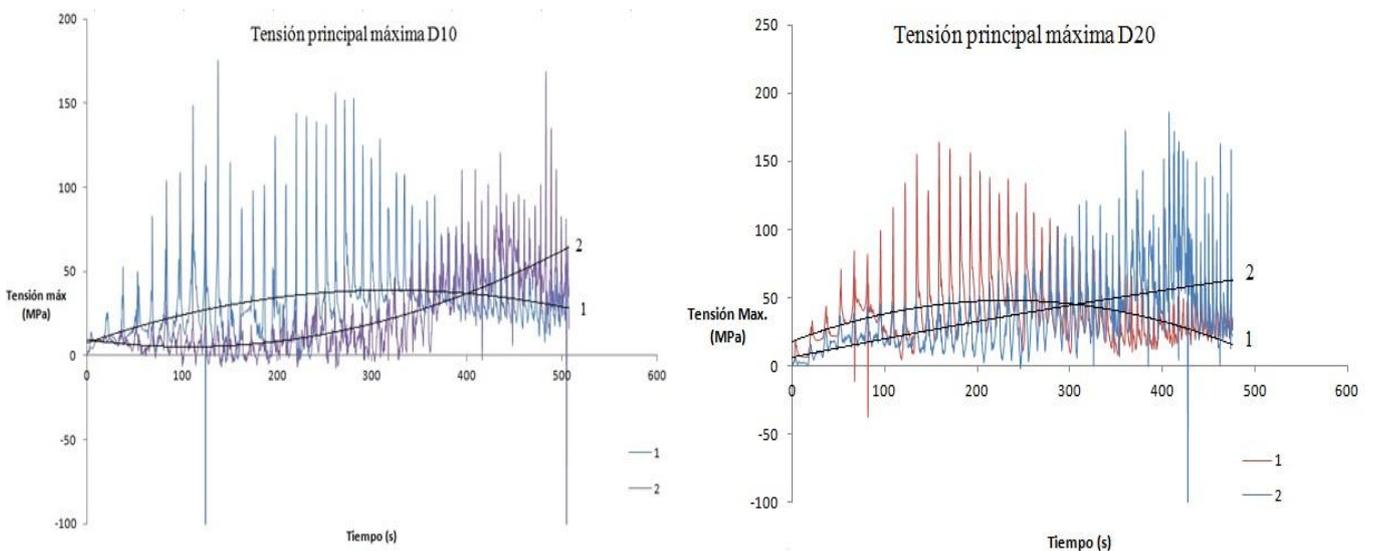


Figura 4.7- Tensión principal máxima en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y para el de 20 mm (derecha)

En ambos casos observamos una evolución de tensiones prácticamente iguales en cuanto a valores máximos y medios; alrededor de 150 MPa como máximo y sobre 50 MPa de media. En esta figura se aprecia también de forma clara cómo en los dos modelos la tensión aumenta en el intervalo de tiempo en el que el punzón está pasando por la zona por la que está situado el punto; poco después del inicio del proceso se inicia un ascenso de ésta dado que el punto 1 está en una zona inicial de la geometría tronco-cónica, conforme nos adelantamos en el tiempo esta sollicitación disminuye mientras que la tensión a la que se somete el punto 2 se va incrementando hasta llegar a un máximo en los instantes finales, como era de esperar al situarse dicho punto en la zona de la pared final. Es destacable también la forma de la evolución en cuanto a su composición por picos y valles; incrementos y descensos muy pronunciados de la tensión, esto sucede debido a la ya comentada localización de la deformación e incidencia de la punta de la herramienta en la chapa; cada pico será un instante en el que el punzón pasa por el punto material, descargándose conforme nos alejamos de éste y produciéndose por tanto una nueva bajada o valle.

En las siguientes imágenes se representan las evoluciones de las restantes tensiones principales para los dos diámetros de punta de la herramienta

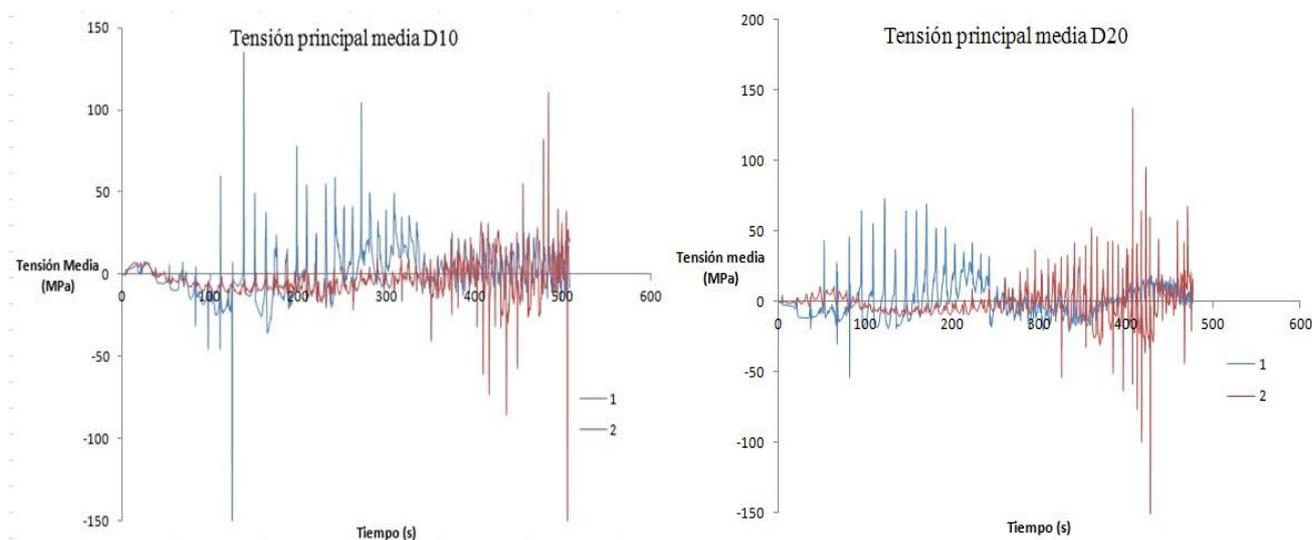


Figura 4.8- Tensión principal media en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y 20 mm (derecha)

En este caso las evoluciones entre ambos modelos siguen siendo muy similares en cuanto a forma y valores medios, máximos y mínimos. La principal diferencia con respecto a las evoluciones de la tensión principal máxima se encuentra en lo comentado al principio del capítulo; si por ejemplo nos fijamos en la curva que representa al estado en el punto 1, ésta tiene puntos de compresión y de tracción debido al hecho de que cuando la herramienta está cercana al punto material pero sin pasar por éste produce una tensión de compresión circunferencial, mientras que cuando se aleja se produce un estirado o tracción. La diferencia entre máximos y mínimos se hace mayor conforme nos vamos acercando al punto seleccionado pero también hay que destacar que cuando nos alejamos en el proceso de dicha zona ésta seguirá estando sometida a dicha componente tensional aunque con menor dispersión en su evolución.

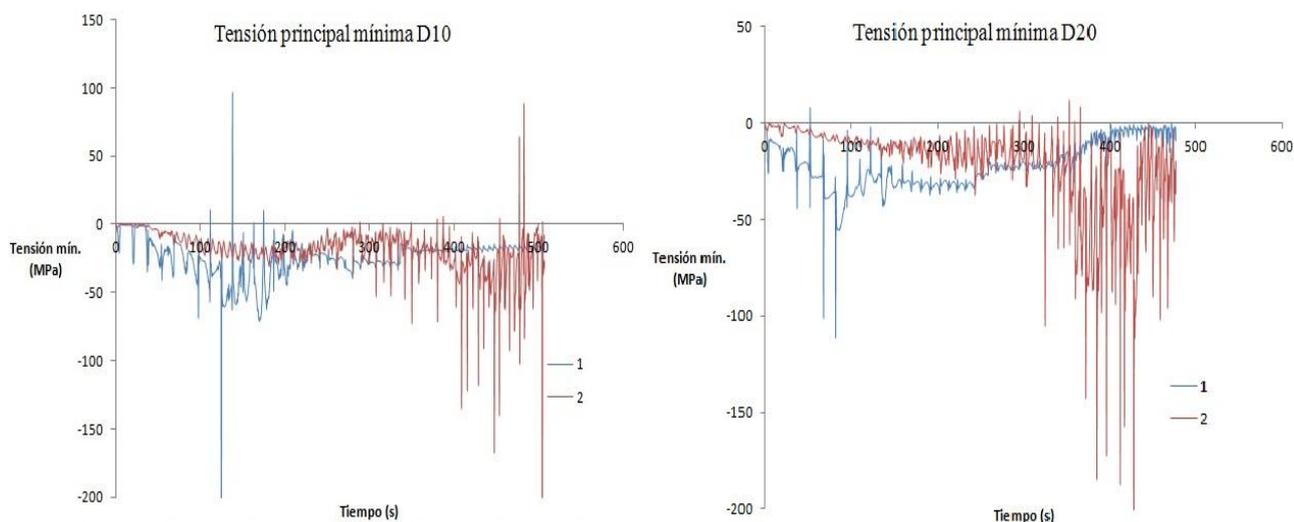


Figura 4.9- Tensión mínima principal en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y 20 mm (derecha)

Como era previsible, en este caso las evoluciones de la tensión principal mínima o  $\sigma_3$  son de valor negativo en todo el proceso ya que el espesor de la chapa siempre disminuye y no aumenta. Aquí también se puede comprobar de forma clara cómo el valor medio y la dispersión entre picos y valles aumenta conforme nos acercamos al punto de estudio, 1 ó 2.

Por último obtendremos la tensión equivalente a lo largo del tiempo en los 2 puntos para cada caso, para ello previamente definiremos esta tensión equivalente a partir de las tres componentes principales, se ha elegido como ya se comentó previamente el criterio de plastificación de Von Mises por lo que el valor de esta componente media vendrá dado por la ecuación (apartado 2.1.2.1.):

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)}$$

$$= \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

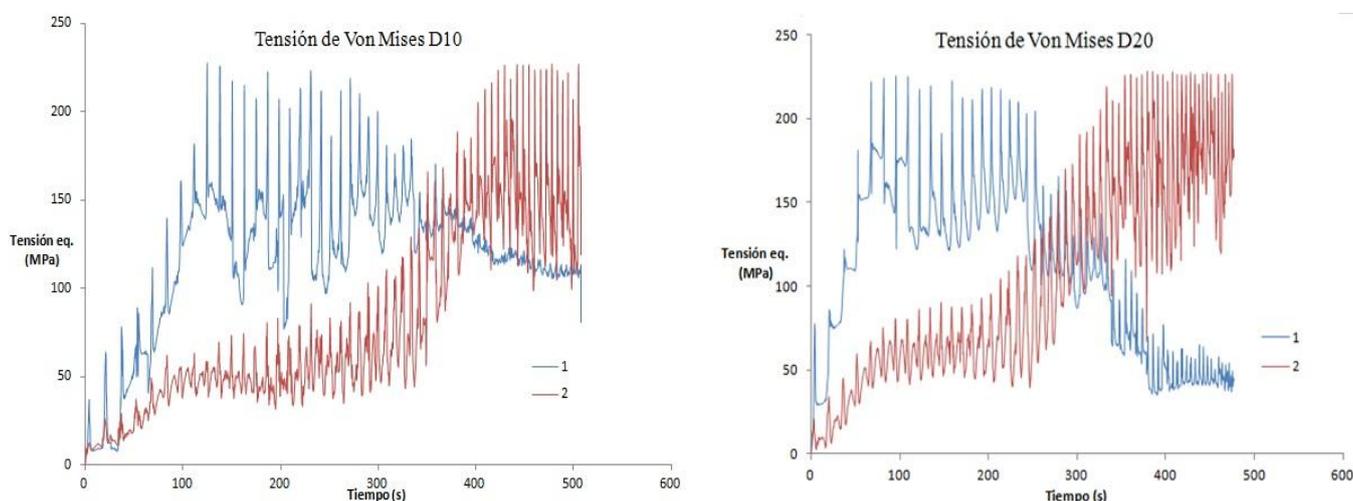


Figura 4.10- Tensión de Von Mises en 2 puntos para el caso de diámetro 10 mm (izquierda) y 20 mm (derecha)

Volvemos a observar ahora gran similitud en ambos procesos; la tensión máxima se sitúa en torno a 225 MPa, valor muy próximo a la tensión de fluencia del material, 226.3 MPa, a partir de este punto la evolución tendrá una tendencia constante debido a la ley de comportamiento del material; se ha alcanzado la máxima tensión posible al tratarse de un material elastoplástico.

Podemos concluir por tanto que la tensión necesaria para conformar la chapa en este proceso, en términos de tensiones principales y de tensión equivalente, no difiere notablemente en relación a cambios en el diámetro de la herramienta.

### **4.2.3. Tensión hidrostática**

Las deformaciones producen distorsión en la forma y cambios de volumen en el material. En cualquier estado de tensiones  $\sigma_{ij}$  hay una componente hidrostática,  $\sigma_H$ , que se puede expresar en función de las tensiones principales de la siguiente forma:

$$\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

Por tanto, esta componente no interviene en la deformación plástica en los metales.

La importancia de estudiar el estado de la tensión hidrostática y su variación en el proceso ante cambios en el diámetro de la herramienta reside en la caracterización de ésta como uno de los fenómenos más importantes que provocan el aumento de la conformabilidad en el SPIF. Como se describe en Emmens et al. (2009) si la componente hidrostática es negativa tendrá un efecto de compresión en la zona estudiada evitando el crecimiento de los microhuecos internos, por tanto ésta no tendrá influencia en la estabilización y localización de la deformación pero si en el retraso de la fractura. Es deducido aquí también que la tensión hidrostática está fuertemente ligada a la tensión de contacto; la componente  $\sigma_3$  en la zona de contacto herramienta-punzón, que ésta sea de compresión y sus mínimos tendrán gran influencia en la evolución de la hidrostática.

Por todo ello se analizará el estado de esta componente en un punto material a lo largo de un intervalo de tiempo para observar la influencia del diámetro de la herramienta en su incidencia con la chapa. Se estudiará también la presión de contacto a través del espesor en ambos modelos.

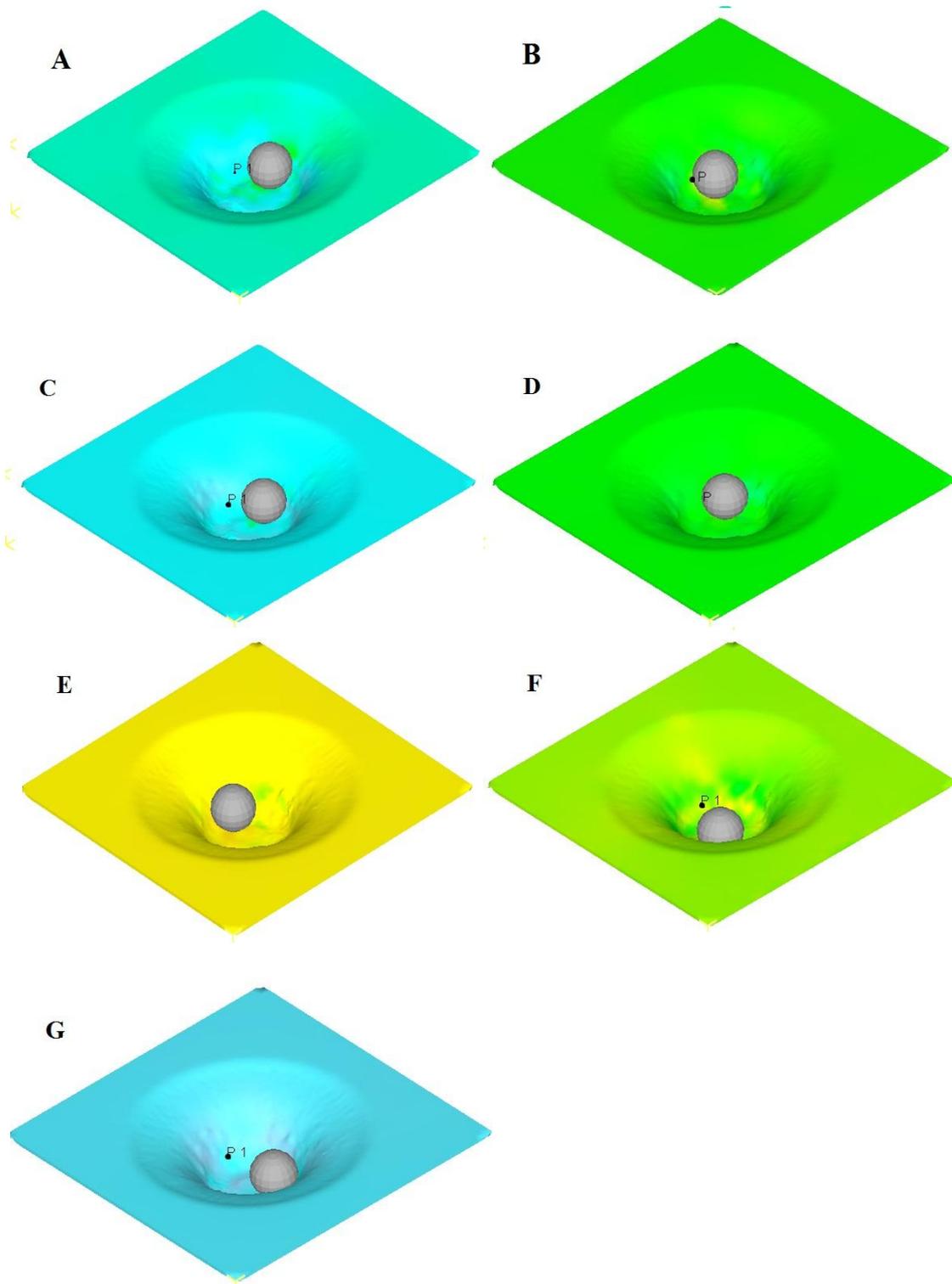


Figura 4.11- Representación del punto a estudiar en diferentes etapas

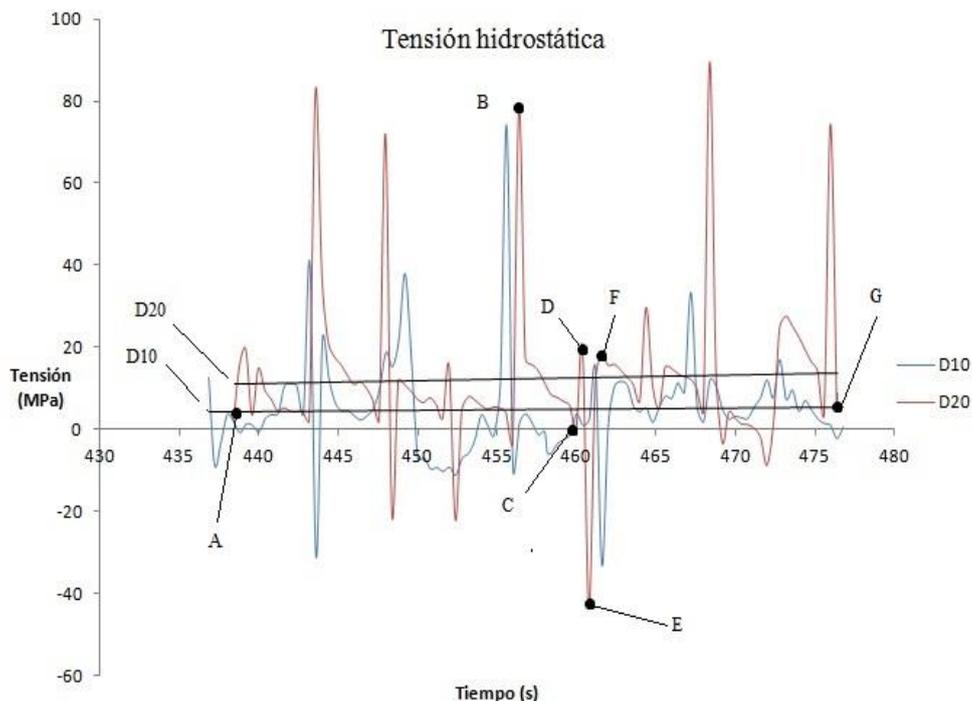


Figura 4.12- Evolución de la presión hidrostática en el punto de estudio para ambos modelos de diámetro de herramienta

En la figura 4.11 se ha mostrado como ejemplo el caso del diámetro del punzón igual a 20 mm para observar cómo afecta el paso de la herramienta por dicho punto. En la figura 4.12 podemos observar que cuando la punta del punzón se va acercando al punto de la chapa elegido pero aún se mantiene lo suficientemente lejos se produce un pico de tensión hidrostática máxima, conforme nos vamos acercando este valor máximo disminuye hasta que la herramienta pasa por dicho punto, dándose entonces un valor negativo que ayudaría a evitar el fallo del material. Como se ha visto en la formulación de esta componente a partir de las tres tensiones principales, dependerá del valor de cada una de ellas en cada instante y en dicho punto, por tanto no será arbitrario predecir el signo de ella. Por otro lado, si que se puede obtener el gráfico la conclusión de que a mayores diámetros de herramienta, mayor valor medio de presión hidrostática y por tanto menor influencia de este efecto en el aumento de la conformabilidad, además en el caso de punzones más pequeños los picos se quedan en valores máximos severamente menores.

En la siguiente figura se evalúa la componente de estudio en este punto a lo largo de todo el proceso; se muestra de forma clara cómo el valor medio en el caso de punzón más pequeño es negativo hasta que éste se va acercando al punto material, entonces la evolución comienza a crecer hasta valores positivos, en el caso del diámetro mayor el valor medio de ésta es positivo en todo el proceso.

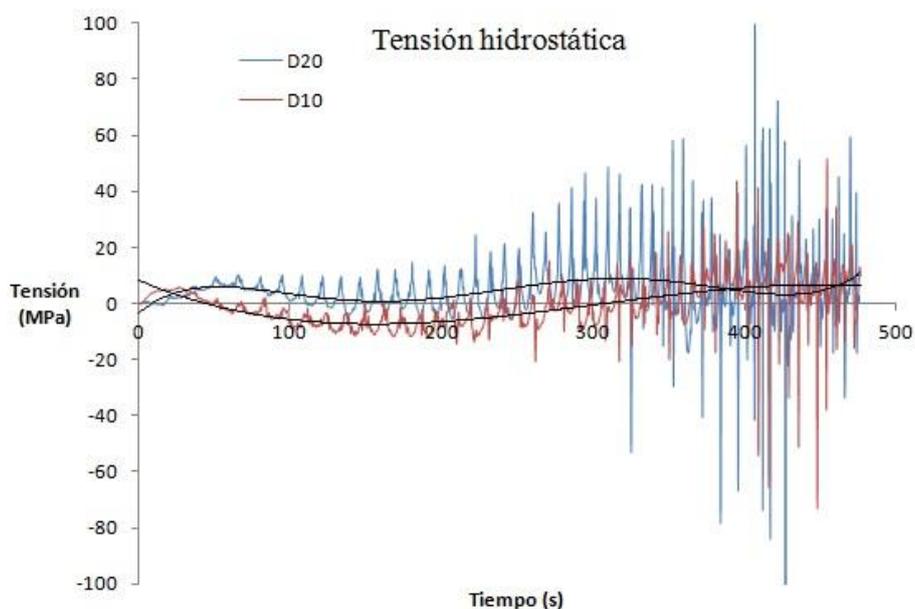


Figura 4.13- Evolución de la presión hidrostática en el proceso completo en ambos modelos de diámetro de la herramienta

Para observar la diferencia entre la evolución de esta variable en la cara interior del cono y la cara exterior o inferior evaluamos ésta a través del espesor en varios puntos de la zona de contacto de la herramienta con la chapa en el caso del punzón de diámetro 10 mm.

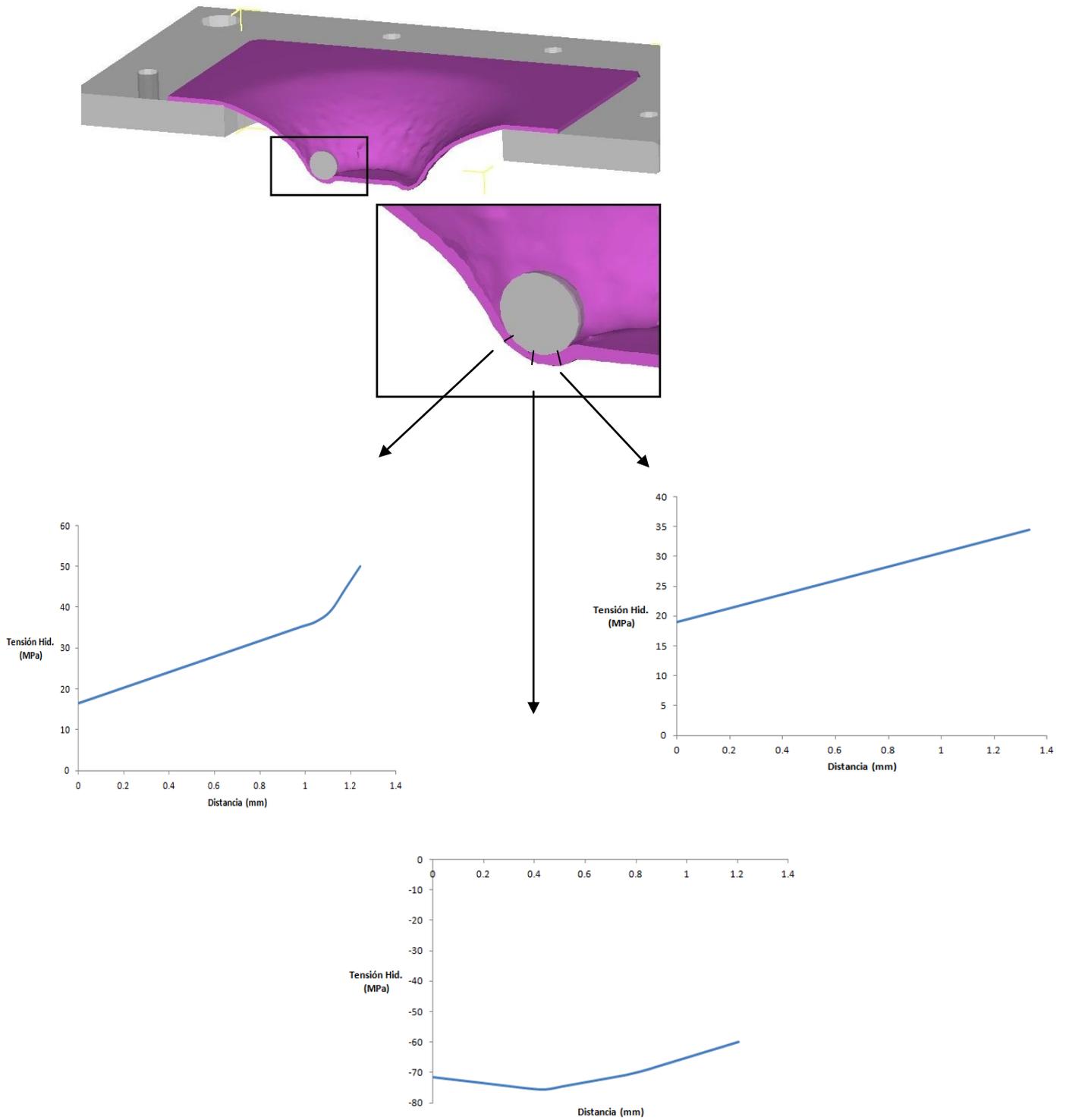


Figura 4.14- Evolución de la tensión hidrostática a través del espesor en la zona de contacto con la herramienta de 10 mm

En la figura anterior observamos cómo la tensión hidrostática aumenta a lo largo del espesor hasta llegar a un valor máximo en la cara exterior, tal y como se expone en Fang et al. (2014) como podemos apreciar en la figura 4.15, hay que destacar también que la zona en la que menor es dicha componente es la de debajo del punzón debido a una tensión de contacto más negativa.

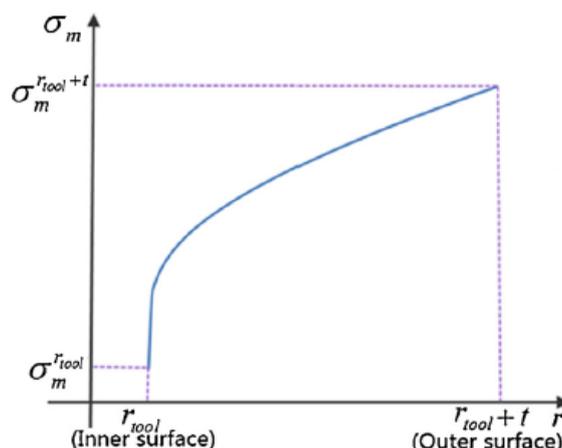


Figura 4.15- Evolución de la presión hidrostática en el espesor ( Fang et al. (2014))

La razón de esta forma creciente de la curva se explica mediante dos causas fundamentales; la tensión de contacto ( $\sigma_3$  en la zona de contacto de la herramienta) también aumenta a través del espesor partiendo de valores negativos en la cara interior hasta llegar a un valor cercano a cero en el exterior ya que no hay contacto con ningún otro elemento, esto hace que en la cara externa no haya prácticamente componente  $\sigma_3$  en la formulación de la presión hidrostática, haciendo que ésta aumente, por otro lado otro de los efectos más importantes dados en el proceso es la flexión o *bending*, que producirá en caso de flexión pura tensiones de compresión en la cara interna y de tracción en la exterior, si le sumamos el estirado o *stretching* producido en el proceso el resultado será que la cara externa estará sometida a mayor valor de tracción pudiendo la cara interna estar sometida también a tracción o a compresión dependiendo del valor de la propia flexión, mecanismo más importante mientras menor sea el tamaño de la herramienta (figura 4.16) ya que también se producirá un mayor gradiente de deformaciones como bien se estudia en Martínez (2012), de aquí deducimos finalmente

que la cara interior siempre estará sometida a una sollicitación en términos de tensión menor que la externa, produciendo valores de presión hidrostática menores.

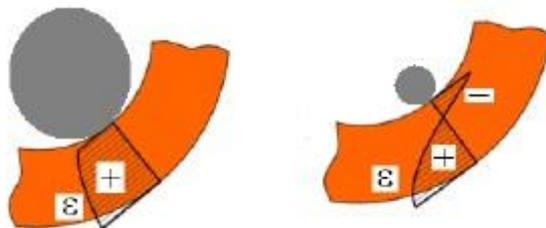


Figura 4.16- Efecto del tamaño de la herramienta en el gradiente de deformaciones en la chapa

En consecuencia de todo esto, podemos afirmar que el tamaño de la herramienta de conformado tiene una importante relevancia en términos de la mejora de la conformabilidad dada en el SPIF en relación a esta componente denominada hidrostática; esto es, a menores diámetros de herramienta menor valor medio de ésta, llegando incluso a tener una media de compresión, y por tanto tardando más tiempo en aparecer la grieta y producirse la fractura o fallo del material.

### 4.3. Deformaciones

Una vez estudiado el estado de las diferentes componentes de la tensión dada en el proceso nos centraremos a continuación en las deformaciones principales en la chapa una vez concluida la operación y en su evolución en el tiempo en diferentes puntos, compararemos además con las deformaciones límite dadas en el ensayo experimental.

La componente con mayor valor será en ambos modelos de herramienta la deformación principal que se da en la dirección 1, en la siguiente figura se representa la evolución de ésta en ambas caras a lo largo de la geometría final una vez retirado el punzón en una sección media, se observa que los máximos se dan en la zona más crítica del proceso; cuando el ángulo de la pared tiene un valor de unos 65°, zona en la que se llega a  $\epsilon_1=0.8$ . En cambio en la zona central de la chapa y en los alrededores la deformación será nula debido a que ahí no se ha actuado con el punzón.

También podemos observar en esta figura cómo la tendencia de la cara externa de la chapa será a estar más deformada, esto es debido al efecto de la flexión inducida por la herramienta, la cual producirá una mayor tensión en dicha cara que en la interna, como ya analizamos en el apartado anterior. Teóricamente la diferencia entre deformaciones en ambas caras será mayor en el caso del diámetro menor, 10 mm, debido a la mayor flexión producida.

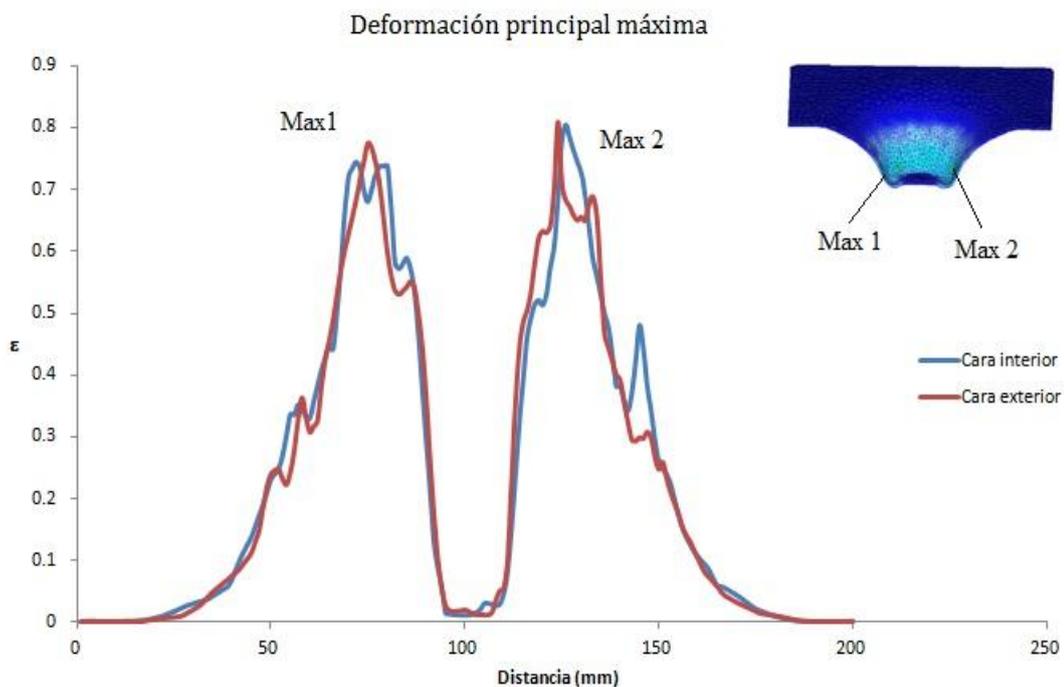


Figura 4.17- Deformación principal máxima en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro

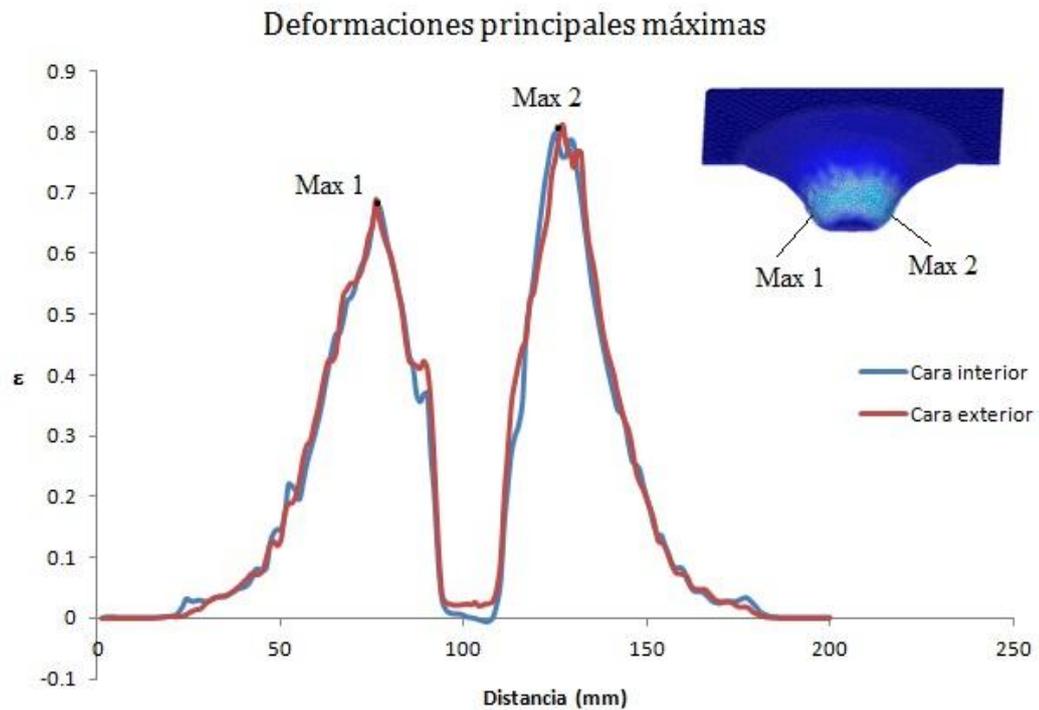


Figura 4.18- Deformación principal máxima en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro

En el caso de la tensión principal media o  $\epsilon_2$  podemos comprobar que es severamente inferior a la máxima dado que estamos en un proceso en el que se da una cierta simetría, no en la carga pero sí en la geometría de la chapa, existiendo infinitos planos radiales de simetría geométrica. De nuevo los máximos se dan en la misma zona crítica que en el caso anterior.

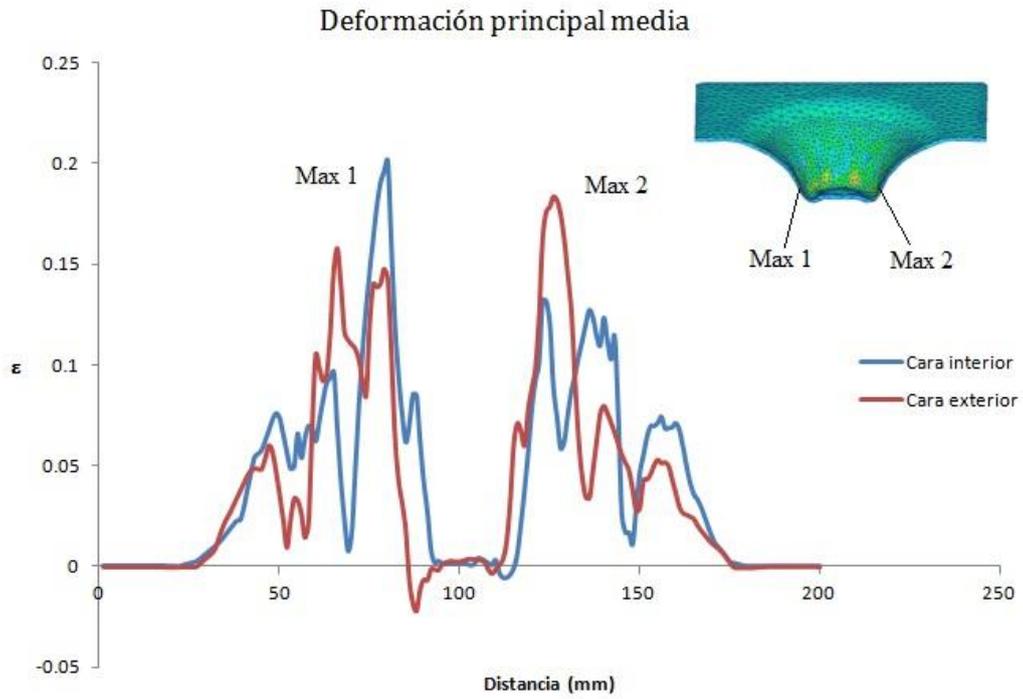


Figura 4.19- Deformación principal media en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro

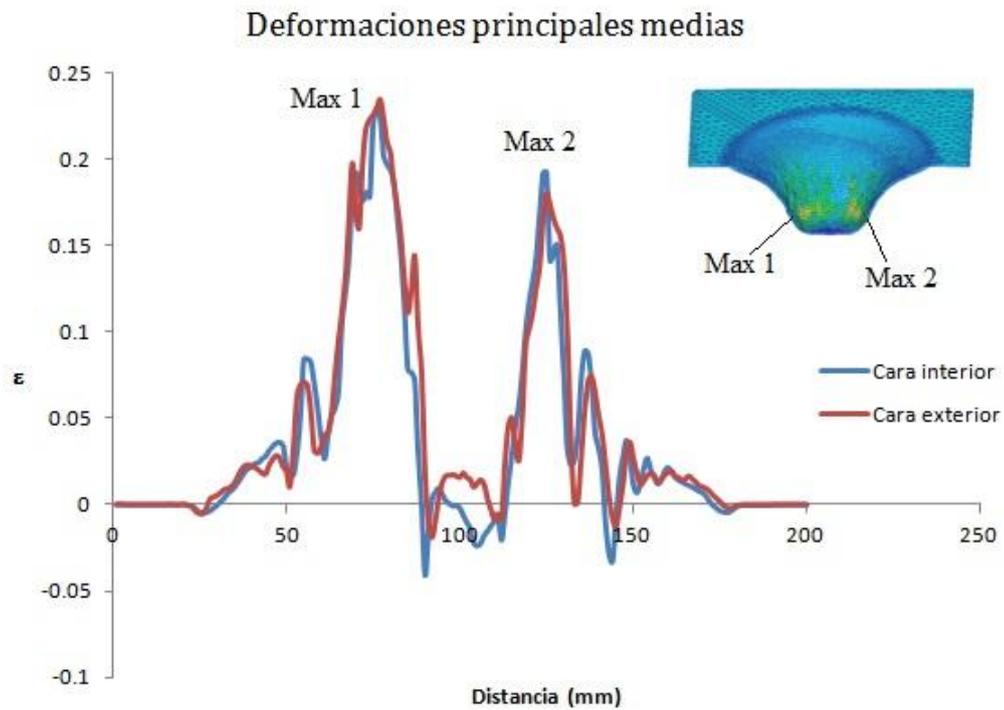


Figura 4.20- Deformación principal media en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro

La tercera y última componente de deformaciones principales es la de menor valor, ya que se trata de la disminución del espesor, los valores obtenidos en los modelos FEM son los siguientes

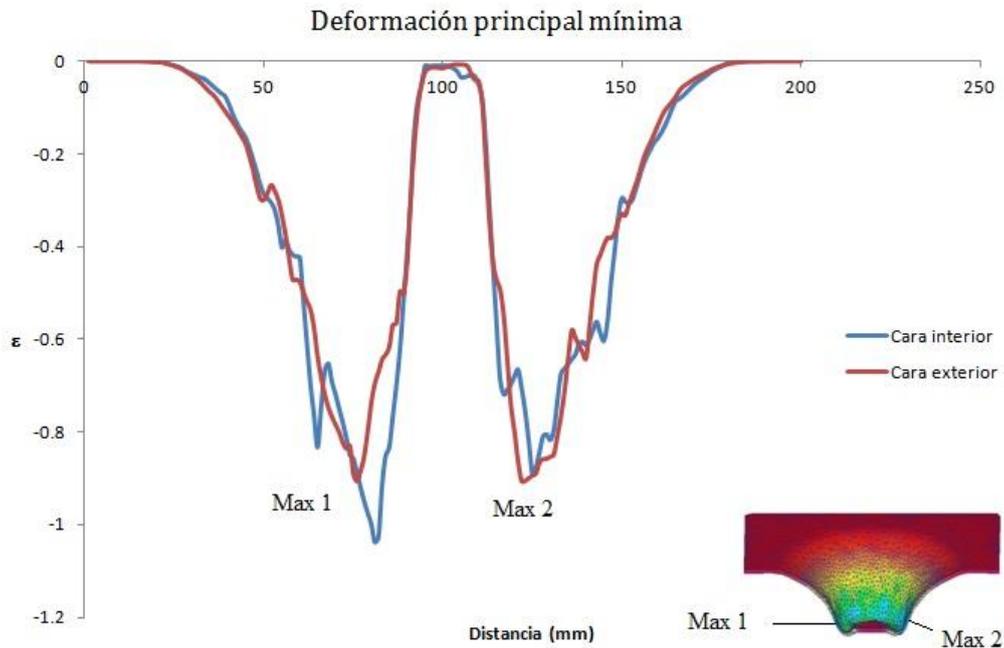


Figura 4.21- Deformación principal mínima en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro

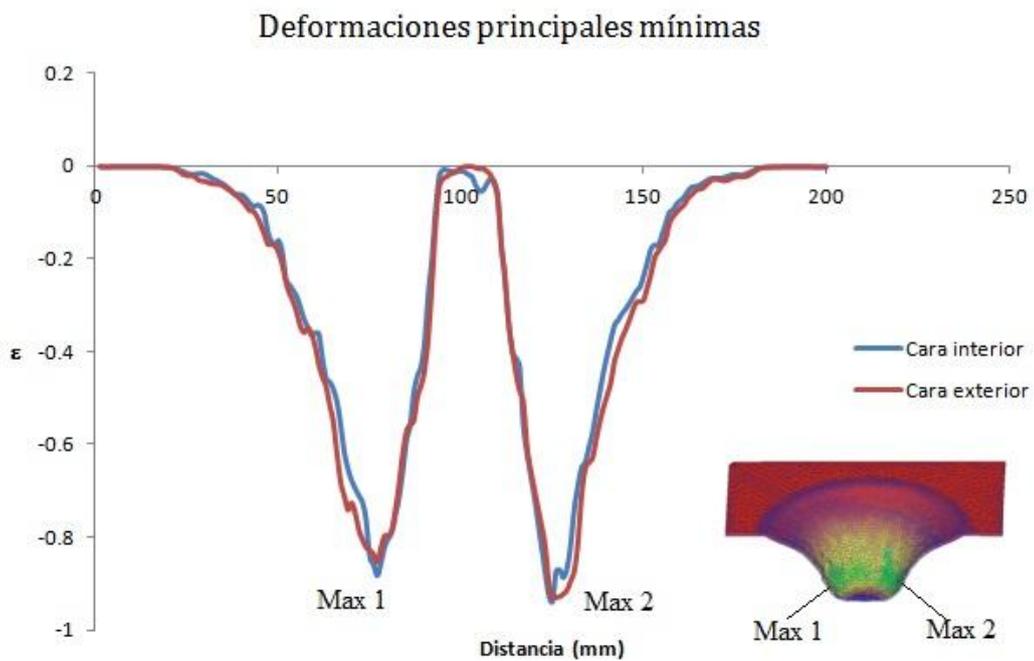


Figura 4.22- Deformación principal mínima en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro

En ambas gráficas observamos que el máximo decremento de espesor tiene un valor que ronda la unidad, produciéndose en la zona crítica situada en los puntos de contactos laterales de la chapa con el punzón.

Analizaremos ahora la deformación equivalente de Von Mises, término escalar obtenido a partir de una igualdad de energía dada mediante los términos equivalentes y mediante los tensores de tensión y deformación.

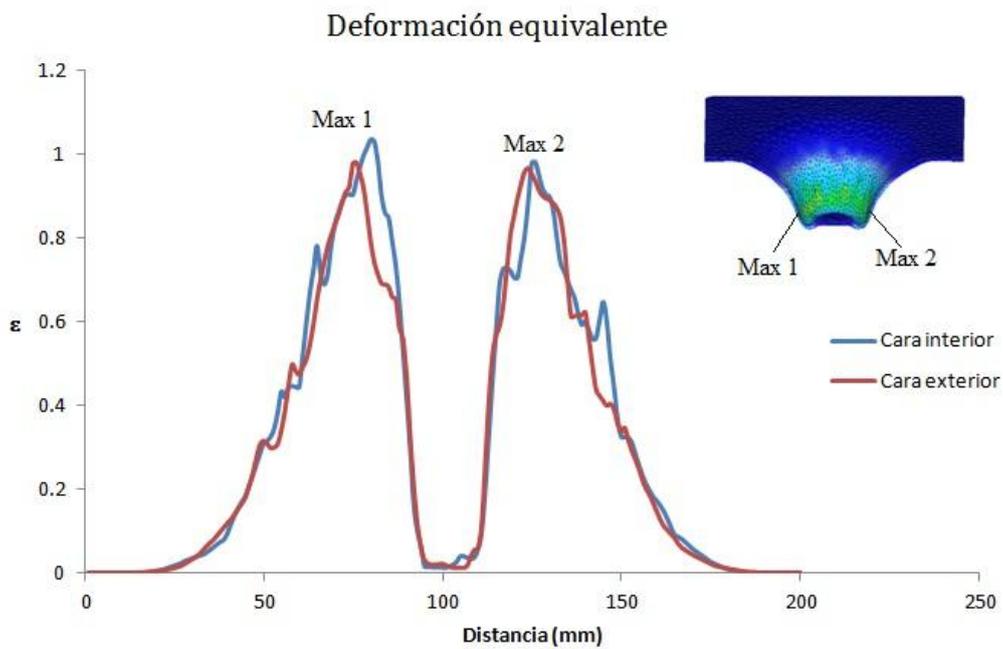


Figura 4.23- Deformación de Von Mises en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro

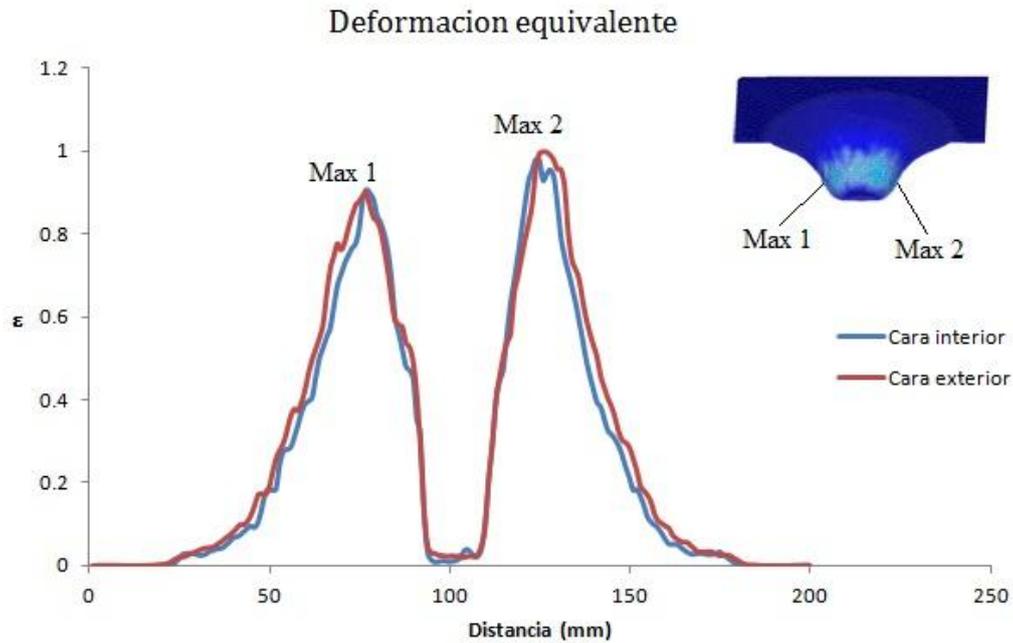


Figura 4.24- Deformación de Von Mises en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro

Si ahora sumásemos las tres componentes principales en deformaciones deberíamos obtener un valor nulo en cada punto si partiéramos de la hipótesis de incompresibilidad o conservación de volumen en los procesos de deformación plástica, es decir:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

En los modelos FEM se comprueba que el software no implementa dicho teorema como hipótesis al tratarse de un proceso elastoplástico, como podemos comprobar en la siguiente figura (curva morada), aunque podemos concluir también que ésta no difiere notoriamente de la realidad una vez se ha retirado el punzón y toda la deformación existente es plástica.

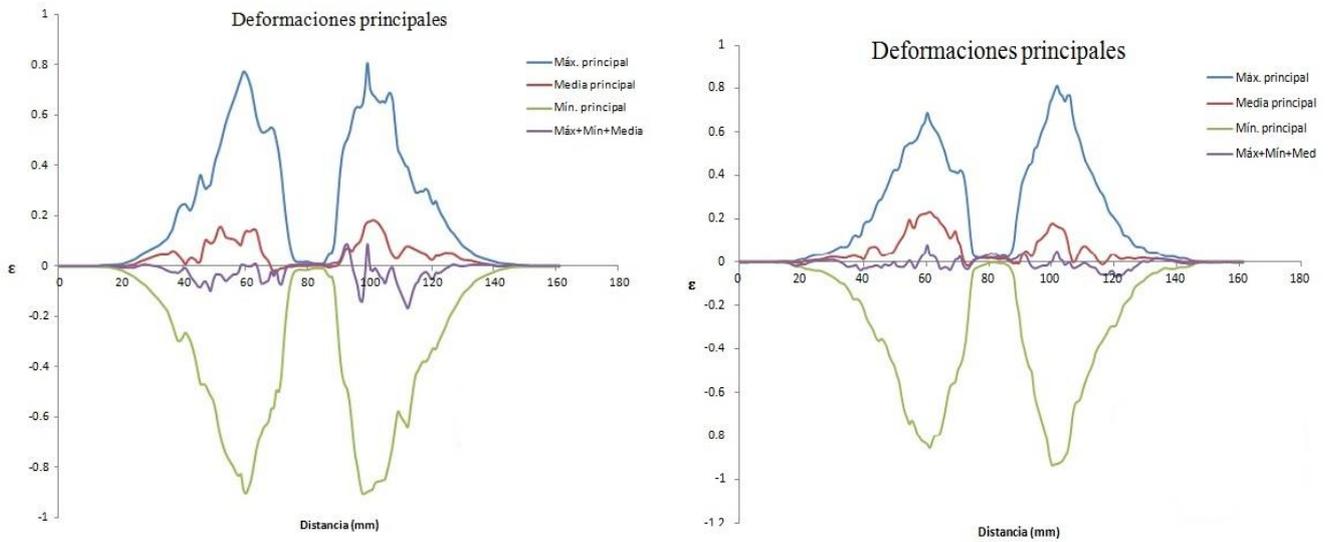


Figura 4.25- Evolución de las deformaciones principales y de la suma de éstas en el modelo de 10 mm de diámetro de herramienta (izquierda) y 20 mm (derecha).

Si medimos ahora la historia en deformaciones de varios puntos situados en la pared externa de la chapa desde el principio del proceso hasta que se retira el punzón y comparamos las componentes principales máxima y media podremos representar un diagrama en el que comparar con la FFL experimental para distinguir en qué punto y bajo qué estado de deformaciones se produce el fallo o rotura. Dicha curva FFL (*fracture forming limit*) no es más que una línea orientativa obtenida a partir de mediciones de deformaciones en la probeta ensayada, como describiremos más adelante, por tanto la curva real de fractura se encontrará un poco por encima en torno a  $\epsilon_1 = 0.85$  y  $\epsilon_1 = 0.9$ , ya que las mediciones realizadas experimentalmente se hicieron sobre la zona más deformada previa a la fractura para hallar deformaciones máximas y no en la propia grieta. En las siguientes figuras se representa lo comentado aquí y se dibuja también la envolvente generada por los estados de deformación más desfavorables en cada punto de estudio.

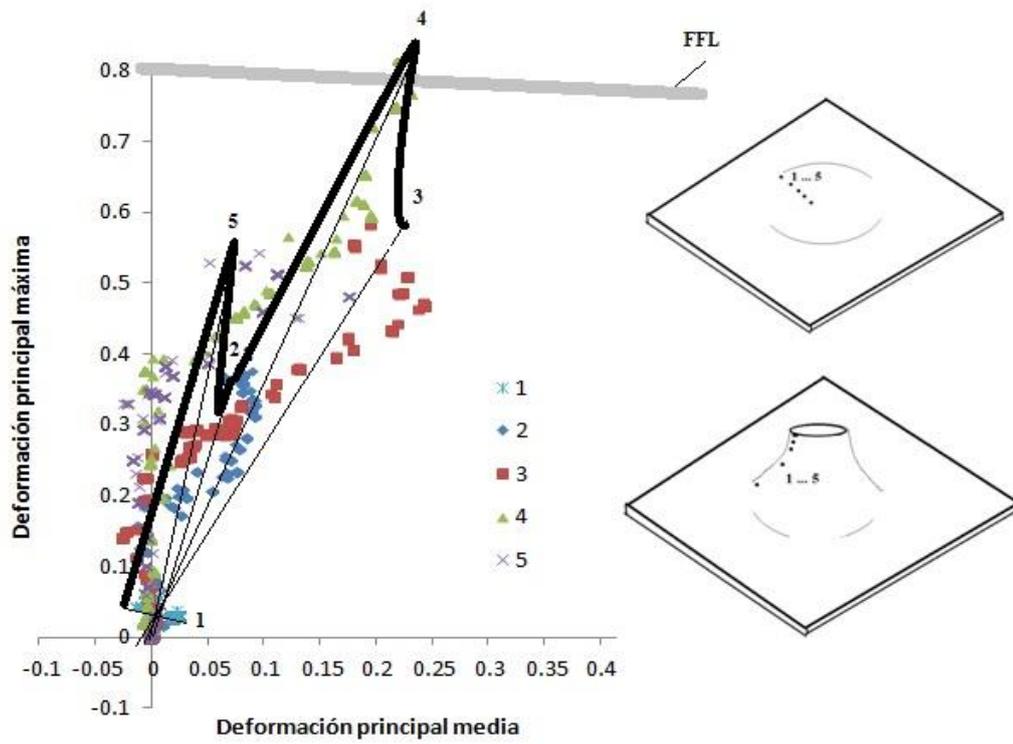


Figura 4.26- Historia de las deformaciones principales máxima y media en los puntos mostrados para el caso de herramienta de diámetro 10 mm y curva orientativa FFL

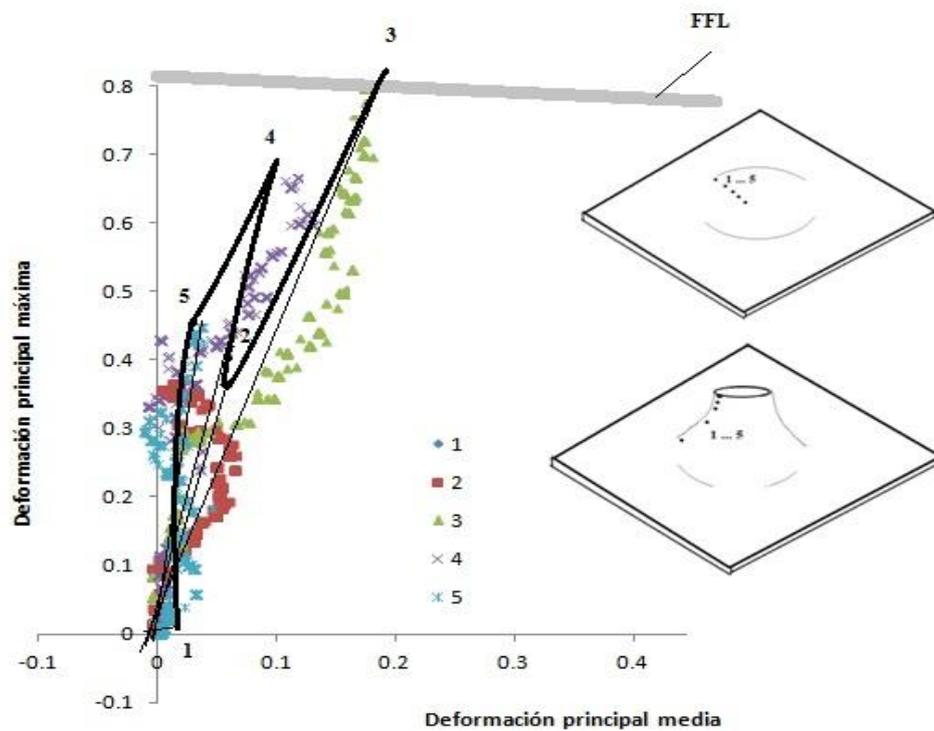


Figura 4.27- Historia de las deformaciones principales máxima y media en los puntos mostrados para el caso de herramienta de diámetro 20 mm y curva orientativa FFL

En estas figuras se representan los puntos mostrados en el esquema de la derecha y cada recta es la línea de tendencia para cada uno de ellos.

En el caso de la herramienta de menor diámetro, el fallo se produciría en el penúltimo punto, el número 4, situado en la zona anterior al último punto de contacto entre el punzón y la chapa. En cambio, para el caso de diámetro 20 mm, el estado de deformaciones más crítico se da en el punto 3, esto ocurre dado que al ser la herramienta mayor la zona crítica está por encima al ser la zona de contacto mayor como podemos observar en el siguiente esquema:

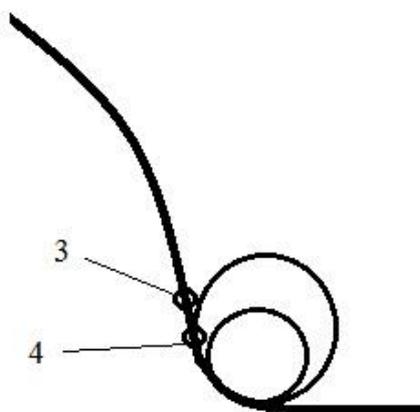


Figura 4.28- Puntos de fallo en ambos modelos de herramienta

Tanto en el modelo de 10 mm como en el de 20 mm se observa que la evolución del punto donde se alcanza el estado crítico de deformaciones sigue una trayectoria cercana a un estado de deformación plana local (ninguna supera  $\beta=1$ ) ya que podemos apreciar como la evolución de este está bajo condiciones en las que  $\varepsilon_2 \approx 0$  en los últimos instantes, cuando se da el fallo. Si nos centramos en la evolución única de cada punto podemos destacar cómo los puntos situados más al principio de la trayectoria recorrida por la herramienta (punto 1 y 2) se ven sometidos a unos niveles de deformación menores, especialmente el punto 1, esto es debido principalmente a la localización de la deformación que hace que éste solo se vea afectado al principio del proceso quedando en instantes posteriores bajo el mismo estado ya que la herramienta se aleja de él, por otro lado, los puntos 3 y 4 son los sometidos a mayores valores de  $\varepsilon_2$  y por tanto a una mayor bi-axialidad dado que se trata de los puntos que en instantes finales más están en

contacto con el lateral de la herramienta, si continuamos hacia el centro de la chapa (punto 5) volvemos a condiciones de mayor deformación principal máxima ya que nos empezamos a referir a la zona de contacto que queda por la parte inferior de la herramienta, realizando un mayor esfuerzo vertical que en zonas laterales de ésta. Volviendo a tratar la localización de la deformación podremos observar cómo al principio del proceso este punto final se verá sometido a un estado de deformación nulo.

Como ya comentamos anteriormente, la tendencia de todos los puntos de estudio a estados de deformación plana es debida a la existencia de infinitos planos de simetría radial geométricos en el proceso.

Una vez llegados a este punto, podemos observar el efecto cíclico e incremental de la deformación, este mecanismo es también de gran importancia en el aumento de la conformabilidad de un material como ya se comentó en el capítulo 1; si nos fijamos en un punto material de la chapa y pasamos con la herramienta recorriendo la trayectoria especificada, la estricción no tendrá tiempo para desarrollarse completamente haciendo que el material llegue directamente al punto de fractura, cabe mencionar que a pesar de no ser el mecanismo de fallo predominante en el SPIF, sí que se da una pequeña disminución en la zona de rotura previa al fallo final como se demuestra en Centeno et al. (2013). Volviendo a las simulaciones realizadas en este trabajo, podemos comprobar el efecto incremental de la deformación en cualquier punto, por ejemplo en el punto 2, uno de los pertenecientes al análisis de la historia de deformaciones anterior. Se representa en la siguiente figura la deformación equivalente en un pequeño intervalo de tiempo en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro.

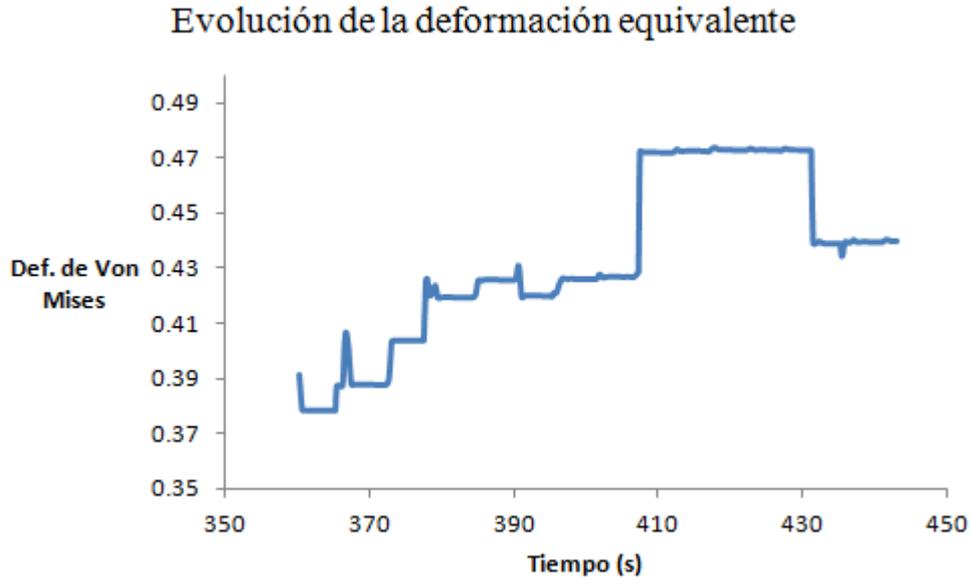


Figura 4.29- Deformación equivalente a lo largo de un intervalo de tiempo en el punto 3

Finalmente, para comparar con el ensayo experimental las deformaciones límite del proceso nos basamos en las ecuaciones del apartado 3.2.1 y mediante el sistema óptico realizamos las mediciones en la zona crítica previa a la zona de fractura en el ensayo con herramienta de diámetro 10 mm.

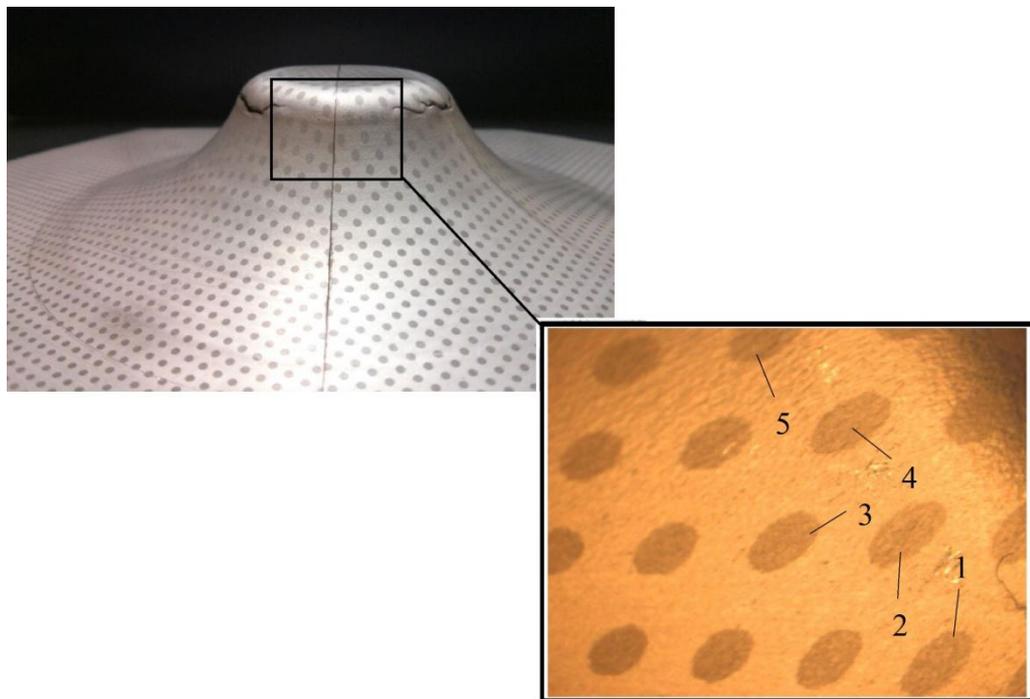


Figura 4.30- Puntos seleccionados para medir deformaciones en el ensayo real

Los resultados obtenidos son los siguientes

$d_0$ [mm]	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_{1_{num}}$	$\varepsilon_{2_{num}}$
1	2.2562	1.0827	0.8137	0.0795	0.8083	0.175
1	2.2530	1.0002	0.8123	0.0002		
1	2.1350	1.0882	0.7585	0.0845		
1	2.1501	1.0493	0.7655	0.0481		
1	2.1081	1.0764	0.7458	0.0736		
1	2.2437	1.0096	0.8081	0.0010		

$$\varepsilon_{1_{m\acute{a}x}} = 0.8137; \varepsilon_{2_{m\acute{a}x}} = 0.0845$$

$$\varepsilon_{1_{num}} = 0.8083; \varepsilon_{2_{num}} = 0.175$$

Como se puede apreciar la deformación principal máxima se asemeja bastante a la realidad pero en cambio la componente media es bastante mayor en el modelo numérico, esto es debido principalmente al tipo de criterio de plastificación optado; criterio isótropo, el cual hace que el efecto de la fricción sea mayor que en el caso real, más cercano a una plastificación y endurecimiento anisótropos.

#### 4.4. Precisión geométrica

Por último, en este subcapítulo final se pretende hacer una comparación geométrica y de precisión en la forma y espesores finales entre los distintos modelos numéricos, modelo CAD y pieza obtenida en el taller.

En primer lugar comenzaremos haciendo un análisis comparativo de la evolución de espesores a lo largo de la chapa conformada. Teóricamente, el espesor disminuye con el ángulo, o con la profundidad, según la conocida como Ley del seno de la siguiente forma

$$t_f = t_0 * \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right)$$

, donde  $\alpha$  es el ángulo que forma la pared de la chapa con el eje horizontal.

Por facilidad de medición en la práctica, se ha decidido poner esta ley en función de la profundidad o coordenada z de la base de la chapa, en el caso de herramienta de diámetro 10 mm los resultados son los siguientes:

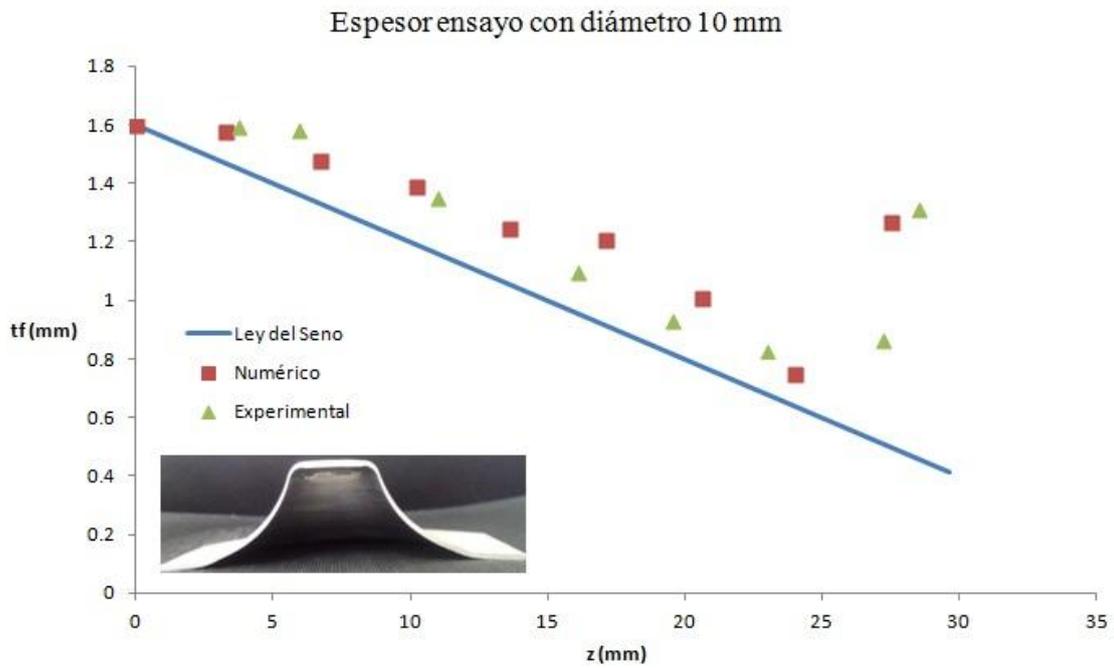


Figura 4.31- Evolución de espesor en el caso de herramienta de 10 mm de diámetro

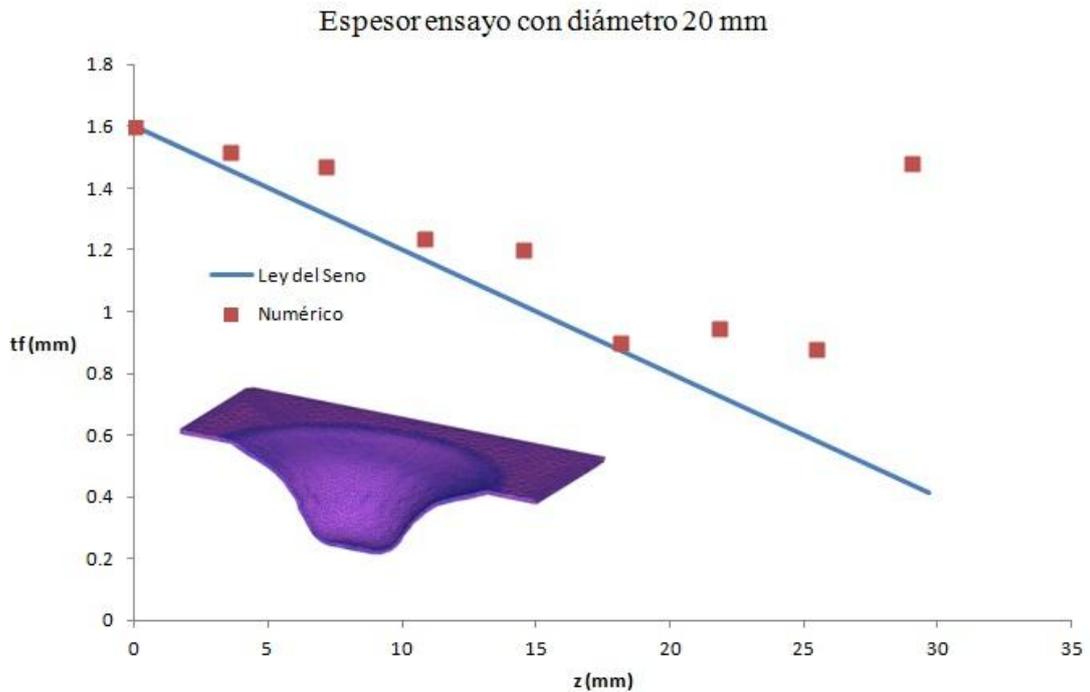
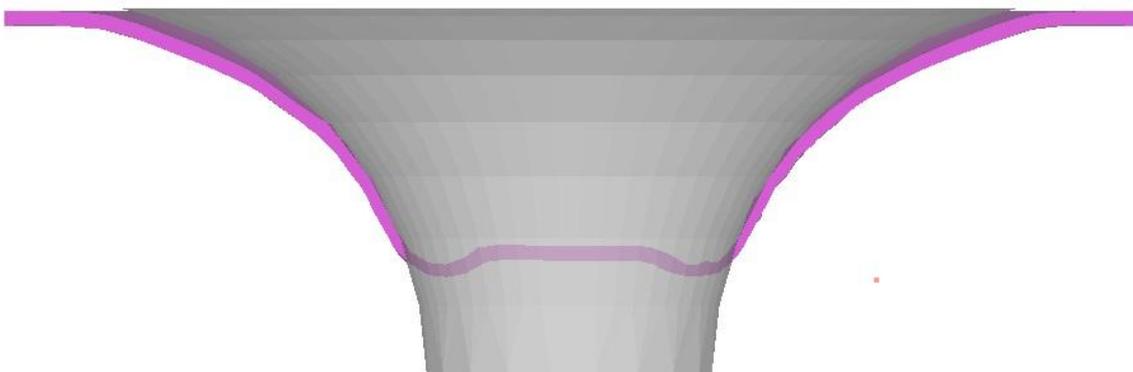


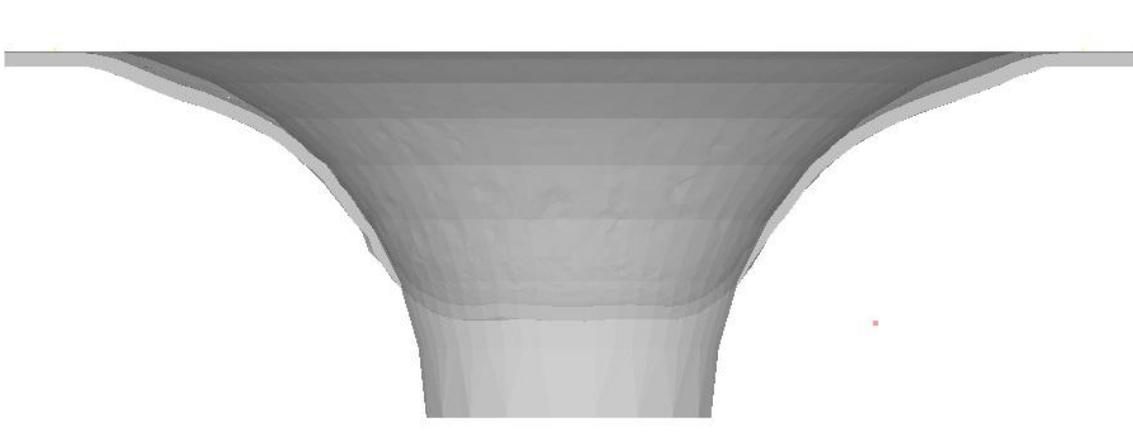
Figura 4.32- Evolución de espesor en el caso de herramienta de 20 mm de diámetro

A la vista de estos resultados podemos concluir que los espesores dados por el modelo numérico se asemejan de forma considerable a la realidad, estando un poco por encima de la evolución dada por la Ley del seno.

Si ahora comparamos los modelos FEM con la cara interior del sólido obtenido por CAD para generar las trayectorias en Catia® observaremos el fenómeno de la flexión generada por la herramienta, además del efecto del radio de ésta en la precisión geométrica en la base del cono, la flexión se aprecia en la linealidad de la pared en la zona más alta (en las primeras pasadas del punzón), zona en la que predomina la flexión total por encima de la deformación localizada, por tanto a mayores fuerzas en la herramienta mayor flexión se producirá.



*Figura 4.33- Comparación geométrica entre modelo CAD y FEM*



*Figura 4.34- Comparación geométrica entre modelo CAD y FEM*

Como bien se predijo, se aprecia un mayor *bending* en la chapa en el caso del punzón mayor, además se puede observar de forma clara cómo la transición entre las paredes laterales del cono y la base se realiza adaptándose al radio y forma del punzón, este hecho también se muestra en la siguiente figura comparativa.

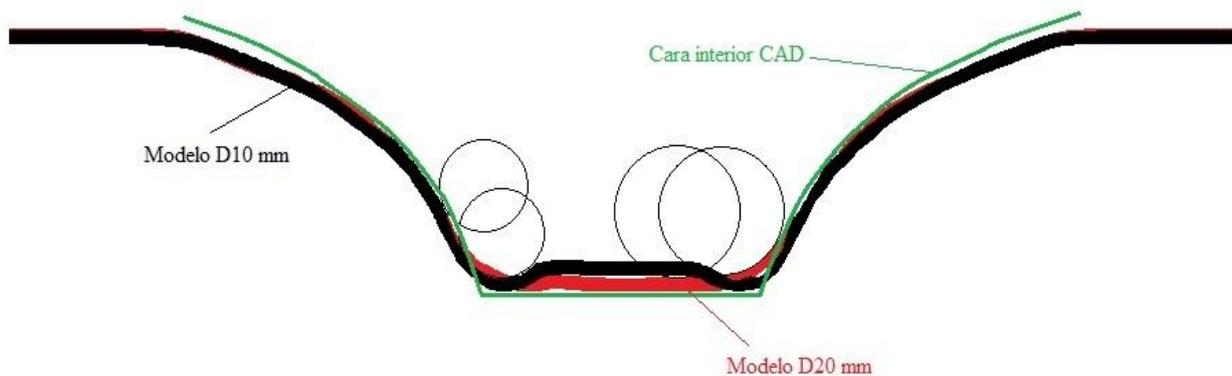


Figura 4.35- Comparación geométrica de ambos modelos

En vista a estos resultados, podemos concluir que se alcanzará mejor precisión cuanto menor sea el punzón ya que se conseguirá una mayor resolución de las esquinas y radios de acuerdo y se producirá una menor flexión.

Finalmente, se muestran unas imágenes de los modelos finales una vez realizado todo el proceso. En estos se puede apreciar una cierta torsión generada debida al arrastre de material por la herramienta.

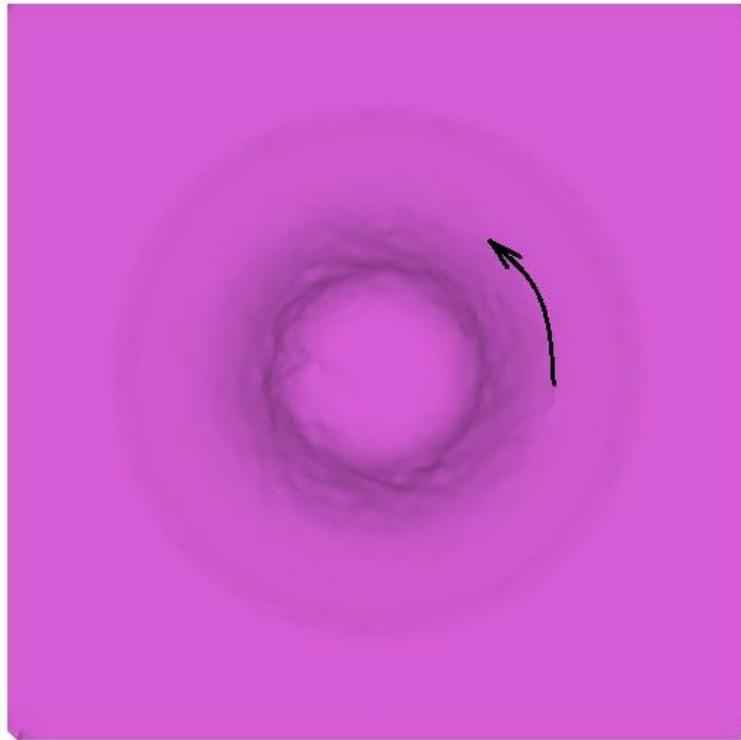


Figura 4.36- Efecto de la torsión observada en la base de la geometría

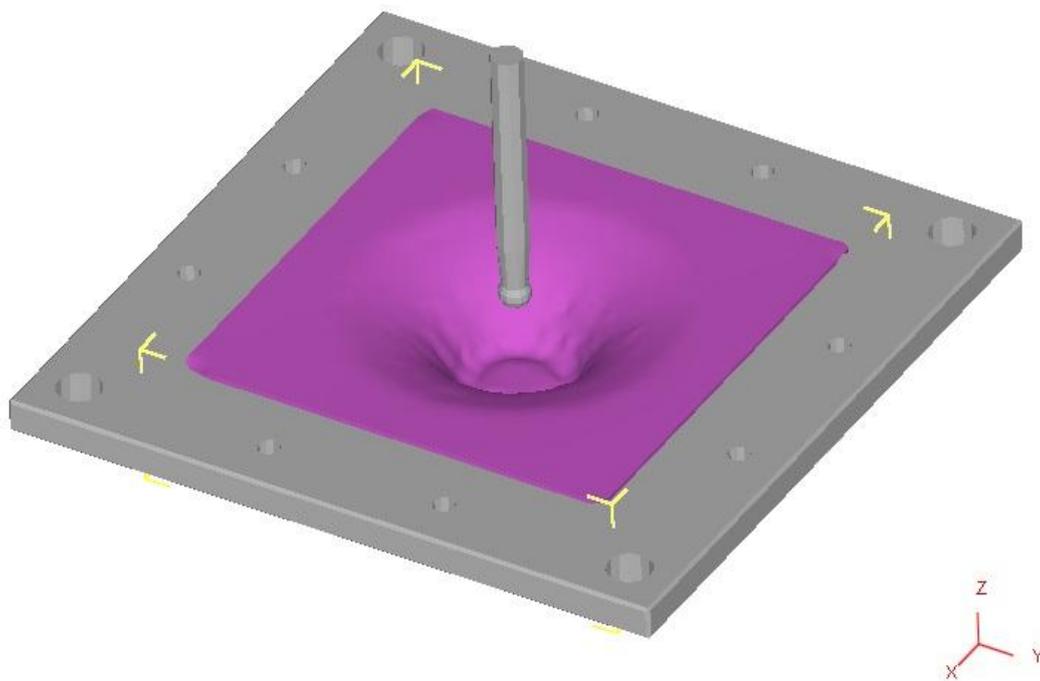


Figura 4.37- Geometría final en el modelo de herramienta de 10 mm de diámetro

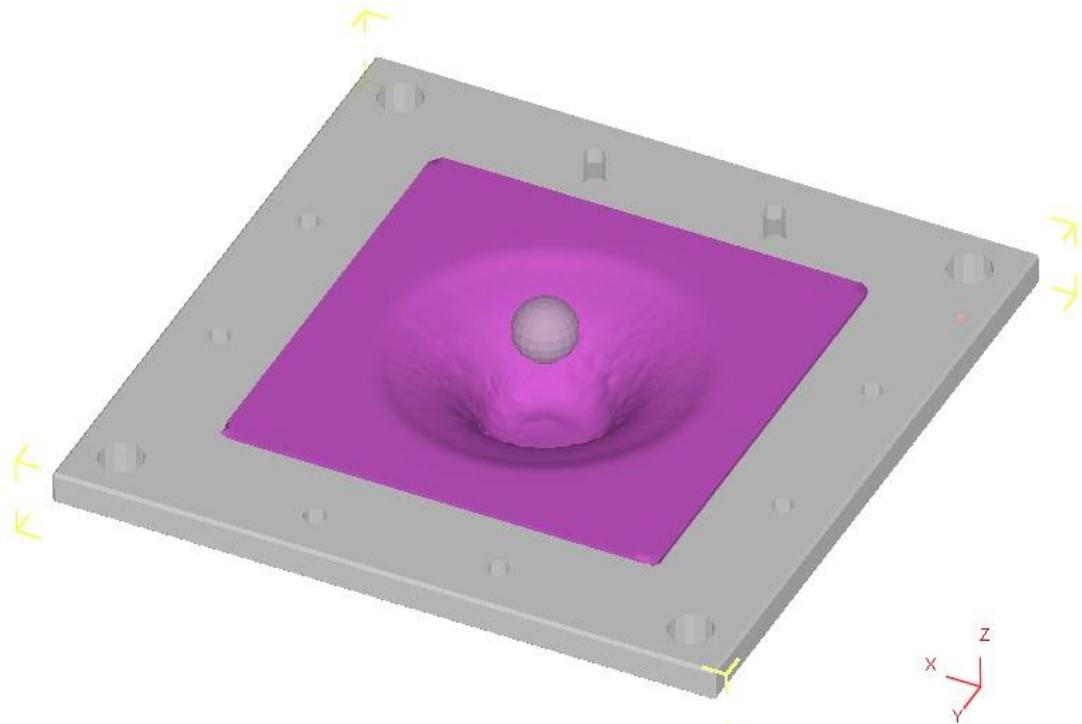


Figura 4.38- Geometría final en el modelo de herramienta de 20 mm de diámetro

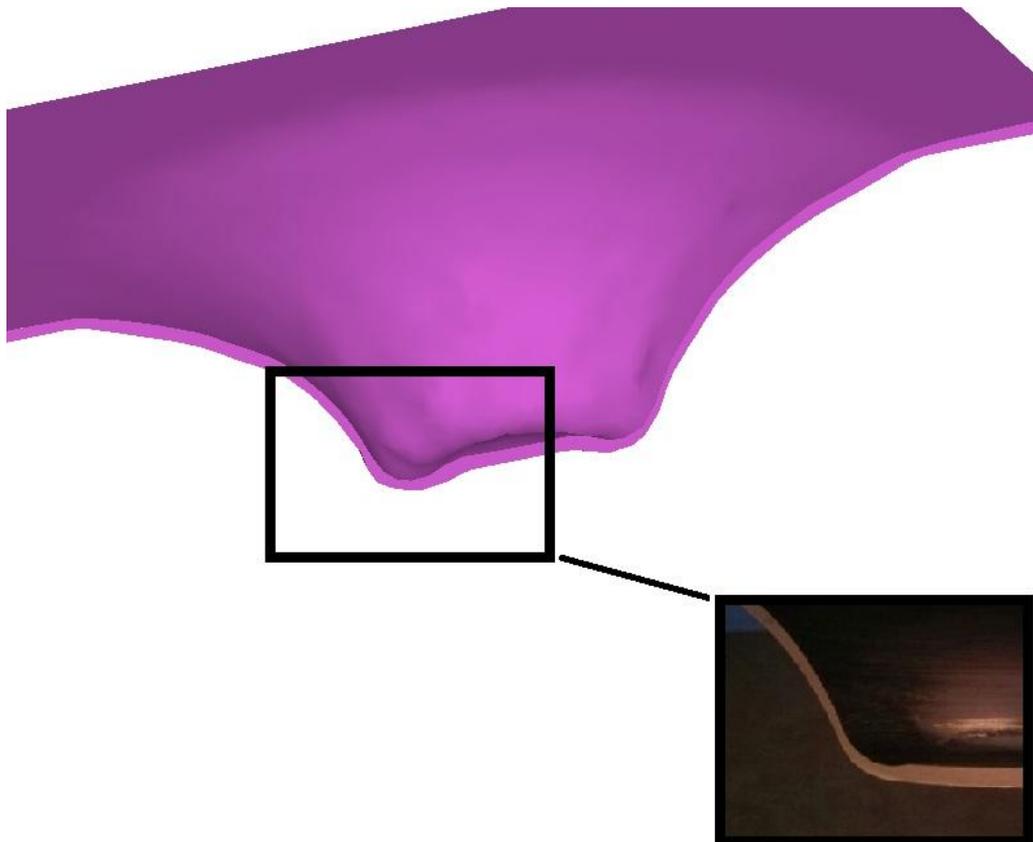


Figura 4.39- Comparación de curvatura generada en el modelo con la pieza real

## **5. Conclusiones y desarrollos futuros**

### **5.1. Conclusiones**

En el presente proyecto se consiguió crear una serie de modelos numéricos mediante el método de los elementos finitos en un software robusto y de carácter industrial. Dichos modelos se han validado satisfactoriamente mediante algunas comprobaciones y comparaciones con respecto a algún ensayo experimental en el que se implementaron los mismos parámetros, estas variables comparativas son la fuerza a aplicar por la herramienta, la distribución de espesores en la chapa final, las deformaciones límite dadas, y la precisión geométrica. Cabe destacar que se tomaron diversas simplificaciones tales como el criterio de plastificación y la ley de endurecimiento del material, además de otras condiciones de contorno en el proceso, que hicieron disminuir en gran medida el tiempo de cálculo computacional, dando a su vez buenos resultados y muy ajustados al proceso real.

Se ha presentado también un punto de vista atendiendo a las tensiones, especialmente a la presión hidrostática, y se ha comprobado que ésta disminuye con el diámetro de la herramienta, llegando a tener en algún momento incluso un valor medio negativo, por lo que se ha mostrado la influencia del tamaño del punzón en el estado de esta componente y su consecuencia en el aumento de la conformabilidad en el SPIF.

Por otro lado, se ha caracterizado el estado de deformaciones en el instante de la rotura mostrando qué tipo de evolución deformacional predomina en el proceso, siendo fundamentalmente un estado de deformación plana debido a los planos de simetría geométricos. Se han contrastado los valores máximos de las dos primeras componentes principales obteniendo un valor máximo en la primera de 0.8.

Finalmente, también se ha visto la influencia del radio de herramienta en la precisión geométrica de la chapa; a menor diámetro mayor similitud entre el modelo CAD y la pieza obtenida al final del proceso.

## 5.2. Desarrollos futuros

Tras validar los modelos aquí expuestos, se podrían extrapolar y generar otros nuevos con diferentes diámetros de herramienta; 8 mm, 12 mm, etc. Además se comprobarían resultados y variables con ensayos en el taller.

Por otro lado, se podrían implementar nuevos modelos numéricos del proceso en otro software de cálculo explícito tales como LS-Dyna® e implícitos como Abaqus® en los que poder variar parámetros y obtener resultados de manera más rápida. Se pretende considerar en estos modelos criterios de plastificación y endurecimiento del material más ajustados a la realidad.

Además, se podrían estudiar geometrías de aplicación industrial en las que poder aplicar los límites y conclusiones encontradas en el diseño y fabricación de éstas, por ejemplo aplicaciones como el rebordeado de agujeros o *hole flanging*.

## 6. Bibliografía

Skjoedt M., Bay N., Endelt B. and Ingarrao G.: *Multi-stage strategies for single point incremental forming of a cup*, 11th ESAFORM conference on metal forming – ESAFORM2008, (2008).

GhulamHussain, Gao Lin and Nasir Hayat. *A new parameter and its effect on the formability in single point incremental forming: A fundamental investigation*. Journal of Mechanical Science and Technology, 1617-1621 (2010).

M. Durante, A. Formisano, and A. Langella. *Observations on the Influence of Tool Sheet Contact Conditions on an Incremental Forming Process*. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, Volume 20, Number 6, 941-946 (2011).

M. Skjoedt, M.B. Silva, N. Bay, P.A.F. Martins. *Formability in Multistage Single Point Incremental Forming*. The 7th Euromech Solids Mechanics Conference, (2009).

Fei HAN, Jian-hua MO, Hong-wei QI, Rui-fen LONG, Xiao-hui CUI, Zhong-wei LI. *Springback prediction for incremental sheet forming based on FEM-PSONN technology* (2012).

Kathryn Jackson, Julian Allwood. *The mechanics of incremental sheet forming*. Journal of materials processing technology 209, 1158–1174 (2009).

Pohlak, M.; Küttner, R.; Majak, J.; Karjust, K. & Sutt, A. *SIMULATION OF INCREMENTAL FORMING OF SHEET METAL PRODUCTS*. 4th International DAAAM Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING – INNOVATION AS COMPETITIVE EDGE FOR SME".143-145 (2014).

S.H.Wu, Ana Reis, F.M. Andrade Pires, Abel D. Santos, A. Barata da Rocha<sup>1</sup>. *Study of tool trajectory in incremental forming*. Advanced Materials Research Vols. 472-475, 1586-1591 (2012).

Massimo Callegari, Dario Amodio<sup>1</sup>, Elisabetta Ceretti, Claudio Giardini. *Sheet Incremental Forming: Advantages of Robotised Cells vs. CNC Machines*. Industrial Robotics: Programming, Simulation and Application, 702 (2006).

J.I.V. Sena, R.A.F. Valente and J.J. Grácio, F.J.P. Simões, R.J. Alves de Sousa. *Finite element analysis of incrementally formed parts*. Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems, Vol. 4, No. 5, 454-469 (2011).

Cho, Hyunjoong; Ngaile, Gracious; Altan, Taylan; Ghosh, S.; Castro, J.C.; Lee, J.K. *3D Finite Element Analysis of Orbital Forming and Inverse Analysis for Determination of Flow Stress of the Workpiece*. AIP Conference Proceedings, Vol. 712 Issue 1, 1502 (2004).

By G. Li, J. Yang, J.Y. Oh, M. Foster, and W. Wu, Scientific Forming Tech. Corp.; and P. Tsai and W. Chang, MIRDC. *Advancements of Extrusion Simulation in DEFORM-3D* (2009).

C. Vallellano, D. Morales, and F.J. Garcia-Lomas. *On the study of the effect of bending in the formability of metal sheets*, Numisheet 2008. 85-90 (2008)

Andrés Jesús Martínez Donaire. *Análisis del efecto del gradiente de deformaciones en el conformado de Chapa Metálica*. 1-34(2012)

W.C. Emmens, A.H. van den Boogaard. *An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming* (2008).

Stephen King, Tony Richards. *Solving contact problems with Abaqus*. (2013).

LÊ VAN SY. *MODELING OF SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING PROCESS FOR METAL AND POLYMERIC SHEET*. University of Padua. (2009).

Carlos Suntaxi Guallichico. *Análisis experimental de deformaciones límite en chapas de acero AISI 304 en conformado incremental*. Universidad de Sevilla. 33 (2013).

Y. Fang, B. Lu, J. Chen, D.K. Xu, H. Ou. *Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming*. Journal of Materials Processing Technology. (2013)

G. Centeno, A.J. Martinez-Donaire, C. Vallellano, L.H. Martinez-Palmet, D. Morales, C. Suntaxi, F.J. Garcia-Lomas. *Experimental Study on the Evaluation of Necking and Fracture Strains in Sheet Metal Forming Processes*. Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference – Zaragoza. (2013)

