

# Trabajo de Fin de Grado

## Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

### Diseño de una práctica de análisis por elementos finitos del corte ortogonal para la asignatura Procesos de Fabricación Aeronáutica

Autor: Francisco de Asís Fernández Ocaña

Tutor: Luis V. Bohórquez Jiménez

**Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

**Diseño de una práctica de análisis por elementos  
finitos del corte ortogonal para la asignatura  
Procesos de Fabricación Aeronáutica**

Autor:

Francisco de Asís Fernández Ocaña

Tutor:

Luis Valentín Bohórquez Jiménez

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Grado: Diseño de una práctica de análisis por elementos finitos del corte ortogonal para la asignatura Procesos de Fabricación Aeronáutica

Autor: Francisco de Asís Fernández Ocaña

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

A C.



# Agradecimientos

---

A mi tutor, D. Luis Valentín Bohórquez Jiménez, que fue quien concibió este proyecto y siempre estuvo para resolver todas y cada una de las cuestiones que surgían en el desarrollo de éste. Por mostrar siempre su lado más amable conmigo.

A mi familia, por mostrar su lado más fuerte durante la situación vivida por todos durante este año. Por enseñarme el valor del esfuerzo y “apretarme las tuercas” en momentos de flaqueza.

A mis amigos de siempre, por proporcionarme la motivación y presión necesaria para caminar hacia adelante. Por nunca hacerme olvidar dónde podría llegar.

A mis compañeros de clase, por ayudarme a querer mejorar cada día y por lanzarme algún que otro “chaleco salvavidas” cuando la situación era de dificultad.

Finalmente, a mi abuelo, por que apostaba por mí como nadie y porque puedo imaginar su cara al haber leído estas palabras.

*Francisco de Asís Fernández Ocaña*

*Sevilla, 2020*



# Resumen

---

El objetivo de este proyecto se basa en el desarrollo de una práctica para los alumnos de la asignatura Procesos de Fabricación Aeronáutica perteneciente al Máster en Ingeniería Aeronáutica de la Universidad de Sevilla.

Dicha práctica consiste en comprobar si, a través del Método de los Elementos Finitos en un proceso de mecanizado, es posible trasladar a la vida real distintas simulaciones con diferentes características realizadas con la herramienta de simulación DEFORM-2D.

Este software de simulación permite definir tanto la herramienta como el material de trabajo del proceso en función de diferentes características como su composición, dimensión, avance o velocidad de corte.

Para la elaboración de la práctica, se han establecido tres escenarios en base a tres diferentes calidades del material de las herramientas, de forma que cada una de ellas conforme un caso a desarrollar por el alumno o grupo de alumnos. A su vez, cada uno de estos casos está definido por seis subcasos, dónde los alumnos deberán experimentar con diferentes condiciones de simulación. De esta forma, cada estudiante o grupo de éstos deberá realizar 18 simulaciones distintas.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, éstos deben ser representados como se explicará durante el desarrollo del Trabajo mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

Al final del presente documento, se añaden diferentes anexos donde se muestran tanto el procedimiento de instalación del software como los pasos a seguir para completar una simulación con el Asistente de DEFORM – 2D. Finalmente, se muestran todos los resultados obtenidos para cada uno de los casos propuestos.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Gráficas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xviii</b>
<b>Índice de Ilustraciones·Anexo A</b>	<b>xx</b>
<b>Índice de Ilustraciones·Anexo B</b>	<b>xx</b>
<b>Índice de Ilustraciones·Anexo C</b>	<b>xxi</b>
<b>Notación</b>	<b>xxiv</b>
<b>1 Fundamentos teóricos del mecanizado</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Modelado y Simulación</i>	1
1.3 <i>Corte ortogonal y oblicuo</i>	2
1.4 <i>Zonas de deformación</i>	4
1.5 <i>Modelo del plano de corte</i>	6
<b>2 Cálculos realizados</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Software</i>	7
2.2 <i>Metodología</i>	7
2.2.1 <i>Definición de casos</i>	8
2.2.2 <i>Diferencias entre casos</i>	9
2.2.3 <i>Paso a paso</i>	9
2.3 <i>Datos utilizados</i>	9
2.3.1 <i>Caso 1 · Calidad H10</i>	9
2.3.2 <i>Caso 2 · Calidad CD10</i>	12
2.3.3 <i>Caso 3 · Calidad CD05</i>	13
2.4 <i>Justificaciones</i>	14
2.4.1 <i>Software de simulación: DEFORM-2D</i>	14
2.4.2 <i>Geometría de herramienta y pieza</i>	14
2.4.3 <i>Material de herramienta y pieza</i>	14
2.4.4 <i>Malla</i>	15
2.5 <i>Puntos de estudio</i>	15
2.6 <i>Otras variables</i>	16
<b>3 Resultados obtenidos</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Obtención del ángulo de cizalladura</i>	17
3.2 <i>Ajuste de mínimos cuadrados</i>	18
3.2.1 <i>Caso 1 · Calidad H10</i>	19

3.2.2	Caso 2 · Calidad CD10	20
3.2.3	Caso 3 · Calidad CD05	21
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>Trabajos futuros</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Anexos</b>	<b>27</b>
	<b>Referencias</b>	<b>29</b>
<b>Anexo A</b>	<b>Procedimiento de instalación de DEFORM-2D</b>	<b>31</b>
	<i>Instalación de DEFORM®</i>	32
	<i>Carpeta de descarga</i>	32
	<i>DEFORM System</i>	32
	<i>DEFORM Support Code v10.2</i>	33
	<i>MPICH Multiple Processor Support</i>	34
	<i>DEFORM License Manager</i>	36
	<i>DEFORM v10.2</i>	37
	<i>Administrador de tareas</i>	39
	<i>Reemplazo de archivos</i>	39
	<i>Ejecutar LManager Server</i>	40
<b>Anexo B</b>	<b>Dossier para la simulación</b>	<b>41</b>
	<i>Introducción</i>	42
	<i>Consideraciones previas</i>	42
	<i>Herramientas</i>	43
	<i>Datos y parámetros</i>	44
	<i>Realización de las simulaciones</i>	45
	<i>Iniciación</i>	45
	<i>Pasos previos</i>	46
	<i>Ventanas</i>	46
	<i>Preparación de carpetas</i>	47
	<i>Asistente</i>	47
	<i>Unidades</i>	48
	<i>Operation Name</i>	48
	<i>Características de la operación</i>	49
	<i>Configuración de la herramienta</i>	49
	<i>Configuración de la pieza</i>	51
	<i>Condiciones de la simulación</i>	53
	<i>Cálculo de la simulación</i>	55
	<i>Visualización de los resultados</i>	55
	<i>Realización del Estudio paramétrico</i>	56
	<i>Post- procesamiento</i>	56
	<i>Obtención de datos</i>	56
	<i>Arranque del módulo de post- procesamiento</i>	56
	<i>Barra de herramientas de reproducción</i>	57
	<i>Representación de la tensión efectiva</i>	57
	<i>Obtención del ángulo de cizallamiento</i>	58
	<i>Ajuste por mínimos cuadrados</i>	59
<b>Anexo C</b>	<b>Resultados de las simulaciones</b>	<b>61</b>
	<i>Introducción</i>	62
	<i>Resultados de las simulaciones</i>	62
	<i>Caso 1·Calidad de la herramienta H10</i>	62
	<i>Simulación 1</i>	62
	<i>Simulación 2</i>	63
	<i>Simulación 3</i>	64

<i>Simulación 4</i>	65
<i>Simulación 5</i>	66
<i>Simulación 6</i>	67
<i>Caso 2·Calidad de la herramienta CD10</i>	68
<i>Simulación 7</i>	68
<i>Simulación 8</i>	69
<i>Simulación 9</i>	70
<i>Simulación 10</i>	71
<i>Simulación 11</i>	72
<i>Simulación 12</i>	73
<i>Caso 3·Calidad de la herramienta CD05</i>	74
<i>Simulación 13</i>	74
<i>Simulación 14</i>	75
<i>Simulación 15</i>	76
<i>Simulación 16</i>	77
<i>Simulación 17</i>	78
<i>Simulación 18</i>	79
<i>Consideraciones finales</i>	80

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-A. Características de la calidad H10.	10
Tabla 2-B. Características de la calidad CD10	12
Tabla 2-C. Características de la calidad CD05	13
Tabla 3-A. Valores de los parámetros para calidad H10	19
Tabla 3-B. Valores obtenidos para el ajuste de mínimos cuadrados para calidad H10	19
Tabla 3-C. Valores de los parámetros para calidad CD10	20
Tabla 3-D. Valores obtenidos para el ajuste de mínimos cuadrados para calidad CD10	20
Tabla 3-E. Valores de los parámetros para calidad CD05	21
Tabla 3-F. Valores obtenidos para el ajuste de mínimos cuadrados para calidad CD05	21

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica I. Ajuste por mínimos cuadrados para el Caso 1	20
Gráfica II. Ajuste por mínimos cuadrados para el Caso 2	21
Gráfica III. Ajuste por mínimos cuadrados para el Caso 3	22



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Corte oblicuo. <i>Fuente:</i> [1]	2
Figura 1-2. Corte ortogonal. <i>Fuente:</i> [1]	3
Figura 1-3. Valores del ángulo de desprendimiento. <i>Fuente:</i> [1]	3
Figura 1-4. Zonas de deformación. <i>Fuente:</i> [1]	5
Figura 1-5. Círculo de Merchant. <i>Fuente:</i> [1]	6
Figura 2-1. Parámetros de la herramienta.	8
Figura 2-2. Ejemplo de plaquita para torneado con calidad H10. <i>Fuente:</i> [5]	10
Figura 2-3. Introducción parámetros de la herramienta	11
Figura 2-4. Introducción parámetros del material de trabajo	11
Figura 2-5. Ejemplo de plaquita para torneado con calidad CD10. <i>Fuente:</i> [5]	12
Figura 2-6. Ejemplo de plaquita para torneado con calidad CD05. <i>Fuente:</i> [5]	13
Figura 2-7. Selección de puntos	16
Figura 3-1. Asistente de la web de medición de ángulos. <i>Fuente:</i> [7]	17
Figura 3-2. Posición de los indicadores de medición	18



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES·ANEXO A

---

Ilustración A 1. Contenido de los archivos de descarga	32
Ilustración A 2. License Agreement	33
Ilustración A 3. Instalación 32/64 bit systems	34
Ilustración A 4. Asistente MPICH	34
Ilustración A 5. Palabra clave requerida (MPICH2 password.doc)	35
Ilustración A 6. Contraseña DEFORM License Server	36
Ilustración A 7. Confirmación contraseña	36
Ilustración A 8. Iniciación DEFORM v10.2	37
Ilustración A 9. Cuestión 1	37
Ilustración A 10. Cuestión 3	38
Ilustración A 11. Cuestión 2	38
Ilustración A 12. Generación de modos de trabajo y Shortcuts	38
Ilustración A 13. Fin instalación DEFORM v10.2	39
Ilustración A 14. Archivos de la carpeta License Manager	40

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES·ANEXO B

---

Ilustración B 1. Parámetros de la herramienta	43
Ilustración B 2. Características del proceso	44
Ilustración B 3. Condiciones para la calidad H10	44
Ilustración B 4. Condiciones para la calidad CD10	44
Ilustración B 5. Condiciones para la calidad CD05	45
Ilustración B 6. Ventana de estado	46
Ilustración B 7. Ventana principal del software DEFORM-2D	46
Ilustración B 8. Machining (Cutting)	47
Ilustración B 9. Cuadro de diálogo	47
Ilustración B 10. Ventana inicial y configuración de Unidades	48
Ilustración B 11. Plantilla de la herramienta	49
Ilustración B 12. Configuración de la herramienta	50
Ilustración B 13. Generación de malla	50
Ilustración B 14. Condiciones de contorno	51
Ilustración B 15. Configuración inicial de la pieza de trabajo	52

Ilustración B 16. Configuración de la pieza de trabajo	52
Ilustración B 17. Generación de la malla de la pieza	53
Ilustración B 18. Posiciones relativas de herramienta y pieza	53
Ilustración B 19. Modelo Usui	54
Ilustración B 20. Condiciones de desarrollo	54
Ilustración B 21. Puesta en marcha de la simulación	55
Ilustración B 22. Pantalla principal: Post-procesado	55
Ilustración B 23. Modulo de post-procesado	56
Ilustración B 24. Barra de reproducción	57
Ilustración B 25. Barra de reproducción inversa	57
Ilustración B 26. Botón State Variable	57
Ilustración B 27. Ubicación Botón State Variable	57
Ilustración B 28. Árbol desplegable de State Variable	58
Ilustración B 29. Opciones de visualización	58
Ilustración B 30. Asistente de la web de medición de ángulos	58
Ilustración B 31. Posiión de los indicadores de medición	59
Ilustración B 32. Ajuste por mínimos cuadrados para la calidad de herramienta CD10	60

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES-ANEXO C

---

Ilustración C 1. Parámetros simulación 1	62
Ilustración C 2. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 1	63
Ilustración C 3. Obtención del ángulo de corte en la simulación 1	63
Ilustración C 4. Parámetros simulación 2	63
Ilustración C 5. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 2	64
Ilustración C 6. Obtención del ángulo de corte en la simulación 2	64
Ilustración C 7. Parámetros simulación 3	64
Ilustración C 8. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 3	65
Ilustración C 9. Obtención del ángulo de corte en la simulación 3	65
Ilustración C 10. Parámetros simulación 4	65
Ilustración C 11. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 4	66
Ilustración C 12. Obtención del ángulo de corte en la simulación 4	66
Ilustración C 13. Parámetros simulación 5	66
Ilustración C 14. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 5	67
Ilustración C 15. Obtención del ángulo de corte en la simulación 5	67
Ilustración C 16. Parámetros simulación 6	67

Ilustración C 17. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 6	68
Ilustración C 18. Obtención del ángulo de corte en la simulación 6	68
Ilustración C 19. Parámetros simulación 7	68
Ilustración C 20. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 7	69
Ilustración C 21. Obtención del ángulo de corte en la simulación 7	69
Ilustración C 22. Parámetros simulación 8	69
Ilustración C 23. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 8	70
Ilustración C 24. Obtención del ángulo de corte en la simulación 8	70
Ilustración C 25. Parámetros simulación 9	70
Ilustración C 26. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 9	71
Ilustración C 27. Obtención del ángulo de corte en la simulación 9	71
Ilustración C 28. Parámetros simulación 10	71
Ilustración C 29. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 10	72
Ilustración C 30. Obtención del ángulo de corte en la simulación 10	72
Ilustración C 31. Parámetros simulación 11	72
Ilustración C 32. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 11	73
Ilustración C 33. Obtención del ángulo de corte en la simulación 11	73
Ilustración C 34. Parámetros simulación 12	73
Ilustración C 35. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 12	74
Ilustración C 36. Obtención del ángulo de corte en la simulación 12	74
Ilustración C 37. Parámetros simulación 13	74
Ilustración C 38. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 13	75
Ilustración C 39. Obtención del ángulo de corte en la simulación 13	75
Ilustración C 40. Parámetros simulación 14	75
Ilustración C 41. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 14	76
Ilustración C 42. Obtención del ángulo de corte en la simulación 14	76
Ilustración C 43. Parámetros simulación 15	76
Ilustración C 44. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 15	77
Ilustración C 45. Obtención del ángulo de corte en la simulación 15	77
Ilustración C 46. Parámetros simulación 16	77
Ilustración C 47. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 16	78
Ilustración C 48. Obtención del ángulo de corte en la simulación 16	78
Ilustración C 49. Parámetros simulación 17	78
Ilustración C 50. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 17	79
Ilustración C 51. Obtención del ángulo de corte en la simulación 17	79
Ilustración C 52. Parámetros simulación 18	79
Ilustración C 53. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 18	80
Ilustración C 54. Obtención del ángulo de corte en la simulación 18	80



# Notación

---

$A^*$	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de $x$ elevado a $y$
$\cos^x y$	Función coseno de $x$ elevado a $y$
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de $y$ respecto
$x^\circ$	Notación de grado, $x$ grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso $A$
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
\	Backslash
$\Leftrightarrow$	Si y sólo si

# 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MECANIZADO

---

*“En realidad, no me preocupa que quieran robar mis ideas, me preocupa que ellos no las tengan”.*

*- Nikola Tesla -*

## 1.1 Introducción

Todas las secciones y figuras pertenecientes a este primer capítulo son adaptaciones de la obra de A.P. Markopoulos [1].

Actualmente, existen dos importantes factores dentro del ámbito de la tecnología de fabricación que están marcando tendencia: calidad y reducción de costes. Los esfuerzos de esta industria van destinados a productos que presenten tanto gran precisión dimensional como baja rugosidad superficial a un coste aceptable.

Por el término *mecanizado (machining)*, se definen aquellos procesos que proporcionan la forma esperada a una determinada pieza mediante la eliminación del material no deseado. Esta pieza para mecanizar recibe el nombre de *workpiece*, pudiendo ser metálica o no metálica, por ejemplo, polímero, madera, cerámica o incluso, materiales compuestos; sin embargo, en lo sucesivo hablaremos del mecanizado de materiales metálicos. El material desechado se desprende normalmente de la pieza de trabajo como viruta.

El término *corte (cutting)* suele usarse para describir la formación de viruta gracias a la interacción de una herramienta con forma de cuña con la superficie de la pieza de trabajo debido al movimiento relativo producido entre ambos. Las operaciones de mecanizado incluyen el torneado, fresado y taladrado entre otras, refiriéndonos normalmente a ellas como operaciones de mecanizado tradicionales. Procesos abrasivos como el afilado son, también, parte fundamental de los procesos de corte de gran importancia dentro de la industria contemporánea.

Merece la pena destacar aquellas operaciones de mecanizado no tradicionales que pudieran incluir o no contacto físico entre en la herramienta y la pieza de trabajo, bien porque éstas no necesiten herramientas de corte en el mismo sentido que en los procesos tradicionales o bien porque se utiliza energía térmica o química para eliminar material de la pieza de trabajo, como es el caso del mecanizado por ultrasonidos, mecanizado por chorro de agua o mecanizado por descarga eléctrica por nombrar algunos.

## 1.2 Modelado y Simulación

¿Qué es el modelado y qué es la simulación?

Un modelo es un sistema ideal simplificado del que podemos extraer información y que se comporta de forma parecida a otro sistema real objeto de nuestro estudio. La validez del modelo radica en el grado de similitud de los comportamientos del modelo y el sistema real modelado.

También, un modelo puede definirse como una simplificación de todos los elementos de un sistema real: material, forma geométrica, relaciones tribológicas, condiciones iniciales y de contorno, etc. Muchas de estas simplificaciones consisten en obviar elementos que no afectan a la respuesta estudiada (por ejemplo, el color en un estudio mecánico).

Teniendo en cuenta lo anterior, se pueden definir dos tipos diferentes de modelos; por un lado, los modelos físicos y por otro, los modelos ideales. Los modelos físicos son sistemas materiales en los que podemos medir valores de ciertas respuestas, como son prototipos o maquetas a escala, sin embargo, los modelos ideales son un conjunto de ecuaciones que ligan un determinado grupo de variables de entrada con un grupo de variables de salida.

Un modelo permite analizar hechos generales sobre los elementos, estructura o comportamiento de una sección de la realidad, por lo que, de esta forma, se puede definir una simulación como un caso particular de empleo de un modelo.

Cuando resolvemos un determinado modelo decimos que hacemos una simulación de la realidad modelada. Las simulaciones de modelos materiales se hacen en máquinas de ensayo. Las simulaciones de modelos ideales se llevan a cabo resolviendo analíticamente las ecuaciones o resolviéndolas numéricamente mediante elementos finitos, elementos de contorno, diferencias finitas. En el presente Trabajo se desarrollan modelos de elementos finitos del proceso de corte.

¿Cuáles son los beneficios de los modelos de mecanizado? Hoy en día, la gran mayoría de investigadores están de acuerdo en la realización de mecanizado por modelado gracias a su gran capacidad predictiva. Parámetros fundamentales como las fuerzas de corte, temperaturas, morfología de la viruta y tensiones pueden ser calculadas con anterioridad a que se realice el corte con una máquina o herramienta. La aproximación por prueba y error es mucho más laboriosa y costosa. Con el modelado, se ahorran recursos, se alcanza la optimización y el coste se ve reducido. Lo anterior no significa que el trabajo experimental se encuentre obsoleto, ya que en muchos casos la validación del modelo es necesaria y la única manera de proporcionarla es probar los resultados del modelo con condiciones reales para poder hacer la comparación.

### 1.3 Corte ortogonal y oblicuo

El flujo de viruta de cualquier proceso de mecanizado en cuña puede ser estudiado mediante un modelo simple conocido como “*corte oblicuo*”.

La herramienta, modelada mediante la cuña rígida, penetra en el material con una velocidad  $v$  que llamamos “*velocidad de corte*”. La velocidad de corte es paralela a las superficies de la pieza: original y mecanizada. La distancia entre ambas superficies es el “*espesor de viruta indeformada*” que es proporcional al avance de la herramienta siendo la constante de proporcionalidad dependiente de la geometría del corte.

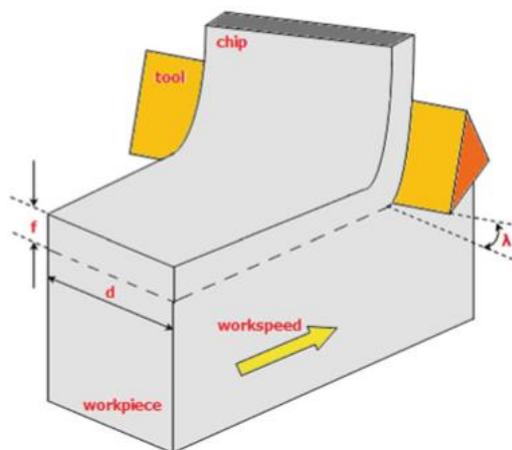


Figura 1-1. Corte oblicuo. Fuente: [1]

La Figura 1.1 muestra una sección donde el filo de la herramienta viene representado por el vértice de la cuña.

La viruta arrancada resbala por la “*cara de desprendimiento*” (*rake face*) y la superficie mecanizada queda por debajo de la “*cara de incidencia*” (*flank face*). Pero el filo es una recta, no un punto, que sale del plano de la figura. El ángulo que forma dicho filo con la normal al plano de la figura (formados por la velocidad de corte y el espesor de viruta indeformada) es el “*ángulo de inclinación*” cuya función es conducir la viruta hacia fuera, evitando que se acumule delante de la herramienta.

Un caso particular de mucho interés por su simplicidad es el *corte ortogonal*, para el que el ángulo de inclinación es nulo, como muestra la Figura 1.2.

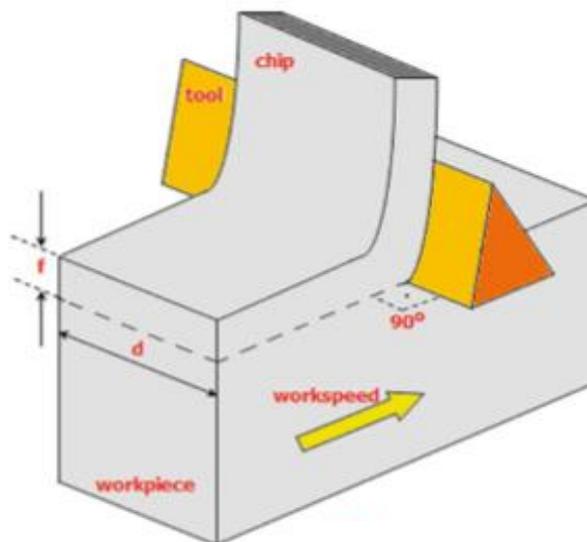


Figura 1-2. Corte ortogonal. Fuente: [1]

El ángulo entre la normal a la superficie mecanizada y la cara de desprendimiento se llama “*ángulo de desprendimiento*” (*rake angle*), simbolizado por  $\gamma$ . El ángulo formado por la superficie mecanizada y la cara de incidencia se conoce como “*ángulo de incidencia*” (*clearance angle*), el cual se representa por  $\alpha$ . Por último, el ángulo entre las caras de desprendimiento y de incidencia se conoce como “*ángulo de cuña o filo*” (*wedge angle*), que se indica con la letra griega  $\beta$ .

La suma de estos tres ángulos es siempre igual a  $90^\circ$ , por lo tanto:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Durante el movimiento, una capa de material en forma de viruta se desprende. Para poder continuar eliminando material en una segunda etapa, la herramienta es llevada de vuelta a su posición inicial y se desplaza hacia abajo una cantidad  $f$ , el *avance del proceso*. De manera perpendicular a  $f$ ,  $d$  es la *profundidad de corte*, la cual es menor o igual que la anchura del borde de la herramienta.

En la Figura 1.3 se muestra la dirección que define un *ángulo de desprendimiento* positivo o negativo. Para un ángulo de desprendimiento negativo, la herramienta posee un ángulo de filo más amplio.

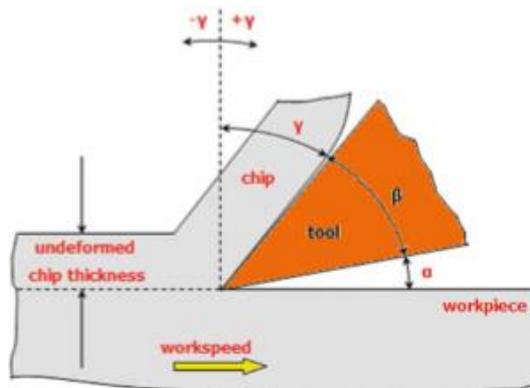


Figura 1-3. Valores del ángulo de desprendimiento. Fuente: [1]

Para materiales dúctiles, se utiliza un ángulo de desprendimiento positivo, por lo que una herramienta “más débil” con un ángulo de filo más pequeño, será suficiente para realizar la operación de corte. Para materiales de mayor resistencia, el ángulo de desprendimiento se elige para que sea negativo, de esta forma, se aumenta el ángulo de filo y se crea un borde de corte más fuerte. Sin embargo, este borde de corte presenta la gran desventaja de requerir un mayor consumo de energía y la necesidad de una herramienta robusta para configurar una pieza de trabajo que compense las vibraciones.

La cara de incidencia de la herramienta no participa en el proceso de eliminación de viruta; esto asegura que la herramienta no roza la superficie recién mecanizada y afecta su calidad. Sin embargo, el ángulo de incidencia afecta la tasa de desgaste de la herramienta de corte. Si la holgura de la herramienta es demasiado grande, debilitará el ángulo de filo de la herramienta, mientras que, si es demasiado pequeño, tenderá a rozar la superficie mecanizada.

El corte ortogonal representa un problema mecánico de dos dimensiones donde no se considera el rizado lateral de la viruta. Éste representa tan sólo un pequeño fragmento del proceso de mecanizado, como podía ser la planificación o giro final de un tubo de pared delgada. Sin embargo, estos modelos son ampliamente usados tanto en el trabajo teórico como en el trabajo experimental debido a su simplicidad.

Gracias a su condición en 2D, muchas variables independientes son eliminadas, por ejemplo, en los problemas de corte ortogonal, solamente se identifican dos fuerzas de cortes.

Por otro lado, el corte oblicuo, donde la herramienta de corte se encuentra inclinada un ángulo  $\lambda$ , corresponde a un problema tridimensional con una representación más realista del flujo de viruta y con un análisis más complejo, ya que están presentes tres fuerzas y se representa el rizado de la viruta.

En el corte oblicuo, que es un caso más general que el corte ortogonal, existen tres componentes de fuerzas de corte perpendiculares entre sí. Si se adopta un sistema de coordenadas basadas en la dirección de velocidad de corte y el avance, entonces se considerarán la fuerza de corte, la fuerza de avance y la fuerza de retroceso. La fuerza de corte es normalmente la más grande mientras que la fuerza de retroceso es la fuerza más pequeña.

En el corte ortogonal, la tercera componente de la fuerza es ignorada, ya que la fuerza total del sistema se encuentra en un solo plano normal al filo de corte de la herramienta.

Es importante conocer de antemano las fuerzas de corte ya que nos permite estimar la potencia necesaria de la máquina-herramienta, así como las propiedades de las herramientas necesarias para asegurar un buen resultado.

Por ejemplo, si la fuerza de avance es alta y el portaherramientas no es lo suficientemente rígido, el filo de corte se apartará de la superficie de la pieza de trabajo, causando una baja precisión dimensional. Además, la determinación de las fuerzas de corte puede conducir al cálculo de otros parámetros como las tensiones.

## 1.4 Zonas de deformación

Se distinguen dos áreas deformadas en el mecanizado, llamadas zonas de deformación primaria y secundaria, como muestra la Figura 1.4.

La zona de deformación primaria está definida en el área OAB. El material de la pieza de trabajo que cruza el borde OA sufre una alta deformación a alta tensión y sale de la zona por el borde OB, endurecido por el trabajo. Examinaciones microscópicas y diferentes experimentos determinan que la viruta es producida por el corte dentro de esta región.

La mayoría de los estudios experimentales concluyen que esta zona tiene un espesor promedio de aproximadamente una décima parte del espesor de la viruta.

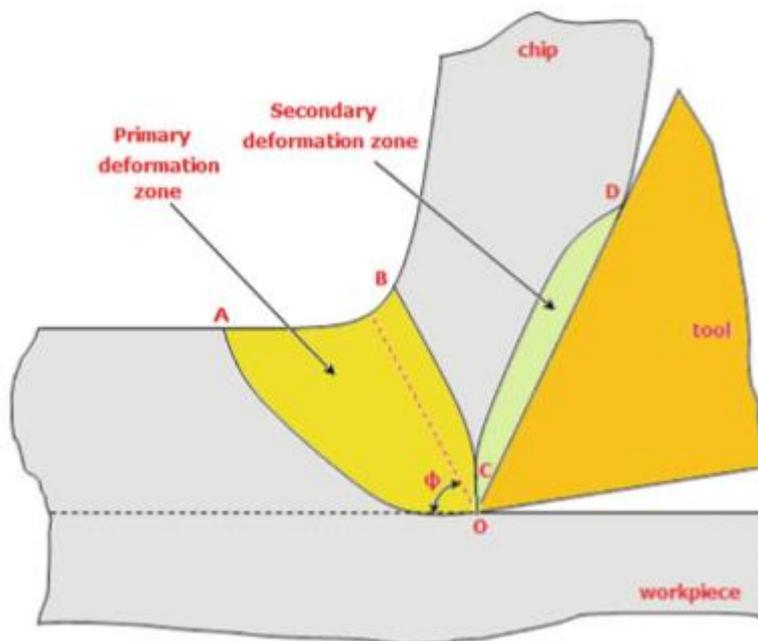


Figura 1-4. Zonas de deformación. Fuente: [1]

La zona de deformación secundaria está incluida en OCD. A lo largo de OD, la longitud de contacto entre la cara de desprendimiento de la herramienta y la viruta, el material es deformado debido a la fricción intensiva entre ambas caras.

Esta zona de deformación está definida por dos regiones, la región de adherencia, cercana a la punta de la herramienta de corte, y la región de deslizamiento, aguas abajo de la anterior.

En la región de adherencia, como su nombre sugiere, la viruta se adhiere a la herramienta produciéndose el flujo en el interior de la viruta. La viruta fluye plásticamente sobre sí misma.

Ambas zonas de deformación están caracterizadas por un aumento de la temperatura debido a una severa deformación plástica en la zona primaria y a la fricción en la zona de deformación secundaria.

Además, las altas velocidades de corte no permiten la conducción de calor y éste se concentra en un área pequeña alrededor del borde de la herramienta de corte. El endurecimiento por deformación debido a la tensión y el ablandamiento debido a la temperatura altera las características de formación de viruta en cada paso de su formación.

La medición del coeficiente de fricción en la zona de deformación secundaria es extremadamente difícil. Dado lo complejo del problema sólo podemos aspirar a obtener resultados aproximados.

Existen enfoques simplificados que proponen que el corte en la zona de deformación primaria tiene lugar a lo largo de un plano de corte, caracterizado por el **ángulo de corte**  $\phi$ , situado entre la superficie de la pieza de trabajo y el anteriormente citado plano de corte. Si bien este modelo de plano de corte único es criticado, generalmente se lo menciona en manuales de mecanizado debido a su simplicidad y es la base para calcular varios parámetros del proceso.

## 1.5 Modelo del plano de corte

Los modelos de planos de deslizamiento o cizalladura se basan en la *teoría de Ernst-Merchant*, así como en la analogía de los naipes de Piispanenen, cuyo modelo representa la pieza a modelar siendo cortada de manera algo similar a la de una baraja de cartas deslizándose una sobre la otra, con un ángulo de la superficie libre, que corresponde al ángulo de corte [2].

La viruta se forma por la cizalladura en un único plano que parte del filo de la herramienta y forma un ángulo  $\phi$  con la dirección del movimiento de corte. La viruta es recta lo que hace que no se desprege de la herramienta y la tensión de cizalladura es igual a la tensión de fluencia tangencial del material.

Se asume que la viruta es un cuerpo rígido en equilibrio. Este equilibrio se refiere a las fuerzas entre la cara de la viruta y la herramienta, y a través del plano de corte.

A continuación, se expone el diagrama de fuerzas del círculo de Merchant (Figura 1.5). Todas las fuerzas que se muestran están actuando sobre la punta de la herramienta.

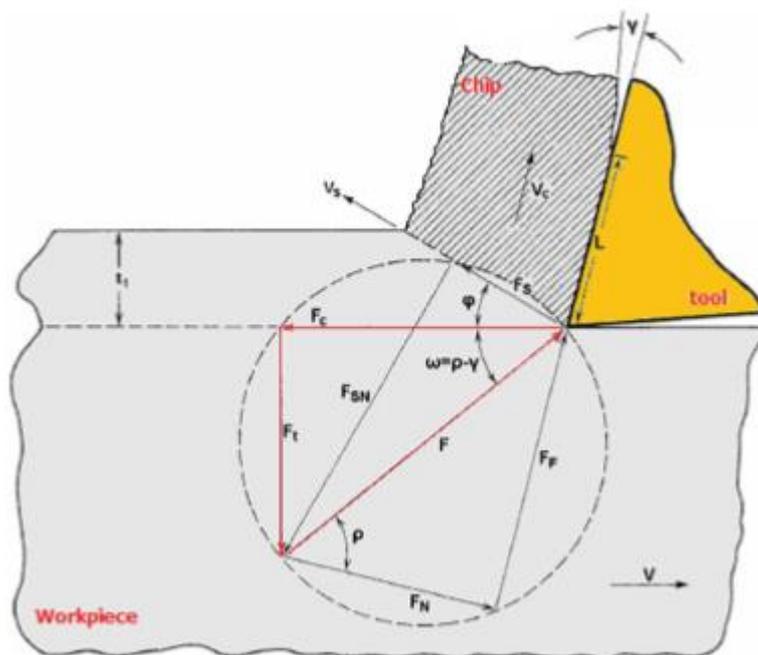


Figura 1-5. Círculo de Merchant. Fuente: [1]

La fuerza resultante  $F$  queda formada por la componente  $F_N$ , que corresponde a una fuerza normal a la superficie de la herramienta, y en la componente  $F_F$ , referida a la fuerza normal a lo largo de la cara de la herramienta. También queda conformado en  $F_{SN}$  y  $F_S$ , que son las fuerzas normales al plano de corte y a lo largo de éste, respectivamente.

Finalmente, también puede ser resuelto en componentes  $F_C$ , la fuerza de corte, y  $F_T$  el avance o fuerza de empuje. Además, se muestran el ángulo de desprendimiento  $\gamma$ , el ángulo de corte  $\phi$  y el ángulo medio de fricción entre la viruta y la herramienta,  $\rho$ .

Dicho ángulo de fricción  $\rho$  está relacionado con el coeficiente de fricción  $\mu$  a través de la ecuación:

$$\rho = \arctan \mu = \arctan \frac{F_F}{F_N}$$

# 2 CÁLCULOS REALIZADOS

---

En el presente capítulo se detallan los aspectos concernientes al proceso de cálculo y para ello, se describen el software empleado, la metodología desarrollada, los datos iniciales y las justificaciones necesarias.

Para la elaboración de este capítulo, se ha seguido la estructura propuesta por Miguel Tomás Martínez Ysern en su proyecto Fin de Máster [3]

## 2.1 Software

Todas las simulaciones han sido realizadas con un ordenador con el sistema operativo *Windows 8.1*, y con el software de simulación *DEFORM-2D V10.2*. Las operaciones realizadas con los datos obtenidos en dichas simulaciones tienen lugar con el programa *Microsoft Office Excel 2016*.

## 2.2 Metodología

La metodología empleada para la realización de este Documento es el resultado de las observadas en la literatura existente, siendo una de las principales fuentes de inspiración el trabajo de Markopoulos A.P [1] y de Geoffrey Boothroyd [4].

Resulta de importancia destacar que todos los procesos aquí tomados, están adaptados al contenido de la asignatura Procesos de Fabricación Aeronáutica perteneciente al Máster de Ingeniería Industrial en Ingeniería Aeronáutica, por lo que el alumno interesado en realizar de la Práctica que aquí se desarrolla debe tener nociones básicas sobre el Método de los Elementos Finitos.

De esta manera, se estudia el proceso de comienzo de corte ortogonal simulando hasta que se forma un tramo de viruta suficientemente largo como para entender que se ha entrado en un proceso estacionario. Una vez se ha llevado a cabo cada simulación, se tomarán 3 puntos representativos en la zona de deformación primaria sobre los que se obtendrán datos y se representarán en gráficas para su correspondiente análisis.

Cada caso de estudio está basado en las características del proceso que impone el tipo de calidad del material de la herramienta de corte. Como se comentará en apartados posteriores, para el desarrollo de este Trabajo se analizarán tres casos, constituidos a su vez, por seis subcasos, los cuales se distinguen entre ellos por el valor del coeficiente de fricción y del ángulo de desprendimiento.

En definitiva, el objetivo que se persigue en este Trabajo es la obtención de valores del ángulo de cizalladura o de corte  $\phi$ , para analizar la posibilidad de llevar a un entorno real de trabajo las simulaciones propuestas con los datos de corte que aquí se presentan, mediante el método de ajuste por mínimos cuadrados.

De esta forma, para obtener los datos de  $\phi$ , se recurre a la siguiente expresión generalizada [4], obtenida de la obra de G. Boothroyd:

$$\phi = \phi_0 - K(\beta - \gamma)$$

Donde:

$\phi_0$  representa el ángulo de cizalladura inicial (término independiente)

K representa la pendiente

$(\beta - \gamma)$ , siendo  $\gamma$  el valor del ángulo de desprendimiento

Mediante cada simulación, se tratarán de obtener los valores de  $\phi$  imponiendo  $(\beta - \gamma)$ .

El rango de valores en los que debe variar el valor de esta imposición debe situarse entre  $15^\circ$  y  $40^\circ$ . Para ello,  $\gamma$  debe pertenecer al intervalo  $[-5^\circ, 10^\circ]$ . Una vez definido  $\gamma$ , se despejará el valor de  $\beta$  para cada una de las simulaciones.

Con  $\beta$  hallado, se procede a obtener el coeficiente de rozamiento mediante la expresión:

$$\mu = \tan(\beta)$$

donde  $\mu$  representa el valor del coeficiente de rozamiento entre la herramienta y la pieza.

Los datos que serán introducidos en el programa para realizar la simulación se han obtenido del catálogo *Sandvik Coromant* [5], referente dentro del sector de herramientas de mecanizado industrial.

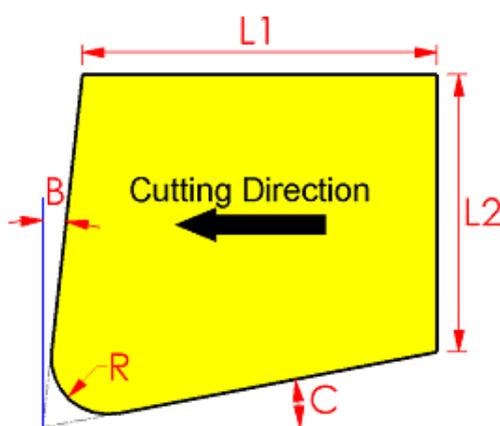


Figura 2-1. Parámetros de la herramienta.

Dicho catálogo proporciona diferentes recomendaciones de velocidades de corte en función tanto de la calidad del material de la herramienta que se utilizará en cada operación, como del material sobre el que ésta trabajará

Como puede apreciarse en la Figura 2.1, las características de la herramienta deben quedar determinadas para evitar errores durante la simulación.

El valor de  $\gamma$  corresponde en la Figura 2.1 al valor del parámetro B.

Por último, cabe destacar que se han realizado los estudios pertinentes de geometrías y mallas tanto de herramientas como de piezas, hasta obtener una combinación apropiada que converja lo más rápidamente posible y que pueda ser representativa del proceso real. En la sección 2.4 “Justificaciones” se presentan algunos detalles.

### 2.2.1 Definición de casos

Para la obtención de simulaciones que sean similares, se definirá cada caso como un conjunto de parámetros fijos. Cada caso estará compuesto a su vez por seis subcasos.

Para acercar cada caso a la realidad, se ha basado cada uno de ellos de acuerdo con una determinada calidad para la plaquita que ejerce como herramienta. Todas ellas implican forzosamente una serie de características que aproximan el proceso a casos reales admisibles en función del material sobre el que se aplique, avance y velocidad de corte.

Así, cada plaquita posee unas condiciones óptimas de corte para el tipo de material sobre las que se utilicen. Por lo que todas las simulaciones se realizarán sobre el mismo tipo de material.

Tomando como referencia el Trabajo de Martínez Ysern [3], un caso se define manteniendo las siguientes variables constantes:

- Velocidad de corte
- Avance
- Temperatura ambiente, de la herramienta y la pieza
- Coeficiente de transferencia de calor
- Materiales de la herramienta y la pieza

- Geometría de la pieza
- Mallas de la herramienta y la pieza
- Condiciones de contorno sobre las mallas
- Coeficientes de Usui

En ciertos casos puede observarse cómo la viruta se sale de la zona de remallado fino, de forma que se distorsiona la forma de ésta, lo que puede llegar a perturbar a la estabilidad del resultado obtenido. Al detener la simulación antes de esto, se limitan los tiempos de computación, ahorrando cálculos que no serán útiles para el desarrollo de la Práctica.

### 2.2.2 Diferencias entre casos

Conviene, antes de continuar, explicar las diferencias existentes entre cada caso que se va a desarrollar. La distinción principal entre cada uno de ellos se encuentra tanto en el valor del avance como de la velocidad de corte de la herramienta, una vez que ha quedado claro que todos se aplicarán sobre el mismo tipo de material.

En lo relativo a los subcasos pertenecientes a un mismo caso, se distinguen principalmente por la variación del coeficiente de fricción en función de los valores de la geometría de la herramienta. El valor del ángulo de desprendimiento (*rake angle*) condiciona de manera significativa la obtención del ángulo del plano de corte debido a su influencia sobre el coeficiente de fricción,  $\mu$ , como se contempla más adelante.

En la mayoría de los casos se deja el resto intacto, incluso el mallado, ya que permite uniformizar los resultados. Sin embargo, han existido ciertos casos en los que no se ha podido mantener dicha uniformidad puesto que la solución no ha llegado a converger. En estos casos se ha variado ligeramente la malla propuesta por el software y repetido hasta obtener una solución aceptable.

Aunque no se mantenga la uniformidad completa entre los casos, las conclusiones no se ven afectadas, y las diferencias en los resultados no son importantes ya que se desea realizar un análisis cualitativo y no cuantitativo del ángulo de corte.

### 2.2.3 Paso a paso

El proceso de obtención de datos a través de completar cada simulación desde cero se encuentra descrito detalladamente en el *Anexo B*, adjunto al final del presente Documento, en el cual se cubren los aspectos formales de realización de simulaciones que han sido utilizados para el logro de las soluciones obtenidas.

## 2.3 Datos utilizados

En este apartado se tratará de mostrar los datos que se utilizarán para cada uno de los tres casos a estudiar. Como se ha comentado anteriormente, cada uno de estos casos corresponde a una calidad específica de las plaquitas que se usan como herramienta de corte y cuyos datos han sido proporcionados por el Catálogo Sandvik.

### 2.3.1 Caso 1 · Calidad H10

El primer caso que analizar corresponde a la calidad para herramienta de corte H10. Ésta se utiliza como primera elección en operaciones de acabado y desbaste de aleaciones de aluminio, como es el caso que ocupa el presente Trabajo.



Figura 2-2. Ejemplo de plaquita para torneado con calidad H10. Fuente: [6]

Esta calidad de metal duro sin recubrimiento contiene una exclusiva combinación de resistencia al desgaste abrasivo y agudeza del filo excelentes. Algunas de las grandes ventajas que presenta este tipo de calidades son una vida útil prolongada, así como la realización de acabados superficiales excelentes [6]

Se procede a mostrar en la Tabla 2-A los valores que se han utilizado para este primer caso teniendo en cuenta lo anterior. Tanto el valor de la velocidad de corte como del avance se han obtenido del *Catálogo Sandvik Coromant* [5].

Parámetros	Unidades	Valores	
Velocidad de corte	m/min	250	
Avance	mm/rev	0.15 – 0.8	
Temperatura	°C	20	
Coefficiente de Transferencia de Calor	kW/m <sup>2</sup> K (N/s/mm/C en Deform-2D)	45	
Geometría de la herramienta	Metros (m)	L1 = 1 C = 5	L2 = 1 R = 0.05
Geometría de la pieza	Metros (m)	W = 3	H = 1
Malla de la herramienta	Elementos	737	
Malla de la pieza	Elementos	1656	

Tabla 2-A. Características de la calidad H10.

Para la definición del avance, el catálogo recomienda utilizar una gama de avances comprendida entre esos dos valores. Para simplificar el proceso, se ha optado por utilizar el valor medio de dicha gama, aproximadamente 0.45 mm/rev.

En cuanto a la geometría de la herramienta, la tabla muestra los valores a asignar a cada una de las medidas a excepción del parámetro B. Éste hace referencia al valor del ángulo de la cara de desprendimiento, el cual varía para cada simulación que se realice.

En la Figura 2.3 se muestra cómo se introducen en el Asistente del programa y el resultado obtenido:

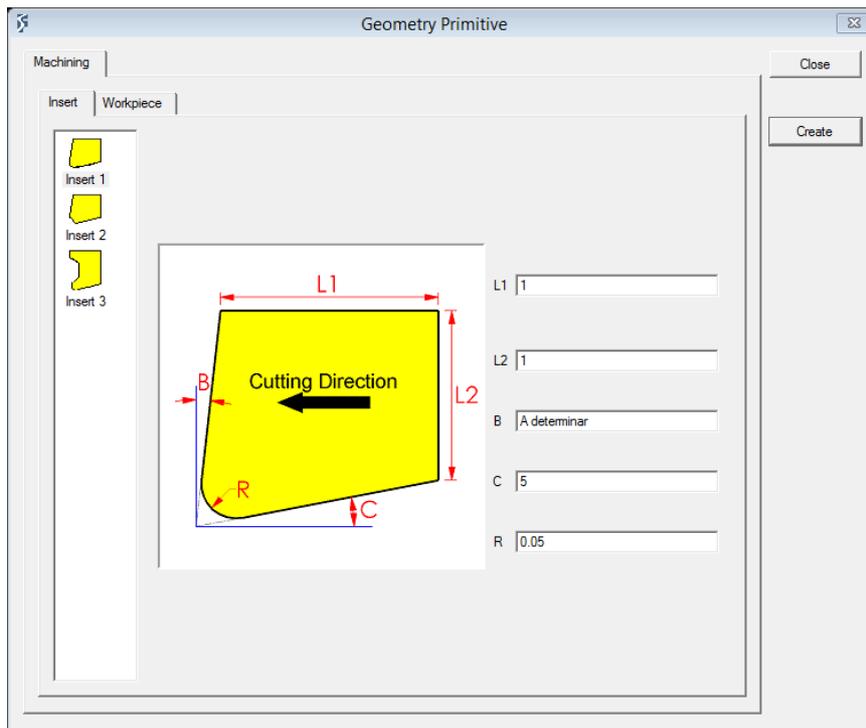


Figura 2-3. Introducción parámetros de la herramienta

A su vez, se ilustra en la Figura 2.4 cómo introducir los valores pertenecientes a la geometría de la pieza, así como el resultado que se obtiene.

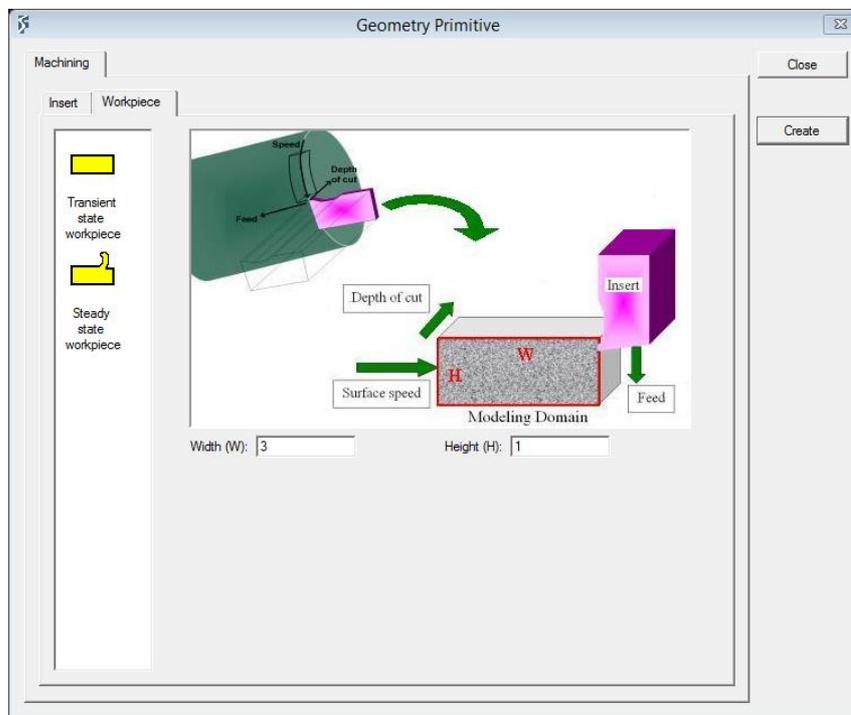


Figura 2-4. Introducción parámetros del material de trabajo

Cuando las soluciones no convergen durante la etapa de pruebas preliminares, se insertan otros datos. Llegado el momento de presentar los resultados se indica claramente qué valores se han utilizado para llevar a cabo las simulaciones. Como se ha comentado, en el Anexo B se recorre el proceso de introducción de manera más detallada.

### 2.3.2 Caso 2 · Calidad CD10

El segundo caso que se estudiará corresponde a la calidad para herramienta de corte CD10.

Ésta es altamente recomendada en condiciones estables cuando se necesita un régimen de arranque de viruta elevado en aplicaciones de mecanizado a medio desbaste. Al ser PCD (policristalino de diamante) permite el uso de una mayor velocidad de corte en el proceso.



Figura 2-5. Ejemplo de plaquita para torneado con calidad CD10. Fuente: [6]

A efectos de uso en procesos de fabricación aeronáutica, permite producir viruta más pequeña, por lo tanto, más fácil de evacuar.

La Tabla 2-B muestra los valores que se han utilizado para este segundo caso teniendo en cuenta lo anterior. Tanto el valor de la velocidad de corte como del avance se han obtenido del *Catálogo Sandvik Coromant* [5].

Parámetros	Unidades	Valores	
Velocidad de corte	m/min	750	
Avance	mm/rev	0.05 – 0.4	
Temperatura	°C	20	
Coefficiente de Transferencia de Calor	kW/m <sup>2</sup> K (N/s/mm/C en Deform-2D)	45	
Geometría de la herramienta	Metros (m)	L1 = 1 C = 5	L2 = 1 R = 0.05
Geometría de la pieza	Metros (m)	W = 3	H = 1
Malla de la herramienta	Elementos	737	
Malla de la pieza	Elementos	1656	

Tabla 2-B. Características de la calidad CD10

En este caso, para la definición del avance, el catálogo recomienda utilizar una gama de avances comprendida entre esos dos valores. Para simplificar el proceso, se ha optado por utilizar el valor medio de dicha gama, aproximadamente 0.25 mm/rev.

Al igual que en el caso anterior, la tabla muestra los valores a asignar de la geometría de la herramienta a excepción del parámetro B. Éste hace referencia al valor del ángulo de la cara de desprendimiento, el cual varía para cada simulación que se realice.

De manera análoga al caso anterior, cuando las soluciones no convergen durante la etapa de pruebas preliminares, se insertan datos ligeramente diferentes, de forma que se alcance una solución admisible.

### 2.3.3 Caso 3 · Calidad CD05

El tercer y último caso que se pretende analizar corresponde a la calidad para herramienta de corte CD05.

Esta calidad de PCD corresponde a procesos para acabado y semiacabado de materiales muy abrasivos como las aleaciones termorresistentes con un alto contenido en silicio, como es el caso que se trata en este Trabajo.



Figura 2-6. Ejemplo de plaquita para torneado con calidad CD05. Fuente: [6]

De igual forma que el caso anterior, permite producir viruta de menor tamaño.

Se procede a mostrar en la Tabla 2-C los valores que se han utilizado para este segundo caso. Tanto el valor de la velocidad de corte como del avance se han obtenido del *Catálogo Sandvik Coromant* [5].

Parámetros	Unidades	Valores	
Velocidad de corte	m/min	500	
Avance	mm/rev	0.15 – 0.8	
Temperatura	°C	20	
Coefficiente de Transferencia de Calor	kW/m <sup>2</sup> K (N/s/mm/C en Deform-2D)	45	
Geometría de la herramienta	Metros (m)	L1 = 1 C = 5	L2 = 1 R = 0.05
Geometría de la pieza	Metros (m)	W = 3	H = 1
Malla de la herramienta	Elementos	737	
Malla de la pieza	Elementos	1656	

Tabla 2-C. Características de la calidad CD05

Para la definición del avance, el catálogo Sandvik Coromant recomienda utilizar una gama de avances comprendida entre esos dos valores. Para simplificar el proceso, se ha optado por utilizar el valor medio de dicha gama, aproximadamente 0.45 mm/rev.

Se seguirán las mismas indicaciones que en los casos anteriores, a la hora de introducir los datos en el Asistente de *DEFORM*.

## 2.4 Justificaciones

En este apartado se explican las decisiones adoptadas para el estudio del ángulo de corte en este Trabajo.

### 2.4.1 Software de simulación: DEFORM-2D

Se ha utilizado este programa de computación por distintos motivos:

1. Según varios estudios permite el estudio del corte ortogonal de manera sencilla y con resultados óptimos.
2. Disponibilidad de un amplio de catálogo de materiales para realizar la simulación, así como un gran abanico de categorías de estudio.
3. El autor del Trabajo Fin de Grado adquirió práctica con el software durante el desarrollo del Grado.

Debido a lo anterior se ha utilizado este software frente a otros semejantes.

### 2.4.2 Geometría de herramienta y pieza

Todas las geometrías utilizadas en este Documento son el resultado de un proceso iterativo hasta que se alcanzaron valores útiles.

Diferentes geometrías han sido probadas, cada una de ellas variaciones de parámetros de herramientas simples. Radios de punta altos, como el que usa por defecto el Asistente de DEFORM-2D,  $R=0.05\text{mm}$  requieren valores de avance grandes para obtener valores útiles, es el motivo por el cual se descarta el valor mínimo de la gama propuesta en los apartados anteriores.

En cuanto al valor del parámetro B de la geometría de la pieza, como se ha mencionado anteriormente, éste corresponde al ángulo de desprendimiento. Dicho valor variará en cada simulación que se lleve a cabo como resultado de un proceso iterativo para conseguir valores representativos del ángulo de corte.

De la pieza sólo se modela una pequeña porción, sobre la que se realiza el estudio de corte ortogonal. Se toma el valor por defecto propuesto por el Asistente, de forma que permita obtener una viruta larga en la mayoría de los casos. Se toma el valor de longitud  $W=3$  y altura  $H=1$ .

### 2.4.3 Material de herramienta y pieza

Como se ha comentado en la sección anterior, para poder comparar resultados entre cada caso, éstos deben aplicarse sobre una pieza de trabajo del mismo material para cada uno de ellos. En esta situación, se ha elegido simular sobre aleaciones de aluminio fundidas, con una composición de silicio entre el 16 y el 22%.

Este tipo de material se adecúa a las características de cada uno de los casos y a las condiciones que imponen para obtener resultados admisibles.

En cuanto al material de la herramienta se ha optado por carburo de wolframio (WC), compuesto cerámico de gran dureza. Característica por la cual es uno de los materiales con mayor uso dentro del sector de la fabricación aeronáutica y también [7], uno de los principales motivos por la cual se ha escogido en este Trabajo.

A efectos de simulación, tras reiteradas comprobaciones con otros compuestos, el carburo de wolframio o carburo de tungsteno permite reducir el tiempo de convergencia, por lo que resulta ser un factor clave en el objetivo final, realizar una práctica con alumnos en un tiempo limitado.

#### 2.4.4 Malla

Para definir la malla, es importante conocer algunas nociones básicas del Método de los Elementos Finitos desde distintos frentes. Durante el desarrollo del Grado, se da la oportunidad de adquirir estos conocimientos, enfrentando los problemas tanto de forma técnica, mediante el estudio de la teoría y su implementación, como con diferentes aplicaciones prácticas utilizando diferentes softwares como, por ejemplo, DEFORM-2D.

Se insiste en la necesidad de tener unas bases de conocimiento asentadas del problema antes de utilizar programas para solucionarlo, para así, evitar errores en la interpretación de los resultados.

A su vez, se reitera la necesidad de obtener mallados concisos que permitan estudiar adecuadamente las geometrías de los elementos del problema. Por este motivo, se suelen utilizar mallas variables, con elementos más pequeños allí donde sea más necesario, y más grandes donde no se requiera mucha información, para evitar gastar recursos de cálculo de manera innecesaria.

De todas formas, también se concibe como imprescindible ajustar el tamaño de los elementos en las zonas más problemáticas o interesantes para obtener valores representativos.

La obtención de mallas válidas es un proceso iterativo que conlleva bastante dificultad, y su implementación no resulta simple. Por este motivo, durante este Trabajo y para evitar dificultades futuras, se optará por aceptar los valores por defecto del Asistente de DEFORM-2D, los cuáles se adecúan a las geometrías introducidas previamente por el usuario.

## 2.5 Puntos de estudio

Como se explica en la sección *1.4 Zonas de deformación*, en el mecanizado se distinguen dos zonas de deformación, llamadas zona de deformación primaria y zona de deformación secundaria.

Particularmente, esta Práctica se centra en la zona de deformación primaria, donde puede apreciarse la deformación plástica producida por el ángulo de corte, dejando a un lado la zona de deformación secundaria.

Para cada simulación deben ser escogidos de manera aproximada tres puntos dentro de la zona de deformación primaria, de forma que pueda ser definido el ángulo de corte.

La Figura 2.7 muestra un ejemplo de uno de los casos simulados para la elección de puntos admisibles.

Cabe destacar que el propósito de la obtención de puntos característicos no es trascendental a la hora de obtener resultados, por lo que se realiza de manera aproximada a criterio del usuario, siempre y cuando se respeten las zonas de deformación generadas en la simulación.

Para hallar el valor del ángulo de corte, pueden utilizarse diferentes herramientas de manera virtual. En el desarrollo de este Trabajo, se ha recurrido a un recurso on-line creado por la Universidad Politécnica de Valencia para la medición de ángulos [8].

En el siguiente capítulo se explicará la utilización de dicha herramienta.

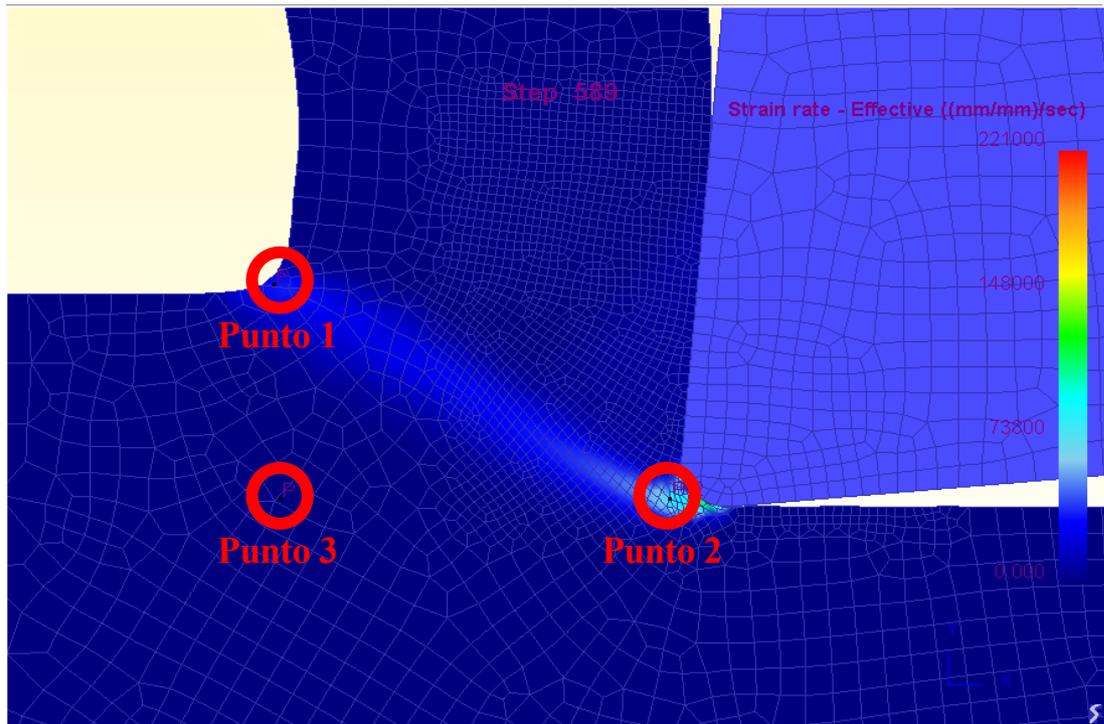


Figura 2-7. Selección de puntos

## 2.6 Otras variables

Los valores de ciertas variables que no han sido indicadas en las anteriores secciones han sido tomadas o bien por defecto o bien han sido consultadas en la bibliografía para ser afin a la realidad:

**Velocidad de corte.** Se toman valores altos pero aceptables. Como cada caso está definido para una calidad específica, se siguen las recomendaciones del Catálogo Sandvik para dicha herramienta.

**Condiciones de contorno.** Corresponden a las usuales para procesos de corte ortogonal.

**Temperatura.** Se ajusta a los valores estándar en un taller de mecanizado.

**Coefficiente de transferencia de calor.** Análisis comparativos de casos reflejan poca o ninguna influencia sobre el ángulo de corte, por lo que se opta por tomar el valor por defecto propuesto por el software.

**Variables de control de simulación.** En la gran mayoría de los casos no ha hecho falta cambiar el valor de las variables generadas por defecto.

**Coefficientes de Usui.** De gran importancia en cálculos de desgaste, pero poca influencia para nuestro caso. Se asumen los valores por defecto propuestos por el Asistente del software.

Respecto a otras variables que no se hayan definido, no ha existido ninguna variación respecto a los valores por defecto ofrecidos por el Asistente de DEFORM-2D. En ciertas simulaciones, se llegaron a realizar ligeros ajustes para intentar alcanzar la convergencia cuando no se logró, resultando en vano en la mayoría de los casos.

# 3 RESULTADOS OBTENIDOS

*“Los resultados negativos son justo lo que quiero. Son tan valiosos para mí como los resultados positivos. No puedo encontrar lo que funciona mejor hasta que encuentro lo que no funciona”*

*- Thomas Edison -*

En este capítulo se presentará la metodología a seguir para obtener el ángulo de cizalladura, así como las gráficas resultantes en cada caso estudiado tras realizar el ajuste por mínimos cuadrados.

A su vez, se ofrecen los valores de variables utilizadas para la consecución de los valores del ángulo de corte, al igual que los parámetros que quedaron por definir en la sección 2.3 *Datos utilizados*, como pudiera ser el caso del valor del ángulo de la cara de desprendimiento.

## 3.1 Obtención del ángulo de cizalladura

Partiendo de la sección 2.5 *Puntos utilizados*, donde se ejemplifica la selección de puntos admisibles para la obtención de resultado, se procede a detallar el proceso de consecución del ángulo de cizalladura mediante herramientas virtuales.

A través de la página web: <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/ruler/ruler.php> [8] perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia, se determinarán los ángulos necesarios para la realización del método.

En primer lugar, se deberá realizar una captura de pantalla de la ventana de post procesado.

Para ello, se recomienda encarecidamente, la creación de una carpeta donde poder almacenar el contenido que se vaya generando, con el fin de evitar el extravío de información y repetir pasos ya realizados.

Así, cuando se disponga de la captura, se deberá cargar la imagen en la página web mencionada con anterioridad.

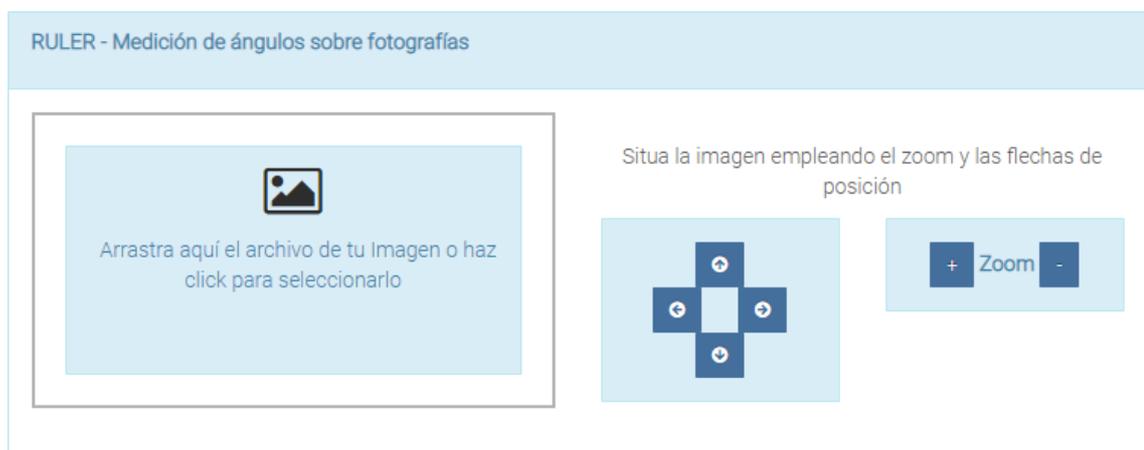


Figura 3-1. Asistente de la web de medición de ángulos. Fuente: [8]

Siguiendo las instrucciones básicas que dicha página proporciona, se tratará de centrar la imagen de forma que la zona de deformación sea apreciable.

Una vez realizado este paso, se deberá arrastrar el **indicador azul** al punto indicado en la Figura 3.2, mientras que la línea que une dicho indicador con el **indicador rojo** deberá seguir la zona de deformación primaria de manera aproximada.

Por último, el **indicador amarillo** deberá quedar situado en paralelo a la superficie mecanizada.

Estos indicadores quedan en posiciones similares a las obtenidas en la Figura 2.7 del capítulo anterior.

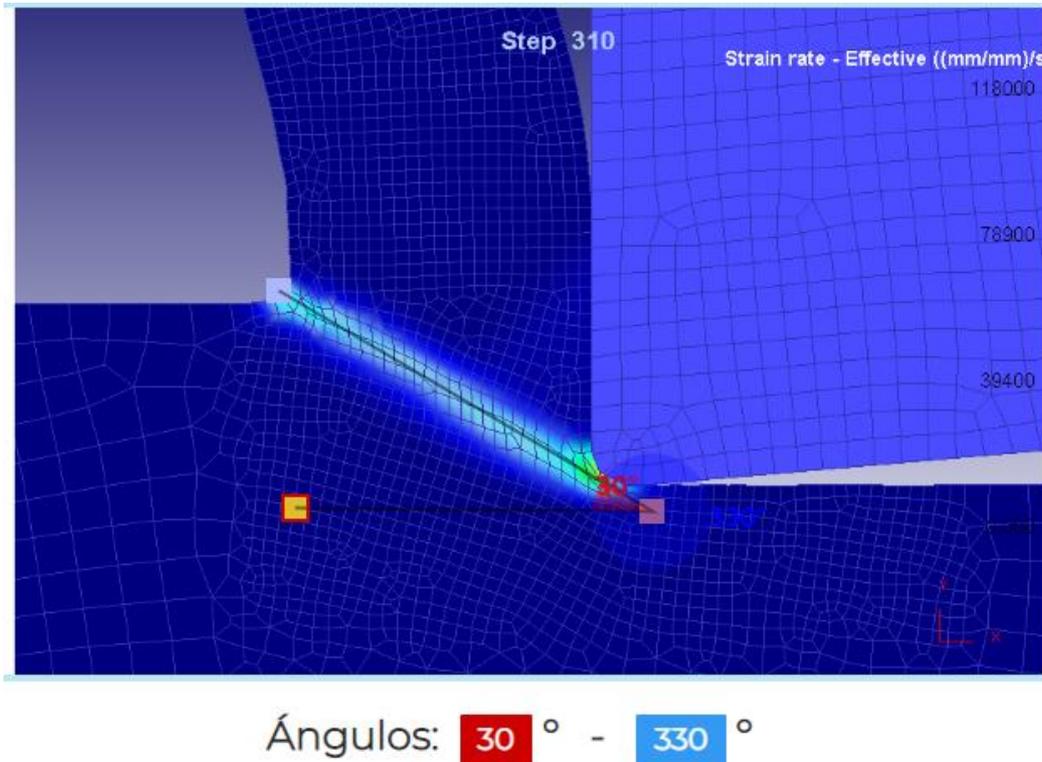


Figura 3-2. Posición de los indicadores de medición

Un sencillo truco para saber si el indicador amarillo está bien colocado nos lo dice el color de los ángulos externo e interno que rodean al indicador rojo. Cuando al desplazar el marcador amarillo verticalmente, los ángulos externo e interno intercambian de color, se ha encontrado la posición requerida para obtener dichos ángulos.

Una vez realizado este paso, se anota el ángulo interno obtenido para cada simulación realizada, obteniéndose así el ángulo de cizalladura requerido. La consecución de este ángulo es semejante para cada subcaso.

### 3.2 Ajuste de mínimos cuadrados

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de este Trabajo reside en comparar resultados experimentales obtenidos mediante softwares de simulación con fórmulas teóricas, es decir, se comprueban si las medidas con los valores que predice la teoría.

Las mediciones siempre están afectadas por errores, y para determinar con precisión el grado de concordancia es útil la utilización de metodologías como el ajuste por mínimos cuadrados.

Gracias a esta técnica podremos encontrar los valores de la pendiente y del ángulo de cizalladura inicial que mejor ajustan los datos a una recta en función de los pares de datos formados por la diferencia  $(\beta - \gamma)$  y el ángulo de corte  $\phi$ .

De esta forma se procede a mostrar los resultados obtenidos para cada caso estudiado.

### 3.2.1 Caso 1 · Calidad H10

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las simulaciones realizadas con las características correspondientes a la calidad H10.

Como se ha comentado anteriormente, cada caso está compuesto a su vez por otros seis subcasos. En cada uno de ellos se han variado ligeramente tanto el valor del ángulo de desprendimiento como del coeficiente de fricción, lo que permite obtener un valor de ángulo de corte diferente en cada simulación.

Se reflejan en la siguiente tabla los valores de los parámetros utilizados en cada una de las simulaciones.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$
<b>Simulación 1</b>	0	15	0,268
<b>Simulación 2</b>	10	30	0,577
<b>Simulación 3</b>	-5	20	0,364
<b>Simulación 4</b>	5	35	0,700
<b>Simulación 5</b>	2	37	0,754
<b>Simulación 6</b>	-5	35	0,700

Tabla 3-A. Valores de los parámetros para calidad H10

Siendo  $\gamma$  el valor del ángulo de desprendimiento y  $\mu$ , el coeficiente de fricción.

El valor de  $\beta$  viene definido por la condición de obtener valores de  $(\beta - \gamma)$  comprendidos entre 15° y 40°. De esta forma, el valor del ángulo de desprendimiento por el que se opte implica necesariamente el valor de  $\beta$  y, a su vez, el valor del coeficiente de fricción.

Una vez definidos la totalidad de los parámetros que se utilizarán en la simulación, ésta se inicia como se indicará en el Anexo B. Al finalizar, se procede a la selección de puntos para la obtención del ángulo de corte como se desarrolló en la sección 2.5 *Puntos utilizados*.

Obtenido el ángulo de corte para esa simulación según la sección 3.1 de este mismo capítulo, se representa en una gráfica el valor de dicho ángulo frente al valor de la diferencia  $(\beta - \gamma)$

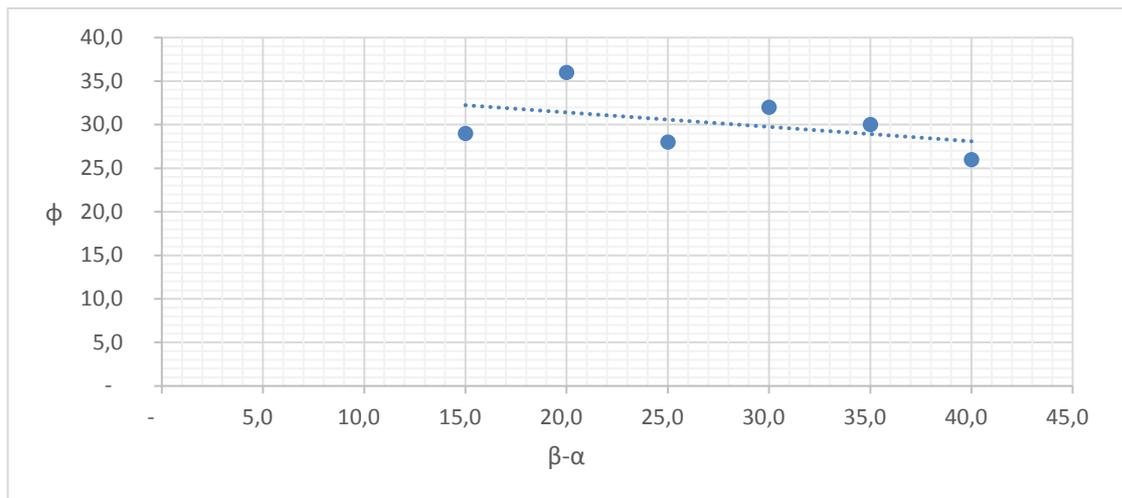
	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 1</b>	<b>15,0</b>	29.0
<b>Simulación 2</b>	<b>20,0</b>	36.0
<b>Simulación 3</b>	<b>25,0</b>	28.0
<b>Simulación 4</b>	<b>30,0</b>	32.0
<b>Simulación 5</b>	<b>35,0</b>	30,0
<b>Simulación 6</b>	<b>40,0</b>	26,0

Tabla 3-B. Valores obtenidos para el ajuste de mínimos cuadrados para calidad H10

Una vez representado, se realiza el ajuste de mínimos cuadrados.

El total de tiempo consumido para el caso en términos de computación fue aproximadamente de 1 hora y 26 minutos.

En el *Anexo B* se encuentra la explicación detallada de introducción de datos e inicio de simulación en el Asistente de Deform-2D



Gráfica I. Ajuste por mínimos cuadrados para el Caso 1

### 3.2.2 Caso 2 · Calidad CD10

Seguidamente, se muestran los resultados conseguidos para las simulaciones realizadas con las características correspondientes a la calidad CD10.

De manera análoga al caso anterior, este está compuesto por otros seis subcasos cuyos parámetros han sido variados ligeramente para obtener un valor de ángulo de corte diferente en cada simulación.

Se reflejan en la siguiente tabla los valores de los parámetros utilizados en cada una de las simulaciones.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$
<b>Simulación 7</b>	10	25	0,466
<b>Simulación 8</b>	5	25	0,466
<b>Simulación 9</b>	10	35	0,700
<b>Simulación 10</b>	-5	25	0,466
<b>Simulación 11</b>	0	35	0,700
<b>Simulación 12</b>	-5	35	0,700

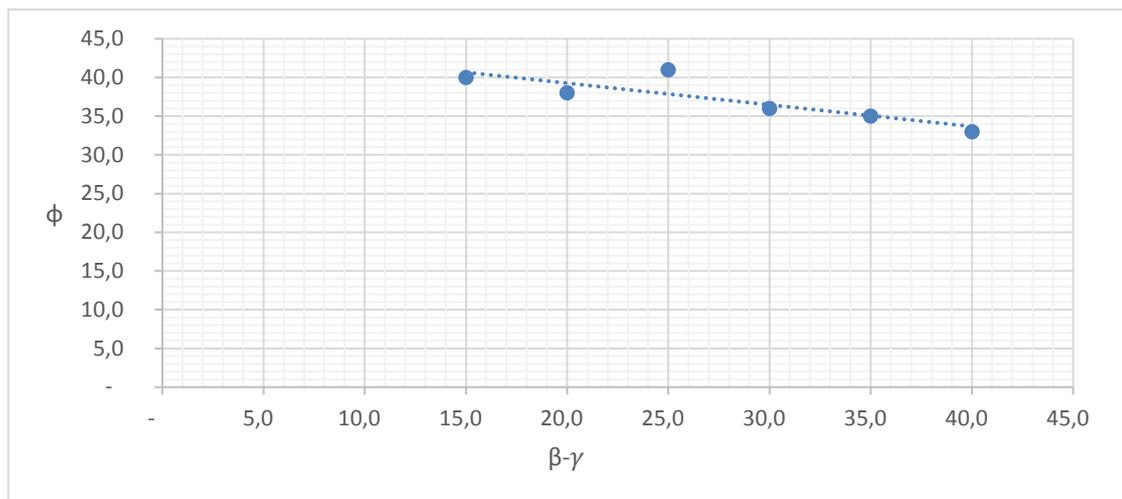
Tabla 3-C. Valores de los parámetros para calidad CD10

Siendo  $\gamma$  el valor del ángulo de desprendimiento y  $\mu$ , el coeficiente de fricción.

Para evitar la repetición de información, y ya que cada proceso es semejante al anterior con la excepción de los valores del coeficiente de fricción y el ángulo de desprendimiento, se procede a mostrar directamente tanto la tabla de ángulos obtenidos para este caso como el ajuste resultante de éste.

	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 7</b>	15,0	40,0
<b>Simulación 8</b>	20,0	38,0
<b>Simulación 9</b>	25,0	41,0
<b>Simulación 10</b>	30,0	36,0
<b>Simulación 11</b>	35,0	35,0
<b>Simulación 12</b>	40,0	33,0

Tabla 3-D. Valores obtenidos para el ajuste de mínimos cuadrados para calidad CD10



Gráfica II. Ajuste por mínimos cuadrados para el Caso 2

El total de tiempo consumido para el caso en términos de computación fue aproximadamente de 1 hora y 53 minutos.

### 3.2.3 Caso 3 · Calidad CD05

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos para las simulaciones realizadas con las características correspondientes a la calidad CD05.

El procedimiento es análogo a los casos anteriores, por lo que se muestran los datos usados y los resultados obtenidos.

En la siguiente tabla se reflejan los valores de los parámetros utilizados en cada una de las simulaciones.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$
<b>Simulación 13</b>	10	25	0,466
<b>Simulación 14</b>	5	25	0,466
<b>Simulación 15</b>	0	25	0,466
<b>Simulación 16</b>	5	35	0,700
<b>Simulación 17</b>	-5	30	0,577
<b>Simulación 18</b>	-5	35	0,700

Tabla 3-E. Valores de los parámetros para calidad CD05

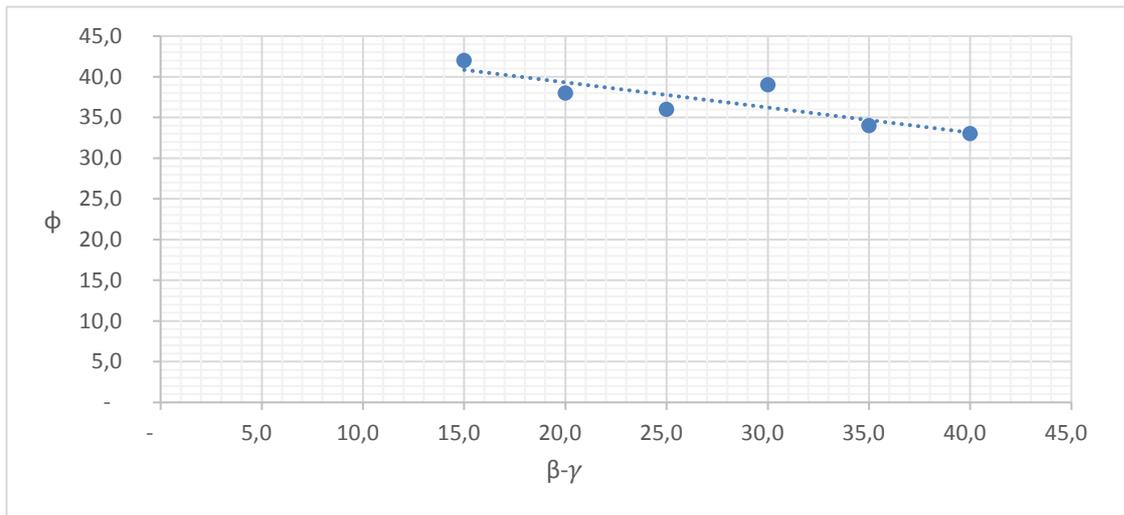
Siendo  $\gamma$  el valor del ángulo de desprendimiento y  $\mu$ , el coeficiente de fricción.

Una vez obtenidos los ángulos de cizalladura para cada simulación se representan en una gráfica el valor de dichos ángulos frente al valor de la diferencia ( $\beta - \gamma$ )

	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 13</b>	15,0	42,0
<b>Simulación 14</b>	20,0	38,0
<b>Simulación 15</b>	25,0	36,0
<b>Simulación 16</b>	30,0	39,0
<b>Simulación 17</b>	35,0	34,0
<b>Simulación 18</b>	40,0	33,0

Tabla 3-F. Valores obtenidos para el ajuste de mínimos cuadrados para calidad CD05

Una vez representado, se realiza el ajuste de mínimos cuadrados.



Gráfica III. Ajuste por mínimos cuadrados para el Caso 3

El total de tiempo consumido para el caso en términos de computación fue aproximadamente de 1 hora y 43 minutos.

# 4 CONCLUSIONES

---

*“Cada solución da pie a un nuevo problema...”*

*- David Hume -*

A la vista de los resultados obtenidos, cabe efectuar varias interpretaciones a distintos niveles, fruto del proceso de realización del presente Trabajo.

En este Documento se presenta el estudio realizado para la elaboración de una práctica formativa destinada a los alumnos pertenecientes a la asignatura de Procesos de Fabricación Aeronáutica impartida en el Máster de Ingeniería Aeroespacial.

Mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos dentro del software de simulación DEFORM – 2D, se han establecido tres casos a desarrollar por los alumnos como el presente Documento indica.

A raíz de las gráficas obtenidas tras finalizar las diferentes simulaciones y analizar los diversos casos, puede observarse que dichos resultados son admisibles.

No deja de ser significativo ver como cada uno de los casos que conforman la práctica muestran cómo la relación entre en ángulo de cizalladura y el valor de  $(\beta - \gamma)$  se ajusta en una recta lineal decreciente.

Es importante destacar que todos los resultados halados no dejan de ser aproximaciones realizadas mediante un software de simulación, por lo que numéricamente no se alcanzan valores reales; sin embargo, si puede suponerse el mismo comportamiento que se obtendría experimentalmente.

Uno de los factores que más se tuvo en cuenta durante el desarrollo de la práctica fue el tiempo. A la hora de definir las características que conforman una práctica, hay que tener en cuenta la estimación de tiempo que ésta ocupará a los alumnos. En base a esto, ciertas condiciones de las simulaciones se modificaron para tratar de simplificar la práctica de forma que se ajustara al tiempo destinado por el Plan de Estudios.

Una vez desarrollada, se ha comprobado que la duración de la práctica es factible, ya que los alumnos han considerado que tanto los tiempos de simulación como de obtención de resultados eran razonables.

La valoración de los alumnos resulta fundamental para verificar la idoneidad de la práctica. Por ese motivo, una vez concluida, se les preguntó a éstos sus impresiones, quedando resumidas en los siguientes puntos:

- Presenta un punto de vista diferente y necesario del Método de los Elementos Finitos fuera del ámbito de la ingeniería de estructuras.
- Punto de apoyo para fijar conceptos del Método de los Elementos Finitos a través de la puesta en práctica de los conceptos teóricos conocidos.
- Herramienta muy útil para conocer de primera mano el uso de un software de simulación como es DEFORM – 2D.

Por estos motivos, la puesta en práctica de este Práctica ha resultado exitosa.



## 5 TRABAJOS FUTUROS

---

En este capítulo se presentan algunas ideas que pueden servir de líneas futuras de trabajo, nacidas como consecuencia del desarrollo del presente Documento.

Aunque el objetivo principal de esta práctica gira en base a la idea de analizar el ángulo de cizalladura mediante el Método de los Elementos Finitos, durante el transcurso de elaboración de esta práctica resalta el gran abanico de posibilidades que el software elegido (DEFORM -2D) brinda.

A la vista de esto, surge la posibilidad de ampliar los límites que presenta esta práctica, llegando a analizar en profundidad otros parámetros del proceso de torneado relacionados con el aquí estudiado, o bien, elaborar una nueva práctica enfocada en otros aspectos del mecanizado.

Si bien este Trabajo se ha centrado en el corte ortogonal en dos dimensiones, la última versión del software DEFORM permite trabajar en tres dimensiones, aproximándose de manera significativa a la realidad, aunque resultando más complejo.

Si se continúa estudiando el corte ortogonal y sus propiedades, se recomienda centrar los esfuerzos en incorporar el cálculo térmico en el proceso de arranque de viruta, ya que resulta de gran interés académico dentro del marco teórico que la asignatura de Procesos de Fabricación Aeronáutico ofrece.



# 6 ANEXOS

---

A este Trabajo se añaden tres documentos que complementan la información que en él se muestra, pero que no tienen lugar aquí.

El Anexo A: Documento de instalación de Deform – 2D, detalla el procedimiento adecuado para la puesta en marcha de dicho software de simulación.

El Anexo B: Dossier de la práctica, documento destinado a los alumnos de la asignatura de Procesos de Fabricación Aeronáutica para la realización de las simulaciones.

El Anexo C: Resultados de las simulaciones, contiene las figuras con la obtención de los ángulos de cizalladura de todas los subcasos indicados tal y como se obtienen del módulo de post-procesado de DEFORM-2D.



# REFERENCIAS

---

- [1] A. P. Markopoulos, *Finite Element Method in Machining Process*, Athens: Springer, 2013.
- [2] G. T. Smith, *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [3] M. T. Martínez Ysern, *Desgaste de herramientas en mecanizado: Análisis de sensibilidad a la fricción*, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2011.
- [4] G. Boothroyd, *Fundamentos del corte de metales y las Máquinas-herramientas*, Massachusetts: McGraw Hill Latinoamericana S.A., 1978.
- [5] Catálogo SANDVIK COROMANT, *Herramientas de torneado*, 2012.
- [6] Sandvik Coromant, «Plaquetas y calidades de torneado de materiales no ferrosos,» [En línea]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/turning-inserts-grades-non-ferrous-materials/pages/default.aspx>. [Último acceso: 13 04 2020].
- [7] CarboSystem, «CarboSystem.com,» [En línea]. Available: <https://carbosystem.com/carburo-de-tungsteno/>. [Último acceso: 8 Abril 2020].
- [8] J. Diego-Mas, «ERGONOMICS RULER - Medición de ángulos en fotografías,» Ergonautas.upv.es, [En línea]. Available: <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/ruler/ruler.php>. [Último acceso: 2 Diciembre 2019].



# **ANEXO A · PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN DE DEFORM-2D**

---

## Instalación de DEFORM®

DEFORM® es un software de ingeniería que permite a diseñadores analizar procesos de formación de metal, tratamiento térmico y mecanizado en el ordenador en lugar de en el taller utilizando metodologías de prueba y error.

Esta herramienta se encuentra constituida por dos productos diferentes, DEFORM-2D y DEFORM-3D. Aunque para el desarrollo de la práctica tan sólo será necesario DEFORM-2D, esta instalación incluye también la puesta en marcha de DEFORM-3D.

De esta forma, las siguientes páginas servirán a los alumnos como una guía básica de instalación de ambos programas.

Cabe destacar que, para la completa instalación de este software, será necesario instalar, a su vez, diversos complementos que aseguren el funcionamiento del programa.

## Carpeta de descarga

Previamente al inicio la instalación, el usuario debe cerciorarse de que la carpeta que contiene los archivos de instalación está dispuesta por los documentos que muestra la Ilustración A-1:

Nombre	Tipo	Tamaño
 SFTC Deform 10.2	Carpeta de archivos	
 D3D	Archivo WinRAR	503.529 KB
 DEFORM-3D-V61	Archivo PDF	36.307 KB
 MPICH2 password	Documento de Mi...	59 KB

Ilustración A 1. Contenido de los archivos de descarga

Correspondiendo tanto la carpeta de archivos *SFTC Deform 10.2* como el archivo *PDF DEFORM-3D-V61* al contenido ya descomprimido del archivo WinRAR *D3D*.

El documento PDF *DEFORM-3D-V61* contiene el manual de usuario del programa para aquellas personas que quieran tanto introducirse en él como explorar todas las posibilidades que ofrece, llegando mucho más allá de los objetivos que se van a alcanzar con esta práctica.

Al hacer clic en la carpeta de archivos *SFTC Deform 10.2*, aparecerán tres tipos de archivos diferentes. Se clica en el primero de ellos, la carpeta de archivos *LEGEND*.

Una vez dentro de *LEGEND*, se abrirá el documento de texto "*readme*", que contiene de forma esquemática, los pasos a seguir durante la instalación de esta versión del programa DEFORM pero que servirá como punto de apoyo durante el transcurso de ésta.

Así, siguiendo las instrucciones de este documento de texto, se retrocederá a la carpeta anterior para ejecutar la aplicación *DEFORM\_System\_v10.2\_Installer*.

## DEFORM System

El siguiente paso corresponde a la puesta en marcha de cada uno de los complementos necesarios para el correcto funcionamiento de DEFORM.

De esta manera, se abrirá el asistente de instalación del programa, el cual recomendará cerrar todas las aplicaciones que se estén ejecutando en ese instante en el ordenador antes de comenzar con el proceso. Para continuar, se hará clic en *Next*.

Como se muestra en la Ilustración A-2, la siguiente ventana corresponde a *License Agreement* de este primer programa. Para continuar con la instalación, se clicará en “*I Agree*” y, posteriormente, en *Next*.

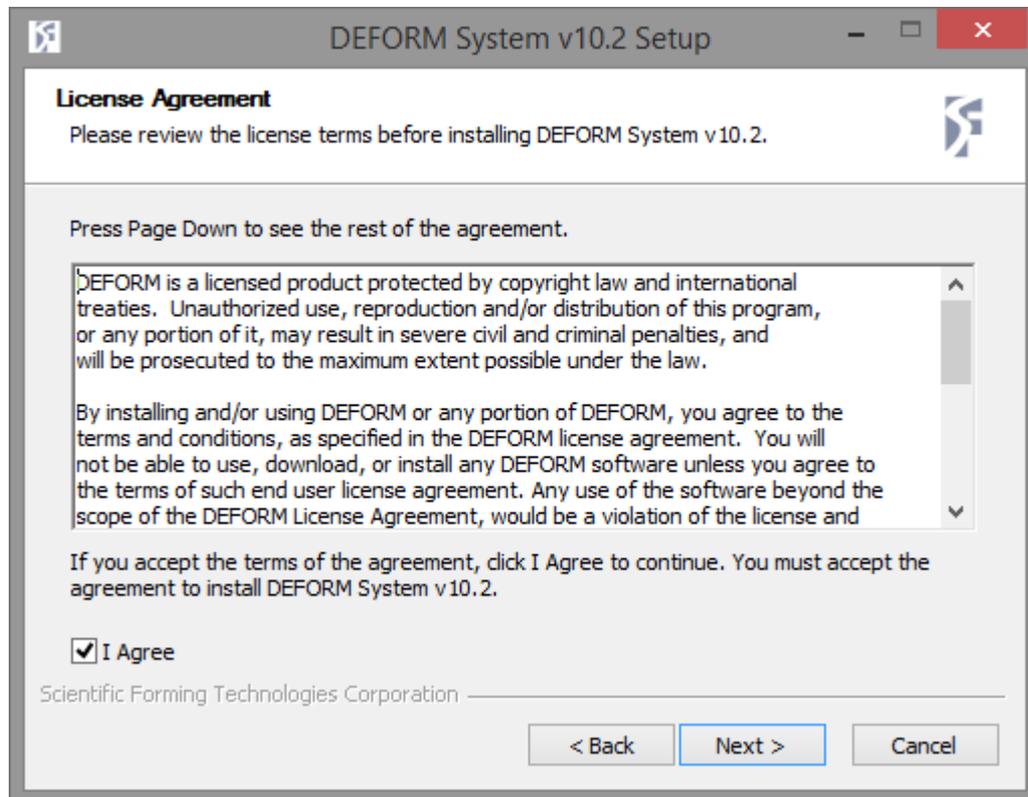


Ilustración A 2. License Agreement

A continuación, se elegirán los componentes que se quieren instalar, así como el tipo de instalación que desee el usuario. Se prosigue con la instalación con las opciones por defecto, es decir, todos los componentes opcionales marcados y el tipo de instalación *Node Locked/Floating* y, clicando finalmente, en *Install*.

De esta forma, mientras el asistente de **DEFORM System v10.2** iniciará la instalación, aparecerá una nueva ventana emergente correspondiente al asistente de **DEFORM Support Code v10.2**, uno de los componentes previamente seleccionados cuya instalación se requiere.

## DEFORM Support Code v10.2

De manera análoga al asistente anterior, se recomienda mantener cerradas todas las aplicaciones antes de comenzar el proceso. Para continuar, se hace clic en *Next*.

A continuación, se vuelven a elegir los componentes y características que integran la instalación, pero en este caso, para el complemento **DEFORM Support Code v10.2**. Como en el desarrollo de esta práctica no tendrá lugar ninguna operación con Python, se desmarca esta opción que se encuentra activa por defecto.

Antes de proceder al siguiente paso y hacer clic en *Next*, se debe asegurar que la única opción marcada corresponde al componente *MPICH Multiple Processor Support* siendo el tipo de instalación *Custom Installation*.

La siguiente ventana preguntará al usuario sobre la carpeta de destino donde guardar los archivos del programa. Se recomienda seguir las instrucciones por defecto. Una vez seleccionada la localización definitiva, se clicará en *Install*.

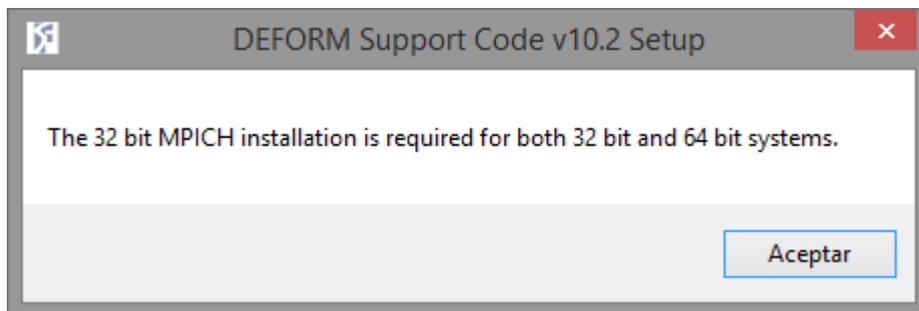


Ilustración A 3. Instalación 32/64 bit systems

Durante el proceso, surgirá la ventana que muestra la Ilustración A-3, la cual indica la necesidad de una instalación de 32 bits para el complemento *MPICH*. Para continuar con este desarrollo, se pulsa sobre *Aceptar*.

## MPICH Multiple Processor Support

A continuación, se pondrá en marcha el asistente para la instalación de *MPICH* en el ordenador (Ilustración A-4) Para comenzar, se clica sobre *Next*.

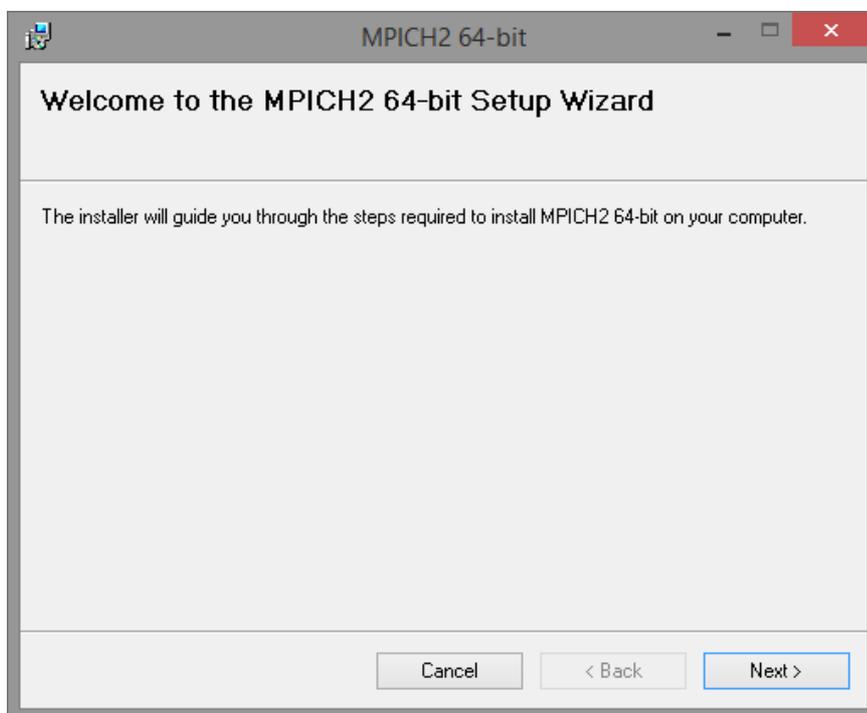


Ilustración A 4. Asistente MPICH

La siguiente pantalla mostrará los requerimientos del sistema que este programa necesita. Resulta interesante ojear este contenido para el caso de posibles incompatibilidades.

Si no hay inconvenientes, hacer clic en *Next*.

*License Agreement* será el contenido que mostrará la siguiente ventana. Para proseguir, se debe cambiar la opción marcada por defecto a “*I Agree*” y clicar sobre *Next*.

Llegados a este punto, la instalación del programa requiere al usuario una contraseña para poder continuar con el proceso. Generalmente, esa palabra aparece por defecto, siendo ésta “*behappy*”, por lo que clicando sobre *Next* se avanza de pantalla.

Si no es el caso, y dicha palabra no apareciese, habría que retroceder al Documento Word *MPICH2 password* contenido en la Carpeta de descarga. En dicho archivo aparece una captura de pantalla con la contraseña (Ilustración A-5), por lo que simplemente, habrá que introducirla en el casillero y clicar sobre *Next* para continuar.

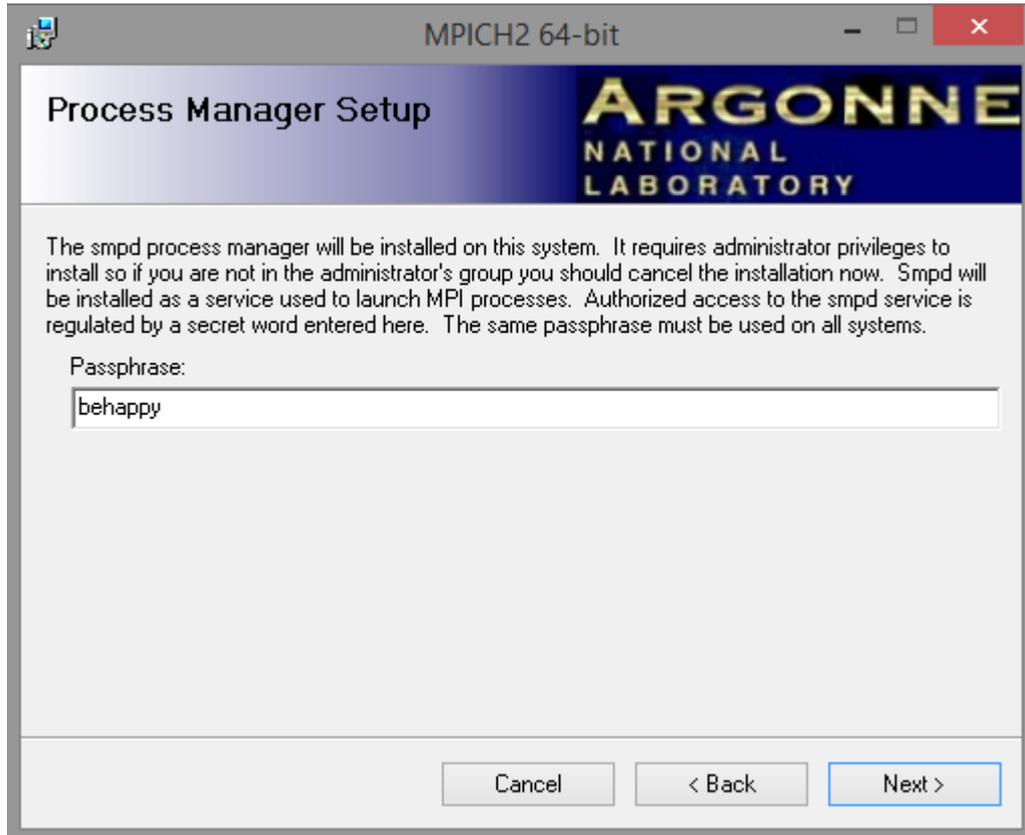


Ilustración A 5. Palabra clave requerida (MPICH2 password.doc)

Introducida la palabra clave, se debe elegir una carpeta de destino para la instalación de este módulo. Se recomienda usar la carpeta propuesta por defecto. Es importante mantener marcada la opción “*Just me*” antes de seguir con la puesta a punto.

La siguiente ventana es previa al comienzo de la instalación del componente. Para confirmar, clicar sobre *Next* y en breves instantes, el programa quedará instalado. Cerramos con *Close*.

Una vez completa la instalación de este componente, el asistente de *DEFORM Support Code v10.2* habrá finalizado su tarea, por lo que al clicar sobre *Finish* se seguirá con la instalación del programa.

## DEFORM License Manager

El siguiente componente cuya instalación es requerida se trata de **DEFORM License Manager v3.0.3**.

De manera análoga a los casos anteriores, se hará clic sobre *Next* para llegar a los acuerdos de licencia del programa. Queda a criterio y disposición del usuario la lectura de éstos. Para continuar con la instalación, el usuario debe mostrar conformidad y clicar sobre “*I Agree*”, momento en que se activará el botón *Next* para pasar a la siguiente pantalla.

Se volverá a elegir una localización de destino para los archivos que se generen. Se recomienda que la carpeta escogida sea la misma que se haya usado con anterioridad en los asistentes previos para evitar problemas. Una vez finalizada dicha tarea, haciendo clic en *Install*, dará comienzo la instalación.

A continuación, el programa requerirá una contraseña para los archivos de **DEFORM License Server** (Ilustración A-6). En este caso, como este componente simplemente, es necesario para la instalación y no será ejecutado durante la práctica, no será necesaria dicha contraseña, por lo que se hará clic en *Close* para continuar.

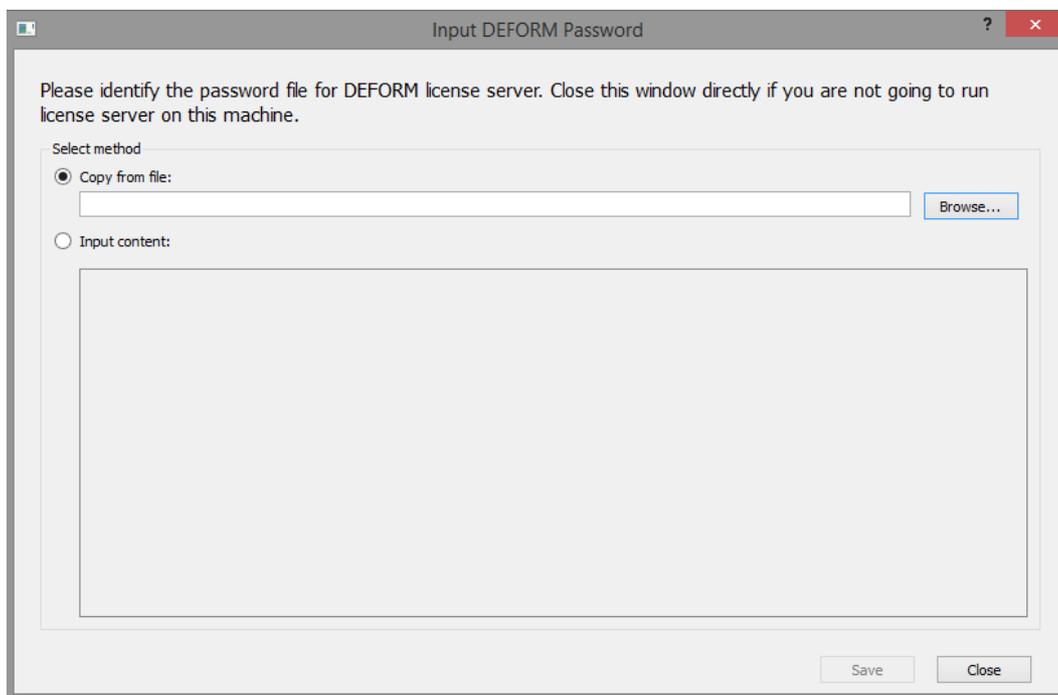


Ilustración A 6. Contraseña DEFORM License Server

Se confirma la decisión de cerrar la ventana al pulsar sobre *Yes* (Ilustración A-7).

Con este paso, se habrá terminado la instalación de **DEFORM License Manager v3.0.3**, de forma que haciendo clic en *Finish*, se pasará a la siguiente etapa.

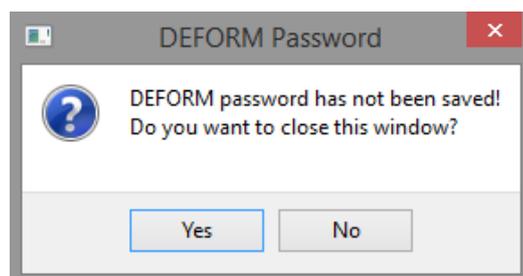


Ilustración A 7. Confirmación contraseña

Tras esperar unos instantes. Comenzará la última instalación de las aplicaciones requeridas.

## DEFORM v10.2

Este componente es realmente el más importante de todos los instalados hasta ahora, ya que se trata de la aplicación que contiene el programa que se usará para el desarrollo de la práctica.

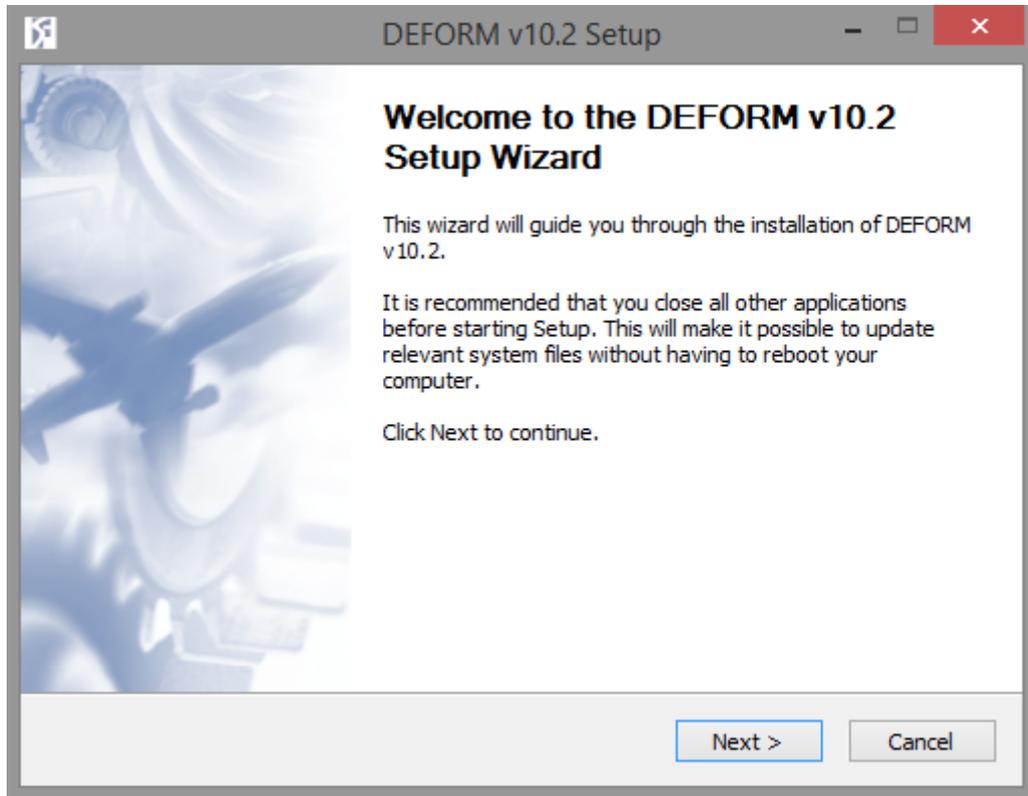
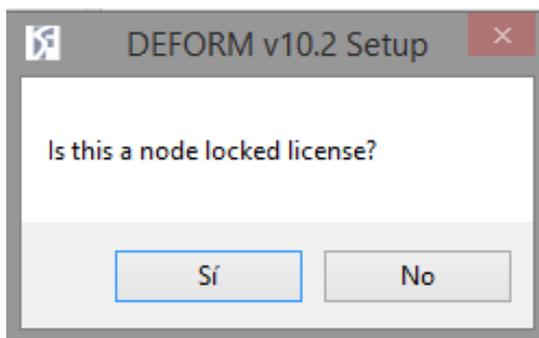


Ilustración A 8. Iniciación DEFORM v10.2

Para continuar a partir de la primera ventana (Ilustración A-8), se clicará en *Next*.



Siguiendo el ejemplo de los casos anteriores, se requiere la conformidad de los acuerdos de licencia para el uso y la instalación del programa. Haciendo clic en "I Agree", y posteriormente, en *Next*, se continúa con el proceso.

Se deberá escoger un lugar de destino para los archivos que se produzcan durante el proceso y, se hace clic sobre *Install*.

Tras unos minutos durante los que el programa estará completando la instalación, surgirá una nueva ventana. (Ilustración -9). Se hace clic en *No*.

Ilustración A 9. Cuestión 1

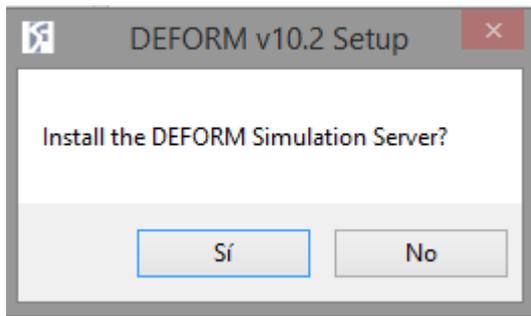


Ilustración A 11. Cuestión 2

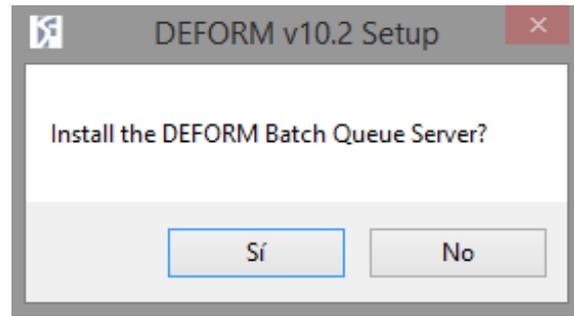


Ilustración A 10. Cuestión 3

Aparecerán dos ventanas con preguntas acerca de más instalaciones que, en este caso serán prescindibles para el futuro desarrollo de esta práctica (Ilustraciones A-10 y A-11). Así, de la misma forma, se hará clic en **No**.

Unos breves instantes después de responder a las preguntas, surge una nueva pantalla (Ilustración A -12) donde se seleccionan los diferentes módulos disponibles y sus correspondientes accesos directos (*Shortcuts*) que se quieren incluir en el programa. Como se muestra en la Ilustración A -12, se seleccionan todas las opciones para posteriormente, hacer clic en **Generate shortcuts**.

Una nueva ventana emergente informará que todos los *Shortcuts* han sido creados, por lo que se hace clic en **OK** y el programa volverá a la pantalla de la Ilustración A -12. Para finalizar, hacemos clic en *Close*.

A continuación, aparecerá una ventana donde se podrán comprobar las carpetas de destino de cada uno de los programas ya instalados. Para seguir con el proceso, clic en *Close*.

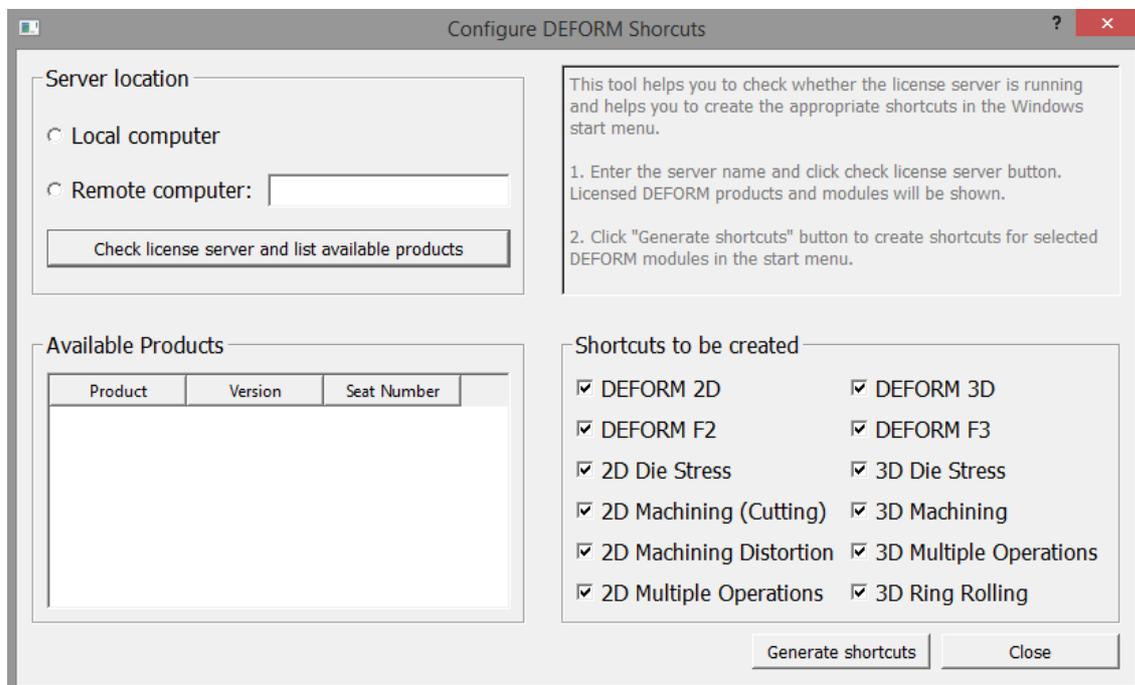


Ilustración A 12. Generación de modos de trabajo y Shortcuts

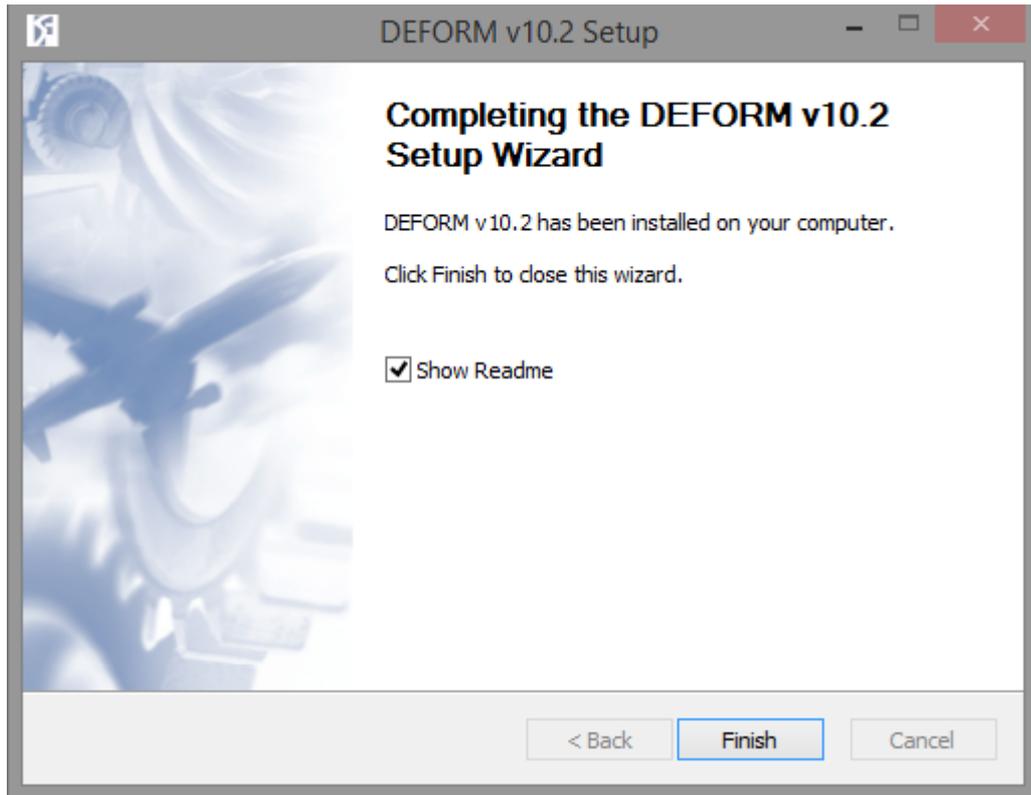


Ilustración A 13. Fin instalación DEFORM v10.2

Finalmente, la instalación de **DEFORM v10.2** habrá concluido. Para pasar a la siguiente etapa, se hace clic en *Finish* como muestra la Ilustración A -13.

La opción marcada por defecto, “*Show Readme*” puede ser desactivada. Al dejarla activa, el programa nos mostrará la última versión del Manual de Usuario disponible para esta versión del software

El asistente general de **DEFORM System v10.2 Setup Wizard** también habrá concluido, por lo que, de la misma forma, se hace clic en *Finish*.

## Administrador de tareas

Siguiendo la guía del documento de texto “*readme*” anteriormente comentado en el apartado *Carpeta de descarga*, se procede a detener **DEFORM License Manager Server** en el caso que se esté ejecutando.

Generalmente, dicho programa no se está ejecutando una vez que finaliza la instalación, aunque para asegurar que se continúa con el proceso satisfactoriamente, accediendo al **Administrador de tareas** de nuestro ordenador, se puede comprobar que no está activo.

En el caso que lo estuviese, se debe forzar la detención de dicho componente.

## Reemplazo de archivos

Para el siguiente paso, se deberá retroceder al apartado *Carpeta de descarga*, donde siguiendo la ruta **SFTC Deform 10.2 \ LEGEND \ Program Files \ SFTC \ License Manager** se encuentran dos archivos como muestra la Ilustración A -14

Nombre	Tipo	Tamaño
 Deform.pwd	Archivo PWD	9 KB
 LManagerServer	Aplicación	300 KB

Ilustración A 14. Archivos de la carpeta License Manager

Estos archivos deberán ser copiados y posteriormente, reemplazados en la carpeta de destino que se haya elegido durante la instalación del programa.

Si se han seguido todas las recomendaciones por defecto del Asistente de Instalación, la ruta donde los archivos copiados deben ser reemplazados es la siguiente:

***C:\Program Files\SFTC\License Manager***

Ya en esta dirección, aceptamos reemplazar los archivos existentes en ese instante por los que venían contenidos dentro de la Carpeta de descarga

## **Ejecutar LManager Server**

Finalmente, se ejecuta el archivo ya pegado ***LManagerServer*** y se esperan aproximadamente 20 segundos.

A continuación, se busca en nuestro ordenador la aplicación DEFORM 2D y se ejecuta para comprobar que la instalación se ha llevado a cabo correctamente.

Es importante advertir que cada vez que se pretenda poner en marcha DEFORM 2D o cualquiera de sus otros módulos instalados, se deberá ejecutar previamente **LManagerServer** para que el software comience a funcionar.

# **ANEXO B· DOSSIER PARA LA SIMULACIÓN**

---

## Introducción

En el presente Documento se expone paso por paso cómo realizar un estudio sobre el proceso de formación de viruta y la obtención del ángulo de cizalladura en mecanizado mediante corte ortogonal a través de simulación 2D. En estas páginas no se pretende proporcionar al alumno una guía detallada sobre el funcionamiento del programa *DEFORM-2D*, ni siquiera los aspectos más básicos. Se trata de una guía para comprender de forma intuitiva el complejo proceso de formación de viruta mediante un software que aplica el *Método de los Elementos Finitos*.

Estas páginas se enfocan en proporcionar una metodología muy definida para alcanzar el fin de esta práctica, es decir, el estudio de formación de viruta y los ángulos de los diferentes planos de corte entre la herramienta y la pieza de trabajo.

No se prevén en este Trabajo diferentes modificaciones ni en forma ni contenido de las que se plantean en esta Práctica, por lo que se recomienda encarecidamente al alumno la consulta de manuales específicos del programa si se desea profundizar.

Esta Práctica va dirigida a aquellos alumnos de la asignatura de Procesos de Fabricación Aeronáutica que quieran comprender mejor la metodología y el camino seguidos por el autor en el proceso de realización de las simulaciones propuestas, por lo que se supone que éstos poseen nociones básicas en el Método de los Elementos Finitos, técnicas industriales de mecanizado como el torneado y el uso del corte ortogonal, así como en el manejo de las características básicas de uso del PC.

Las ilustraciones que se muestran en este Documento han sido tomadas directamente del software, y tal y como se ha ido describiendo durante este trabajo, se ha utilizado el sistema operativo Windows 8.1. La versión utilizada del programa *DEFORM-2D* es la versión **v10.2**.

## Consideraciones previas

Antes de comenzar con la puesta en marcha de las simulaciones, se procede a explicar el contenido y las características que se utilizarán en ellas.

Resulta de importancia destacar que se pretende estudiar el proceso de comienzo de corte ortogonal simulando hasta que se forma un tramo de viruta suficientemente largo como para entender que se ha entrado en un proceso estacionario. Una vez se ha llevado a cabo cada simulación, se tomarán 3 puntos representativos en la zona de deformación primaria sobre los que se obtendrán datos y se representarán en gráficas para su correspondiente análisis.

Para la obtención de simulaciones que sean similares, se definirá cada caso como un conjunto de parámetros fijos. Cada caso estará compuesto a su vez por seis subcasos distintos en los que se variarán las condiciones del proceso, por lo que finalmente, se habrán realizado dieciocho simulaciones diferentes.

Dichas condiciones del proceso vienen determinadas por el avance y la velocidad de corte, así como por el coeficiente de resistencia y los ángulos  $\beta$  y  $\gamma$ .

Para acercar cada caso a la realidad, se ha basado cada uno de ellos de acuerdo con una determinada calidad para la plaquita que ejerce como herramienta. Todas ellas implican forzosamente una serie de características que aproximan el proceso a casos reales admisibles en función del material sobre el que se aplique, avance y velocidad de corte.

Así, cada plaquita posee unas condiciones óptimas de corte para el tipo de material sobre las que se utilicen. Por lo que todas las simulaciones se realizarán sobre el mismo tipo de material.

El objetivo principal de esta Práctica consiste en obtener de valores del ángulo de cizalladura o de corte  $\phi$ , para analizar la posibilidad de llevar a un entorno real de trabajo las simulaciones propuestas con los datos de corte que aquí se presentan, mediante el método de ajuste por mínimos cuadrados.

De esta forma, para obtener los datos de  $\phi$ , se recurre a la siguiente expresión generalizada:

$$\phi = \phi_0 - K(\beta - \gamma)$$

Donde:

$\phi_0$  representa el ángulo de cizalladura inicial (término independiente)

K representa la pendiente

$(\beta - \gamma)$ , siendo  $\gamma$  el valor del ángulo de desprendimiento

Mediante cada simulación, se tratarán de obtener los valores de  $\phi$  imponiendo  $(\beta - \gamma)$ .

El rango de valores en los que debe variar el valor de esta imposición debe situarse entre  $15^\circ$  y  $40^\circ$ . Para ello,  $\gamma$  debe pertenecer al intervalo  $[-5^\circ, 10^\circ]$ . Una vez definido  $\gamma$ , se despejará el valor de  $\beta$  para cada una de las simulaciones.

Con  $\beta$  hallado, se procede a obtener el coeficiente de rozamiento mediante la expresión:

$$\mu = \tan(\beta)$$

donde  $\mu$  representa el valor del coeficiente de rozamiento entre la herramienta y la pieza.

Los datos que serán introducidos en el programa para realizar la simulación se han obtenido del catálogo **Sandvik Coromant**, referente dentro del sector de herramientas de mecanizado industrial.

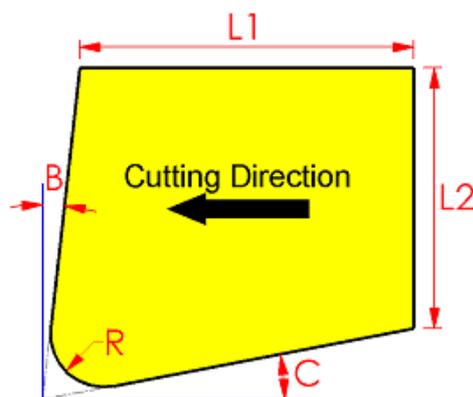


Ilustración B 1. Parámetros de la herramienta

Dicho catálogo proporciona diferentes recomendaciones de velocidades de corte en función tanto de la calidad del material de la herramienta que se utilizará en cada operación, como del material sobre el que ésta trabajará.

Como puede apreciarse en la Ilustración B-1, las características de la herramienta deben quedar determinadas para evitar errores durante la simulación.

El valor de  $\gamma$  corresponde en la Ilustración B-1 al valor del parámetro B.

Por último, cabe destacar que se han realizado los estudios pertinentes de geometrías y mallas tanto de herramientas como de piezas, hasta obtener una combinación apropiada que converja lo más rápidamente posible y que pueda ser representativa del proceso real.

## Herramientas

Esta Práctica se centrará en torneado sobre materiales no férreos, concretamente en aleaciones de aluminio con composición de silicio entre el 16-22%. Para ello, se procede a describir las tres plaquitas de diferente calidad que recubren la herramienta que se han escogido para realizar los casos.

- **H10.** Calidad de metal duro sin recubrimiento. Combina una excelente resistencia al desgaste por abrasión y agudeza del filo. Para el torneado en desbaste ha acabado de aleaciones de aluminio.
- **CD10.** Calidad de diamante policristalino para acabado y semiacabado de materiales no férreos y no metálicos. Ofrece una larga vida de la herramienta, cortes limpios y un buen acabado superficial
- **CD05.** Una calidad con recubrimiento de diamante para acabado a desbaste de aluminio, magnesio, cobre, latón, plásticos, etc. Su recubrimiento de diamante proporciona una excelente resistencia al desgaste y menos filos de aportación, obteniendo una gran calidad superficial.

El catálogo proporciona un intervalo de valores para el avance (*feed*) con el que la herramienta seleccionada debe trabajar para alcanzar las velocidades de corte recomendadas. De esta manera, para cada simulación, se tomará un valor medio dentro de la gama de valores propuesta.

## Datos y parámetros

En este apartado se muestran los valores de los parámetros propuestos para realizar esta práctica.

Características	Unidad	H10	CD10	CD05
Avance, $f$	mm/rev	0.15 - 0.8	0.05 - 0.4	0.15 - 0.8
Velocidad de corte, $v$	m/min	250	750	500

Ilustración B 2. Características del proceso

Para la herramienta H10:

Simulaciones	$\beta - \gamma$ (°)	$\gamma$ (°)	$\beta$ (°)	$\mu$
<i>Simulación 1</i>	15	0	15	0.2679
<i>Simulación 2</i>	20	10	30	0.577
<i>Simulación 3</i>	25	-5	20	0.3639
<i>Simulación 4</i>	30	5	35	0.7
<i>Simulación 5</i>	35	2	37	0.7535
<i>Simulación 6</i>	40	-5	35	0.7

Ilustración B 3. Condiciones para la calidad H10

Para la herramienta CD10:

Simulaciones	$\beta - \gamma$ (°)	$\gamma$ (°)	$\beta$ (°)	$\mu$
<i>Simulación 7</i>	15	10	25	0.466
<i>Simulación 8</i>	20	5	25	0.466
<i>Simulación 9</i>	25	10	35	0.7
<i>Simulación 10</i>	30	-5	25	0.466
<i>Simulación 11</i>	35	0	35	0.7
<i>Simulación 12</i>	40	-5	35	0.7

Ilustración B 4. Condiciones para la calidad CD10

Para la herramienta CD05:

<b>Simulaciones</b>	<b><math>\beta - \gamma</math> (°)</b>	<b><math>\gamma</math> (°)</b>	<b><math>\beta</math> (°)</b>	<b><math>\mu</math></b>
<i>Simulación 13</i>	15	10	25	0.466
<i>Simulación 14</i>	20	5	25	0.466
<i>Simulación 15</i>	25	0	25	0.466
<i>Simulación 16</i>	30	5	35	0.7
<i>Simulación 17</i>	35	-5	30	0.577
<i>Simulación 18</i>	40	-5	35	0.7

Ilustración B 5. Condiciones para la calidad CD05

Además de estos datos, se proporcionan a continuación algunos datos transversales a todas ellas que servirán para configurar tanto la herramienta como la pieza a modelar.

Radio de punta de la herramienta (R) = 0.05 mm

Ancho de la pieza a mecanizar (W) = 3 m

Altura de la pieza a mecanizar (H) = 1 m

En cuanto al material de la herramienta se ha optado por carburo de wolframio (WC), compuesto cerámico de gran dureza, característica por la cual es uno de los materiales con mayor uso dentro del sector de la fabricación aeronáutica

A efectos de simulación, tras reiteradas comprobaciones con otros compuestos, el carburo de wolframio o carburo de tungsteno permitirá reducir el tiempo de convergencia.

## **Realización de las simulaciones**

En este punto se describen los pasos para la realización de una simulación de corte ortogonal para el estudio de la formación de viruta con diferentes herramientas, utilizando el Asistente del software de simulación DEFORM-2D.

### **Iniciación**

El programa DEFORM-2D permite realizar simulaciones de diferentes procesos de fabricación. En el presente caso se explicará cómo utilizar el asistente para mecanizado mediante corte ortogonal.

Para otras cuestiones, o para profundizar en los pasos que no resulten suficientemente claros, se aconseja la consulta de los manuales de DEFORM-2D, aunque esta Práctica debe cubrir las necesidades básicas para poder realizar satisfactoriamente simulaciones de corte ortogonal.

## Pasos previos

Se analizan a continuación algunas características previas al uso del programa.

### Ventanas

Después de iniciar el programa se mostrarán 2 ventanas diferentes:

1. Ventana de estado, que tiene letras blancas sobre fondo negro, sobre la que no se podrá actuar (Ilustración B-6).

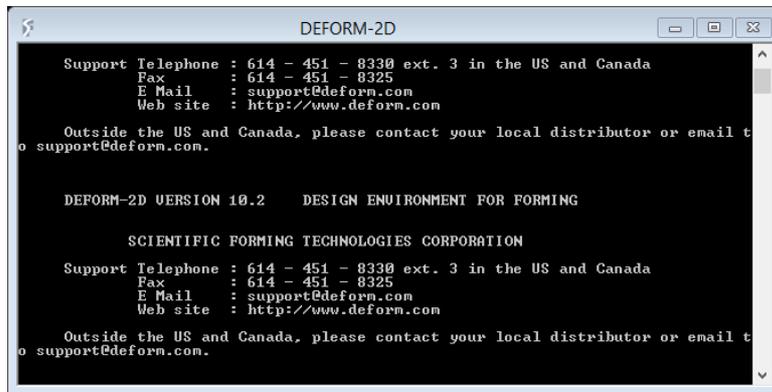


Ilustración B 6. Ventana de estado

2. Ventana principal (Ilustración B-7):

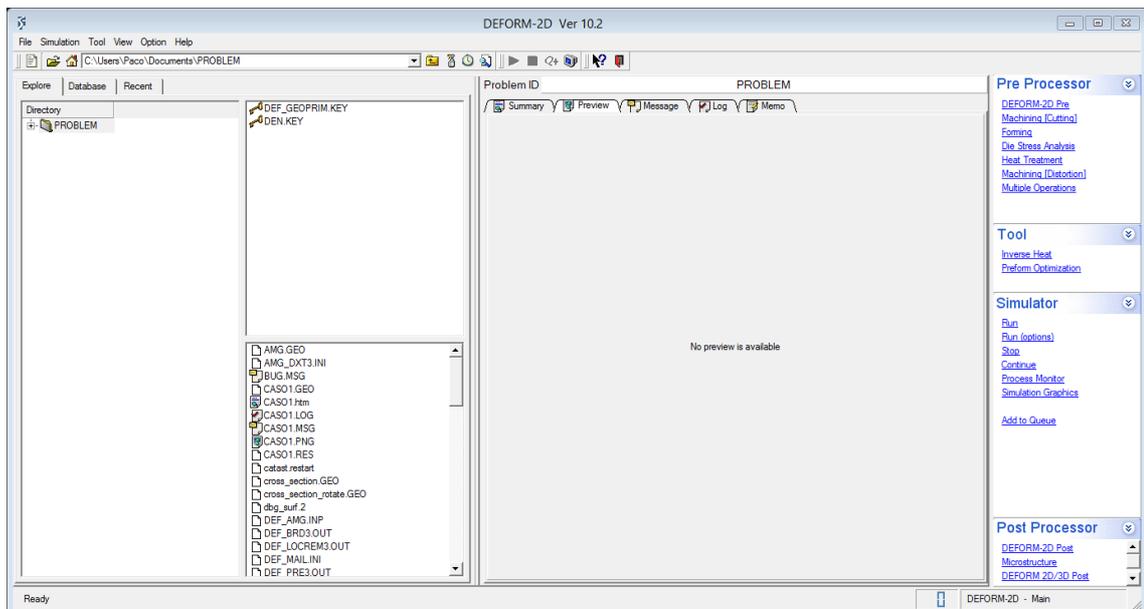


Ilustración B 7. Ventana principal del software DEFORM-2D

## Preparación de carpetas

En la búsqueda de organización y orden a la hora de trabajar, se recomienda al usuario seguir ciertas instrucciones previas a la simulación:

- ✓ Creación de diferentes carpetas destinadas a los archivos que se produzcan durante la simulación.
- ✓ Cada carpeta se nombrará de acuerdo con el código que el catálogo Sandvik asigna a cada una de las diferentes plaquitas que se usarán para realizar este proceso (H10, CD10 y CD05)
- ✓ Al seleccionar la carpeta en la columna “*Directory*”, se hará clic en ***Machining (Cutting)***, situado en la columna de la derecha llamada “*Pre Processor*” (Ilustración B-8).

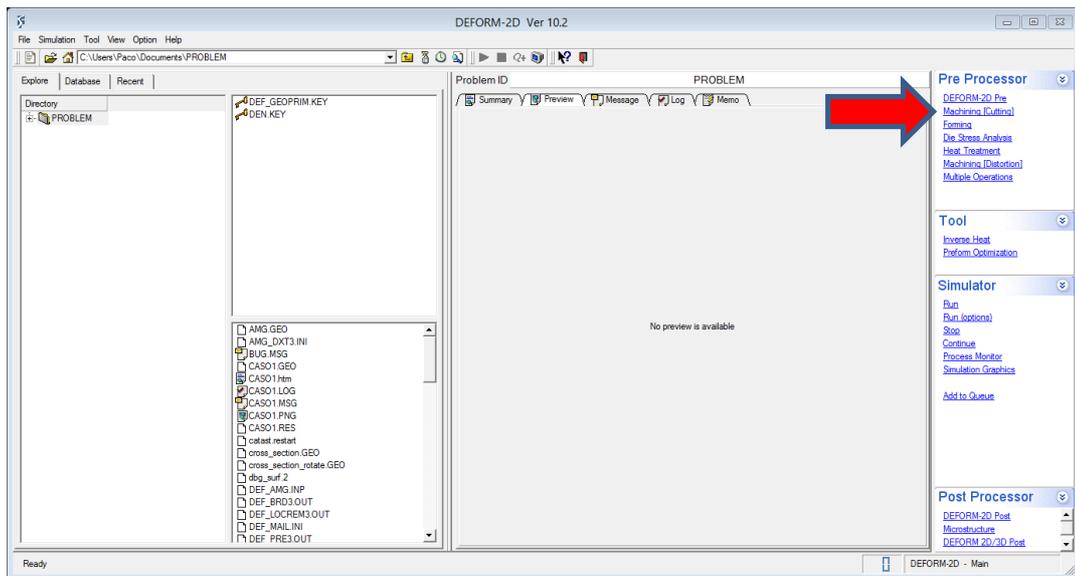


Ilustración B 8. Machining (Cutting)

- ✓ A continuación, aparecerá la ventana emergente “*Problem Setup*”, donde se nombrará la simulación, como se muestra en la Ilustración B-9.
- ✓ Para finalizar, en esa misma ventana, se hará clic en “*Next*”.

Al seguir estos breves pasos, lograremos trabajar de manera mucho más eficiente, con todos los archivos generados almacenados en su carpeta correspondiente, ganando tanto comodidad a la hora de trabajar como evitando la pérdida de información.

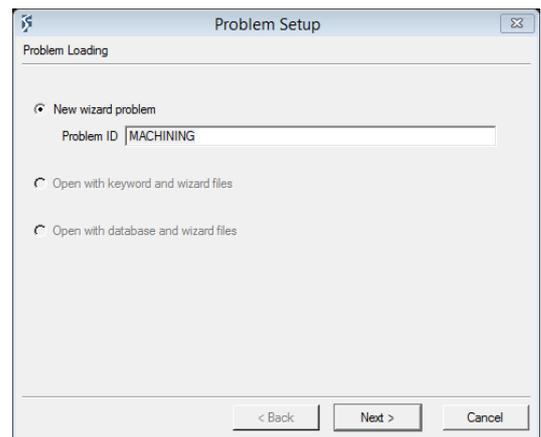


Ilustración B 9. Cuadro de diálogo

## Asistente

DEFORM-2D proporciona un Asistente para guiar al usuario a lo largo del proceso de creación de la base de datos de la simulación. Durante varias etapas, se preguntarán diferentes cuestiones relacionadas con las características de cada simulación.

Cuando se responde a cada una de ellas, se hará clic en “Next”, si se quiere avanzar al siguiente paso, o bien, “Back”, si se quiere volver al anterior.

## Unidades

Siguiendo los pasos explicados en el apartado *Preparación de carpetas*, la ventana del Asistente del programa se iniciará.

Todas las cuestiones relativas a las características de la simulación aparecerán en la esquina inferior derecha de esta ventana.

En primer lugar, se deberán configurar las unidades con las que se va a trabajar en esta simulación.

Deform 2D permite elegir entre el sistema de medida Inglés y el Sistema Internacional (SI). Por comodidad y costumbre, en este trabajo se utilizará el Sistema Internacional.

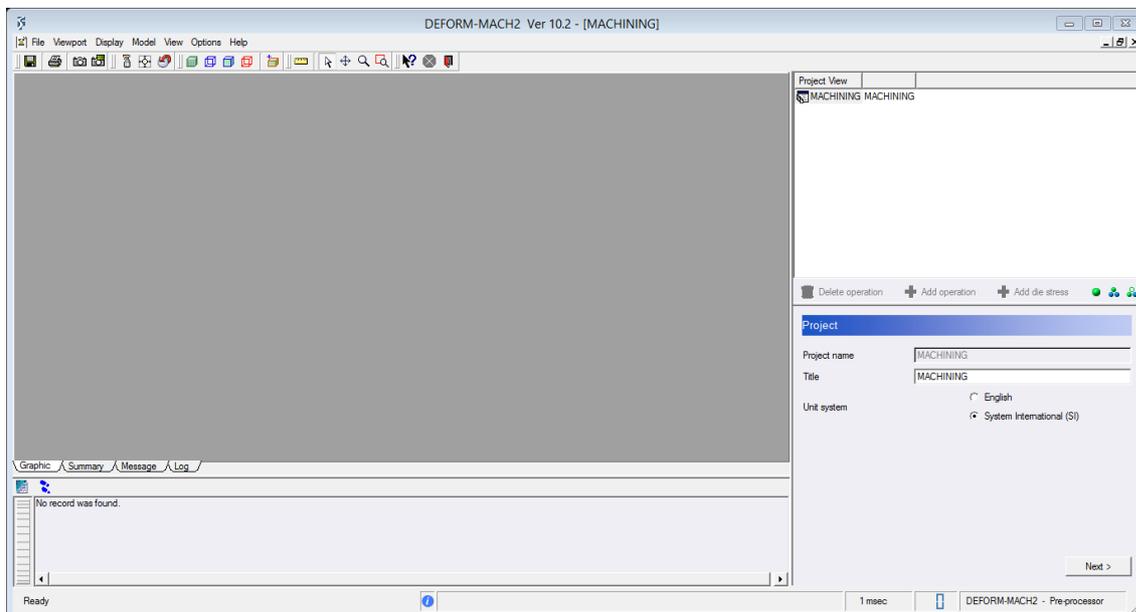


Ilustración B 10. Ventana inicial y configuración de Unidades

Una vez que se seleccione el sistema de unidades con el que se quiere trabajar no se podrá deshacer por lo que se recomienda seleccionar con precaución para no repetir todo el proceso.

Para finalizar, hacemos clic en “Next”

## Operation Name

La siguiente etapa del proceso pregunta el nombre que se quiere asignar a la operación.

El nombre que se le dé no tiene relevancia, pero se recomienda, siguiendo las directrices del primer apartado, asignar un nombre característico del proceso que estamos realizando.

Para finalizar, hacemos clic en “Next”

## Características de la operación

En esta etapa se pregunta por las características básicas de cada simulación y por las condiciones del proceso. En este caso, velocidad de corte, avance y coeficiente de rozamiento.

En el interior del cuadro Cutting Speed, tan sólo se selecciona Surface speed ( $v$ ) y en el desplegable de unidades para dicha opción, se clicará en rev/min (Revoluciones por minuto).

Fuera de dicho cuadro, se deberá completar la información al Asistente, introduciendo el avance que tendrá la herramienta sobre el material de trabajo (Feed rate,  $f$ ) en milímetros por revolución (mm/rev).

Cabe destacar que, a pesar de escoger valores de corte para tres útiles de trabajo de diferente composición, a efectos del programa, todas las simulaciones se realizarán con dichos valores para Carburo de Wolframio (WC).

Cuando se hallan insertado los datos de cada simulación procedentes de la Tabla, se hará clic en “Next”

Por último, se han de definir las condiciones del proceso como la temperatura ambiente, coeficiente de rozamiento y, aunque no aplica en este trabajo, coeficiente de transferencia de calor.

Se usará el valor de temperatura que DEFORM-2D propone por defecto, es decir, temperatura ambiente.

El valor del coeficiente de rozamiento para cada simulación viene contenido en las Ilustraciones B-3, B-4 y B-5.

## Configuración de la herramienta

Sobre la configuración de la herramienta, el Asistente del programa mostrará diferentes pantallas a completar.

En primer lugar, se preguntará sobre la temperatura de la herramienta. A lo largo de esta práctica, se operará con ciertos valores por defecto para simplificar la simulación, entre los que se incluye este apartado. El Asistente propondrá el valor de 20 °C

Aunque en este caso, se descartará esa opción, es interesante tener en cuenta que existe la posibilidad de calcular las variaciones de temperatura, esenciales para cálculos de desgaste.

En la siguiente pantalla, se procederá a la definición de la geometría de la herramienta, de este modo, se hace clic en “Define primitive geometry”.

Surgiendo la siguiente ventana (Ilustración B-11).

DEFORM-2D dispone de varios modelos de herramientas disponibles para su definición. En esta práctica se usará la que se muestra en la imagen, es decir, la plantilla 1.

Es relevante para el desarrollo de este trabajo el valor del radio de punta “ $R$ ”. Como se ha explicado en apartados anteriores, en todas y cada una de las simulaciones usaremos el mismo valor fijo  $R=0.005\text{mm}$ .

De la misma forma, en el casillero correspondiente al parámetro  $B$ , se introducirá el valor de  $\gamma$  requerido para cada simulación.

El resto de las medidas que aparecen en la plantilla se dejarán por defecto.

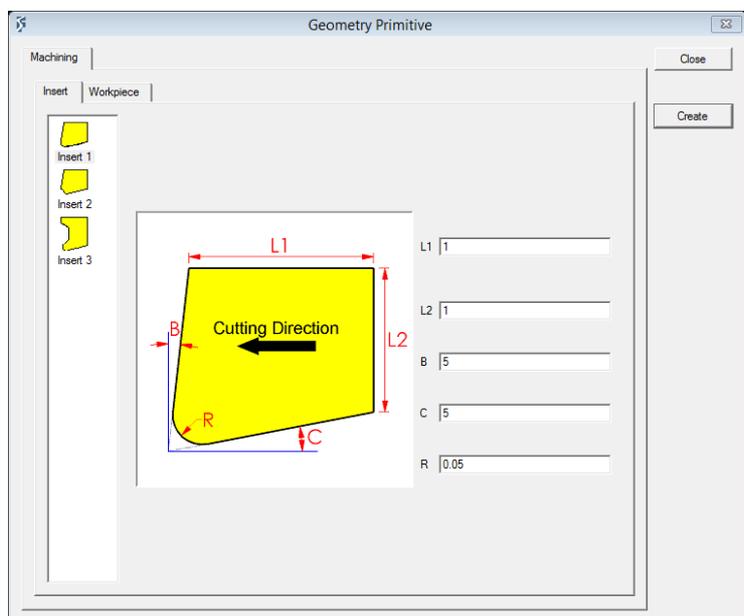


Ilustración B 11. Plantilla de la herramienta

Una vez listo, se debe pulsar sobre el botón “*Create*”, lo cual generará la herramienta, y luego “*Close*”.

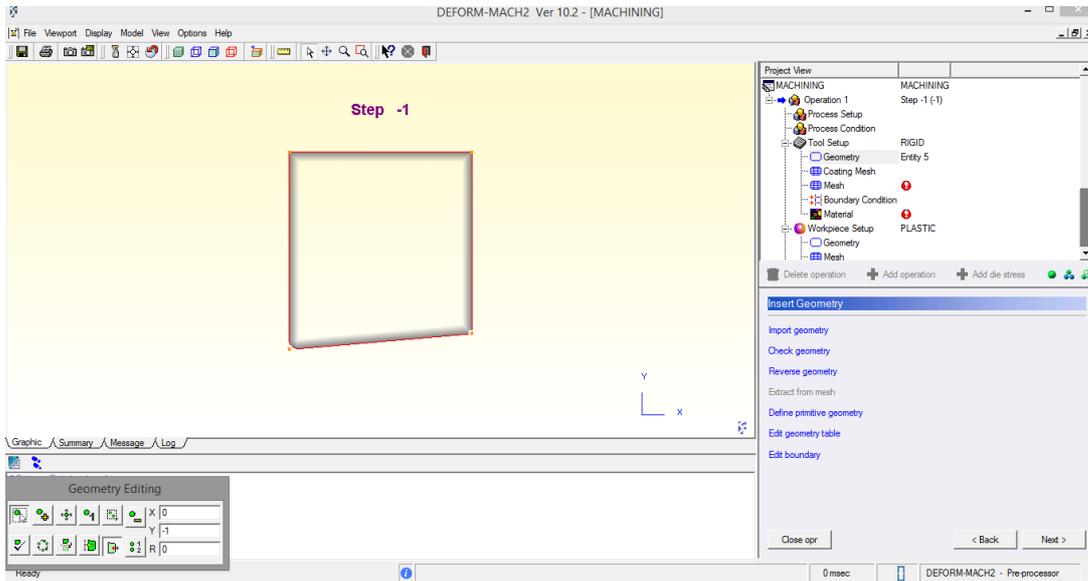


Ilustración B 12. Configuración de la herramienta

El contorno de la herramienta que se usará en la simulación se mostrará en la pantalla principal de preprocesador. Es importante subrayar que no se trabajará con el resto de las opciones que DEFORM-2D propone en esta pantalla, aunque puede llegar a ser interesante para el alumno investigar sobre ellas más adelante.

La siguiente cuestión que plantea el Asistente trata sobre el recubrimiento de la herramienta seleccionada. En este caso, **no** se utilizará.

Uno de los aspectos claves de esta simulación reside en la definición del mallado por el número aproximado de elementos que se desean utilizar. Se hace clic en “*Next*” para continuar.

En este trabajo se elegirá el número de elementos por defecto que el Asistente propone para cada simulación para simplificar los cálculos. Sin embargo, se podría tratar de cambiar estos parámetros realizándose comparaciones con el resultado que se obtendrá en esta práctica.

Se hace clic en “*Generate Mesh*”. Esta acción generará un mallado no uniforme donde se incrementan el número de elementos finitos cerca de la punta de la herramienta.

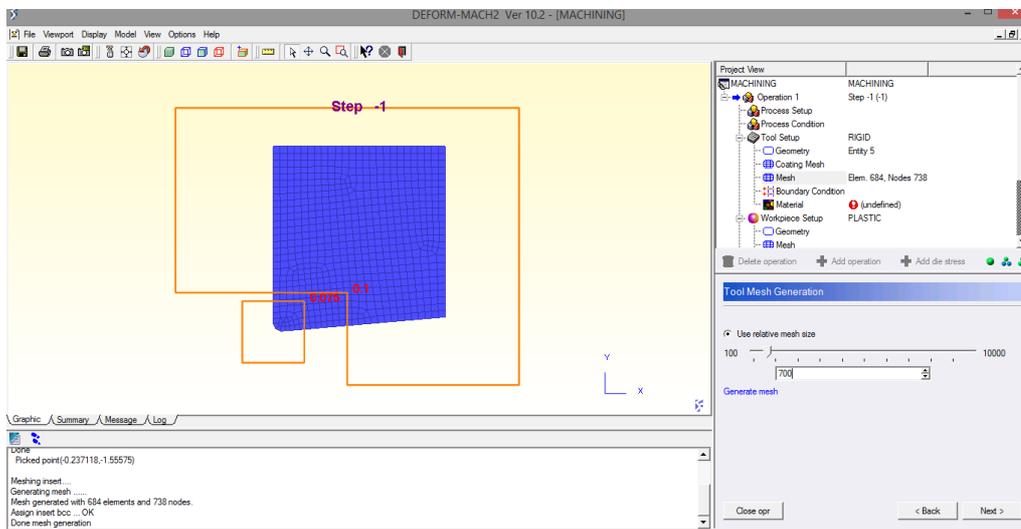


Ilustración B 13. Generación de malla

En la siguiente etapa se establecen las condiciones de contorno, las cuáles serán dejadas por defecto.

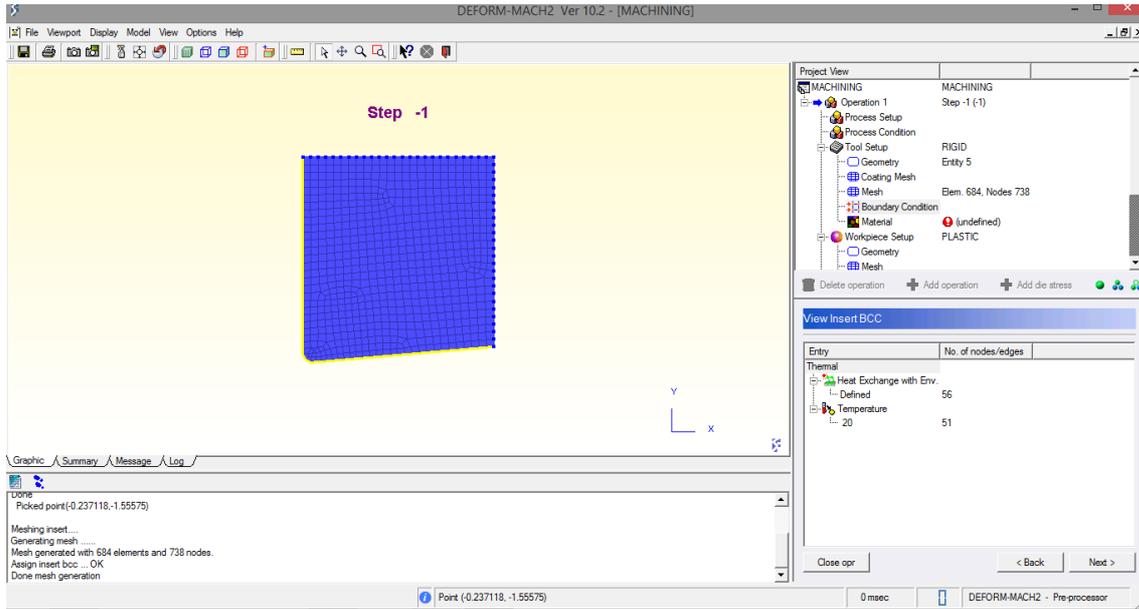


Ilustración B 14. Condiciones de contorno

Finalmente, se deberá elegir el material de la herramienta. Para ello, se hace clic en “*Import from library*”, donde se accederá a la base de datos del programa y se mostrará el catálogo de materiales del que DEFORM-2D dispone.

En la categoría *Tool\_Material*, se selecciona WC (Carburo de Wolframio). Para continuar, se pulsa sobre “*Load*”.

Esta elección se basa en la simplificación del proceso, ya que la simulación en DEFORM-2D puede llegar a demorarse una cantidad de tiempo que sobrepasa lo estimado para la realización de esta Práctica, incluso pudiendo llegar a resultados inconclusos.

## Configuración de la pieza

En la siguiente etapa del proceso se procederá a configurar la pieza sobre la que se va a trabajar.

El primer requerimiento que el Asistente del programa hará, será seleccionar el tipo de comportamiento que se quiere que tenga la pieza. En este caso, será comportamiento plástico.

A su vez, se solicita la temperatura de ésta antes de empezar a mecanizar, en este caso, temperatura ambiente, 20 °C.

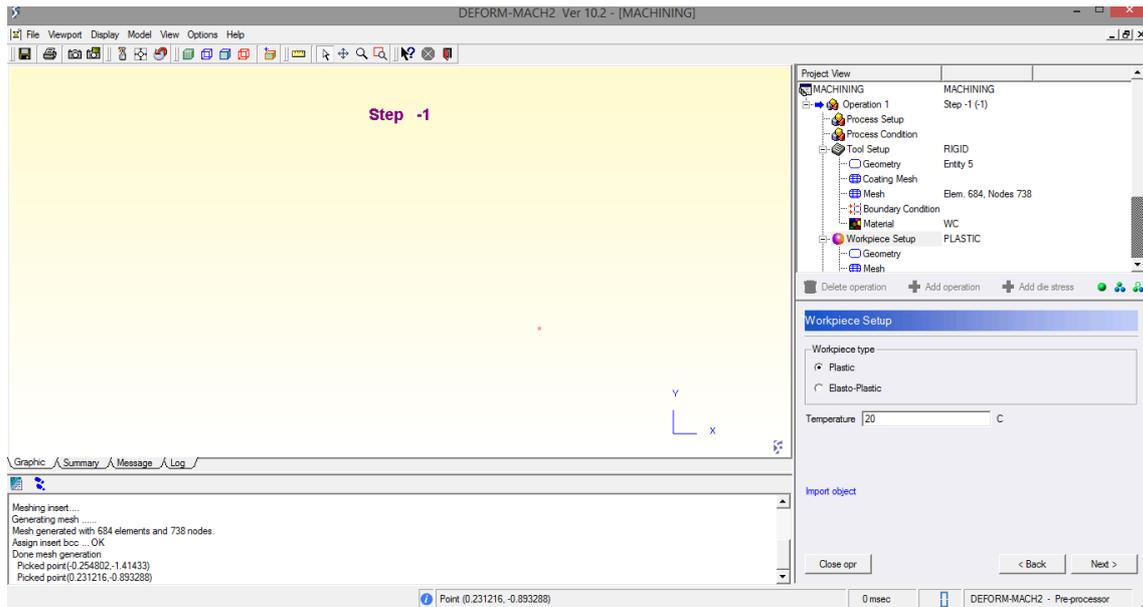


Ilustración B 15. Configuración inicial de la pieza de trabajo

De manera análoga a como se definió la herramienta de la simulación, se procede a concretar las características del material sobre el que se desarrolla la operación.

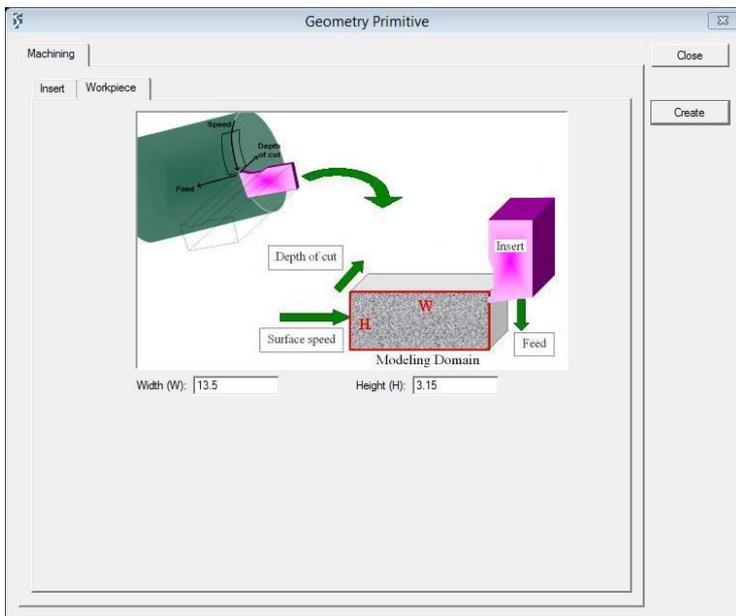


Ilustración B 16. Configuración de la pieza de trabajo

En primer lugar, se hace clic en “*Define primitive geometry*”, momento en el surge la ventana emergente donde se ilustran la plantilla de la pieza de trabajo como se muestra a continuación:

Se deben introducir los valores que se determinaron en el apartado *Datos* tanto para el alto “*Height*”, como para el ancho “*Width*”, adaptados a la geometría de la herramienta y a la longitud necesaria de recorrido. Al hacer clic en “*Create*” y “*Close*”, aparecerá el contorno de la pieza en la ventana, al igual como sucedía con la herramienta.

El siguiente paso requerirá la definición de la malla de forma análoga a como se procedía con la herramienta. Se elegirá el número de elementos que ésta contenga y se hará clic en “*Generate Mesh*”.

Las condiciones de contorno solicitadas a continuación se dejarán por defecto para simplificar el procedimiento.

A la hora de elegir el material para la herramienta, se usará la base de datos de la que el programa dispone. Se pulsa sobre “*Import material from library*” y aparecerá la ventana que muestra la biblioteca de materiales.

Dentro de la categoría de materiales de aluminio, se escogerá el material “*Al20%Si\_machining*”, correspondiente a aluminio con composición de Silicio del 20% como se ha comentado en apartados anteriores.

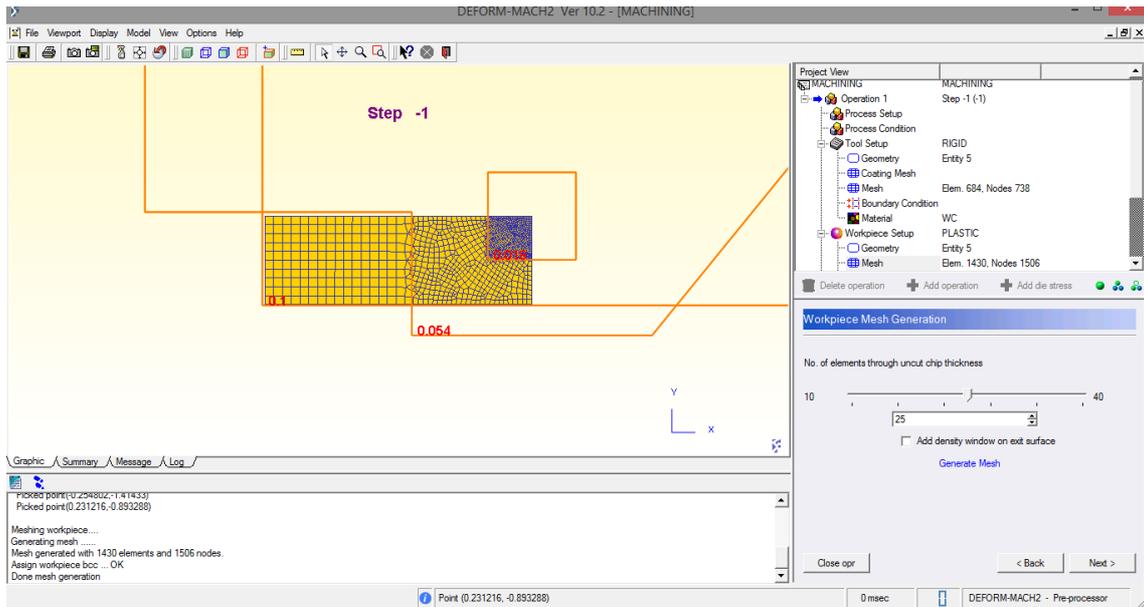


Ilustración B 17. Generación de la malla de la pieza

## Condiciones de la simulación

A continuación, se describen las últimas etapas del Asistente.

Se debe definir correctamente la posición relativa entre pieza y herramienta, y se dejará por defecto, de forma que se utilizará el valor de feed que se haya puesto en el segundo paso de la Configuración de la operación, así que se hace clic en **“Generate default positioning”** de forma que la posición del conjunto queda como sigue:

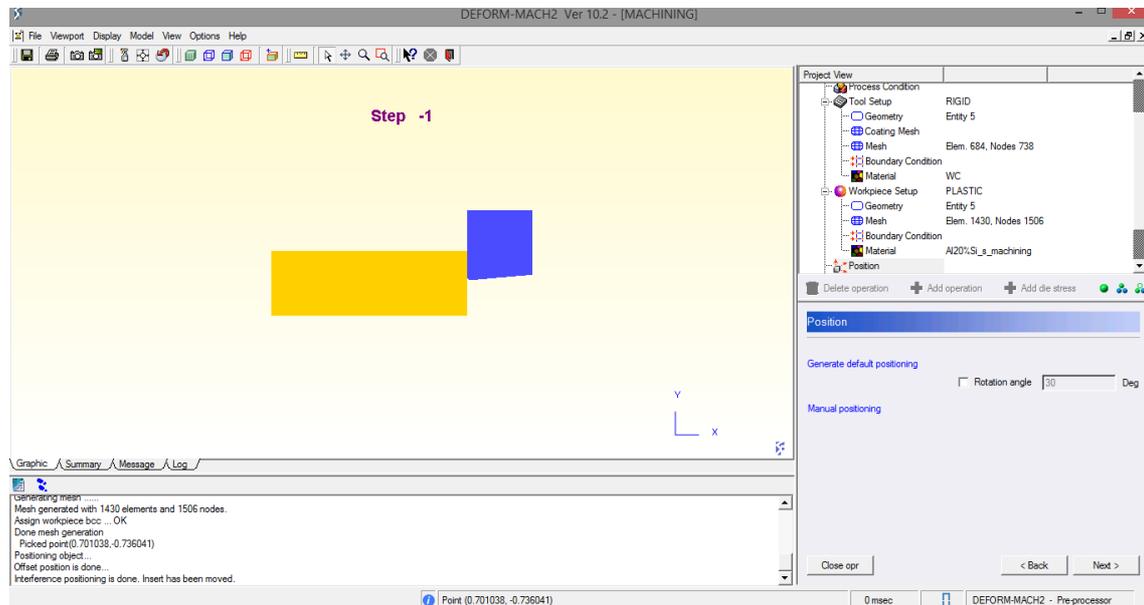


Ilustración B 18. Posiciones relativas de herramienta y pieza

Se piden ahora datos relativos al cálculo del desgaste, para ello se selecciona el modelo Usui del desplegable y se utilizarán los valores propuestos por defecto. (Ilustración B-19)

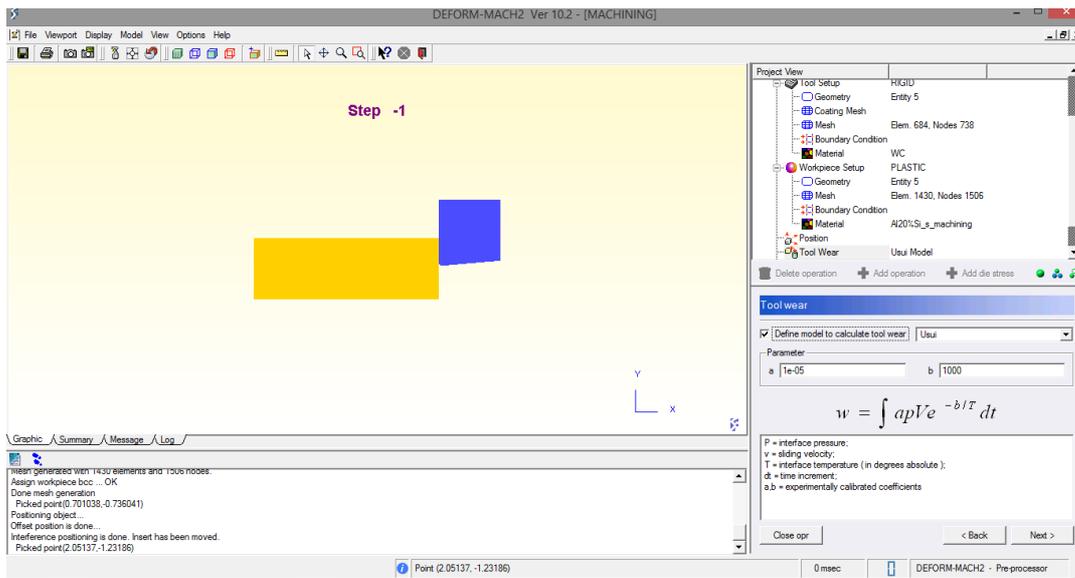


Ilustración B 19. Modelo Usui

El siguiente requerimiento sirve para modificar las condiciones de desarrollo de la simulación, se debe dejar por defecto:

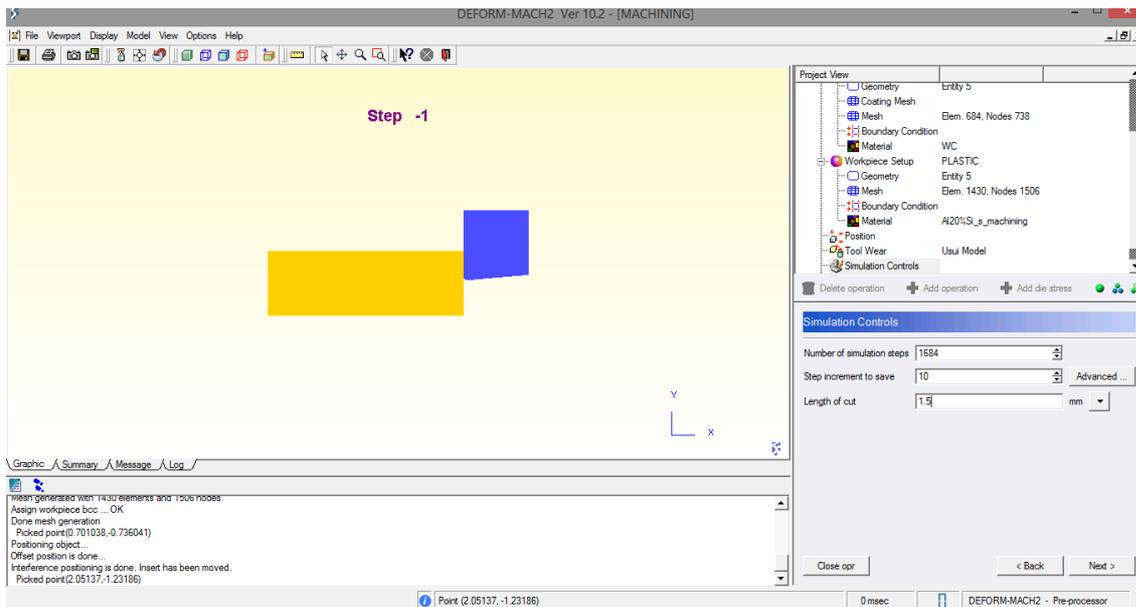


Ilustración B 20. Condiciones de desarrollo

Por último, se comprueba que no hay errores en la creación de la base de datos mediante clic en **“Check data”** y por último se genera la base de datos mediante **“Generate database”**:

Se hace clic en **“Next”** y aparece un cuadro de diálogo en el que se pregunta si se desea cerrar la operación. Se hace clic en **“Yes”**.

Con este paso, finaliza el pre procesamiento de la pieza, con lo que volvemos a la página de inicio de DEFORM-2D.

## Cálculo de la simulación

Una vez de vuelta en la pantalla principal, y con la base de datos ya creada y seleccionada en el directorio, se clicca en “Run” para comenzar a la etapa de cálculo:

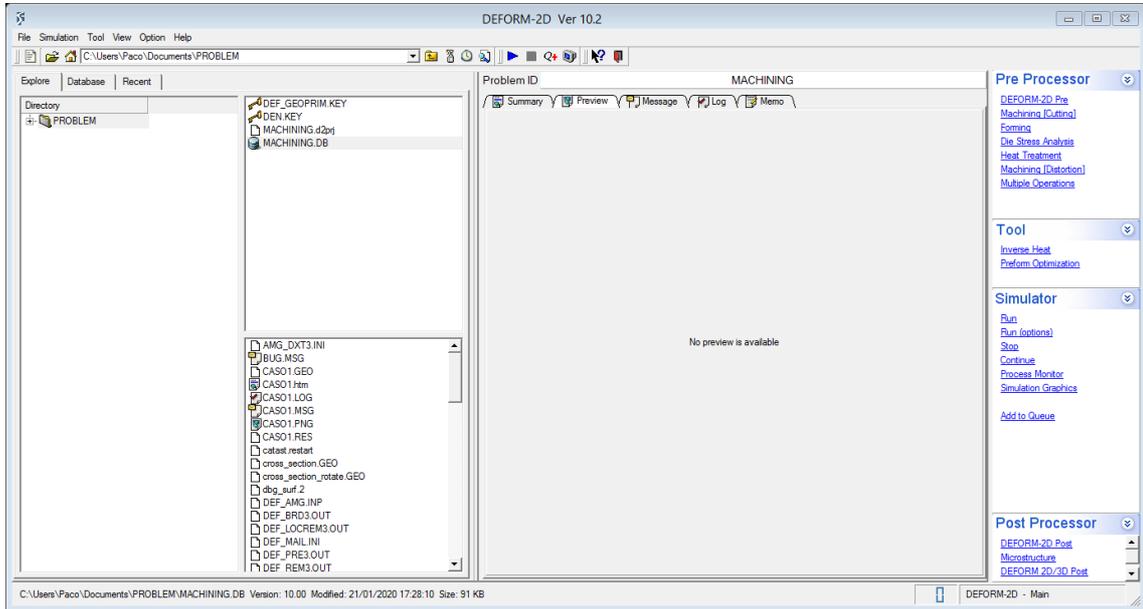


Ilustración B 21. Puesta en marcha de la simulación

## Visualización de los resultados

Para poder ver los resultados una vez ha terminado el proceso de cálculo, se deberá activar el módulo de post procesado. El proceso de visualización no es intuitivo y diferirá en base a lo que se pretenda analizar.

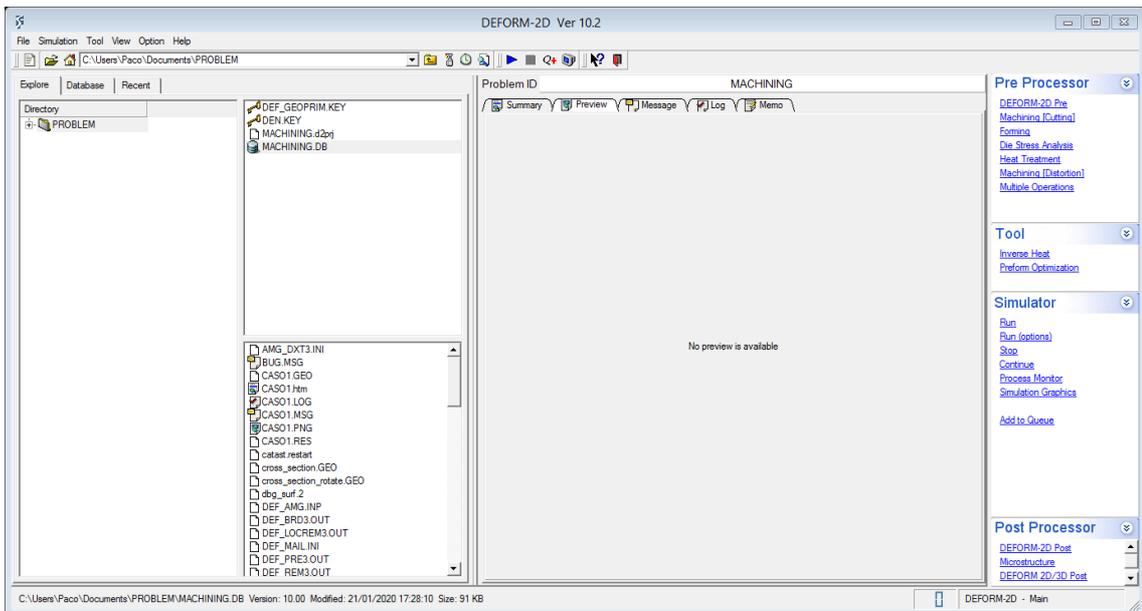


Ilustración B 22. Pantalla principal: Post-procesado

## Realización del Estudio paramétrico

En este apartado se realizará la descripción de las simulaciones necesarias para completar el estudio de formación de viruta en procesos de mecanizado.

## Post- procesamiento

Una vez terminada la simulación, se procede a obtener los datos pertinentes en busca del objetivo.

Se detalla a partir de aquí, una guía básica de manejo del Asistente de post- procesamiento

## Obtención de datos

El proceso de obtención de datos de las simulaciones es notoriamente complicado, por lo que se procederá con cautela para no cometer errores.

En el módulo de post procesamiento se seleccionan diferentes puntos que se consideran representativos de lo que sucede en la zona de deformación primaria. Serán estos puntos sobre los que se materializará el estudio de formación de viruta para aleaciones de aluminio con composición de Silicio, que ayudarán a comprender el proceso y para obtener conclusiones sobre el mismo.

## Arranque del módulo de post- procesamiento

Para la toma de datos se debe inicializar el módulo de post procesamiento sobre la carpeta de simulación que se requiera analizar. Así, en la página de inicio se selecciona en el directorio la carpeta que contiene la simulación a estudiar y se hace clic en “DEFORM-2D Post”

Tras esto, se inicia dicho módulo con la siguiente apariencia:

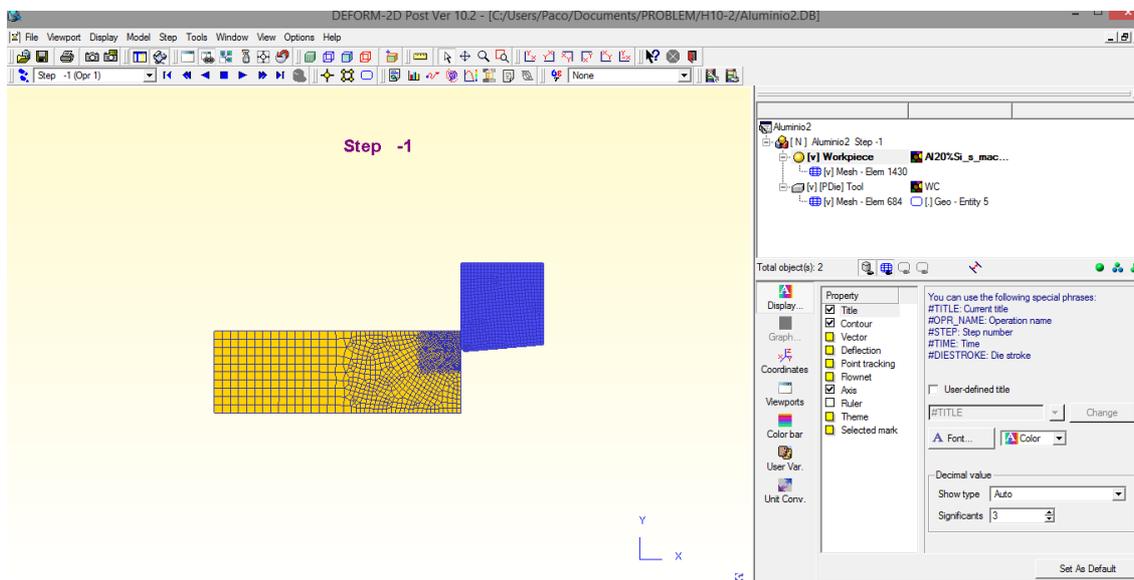


Ilustración B 23. Módulo de post-procesado

En la Ilustración B-23, puede observarse la herramienta en tonos azules y la pieza en color amarillo. Sobre ambas se aprecia la malla aplicada en el módulo de pre procesamiento.

## Barra de herramientas de reproducción

En la siguiente imagen, se muestra la barra de herramientas de reproducción de la simulación, la cual permite controlar el proceso de arranque del material.



Ilustración B 24. Barra de reproducción

Los botones posibilitan el desplazamiento entre los diferentes *Steps* que la simulación ha archivado durante su ejecución. A continuación, se define brevemente su utilización (de izquierda a derecha):

1. Pausa. Detiene la reproducción de la animación
2. Play. Reproduce los steps uno tras otro de forma animada
3. Paso a paso. Adelanta al siguiente paso de carga guardado
4. Paso final. Muestra el último paso de carga guardado

La barra de reproducción dispone del correspondiente inverso de los botones recién comentados, de forma que éstos realizan las mismas funciones, pero invirtiendo el tiempo, así, de derecha a izquierda:



Ilustración B 25. Barra de reproducción inversa

1. Animación inversa. Recorre los pasos desde el último al primero.
2. Paso a paso anterior. Atrasa al paso de carga anterior al actual.
3. Paso inicial. Muestra el primer paso de carga.

La correcta utilización de dicha barra de herramientas es fundamental para que el proceso de recogida de resultados sea lo más eficiente posible.

## Representación de la tensión efectiva

Ahora llega el momento de activar la representación de los datos que se buscan, en el presente caso, la tensión efectiva "*Strain effective*".

Se debe usar el recurso que permite la representación de variables de estado, para ello se hace clic en el botón "*State Variable*":



Ilustración B 26. Botón State Variable

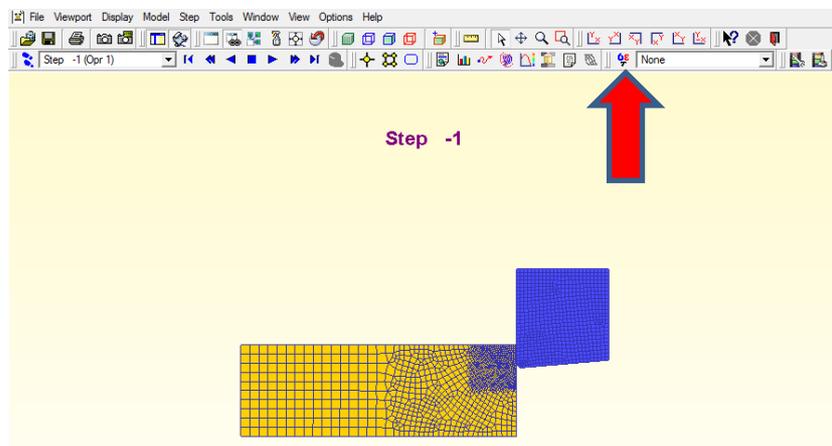


Ilustración B 27. Ubicación Botón State Variable

Surge la siguiente ventana:

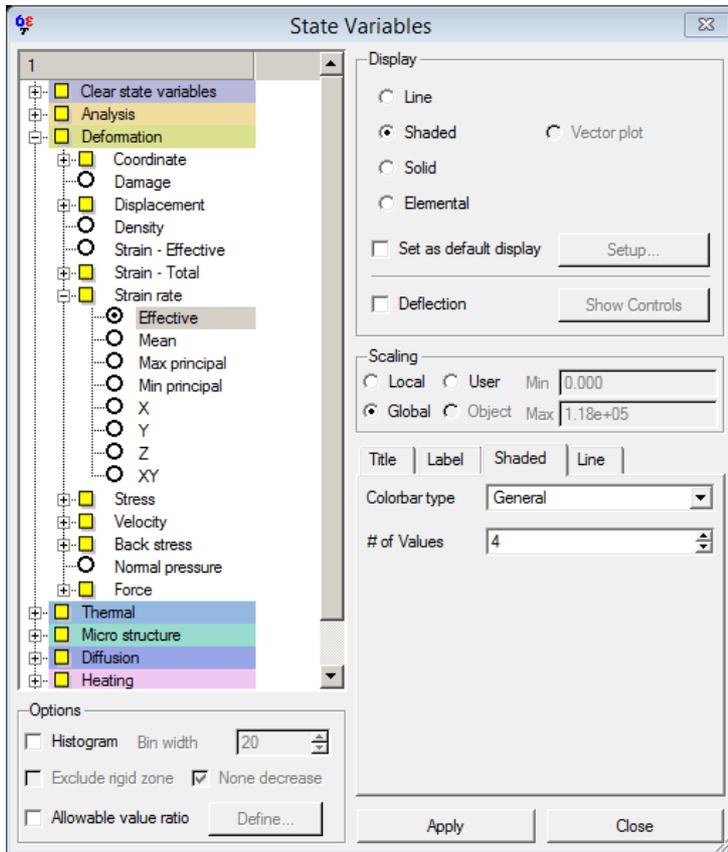


Ilustración B 28. Árbol desplegable de State Variable

En el interior del desplegable State Variable Type, se abrirá el árbol “Deformation” y se hace clic en “Strain\_Rate”, que mostrará diferentes opciones posibles. En esta práctica, se escogerá “Strain effective”. Posteriormente se hace clic sobre Apply y Close, respectivamente.

A continuación, en la barra de herramientas, se buscan las opciones Select (que se encontrará marcada), Pan y Dynamic Zoom (Figura 24)



Ilustración B 29. Opciones de visualización

Haciendo uso de la barra de reproducción, se comienza a reproducir la simulación generada. De esta forma, se detiene la simulación en una iteración cualquiera para poder obtener los puntos de representación.

### Obtención del ángulo de cizallamiento

A través de la página web: <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/ruler/ruler.php> perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia, se determinarán los ángulos necesarios para la realización del método.

En primer lugar, se deberá realizar una captura de pantalla de la ventana de post procesado.

Para ello, se recomienda encarecidamente al lector, la creación de una carpeta donde poder almacenar el contenido que se vaya generando, con el fin de evitar el extravío de información y repetir pasos ya realizados.

Así, cuando se disponga de la captura, se deberá cargar la imagen en la página web mencionada con anterioridad.



Ilustración B 30. Asistente de la web de medición de ángulos

Siguiendo las instrucciones básicas que dicha página proporciona, se tratará de centrar la imagen de forma que la zona de deformación sea apreciable.

Una vez realizado este paso, se deberá arrastrar el **indicador azul** al punto indicado en la Ilustración B-31, mientras que la línea que une dicho indicador con el **indicador rojo** deberá seguir la zona de deformación primaria de manera aproximada.

Por último, el **indicador amarillo** deberá quedar situado en paralelo a la cara generada.

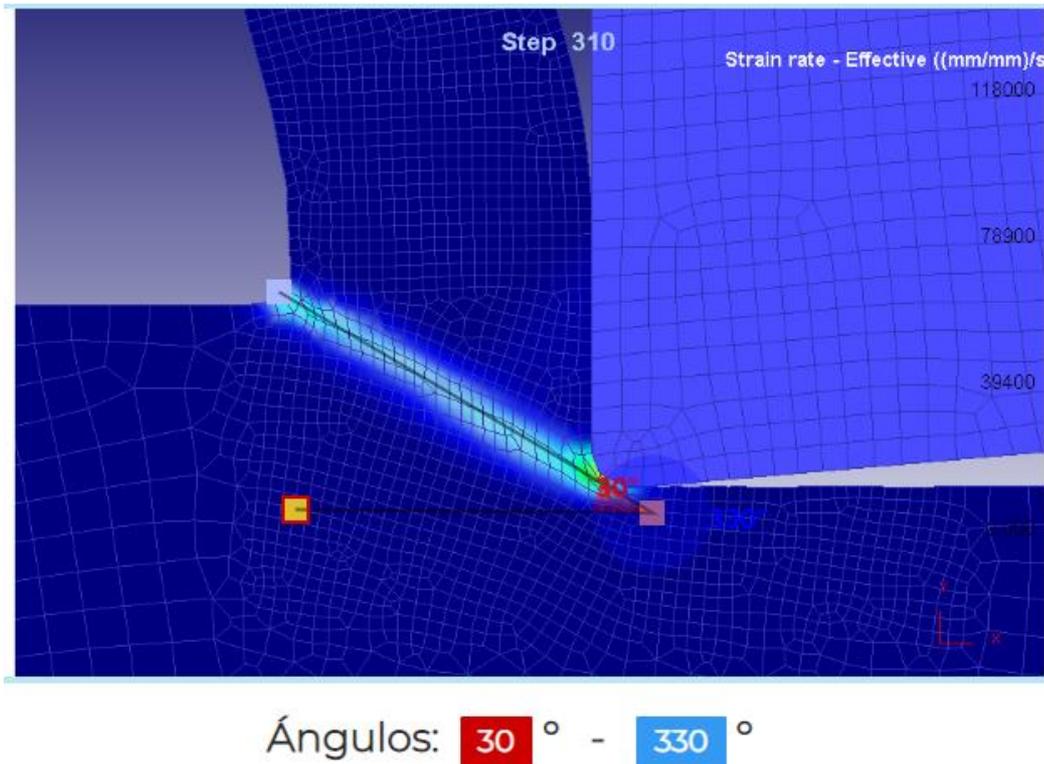


Ilustración B 31. Posiión de los indicadores de medición

Un sencillo truco para saber si el indicador amarillo está bien colocado nos lo dice el color de los ángulos externo e interno que rodean al indicador rojo. Cuando al desplazar el marcador amarillo verticalmente, los ángulos externo e interno intercambian de color, se ha encontrado la posición requerida para obtener dichos ángulos.

Una vez realizado este paso, se anota el ángulo interno obtenido para cada simulación realizada.

## Ajuste por mínimos cuadrados

En esta última etapa del proceso, se tratará de comprobar si con las condiciones propuestas en los apartados anteriores, es posible llevar a cabo estas simulaciones a situaciones reales de trabajo.

Para ello, se hará uso de la hoja de Excel adjunta “*Ajuste mínimos cuadrados .xlsx*”, donde introduciendo los valores proporcionados en la Ilustraciones del apartado *Datos*, así como los valores del ángulo de cizalladura hallados para cada simulación.

Con estos datos, se trazará la línea de mejor ajuste que explique la posible relación entre dicho ángulo de cizalladura y  $(\beta - \gamma)$ .

A su vez, se hallará el valor de la pendiente  $K$  y el valor de la ordenada en el origen, en este caso el ángulo de cizalladura  $\phi_0$ .

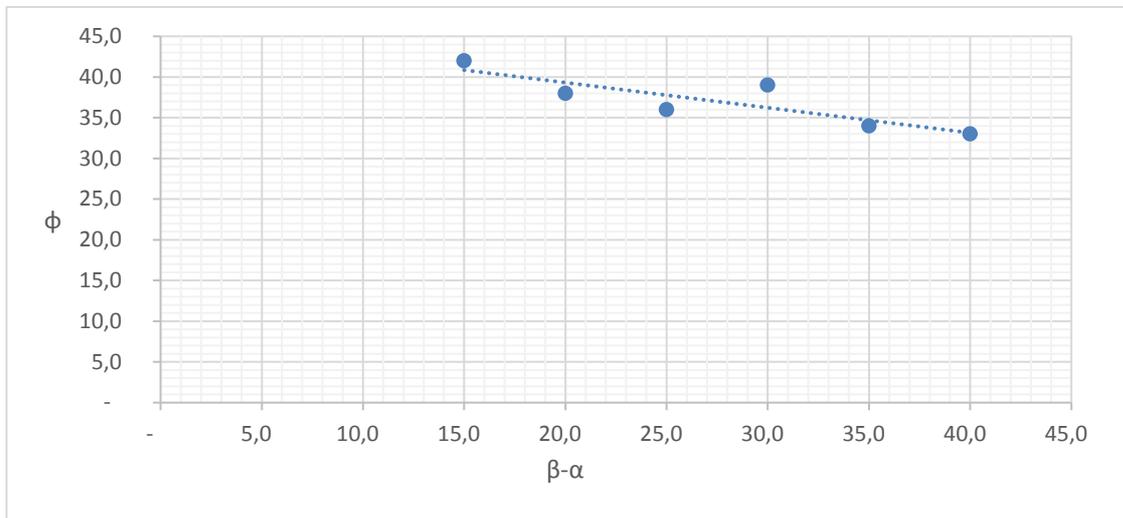


Ilustración B 32. Ajuste por mínimos cuadrados para la calidad de herramienta CD10

Como puede observarse en la gráfica adjunta, no existe una gran dispersión entre los valores obtenidos, por lo que puede llegar a trazarse una línea de ajuste entre las variables del problema.

# **ANEXO C· RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES**

## Introducción

Este documento muestra los resultados de las simulaciones realizadas en DEFORM -2D.

Como se ha comentado con anterioridad a lo largo del presente Trabajo, se han analizado tres casos, cada uno de los cuáles se compone de seis subcasos o simulaciones cuyas condiciones de proceso varían ligeramente de unas a otras.

Se procede a mostrar la etapa final de cada una de esas simulaciones, así como los parámetros utilizados en cada una de ellas y, finalmente, el ángulo de corte obtenido.

Resulta de importancia destacar que ninguna de las simulaciones realizadas obtiene el recorrido completo, ya que es frecuente que las simulaciones se acorten debido a la interferencia de la viruta generada con la pieza al alcanzar valores no excesivamente altos de tiempo, gastándose así tiempo de computación de manera insustancial.

## Resultados de las simulaciones

A continuación, se reflejan los resultados obtenidos para las simulaciones de cada uno de los subcasos presentados.

### Caso 1·Calidad de la herramienta H10

Se exponen los seis subcasos que conforman este primer caso.

Nótese que todas las simulaciones pertenecientes a un mismo caso comparten ciertos valores en el proceso como se detalla en el capítulo 2.3 *Datos utilizados*. Aquí se reflejan los datos que diferencian cada subcaso de otro.

#### Simulación 1

Para realizar esta primera simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 1</b>	0	15	0,268	15,0	29,0

Ilustración C 1. Parámetros simulación 1

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

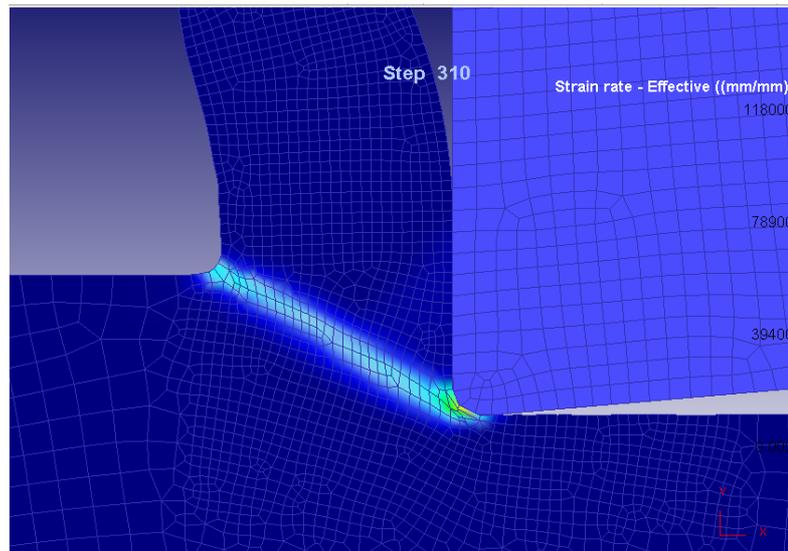


Ilustración C 2. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 1

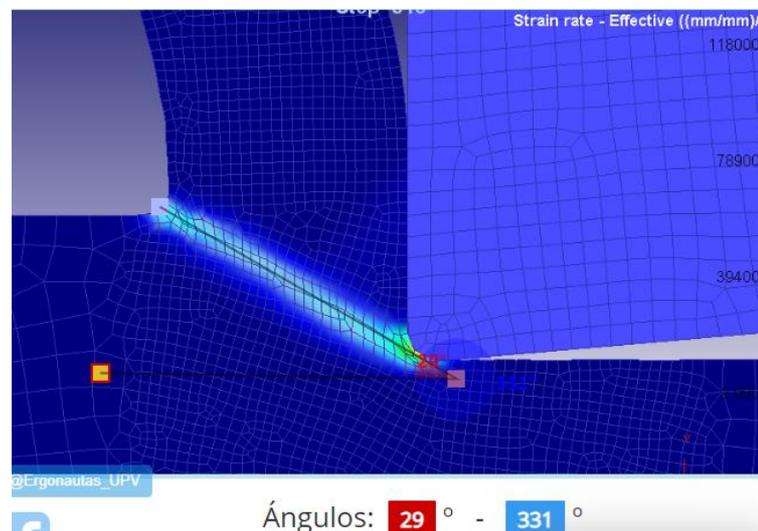


Ilustración C 3. Obtención del ángulo de corte en la simulación 1

## Simulación 2

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 2</b>	10	30	0,577	20,0	36,0

Ilustración C 4. Parámetros simulación 2

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

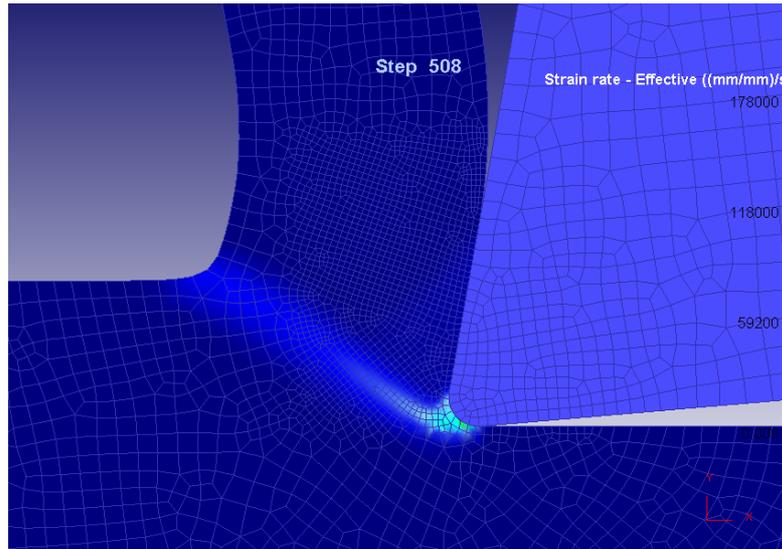


Ilustración C 5. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 2

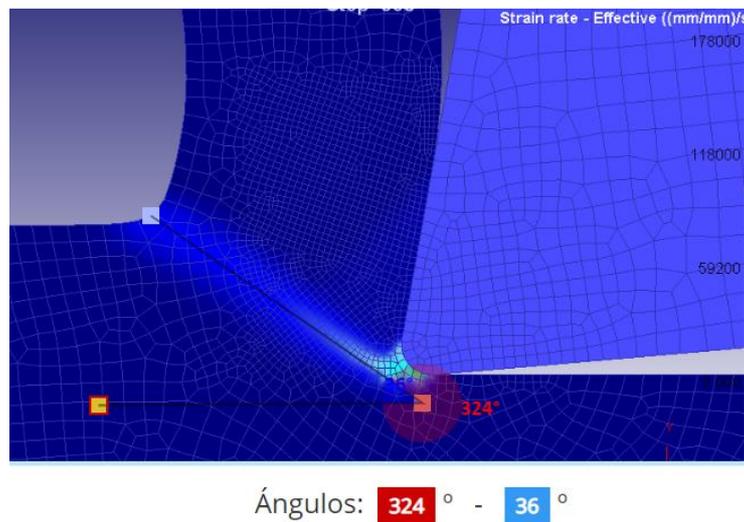


Ilustración C 6. Obtención del ángulo de corte en la simulación 2

### Simulación 3

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 3</b>	-5	20	0,364	25,0	28,0

Ilustración C 7. Parámetros simulación 3

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

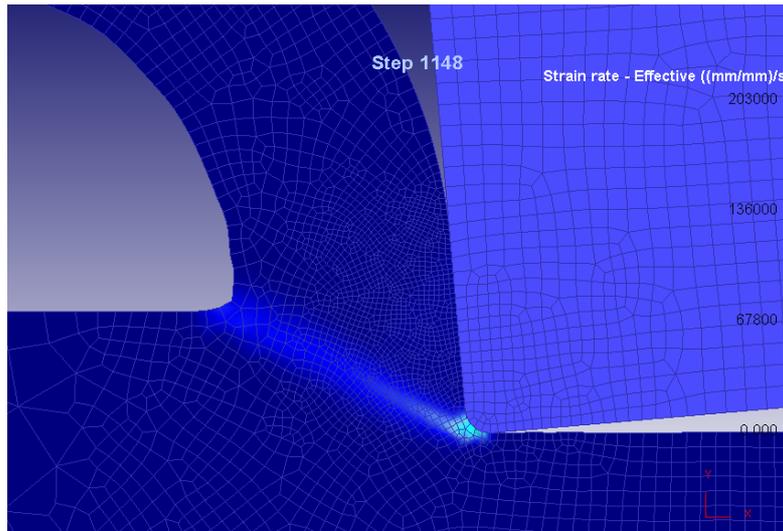
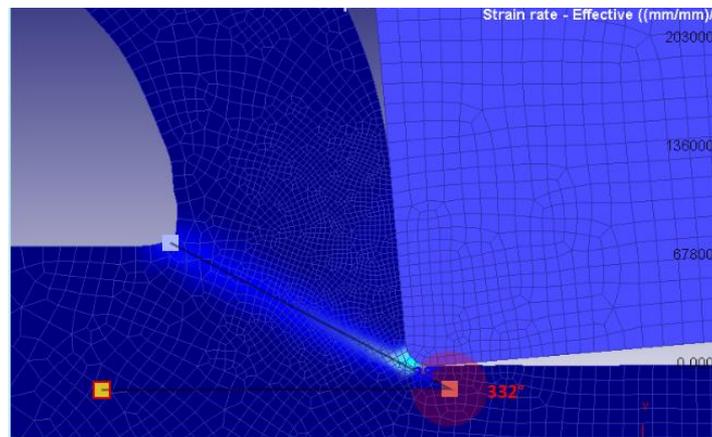


Ilustración C 8. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 3



Ángulos: 332° - 28°

Ilustración C 9. Obtención del ángulo de corte en la simulación 3

## Simulación 4

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 4</b>	5	35	0,700	30,0	32,0

Ilustración C 10. Parámetros simulación 4

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

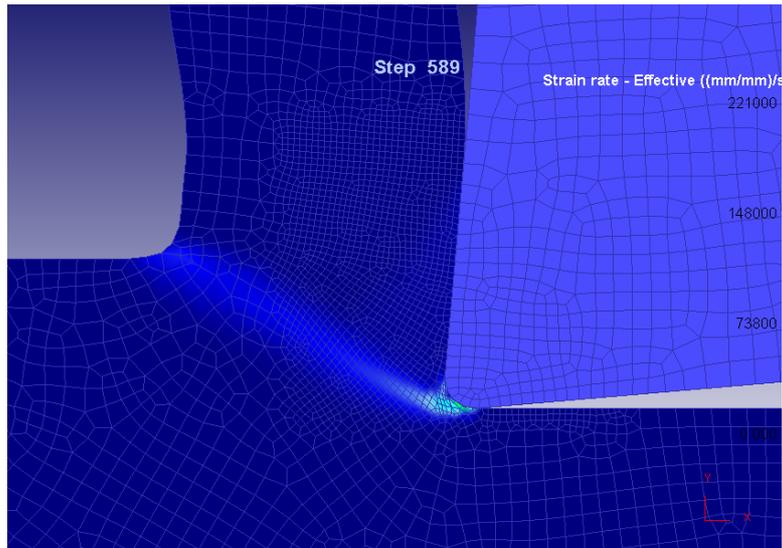
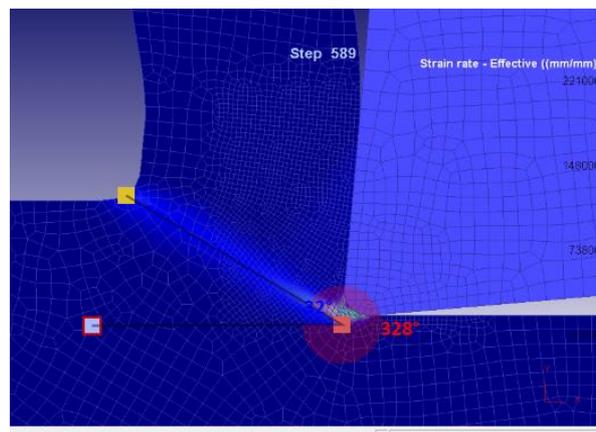


Ilustración C 11. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 4



Ángulos: **328** ° - **32** °

Ilustración C 12. Obtención del ángulo de corte en la simulación 4

## Simulación 5

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 5</b>	2	37	0,754	35,0	30,0

Ilustración C 13. Parámetros simulación 5

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

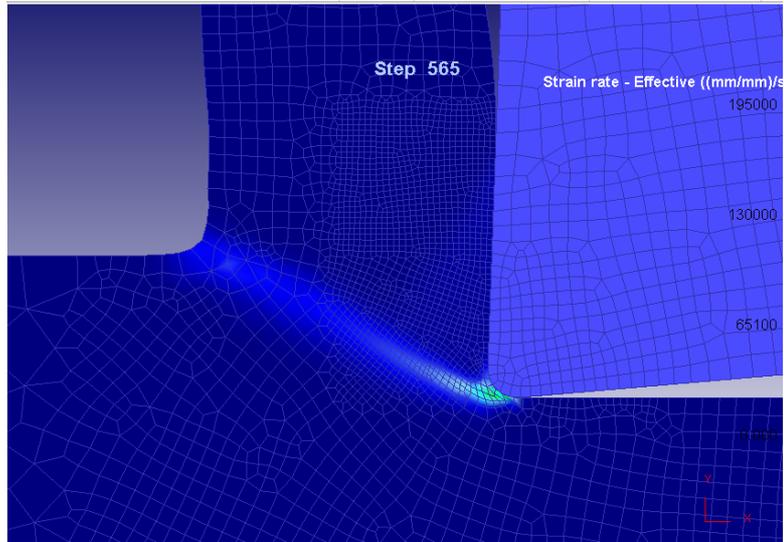


Ilustración C 14. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 5

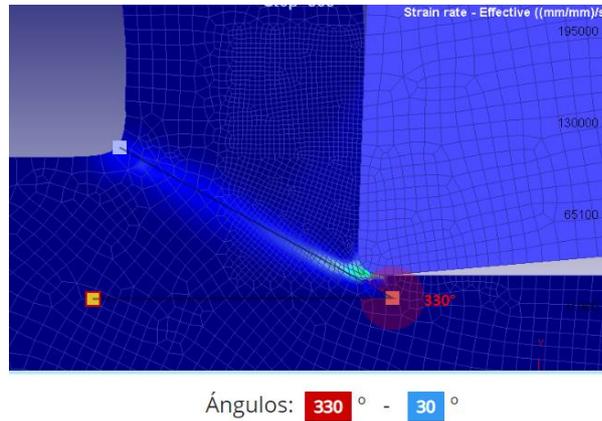


Ilustración C 15. Obtención del ángulo de corte en la simulación 5

## Simulación 6

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 6</b>	-5	35	0,700	40,0	26,0

Ilustración C 16. Parámetros simulación 6

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

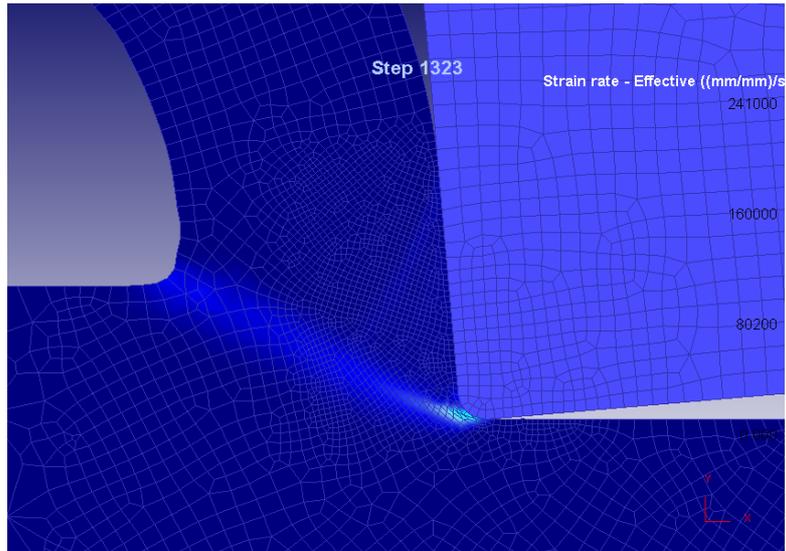
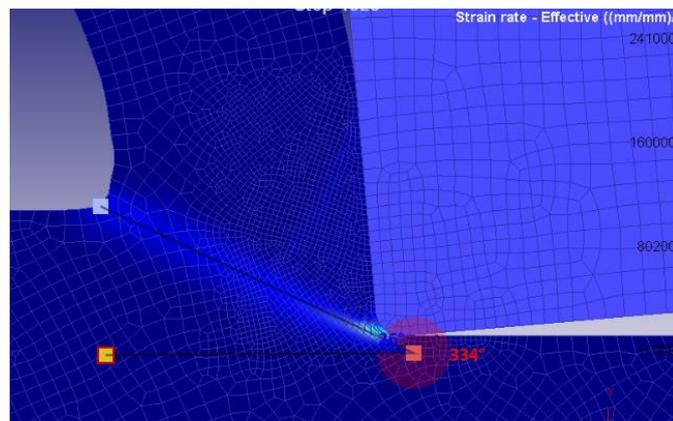


Ilustración C 17. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 6



Ángulos: 334 ° - 26 °

Ilustración C 18. Obtención del ángulo de corte en la simulación 6

### Caso 2·Calidad de la herramienta CD10

Se exponen los seis subcasos que conforman el segundo caso.

Nótese que todas las simulaciones pertenecientes a un mismo caso comparten ciertos valores en el proceso como se detalla en el capítulo 2.3 *Datos utilizados*. Aquí se reflejan los datos que diferencian cada subcaso de otro.

#### Simulación 7

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 7</b>	10	25	0,466	15,0	40,0

Ilustración C 19. Parámetros simulación 7

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

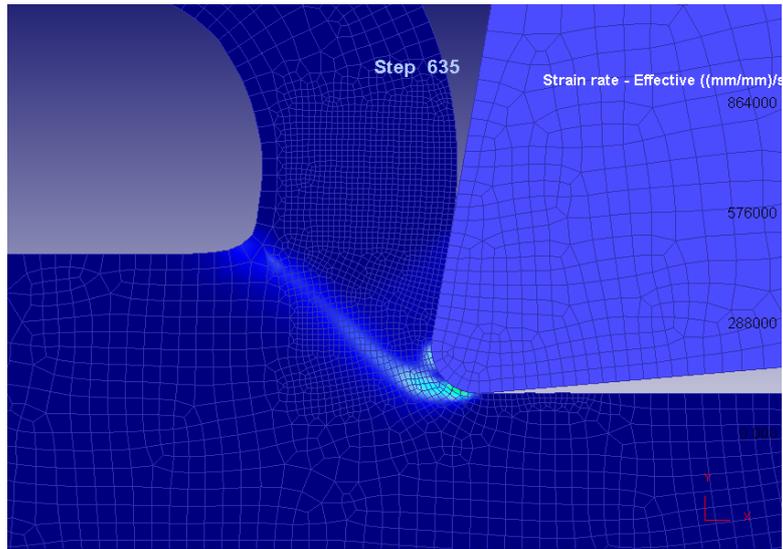
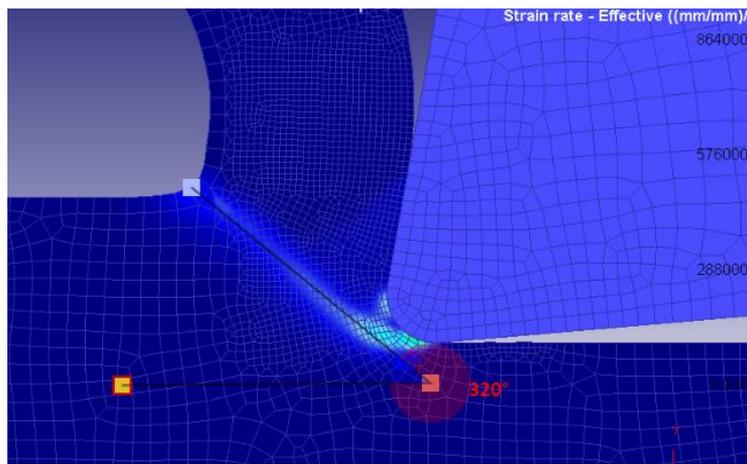


Ilustración C 20. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 7



Ángulos: **320** ° - **40** °

Ilustración C 21. Obtención del ángulo de corte en la simulación 7

## Simulación 8

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 8</b>	5	25	0,466	20,0	38,0

Ilustración C 22. Parámetros simulación 8

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

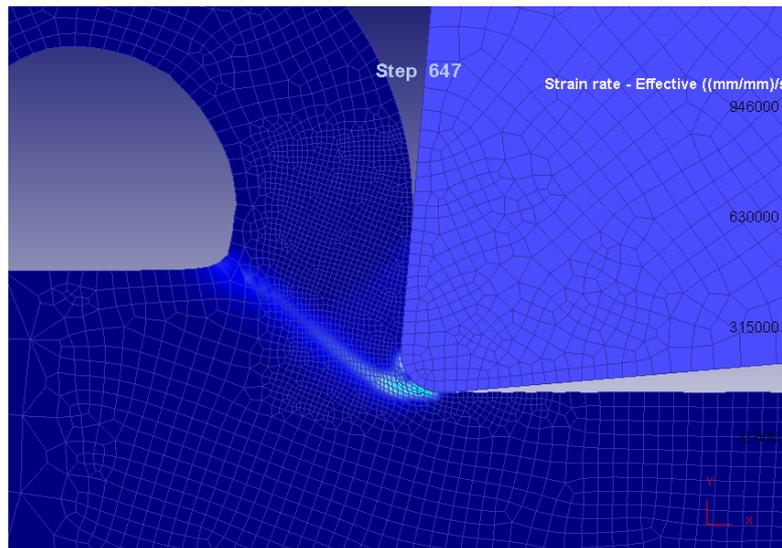
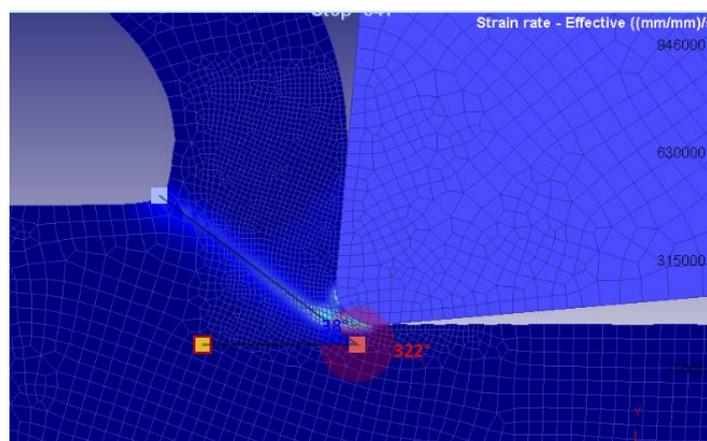


Ilustración C 23. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 8



Ángulos: **322** ° - **38** °

Ilustración C 24. Obtención del ángulo de corte en la simulación 8

## Simulación 9

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 9</b>	10	35	0,700	25,0	41,0

Ilustración C 25. Parámetros simulación 9

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

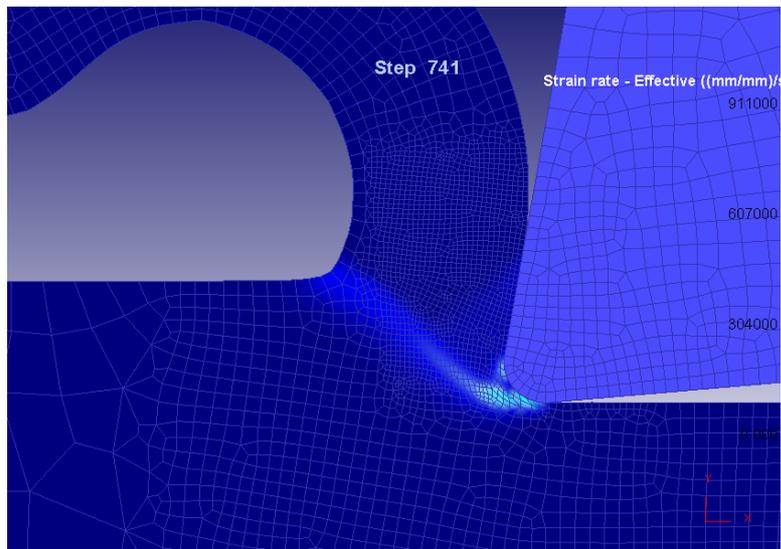


Ilustración C 26. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 9

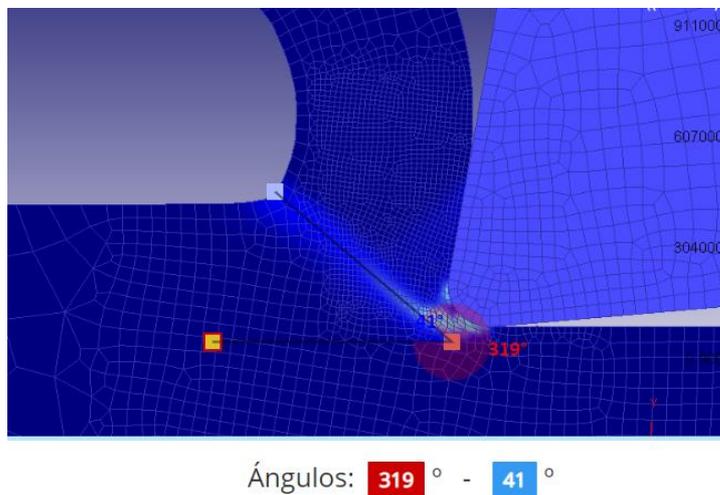


Ilustración C 27. Obtención del ángulo de corte en la simulación 9

## Simulación 10

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 10</b>	-5	25	0,466	30,0	36,0

Ilustración C 28. Parámetros simulación 10

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

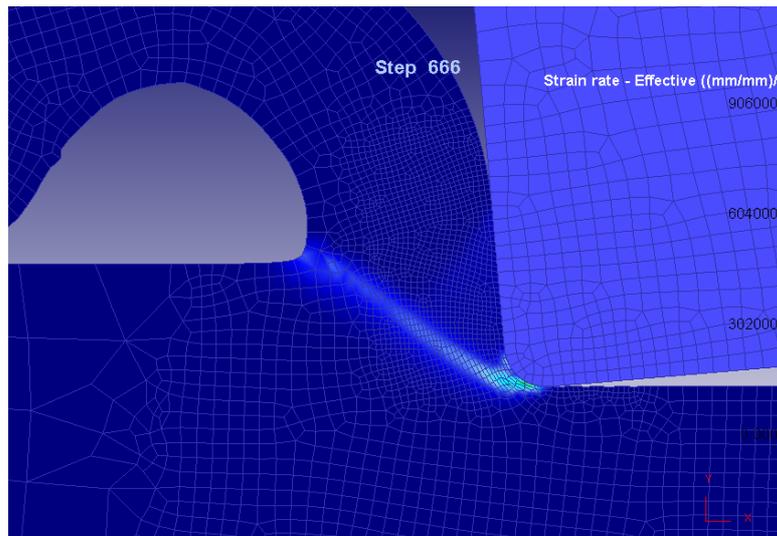
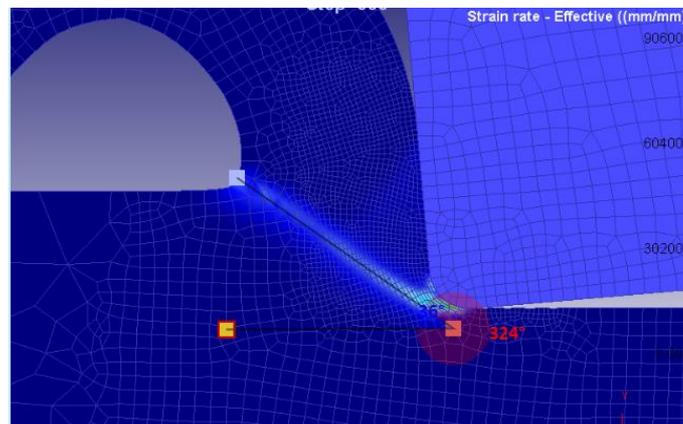


Ilustración C 29. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 10



Ángulos: **324** ° - **36** °

Ilustración C 30. Obtención del ángulo de corte en la simulación 10

## Simulación 11

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 11</b>	0	35	0,700	35,0	35,0

Ilustración C 31. Parámetros simulación 11

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

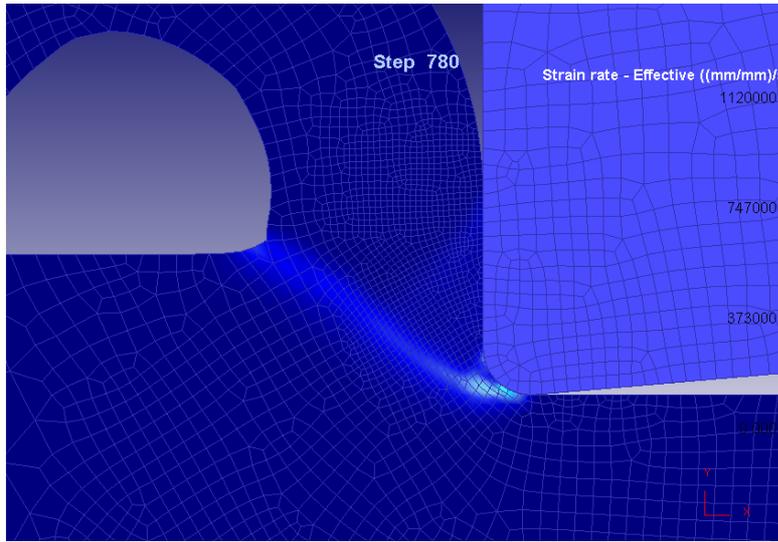


Ilustración C 32. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 11

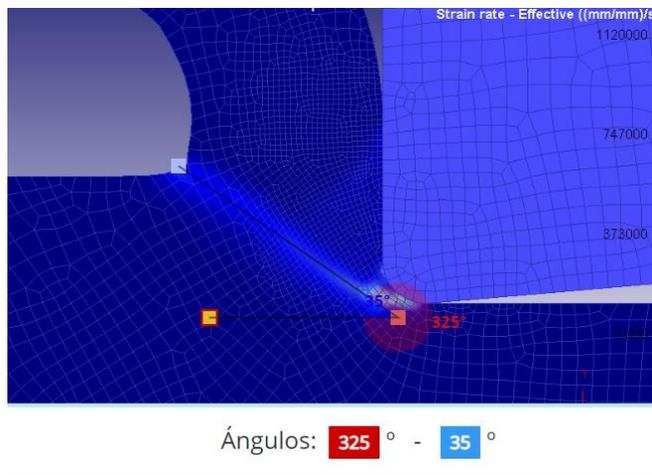


Ilustración C 33. Obtención del ángulo de corte en la simulación 11

## Simulación 12

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 12</b>	-5	35	0,700	40,0	33,0

Ilustración C 34. Parámetros simulación 12

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

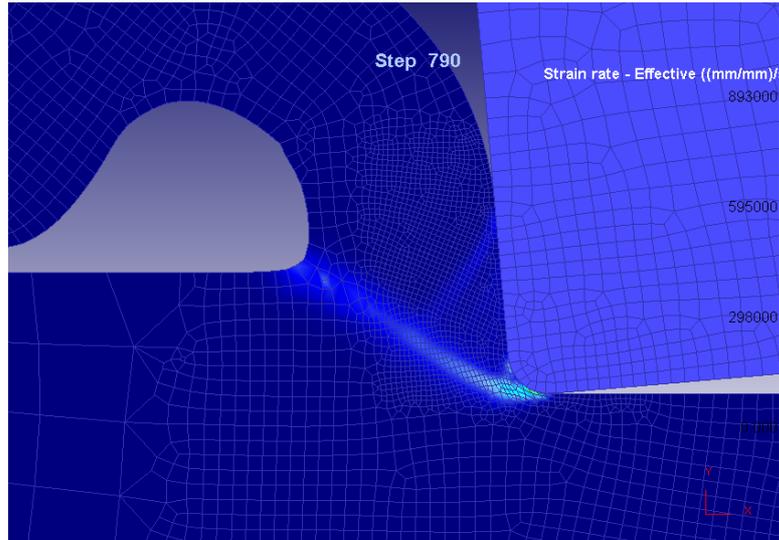
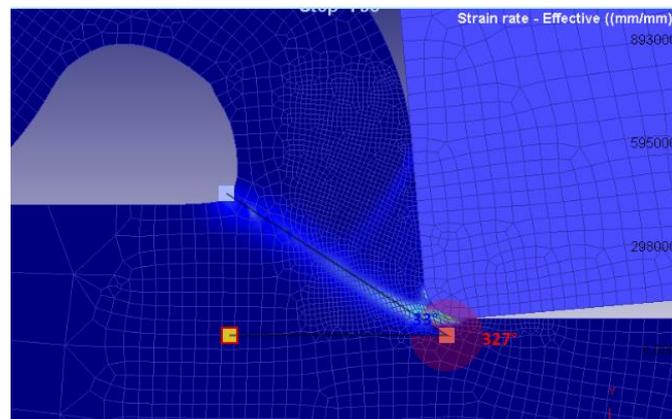


Ilustración C 35. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 12



Ángulos: **327** ° - **33** °

Ilustración C 36. Obtención del ángulo de corte en la simulación 12

### Caso 3-Calidad de la herramienta CD05

Se exponen los seis subcasos que conforman el último caso.

Nótese que todas las simulaciones pertenecientes a un mismo caso comparten ciertos valores en el proceso como se detalla en el capítulo 2.3 *Datos utilizados*. Aquí se reflejan los datos que diferencian cada subcaso de otro.

#### Simulación 13

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 13</b>	10	25	0,466	15,0	42,0

Ilustración C 37. Parámetros simulación 13

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

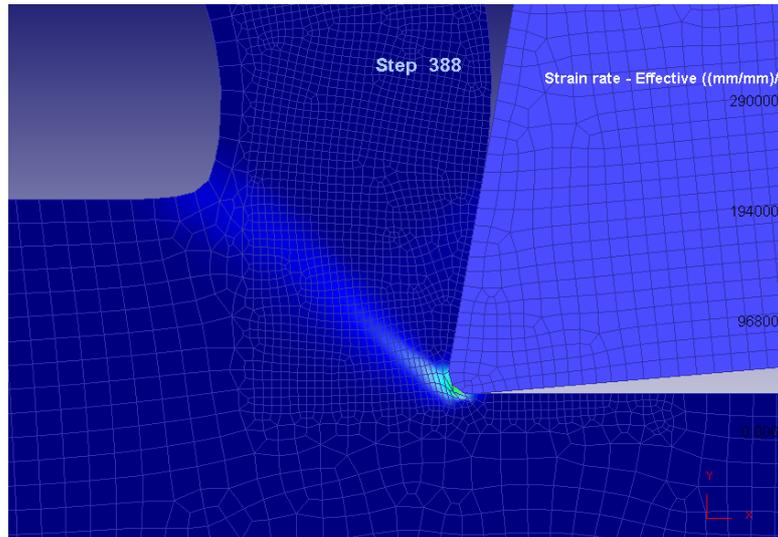
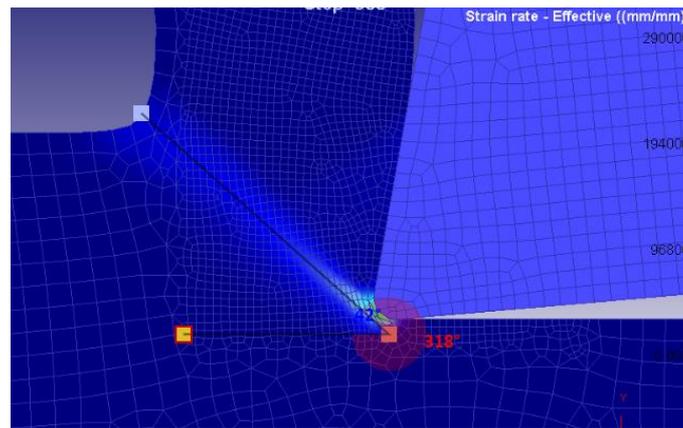


Ilustración C 38. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 13



Ángulos: **318** ° - **42** °

Ilustración C 39. Obtención del ángulo de corte en la simulación 13

## Simulación 14

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 14</b>	5	25	0,466	20,0	38,0

Ilustración C 40. Parámetros simulación 14

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

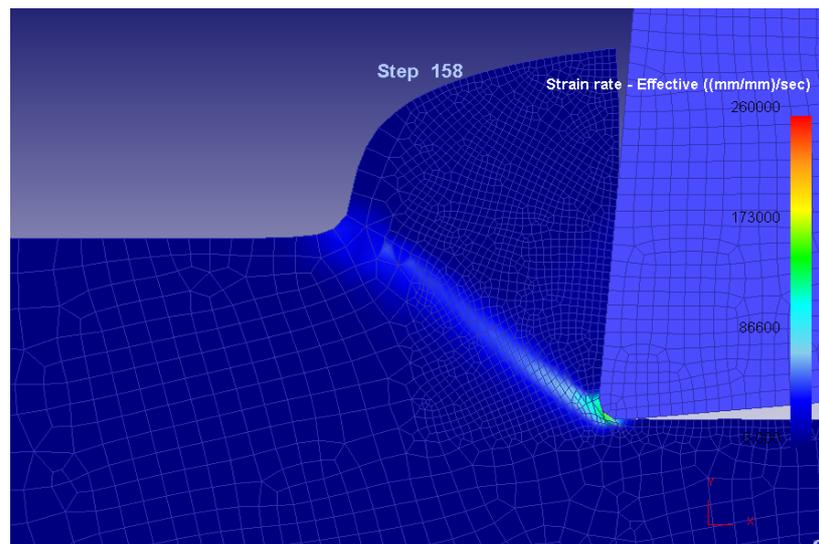
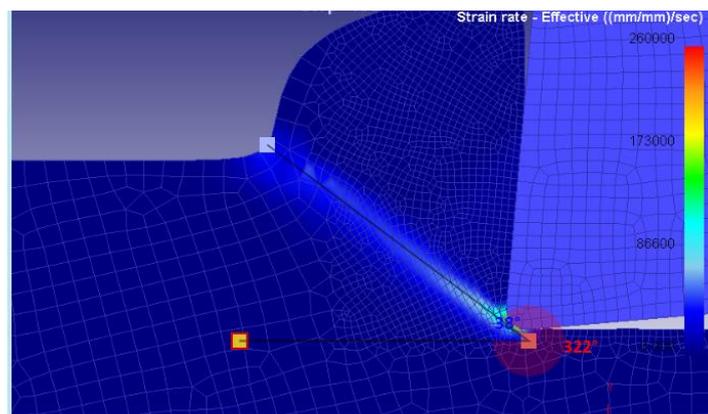


Ilustración C 41. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 14



Ángulos: **322** ° - **38** °

Ilustración C 42. Obtención del ángulo de corte en la simulación 14

## Simulación 15

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 15</b>	0	25	0,466	25,0	36,0

Ilustración C 43. Parámetros simulación 15

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

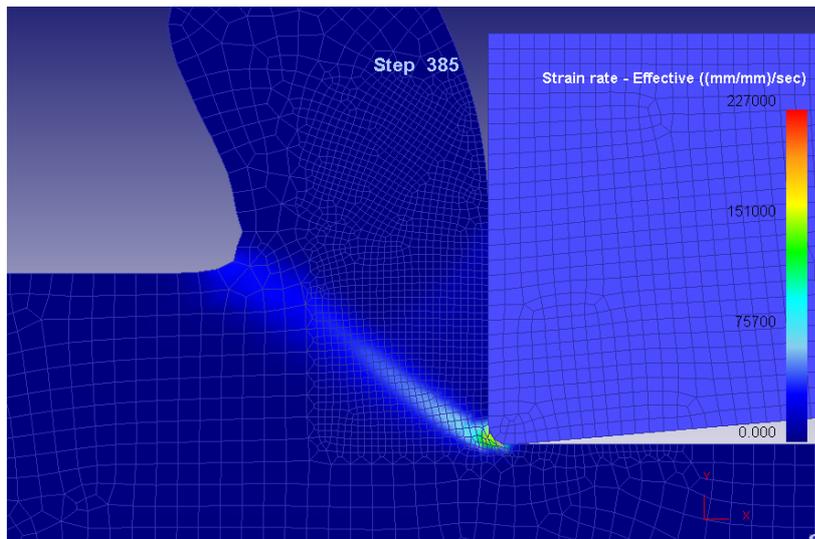
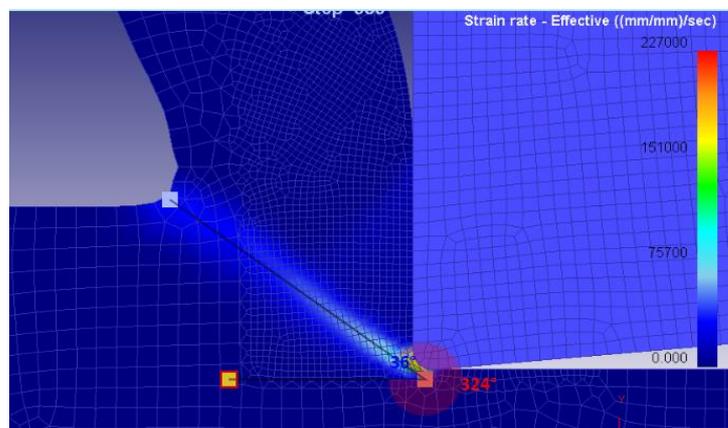


Ilustración C 44. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 15



Ángulos: 324 ° - 36 °

Ilustración C 45. Obtención del ángulo de corte en la simulación 15

## Simulación 16

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 16</b>	5	35	0,700	30,0	39,0

Ilustración C 46. Parámetros simulación 16

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

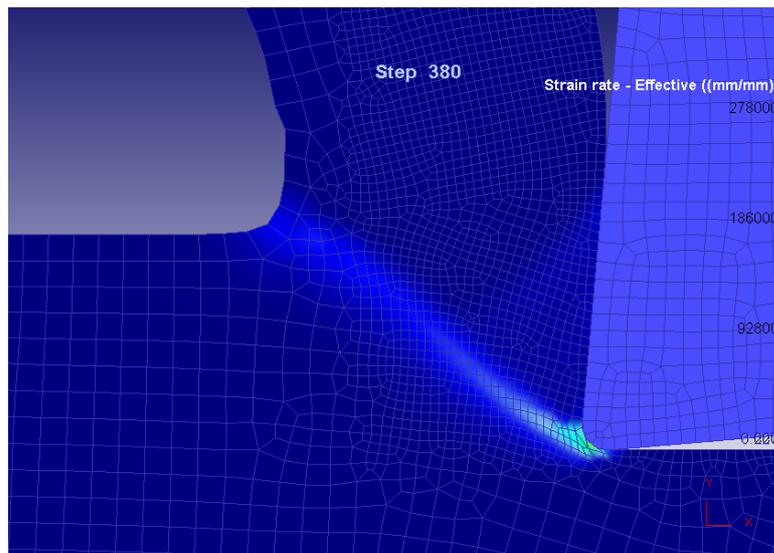
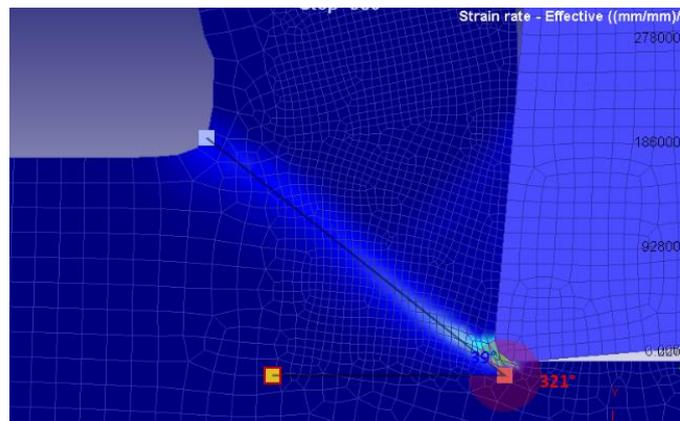


Ilustración C 47. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 16



Ángulos: **321** ° - **39** °

Ilustración C 48. Obtención del ángulo de corte en la simulación 16

## Simulación 17

Para realizar esta simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 17</b>	-5	30	0,577	35,0	34,0

Ilustración C 49. Parámetros simulación 17

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

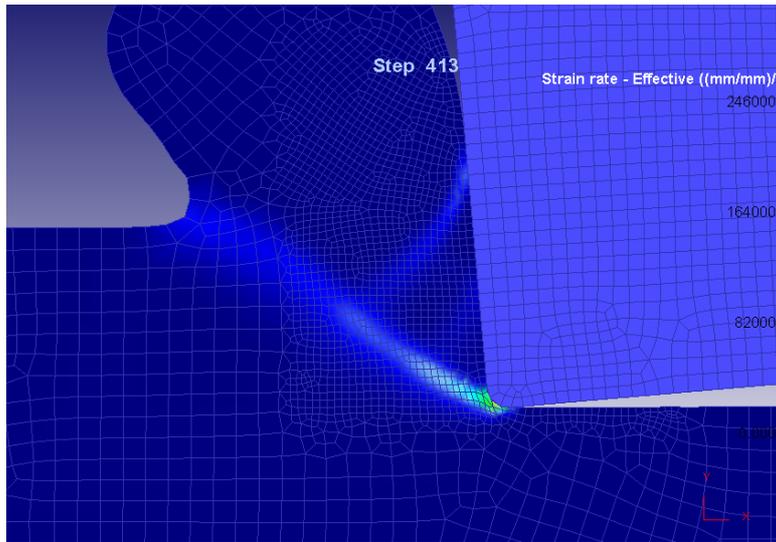


Ilustración C 50. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 17

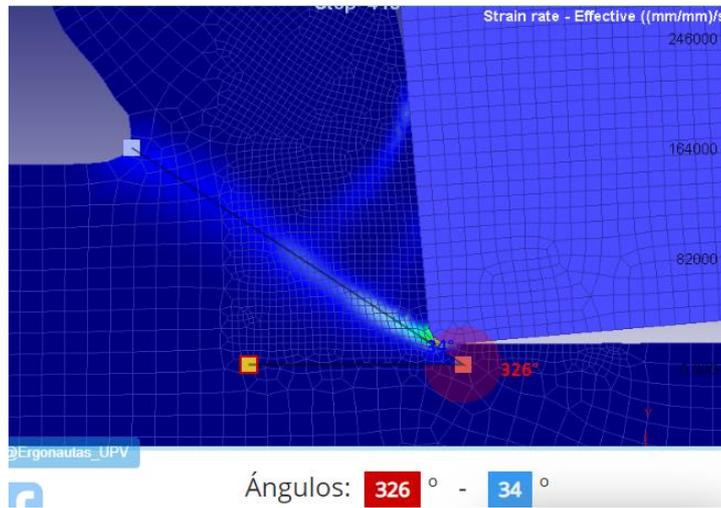


Ilustración C 51. Obtención del ángulo de corte en la simulación 17

## Simulación 18

Para realizar la última simulación se han usado los siguientes datos.

	$\gamma$	$\beta$	$\mu$	$\beta - \gamma$	$\phi$
<b>Simulación 18</b>	-5	35	0,700	40,0	33,0

Ilustración C 52. Parámetros simulación 18

Se muestra la etapa final de la simulación y el ángulo de corte ( $\phi$ ) obtenido.

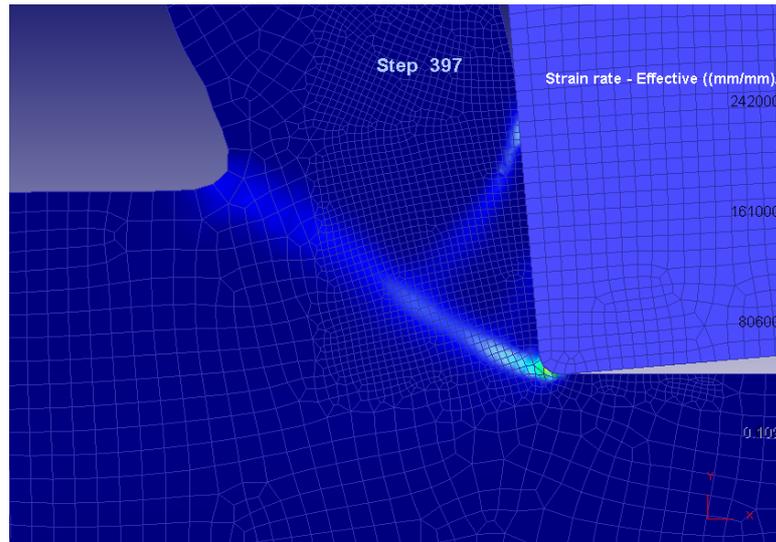


Ilustración C 53. Tensión efectiva en la etapa final de la simulación 18

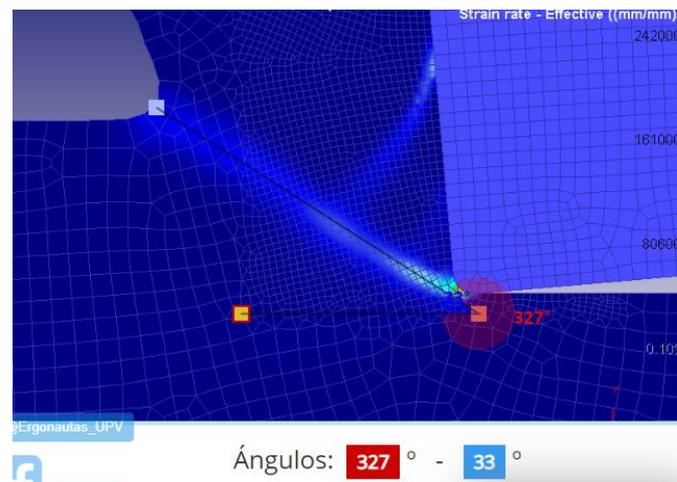


Ilustración C 54. Obtención del ángulo de corte en la simulación 18

## Consideraciones finales

En el presente Anexo se muestra de forma gráfica las soluciones de cada simulación realizada, por lo que se pretende que cada una de estas imágenes puede servir como guía al alumno para comparar resultados con los obtenidos en la práctica.

Los resultados obtenidos no deberían distar en demasía de los aquí propuestos, si bien hay que tener en cuenta que la medición del ángulo se realiza de manera aproximada a criterio del usuario.

