



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI (URV) Y UNIVERSITAT OBERTA DE CATALUNYA (UOC)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA COMPUTACIONAL Y MATEMÁTICA

## TRABAJO FINAL DE MÁSTER

ÁREA: SIMULACIÓN

### **Análisis del flujo de refrigeración por aire en torneado de acero**

**Estudio mediante FLOEFD**

---

Autor: Martínez Morato, Daniel

Tutor: Jaramillo Císcar, David

Profesor: Leitao Rodríguez, Álvaro

---

Barcelona, 8 de junio de 2024

El Dr. Jaramillo Císcar, David, certifica que el estudiante Martínez Morato, Daniel ha elaborado el trabajo bajo su tutoría y autoriza la presentación de esta memoria para su evaluación.

Firma del tutor/a:

A handwritten signature in blue ink. The signature consists of a stylized, cursive initial 'D' followed by the name 'JARAMILLO' written in a slightly slanted, uppercase font. A long horizontal line extends to the right from the end of the name.

# Créditos/Copyright



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada  
3.0 España de CreativeCommons.



# FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Análisis del flujo de refrigeración por aire en torneado de acero
Nombre del autor:	Martínez Morato, Daniel
Nombre del colaborador/a docente:	Jaramillo Císcar, David
Nombre del PRA:	Leitao Rodríguez, Álvaro
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2024
Titulación o programa:	Máster Universitario en Ingeniería Computacional y Matemática
Área del Trabajo Final:	Simulación
Idioma del trabajo:	Español
Palabras clave	REFRIGERACIÓN, TORNEADO, FLOEFD



# Abstract

This master's degree final project, carried out by the electrical engineer Daniel Martínez Morato and directed by Dr. David Jaramillo Císcar and Dr. Álvaro Leitao Rodríguez, focuses on the analysis of air cooling flow during steel turning, by means of computational fluid mechanics and using the FLOEFD simulation software, student version. The study focuses on the optimisation of this crucial process in mechanical manufacturing, with the aim of improving its efficiency and analysing the feasibility of its implementation to increase the durability of the cutting tool. The paper presents a detailed introduction contextualising the importance of cooling in steel turning and the state of the art in this field, followed by a procedural methodology and an analysis of the results obtained. The conclusions derived from the simulation provide valuable information to understand the scope of this cooling method and to reconsider its implementation in mechanical manufacturing processes in industrial steel machining applications.

**Key words:** REFRIGERATION, TURNING, FLOEFD





# Resumen

Este trabajo final de máster realizado por el ingeniero eléctrico Daniel Martínez Morato y dirigido por los doctores David Jaramillo Císcar y Álvaro Leitao Rodríguez, se enfoca en el análisis del flujo de refrigeración por aire durante el torneado de acero, mediante mecánica de fluidos computacional y utilizando el programa de simulación FLOEFD, versión estudiante. El estudio se centra en la optimización de este proceso crucial en la fabricación mecánica, con el objeto de mejorar su eficacia y analizar la viabilidad de su implementación para aumentar la durabilidad de la herramienta de corte. El documento presenta una introducción detallada que contextualiza la importancia de la refrigeración en el torneado de acero y el estado del arte en esta materia, seguida de una metodología procedimental y un análisis de los resultados obtenidos. Las conclusiones derivadas de la simulación ofrecen información valiosa para comprender el alcance de este método de refrigeración y reconsiderar su implementación en los procesos de fabricación mecánica en aplicaciones industriales de mecanizado de acero.

**Palabras clave:** REFRIGERACIÓN, TORNEADO, FLOEFD



# Índice general

<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Índice</b>	<b>IX</b>
<b>Listado de Figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Listado de Tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y justificación del proyecto . . . . .	1
1.2. Objetivos del proyecto . . . . .	2
1.3. Impacto socioético, de sostenibilidad y de diversidad del proyecto . . . . .	2
1.4. Enfoque . . . . .	2
1.5. Planificación del proyecto . . . . .	3
1.6. Breve resumen de los resultados . . . . .	3
1.7. Descripción de las partes del proyecto . . . . .	3
<b>2. Estado del arte</b>	<b>5</b>
2.1. Estado del arte de la refrigeración en fabricación por mecanizado . . . . .	5
2.1.1. Tubo Vortex . . . . .	10
2.2. Estado del arte de la CFD . . . . .	11
2.2.1. Software de simulación CFD . . . . .	14
2.3. Campos actuales de investigación . . . . .	15
<b>3. Definición y objetivos del trabajo</b>	<b>17</b>
<b>4. Base teórica</b>	<b>21</b>
4.1. Mecánica de fluidos . . . . .	21

4.1.1. Conservación de la masa . . . . .	22
4.1.2. Conservación del momento . . . . .	23
4.1.3. Conservación de la energía . . . . .	24
4.2. Termodinámica . . . . .	24
<b>5. Modelización del problema</b>	<b>27</b>
<b>6. Sistema a simular</b>	<b>33</b>
<b>7. Análisis de resultados</b>	<b>39</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>

# Índice de figuras

1.1. Planificación del proyecto. . . . .	3
2.1. Refrigeración interna.[RYK <sup>+</sup> 17] . . . . .	6
2.2. Refrigeración indirecta.[PRFV <sup>+</sup> 15] . . . . .	7
2.3. Tubo de calor.[RYK <sup>+</sup> 17] . . . . .	7
2.4. Lubricante sólido.[RYK <sup>+</sup> 17] . . . . .	8
2.5. Estudio de la rugosidad en pieza.[LL11] . . . . .	9
2.6. Estudio de la rugosidad en herramienta.[LL11] . . . . .	9
2.7. Esquema de equipo de refrigeración Vortex experimental.[CLJ01] . . . . .	10
2.8. Representación del tubo Vortex.[SPRS22] . . . . .	11
2.9. Coste estimado de la CFD por método.[WJ17] . . . . .	12
2.10. N <sup>o</sup> de artículos publicados.[GS17] . . . . .	15
3.1. Torneado recto.[KS08] . . . . .	17
3.2. Esquema de corte bidimensional.[KS08] . . . . .	18
3.3. Distribución característica de temperatura.[KS08] . . . . .	19
4.1. Capa límite de velocidad coincidente con la térmica ( $Pr = 1$ ).[Cen13] . . . . .	25
5.1. Celdas del volumen finito.[GW22] . . . . .	28
6.1. Representación del sistema. . . . .	33
6.2. Dominio de la simulación. . . . .	35
6.3. Mallado de la simulación. . . . .	36
7.1. Evolución del cálculo de convección con el aumento de la precisión de mallado. . . . .	44
7.2. Evolución del cálculo de fuerza de presión con el aumento de la precisión de mallado. . . . .	45
7.3. Evolución del cálculo de fuerza viscosa con el aumento de la precisión de mallado. . . . .	45
7.4. Velocidad en el plano XY para 15 ° y 50 mm. . . . .	50

7.5. Temperatura en el plano XY para $15^\circ$ y 50 mm. . . . .	50
7.6. Velocidad en el plano YZ para $15^\circ$ y 50 mm. . . . .	51
7.7. Temperatura en el plano YZ para $15^\circ$ y 50 mm. . . . .	52
7.8. Presión en el plano XY para $15^\circ$ y 50 mm. . . . .	54
7.9. Presión en el plano YZ para $15^\circ$ y 50 mm. . . . .	54

# Índice de cuadros

2.1. <i>Impacto del progreso de cómputo en 20 años [WJ17]. . . . .</i>	13
2.2. <i>Resumen de programas CFD actuales. . . . .</i>	14
7.1. <i>Velocidad a diferentes tamaños de malla. . . . .</i>	40
7.2. <i>Velocidades a diferentes tamaños de mallado homogéneo. . . . .</i>	41
7.3. <i>Velocidades con mallado en proximidad. . . . .</i>	42
7.4. <i>Velocidad a diferente malla de contorno. . . . .</i>	43
7.5. <i>Velocidad a diferentes ángulos de incidencia. . . . .</i>	46
7.6. <i>Temperatura a diferentes ángulos de incidencia. . . . .</i>	47
7.7. <i>Velocidad a diferentes distancias y 15<sup>o</sup> de incidencia para plano YZ. . . . .</i>	49
7.8. <i>Temperatura a diferentes distancias y 15<sup>o</sup> de incidencia para plano YZ. . . . .</i>	49
7.9. <i>Comparativa del valor calculado (analítico) y el valor simulado de la transferencia de calor por convección, fuerza normal y viscosa para cada caso. . . . .</i>	53





# Capítulo 1

## Introducción

El siguiente documento es la memoria del trabajo final de máster en Ingeniería Computacional y Matemática. El proyecto se engloba dentro del grupo de trabajos pertenecientes a Modelización y Simulación. En particular, el trabajo desarrolla la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) al estudio del uso de aplicaciones de refrigeración en la fabricación mecánica mediante procesos de mecanizado, concretamente, a la refrigeración de la herramienta de corte en torneado de acero fundido.

### 1.1. Contexto y justificación del proyecto

En el ámbito que afecta a este proyecto, se destaca la necesidad de seguir implementando simulaciones que ayuden a diseñar estrategias de refrigeración en los procesos de fabricación mecánica, aspectos como el rendimiento del flujo másico que interacciona con la pieza a refrigerar, el coeficiente de convección del aire o el grado de turbulencia generado, a fin de predecir la transferencia de calor en la herramienta de corte, la tasa de evacuación de viruta, el ángulo óptimo de inyección de aire o el tipo de boquilla más adecuado en cada tipología de mecanizado. Por todos estos motivos es de interés contemporáneo aportar estudios como el que aquí se pretende.

Justifica, por tanto, la necesidad de este proyecto el hecho de que el análisis del fluido de refrigeración por método Vortex en torneado de piezas durante el desarrollo del cilindrado, mecanizado crítico y de mayor temperatura, no ha sido estudiado por el momento teniendo en cuenta, además, la emisión calorífica como un punto de generación a mitad de la altura de la herramienta y con una distribución térmica como la explicada en este documento.

Complementariamente, se tiene en cuenta la distribución de aire en el conjunto pieza-herramienta y el parametrizado de la convección forzada, en la situación de refrigeración en la cara de desprendimiento y en la cara de flanco, con una inclinación paralela al eje de las mismas y con un flujo de aire de diámetro igual a la boquilla del dosificador.

## **1.2. Objetivos del proyecto**

La definición y los objetivos del trabajo se desarrollan de forma extendida en el Capítulo 3. De forma resumida, el objetivo es dar cumplimiento a la obtención de las competencias marcadas para el Trabajo de Final de Máster, mediante la implementación de una aplicación en simulación de dinámica de fluidos computacional desarrollando una labor de investigación que incida en campos, todavía por estudiar, en la aplicación de estas herramientas de cálculo al proceso de fabricación mecánica de torneado por cilindrado.

## **1.3. Impacto socioético, de sostenibilidad y de diversidad del proyecto**

Tal como se explica en el Capítulo 2, la mejora de los procesos de refrigeración tiene una vertiente medioambiental y de protección de la salud laboral relacionada con la baja emisión o reducción de sustancias cancerígenas y de los derivados del petróleo, además de incorporar formas de reducción de los costes energéticos. Por otra parte, la mejora de los procesos de automatización en la fabricación mecánica inciden directamente en la integración al mercado laboral de los y las trabajadoras, ampliando la gama de trabajos técnicos y altamente cualificados que requiere la sociedad.

## **1.4. Enfoque**

El enfoque del proyecto es el de generar la simulación del proceso siguiendo los pasos estructurados de una investigación científico-técnica en el ámbito de las aplicaciones computacionales: desarrollo de la hipótesis o objetivos a trabajar, modelización del problema, parametrizado del sistema, simulación, comprobación y verificación, análisis de las modificaciones e implementación de las mismas y conclusiones.

## 1.5. Planificación del proyecto

La planificación del trabajo se muestra a continuación:

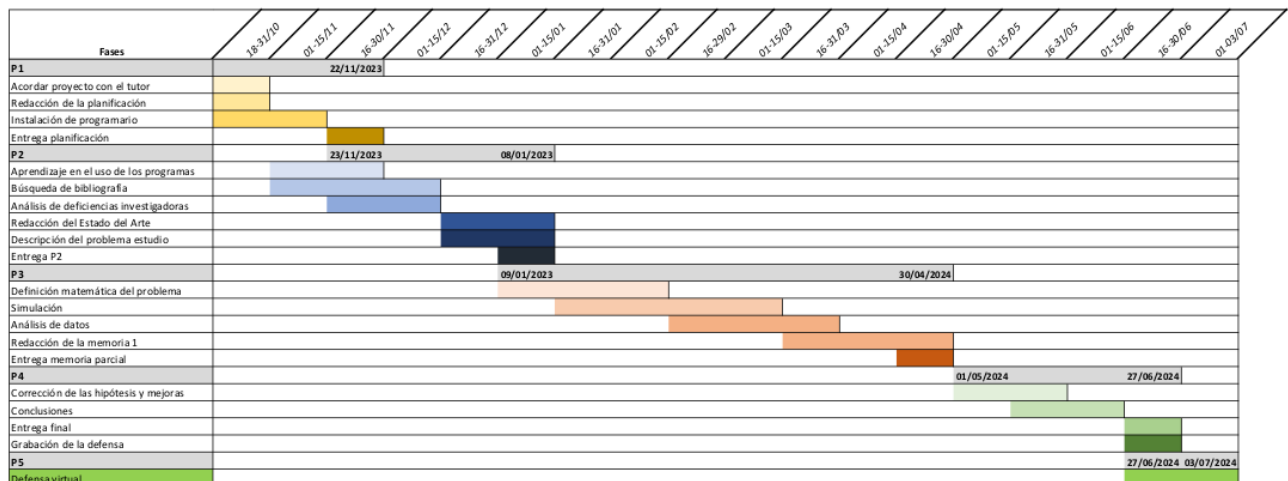


Figura 1.1: Planificación del proyecto.

## 1.6. Breve resumen de los resultados

Se ha desarrollado el proceso de simulación del sistema de refrigeración mecánica, describiendo la obtención de la mejor malla del dominio para las capacidades de cómputo de la máquina con la que se realiza el estudio, obteniendo la convección total de calor disipado en el proceso de corte mediante refrigeración por aire forzado. Se han comprobado los resultados obtenidos mediante simulación con el modelo analítico termodinámico. Se ha determinado que la mejor inclinación del chorro de aire con la superficie de la herramienta de corte es de  $15^\circ$  y que aproximar el inyector a la superficie disminuye la disipación, consiguiendo valores de velocidad más próximos a los de contorno, hasta cierto valor, pues disminuir demasiado esa distancia puede aumentar el estancamiento del fluido en la superficie de la cuchilla.

## 1.7. Descripción de las partes del proyecto

El primer bloque del trabajo se inicia con el Capítulo 2, donde se explican el estado del arte de la refrigeración en procesos de fabricación por mecanizado y el estado del arte en el uso de técnicas CFD. También se exponen los posibles campos de investigación por desarrollar o

complementar. Se finaliza en el Capítulo 3 con la exposición del problema planteado para este proyecto y los objetivos.

El segundo bloque del trabajo contiene el Capítulo 4, donde se expone la base teórica del sistema. El Capítulo 5 define la modelización del problema a simular. Y en el Capítulo 6 se definen los parámetros del sistema a simular y se muestra la creación de la malla.

Finalmente, en el tercer bloque encontramos la descripción de los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, en el Capítulo 7, para terminar en el Capítulo 8 con las conclusiones del trabajo. Se anexan los documentos y archivos generados durante el estudio.

# Capítulo 2

## Estado del arte

### 2.1. Estado del arte de la refrigeración en fabricación por mecanizado

Tal como explican Ramachandran et al. [RYK<sup>+</sup>17], la refrigeración en el mecanizado se ha basado en los últimos años en la implementación de técnicas con tres tipos de condición: mecanizado con lubricación húmeda, mecanizado cercano a seco y mecanizado seco. Los objetivos de esta lubricación son: alargar la vida útil de la herramienta, reducir o establecer una temperatura de corte adecuada, reducir las fuerzas de corte y mejorar la eliminación de material, viruta, en el proceso de corte.

La utilización de fluidos lubricantes como la taladrina ha sido, hasta la fecha el mejor método de refrigeración y lubricación, pero acarrea un conjunto de contras. El coste del fluido de corte es mayor que el de la herramienta. Estos productos son contaminantes y conllevan un peligro para la salud e higiene del lugar de trabajo, comportando riesgos para los trabajadores. Como exponen Goindi et al. [GS17], supone riesgos de sufrir dermatitis, infecciones faciales, insuficiencia respiratoria o cáncer. Además, puede haber una reducción de la efectividad de la herramienta por: la limitación para que el fluido alcance la zona de corte y por un excesivo movimiento de la viruta que dañe el acabado superficial.

Tal como se extrae de lo anterior, en el proceso, el control de la temperatura es lo más importante para la herramienta y la pieza a fabricar motivado porqué una alta temperatura reduce la resistencia mecánica del filo de corte y aumenta el desgaste del mismo.

Del artículo de Kalpakjian et al. [KS08] podemos extraer que la temperatura alcanzada en la zona de contacto de la herramienta con la pieza varía entre los 380 °C y los 700 °C,

dependiendo del tipo de material a mecanizar. La deformación y fricción en el corte provocan que, de toda la energía consumida, entre el 1 % y el 10 %, únicamente, se emplea en el corte y el resto es calor residual. Si anteriormente comentábamos la repercusión sobre la herramienta, en el caso de la pieza, excesos de temperatura producen peor rugosidades por causas de estrés superficial y una peor calidad dimensional.

Pero refrigerar mediante el uso de lubricantes, como decíamos, no es la mejor solución o, mejor dicho, actualmente ya no es la mejor solución. Entre el 7 % y el 18 % del coste de fabricación de una pieza es dirigido al uso de estos lubricantes. Teniendo en cuenta que, durante el proceso, el 15 % del refrigerante fluye con la viruta, se evapora y es necesario, finalmente, tratarlo o filtrarlo para ser reutilizado y, además, solo el 1 % permanece en la pieza para garantizar el tratamiento en el corte. Se hace necesario plantear otros métodos de refrigeración que no conlleven un coste energético y económica tan elevado. No obstante, a la hora de escoger un mejor método de refrigeración, debemos comparar si la eficiencia en el corte iguala o supera la del mecanizado húmedo.

Actualmente la refrigeración interna es la que está dando mejores resultados. Por el interior de la herramienta y en contacto con la cuchilla de corte, tal como se muestra en la figura 2.1, circula fluido refrigerante, de forma que el calor se transfiere al circuito de refrigeración, no se pierde lubricante durante el proceso, pero no se implementa la lubricación en el corte.

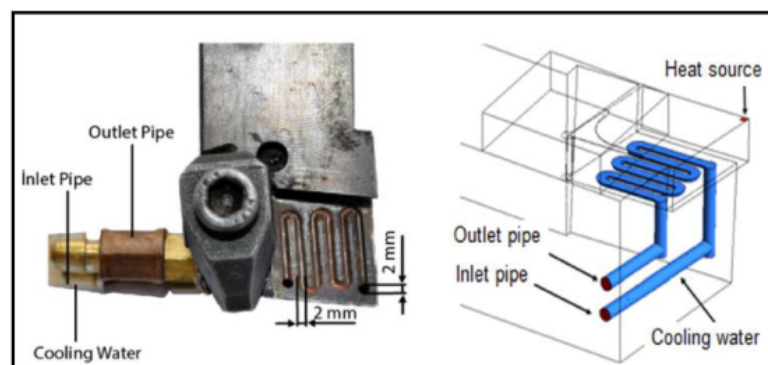


Figura 2.1: Refrigeración interna.[RYK+17]

La refrigeración indirecta criogénica, explicada por Pereira et al. [PRFV+15] y mostrada en la figura 2.2, mediante el uso de  $CO_2$  o nitrógeno, es una opción de coste elevado debido a las condiciones de los circuitos de refrigeración antes del inyector o a las dificultades de fabricación de herramientas con micro-conductos para la circulación del refrigerante. Además ocurre lo mismo que en el caso del lubricante líquido, el producto se pierde o desperdicia.

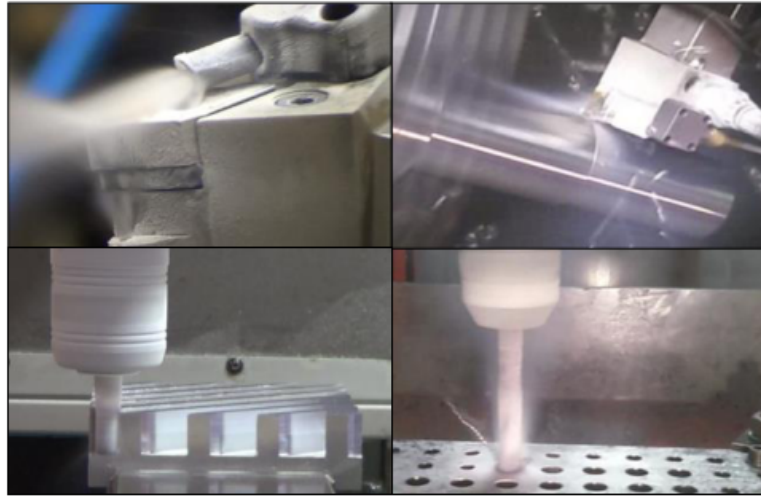


Figura 2.2: Refrigeración indirecta.[PRFV+15]

Otra opción es evacuar el calor mediante tubo de calor. La transferencia de calor se produce sin el uso de fluidos y solo por el contacto del tubo con la herramienta de corte, tal como se muestra en la figura 2.3, permitiendo controlarla a partir de los parámetros de diseño del tubo.

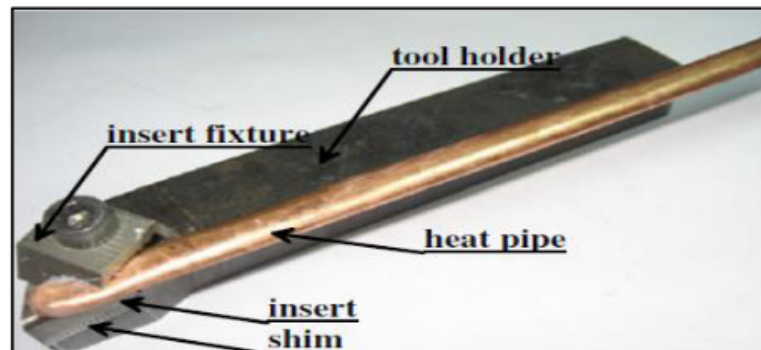


Figura 2.3: Tubo de calor.[RYK+17]

Con el fin de aportar la lubricación no conseguida en la refrigeración interna o en la transferencia de calor mediante tubo, se implementan lubricantes sólidos, método mostrado en la figura 2.4, como el difluoruro de calcio ( $CaF_2$ ), en la cara de flanco de la herramienta o en la cara de desprendimiento, donde la lubricación es un 20 % más eficiente.

La alternativa a todos estos métodos es la refrigeración en seco. Pero tiene en contra todas las afectaciones, anteriormente explicadas, sobre el rendimiento del proceso, la durabilidad de la herramienta y la calidad de la pieza. Para mitigar estos efectos se investiga diferentes materiales de fabricación de la herramienta de corte, ya sean metales duros, uso de carburo tenaz en las plaquitas intercambiables o de recubrimientos como los siguientes: metales resistentes,

aleaciones, carburos cementados, cerámicos recubiertos, ELBOR (nitruro de boro), nitruro de titanio u óxido de aluminio (alúmina).

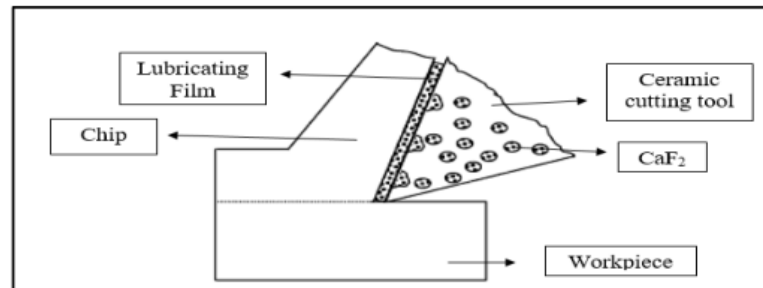


Figura 2.4: Lubricante sólido.[RYK+17]

Pero no todos los materiales pueden ser mecanizados en seco o no todos tienen un comportamiento eficiente a éste método. Los aceros fundidos son los que mejor respuesta dan, nos explican en el artículo de Goindi y Sarkar [GS17], pero para evitar elevadas temperaturas es necesario reducir la velocidad de corte a valores comprendidos entre los 250 m/min y los 300 m/min. En este método, el estudio de la incidencia del filo de corte es muy importante, demostrándose que un elevado ángulo de desprendimiento sumado a un bajo ángulo de filo producen el decrecimiento de la temperatura en la herramienta a valores comprendidos entre los 200 °C y los 120 °C con velocidades de corte bajas.

Existen muchas implementaciones en desarrollo que serán expuestas en la Sección 2.2, pero la más económica y fácil de implementar es el uso de aire comprimido, que puede incorporar el uso de lubricantes mediante micro-pulverizado (MQL) y que permite aumentar las velocidades de corte en torneado de piezas a valores estándar de producción, con calidades superficiales y dimensionales muy elevadas o no muy alejadas de la fabricación mediante lubricante líquido.

Como explican Swain et al. [SPRS22], el uso del aire comprimido mediante tubo Vortex en mecanizado de piezas reduce el caudal de fluido refrigerante de valores comprendidos entre los 10 l/min y los 100 l/min, en refrigeración líquida externa, a valores cercanos a los 15 ml/min de aire comprimido. Si hablamos de micro-pulverizado, nos situamos en valores de caudal de lubricante líquido de 0,25 ml/min a 8,5 ml/min, que se suman al caudal de aire comprimido. Esto permite un aumento en la velocidad de corte del mecanizado seco alcanzando valores que superan los 400 m/min. Sarma y Dixit [SD07] demuestran el beneficio conseguido con este método en el acabado superficial de la pieza, sin el uso de lubricante y con velocidades de corte de 480 m/min para acero fundido.

Finalmente, se han realizado diversos estudios comparativos. Por ejemplo, en el realizado



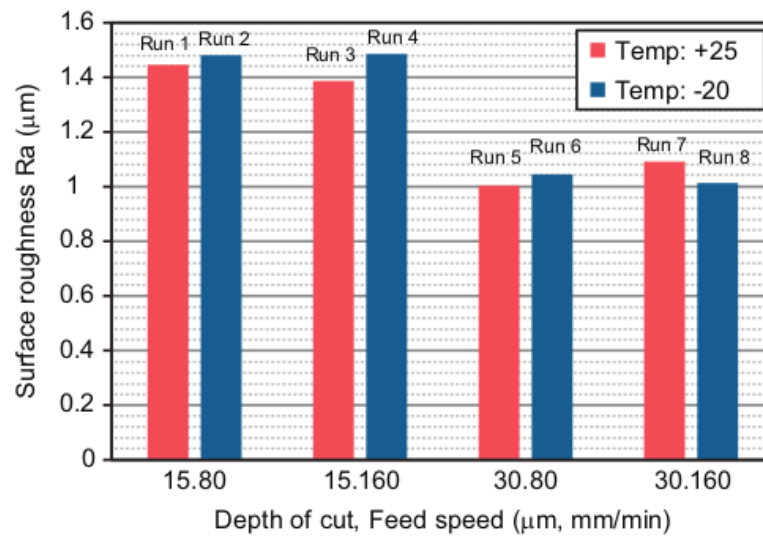


Figura 2.5: Estudio de la rugosidad en pieza.[LL11]

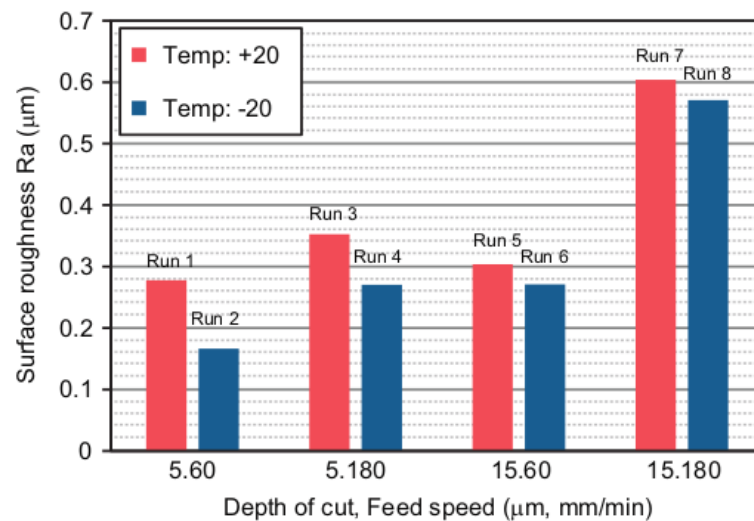


Figura 2.6: Estudio de la rugosidad en herramienta.[LL11]

por Choi et al. [CLJ01] se comparan los efectos de la refrigeración con aire comprimido frío y refrigerante en husillo de tipo SCM4 y SCM21 para muela cilíndrica utilizando un parámetro de presión en la ventilación de 0'4 MPa (4 bar), velocidad del fluido entre 40 m/s y 80 m/s, utilizando una boquilla de ventilación de  $\varnothing 9,3$  mm y  $\varnothing 12,3$  mm y temperatura de ensayo -10 °C. Del estudio se deriva que la rugosidad del material tiene tendencia similar con la profundidad de corte y que, a menor diámetro de boquilla, mejor acabado superficial. De igual forma, en el estudio de Lee y Won [LL11] realizado con micro-muela, se comprueba que si se realiza un estudio paralelo entre la rugosidad superficial del material a mecanizar y de la herramienta, se obtienen mejores resultados en la pieza mecanizada con temperaturas de refrigeración cercanas

a los 20 °C. En cambio, en la herramienta ocurre lo contrario, la vida útil de la herramienta se alarga con temperaturas más bajas cercanas a los -20 °C, tal como se observa en la figura 2.5 y 2.6. La diferencia no es mucha y será siempre preferible conservar la herramienta.

### 2.1.1. Tubo Vortex

El sistema de enfriamiento por aire comprimido es el más ecológico, decrementa las fuerzas de corte, incrementa la vida útil de la herramienta, el acabado superficial de la pieza, facilita la expulsión de viruta, no es perjudicial para los trabajadores y es fácil de implementar, sustituyendo los sistemas de lubricación tradicionales por un sistema como el que se muestra en la figura 2.7.

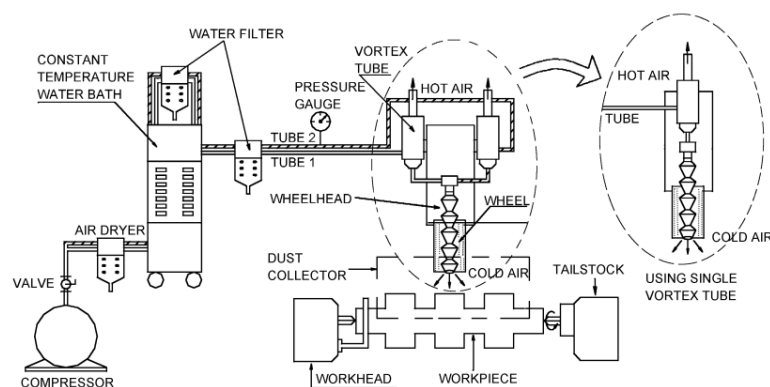


Figura 2.7: Esquema de equipo de refrigeración Vortex experimental.[CLJ01]

El tubo Vortex, definido por Swain et al. [SPRS22], permite la separación térmica de una proporción de aire caliente y otra fría. Esto se realiza mediante la introducción de aire comprimido por un lateral del tubo, a través de una circulación forzada el fluido se desplaza hasta el final de tubo para, posteriormente extraer una parte por el orificio trasero y el resto retornarlo por el interior del canal. Este fluido de retorno es expulsado por la boquilla principal a una temperatura mucho menor a la de entrada. El elemento está representado en la figura 2.8.

Mucho se ha investigado, tal como resumen Xue et al. [XAK10], sobre el funcionamiento físico del tubo Vortex. En los años 30 del siglo XX, Georges J. Ranques inició estas investigaciones basando su modelo en el efecto de un proceso de compresión y expansión. Posteriormente, Hilsh pensó que la separación térmica del fluido se debía a la fricción en la entrada del tubo. Continuó el estudio Kurosaka, quien reaccionó al sonido que se produce en el tubo proponiendo un modelo basado en el estudio de las ondas. Fulton estudió el sistema a partir de la variación de la viscosidad y turbulencia. A partir de la medición de la temperatura en diversos tramos

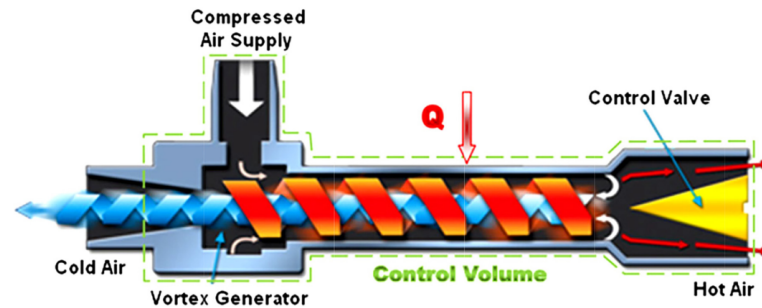


Figura 2.8: Representación del tubo Vortex. [SPRS22]

del tubo se observó que se producía una segunda circulación entre el fluido frío y el caliente, de forma que aparecía un proceso de intercambiador térmico entre dos fases, pero esta segunda circulación solo aparecía en tubos de boquilla corta. Finalmente, se ha observado que con tubos de mayor envergadura se produce un gradiente estático de temperatura. En cualquier caso no queda claro como modelizar el tubo Vortex actualmente y se ha optado por entender que en el proceso ocurren sumadas todas las opciones estudiadas a la vez.

## 2.2. Estado del arte de la CFD

La dinámica de fluidos computacional es relativamente joven, unos 50 años, y guarda una estrecha interrelación con el desarrollo de la capacidad de cómputo del hardware. Actualmente, las predicciones en materia de mecánica de fluidos se basan en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, sustituyendo al método anterior de las ecuaciones de Euler, utilizadas en la actualidad únicamente para cálculos preliminares de diseño. No obstante, en materia de diseño aerodinámico, la teoría de control también juega un papel importante. El método de los volúmenes finitos para RANS de segundo orden está siendo implementado en mallas de 100 millones de celdas y también se resuelven problemas en flujos viscosos para sistemas transónicos y supersónicos.

Un ejemplo práctico de simulación RANS aplicado a la refrigeración en procesos de mecanizado lo muestran Stachurski et al. [SSKN22], donde imponen las condiciones de contorno, las condiciones iniciales del fluido y estudian el flujo de aire en la salida y la superficie de influencia sobre la pieza a refrigerar. En este estudio, se implementa el modelo "SST- $k-\omega$ ", un modelo híbrido entre el " $k-\omega$ " y el " $k-\epsilon$ ", para calcular la eficiencia del chorro de aire sobre la superficie de refrigeración a partir de la relación entre el caudal másico en la pieza y el caudal de salida de la boquilla, concluyendo que la mejor inclinación en este tipo de mecanizados es situando

la refrigeración con una inclinación de  $45^\circ$ . Por otro lado, Alberdi et al. [ASP<sup>+</sup>11] estudian directamente el diseño de las boquillas de inyección de aire para estos procesos y la forma del fluido de salida con cada tipo de boquilla.

No obstante, como aclaran Witherden y Jameson [WJ17], la CFD presenta limitaciones para el estudio de flujos turbulentos separados en el diseño aerodinámico. Con fenómenos de este tipo o estudio de transitorios, todavía el túnel de viento es más utilizado debido a la amortización de su coste, ya que, una vez fabricado el modelo, permite obtener muchos más datos del sistema y en menor tiempo. Para el cálculo de fluidos internos en turbo-máquinas, estructuras, estudio del ruido o fenómenos de tipo vórtice también aparecen problemáticas a la hora de aplicar estos métodos de resolución RANS.

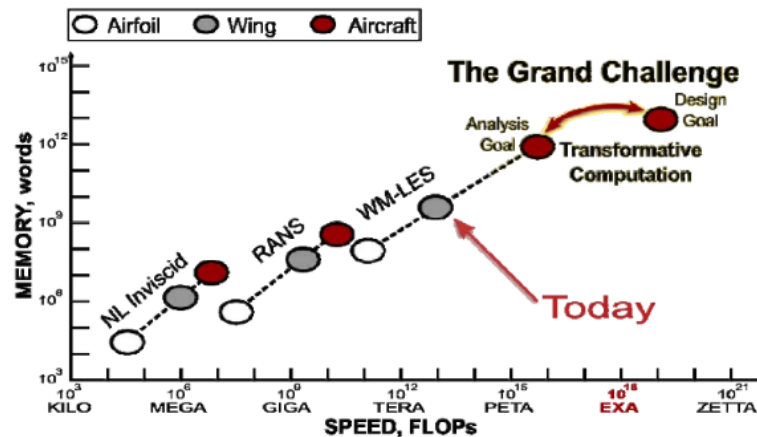


Figura 2.9: Coste estimado de la CFD por método.[WJ17]

En la simulación de grandes remolinos (LES) está comprobada la buena aproximación de las predicciones, pero necesita de grandes avances en hardware, tal como se muestra en la figura 2.9, de igual manera que podemos compararlo con el coste del resto de métodos predictivos. El desarrollo de la capacidad de cómputo año tras año sigue la tendencia de la ley de Moore, pero el desarrollo de la capacidad de memoria está siendo de menor tendencia. Esto complica el cálculo de los métodos numéricos en dinámica de fluidos ya que, aun habiendo incorporado algoritmos que reducen el número de FLOPS requeridos, necesitan, igualmente, capacidades de memoria elevadas. En la tabla 2.1 podemos ver una comparativa.

La computación paralela abre la puerta a resolver problemas más complejos. No obstante, cuando son problemas que, por sí, requieran de iteraciones, las propias iteraciones de la sincronización del paralelismo dificultan estas mejoras. Además, se complica el desarrollo del código, lo que produce que la tendencia futura sea la de implementar arquitecturas computacionales orientadas a sistemas de uso específico a la CFD.

	1994	2014	Ratio
MFLOP/s	33	604.000	18.303
MB/s	176	68.000	386

Cuadro 2.1: *Impacto del progreso de cómputo en 20 años [WJ17].*

Otro método en desarrollo es el de elementos espectrales discontinuos de alto orden, como el método de Galerkin, explicado por Mengaldo et al. [MDM<sup>+</sup>15], y utilizado en simulaciones donde se producen discontinuidades o irregularidades en la malla. Este método se resume en representar la solución de las ecuaciones de orden superior dentro de cada elemento malla, discontinuo entre elementos continuos, como ocurre en el método de los elementos finitos. Posteriormente, mediante funciones de flujo se aproxima entre los elementos vecinos, lo que permite una buena implementación paralela.

Por otro lado se está trabajando en métodos híbridos compuestos por el método RANS y el LENS. Chaouat [Cha17] explica que el mejor método para flujos turbulentos es la simulación numérica directa, resolviendo todas las escalas en una malla con un tamaño de celdas menor del orden de magnitud de Kolmogorov. Las aplicaciones RANS son buenas cuando el tiempo de variación del fluido tiene una frecuencia mucho menor que el de turbulencia. En cambio, la simulación LES es mejor en análisis de capa límite, pero requiere de un coste computacional mayor. La hibridación de los 2 modelos permite reducir ese coste y obtener resultados de análisis del sistema completo.

Finalmente, el aprendizaje máquina o aprendizaje profundo también está siendo estudiado para aplicaciones CFD. Calzolari y Liu [CL21], demuestran el abaratamiento de los coste computacionales y destaca su uso en aplicaciones meteorológicas. Kochkov et al. [KSA<sup>+</sup>21] hacen uso del aprendizaje para conseguir modelos de simulación más eficientes, consiguiendo la misma exactitud en menor tiempo.

### 2.2.1. Software de simulación CFD

Entre los distintos programas comercializados o libres del ámbito de la ingeniería, encontramos diferentes aplicaciones especializadas o generales para distintos ensayos o predicciones. En la tabla 2.2 se analizan algunos de ellos:

<b>SOFTWARE</b>	<b>Descripción</b>
OpenFOAM	Software de código abierto con variedad de resolvedores
ANSYS	Análisis estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos, electromagnetismo y campos acoplados
FLOEFD	Análisis de fluidos interiores y exteriores de flujos transitorios y estacionarios
Simcenter StarCCM	De la empresa SIEMENS, permite predicciones multifísicas
FLOW-3D	Resolución de superficies libres complejas y fluidos contenidos
Helyx CFD	Derivado de OpenFOAM con interfaz gráfica
HecRas y Iber	Análisis de inundaciones en una y dos dimensiones
Autodesk CFD	Análisis de transferencia de calor y diseño de flujos
Solidworks flow simulation	Análisis de la interacción de líquidos y fluidos en contacto con piezas de diseñadas en SolidWorks

Cuadro 2.2: *Resumen de programas CFD actuales.*

## 2.3. Campos actuales de investigación

Muchos artículos se están publicando en los últimos años en relación a la refrigeración de los procesos de fabricación, como podemos ver en la figura 2.10. De los artículos nombrados en el Capítulo 2 destacamos nuevos campos de investigación en los procesos de mecanizado de todo tipo. Se está trabajando en la incorporación de micro-vibraciones por ultrasonidos en la herramienta con el fin de reducir los esfuerzos en el corte, medida que es difícil de implementar a causa de las propias vibraciones de la maquinaria. También se está estudiando el precalentamiento del material a mecanizar de forma localizada y previo al corte de la herramienta con láser, ya que esto aumenta la velocidad de corte en seco.

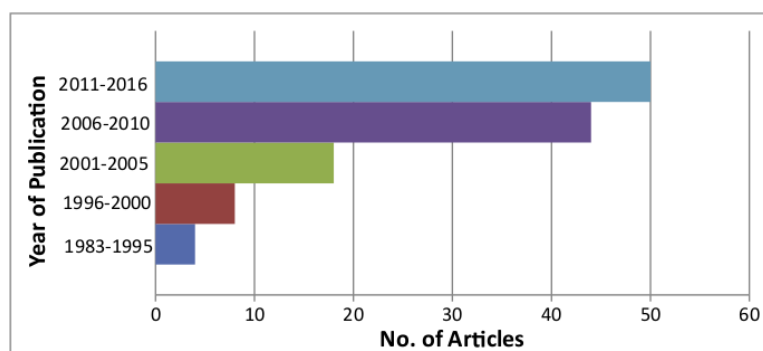


Figura 2.10: N<sup>o</sup> de artículos publicados. [GS17]

El micro-pulverizado (MQL) también está siendo investigado en profundidad con nuevos productos lubricantes y a diferentes caudales de refrigeración por aire. Este sistema está demostrando que es un buen método de refrigeración en aleaciones de magnesio, cobre, acero fundido, aceros de baja aleación y aceros al carbono simples. EL MQL ayuda a la no adhesión de material a la herramienta.

Como producto de refrigeración alternativo a los lubricantes líquidos se continua con la investigación en la refrigeración por nitrógeno líquido, ya que, además de conseguir temperaturas de trabajo muy bajas, realiza la función de lubricar. Otras sustancias que están siendo estudiadas en el micro-pulverizado son los aceites vegetales, el pulverizado de agua, el aire comprimido mediante tubo Vortex, el uso de aditivos o el  $CO_2$ .

Otros campos futuros de investigación pueden ir encaminados al desarrollo de materiales autolubricantes para la fabricación de herramientas de corte, como son los materiales cerámicos, el diamante, el TiAlN u otros.

En cuanto a la investigación en simulación CFD, se ha podido comprobar que también

existen muchos ámbitos de desarrollo. La mejora de los procesadores impulsa la aplicabilidad de la CFD, pero sigue siendo necesario un mayor avance en los componentes de memoria. Esto condiciona la creación de aplicaciones específicas paralelas, luego existen también campos de investigación en esta materia. Tanto el desarrollo en mallado como los algoritmos y estrategias de resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, así como la aplicación de la inteligencia artificial como nuevo paradigma de la simulación CFD inspiran los trabajos actuales.



## Capítulo 3

# Definición y objetivos del trabajo

En los siguientes capítulos se procede a la modelización, diseño, simulación, análisis y comprobación del sistema de refrigeración por aire comprimido mediante tubo Vortex de un proceso estándar de torneado de acero fundido mediante dinámica de fluidos computacional.

El sistema a estudiar ejemplificado en la figura 3.1, es el proceso típico de torneado mediante el avance de la herramienta de corte sobre la pieza a mecanizar que describe un movimiento angular sobre su eje central, la diferencia principal que se va a contemplar es la forma que la viruta describe y la afectación del movimiento angular de la pieza mecanizada. En este tipo de mecanizados la profundidad de cortes está relacionada con la geometría de la viruta que se desprende. El valor del espesor de la viruta ( $t_c$ ) siempre es mayor que la profundidad de corte ( $t_o$ ), pero es esta relación ( $t_o/t_c$ ) la que define el tipo de viruta generada.

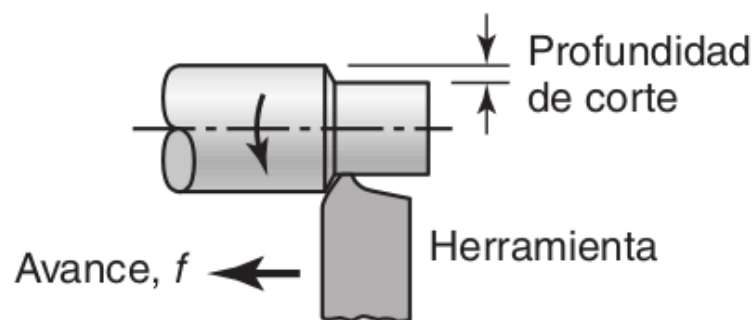


Figura 3.1: Torneado recto.[KS08]

Es importante hablar de la forma de la viruta que se genera porque condicionará la cantidad de aire refrigerante en contacto con la superficie de la herramienta. La viruta se puede clasificar según su forma en:

- Continua: Producida en materiales dúctiles, mediante altas velocidades de corte o ángulos

elevados de ataque. No interesa que se desarrollen debido a la acumulación que se produce.

- De borde acumulado: Capa que se acumula sobre la herramienta hasta que adquiere una longitud en la que se rompe, el material suele quedarse depositado sobre la herramienta.
- Aserradas: De tipo discontinuo, aparecen en materiales de baja conductividad térmica y resistencia como el titanio.
- Discontinuas: Los segmentos de material pueden estar firmemente sujetos o muy sueltos entre ellos debido a velocidades de corte extremadamente bajas o altas, mala sujeción de la herramienta, fallo de la lubricación o materiales frágiles.

Para el caso estudio se toma el modelo de viruta de borde acumulado, el que suele aparecer en acero fundido y el cual podemos controlar, permitiendo que, con una baja profundidad de corte, la longitud del borde generado se vaya rompiendo y desprendiendo rápidamente, tal como se observa en la figura 3.2, donde se definen los parámetros que configuran el proceso de corte en la interacción de la herramienta con la pieza.

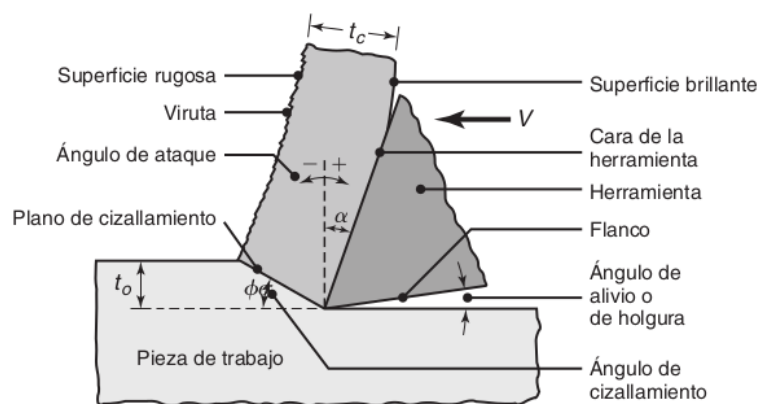


Figura 3.2: Esquema de corte bidimensional. [KS08]

Como se pretende analizar el fluido de refrigeración en contacto con la herramienta de corte, también es importante hablar del perfil de temperaturas generado sobre ésta en el proceso de cilindrado. La generación de calor se produce en la zona de cizallamiento y en el contacto entre la herramienta y la viruta. La temperatura más elevada se encuentra a la mitad de la herramienta de corte y es ésta la que sufre un mayor estrés térmico, como se observa en la figura 3.3. La pieza mecanizada no sufre un aumento elevado de temperatura y en la viruta es indiferente, ya que se desprende durante el proceso. Por lo tanto, el análisis debe efectuarse buscando la mayor direccionalidad del chorro de aire comprimido a la zona de desprendimiento, es decir, hacia la cara de la herramienta en contacto con la viruta. La elevada temperatura es

un factor de riesgo en el mecanizado ya que reduce la resistencia, la dureza y la rigidez de la herramienta aumentando el desgaste. También produce variaciones en el dimensionado de las piezas y pueden ocurrir cambios físicos en la superficie de la pieza que afecten a sus propiedades materiales. La temperatura media se relaciona directamente con la velocidad de corte y el avance de la herramienta, factores que determinan la productividad de una máquina, de manera que si se consigue reducir la temperatura en la herramienta, disminuyendo su desgaste, y se aumentan las velocidades de corte y el avance, la reducción del coste por pieza se verá mermado, al poder producir más piezas en menor tiempo y alargar la vida útil de la herramienta.

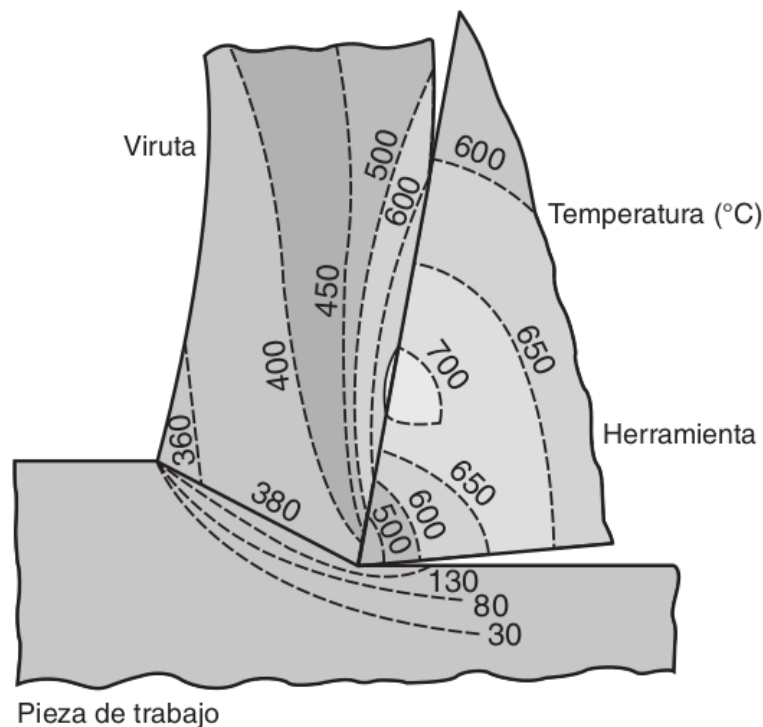


Figura 3.3: Distribución característica de temperatura.[KS08]

Para el estudio de este problema se procede al diseño e implementación de un modelo CFD mediante software FLOEFD. Para ello se plantean los siguientes objetivos:

- Modelización del flujo turbulento y las ecuaciones de Navier-Stokes.
- Modelización de la convección externa forzada.
- Representación 3D del sistema a estudiar.
- Mallado del sistema a simular.
- Parametrizado del problema en FLOEFD.
- Análisis de los resultados, modificaciones y comprobaciones.



# Capítulo 4

## Base teórica

### 4.1. Mecánica de fluidos

En el análisis de la dinámica de fluidos el movimiento del fluido viene definido por la conservación de la masa, el momento y la energía. Tal como nos definen García et al. [NGF21], los modelos escogidos para describir un flujo pueden ser:

- Molecular: En el que se estudia el flujo como sistema formado por moléculas.
- De volumen de control finito: En el que se define una región finita donde el flujo se desplaza conjuntamente a él o lo atraviesa. Se describen las ecuaciones en forma integral.
- De volumen de control infinitesimal: De tamaño  $\delta V$  que define un medio continuo. Se describen las ecuaciones en forma diferencial.

El flujo en la dinámica de fluidos se suele describir a partir de una concepción Euleriana, dónde se describen las variables en cada punto y pueden cambiar con el tiempo. A diferencia de la termodinámica, en la que se aplica una concepción Lagrangiana y las propiedades se aplican a cada partícula.

De esta manera, si aplicamos la 2ª Ley de Newton a una partícula:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (4.1)$$

Siendo  $\vec{F}$  la fuerza que actúa sobre la partícula de masa  $m$  y  $a$  su aceleración. De tal manera que podemos expresar la aceleración:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (4.2)$$

Como la partícula se desplaza en todo momento con el fluido, la velocidad será igual al valor local de campo:

$$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t) = u(x, y, z, t)\hat{i} + v(x, y, z, t)\hat{j} + w(x, y, z, t)\hat{k} \quad (4.3)$$

Donde  $u = dx/dt$ ,  $v = dy/dt$  y  $w = dz/dt$ , siendo la aceleración de la partícula la derivada sustancial de la velocidad, de manera que para cualquier momento  $t$ , el campo de aceleración del fluido tiene que ser igual a la aceleración de la partícula ocupando la posición  $(x, y, z)$ , pasando de una concepción Lagrangiana a una Euleriana:

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (4.4)$$

Podemos observar que aparece un término,  $\delta \vec{V} / \delta t$ , referido a la aceleración local, término que para la simulación no tendremos en cuenta, ya que se trata de un análisis estacionario y este término solo es diferente de 0 para flujos no estacionarios. El segundo término es la aceleración convectiva, la cual describe el efecto de la partícula que se desplaza de un lugar a otro con el flujo. Formulada esta ecuación, queda plantear la conservación de la masa, la conservación del momento y la conservación de la energía para acabar de definir el flujo:

#### 4.1.1. Conservación de la masa

A partir de un elemento diferencial de volumen  $\delta V$  en el que no se aporta o se desprende masa  $\delta m$ :

$$\delta m = \rho \delta V \quad (4.5)$$

Podemos aplicar la derivada material:

$$\frac{D(\rho \delta V)}{Dt} = \delta V \frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{D(\delta V)}{Dt} = 0 \quad (4.6)$$

Apareciendo el término de divergencia de la velocidad, de manera que la ecuación nos queda:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (4.7)$$

Desarrollando para conseguir la ecuación diferencial conservativa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4.8)$$

### 4.1.2. Conservación del momento

Sabiendo que la suma de fuerzas exteriores modifica el momento lineal del sistema, tenemos que tener en cuenta dos tipos de fuerzas: las fuerzas de volumen  $f_m$ , no inerciales y gravitatorias actuando sobre el volumen; y las fuerzas de superficie, que son la presión y la viscosidad. Del segundo tipo de fuerzas tenemos un tensor que es suma del tensor de presiones y el tensor de esfuerzos viscosos:

$$\tau = \tau_p + \tau' = \begin{pmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau'_{xx} & \tau'_{yx} & \tau'_{zx} \\ \tau'_{xy} & \tau'_{yy} & \tau'_{zy} \\ \tau'_{xz} & \tau'_{yz} & \tau'_{zz} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

De manera que el tensor de esfuerzos viscosos para un fluido newtoniano incompresible con propiedades constantes se relaciona con el tensor de deformación del volumen, a partir de la viscosidad dinámica:

$$\tau'_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (4.10)$$

Si igualamos fuerzas:

$$\sum F = \frac{dP}{dt} \quad (4.11)$$

O de forma análoga, la aceleración de un volumen infinitesimal y móvil con el fluido tiene que ser igual a las fuerzas que actúan sobre el volumen:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \tau + \rho f_m \quad (4.12)$$

Conocida como la ecuación de Navier-Stokes. Ecuación que ya describe la turbulencia, pero cuando se requiere representar adecuadamente las escalas entre términos grandes y términos turbulentos de escala muy pequeña y que aparecen generalmente en la superficie de sólidos, con la aparición de la capa límite, como es el caso de este estudio; se necesita promediar las ecuaciones descomponiendo las variables  $f = \bar{f} + f'$ . De esta manera es posible reescribir la ecuación de Navier-Stokes promediada de Reynolds (RANS), ecuación a la que hacíamos referencia en el capítulo 2:

$$\bar{\rho} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{\rho} \nabla (\bar{v}_i \bar{\mathbf{v}}) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{v}_i - \bar{\rho} \frac{\partial v'_i v'_j}{\partial x_i} + \bar{\rho} \bar{f}_{mi} \quad (4.13)$$

### 4.1.3. Conservación de la energía

Para obtener la ecuación de la conservación de la energía partimos de la primera ley de la Termodinámica aplicada a un volumen de fluido en su forma integral:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) dV = \int_V \rho \mathbf{f}_m \cdot \mathbf{v} + \oint_S (\hat{\mathbf{n}} \boldsymbol{\tau}) \cdot \mathbf{v} dS - \oint_S (\mathbf{q} \cdot \hat{\mathbf{n}}) dS + \oint_V \dot{Q} dV \quad (4.14)$$

Donde  $\mathbf{q}$  es el vector de flujo de calor asociado a una superficie (conducción) y  $\dot{Q}$  el calor transferido por unidad de volumen y tiempo (radiación). Aplicando el teorema de transporte de Reynolds para un volumen de control fijo:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) dV + \oint_{SC} \rho \left( e + \frac{1}{2} v^2 \right) \mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS = \int_{VC} \rho \mathbf{f}_m \cdot \mathbf{v} + \oint_{SC} (\hat{\mathbf{n}} \boldsymbol{\tau}) \cdot \mathbf{v} dS - \oint_{SC} (\mathbf{q} \cdot \hat{\mathbf{n}}) dS + \oint_{VC} \dot{Q} dV \quad (4.15)$$

Ecuación que aplicada al caso particular de flujo estacionario e incompresible donde no hay aporte de trabajo de las fuerzas másicas, ni superficiales, ni energía calorífica aportada, nos lleva a la ecuación de Bernoulli.

## 4.2. Termodinámica

El análisis de la convección de calor de la herramienta de corte, como se ha desprendido de la ecuación de conservación de la energía, dependerá de las condiciones de velocidad del fluido sobre la superficie de esta. Tal como explica Cengel [Cen13], podemos calcular la transferencia de calor por convección a partir de la ley de Newton del enfriamiento:

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (4.16)$$

Siendo  $h$  el coeficiente de transferencia de calor:

$$h = \frac{-k_{fluido} (\delta T / \delta y)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (4.17)$$

El coeficiente adimensional de transferencia de calor es el número de Nusselt:

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad (4.18)$$

El número adimensional de Prandtl es:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (4.19)$$



El número de Reynolds es:

$$Re = \frac{VL_c}{v} \quad (4.20)$$

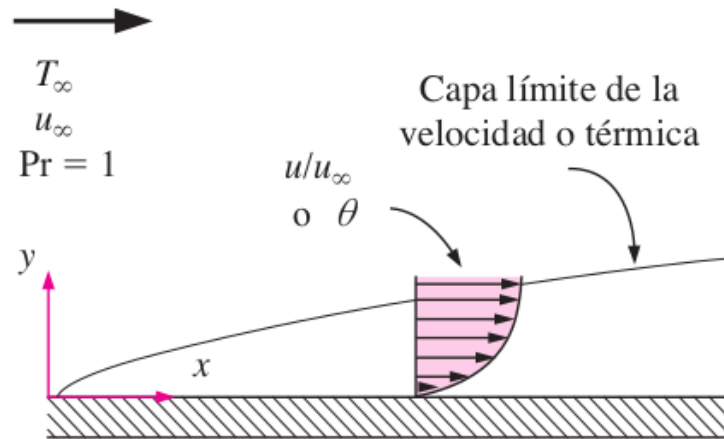


Figura 4.1: Capa límite de velocidad coincidente con la térmica ( $Pr = 1$ ).[Cen13]

Cuando el fluido, en nuestro caso el aire a alta velocidad que recorre la herramienta de corte, interacciona con la superficie a enfriar creando fuerzas de fricción, se genera una capa límite donde se sienten las fuerzas viscosas. Capa límite que está delimitada por la distancia  $\delta$ , valor donde la velocidad de la componente  $u = 0,99V$ . Si hablamos de capa límite térmica, esta distancia  $\delta$  será aquella donde  $T - T_s = 0,99(T_\infty - T_s)$ . El esfuerzo viscoso vendrá dado por la ecuación:

$$\tau_s = C_f \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.21)$$

Donde  $C_f$  es el coeficiente de fricción necesario para calcular la fuerza de rozamiento sobre la superficie, conocida la velocidad del fluido:

$$F_f = C_f A_s \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.22)$$

Utilizando las ecuaciones expuestas anteriormente, en el apartado de mecánica de fluidos, aplicadas al caso de una placa plana, con flujo incompresible, estacionario y paralelo a la superficie, se derivan las siguientes:

- Espesor de la capa límite:

$$\delta = \frac{4,91x}{\sqrt{Re_x}} \quad (4.23)$$

- Coeficiente local de fricción:

$$C_{f,x} = 0,664Re_x^{-1/2} \quad \textit{laminar} \quad (4.24)$$

$$C_{f,x} = 0,059Re_x^{-1/5} \quad \textit{turbulento} \quad (4.25)$$

- Número local de Nusselt:

$$Nu_x = 0,332Pr^{1/3}Re_x^{1/2} \quad \textit{laminar} \quad (4.26)$$

$$Nu_x = 0,0296Pr^{1/3}Re_x^{0,8} \quad \textit{turbulento} \quad (4.27)$$

- Espesor de la capa límite térmica:

$$\delta_t = \frac{4,91x}{Pr^{1/3}\sqrt{Re_x}} \quad (4.28)$$

De lo que se deriva que la convección originada dependerá de la velocidad del fluido, generando una capa límite donde se vean los efectos de las fuerzas viscosas y, dependiendo de la difusividad molecular de la cantidad de movimiento respecto de la difusividad molecular del calor ( $Pr$ ) obtendremos o no una capa límite térmica coincidente con la de velocidad. La determinación de si el fluido es laminar o turbulento vendrá dado por el Reynolds crítico ( $Re_c = 5 \cdot 10^5$ ). Para todas las ecuaciones anteriores, integrando para la longitud de la placa se obtienen los valores promedio.

Por último, dependiendo de la inclinación del chorro de aire con el que enfriemos la herramienta de corte, aparecerán fuerzas de resistencia al movimiento por la presión. El coeficiente adimensional que representa este hecho es el coeficiente de arrastre:

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (4.29)$$

# Capítulo 5

## Modelización del problema

De manera consecuente con el capítulo 4, podemos modelar matemáticamente un flujo concreto mediante la formulación diferencial. A partir de la ecuación de conservación de la masa, la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, conocidas las condiciones de contorno y las condiciones iniciales se genera el sistema de ecuaciones. En caso de que este sistema sea resoluble, obtendremos toda la información del flujo. Con frecuencia es imposible encontrar una solución analítica al problema planteado, lo que nos lleva a tres posibilidades: simplificar las ecuaciones, emplear la mecánica de fluidos computacional y la experimentación, que en cualquier caso siempre será necesaria para establecer si los resultados de las herramientas anteriores son veraces.

Existen muchos métodos numéricos en la mecánica de fluidos computacional. La elección depende del caso que se quiera simular, del tamaño del objeto o fenómeno a estudiar o de la dificultad de resolución de las ecuaciones diferenciales.

FLOEFD utiliza el método de los volúmenes finitos, por el que se traslada la idea de dividir el volumen de control en pequeños volúmenes de fluido, estudiando y aplicando en cada unidad espacial las ecuaciones de Navier-Stokes.

Çengel y Cimbala [[Cen13](#)] introducen el método de solución numérica de los volúmenes finitos como un procedimiento formado por los siguientes pasos:

1. Elección de un dominio computacional y generación de malla o red de nodos formada por celdas.
2. Definición de las condiciones de frontera.
3. Definición del fluido.

4. Selección de los parámetros y algoritmos de solución.
5. Definición de las condiciones iniciales de cada celda.
6. Definición del residuo o tolerancias de cálculo.
7. Iteración de las ecuaciones de transporte para cada campo a calcular, iterando para cada unidad de forma consecutiva en cada iteración.
8. Convergencia y posprocesado de los datos obtenidos en una representación gráfica.
9. Análisis de los datos globales del campo del fluido y de las propiedades integrales.

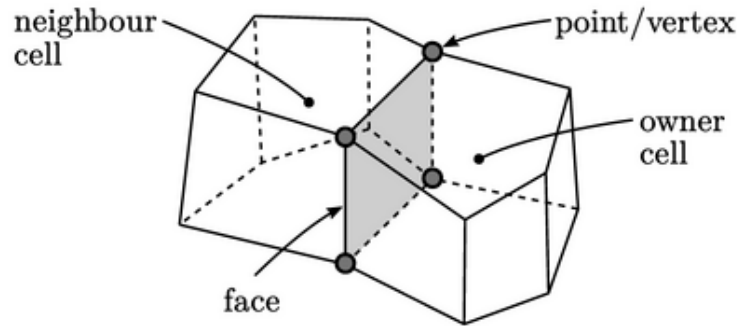


Figura 5.1: Celdas del volumen finito.[GW22]

En la figura 5.1 observamos que podemos construir cada una de las celdas de la malla de nuestro dominio a partir de poliedros formados por 4 o más caras y por 3 o más ejes. Posteriormente se lista cada una de las caras entre volúmenes para discretizar el problema, conocido cada vértice, el volumen de la celda puede ser calculado a partir de la superficie de la cara, conocido el centro de ésta, a partir del teorema de Gauss utilizando  $x$  para describir la posición, anotando  $\nabla \cdot x \equiv 3$ :

$$V = \int_V dV = \frac{1}{3} \int_V \nabla \cdot x dV = \frac{1}{3} \int_S (dS \cdot x) \approx \frac{1}{3} \sum_f S_{cara} \cdot C_{cara} \quad (5.1)$$

Siendo  $S_{cara}$  el vector superficie de la cara analizada y  $C_{cara}$  el vector centro de la cara, calculamos el calculamos el centro del volumen, anotando  $\nabla |x|^2 \equiv 2x$ , de forma similar:

$$C = \frac{1}{V} \int_V x dV = \frac{1}{2V} \int_V \nabla |x|^2 dV \approx \frac{1}{2V} \sum_f S_{cara} |C_{cara}|^2 \quad (5.2)$$

Creada la base de datos para cada celda podemos discretizar las ecuaciones diferenciales parciales, de forma separada para cada campo, en un conjunto de ecuaciones lineales. Se ordenarán las ecuaciones lineales de cada campo  $\psi$  de forma matricial donde  $[A]$  será la matriz de coeficientes de cada celda del dominio y  $[b]$  la matriz de coeficientes fuente:

$$[A][\psi] = [b] \quad (5.3)$$

De manera que, a partir de la discretización de los términos de la ecuación de Navier-Stokes, de cada término transitivo, convectivo, de difusión o fuente, se consigue la integración de los flujos en las caras de los volúmenes.

En el capítulo anterior se comentaba, también, que de forma general el fenómeno de la turbulencia ya venía descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes, y se describió el uso del modelo de los promedios de Reynolds. No obstante, la complejidad de cada tipo de problema a resolver lleva a la necesidad de buscar modelos de turbulencia que no requieran de recursos computacionales tan elevados. Para el método RANS existen varios modelos, pero el modelo estándar industrial utilizado en CFD, en particular en FLOEFD para este trabajo, es el modelo  $k$ - $\epsilon$ . Lam y Bremhorst (1981) nos definen este modelo de transporte a partir de dos ecuaciones y que es explicado en el manual de Mentor Graphics Corporation [Men18][Men11]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_t P_B \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \epsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B) - f_2 C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (5.5)$$

$$\tau = \mu s_{ij}, \quad \tau_{ij}^R = \mu_t s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (5.6)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (5.7)$$

Los coeficientes  $k$  y  $\epsilon$  del modelo se seleccionan a partir de la experiencia, pero para el caso de flujos estacionarios, donde la derivada local respecto del tiempo es cero, la buena o mala elección de los valores iniciales no afecta y será corregido durante el proceso iterativo, en cambio, para simulaciones de periodo corto seleccionar estos valores será clave. Para el resto de coeficientes:  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_{\epsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\epsilon = 1,3$ ,  $\sigma_B = 0,9$ ,  $C_B = 1$  si  $P_B > 0$ ,  $C_B = 0$  si  $P_B < 0$ .

La viscosidad de turbulencia vendrá dada por:

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (5.8)$$

Siendo la función de descarga de Lam y Bremhorst determinada por:

$$f_\mu = (1 - e^{-0,025R_y})^2 (1 + \frac{20,5}{R_t}) \quad (5.9)$$

Donde:

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{ky}}{\mu}, \quad R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon} \quad (5.10)$$

Siendo  $y$  la distancia desde el punto del volumen a la pared y las funciones  $f_1$  y  $f_2$  determinadas por:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu}\right)^3, \quad f_2 = 1 - e^{R_t^2} \quad (5.11)$$

Estas funciones de descarga decrecen la viscosidad de turbulencia y la energía de turbulencia, e incrementan la disipación de turbulencia cuando el número de Reynolds  $R_y$ , calculado a partir de la velocidad media de las fluctuaciones y la distancia a la pared, se hace más pequeño.

En FloeFD la velocidad en las condiciones de pared es cero según la hipótesis de no deslizamiento. Pero en aquellos fluidos no newtonianos en que el esfuerzo cortante exceda el valor de tensión de límite elástico, la velocidad de deslizamiento será calculada como:

$$v_{slip} = C_1 (\tau - \tau_{0,slip})^{C_2} \quad (5.12)$$

Siendo  $C_1$  y  $C_2$  escogidos por el usuario, de igual manera que pueden imponerse valores de temperatura o flujo de calor en la superficie de los sólidos.

Para el cálculo de la capa límite, FloeFD aplica las funciones de pared de dos escalas (2SWF), dos enfoques diferentes, uno cuando la capa límite es gruesa ( $\delta > A \cdot y$ ) y otro cuando es delgada ( $\delta \leq A \cdot y$ ), siendo  $\delta$  el grosor de capa límite,  $y$  calculado como la distancia entre el centro de masa de la celda de volumen de fluido y la superficie del sólido, y  $A$  un coeficiente que depende de las características del fluido. Para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, FloeFD utiliza el valor adimensional  $y^+$ :

$$y^+ = \frac{\sqrt{p\tau_w y}}{\mu} \quad (5.13)$$

Como la malla que utiliza FloeFD es de tipo cartesiano no ajustada al cuerpo, para aquellas

celdas con una distancia a pared muy pequeñas se escoge un valor mínimo de  $y_{up}^+ = 300$ .





# Capítulo 6

## Sistema a simular

Como se viene explicando, la simulación a desarrollar partirá del modelo ensamblado de una sección de cilindro a tornearse de 120 mm, se ha escogido este diámetro por ser una pieza de tipo estándar y porque la dimensión de la pieza no afecta sobre el calentamiento de la herramienta de corte y, sobre el fluido, tampoco nos interesa estudiar la capacidad de enfriamiento de ésta, ya que la mayor parte del calor generado en el corte se produce en la proximidad de la punta de corte de la cuchilla.

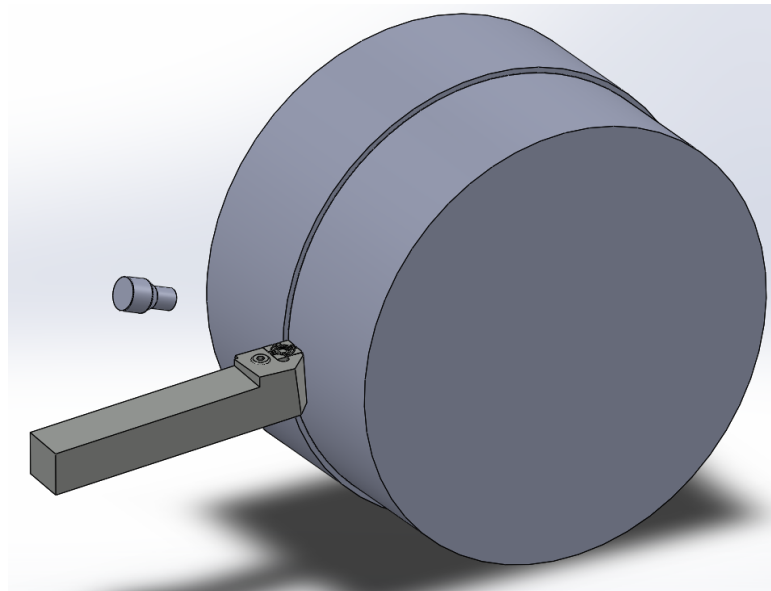


Figura 6.1: Representación del sistema.

En la figura 6.1 podemos ver la representación 3D de este ensamblado. Se ha escogido una herramienta de corte estándar, de geometría romboide, para torneado cilíndrico. Esta cuchilla puede estar fabricada con aleaciones de acero o materiales cerámicos, para la simulación se ha escogido un acero S63198. En cambio, para el cilindro se ha escogido un acero 5135. A efectos

de la simulación no afecta el tipo de acero, solo es para introducir factores de reflexión en la simulación que dependen directamente del brillo de la superficie, es decir, la condición de pared asociada al material. Por otro lado, no se estudia la conducción del calor entre las piezas ya que se considera que el contacto es mínimo y, como definíamos en el capítulo 3, los efectos del calentamiento recaen sobre la herramienta de corte .

El tipo de problema que se plantea es el estudio del flujo externo a los elementos del ensamblado, teniendo en cuenta las siguientes condiciones iniciales:

- El flujo está compuesto de aire.
- La presión del contorno es la atmosférica, 101325 Pa.
- La humedad relativa del contorno es del 50 %.
- La velocidad del aire en el contorno es de 0  $m/s$
- La temperatura del entorno es de 293,2  $K$ .
- Se introduce el efecto de la gravedad para  $g_z = -9,81 m/s^2$ .
- Se realiza el estudio para flujo incompresible, introduciendo una simplificación que puede alterar el resultado final ya que superamos el límite del 30 % de la velocidad del sonido en 80  $m/s$  para flujo incompresibles. No obstante, esto afectará en el cambio de volumen que se produce en la salida de la boquilla, que obviamos por centrar el estudio en las peores condiciones de velocidad, según datos de fabricantes de tubo Vortex para el contacto del aire con la cuchilla.
- El estudio se realiza para flujo laminar y turbulento. Con valores iniciales de intensidad de turbulencia del 0,1 % y longitud de turbulencia de 0,0006 m.

Como condiciones de contorno se han introducido las siguientes:

- Se considera la superficie de la herramienta como pared real a temperatura de 973 $K$ .
- La temperatura del cilindro es la del entorno (hipótesis de no calentamiento del cilindro).
- Se incluye la rugosidad superficial de  $\epsilon = 0,3 \mu m$ .
- Se tiene en cuenta la velocidad de giro del cilindro en el torno. Para el cálculo de la velocidad angular del cilindro hay que tener en cuenta velocidades de corte entre  $15 \div 18$

$m/min$ , para aceros rápidos, y entre  $60 \div 70 m/min$ , de manera que, para los dos casos extremos, podemos calcular la velocidad angular de la manera siguiente:

$$N_1 = \frac{2 \cdot 1000 \cdot V_c}{D \cdot 60} = \frac{2000 \cdot 15}{120 \cdot 60} = 4,17 \text{ rad/s} \quad (6.1)$$

$$N_1 = \frac{2 \cdot 1000 \cdot V_c}{D \cdot 60} = \frac{2000 \cdot 70}{120 \cdot 60} = 19 \text{ rad/s} \quad (6.2)$$

Escogiendo un valor intermedio de  $\omega = 7,5 \text{ rad/s}$ .

Como se puede observar en la figura 6.2, se ha simplificado el modelo inicial por uno en el que el cilindro no es representado con su reducción de diámetro al paso de la herramienta y donde la cuchilla se reduce a la mínima representación de un prisma romboide. Esta reducción se ha realizado a fin de no introducir huecos en la simulación que pueden alterar los resultados o llevarlos a error por problemas de tamaño de malla. Esta acción es recomendada en el uso de cualquier programa de CFD.

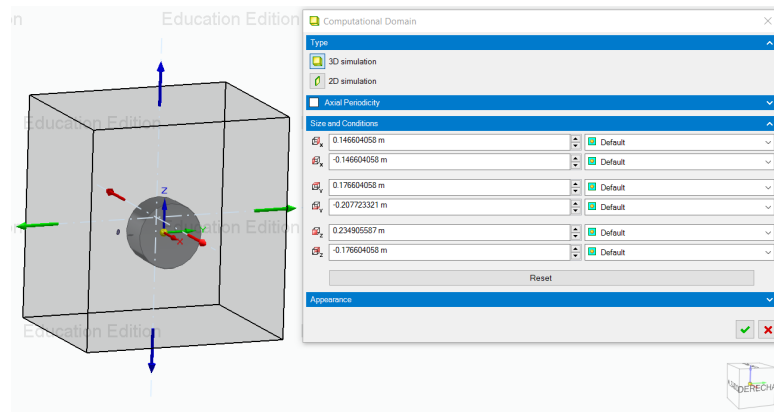


Figura 6.2: Dominio de la simulación.

La elección del entorno es una de las complicaciones añadidas a la preparación de una simulación. Se debe escoger un tamaño lo suficientemente grande para que las variables de contorno se estabilicen con los valores frontera en las sucesivas iteraciones, pero, a la vez, se debe hallar aquel tamaño lo suficientemente reducido para no aumentar el dominio de cálculo del programa, requiriendo de mayor cantidad de memoria y mayor tiempo de cálculo, para este caso se ha escogido un tamaño el doble del diámetro del cilindro.

Para la representación del conducto de entrada de aire, la boquilla, en FLOEFD es suficiente con un cilindro de altura 1 mm, el cual podemos ir desplazando para cada inclinación y distancia de refrigeración. Para este elemento de entrada de aire (INLET), los parámetros de contorno son los siguientes:

- Los fabricantes de tubo Vortex suelen garantizar valores de velocidad comprendidos entre  $180 \div 250 \text{ m/s}$ . Se ha escogido el valor extremo inferior,  $180 \text{ m/s}$ , ya que a menos velocidad, menor serán las fuerzas viscosas y la convección térmica en la herramienta. No se realiza el estudio de los efectos de la geometría en la boquilla del inyector.
- La presión a la salida de la boquilla es la atmosférica.
- Se considera la humedad relativa del 50 % i la temperatura de rocío  $293,2 \text{ K}$ . La temperatura del fluido es  $273 \text{ K}$ .
- Los valores de turbulencia en la frontera del inyector iniciales  $k$ - $\epsilon$  son  $1 \text{ J/kg}$  y  $1 \text{ W/kg}$ , valores que no afectan a los resultados en simulaciones largas, es decir, de tipo estacionario.

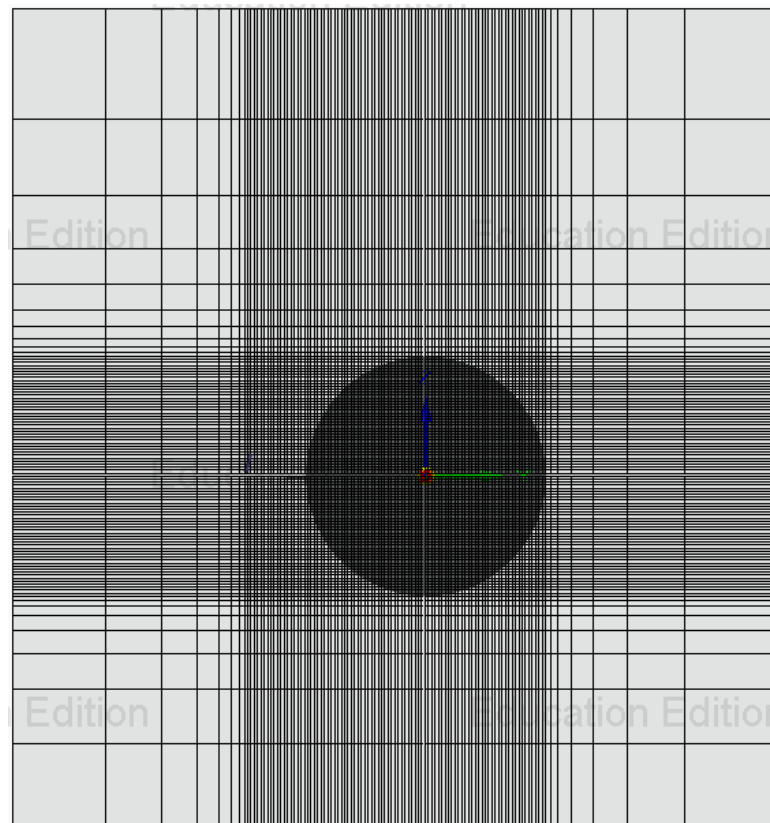


Figura 6.3: Mallado de la simulación.

Otra de las medidas a contemplar es la configuración de la malla. El elemento básico de malla es el hexaedro para simulación 3D con malla estructurada, es decir, existe una conectividad entre las diferentes celdas que permite su ordenado. De tal manera, el uso de mallas estructuradas facilita la convergencia de la iteraciones. En este sentido, el tamaño de cada celda mejora el resultado de la simulación, pero con la distancia de celdas está asociado el tiempo de paso de

---

cálculo. Para una simulación CFD relacionaremos estos valores a partir del número de Courant (Co), dependiendo de la velocidad del fluido:

$$Co = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (6.3)$$

FloeFD adapta el paso de cálculo a la malla generada y solo nos veremos condicionados en la elección de ésta por la capacidad de memoria de nuestra computadora. A lo largo del capítulo 7 se realiza el estudio y análisis de los resultados obtenidos para diferentes tamaños de malla, observando cómo mejora la simulación con la reducción del tamaño de las celdas, decrementando su valor a medida que nos aproximamos a los objetos sólidos o incluyendo una mallado distinto y progresivo para la capa límite.

El último de los parámetros a incluir en el diseño de la simulación son el conjunto de metas que el cálculo deberá aproximar hasta conseguir la convergencia en las iteraciones. Se han programado las siguientes:

- Presión del total de fluido media.
- Temperatura del total de fluido media.
- Velocidad del total de fluido media.
- Viscosidad de turbulencia del total de fluido media.
- Tiempo de turbulencia del total de fluido medio.
- Longitud de turbulencia del total de fluido media.
- Intensidad de turbulencia del total de fluido media.
- Energía de turbulencia del total de fluido media.
- Disipación de turbulencia del total de fluido media.
- Temperatura de las paredes y sólidos.
- Velocidad de las paredes (condición de no deslizamiento).

Una vez creada la simulación, será necesario verificar los resultados mediante el procedimiento descrito por Slater [Sla21], examinando los siguientes elementos:

1. Convergencia de las iteraciones.

2. Consistencia de los resultados.
3. Convergencia espacial.
4. Convergencia temporal.
5. Comparación de los resultados con la experimentación.
6. Comprobación de las incertezas del modelo.

# Capítulo 7

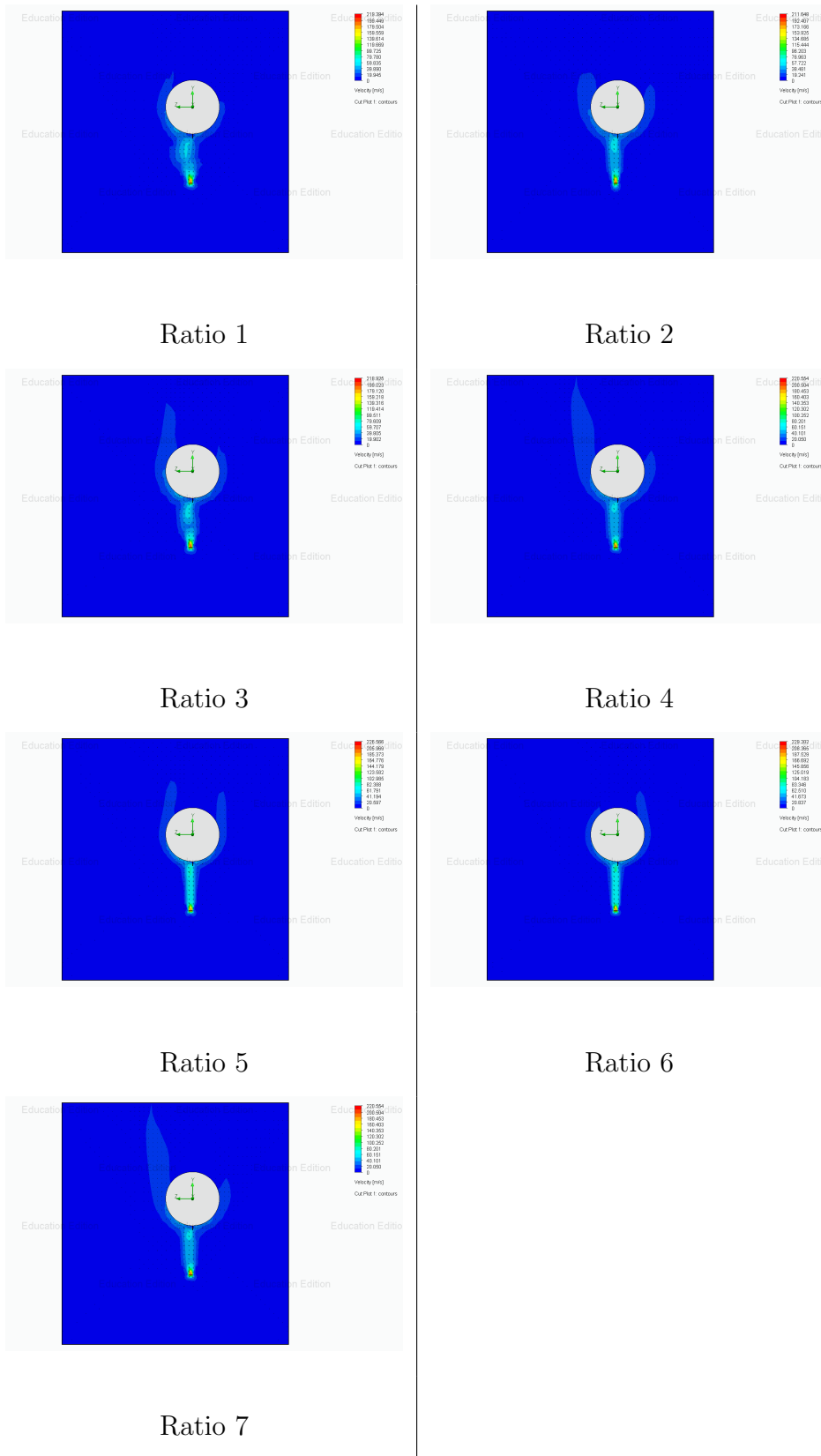
## Análisis de resultados

Realizada la configuración de la simulación, se procede a la búsqueda del mejor mallado, dentro de las posibilidades del computador utilizado con las características siguientes:

- Procesador: Intel® Core™ i7-1165G7 (4 núcleos, frecuencia desde 2.8 GHz hasta 4.7 GHz, 11,44 MiB caché).
- Memoria RAM: 14,90 GiB DDR4 3200 MHz (1 x 16 GB); 2 ranuras para memoria, de las cuales 1 ocupada.
- Almacenamiento: 476,84 GiB SSD M.2 PCIe.
- Controlador gráfico Integrado: Intel® Iris® Xe Graphics.

La primera definición de la malla es la longitud general de celda que, para el caso de FLOEFD, se parametriza a partir del valor de ratio desde 1 hasta 7, como nos explica Johansson [Joh21]. Este parámetro divide el dominio de la simulación en partes iguales pudiendo pasar de un menor a un mayor refinamiento, de manera que un ratio 1 para fluido incompresible representa 2 divisiones por unidad de longitud y un ratio 7, 20 divisiones por unidad de longitud.

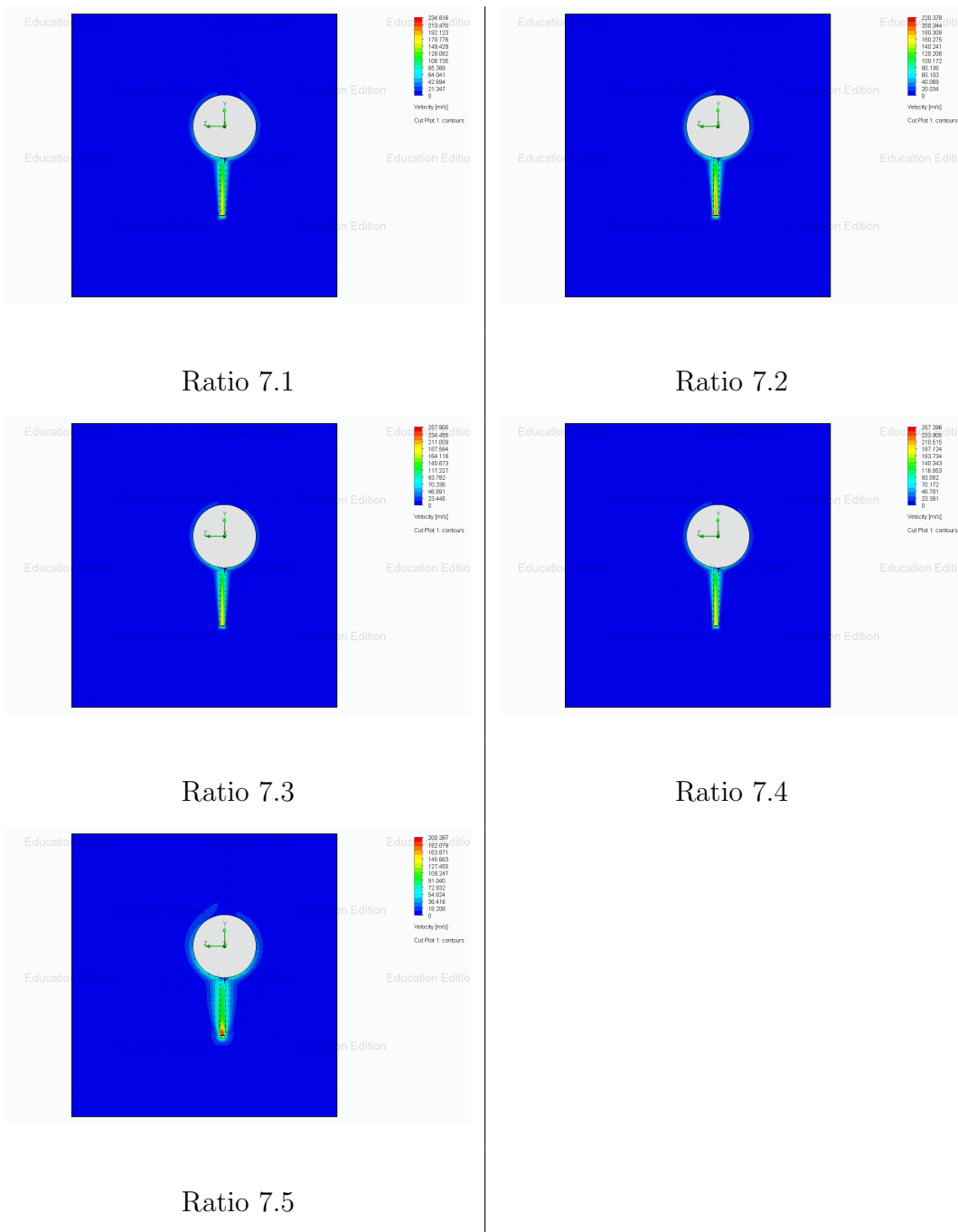
En el cuadro 7.1 podemos ver los resultados gráficos para la velocidad del fluido a diferentes niveles de refinamiento. Estas simulaciones han ido variando el número de iteraciones entorno a las 240, por contra vemos que la resolución ha dado ciertas desviaciones en el fluido que se proyecta desde el inyector. Dada las posibilidad del computador se toma como ratio definitiva el nivel máximo 7. Además se ha indicado que el tamaño mínimo de hueco sea de 0,0005  $m$ , conforme con el ancho mínimo de placa de corte de 1  $mm$ .



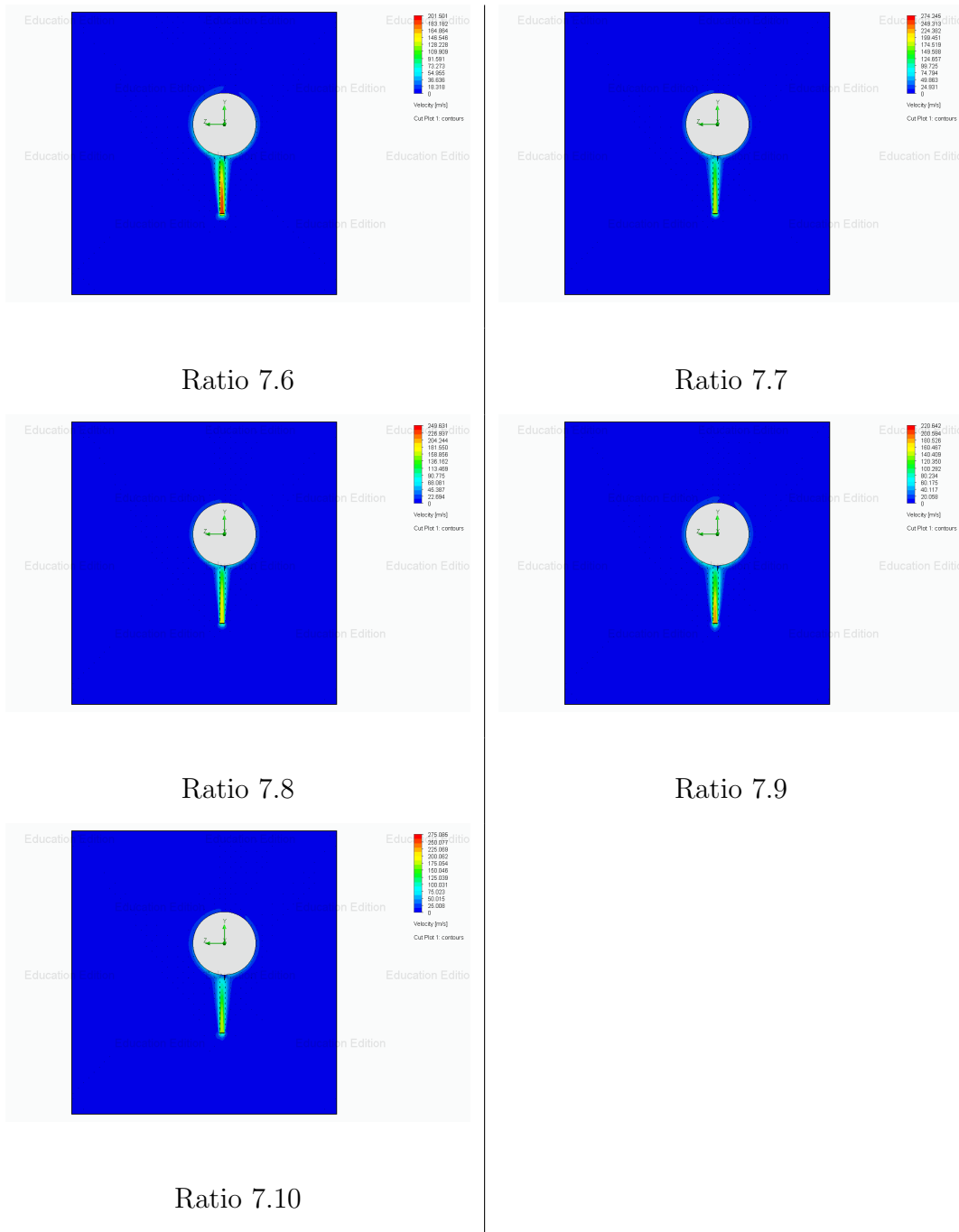
Cuadro 7.1: Velocidad a diferentes tamaños de malla.



Creada la malla general se procede a introducir el factor de ratio de 1 a 10 con el fin de refinar la malla en la proximidad de los sólidos, aumentando la longitud de celda a medida que nos alejamos de éstos. Así permitimos una mayor definición del fluido en aquellas zonas donde aparecerá capa límite, no consumiendo espacio de memoria en las regiones más alejadas donde los valores característicos son iguales o próximas a las condiciones iniciales. Podemos ver los resultados de la simulación de menor a mayor definición en el cuadro 7.2 y 7.3:



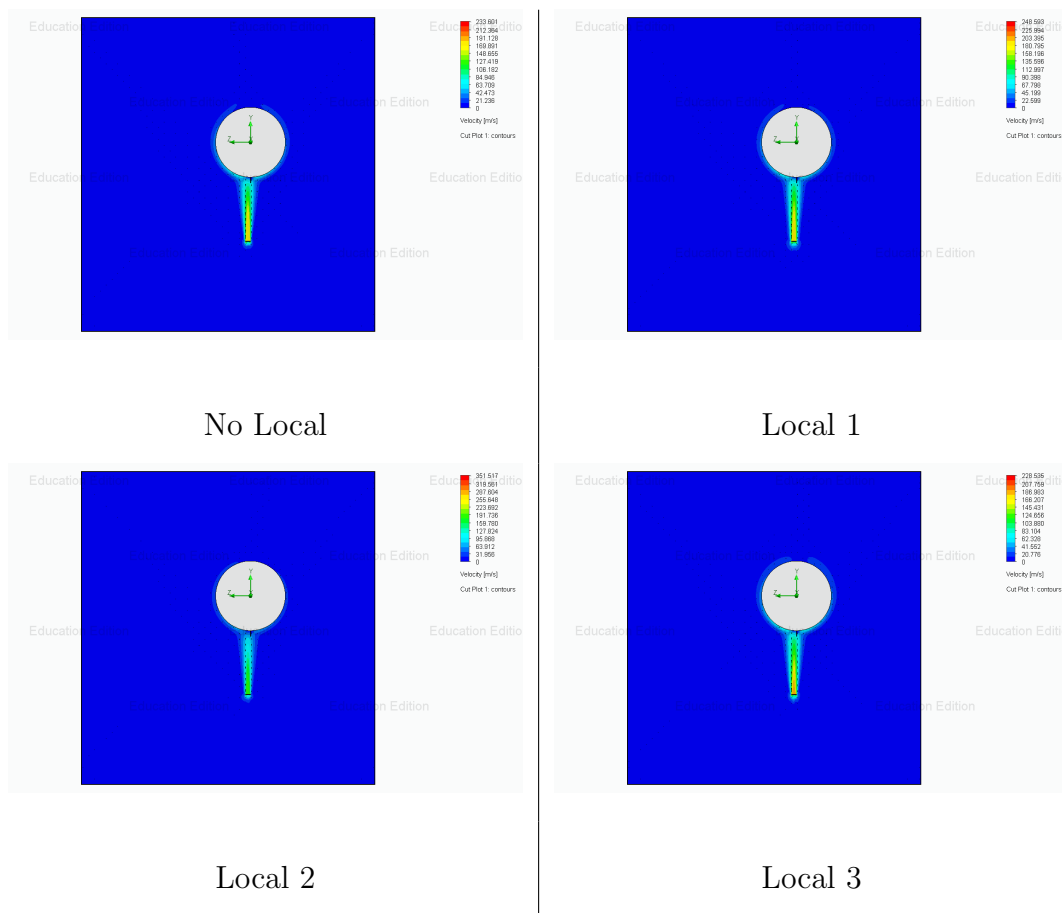
Cuadro 7.2: Velocidades a diferentes tamaños de mallado homogéneo.



Cuadro 7.3: Velocidades con mallado en proximidad.

Como se explicaba anteriormente, la última de las posibilidades a la hora de configurar la malla es definir su geometría en el espacio donde se forma la capa límite del fluido en contacto con la superficie de la herramienta y del cilindro, ya sea mediante diferentes tamaños más reducidos de celda en comparación con la malla global o mediante definición de tamaño para mayor ajuste angular o en curvas de superficie.

Debido a las limitaciones de memoria del computador con el que se ha realizado el estudio, solo se ha podido introducir el parámetro de definición de ratio en proximidad de superficie hasta el nivel 3. Conforme al análisis realizado anterior se procede, igualmente, pudiendo ver los resultados en el cuadro 7.4.



Cuadro 7.4: Velocidad a diferente malla de contorno.

Podemos observar que añadir mallado de contorno a las superficies ha producido una mejora en la representación de la capa límite y en la zona posterior del cilindro, lugar de baja presión por donde evacua el aire calentado.

La necesidad de determinar la malla correcta que permita decidir si es lo suficientemente pequeña como para que el resultado del cálculo sea independiente de ésta, nos lleva a evaluar el resultado para las magnitudes locales del estudio: el calor por convección, la fuerza de presión y la fuerza viscosa en la superficie de la herramienta de corte. Se escogen valores local y no globales, porque la distribución de presiones, temperaturas y velocidades en el dominio puede tener una dispersión tal que nos lleve a cometer el error de pensar que un mallado de volúmenes finitos grandes sea correcto.

A partir de la gráfica de resultados finales del calor emitido por convección, figura 7.1, para los distintos ratio de mallado utilizados (se incluye el mallado local con proximidad de curva y definición angular, para el caso de malla global más pequeña con proximidad), podemos observar que aparece una primera zona de convergencia entre el ratio 6/7 y la aplicación de malla en proximidad hasta ratio 3. Posteriormente el valor diverge para volver a converger con ratio de proximidad entre 7 y 9. Finalmente, para un ratio de malla en proximidad de 10 y mallado local cercanas a las superficies sólidas, encontramos una nueva convergencia cercana a los 27 W. De igual forma ocurre con los resultados de la de fuerza presión, figura 7.2, y de la fuerza viscosa, figura 7.3, en la superficie de la herramienta.

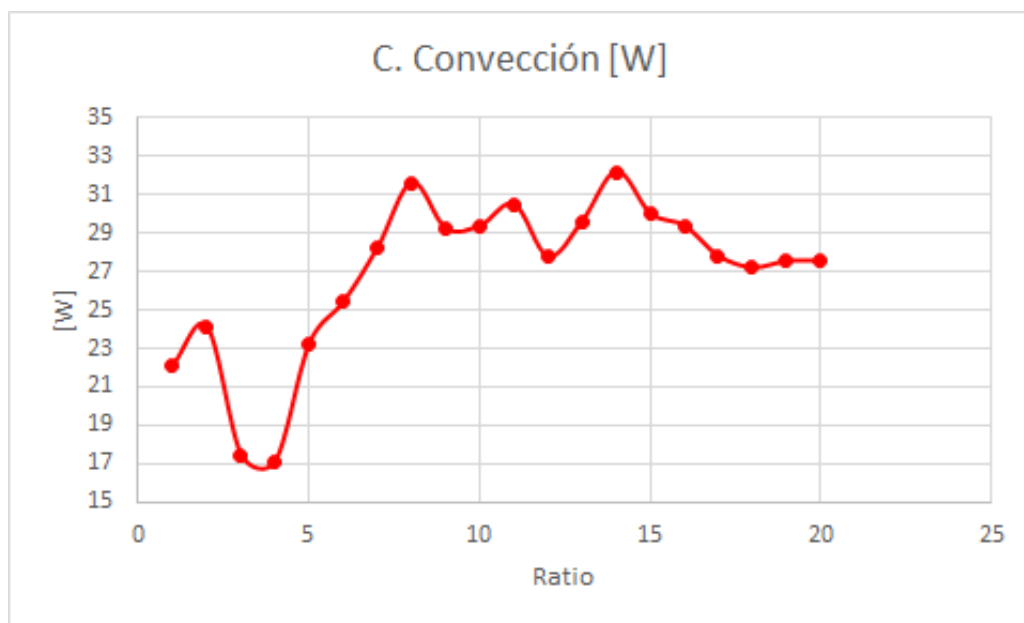


Figura 7.1: Evolución del cálculo de convección con el aumento de la precisión de mallado.

Configurada la simulación se procede al estudio de la refrigeración de la herramienta de corte a diferentes ángulos de incidencia del chorro de aire. En el cuadro 7.5 podemos ver el resultado de la velocidad del fluido para cada ángulo y en el cuadro 7.6 el resultado de la temperatura.

No se presentan imágenes de presión porque no se está realizando un estudio aerodinámico

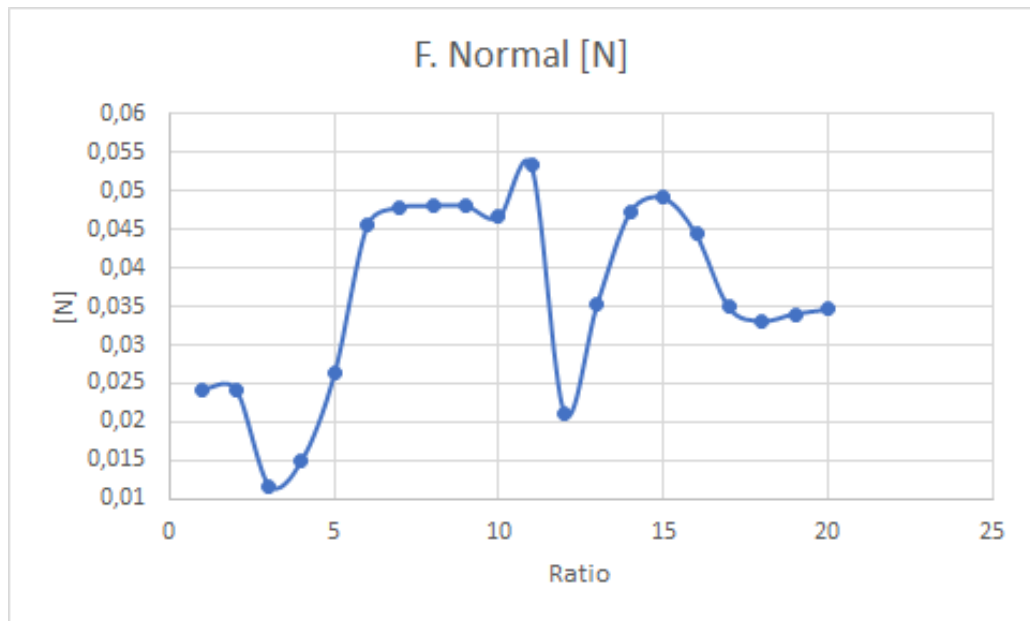


Figura 7.2: Evolución del cálculo de fuerza de presión con el aumento de la precisión de mallado.

de las piezas y podemos deducir los efectos de la presión a partir de las imágenes de velocidad. Nos interesa conocer qué campo de velocidades tenemos en la proximidad de la superficie de la herramienta, si el cilindro con su giro angular produce retroceso del aire caliente sobrecalentando la herramienta, si aparecen zonas de alta presión donde el fluido en movimiento no accede para disipar calor o si existen zonas de alta temperatura que no se refrigeran de forma adecuada.

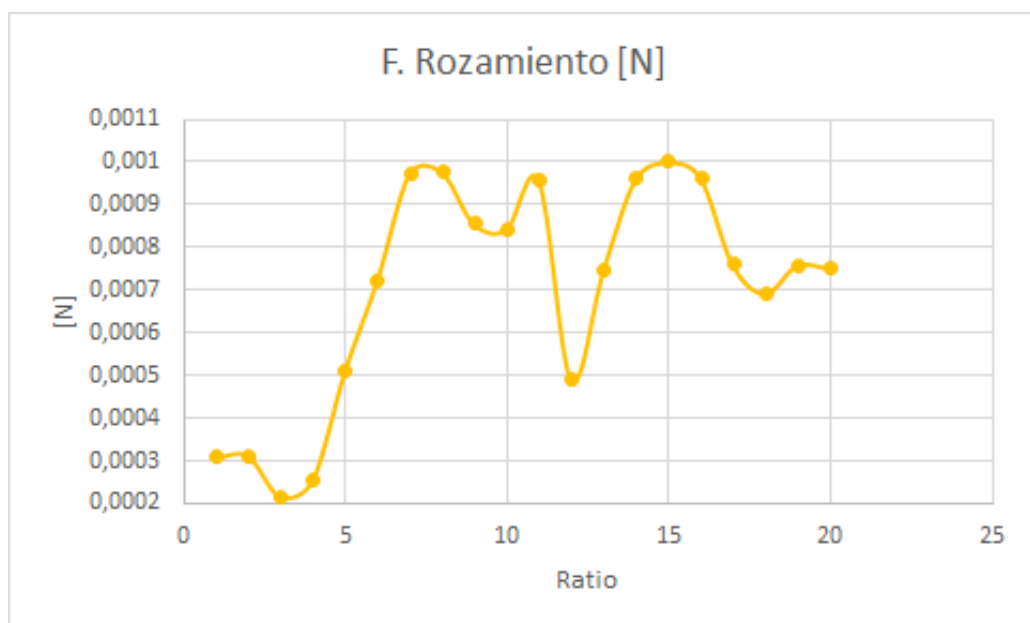
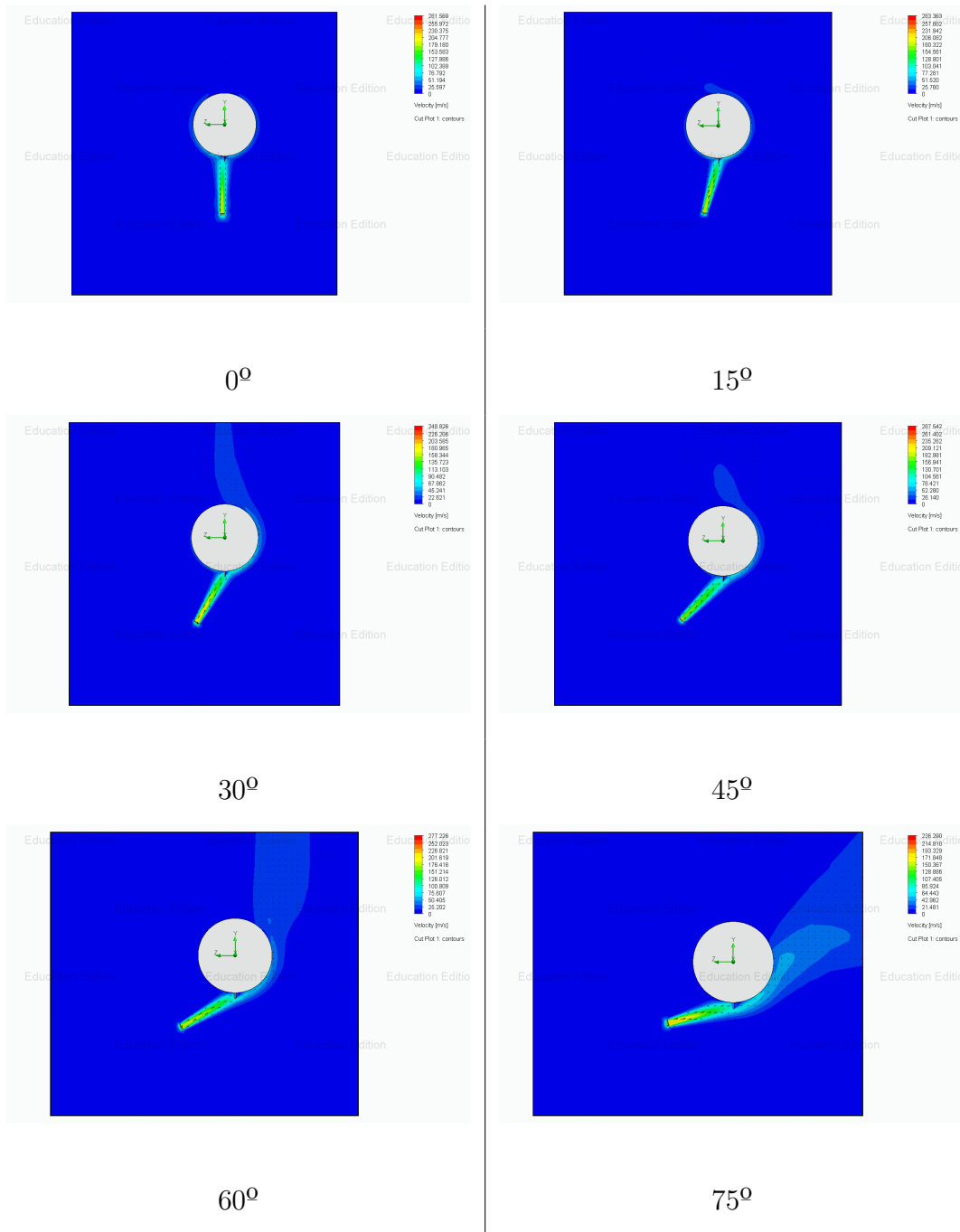
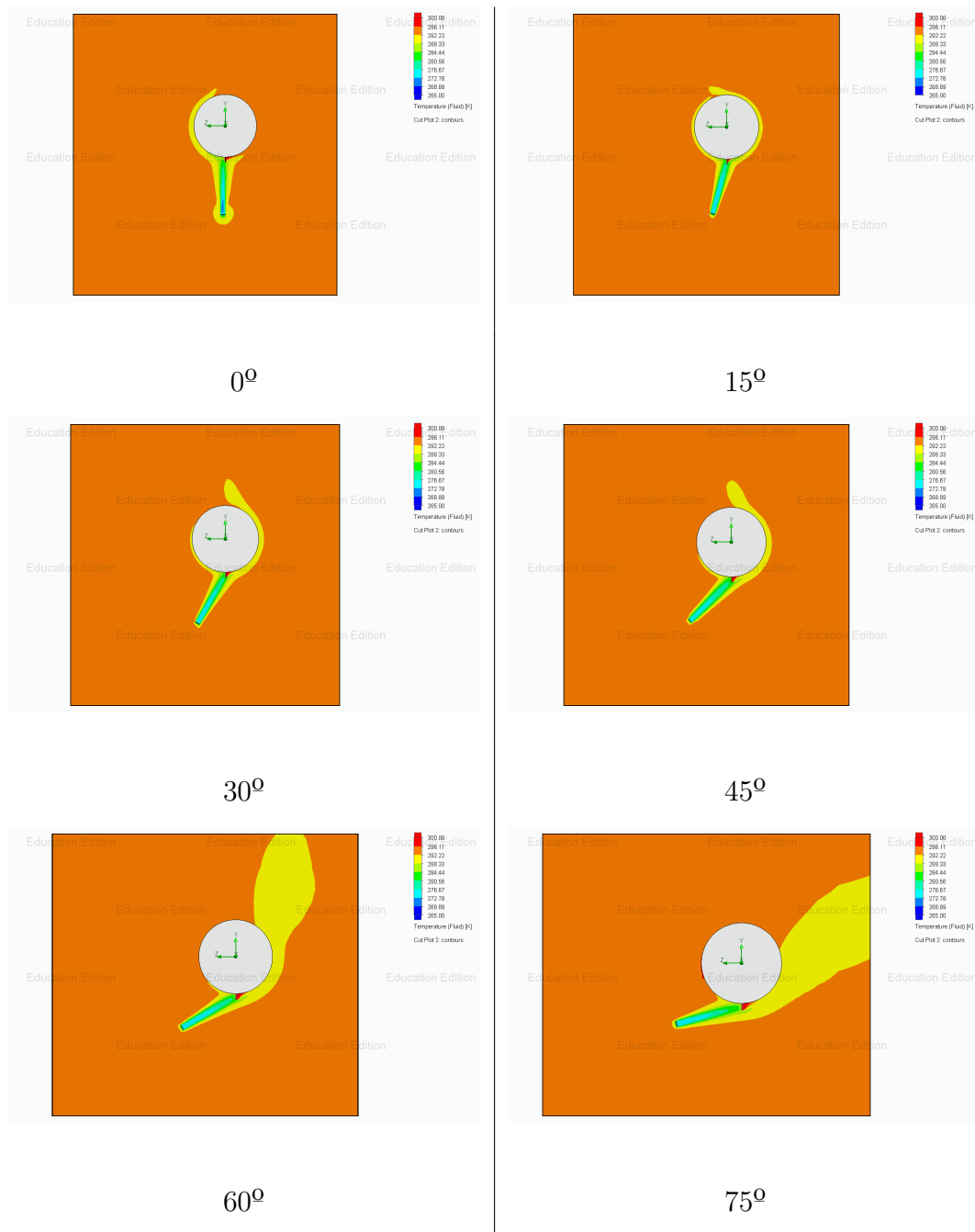


Figura 7.3: Evolución del cálculo de fuerza viscosa con el aumento de la precisión de mallado.



Cuadro 7.5: Velocidad a diferentes ángulos de incidencia.



Cuadro 7.6: *Temperatura a diferentes ángulos de incidencia.*

La necesidad de realizar un estudio del ataque del flujo de aire contra la superficie en función del ángulo de incidencia sobre la herramienta se justifica, a partir de lo explicado en el capítulo 4, por hallar aquella geometría que beneficia a la convección térmica de la placa gracias a la ventilación forzada de ésta y a las fuerzas viscosas que aparecen. Por otro lado, debe buscarse el equilibrio entre la aparición de fuerzas de resistencia o presión que nos faciliten la evacuación de restos materiales en el corte sobre el cilindro torneado, pero sin que estas fuerzas perjudiquen

a la disipación de calor, más cuando las herramientas y la incidencia del ángulo de corte se diseñan para este propósito.

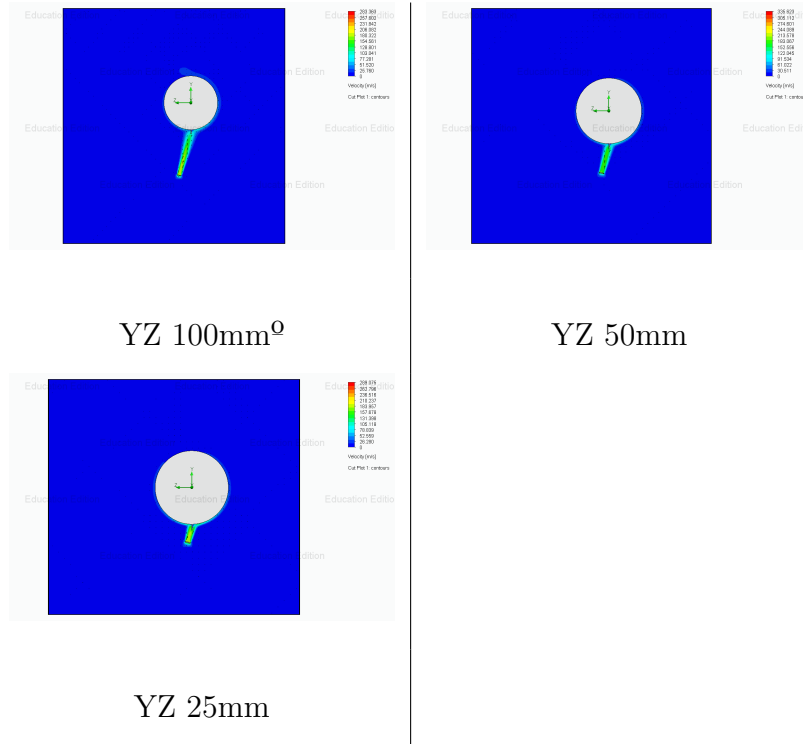
Si analizamos, primeramente, los resultados para  $0^\circ$  de inclinación, podemos observar que, debido a la disipación del fluido con el contorno, la velocidad que alcanza la cuchilla se reduce de los  $180 \text{ m/s}$  a, aproximadamente,  $100 \text{ m/s}$ , lo que nos lleva a pensar que la distancia del inyector de aire es demasiado grande. También aparece un punto de estancamiento en la unión de la cuchilla con el cilindro, aumentando la presión y reduciendo la superficie de refrigeración forzada en  $1/3$ .

Analizando la temperatura del dominio a  $0^\circ$ , se observa que la temperatura del flujo al alcanzar la superficie de la herramienta, también por efecto de la disipación con el entorno, aumenta de  $273 \text{ K}$  a  $280 \text{ K}$ . También aparece una zona de mayor temperatura en la parte inferior de la cuchilla, zona que para el caso real será el alojamiento de ésta en el útil portaherramientas, de lo que se desprende la posibilidad de realizar una refrigeración híbrida que compense el gradiente de temperatura entre las dos caras mediante un circuito interior de refrigeración líquida o mediante el diseño de útiles con perforaciones que permitan el paso de aire a la zona inferior.

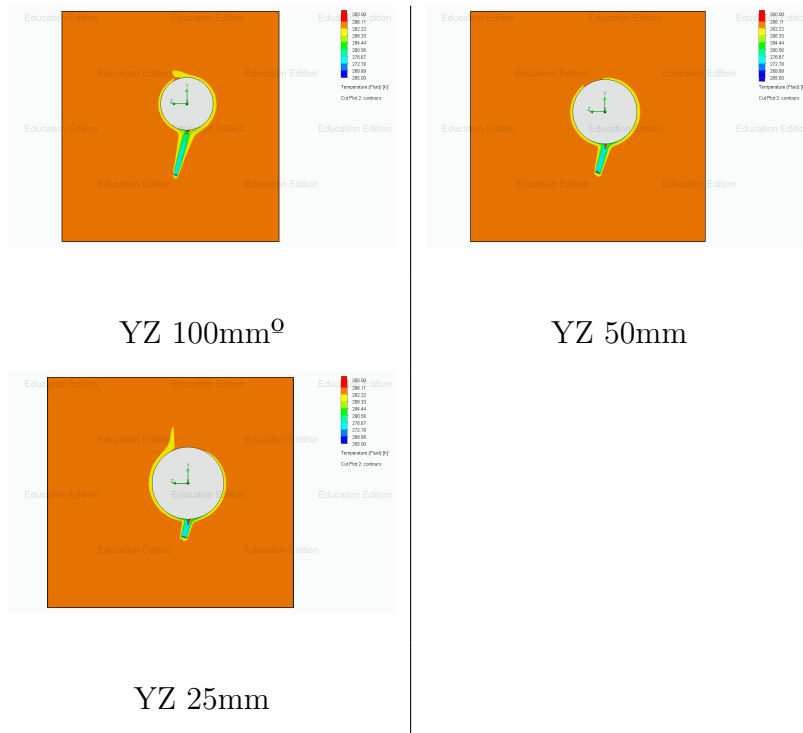
A medida que se aumenta el grado de inclinación, la zona de estancamiento por presión se va desplazando de la superficie del cilindro a la zona superior de la cuchilla. Este efecto se ve reducido por la propia geometría de la herramienta, siendo de menor área que el cilindro. Pero sus efectos se incrementan a  $90^\circ$ , donde la peor refrigeración produce un mayor calentamiento en la zona inferior del cilindro, que al girar en solidaridad con la trayectoria del flujo, por efecto Coanda, genera la aparición de un reflujo de aire caliente que retorna a la herramienta por su cara superior.

En este sentido, podemos afirmar que la mejor configuración es aquella que introduce un pequeño ángulo de inclinación suficiente para que los efectos del estancamiento por presión producidos en la superficie del cilindro no reduzcan la superficie de contacto de refrigeración forzada en la herramienta, permita la evacuación de aire caliente a lo largo del cilindro sin producirse rebufo y no genere una zona de mayor temperatura en la cara inferior de la cuchilla. De tal manera, se puede comprobar, a partir de los datos de convección en la superficie de la herramienta obtenidos de la simulación, que en el entorno de los  $15^\circ$  conseguimos estos objetivos.





Cuadro 7.7: *Velocidad a diferentes distancias y 15<sup>o</sup> de incidencia para plano YZ.*



Cuadro 7.8: *Temperatura a diferentes distancias y 15<sup>o</sup> de incidencia para plano YZ.*

Conocido el mejor ángulo de inclinación para el chorro de aire, se procede a estudiar la mejor distancia del inyector a la herramienta. En este sentido, es sencillo valorar que a menor distancia menor es la disipación de la velocidad del flujo de aire con el entorno. Por el contrario, se ven aumentados los efectos perjudiciales sobre la zona de estancamiento en la superficie de la cuchilla si acercamos el inyector demasiado a la superficie de la herramienta. Por otro lado, al disminuir la distancia, el flujo de aire caliente tiende a trazar su trayectoria por la parte superior del cilindro y no por la parte inferior que ayudaría a enfriar, también, el tramo de pieza ya torneado.

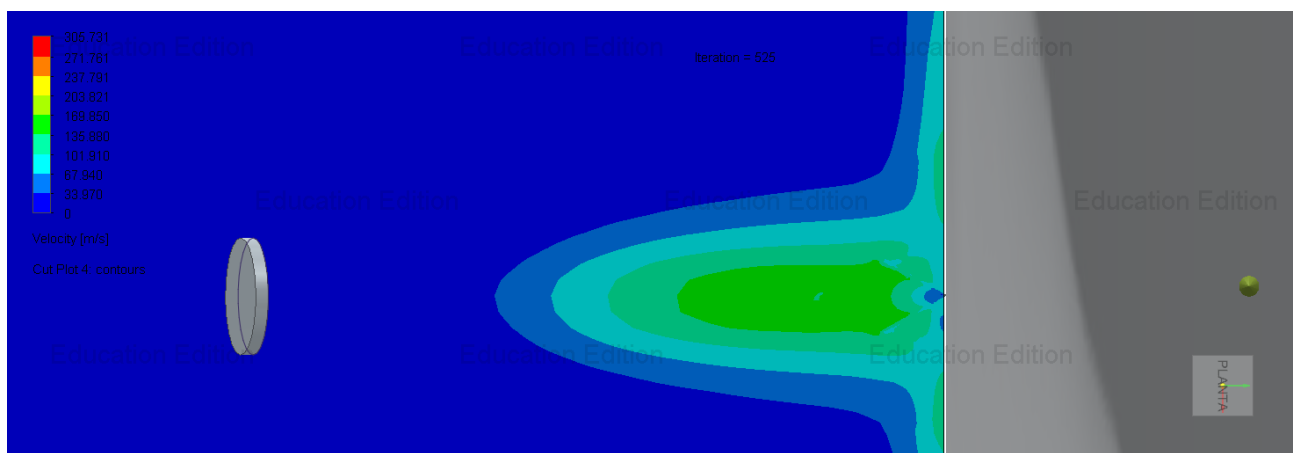


Figura 7.4: Velocidad en el plano XY para 15 ° y 50 mm.

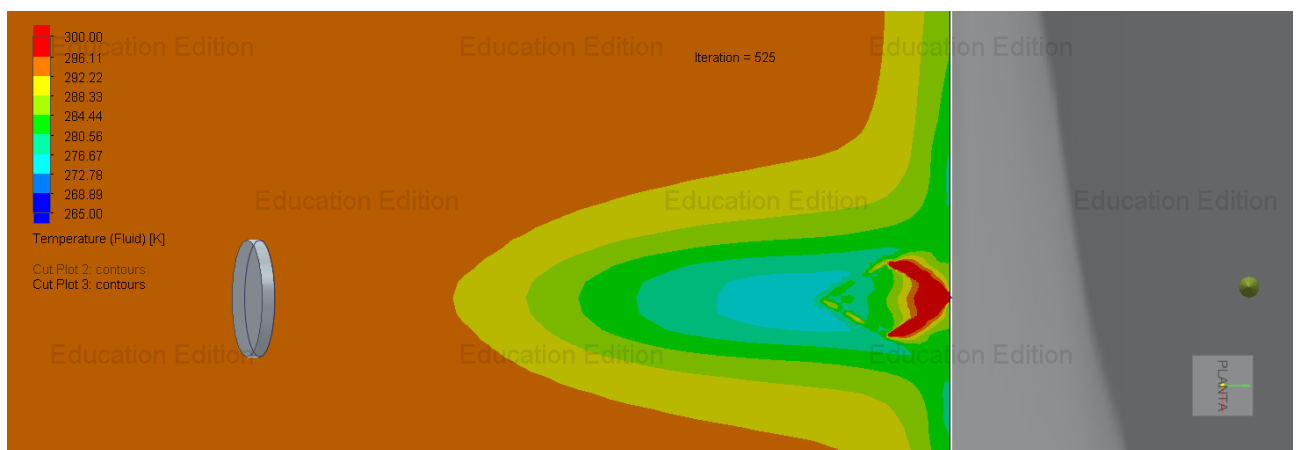


Figura 7.5: Temperatura en el plano XY para 15 ° y 50 mm.

Analizando a  $50\text{ mm}$  (mejor dato de convección según resultados de la simulación) la velocidad y la temperatura en el plano XY, podemos dar cuenta que la zona de estancamiento, que en este caso es menor a otras inclinaciones, se produce especialmente en la zona de contacto, pero, tal como se describió en el capítulo 3, no es un problema añadido ya que los estudios realizados en mecanizado demuestra que la concentración térmica se produce más o menos a la mitad de la longitud de la herramienta. Para el último estudio realizado, a  $15^\circ$  de inclinación y  $50\text{ mm}$  de distancia, el simulador nos da los siguientes resultados para la superficie de contacto de la cuchilla con el chorro de aire:

- Superficie:  $8,056 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2$ .
- Fuerza de presión:  $0,1487\text{ N}$ .
- Fuerza viscosa:  $0,0033\text{ N}$ .
- Ratio de transferencia de calor por convección:  $48,25\text{ W}$ .

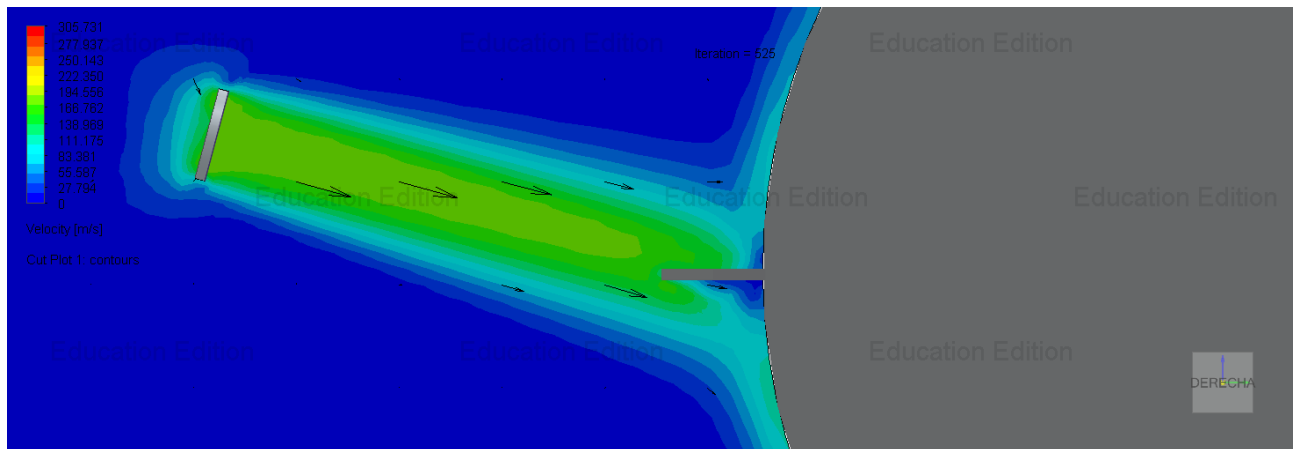


Figura 7.6: Velocidad en el plano YZ para  $15^\circ$  y  $50\text{ mm}$ .

Si escogemos un valor teórico de velocidad en la superficie de  $180 \cdot \cos(15^\circ) = 173,86 \text{ m/s}$ , que sería la velocidad de refrigeración sin disipación, para aire seco a presión atmosférica y a  $293 \text{ K}$  con los siguientes datos:

- $c_p = 1,0061 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$
- $\rho = 1,2042 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 18,17 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
- $\nu = 15,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $k = 25,64 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
- $Pr = 0,713$

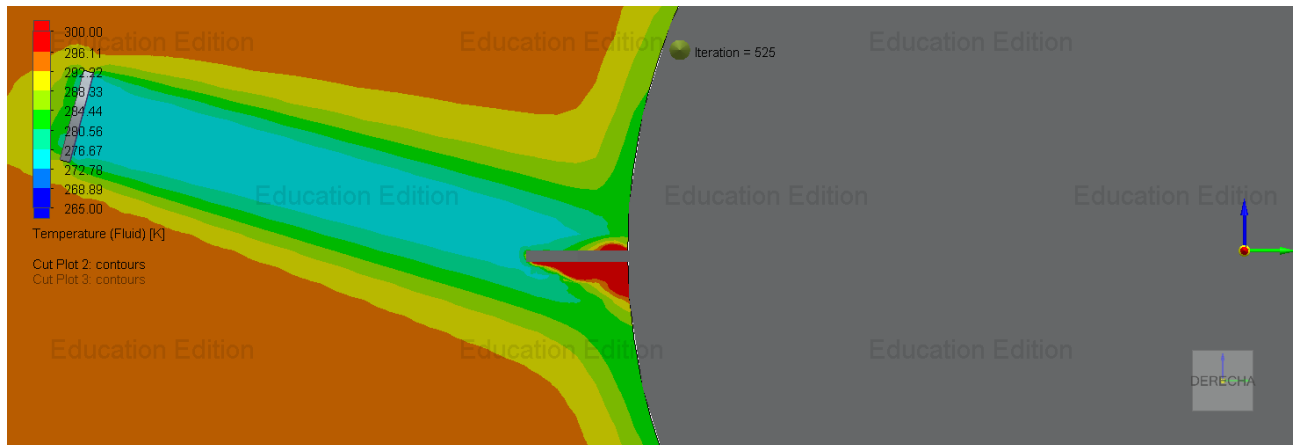


Figura 7.7: Temperatura en el plano YZ para  $15^\circ$  y  $50 \text{ mm}$ .

Podemos calcular el calor disipado en la cara superior de la herramienta de corte:

$$Re_L = \frac{U \cdot L}{\nu} = \frac{173,86 \text{ m/s} \cdot 0,01 \text{ m}}{15,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 115219,78 > 10^5 \quad \textbf{Turbulento} \quad (7.1)$$

$$Nu = 0,0296 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re_L^{0,8} = 0,0296 \cdot 0,713^{1/3} \cdot 115219,78^{0,8} = 296,171 \quad (7.2)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{296,171 \cdot 25,64 \cdot 10^{-3} \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}}{0,01 \text{ m}} = 759,383 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad (7.3)$$

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) = 759,383 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot 0,01^2 \cdot (973,2 \text{ K} - 293,2 \text{ K}) = 51,638 \text{ W} \quad (7.4)$$

Valor analítico muy cercano al valor dado por la simulación, demostrando que la simulación es correcta, aunque el último paso sería comprobarlo mediante la comparación con los datos reales extraídos de la experimentación. Podemos comparar los datos analíticos y de simulación para los diferentes estudios realizados en la siguiente tabla:

Inc. [°]	Dist. [mm]	Val. Sim. [W]	Val. Calc. [W]	F.Norm [N $\times 10^{-2}$ ]	F. Visc [N $\times 10^{-4}$ ]
0	100	27,76	53,09	3,49	7,59
15	100	34,33	51,64	6,07	15,32
<b>15</b>	<b>50</b>	<b>48,25</b>	<b>51,64</b>	<b>14,88</b>	<b>33,41</b>
15	25	42,26	51,64	14,34	29,19
30	100	31,19	47,31	12,84	16,69
45	100	34,15	40,23	20,19	16,95
60	100	37,24	30,49	24,69	11,28
75	100	29,55	18,01	18,83	4,7
90	100	31,19	0,00	17,59	2,09

Cuadro 7.9: Comparativa del valor calculado (analítico) y el valor simulado de la transferencia de calor por convección, fuerza normal y viscosa para cada caso.

Podemos ver que para inclinaciones y distancias diferentes al valor óptimo de refrigeración, el cálculo clásico de convección no es tan próximo al valor de simulación. Tal como comentamos, el cálculo clásico toma en cuenta las condiciones termodinámicas del gas y su velocidad, pero no tiene en cuenta factores de disipación energética en la trayectoria ni por efecto del modelo de turbulencia, que sí lo tiene la resolución de las ecuaciones de Navier-Stoke.

Una vez conocido el valor óptimo de inclinación para la refrigeración, por último se muestra la distribución del campo de presiones en el dominio, dando cuenta de las zonas de mayor presión que se generan en la herramienta de corte al paso del fluido:

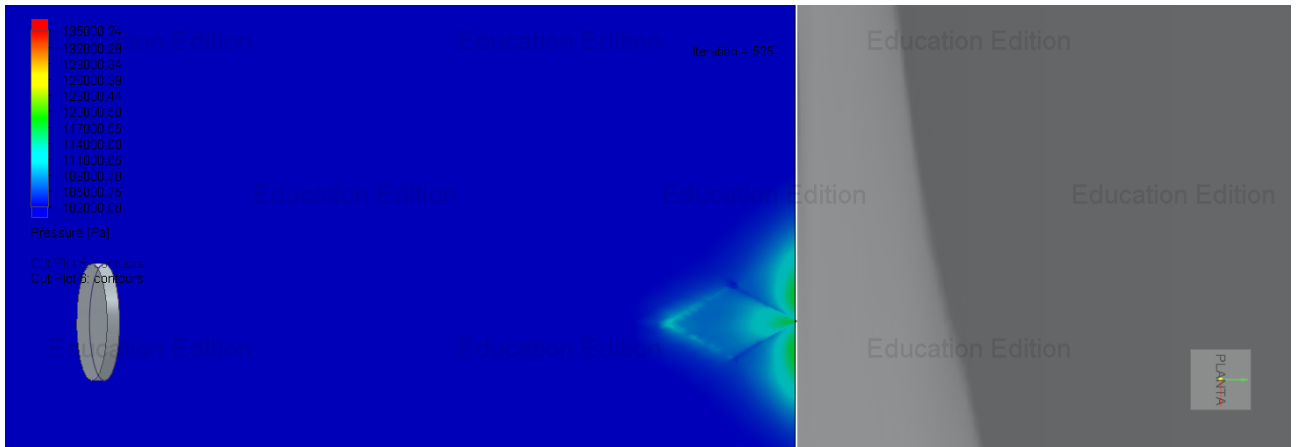


Figura 7.8: Presión en el plano XY para 15 ° y 50 mm.

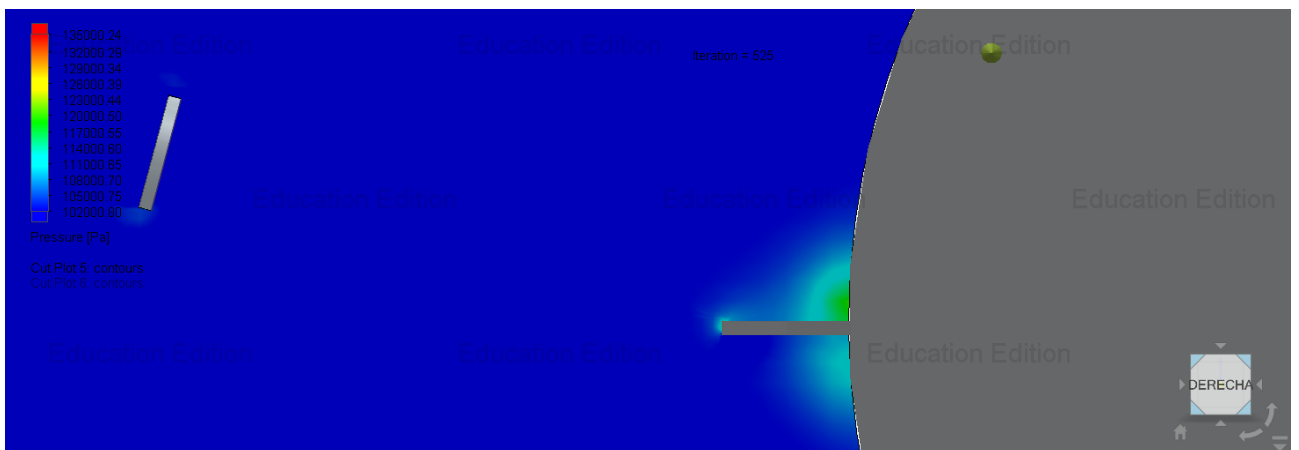


Figura 7.9: Presión en el plano YZ para 15 ° y 50 mm.

# Capítulo 8

## Conclusiones

En este estudio de la refrigeración por convección mediante aire en torneado de acero se ha simulado el chorro de aire generado por tubo Vortex. Todo esto se realizó a partir de la representación simplificada de la porción de cilindro con giro angular y la superficie de la herramienta de corte con emisión de calor, ambas piezas con características materiales, dentro de un dominio de aire, en condiciones normales, el doble de grande que las dimensiones de la pieza.

Para ello, se ha seguido el procedimiento descrito por Slater [Sla21] de manera que se han ido modificando las características de la malla a fin de conseguir la convergencia en las iteraciones entorno a las 850 para el último caso descrito en esta memoria. De los datos obtenidos en la convección podemos dar por buena la convergencia y la simplificación en la malla al haber obtenido un resultado que no diverge más de 0,25 W entre el uso de malla local y sin él, es decir un 0,9 %, siendo análogo para el cálculo de la fuerza normal, con una diferencia del 0,8 %, y la fuerza viscosa, con un 1,1 % de diferencia, sobre la superficie de la cuchilla.

En cuanto a la convergencia espacial, del análisis de los resultados obtenidos se ha comprobado con la mejora del mallado que no aparecen zonas de velocidad y temperatura incoherentes dentro del chorro de aire. Y, para la convergencia temporal, el estudio se ha realizado en régimen estacionario, luego los resultados no dependían de la variable de tiempo y esta convergencia dependía, de igual forma a la anterior, de la coherencia de resultado obtenidos para el campo de velocidades.

Los últimos dos apartados del procedimiento requieren de la experimentación que no se ha podido ejecutar durante la realización de este trabajo debido a las condiciones y la finalidad académica propia del proyecto, quedando, para una posible y futura continuidad del mismo, la comparación de los resultados de la simulación con los datos experimentales y la comprobación

del modelo de turbulencia y las condiciones de simulación utilizados.

Finalizado el proyecto se nos plantea la cuestión de para qué realizar una simulación que conlleva un tiempo extraordinario de preparación, cálculo y análisis cuando es posible aplicar métodos clásicos para el cálculo de la convección térmica. A raíz de los datos obtenidos se comprueba que el método clásico parte de la idea de tener un valor de velocidad conocido, pero este valor es difícil de medir en las condiciones próximas a la herramienta de corte. La simulación nos permite evaluar el campo de velocidad para el total de la trayectoria del flujo de refrigeración, el efecto del fluido de contorno y la gravedad, y, así, analizar los resultados para toda la herramienta punto a punto. Además, nos permite ver todos los efectos físicos que aparecen, por ejemplo el efecto Coanda, para, posteriormente y siendo trabajo del ingeniero, decidir que simplificaciones y resultados se tienen en cuenta a la hora de tener una visión determinista del proceso.

En relación a los resultados obtenidos, el mejor ángulo de inclinación del chorro de aire respecto a la superficie de la herramienta es de  $15^\circ$ , manteniendo la boquilla del tubo Vortex a una distancia próxima a los 50 mm, obteniendo una transferencia de calor, teniendo la cuchilla a  $700^\circ\text{C}$  en condiciones de no refrigeración, de 48,25 W.

No obstante, se ha podido comprobar que la refrigeración única por chorro de aire, a una temperatura de  $0^\circ\text{C}$  no produce una transferencia calorífica muy elevada, luego no es el método más eficaz de refrigeración, al contrario de lo que afirman industriales de fabricación de tubo Vortex, sino es acompañado de fluidos de refrigeración con temperaturas inferiores en las condiciones de presión y velocidad iniciales. Este tipo de técnicas, como se ha extraído de la bibliografía consultada, ocasionan un aumento de los costes de refrigeración y riesgos de contaminación para las personas y el medioambiente. Por otro lado, realizar una preparación del aire previa a su inyección también aumenta los costes energéticos, ya que no nos limitaríamos al simple uso del compresor para alimentar el circuito neumático típico industrial.

Con todo esto, se concluye que, más allá de la finalidad académica de este Trabajo Final de Máster en Ingeniería Computacional y Matemática, se ha mostrado un procedimiento de configuración, simulación y análisis mediante mecánica de fluidos computacional, utilizando el software FLOEFD (versión estudiante), se han comparado los resultados con el método clásico para la convección forzada y se ha cumplido con los objetivos iniciales para el estudio de la refrigeración de herramientas en torneado seco, dando respuesta a conocer el mejor ángulo de inclinación y la distancia más eficaz para la colocación del inyector de aire mediante tubo Vortex.



# Bibliografía

- [ASP<sup>+</sup>11] R. Alberdi, J.A. Sanchez, I. Pombo, N. Ortega, B. Izquierdo, S. Plaza, and D. Barrenetxea. Strategies for optimal use of fluids in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(6):491–499, jun 2011.
- [Cen13] Yunus Cengel. *Transferencia de calor y masa.*, volume 53. McGraw-Hill, México, 3a edition, 2013.
- [Cha17] Bruno Chaouat. The State of the Art of Hybrid RANS/LES Modeling for the Simulation of Turbulent Flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 99(2):279–327, sep 2017.
- [CL21] Giovanni Calzolari and Wei Liu. Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications: A review. *Building and Environment*, 206:108315, dec 2021.
- [CLJ01] H.Z. Choi, S.W. Lee, and H.D. Jeong. A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel. *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1-3):265–268, apr 2001.
- [GS17] Gyanendra Singh Goindi and Prabir Sarkar. Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 165:1557–1571, nov 2017.
- [GW22] Christopher J. Greenshields and Henry G. Weller. *Notes on Computational: Fluid Dynamics: General Principles*. CFD Direct, Reading, 2022.
- [Joh21] Christoffer Johansson. Meshing in Simcenter FLOEFD, 2021.
- [KS08] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. PEARSON EDUCACIÓN, México, 5th edition, 2008.

- [KSA<sup>+</sup>21] Dmitrii Kochkov, Jamie A. Smith, Ayya Alieva, Qing Wang, Michael P. Brenner, and Stephan Hoyer. Machine learning–accelerated computational fluid dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(21), may 2021.
- [LL11] Pil-Ho Lee and Sang Won Lee. Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3):201–209, mar 2011.
- [MDM<sup>+</sup>15] G. Mengaldo, D. De Grazia, D. Moxey, P.E. Vincent, and S.J. Sherwin. Dealiasing techniques for high-order spectral element methods on regular and irregular grids. *Journal of Computational Physics*, 299:56–81, oct 2015.
- [Men11] Mentor Graphics Corporation. *ENHANCED TURBULENCE MODELING IN FloEFD*. Oregon, mgc 02-11 edition, 2011.
- [Men18] Mentor Graphics Corporation. *FloEFD Technical Reference*. Oregon, rev. 19122 edition, 2018.
- [NGF21] Adrián Navas, Pilar García, and Javier Fernández. *Introducción a la mecánica de fluidos computacional*. Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1st edition, 2021.
- [PRFV<sup>+</sup>15] O. Pereira, A. Rodríguez, A. Fernández-Valdivielso, J. Barreiro, A.I. Fernández-Abia, and L.N. López-de Lacalle. Cryogenic Hard Turning of ASP23 Steel Using Carbon Dioxide. *Procedia Engineering*, 132:486–491, 2015.
- [RYK<sup>+</sup>17] Kaaliarasan Ramachandran, Balakumaran Yeesvaran, Kumaran Kadirgama, Devarajan Ramasamy, Saiful Anwar Che Ghani, and Keeran Anamalai. State of art of cooling method for dry machining. *MATEC Web of Conferences*, 90:01015, dec 2017.
- [SD07] D.K. Sarma and U.S. Dixit. A comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 190(1-3):160–172, jul 2007.
- [Sla21] Johan W. Slater. NPARC Alliance CFD Verification and Validation Web Site, 2021.
- [SPRS22] Suchismita Swain, Saroj Kumar Patra, Manmatha Kumar Roul, and Laxman K. Sahoo. A short review on cooling process using compressed cold air by vortex tube in machining. *Materials Today: Proceedings*, 64:382–389, 2022.

- 
- [SSKN22] Wojciech Stachurski, Jacek Sawicki, Krzysztof Krupanek, and Krzysztof Nadolny. A model and its experiment using compressed cold air to clean the active surface of a grinding wheel during sharpening of a hob cutter. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(2):911–931, sep 2022.
- [WJ17] Freddie D. Witherden and Antony Jameson. Future Directions in Computational Fluid Dynamics. In *23rd AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*, Reston, Virginia, jun 2017. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [XAK10] Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, and Richard Kelso. A critical review of temperature separation in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8):1367–1374, nov 2010.