

Capítulo 4

Cálculos realizados

En este capítulo se relatan los aspectos relativos al proceso de cálculo y para ello se describe el software utilizado, la metodología aplicada, los datos de inicio y las justificaciones necesarias.

4.1. Software

Todas las simulaciones se han llevado a cabo en un ordenador con sistema operativo Windows 7 Home Premium, las simulaciones se han llevado a cabo con el código Deform-2D V9.0 (Service Pack 1). La manipulación de los datos obtenidos de las simulaciones se realiza con el programa Microsoft Office Excel 2010.

4.2. Metodología aplicada

La metodología que se ha utilizado para la realización del presente Trabajo es fruto de las observadas en la literatura existente, siendo las principales fuentes de inspiración un artículo de Outeiro et al.[51] y el trabajo de Wassdahl[9], así como el de Cheriguene[52].

Tras el exhaustivo estudio y revisión del Estado del Arte sobre el desgaste, se observan estudios acerca de la influencia de la geometría de la herramienta, sus recubrimientos, los pares de material pieza-herramienta, y muchos artículos sobre modelado. Sólo en algunos pocos artículos se hacen estudios paramétricos del caso con la fricción como parámetro, pero estudian su influencia en las fuerzas de corte, con resultados dispares de Özel por un lado y Filice por otro, según los recoge Cheriguene[52]. Sin embargo no se han encontrado artículos en los que se estudie de manera concienzuda la influencia de la fricción en el desgaste.

Por todo ello, puede resultar interesante estudiar dicha relación, y para ello se ha planteado el estudio del caso de la influencia que la fricción tiene sobre el desgaste producido. Para la correcta parametrización del desgaste se ha utilizado el modelo de fricción constante,

ya que permite recorrer todas los valores de forma sencilla y el estudio paramétrico arroja un mapa de comportamiento completo.

Para ello se han realizado los estudios pertinentes de mallas y geometrías, hasta obtener una combinación adecuada que converja lo más rápidamente posible y que pueda ser representativa del proceso real. En la sección 4.4 “Justificaciones” se ofrecen algunos detalles.

Se estudia el proceso de comienzo de corte ortogonal simulando hasta que se forma un tramo de viruta suficientemente largo como para entender que ha entrado en un proceso estacionario. Una vez se han realizado las simulaciones, se toman 4 puntos representativos del desgaste sobre los que se obtendrán datos, se filtrarán adecuadamente y se representarán en gráficas para su estudio.

4.2.1. Definición de caso

Para obtener simulaciones que sean comparables, se define un caso como un conjunto de parámetros fijos. Sobre el caso se hace el estudio recorriendo el coeficiente de fricción de 0 a 1 en intervalos de 0,1. Por lo tanto se tiene que cada caso comprende 11 simulaciones diferentes únicamente en el coeficiente de fricción.

Un caso se define manteniendo las siguientes variables constantes:

- Velocidad
- Profundidad de corte
- Avance
- Temperatura ambiente, de la herramienta y la pieza
- Coeficiente de transferencia de calor
- Materiales de la herramienta y la pieza
- Geometrías de la herramienta y la pieza
- Mallas de la herramienta y la pieza
- Condiciones de contorno sobre las mallas
- Variables de control de simulación (excepto criterio de parada)
- Coeficientes de Usui

El criterio de parada no afecta a los resultados obtenidos, ya que se tienen en cuenta los resultados obtenidos antes de que la viruta se pliegue y toque la superficie libre original de la pieza, por varios motivos, entre ellos que la configuración de la distribución de las fuerzas

implicadas varía y los resultados por tanto no son representativos.

En algunos casos también se observa que la viruta se sale de la zona de remallado fino, de forma que se distorsiona la forma de la misma, lo que afecta o puede afectar a la estabilidad de la solución. Al parar la simulación antes, se limitan los tiempos de computación, ahorrando cálculos que no son útiles para el fin del presente Trabajo.

4.2.2. Diferencias entre casos

Cada caso se distingue del anterior principalmente por el material de la pieza. En la mayoría de los casos se deja el resto intacto, incluso el mallado, pues permite uniformizar los resultados. Hay algunos casos en los que no se ha podido conseguir mantener dicha uniformidad ya que la solución no ha convergido. En dichos casos se ha variado la malla ligeramente y repetido hasta obtener un caso completo. Si bien no se mantiene uniformidad completa entre casos, las conclusiones no se ven afectadas, y las diferencias en los resultados no son importantes ya que se pretende hacer un estudio cualitativo y no cuantitativo del desgaste.

4.2.3. Paso a paso

El proceso de obtención de datos a través de simulaciones desde cero se encuentra descrito detalladamente en los Anexos I y II, tanto la parte de simulaciones como la del tratamiento para gráficas. En dichos documentos se cubren los aspectos formales de realización de simulaciones que han sido utilizados para la consecución de los resultados mostrados.

4.3. Datos Utilizados

Se procede a indicar los valores usuales utilizados en las simulaciones, que se tomarán por defecto.

Velocidad $250m/s$

Profundidad de corte $3mm$

Avance $0,1mm/rev$

Temperatura $20^{\circ}C$

Coefficiente de transferencia de calor $45kW/m^2K$, ($45N/s/mm/C$ según Deform-2D)

Geometría de la herramienta los valores a introducir son $L1 = 1$, $L2 = 1$, $B = 5$, $C = 5$, $R = 0,02$. En la siguiente figura se aprecia cómo se introducen en el Asistente y el resultado obtenido:

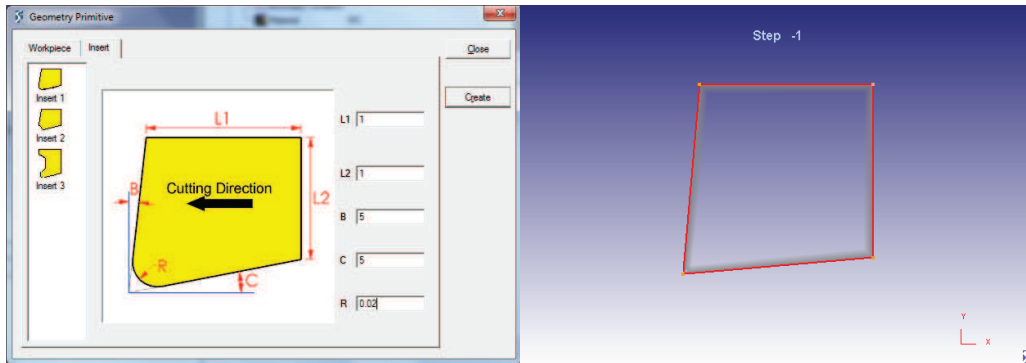


Figura 4.1: Datos utilizados: Geometría de la herramienta.

Geometría de la pieza los valores a introducir son $W = 6$, $H = 1$. En la siguiente figura se aprecia cómo se introducen en el Asistente y el resultado obtenido:

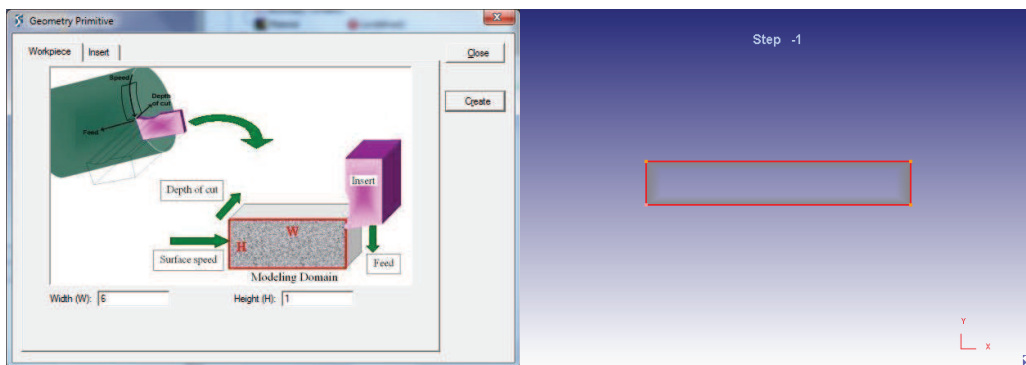


Figura 4.2: Datos utilizados: Geometría de la pieza.

Malla de la herramienta se utiliza una malla con 888 elementos con gradiente de tamaño de 1:6 para las zonas de interés.

Malla de la pieza se utiliza una malla con 3223 elementos con gradiente de tamaño.

Condiciones de contorno las que se suelen utilizar en estudios de corte ortogonal.

Variables de control de simulación las que se obtienen por defecto al usar el Asistente.

Criterio de parada en la siguiente tabla se pueden observar los criterios de parada estándar:

Coefficiente de fricción	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
tiempo (μ s)	360	400	450	520	720	720	720	720	720	720	720

Figura 4.3: Criterios de parada en tiempos según el coeficiente de fricción.

Coefficientes de Usui $A = 1e - 5$; $B = 1904$, según la ecuación del modelo de Usui del punto 3.2.3.

Cuando las soluciones no convergen y durante el periodo de pruebas preliminares se utilizan otros datos. A la hora de presentar los resultados se indica claramente qué valores se han tomado para realizar las simulaciones. En el Anexo I se recorre el proceso de introducción de datos de forma más detallada.

4.4. Justificaciones

En esta sección se pretende explicar las decisiones adoptadas para el estudio de la fricción en el presente Trabajo.

4.4.1. Software de simulación: Deform-2D

Se ha utilizado este código comercial por varias razones:

1. Según varios estudios permite el estudio del corte ortogonal y del desgaste con resultados positivos.
2. Tiene implementados varios modelos de desgaste.
3. Está disponible para su uso en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica de los Materiales.
4. El autor del Trabajo Fin de Máster adquirió práctica con el software durante el desarrollo del Máster.

Por todas estas razones se ha utilizado este código frente a otros similares.

4.4.2. Modelo de desgaste: Usui

El modelo de desgaste utilizado para el Trabajo Fin de Máster ha sido el de Usui. Los motivos más claros para elegir este modelo son claros:

1. El modelo de Usui, tal y como asegura Kitagawa según Outeiro[51], sirve para describir procesos donde el mecanismo de desgaste adhesivo es dominante o muy influyente, y funciona tanto para flanco como en cráter.
2. Hay trabajos precedentes que utilizan este modelo de forma satisfactoria, entre ellos Wassdahl[9], Yang[46] y Outeiro[51].
3. Las constantes de Usui son fácilmente interpretables en su sentido físico, y su variación dentro de un rango razonable no influye en el comportamiento cualitativo del desgaste.

4.4.3. Constantes de Usui

Las constantes de Usui A y B son características del binomio material-herramienta, y se obtienen experimentalmente. Son, por lo tanto, valores a priori desconocidos que no figuran en ninguna bibliografía consultada. Apenas algunos estudios dan rangos de valores aceptables para algunos casos, pero resultan del todo insuficientes para el Trabajo presente. Como el objetivo del proyecto es obtener conclusiones válidas acerca del comportamiento cualitativo del desgaste en función de la fricción, se decidió tomar un par de valores para todos los casos. Las conclusiones obtenidas no dependen de los coeficientes utilizados.

Como solución a la falta de constantes válidas se consideró en primera instancia tomar como referencia los valores propuestos por Yan et al.[53], pero tras algunas simulaciones, y dado que los materiales más utilizados en la pieza son aceros, se decidió tomar los que obtiene Wassdahl[9]. La utilización de dichos datos no arrojaba valores adecuados para una correcta interpretación, pues resultan de procesos de corte largos, por lo que no dieron buenos resultados, ya que A era demasiado bajo.

Como en la ecuación del modelo de Usui el coeficiente A es un factor de escala, se tomó la resolución de variar A hasta poder obtener valores cómodos de interpretar. Finalmente los valores utilizados son $A = 1e - 5$ y $B = 1904$. Los valores exactos de desgaste no serán reales, pero la forma de las gráficas que se obtengan no variará más que en escala. Los resultados obtenidos permiten, por tanto, llegar a conclusiones válidas sobre el comportamiento cualitativo del desgaste en aceros.

4.4.4. Geometría de herramienta y pieza

Las geometrías utilizadas en el presente Trabajo son el resultado de un proceso iterativo hasta conseguir valores útiles.

Se han probado geometrías diferentes, todas ellas variaciones de parámetros de herramientas simples sin rompevirutas con filo redondeado. Radios de punta altos, como el que usa por defecto el Asistente de Deform-2D, $R = 0,05mm$ requieren valores de avance grandes para obtener valores útiles de desgaste, implican grandes recorridos para obtener pequeños tramos de viruta, por lo que no son satisfactorios.

La geometría utilizada en Wassdahl se ha utilizado en varias ocasiones, con resultados adecuados en algunos casos. Finalmente se optó por utilizar un avance fijo bastante pequeño, de $0,1mm$, para limitar el ancho de viruta deformado en lo posible, de forma que el recorrido total de la herramienta fuera no excesivamente grande. Con este avance se ha ido variando el radio de punta hasta obtener resultados adecuados tanto en la zona de cráter como en la de flanco. Finalmente se toma $R = 0,02mm$ como base para la mayoría de las simulaciones finales.

Otros valores adecuados con los que se han obtenido resultados parecidos pueden ser $R = 0,035mm$ y $avance \leq 0,15mm$.

De la pieza sólo se modela un tramo pequeño, sobre el que se hace el estudio de corte ortogonal. Se toma el doble de lo que viene por defecto al utilizar el asistente, de forma que se pudiera obtener una viruta larga en la mayoría de los casos. Se toma el valor de longitud $W = 6$ y altura $H = 1$.

4.4.5. Malla

En el proceso de desarrollo del Máster en Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica se ha estudiado el Método de los Elementos Finitos desde distintos frentes, atacando los problemas tanto de forma más técnica, mediante el estudio de la teoría y su implementación en Matlab, como diferentes aplicaciones prácticas utilizando software como Deform-2D, Deform-3D o Ansys. El hecho de enfocar de forma variada el problema del uso del MEF permite obtener una imagen de conjunto global que otorga al estudiante una amplia perspectiva.

Entre otros conceptos, se hizo hincapié en la necesidad de tener un conocimiento profundo del problema antes de utilizar códigos para solucionarlo, para evitar errores en la interpretación de los resultados. Por otro lado, se insistió en la necesidad de obtener mallados precisos que permitan estudiar adecuadamente las geometrías, a veces delicadas, de los elementos del problema. Para ello se suele usar un mallado variable, con elementos más pequeños allí donde hacen falta y más grandes donde no, para evitar gastar recursos de cálculo de forma innecesaria. De cualquier manera, también se entendía como imprescindible ajustar el tamaño de los elementos en las zonas más problemáticas o más interesantes para el problema para que los valores obtenidos fueran representativos. Se indicó que la obtención de mallas válidas es un proceso iterativo bastante complejo, y su implementación no especialmente sencilla.

Para obtener una solución de compromiso que permita obtener resultados aceptables en tiempos razonables, puede ser la siguiente:

Si se entiende que la malla más fina, esto es, con los elementos más pequeños, es más representativa que una malla gruesa del elemento del problema, se realizan mallados cada vez más finos y se comparan los resultados obtenidos. Cuando la diferencia sea nula o esté dentro de un rango de error definido, se entiende que se ha obtenido una malla suficientemente buena en el penúltimo paso. Esta malla permitirá obtener resultados aceptables con el menor coste de tiempo de computación.

Siguiendo esta solución se han realizado varios mallados diferentes cada vez más finos, utilizando los valores del Asistente de Deform-2D como guía. El rango de error que se ha definido como aceptable es del 10% de error relativo. A priori puede entenderse como excesivo, pero hay que tener en cuenta una serie de dificultades propias de la utilización de Deform-2D. El mallado está dividido en 2 zonas diferenciadas entre las que permite hacer una

gradación del tamaño de los elementos. La disposición de los nodos varía de forma ostensible al variar el tamaño de los elementos, o el número de los mismos. Esto tiene consecuencias en los resultados, ya que se han extraído datos de los mismos puntos en todos los casos. Si un punto cae lejos de un nodo la solución puede, en algunos casos, variar considerablemente, por lo localizado del fenómeno de estudio. Por esto se han comparado casos completos, valorando los errores medios de las 11 simulaciones como medida de bondad entre mallas, y se ha tenido presente que, dado que se pretende hacer un estudio cualitativo, el valor exacto del error puede ser menos importante que la tendencia del mismo, siempre dentro de unos límites razonables. Como se presentará más adelante, se ha puesto sumo cuidado en evaluar las tendencias en las diferencias entre mallados, ya que se ha entendido como fuente principal de error.

En el equipo utilizado principalmente para el desarrollo de las simulaciones del presente Trabajo Fin de Máster, las simulaciones han tenido un coste en tiempo variable, desde unos 20 minutos los casos de mallas más gruesas hasta varias horas en los casos de mallas más finas. Estos datos son orientativos, ya que también varía en función del material utilizado en las simulaciones, esto es, varía en función de las ecuaciones de comportamiento y los valores que definan al material.

Estudio de la malla

Se han estudiado 4 mallas distintas, una malla gruesa, normal, fina y muy fina. Las diferencias entre las mismas radican principalmente en el tamaño de los elementos, y por ende, en su número. A menor tamaño del elemento, mayor será su número y más fina será la malla. El material utilizado en la pieza es AISI 1020, la geometría la estándar y las características de las mallas así como los tiempos medios de cálculo por simulación se exponen en la figura siguiente:

Malla	Número de elementos		Tiempo medio de computación
	Pieza	Herramienta	
Gruesa	1552	752	20 minutos
Normal	3223	888	40 minutos
Fina	3615	1285	70 minutos
Muy fina	4600	2218	100 minutos

Figura 4.4: Tabla de características de cada malla.

Nótese que en las simulaciones hay que tener en cuenta el proceso de remallado inherente a este tipo de estudios. Ello conlleva un coste computacional muy alto.

Primera comparación: malla gruesa versus malla normal

En esta comparación se puede observar que las diferencias entre ambos mallados superan los valores de error aceptable:

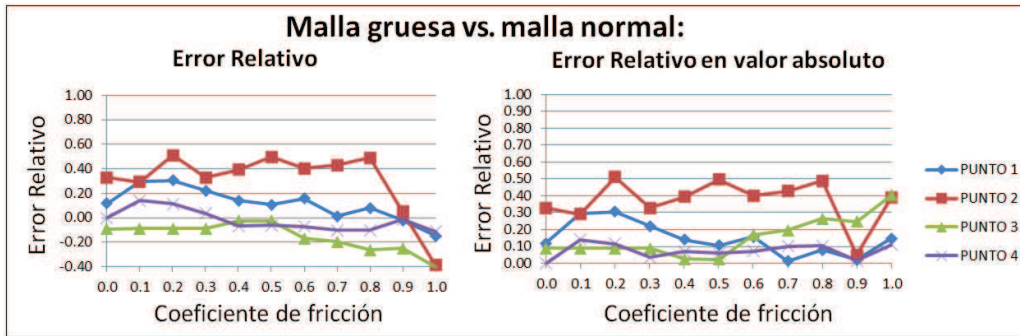


Figura 4.5: Comparativa de errores entre mallas: malla gruesa vs. malla normal.

Ni si quiera hace falta estudiar los tiempos de computación. No es válida la malla gruesa para los objetivos del proyecto. La malla normal tardó aproximadamente unas 8 horas en completarse, y una simulación no convergió, por lo que hubo que repetirla.

Segunda comparación: malla normal versus malla fina

Aquí el error medio está dentro del rango aceptable, y no hay grandes desviaciones:

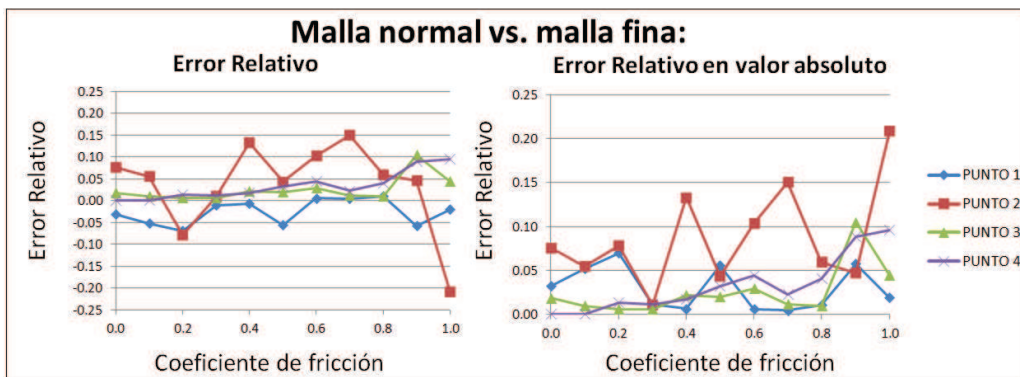


Figura 4.6: Comparativa de errores entre mallas: malla normal vs. malla fina.

Nótese que se escala el eje de ordenadas para una mejor apreciación del error.

En términos de coste de computación, la malla fina tardó en completarse en torno a las 12 horas en total.

Tercera comparación: malla normal versus malla muy fina

Aquí se obtiene un resultado de error muy parecido al caso anterior, tal y como se observa en la siguiente imagen:

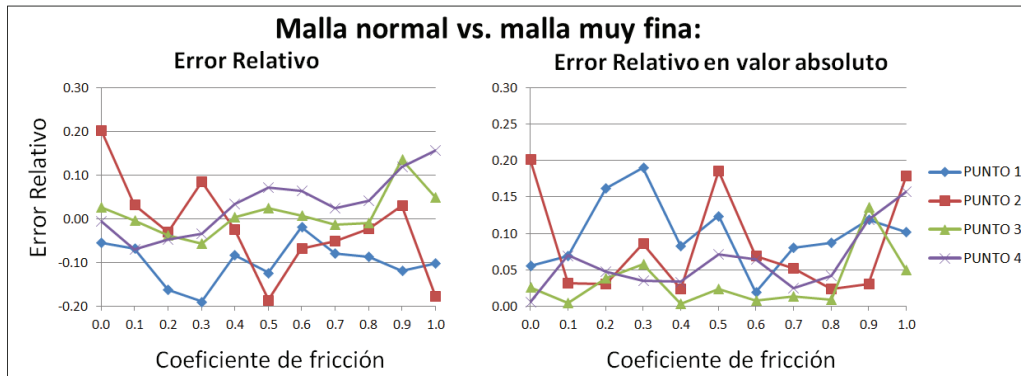


Figura 4.7: Comparativa de errores entre mallas: malla normal vs. malla muy fina.

Las diferencias entre este caso y el anterior son apenas distinguibles. La malla normal ofrece resultados razonablemente buenos y dado que la malla muy fina consumió unas 19 horas de computación, parece que la malla normal es una buena candidata.

4.4.6. Longitud de viruta aceptable: inicio y fin de datos

Según Cheriguene[52], para poder realizar estudios de variables en estacionario, se necesita una longitud de viruta de al menos una vez y media la longitud de contacto entre pieza y herramienta. En el presente caso se entiende que una longitud tal es más que suficiente como para poder estudiar los valores de desgaste.

Por lo tanto se suele considerar el comienzo de toma de datos cuando la longitud de viruta libre es superior en vez y media a la longitud de contacto, esto es, se toma el valor de tiempo inicial de datos válido en el momento en que se supera este límite. En los casos estudiados se aceptan longitudes menores en algunas ocasiones. Sin embargo no se obtienen comportamientos diferentes para longitudes menores, en aquellos casos donde se dan.

4.4.7. Puntos de estudio

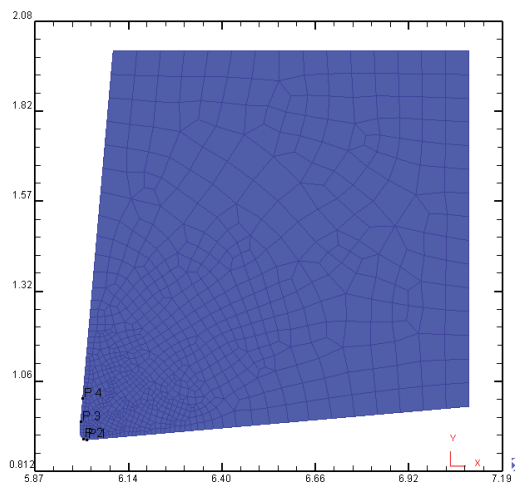
En el corte ortogonal se distinguen claramente 2 zonas de desgaste: flanco y cráter. Se estudian las zonas de desgaste de forma separada, pues se entiende que el comportamiento a fricción de diferentes zonas puede ser distinto. Por ello, y teniendo en cuenta que pese a lo localizado del fenómeno puede haber diferencias entre zonas, se utilizan 2 puntos del contorno tanto en flanco como en cráter.

En la siguiente figura se observa una tabla con el cuarteto de puntos utilizado en algunos casos:

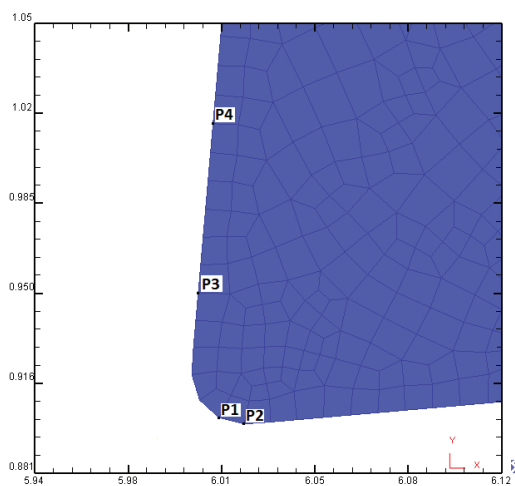
Puntos	Posición	
	X	Y
1	6.01007	0.90294
2	6.01998	0.90001
3	6.00329	0.96109
4	6.00902	1.02659

Figura 4.8: Tabla de puntos utilizados.

Los puntos utilizados ubicados en la herramienta, en la siguiente figura:



a) Herramienta completa



b) Zoom a la zona de la punta de la herramienta

Figura 4.9: Ubicación de los puntos de estudio.

4.4.8. Otras variables

Las variables que no han sido mencionadas se han tomado o bien por defecto o bien han sido consultadas en la bibliografía para ser coherentes con un proceso real:

Velocidad: Se toma una velocidad alta pero adecuada y dentro de rango de aplicabilidad de los aceros, según varios prontuarios.

Temperatura: la estándar para un laboratorio de mecánica.

Coefficiente de transferencia de calor: los estudios comparativos de casos mostraban poca o ninguna influencia en el desgaste, por lo que se deja el valor que viene por defecto.

Variables de control de simulación: en la mayoría de los casos no ha hecho falta cambiar el valor de las variables generadas por defecto, y en algunos casos en los que pudiera tener algún tipo de influencia, como pueda ser la penetración, no ha habido impacto sensible en los valores del desgaste.

De otras variables que no se hayan descrito no ha habido variación con respecto a los valores por defecto o a los sugeridos por el programa. En algún caso se realizaron ajustes para intentar conseguir convergencia cuando no se consiguió, pero con final infructuoso en la mayoría de los casos.