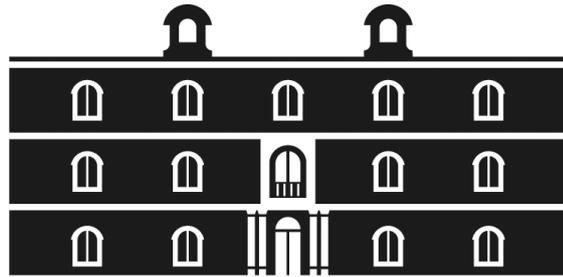


Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales

etsii UPCT

Características termo-hidráulicas en codos a 180° de tubos de sección circular con muelles rígidos insertados

Titulación: Ingeniero Industrial

Alumno/a: José Francisco Fernández Moreno

Director/a/es: Juan Pedro Solano Fernández
David Saura Pérez

Cartagena, a 16 de Junio de 2016

INDICE

AGRADECIMIENTOS	5
PARTE I: INTRODUCCIÓN AL PROYECTO	6
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES.....	7
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	10
PARTE II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
CAPÍTULO 3: CONCEPTOS GENERALES DE MECÁNICA DE FLUIDOS.....	12
3.1. <i>Introducción</i>	12
3.2. <i>Conceptos previos</i>	12
3.2.1. Derivada sustancial	12
3.2.2. Teorema del transporte de Reynolds.	13
3.3. <i>Ecuaciones fundamentales</i>	13
3.3.1. Ecuación de continuidad.....	13
3.3.2. Ecuación de cantidad de movimiento.....	14
3.3.3. Ecuación de conservación de la energía	15
3.4. <i>Números adimensionales</i>	17
3.4.1. Graetz	17
3.4.2. Nusselt	17
3.4.3. Prandtl	18
3.4.4. Reynolds	18
CAPÍTULO 4. TRANSMISIÓN DEL CALOR EN TUBOS.....	19
4.1. <i>Introducción y conceptos previos</i>	19
4.1.1. Coeficiente de transferencia de calor	19
4.1.2. Temperatura de referencia del fluido.....	20
4.1.3. Efecto del número de Reynolds y la caída de presión en transferencia de calor	20
4.1.4. Efecto del número de Prandtl.....	23
4.1.5. Efectos de entrada.....	23
4.1.6. Variación de las propiedades físicas	25
4.1.7. Condiciones de contorno térmicas	25
4.1.8. Límites de precisión en la predicción de los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección.....	25
4.2. <i>Análisis de la convección forzada en tubos para flujo laminar completamente desarrollado</i>	26
4.2.1. Análisis hidrodinámico.....	26
4.2.2. Transferencia de calor	28
4.2.2.1. Flujo de calor uniforme en la pared del tubo.....	29
4.2.2.2. Temperatura uniforme en la pared del tubo.	32
4.3. <i>Convección mixta</i>	35
4.3.1. Efectos de flotación	35
4.3.2. Descripción matemática del fenómeno	36
4.3.2.1. Introducción.....	36
4.3.2.2. Correlaciones de convección mixta para flujo de calor uniforme.....	39
CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE MUELLES EN TUBOS	41
5.1. <i>Introducción</i>	41
5.2. <i>Técnicas de mejora de la transferencia de calor</i>	41
5.3. <i>Características de los muelles. Parámetros.</i>	43
5.4. <i>Muelles insertados en tubos</i>	44
5.5. <i>Estudios anteriores sobre el uso de muelles en el panel absorbedor</i>	47
5.5.1.- Kumar-Prasad.-	49
5.5.2. Alireza Hobbi.-	50
5.5.3.- Jaisankar.-	52
5.5.4. Experiencia del equipo investigador.....	53
PARTE III: FUNDAMENTOS DE CFD	58
CAPÍTULO 6: INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	59

6.1. Visión global de CFD	59
6.1 Ventajas del uso de la CFD.....	61
6.2. Inconvenientes de la mecánica de fluidos computacional.....	62
6.3. Metodología de CFD	63
CÁPITULO 7: METODOLOGÍA DE TRABAJO EN CFD.....	65
7.1. Pre-processing con Gambit 2.4.6	65
7.1.1. Cálculos previos al desarrollo de la geometría	65
7.1.2. Desarrollo de la Geometría y del Mallado	71
7.1.3. Adjudicación de las condiciones de contorno y condiciones de medio.....	80
7.1.4. Exportación de la geometría mallada	81
7.1.5. Generación de la geometría de codo con muelle integrado.....	81
7.2. Solver o Analisis con Fluent ANSYS	83
7.2.1. Read&Write – Case &Data.....	83
7.2.2. Comprobaciones o Checking	83
7.2.3. Escalar la geometría.....	84
7.2.4. Unión de geometrías y fusión de superficies.....	84
7.2.5. Materiales.....	86
7.2.6. Condiciones de operación	87
7.2.7. Condiciones de contorno.....	88
7.2.8. Modelo Físico.....	91
7.2.9. Modelo temporal.....	91
7.2.10. Modelo energético	92
7.2.11. Modelo numérico	92
7.2.11.1 Solver acoplado o segregado	92
7.2.11.2 Solver basado en presión o densidad	93
7.2.11.3 Solver seleccionado	94
7.2.12 Linealización implícita o explícita.....	95
7.2.13. Inicialización del problema	96
7.2.14. Monitorización de la convergencia de la solución.....	96
7.2.15. Análisis del modelo-Puesta en marcha de las iteraciones	98
7.3. Post-procesado con MATLAB y Journals	102
7.3.1. Examen de los resultados	102
7.3.2. Método utilizado para procesado de datos.....	105
7.3.3. Estudio de validación del método.....	106
7.3.4. Consideraciones del método	106
PARTE IV: SIMULACIONES Y RESULTADOS	108
CÁPITULO 8: SIMULACIONES A REALIZAR.....	109
CÁPITULO 9: ESTUDIO DEL FACTOR DE FRICCIÓN EN CONDICIONES DE FLUJO ISOTERMAS, PARA UN CODO LISO SIN MUELLE INTEGRADO EN SU INTERIOR PARA LA VALIDACIÓN DEL MÉTODO DEL ESTUDIO ANTERIOR.....	110
9.1. Geometría y mallado empleados.....	110
9.2. Introducción a las simulaciones del factor de fricción	118
9.3. Propiedades del fluido empleado.....	120
9.4. Algoritmo o solver empleado.....	120
9.5. Resultados del factor de fricción de codo liso sin muelle y comparación con codo liso con muelle insertado.....	122
CÁPITULO 10: ESTUDIO DEL FACTOR DE FRICCIÓN EN CONDICIONES DE FLUJO ISOTERMAS SIMILARES A LAS EXISTENTES EN EL CODO CON MUELLE INTEGRADO EN UN COLECTOR SOLAR PLANO.....	124
10.1. Geometría y mallado empleados.....	124
10.2. Introducción a las simulaciones del factor de fricción	124
10.3. Propiedades del fluido empleado.....	126
10.4. Algoritmo o solver empleado.....	127
10.5. Ecuaciones de comparación.....	128
10.6. Resultados del factor de fricción.....	129
10.7. Resultados del factor de fricción de codo liso sin muelle y comparación con codo liso con muelle insertado.....	131

10.7.1. Representación de coeficiente de Fanning con respecto a los valores del número de Reynolds, para codo con muelle y liso.	131
10.7.2. Representación del patrón del flujo de las distribuciones de velocidad adimensional en las secciones transversales de paso del flujo para codo con muelle y liso.	134
CAPÍTULO 11: ANÁLISIS DEL NÚMERO ADIMENSIONAL DE NUSSELT EN FUNCIÓN DISTINTOS NÚMEROS DE REYNOLDS, PARA UN VALOR DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE 30.000W/M² SOBRE LA PARED DEL CODO SIN MUELLE INTEGRADO.	148
11.1. <i>Geometría y mallado empleados</i>	148
11.2. <i>Introducción a las simulaciones de transferencia del calor</i>	148
11.3. <i>Propiedades del fluido empleado</i>	149
11.4. <i>Algoritmo o solver empleado</i>	149
11.5. <i>Resultados del número de Nusselt de codo liso sin muelle.</i>	150
11.5.1. Representación del gradiente de temperatura de la pared del codo y el fluido	151
11.5.2. Representación de la evolución de la curva del Nusselt local particularizada para cada Reynolds.	153
11.5.3. Representación del número de Nusselt dentro del codo expresado en función del ángulo que ocupa dentro del volumen acodado.	156
11.5.4. Representación logarítmica del número de Nusselt en función de Reynolds para el codo liso, para toda la geometría.	158
CAPÍTULO 12: ANÁLISIS DEL NÚMERO ADIMENSIONAL DE NUSSELT EN FUNCIÓN DISTINTOS NÚMEROS DE REYNOLDS, PARA UN VALOR DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE 30.000W/M² SOBRE LA PARED DEL CODO CON MUELLE INTEGRADO.	159
12.1. <i>Geometría y mallado empleados</i>	159
12.2. <i>Introducción a las simulaciones de transferencia del calor</i>	159
12.3. <i>Propiedades del fluido empleado</i>	159
12.4. <i>Algoritmo o solver empleado</i>	160
12.5. <i>Resultados del número de Nusselt con codo con muelle insertado</i>	161
12.5.1. Representación del gradiente de temperatura de la pared del codo y el fluido	162
12.5.2. Representación de la evolución de la curva del Nusselt local particularizada para cada Reynolds.	164
12.5.3. Representación logarítmica del número de Nusselt en función de Reynolds para el codo con muelle insertado en toda su geometría.....	166
12.6. <i>Resultados del número de Nusselt de codo liso sin muelle y comparación con codo liso con muelle insertado.</i>	167
12.6.1. Comparación de las curvas de Nusselt en el tramo de codo, entre el codo con muelle y el codo liso	167
12.6.2. Gráfica comparativa del número de Nusselt medio en función del Reynolds para codo con muelle insertado y codo liso; comparándolo con la representación para tubería lisa de sección circular.....	172
PARTE V: CONCLUSIONES	176
CAPÍTULO 13: CONCLUSIONES DE LOS ANÁLISIS.....	177
CAPÍTULO 14: LÍNEAS DE PROYECTOS FUTUROS.....	180
BIBLIOGRAFÍA.....	181
ANEXOS	182
ANEXO 1: DOCUMENTO PARA LA OBTENCIÓN DE ARCHIVOS .CAS Y .DAT EN EL SERVIDOR DEL CASO DE FRICCIÓN PARA EL CODO CON MUELLE INSERTADO POR MEDIO DEL USO DE UN JOURNAL.	183
ANEXO 2: DOCUMENTO PARA LA OBTENCIÓN DE ARCHIVOS .CAS Y .DAT EN EL SERVIDOR DEL CASO DE FRICCIÓN PARA EL CODO SIN MUELLE INSERTADO POR MEDIO DEL USO DE UN JOURNAL.	188
ANEXO 3: DOCUMENTOS PARA EL PROCESADO DE LAS VARIABLES A EXTRAER PARA EL ESTUDIO DEL CASO DE FRICCIÓN PARA CODO CON MUELLE INSERTADO	193
ANEXO 4: DOCUMENTOS PARA EL PROCESADO DE LAS VARIABLES A EXTRAER PARA EL ESTUDIO DEL CASO DE FRICCIÓN PARA CODO SIN MUELLE INSERTADO.....	213

AGRADECIMIENTOS

Comienzo dando las gracias a Juan Pedro, por su gran ayuda y su incansable apoyo cuando había fallos en la generación de la malla inicial, procesado de los datos durante el periodo de realización del proyecto, etc. Por lo tanto estoy muy agradecido por su apoyo y confianza en el proyecto y en mí, lo que me hace estar encantado de poder haber desarrollado el proyecto con usted.

También quiero agradecer a David, el haberme echado una mano en la etapa final del proyecto con algunas correcciones.

Por otro lado querría agradecer personalmente a mi familia, el gran apoyo que han supuesto no solo en la realización del proyecto, sino durante todo el periodo de la carrera y en mi desarrollo como persona. Y a Carmen, por estar ahí y soportarme.

PARTE I: INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

Capítulo 1: Antecedentes

La energía, de hoy en día, se ha convertido en una de las necesidades fundamentales de la sociedad y por ello un sector de potente inversión para obtener mejoras en busca del progreso. Desde el principio de los tiempos, el hombre ha integrado la utilización de la energía para facilitar la realización de tareas, pero desde el siglo XIX, el consumo de energía ha aumentado de forma exponencial gracias a los avances científicos y desarrollos tecnológicos. La importancia de la energía es tal que en la actualidad, juega un papel muy importante en diversos sectores como políticos, científicos, económicos, sociales, medio ambientales, etc.

La mayoría de esta energía ha sido obtenida de manera tradicional a partir de combustibles fósiles. Pero diversos aspectos negativos como su agotamiento, aumento de la dificultad de adquisición en los últimos años y los problemas climáticos y daños irreparables sobre el medioambiente han propiciado que se deban buscar alternativas energéticas a ellos.

Existen unas fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles; “las Energías Renovables”, las cuales evitan las problemáticas de los combustibles utilizados hasta entonces. Una de las Energías Renovables de mayor relevancia es la Energía Solar, que permite utilizar la radiación solar para la obtención de energía; por lo cual estamos utilizando una fuente de energía que no se agota. Dentro de las posibilidades que ofrece la energía solar se encuentran, principalmente, la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica.

La energía solar fotovoltaica permite producir electricidad, obtenida directamente de la radiación solar, generalmente mediante un dispositivo denominado célula fotovoltaica. Este tipo de energía fue desarrollada en un principio para dar autonomía energética a los satélites espaciales pero ahora su uso se ha extendido y puede ser utilizada para alimentar aparatos autónomos, proporcionar energía eléctrica a viviendas aisladas de la red eléctrica e incluso producir electricidad a través de redes de distribución.

Por otro lado, la energía solar térmica aprovecha la energía proveniente del sol para calentar un fluido caloportador. Entre las posibilidades que nos ofrece esta tecnología destaca la producción de agua caliente sanitaria (ACS), agua caliente para circuitos de calefacción, la generación de vapor para producción de energía eléctrica o para diversos procesos industriales e incluso se puede emplear como foco caliente en los ciclos de refrigeración por absorción.

Según la temperatura de trabajo del fluido caloportador, los colectores solares se pueden clasificar:

- Colectores solares de baja temperatura.
- Colectores solares de media temperatura.
- Colectores solares de alta temperatura.

Los colectores solares de baja temperatura son usados, generalmente, para producir ACS. De forma muy similar, los colectores solares de media temperatura se emplean para calentar agua o aire para uso residencial o comercial. Por otra parte, los colectores solares de alta temperatura son empleados para la producción de vapor y posterior generación de energía eléctrica. De todos los modelos y diseños existentes, los más empleados en la generación de ACS y, por lo tanto, más cercanos a la sociedad son los colectores solares térmicos de placas planas.

Esta tecnología lleva avanzando desde los años 70, fecha en la que comenzó su implantación y desarrollo. Desde entonces, se han dirigido esfuerzos en mejorar la eficiencia de estos sistemas para aprovechar al máximo posible la radiación solar. Sin embargo, para llevar a cabo investigación experimental en este campo es necesaria una instalación solar, con diversos sistemas de regulación de flujo de calor que se asemejen a la radiación solar, sistemas de medida y control y equipos auxiliares, con el coste que ello conlleva.

Como alternativa, entra en juego la mecánica de fluidos computacional (CFD). Frente a la instalación experimental, ofrece ventajas como el menor coste de ensayos, la diversidad de casos que puedes estudiar variando, con poco esfuerzo, diferentes variables como la el flujo de calor, inclinación del colector, fluido, tipo y tamaño de tubo, materiales, etc.

Se debe añadir que ambos métodos no son excluyentes entre sí. Se tienen que complementar entre ellos para facilitar la comprensión de los fenómenos físicos que tienen lugar en las aplicaciones de interés y poder así contribuir a una mejora de la tecnología.

Capítulo 2: Objetivos del proyecto

Los objetivos que se proponen en el desarrollo de este proyecto se pueden resumir simplemente con el argumento de estudiar las características termo-hidráulicas de un codo con muelle insertado y poder apreciar las ventajas que presenta la utilización de este frente a un codo liso.

Con el desarrollo de este proyecto, se pretende evaluar la caída de presión que existe en un codo liso con un muelle helicoidal insertado para un rango de números de Reynolds, en principio laminares y luego comparar esta caída con la producida en un codo liso sin elementos insertados y averiguar si hay algún rango de valores en los que sea adecuado trabajar con muelle.

Por otro lado, se va a analizar un problema de calor en el que se quiere simular la aplicación de un flujo de calor constante sobre la pared y ver si el número de Nusselt para el codo con muelle insertado, presenta una curva en el trayecto del codo, valores mayores que el número de Nusselt que se obtiene para el codo liso sin inserción de elementos osciladores del flujo. El hecho, que el número de Nusselt fuese mayor para ciertos valores de Reynolds sería positivo para mejorar la transferencia del calor en la tubería acodada.

PARTE II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Capítulo 3: Conceptos generales de mecánica de fluidos.

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los conceptos previos así como las ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos, ya que la simulación numérica se basa en su resolución para la resolución de los problemas. Estas ecuaciones representan los fenómenos físicos que se dan en la mecánica de fluidos.

También se enumerarán los números adimensionales empleados en este proyecto, así como sus definiciones.

3.2. Conceptos previos

3.2.1. Derivada sustancial

Debido al movimiento del fluido, la derivada ordinaria

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.1)$$

ya no representa toda la variación por unidad de tiempo de una magnitud fluida. Para reflejar esta variación se emplea derivada sustancial.

La derivada sustancial para una magnitud fluida ϕ es:

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla(\phi) \quad (3.2)$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial x} u + \frac{\partial \phi}{\partial y} v + \frac{\partial \phi}{\partial z} w + \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.3)$$

donde el término temporal se denomina derivada local y los términos en función de la posición forman parte de la derivada convectiva.

3.2.2. Teorema del transporte de Reynolds.

La derivada sustancial permite calcular la variación de una magnitud fluida respecto a una partícula fluida. El teorema de transporte de Reynolds, por su parte, permite calcular la variación de una magnitud fluida extensiva ligada a un volumen fluido.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{f_1}(t)} \phi \, d\Omega = \frac{d}{dt} \int_{V_{c_1}(t)} \phi \, d\Omega + \int_{S_{c_1}(t)} \phi (V - V_c) \cdot n \, d\sigma \quad (3.4)$$

donde ϕ es la magnitud fluida extensiva definida por unidad el volumen (una magnitud extensiva por unidad de volúmenes una magnitud intensiva), V_f es un volumen fluido, V_c es un volumen de control que coincide con V_f en el instante t , S_c es la superficie dicho volumen de control, V es la velocidad del fluido y V_c es la velocidad la superficie control.

3.3. Ecuaciones fundamentales

Las ecuaciones fundamentales que rigen la mecánica de fluidos son:

- Ecuación de continuidad
- Ecuación de cantidad de movimiento
- Ecuación de conservación de la energía

Estas ecuaciones pueden darse en forma integral o diferencial, dependiendo del problema. Al conjunto de estas ecuaciones en su forma diferencial se le denomina sistema de ecuaciones de Navier-Stokes.

3.3.1. Ecuación de continuidad.

Al plantear sobre el principio de conservación de la masa el teorema de transporte de Reynolds se obtiene la ecuación de continuidad.

El principio de conservación de la masa indica que la base un sistema cerrado permanece constante en el tiempo, así, para un volumen fluido, la conservación de la masa es:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t_1)}^{V_f(t_2)} \rho(\vec{x}, t) \, d\Omega = 0 \quad (3.5)$$

Aplicando el teorema de transporte de Reynolds, queda:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f(t_1)}^{V_f(t_2)} \rho(\vec{x}, t) d\Omega + \int_{SC(t_1)}^{SC(t_2)} \rho(\vec{x}, t) [(\vec{v} - \vec{v}_c) \cdot \vec{n}] d\sigma = 0 \quad (3.6)$$

Tras el desarrollo matemático, su forma diferencial, aplicada a un volumen de control fijo, es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.7)$$

La ecuación de continuidad, tanto en su forma integral como diferencial, representa la variación de la masa de un volumen de control a través de sus superficies de control por unidad de tiempo.

3.3.2. Ecuación de cantidad de movimiento

La Segunda ley de Newton es:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d}{dt} (m\vec{v}) \quad (3.8)$$

La variación de cantidad de movimiento para un volumen fluido es:

$$\frac{d}{dt} (m\vec{v}) = \frac{d}{dt} \int_{V_f(t_1)}^{V_f(t_2)} \rho(\vec{x}, t) \vec{v}(\vec{x}, t) d\Omega = \frac{d}{dt} \int_{VC(t_1)}^{VC(t_2)} \rho \vec{v} d\Omega \quad (3.9)$$

Las fuerzas externas consisten en:

- Fuerzas superficiales:

$$\vec{f}_S = \bar{\tau} \vec{n} \quad (3.10)$$

- Fuerzas volumétricas, de las cuales solo se considerarán la fuerza gravitatoria y las fuerzas inerciales:

$$\vec{f}_V = \rho \vec{f}_m = \rho (\vec{g} - \vec{a}) \quad (3.11)$$

Sustituyendo y aplicando el teorema del transporte de Reynolds para un volumen de control, se obtiene la forma integral de la ecuación de cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{VC(t_1)}^{VC(t_2)} \rho \vec{v} d\Omega + \int_{SC(t_1)}^{SC(t_2)} \rho \vec{v} [(\vec{v} - \vec{v}_c) \vec{n}] d\sigma \\ = - \int_{SC(t_1)}^{SC(t_2)} p \vec{n} d\sigma + \int_{SC(t_1)}^{SC(t_2)} \bar{\tau} \vec{n} d\sigma + \int_{VC(t_1)}^{VC(t_2)} \rho \vec{f}_m d\Omega \end{aligned} \quad (3.12)$$

Siendo su formulación diferencial:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{f}_m = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f}_m \quad (3.13)$$

3.3.3. Ecuación de conservación de la energía

El principio de conservación de la energía establece que la variación de energía en un cuerpo corresponde al trabajo aplicado sobre él, producido por las fuerzas externas, y al calor recibido el exterior:

$$\Delta E = \dot{Q} - \dot{W} \quad (3.14)$$

Así, para un volumen fluido la variación toda la energía es:

$$\Delta E = \frac{d}{dt} \int_{Vf(t_1)}^{Vf(t_2)} \rho \left(u + \frac{1}{2} U^2 \right) d\Omega \quad (3.15)$$

El trabajo realizado por las fuerzas externas se obtiene multiplicando, de forma escalar, estas fuerzas por la velocidad:

$$- \int_{Sf(t_1)}^{Sf(t_2)} (p \vec{n}) \vec{v} d\sigma + \int_{Sf(t_1)}^{Sf(t_2)} (\bar{\tau} \vec{n}) \vec{v} d\sigma + \int_{Vf(t_1)}^{Vf(t_2)} \rho \vec{f}_m \vec{v} d\Omega \quad (3.16)$$

El calor que un volumen fluido recibe por sus superficies viene dado por fenómenos de conducción o radiación. En su interior puede generarse calor mediante

reacciones químicas. El en seno del fluido, el calor es transportado por fenómenos de convección. Así, la variación de calor en un fluido viene dada por:

$$-\int_{Sf(t1)}^{Sf(t2)} \vec{q}\vec{n}d\sigma + \int_{Vf(t1)}^{Vf(t2)} \dot{Q}_{rad} d\Omega + \int_{Vf(t1)}^{Vf(t2)} \dot{Q}_{quim}d\Omega \quad (3.17)$$

Empleando el teorema del transporte de Reynolds y sustituyendo términos, se obtiene la forma integral de la ecuación de conservación de la energía para un volumen fluido:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{Vc(t1)}^{Vc(t2)} \rho \left(u + \frac{1}{2} U^2 \right) d\Omega + \frac{d}{dt} \int_{Sc(t1)}^{Sc(t2)} \rho \left(u + \frac{1}{2} U^2 \right) [(\vec{v} - \vec{v}_c)\vec{n}]d\sigma \\ = - \int_{Sc(t1)}^{Sc(t2)} (p\vec{n})\vec{v}d\sigma + \int_{Sc(t1)}^{Sc(t2)} (\vec{\tau}'\vec{n})\vec{v} d\sigma \\ + \int_{Vc(t1)}^{Vc(t2)} \rho \vec{f}_m \vec{v}d\Omega - \int_{Sf(t1)}^{Sf(t2)} \vec{q}\vec{n}d\sigma + \int_{Vf(t1)}^{Vf(t2)} \dot{Q}_{rad} d\Omega \\ + \int_{Vf(t1)}^{Vf(t2)} \dot{Q}_{quim}d\Omega \end{aligned} \quad (3.18)$$

Si a esta ecuación se le restan los términos de energía mecánica y se expresa en forma diferencial, se genera la ecuación de conservación de la energía interna en forma diferencial:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -p(\nabla \cdot \vec{v}) + \phi_v - \nabla \vec{q} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{quim} \quad (3.19)$$

siendo ϕ_v la función de disipación de Rayleigh.

Por lo tanto, el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes sería:

- Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.20)$$

- Ecuación de cantidad de movimiento

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{f}_m = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f}_m \quad (3.21)$$

- Ecuación de conservación de la energía

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -p(\nabla \cdot \vec{v}) + \phi_v - \nabla \vec{q} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{quim} \quad (3.22)$$

Para resolver este sistema de ecuaciones en derivadas parciales, es necesario establecer una serie de condiciones iniciales para las derivadas temporales y una serie de condiciones de contorno para las derivadas espaciales. Además, también es necesario plantear las ecuaciones de estado en función de las variables termodinámicas que se deseen obtener.

3.4. Números adimensionales

En este proyecto se emplearán con los números adimensionales expuestos en este apartado.

3.4.1 Graetz

El número de Graetz caracteriza el flujo laminar en un conducto.

$$Gz = \frac{\pi D_h}{4 z} Re Pr \quad (3.23)$$

3.4.2 Nusselt

El número de Nusselt representa la relación entre la transferencia de calor por convección y por conducción.

$$Nu = \frac{h_c L}{k_f} \quad (3.4)$$

donde L es la longitud característica, k_f es la conductividad térmica del fluido y h_c el coeficiente de transferencia de calor por convección.

3.4.3 Prandtl

Este número adimensional relaciona la difusividad viscosa frente a la difusividad térmica. Depende únicamente de las propiedades del fluido.

$$Pr = \frac{C_{pf}\mu_f}{k_f} \quad (3.5)$$

donde k_f es la conductividad térmica del fluido, μ_f es la viscosidad dinámica del fluido y C_{pf} es la capacidad calorífica del fluido a presión constante.

3.4.4 Reynolds

Este número adimensional relaciona los términos convectivos y viscosos, caracterizando el movimiento del fluido. A partir de él es posible determinar la naturaleza del flujo, determinando si es un flujo laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho_f U D_h}{\mu_f} \quad (3.6)$$

donde ρ es la densidad del fluido, U es la velocidad del mismo, D_h es el diámetro hidráulico del tubo y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Capítulo 4. Transmisión del calor en tubos

4.1. Introducción y conceptos previos

La transferencia de calor en conductos es uno de los procesos más importantes en ingeniería. El diseño de intercambiadores de calor y el conocimiento de la transferencia del mismo entre un tubo y el fluido que circula por él está estrechamente relacionado con eficiencia energética de los procesos en los que se produce un intercambio de calor. El calor transferido depende del coeficiente transferencia de calor, el área, y la diferencia de temperaturas entre la pared de la tubería y la del fluido que circula.

$$q_c = \bar{h}_c A (T_{pared} - T_{fluido}) \quad (4.1)$$

Esta relación también sirve para determinar el flujo necesario de calor una vez conocido los demás términos.

Cuando la transferencia de calor tiene lugar entre un fluido el interior de un tubo y las paredes del mismo, la temperatura del fluido varía a lo largo del conducto en dirección perpendicular a él, por lo tanto, la temperatura del fluido debe de ser determinada con precisión para obtener resultados acertados.

4.1.1. Coeficiente de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor h_c se puede obtener a partir del número de Nusselt y el diámetro hidráulico, ya que el número de Nusselt se obtiene normalmente de forma experimental.

$$h_c = \frac{Nu K}{D_h} \quad (4.2)$$

$$Nu = \Phi(Re)\psi(Pr) \quad (4.3)$$

$$D_h = 4 \frac{\text{Sección transversal de paso de flujo}}{\text{Perímetro mojado}} \quad (4.4)$$

4.1.2. Temperatura de referencia del fluido

El coeficiente de transferencia de calor h_c , como se ha mencionado antes, depende de la elección de la temperatura de referencia del fluido, la cual, en conductos varía en la dirección del flujo másico \dot{m} y en la dirección en la que se produce la transferencia de calor. Se puede seleccionar como temperatura de referencia del fluido la temperatura en el centro del mismo, pero esta temperatura es difícil de medir de forma experimental además de que no representa una medida del cambio de energía del fluido en todo el conductor.

Para solventar esto generalmente se emplea la temperatura media del volumen fluido T_b . Esto nos permite realizar balances de calor de forma inmediata, porque la diferencia de temperatura media del volumen fluido entre dos secciones es directamente la cantidad de calor transferida:

$$q_c = \dot{m}c_p\Delta T_b \quad (4.5)$$

donde:

q_c = Cantidad de calor transferido [W]

\dot{m} = Flujo másico [kg/s]

c_p = Calor específico a presión constante [kJ/kg K]

ΔT_b = diferencia media de temperatura del volumen fluido entre dos secciones [K o °C]

Esta estimación de la temperatura de referencia del fluido da buenos resultados cuando se trata de un caso con flujo de calor constante las paredes del tubo.

4.1.3. Efecto del número de Reynolds y la caída de presión en transferencia de calor

Para un fluido dado, el número de Nusselt depende, en principio, las condiciones del flujo, las cuales vienen caracterizadas por el número de Reynolds, Re.

$$Re = \frac{\bar{U}D_H\rho}{\mu} = \frac{\bar{U}D_H}{\nu} \quad (4.6)$$

En tubos lisos con suficiente longitud, donde los efectos de entrada no son importantes, el flujo es laminar cuando el número de Reynolds es inferior a 2100, aproximadamente. En el rango de números de Reynolds comprendido entre 2100 y 10000, se produce la transición desde flujo laminar a flujo turbulento. Para Reynolds mayores de 10000, el flujo es completamente turbulento.

En un flujo laminar a través de un tubo no hay mezcla entre las partículas que fluidas calientes y frías debidas al movimiento turbulento, y la transferencia de calor tiene lugar únicamente por conducción. Debido a esto el coeficiente transferencia de calor en flujo laminar es relativamente pequeño.

Cuando se produce la transición del flujo laminar a turbulento también se produce un aumento de la transferencia de calor bastante acusado. Debido a la turbulencia que se genera las partículas de fluido frías y calientes comienzan a mezclarse entre ellas, lo que produce el aumento de dicha transferencia de calor.

Al volverse el flujo turbulento, los remolinos y la turbulencia hace que las partículas fluidas del grueso del fluido se difundan por la capa límite y probablemente penetren en ella. El calor se transfiere de esta manera de forma más rápida y efectiva entre la capa límite y el grueso del fluido completamente turbulento. En la figura 3.1 se puede observar la estructura con flujo turbulento. Las flechas representan los remolinos generados por la turbulencia que van penetrando en la capa límite, facilitando la transferencia de calor.

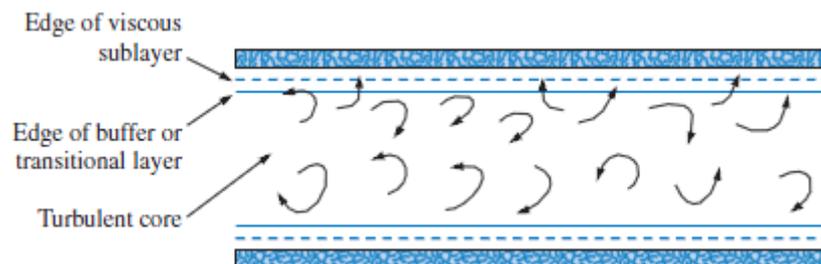


Figura 4.1. Estructura flujo turbulento

Representando el número de Nusselt frente al número de Reynolds se observa claramente lo indicado anteriormente (Figura 4.2).

En la zona laminar la transferencia de calor se produce únicamente por conducción, por lo tanto, es menor al no producirse mezcla de partículas fluidas calientes y frías. En la zona de transición se comienza a producir la mezcla de las mismas, aumentando la transferencia de calor. Finalmente, en la zona turbulenta, las partículas se difunden y penetran la capa límite, con lo que la transferencia de calor continúa aumentando conforme aumenta la turbulencia.

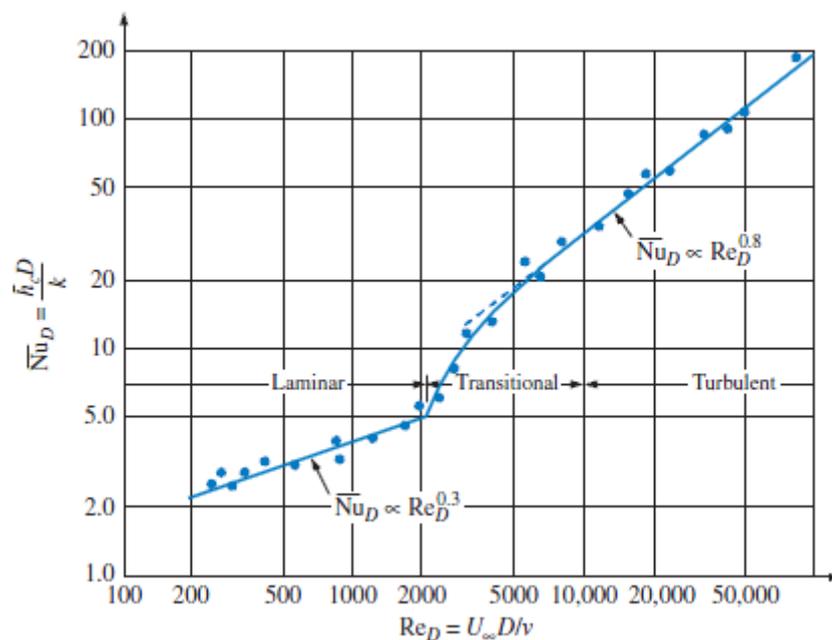


Figura 4.2. Zona con flujo laminar, zona de transición y zona turbulenta

La parte turbulenta del flujo presenta muy poca resistencia a la transferencia de calor, sin embargo, la capa límite si presenta una resistencia térmica a tener en cuenta. El único método efectivo para incrementar la transferencia de calor entre el conductor y el fluido, consiste en aumentar la turbulencia en el grueso del fluido con el fin de que los remolinos turbulentos puedan penetrar a mayor profundidad la capa límite.

Por otra parte, un aumento de la turbulencia viene acompañado por una mayor pérdida de energía, debida caída de presión por fricción en el interior del tubo.

Un diseño óptimo requiere, por lo tanto, un compromiso entre la transferencia de calor y la caída de presión que se produce el tubo.

4.1.4. Efecto del número de Prandtl

Como se ha mencionado anteriormente, el número de Prandtl es una función únicamente de las propiedades del fluido que relaciona la difusión viscosa frente a difusión térmica.

Cuando el número de Prandtl toma como valor la unidad, indica que los perfiles de velocidad y temperatura son similares para ese fluido, por lo que los espesores de las capas límites son iguales.

Si el número de Prandtl es menor que uno, el gradiente de temperaturas cerca de la superficie por la que transcurre el fluido es menos pronunciado que gradiente de velocidad. El espesor de la capa límite de velocidades será menor que el de la capa límite térmica.

Para fluidos con número de Prandtl mayores a la unidad el gradiente de temperaturas cerca de la superficie por la que transcurre el fluido es más pronunciado que el gradiente de velocidad, con lo que, en este caso, la capa límite de velocidad será mayor que la capa límite térmica.

Se puede concluir que, para un número de Reynolds dado, el gradiente de temperatura cerca de la pared, es más pronunciado en fluidos con mayor número de Prandtl que en fluidos con uno menor. Consecuentemente, para un mismo número de Reynolds, fluidos con mayores números de Prandtl darán mayores números de Nusselt.

4.1.5. Efectos de entrada

Al entrar un fluido en un conducto con una velocidad uniforme, las partículas cercanas a la pared del conducto tienden a situarse junto a la misma. A causa de esto aparece una capa límite laminar a lo largo de la pared conducto. Al aumentar la turbulencia del flujo también se vuelve turbulenta. Esta capa límite se seguirá desarrollando hasta ocupar el conducto entero. A partir de entonces, el perfil de velocidades permanece sin cambios.

El desarrollo de la capa límite térmica, se produce de forma similar al desarrollo de la capa límite hidrodinámica. La capa límite térmica va aumentando su espesor hasta que la transmisión de calor se produce entre conducto y el centro del fluido. A partir de

que el perfil de velocidades esté completamente desarrollado el perfil de temperaturas permanece prácticamente constante.

Los perfiles de velocidad y temperatura, depende de si el flujo completamente desarrollado es laminar o turbulento.

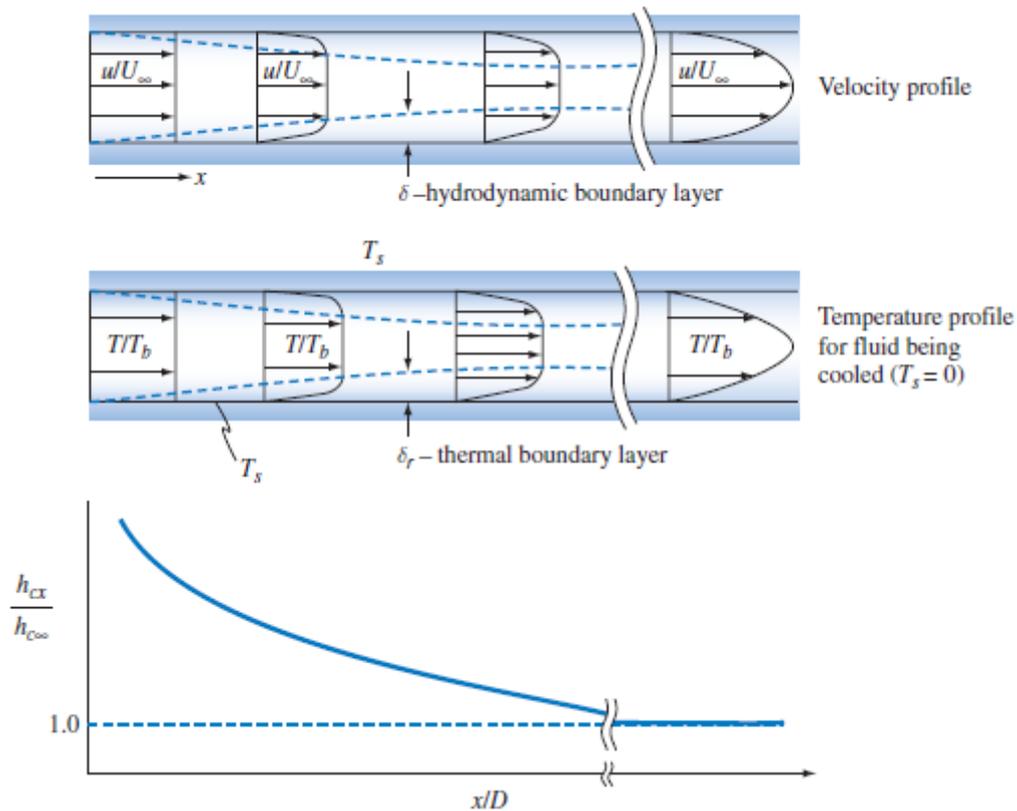


Figura 4.3. Perfiles de velocidad y temperatura en tubo liso

Para flujo laminar, la longitud para completo desarrollo que los perfiles de velocidad y temperatura en un conducto viene dada, respectivamente, por las siguientes ecuaciones.

$$\left(\frac{x}{D}\right)_{lam} = 0.05 Re_{DH} \quad (4.7)$$

$$\left(\frac{x}{D}\right)_{lam,T} = 0.05 Re_{DH} Pr \quad (4.8)$$

4.1.6. Variación de las propiedades físicas

Otro factor que pueden influenciar a la transferencia de calor y en la fricción de forma considerable es la variación de las propiedades físicas con la temperatura. Cuando un fluido que pasa por un conducto es calentado o enfriado su temperatura y, consecuentemente, sus propiedades físicas varían. Para líquidos, la variación de la viscosidad es la más importante. En cambio, para los gases este fenómeno es más complejo ya que, aparte de la viscosidad, la densidad y la conductividad térmica varían significativamente con la temperatura.

Al variar las propiedades del fluido, la determinación del número de Reynolds dependerá de la localización donde esas propiedades han sido evaluadas. Se ha establecido como una buena temperatura donde evaluar esas propiedades, la temperatura media del fluido.

4.1.7. Condiciones de contorno térmicas

Para fluidos con un número de Prandtl de la unidad o menor, el coeficiente de transferencia de calor también depende de las condiciones de contorno térmicas. Para las mismas condiciones geométricas, un mismo número de Reynolds y un mismo número de Prandtl, el coeficiente de transferencia de calor no toma el mismo valor en el caso en que la pared del conducto se mantenga temperatura uniforme o en el caso en que la pared del conducto reciba un flujo de calor constante.

4.1.8. Límites de precisión en la predicción de los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección

Al tratarse de ecuaciones empíricas, se debe de tener en cuenta que el valor del coeficiente de transferencia de calor, que se llegue a obtener, puede no ser exacto. Los resultados obtenidos en varios experimentos, incluso bajo cuidadosas condiciones controladas, difieren apreciablemente.

4.2. Análisis de la convección forzada en tubos para flujo laminar completamente desarrollado

Para ilustrar los conceptos más importantes de la convección forzada, se procederá a analizar con tubo con flujo laminar, en el que se considerará que éste se encuentra completamente desarrollado.

En primer lugar se analizará el flujo sin tener en cuenta la transferencia de calor para, posteriormente, analizar la misma para dos condiciones de contorno térmicas diferentes: Flujo de calor constante en la pared del conducto y temperatura constante en la pared del conducto.

4.2.1 Análisis hidrodinámico

Para proceder a este análisis nos centraremos en la figura 4.4:

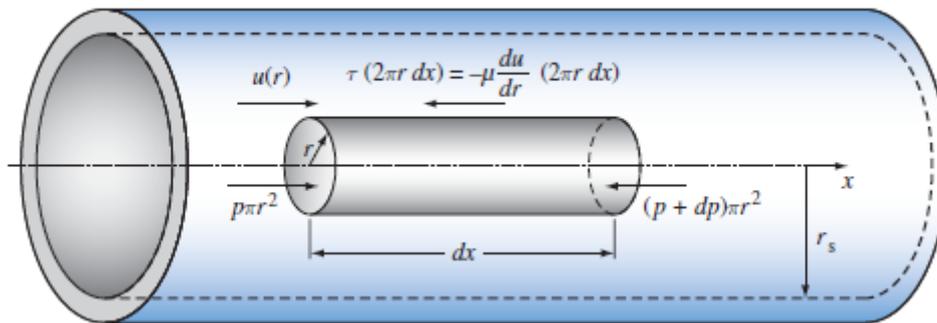


Figura 4.4. Volumen de control para análisis hidrodinámico

Considerando que la presión es uniforme en la sección transversal y que las fuerzas de presión están compensadas con las fuerzas viscosas que actúan sobre la superficie:

$$\pi r^2 [p - (p + dp)] = \tau 2\pi r dx = -\left(\mu \frac{du}{dr}\right) 2\pi r dx \quad (4.9)$$

De esta relación se obtiene:

$$du = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{dp}{dx}\right) r dr \quad (4.10)$$

donde dp/dx es el gradiente axial de presiones.

La distribución radial de la velocidad axial es entonces:

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) r^2 + C \quad (4.11)$$

donde C es una constante de integración cuyo valor es determinado por la condiciones de contorno.

La condición de contorno a emplear es que la velocidad será cero en las paredes del tubo:

$$u = 0 \text{ en } r = r_s \quad (4.12)$$

Empleando estas condiciones para evaluar la constante C obtenemos que la distribución radial de la velocidad axial es:

$$u(r) = \frac{r^2 - r_s^2}{4\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4.13)$$

La velocidad máxima (u_{max}) se da en $r = 0$, y su valor es:

$$u_{max} = -\frac{r_s^2}{4\mu} \frac{dp}{dx} \quad (4.14)$$

$$\frac{u}{u_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{r_s} \right)^2 \quad (4.15)$$

La pérdida de presión a lo largo del conducto viene dada por:

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{U}^2}{2g_c} \quad (4.16)$$

donde \bar{U} es la velocidad media del fluido, L la longitud del conducto, D el diámetro del conducto, ρ la densidad del fluido y f el factor de fricción de Darcy.

Para un flujo en conducto, el flujo másico se obtiene de:

$$\dot{m} = \rho \int_0^{r_s} u 2\pi r dr = \frac{\Delta p \pi \rho}{2L\mu} \int_0^{r_s} (r^2 - r_s^2) r dr = - \frac{\Delta p \pi r_s^4 \rho}{8L\mu} \quad (4.17)$$

Y siendo la velocidad media \bar{U} :

$$\bar{U} = \frac{\dot{m}}{\rho \pi r_s^2} \quad (4.18)$$

sustituyendo \dot{m} , obtenemos otra expresión para la velocidad media:

$$\bar{U} = \frac{\dot{m}}{\rho \pi r_s^2} = \frac{\Delta p r_s^2}{8L\mu} \quad (4.19)$$

Cuyo valor es igual a la mitad del valor de u_{max} .

La caída de presión, anteriormente indicada, también se puede expresar como:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{64L\mu \bar{U}^2}{\rho \bar{U}^2 D} = \frac{64 L \rho \bar{U}^2}{Re_D D 2g_c} \quad (4.20)$$

Ecuación que si se compara con la ecuación 4.16, se observa que el factor de fricción para flujo laminar completamente desarrollado en un conducto es función del número de Reynolds:

$$f = \frac{16}{Re_D} \quad (4.21)$$

La potencia de bombeo necesaria para compensar la caída de presión es igual al producto de la caída de presión dada por el caudal, dividido entre la eficiencia de la bomba:

$$P_p = \frac{\Delta p \dot{Q}}{\eta_p} \quad (4.22)$$

4.2.2. Transferencia de calor

A continuación se procede a añadir el cálculo de la transmisión de calor al análisis anteriormente realizado. Para ello emplearemos dos condiciones de contorno térmicas.

En primer lugar se realizará el análisis imponiendo en la pared del conducto un flujo de calor uniforme. Posteriormente se analizará el caso en el que imponemos como condición de contorno una temperatura constante en la pared del tubo.

4.2.2.1. Flujo de calor uniforme en la pared del tubo.

Para el análisis energético se considera el volumen de control de la figura 4.5:

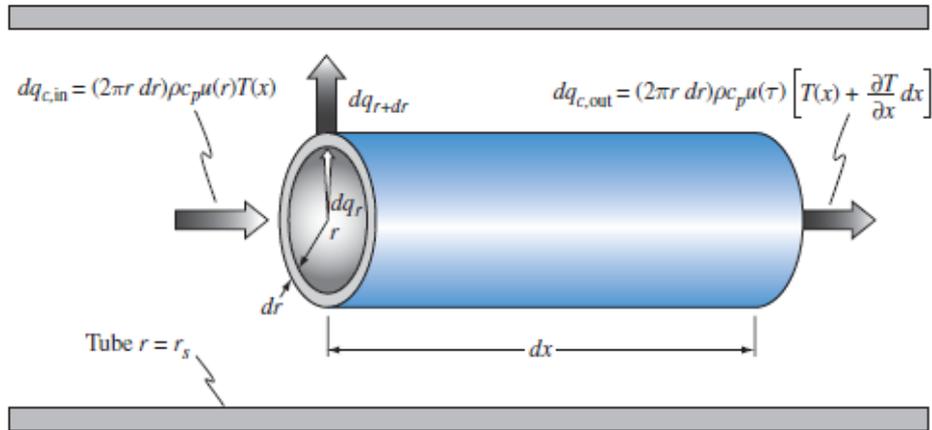


Figura 4.5. Volumen de control para análisis energético

En flujo laminar, la transferencia de calor entra y sale del volumen de control mediante conducción en dirección radial mientras que, en dirección axial, la energía es transportada por convección.

La transferencia de calor por conducción en el elemento fluido es:

$$dq_{k,r} = -k2\pi r dx \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.23)$$

Mientras que la transferencia de calor por conducción fuera del elemento fluido:

$$dq_{k,r+dr} = -k2\pi(r + dr)dx \left[\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr \right] \quad (4.24)$$

La transferencia de calor por convección fuera del elemento fluido viene dada por:

$$dq_c = 2\pi r dr \rho c_p u(r) \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (4.25)$$

Realizando un balance energético que relacione la transferencia de calor por conducción y convección:

$$dq_{k,r+dr} - dq_{k,r} = dq_c \quad (4.26)$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) dx dr = r \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} dx dr \quad (4.27)$$

Y despreciando los términos de segundo orden y reordenando, se obtiene:

$$\frac{1}{ur} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.28)$$

La temperatura del fluido aumenta linealmente en dirección axial debido al flujo de calor uniforme en la pared del conducto:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \text{constante} \quad (4.29)$$

Como el gradiente de temperaturas es constante en dirección axial (ec. 4.29), la ecuación 4.28 se reduce de una ecuación en derivadas parciales a una ecuación diferencial ordinaria, siendo r la única coordenada espacial.

Las condiciones de contorno para la ecuación 4.28 son:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ en } r = 0 \quad (4.30)$$

$$\left| k \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s} = q_s'' = \text{constante en } r = r_s \quad (4.31)$$

Para resolver esta ecuación se sustituye el perfil de velocidad de la ecuación 4.15:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} u_{max} \left(1 - \frac{r^2}{r_s^2} \right) r \quad (4.32)$$

Aplicando las condiciones de contorno e integrado dos veces respecto a r, se obtiene la distribución de temperaturas:

$$T - T_c = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{u_{max} r_s^2}{4} \left[\left(\frac{r}{r_s} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{r_s} \right)^4 \right] \quad (4.33)$$

La temperatura media del fluido (T_b), empleada para la obtención de las propiedades fluidas, se puede determinar como:

$$T_b = \frac{\int_0^{r_s} (\rho u c_p T) (2\pi r dr)}{\int_0^{r_s} (\rho u c_p) 2\pi r dr} = \frac{\int_0^{r_s} (\rho u c_p T) 2\pi r dr}{c_p \dot{m}} \quad (4.34)$$

La temperatura media del fluido también se puede calcular de la forma:

$$T_b - T_c = \frac{7}{96} \frac{u_{max} r_s^2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.35)$$

Y la temperatura de la pared:

$$T_s - T_c = \frac{3}{16} \frac{u_{max} r_s^2}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.36)$$

Siendo el gradiente de temperaturas radial constante, el coeficiente de transferencia de calor medio es:

$$\bar{h}_c = \frac{q_c}{A(T_s - T_b)} = \frac{k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_s}}{T_s - T_b} \quad (4.37)$$

Evaluando este gradiente de temperaturas en $r = r_s$ y sustituyendo las ecuaciones 4.35 y 4.36 en la ecuación 4.37, se obtiene:

$$\bar{h}_c = \frac{24k}{11r_s} = \frac{48k}{11D} \quad (4.38)$$

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_c D}{k} = 4.364 \quad (4.39)$$

Dándose este valor medio del número de Nu para el caso de flujo laminar completamente desarrollado, con flujo de calor contante en las paredes del conducto.

4.2.2.2. Temperatura uniforme en la pared del tubo.

Cuando la temperatura de la superficie del fluido es uniforme, el análisis es más complicado porque la diferencia de temperaturas de la pared del conducto y la temperatura media del fluido varía a lo largo del tubo, es decir, el gradiente de temperatura en dirección axial es función de la longitud.

$$\frac{\partial T_b}{\partial x} = f(x) \quad (4.40)$$

La ecuación:

$$\frac{1}{ur} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.41)$$

En este caso, puede ser resuelta suponiendo que

$$r = r_s \rightarrow T(x, r_s) = \text{constante} \quad (4.42)$$

pero es necesario un proceso iterativo. El resultado no es una simple expresión algebraica, pero el número de Nusselt se puede determinar:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_c D}{k} = 3.66 \quad (4.43)$$

Es la siguiente imagen se puede observar las diferencias entre flujo de calor uniforme temperatura constante las paredes del conducto.

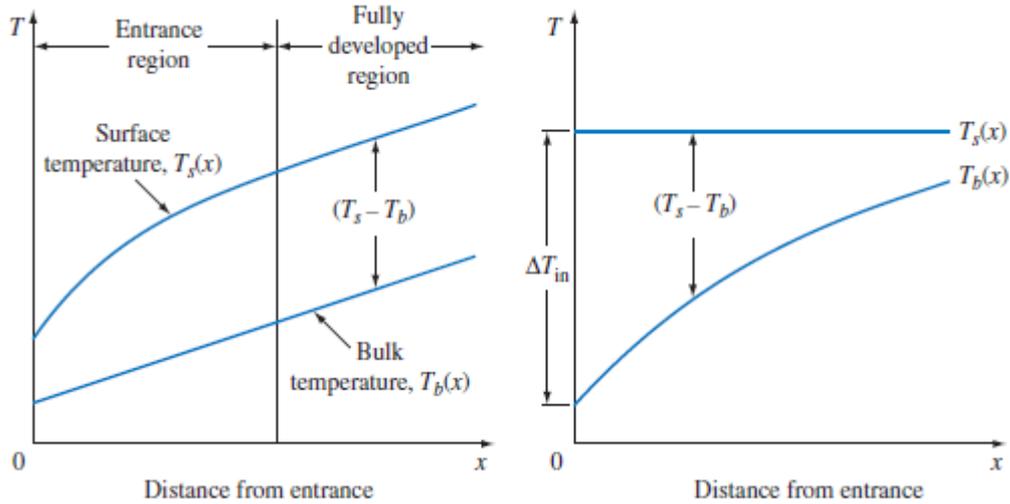


Figura 4.6. Variación de la temperatura media del fluido en función de condición de contorno: Calor uniforme en pared o condición de contorno: Temperatura de pared constante

Como se ha mencionado anteriormente, se observa, para el caso en el que el flujo de calor es constante la par del conducto que, tras los efectos de entrada la diferencia de temperatura entre la pared de temperatura media del fluido es constante. Sin embargo, en el caso de temperatura constante en la pared del conducto, la diferencia de temperatura va variando en función de la distancia a la entrada. Debido a esta variación, se deben aplicar otros valores de temperatura para evaluar la transferencia de calor.

El balance de calor al conducto es:

$$dq_c = \dot{m}c_p dT_b = q_s'' P dx \quad (4.44)$$

donde P es el perímetro de la sección del conducto.

Por lo tanto, el gradiente de temperaturas es de la forma:

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} = \frac{P}{\dot{m}c_p} h_c (T_s - T_b) \quad (4.45)$$

para una temperatura de superficie constante se tiene que:

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{d(T_b - T_s)}{dx} \quad (4.46)$$

reordenando, se obtiene:

$$\int_{\Delta T_{ent}}^{\Delta T_{sal}} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\frac{P}{\dot{m}c_p} \int_0^L h_c dx \quad (4.47)$$

donde:

$$\Delta T = T_s - T_b \quad (4.48)$$

A continuación, integrando:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_{sal}}{\Delta T_{ent}}\right) = -\frac{PL}{\dot{m}c_p} \bar{h}_c \quad (4.49)$$

donde:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{L} \int_0^L h_c dx \quad (4.50)$$

Como T_s es constante, la transferencia de calor por convección en el tubo se puede expresar como:

$$q_c = \dot{m}c_p[(T_s - T_{b,ent}) - (T_s - T_{b,sal})] = \dot{m}c_p(\Delta T_{ent} - \Delta T_{sal}) \quad (4.51)$$

$$q_c = \bar{h}_c A_s \left[\frac{\Delta T_{sal} - \Delta T_{ent}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{sal}}{\Delta T_{ent}}\right)} \right] \quad (4.52)$$

donde el término:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_{sal}}{\Delta T_{ent}}\right) \quad (4.53)$$

es la diferencia de temperatura media logarítmica LMTD, quedando:

$$q_c = \bar{h}_c A_s \left[\frac{\Delta T_{sal} - \Delta T_{ent}}{LMTD} \right] \quad (4.54)$$

4.3 Convección mixta

A continuación realizaremos un breve estudio sobre los fenómenos de convección mixta, tipo de transmisión de calor que se da con frecuencia en colectores solares planos.

4.3.1. Efectos de flotación

Estos fenómenos se producen a causa de la aparición de un gradiente de densidad causado por la mayor temperatura en la pared del tubo respecto a la del fluido. Esto provoca fluido en contacto con la pared ascienda a por la misma hasta la generatriz superior del tubo, ya que éste está más caliente que el fluido que se encuentra el interior del tubo.

Este fenómeno se produce simétricamente, dando lugar a que fluido alojado en la parte superior del tubo desplace hacia la generatriz inferior del mismo, por la parte central. Esto produce las partículas tracen a lo largo del tubo una trayectoria en espiral.

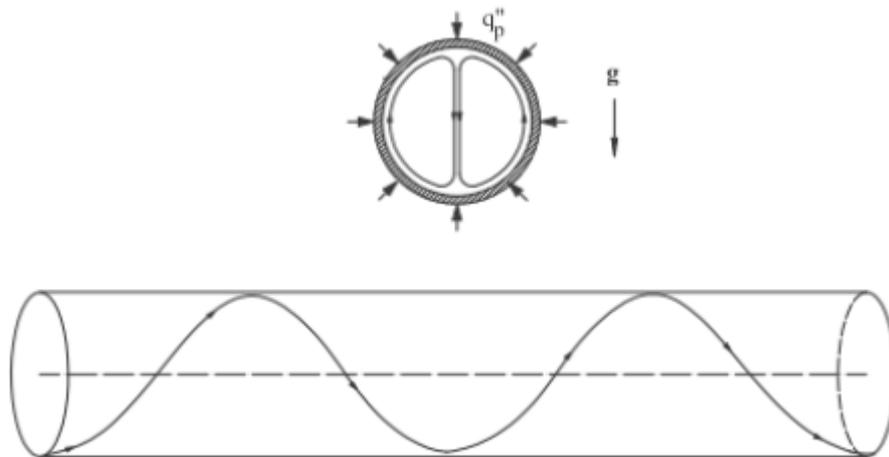


Figura 4.7. Trayectoria de partículas fluidas en perfil transversal y longitudinal de tubo donde se produce el fenómeno de convección mixta.

Debido a estas corrientes el coeficiente de transmisión de calor es mayor la parte superior del tubo. Así, el coeficiente de transmisión de calor varía a lo largo del tubo y a lo largo de cada sección transversal al flujo.

Podemos estimar número de Nusselt promediado en una sección concreta:

$$\overline{Nu_x} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Nu_x d\vartheta \quad (4.55)$$

Quedando, para el caso de calor uniforme:

$$\overline{Nu_x} = \frac{q_p'' d}{k(\overline{T}_s - T_f)} \quad (4.56)$$

Al igual que la convección forzada, la condición de contorno térmica también influye en convección mixta:

Para un flujo de calor constante en la pared del tubo, la diferencia de temperatura entre la pared y el fluido es constante una vez se ha desarrollado térmicamente el flujo.

Para el caso en que la temperatura de pared es constante, el flujo secundario desaparecerá medida que la temperatura del fluido se aproxima la de la pared.

4.3.2. Descripción matemática del fenómeno

4.3.2.1 Introducción

En cualquier fenómeno de transferencia de calor se produce cambios en la densidad del fluido. En el caso de que los efectos de convección forzada sean elevados, las circulaciones mencionadas anteriormente pueden ser despreciables, mientras que en convección natural, los efectos de convección forzada no se tienen en cuenta. Por lo tanto, se hace necesario determinar cuándo predomina un tipo de convección sobre el otro.

Para obtener una idea del efecto de la convección natural o forzada en un flujo se empleará la ecuación de Navier-Stokes, incluyendo los efectos de la convección natural:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta(T - T_\infty) \quad (4.57)$$

Que, sustituyendo:

$$X = \frac{x}{L} \quad (4.58)$$

$$Y = \frac{y}{L} \quad (4.59)$$

$$\theta = \frac{(T - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)} \quad (4.60)$$

$$P = \frac{(p - p_\infty)}{\left(\frac{\rho U_\infty^2}{2g}\right)} \quad (4.61)$$

$$U = \frac{u}{U_\infty} \quad (4.62)$$

$$V = \frac{v}{U_\infty} \quad (4.63)$$

Quedaría:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial X} + \left(\frac{\mu}{\rho U_\infty L}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \left[\frac{g\beta L^3 (T_0 - T_\infty)}{v^2}\right] \frac{v^2}{U_\infty^2 L^2} \theta \quad (4.64)$$

En la capa límite los miembros del lado izquierdo de la ecuación son del orden de la unidad, así como los dos primeros miembros de la parte derecha de la misma. De

esta forma, los efectos de flotación influenciarán al perfil de velocidades, del cual depende la distribución de temperaturas si $\Theta = 1$. Quedando la ec. 4.64 como:

$$\frac{g\beta L^3(T_o - T_\infty)}{\left(\frac{U_\infty L}{\nu}\right)^2} = \frac{Gr_L}{Re_L^2} \cong 1 \quad (4.65)$$

La relación $\frac{Gr_L}{Re_L^2}$, conocida como el número de Richardson (Ri), indica la importancia relativa de los efectos de flotación frente a los efectos de convección forzada. Si es mucho menor que la unidad, entonces tenemos un problema de convección forzada pura. Para valores mucho mayores que la unidad los términos de flotación son dominantes y se tiene un problema de convección natural pura. Entre estos dos límites el problema es de convección mixta, cuando los efectos de convección natural o forzada tienen una magnitud semejante.

En la práctica los efectos de convección natural en flujo turbulento son insignificantes.

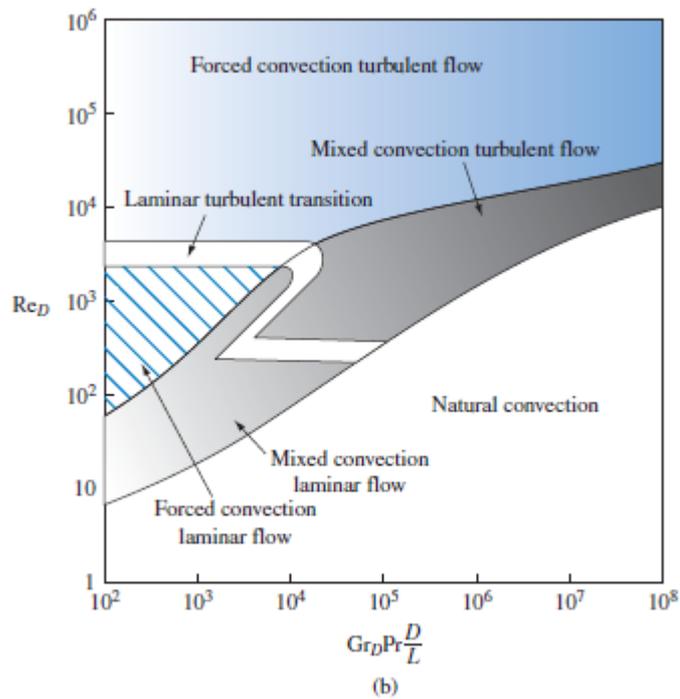
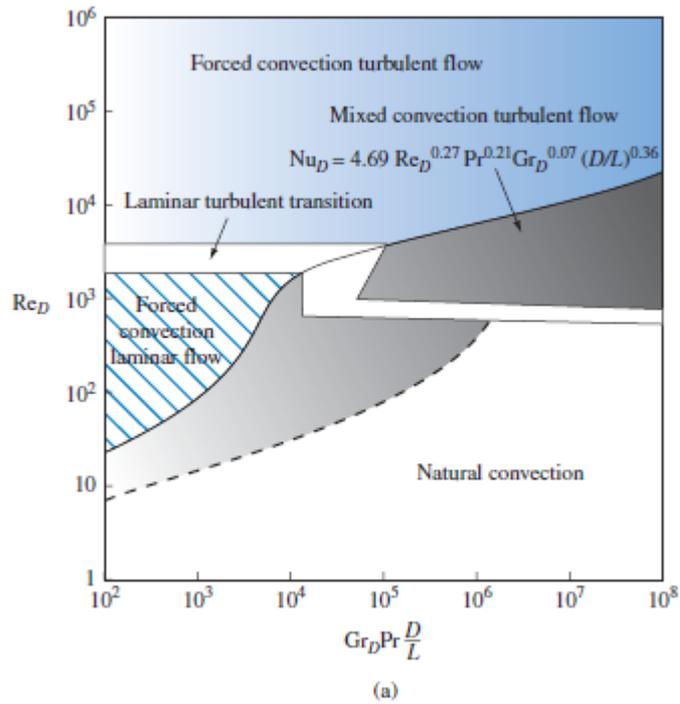


Figura 4.8. Convección natural, forzada y mixta en tubos horizontales (a) y verticales (b)

4.3.2.2 Correlaciones de convección mixta para flujo de calor uniforme

Dentro de las distintas correlaciones para obtener el valor de Nusselt local en caso de flujo de calor uniforme en tubo liso, se encuentra la de Petukhov y Polyakov. Esta

correlación tiene en cuenta tanto el efecto de la convección forzada como el de la convección natural:

$$\overline{Nu}_z = Nu_{z,cf} \left[1 + \left(\frac{Ra_q}{B} \right)^4 \right]^{0.045} \quad (4.66)$$

$$Nu_{z,cf} = 4.36 + 1.31(x^*)^{\frac{-1}{3}} \exp - 13\sqrt{x^*} \quad (4.67)$$

$$B = \begin{cases} 5 \cdot 10^3 (x^*)^{-1} & \text{si } x^* < 1.7 \cdot 10^{-3} \\ 1.8 \cdot 10^4 + 55 (x^*)^{-1.7} & \text{si } x^* > 1.7 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (4.68)$$

Capítulo 5. Inserción de muelles en tubos

5.1. Introducción

La mejora de la transferencia de calor se considera hoy día como una rama más de la transmisión de calor. El principal objetivo de la mejora es aumentar el calor obtenido, partiendo de la ecuación:

$$q_c = \overline{h_c} A \Delta T \quad (5.1)$$

El estudio de la mejora de la transmisión de calor se basa en diversas disciplinas, siendo una de ellas la mecánica de fluidos.

El empleo de técnicas de mejora lleva asociada una penalización debida las pérdidas por fricción que se producen. Así, para obtener una mejora global debe de hallar la relación óptima mejora la transferencia de calor pérdidas por fricción.

5.2. Técnicas de mejora de la transferencia de calor

Considerando en primer lugar un flujo en un conducto liso de sección transversal circular, caracterizado por la velocidad media del flujo u , el diámetro interior del conducto D y la viscosidad cinemática del fluido ν . Se denomina flujo oscilatorio puro (pure oscillatory flow, OPF) a la superposición de un movimiento oscilatorio sobre dicho flujo. (Figura 5.1). Para caracterizar un POF se requiere, además de los parámetros anteriores, un parámetro adicional: la velocidad de oscilación $u_0 = x_0 \omega$, siendo la amplitud de oscilación x_0 y la frecuencia angular de oscilación ω .

Por otro lado en el caso que insertemos una serie de elementos equiespaciados se obtiene un flujo oscilatorio con orificios deflectores (oscillatory baffled flow, OBF) (Figura 5.1). En la caracterización de un OBF intervienen, además de los parámetros anteriores, dos parámetros geométricos: el diámetro interior del elemento deflector D y la distancia entre elementos deflectores L .

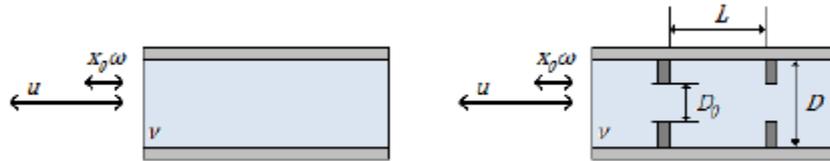


Figura 5.1. Parámetros de caracterización del flujo oscilatorio. Izquierda, flujo oscilatorio puro (POF). Derecha, flujo oscilatorio con orificios deflectores (OBF).

Los dispositivos de mezcla que generan en su interior un OBF se conocen como columnas de flujo oscilatorio con orificios deflectores (oscillatory baffled column, OBC) (Figura 5.2)

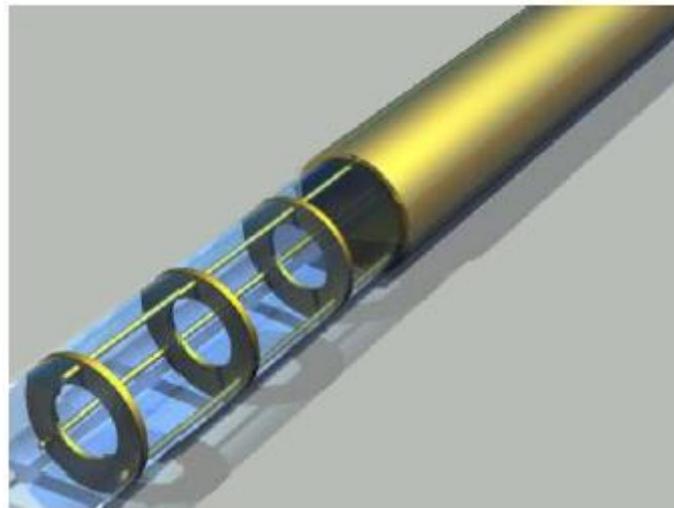


Figura 5.2. Forma típica de una columna de flujo oscilatorio con orificios deflectores OBF.

Por lo tanto los aspectos que están siempre presentes en estos equipos de mezcla tubulares:

- Presencia de elementos insertados espaciados uniformemente
- Existencia de un flujo oscilatorio sobre un flujo neto.

Las diversas técnicas utilizadas para obtener mejoras pueden ser divididas en dos grandes grupos:

- Técnicas activas: Aquellas en las que se requiere una potencia adicional externa a la del movimiento del fluido.
- Técnicas pasivas: Aquellas en las que no se requiere una potencia adicional externa a la del movimiento de fluido.

La mayoría de las técnicas empleadas en la actualidad son pasivas. Éstas consisten en la modificación de las superficies de intercambio, mediante edición de partículas sólidas o mediante la inserción de dispositivos. Estas técnicas de mejora permiten la posibilidad de emplear más de una a la vez, de tal manera que la mejora obtenida sea mayor que la empleada de forma individual.

De todas las técnicas pasivas existentes, las viables económicamente son las superficies rugosas en las paredes del conducto y la inserción de elementos.

Entre los tubos con rugosidad integral destacan aquellos en los que la rugosidad se produce por deformación en frío de la pared del tubo liso. Estos tubos suelen ser más efectivos en flujo turbulento.

Respecto a los elementos insertados, éstos permiten adelantar la transición de régimen laminar a turbulento, además de aumentar la propia turbulencia. En flujo laminar en un tubo liso, las partículas siguen trayectorias longitudinales, por lo que sólo hay transferencia de calor mediante transporte molecular y existe una resistencia térmica que ocupa todo el tubo. Un aumento significativo de la turbulencia se traduce en un aumento de la transferencia de calor ya que las partículas fluidas se mezclan entre sí todas direcciones, reduciendo la resistencia térmica anteriormente mencionada.

De entre todos los posibles elementos insertados destacan las láminas y los muelles en espiral. Las láminas en espiral han sido ampliamente estudiadas y existen correlaciones para régimen laminar, de transición, y turbulento. Por el contrario, los estudios del uso de muelles en espiral son escasos.

5.3. Características de los muelles. Parámetros.

Tal como se ha redactado en capítulos anteriores y como versa el título de este proyecto, se estudian las características termo-hidráulicas de un codo de 180° con la inserción de un muelle en el panel del absorbedor, que permita mejorar la eficiencia del colector solar.

Previo al uso de los mismos se deberá remarcar la forma de caracterizar a los mismos, conociendo su determinación y nomenclatura. Dichos valores serán los siguientes:

Paso del muelle (p): Se denomina paso del muelle a la distancia de avance del muelle para dar un giro sobre sí mismo de 180° .

- Espesor del muelle (e)
- Diámetro del muelle (d)

Por otro lado, se definen también los valores denominados “parámetros adimensionales”, que también caracterizan la geometría de los muelles. Dichos valores son los siguientes:

- Paso adimensional (p/d)
- Espesor adimensional (e/d)
- Relación paso-diámetro de hilo (p/e)

Existen otras variables que aportan información para la caracterización de los muelles en espiral, tales como el ángulo de hélice, que describe la inclinación sobre la horizontal del muelle sobre la que se encuentran las espirales del muelle.

Sobre estos parámetros se trabajará el ensayo, considerando los mínimos suficientes para el conocimiento de la geometría del muelle para la aplicación deseada.

5.4. Muelles insertados en tubos

Actualmente los muelles insertados en tubo se utilizan en aplicaciones como positivos de refrigeración de aceite, precalentadores o calderas. Estos presentan algunas ventajas respecto a otros sistemas de mejora de la transferencia de calor:

- Bajo coste.
- Fácil instalación y desinstalación.
- Conservan la resistencia mecánica del tubo original.
- Posibilidad de introducirlos en un tubo liso de una instalación existente.

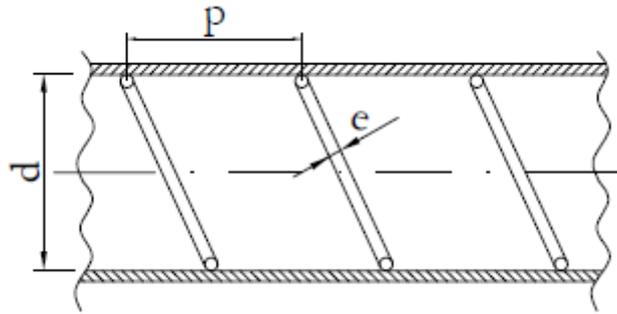


Figura 5.3. Sección longitudinal tubo con muelle helicoidal insertado ajustado a la pared.

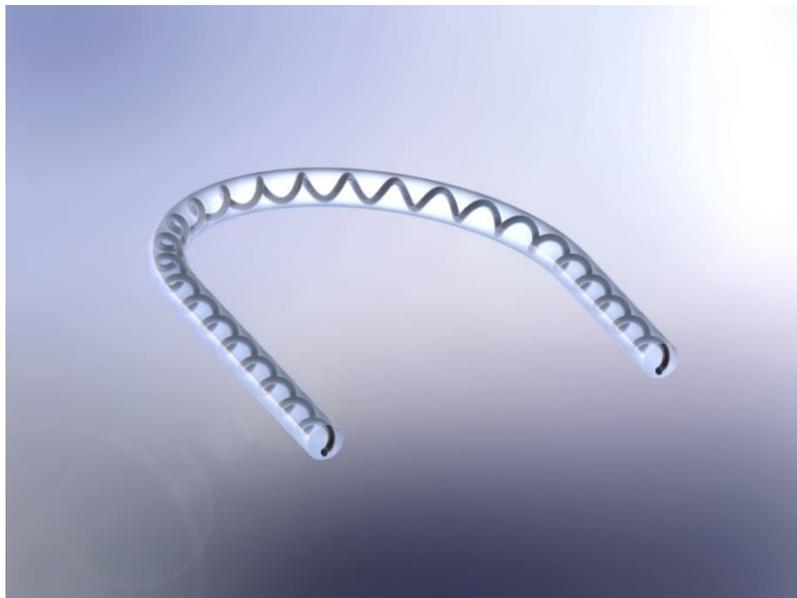


Figura 5.4. Codo de 180° con muelle helicoidal insertado

A causa de la presencia del muelle el flujo se modificada, respecto al que encontraríamos el tubo liso:

- El muelle puede actuar generando una espiral en el flujo (swirl) que propicia fuerzas centrífugas que favorece la convección y mejora la transferencia de calor.

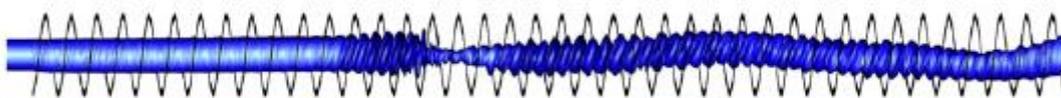


Figura 5.5. Espiral creada en el flujo a causa de la inserción de un muelle helicoidal

- Por otra parte, muelle también puede actuar incrementando la turbulencia del flujo, adelantando la transición de régimen laminar a turbulento. Este hecho también aumentaría la transferencia de calor.
- Los muelles dependiendo de su geometría (paso adimensional, p/d y del espesor adimensional, e/d) generan un adelanto de la transición de la turbulencia promoviendo su aparición de forma suave, lo que actúa incrementando la turbulencia del flujo. Se producen aumento de la transferencia del calor obtenido en el rango de $1000 < Re < 4000$, que va acompañado de un moderado aumento de la pérdida de presión, que hace de estos dispositivos una solución factible para su implementación en equipos tubulares de intercambio térmico que trabajan en este rango operativo. Además como se emplean muelles insertados ajustados a la pared, al estar en contacto con la pared del tubo, también actúan como elementos de rugosidad, perturbando la subcapa límite laminar existente.
- En este proyecto será de vital importancia analizar la interacción entre los vórtices de Dean asociados a la fuerza centrífuga del flujo al cruzar el codo y las estructuras de swirl generadas axialmente por el muelle, las cuales son responsables de las características termo-hidráulicas a identificar. Además podemos apreciar en la comparativa del estudio de codo con muelle insertado y codo sin muelle insertado; que en el primer caso se hace presente en las secciones transversales un swirl en la dirección de desarrollo del muelle, pero en el segundo caso se aprecia la aparición de los típicos vórtices de Dean.

A partir de los dos mecanismos citados anteriormente, los muelles insertados mejoran la transferencia de calor. Dependiendo de las condiciones del flujo y la geometría del muelle pueden darse uno o los dos fenómenos.

Actualmente, a pesar de ser una disciplina interesante para la mejora de la transferencia de calor en tubos, son necesarias correlaciones fiables para extender su uso, ya que no se dispone de ellas debido a su escaso estudio.

5.5. Estudios anteriores sobre el uso de muelles en el panel absorbedor.

La aparición de la energía solar térmica como una aplicación para los intercambiadores de calor, ha hecho a este tipo de captación de energía renovable avanzar mucho en su corta andadura, ya que gran parte de las investigaciones llevadas a cabo para la mejora de transferencia del calor ya habían sido objetivo de estudio.

Conforme al desarrollo de la redacción de esta memoria, se ha procedido a realizar una revisión bibliográfica sobre estudios previos que hayan consistido en la mejora de la transmisión del calor aplicada a instalaciones solares térmicas, de la cual se exponen a continuación las fuentes más destacadas.

Diversos estudios han corroborado que los avances obtenidos en la mejora de la transmisión del calor pueden ser aplicables a la energía solar térmica. De este modo, el equipo de Cortés [1990] ya se lanzó a la mejora de colectores solares a través de la promoción de turbulencia en los conductos mediante tubos corrugados.

Prasad, B.N. [1988] y Varum et al. [India, 2007], propusieron el estudio del efecto de la rugosidad artificial en la transferencia del calor y el factor de efecto de fricción en un calentador solar de aire. El primero de éstos realizó inserción de láminas espirales, descubriendo que la pérdida de carga que experimentaba era mayor que la mejora en sí de la transmisión de calor, que se vio mejorada en un 30%.

Por otra parte, Lambert, A.A. [México, 2006], comenzó a proponer el uso de flujos laminares oscilatorios para mejorar la transferencia de calor en colectores solares de aire.

Dovic et al. [Croacia, 2008], propusieron mejoras en la soldadura de los conductos con el absorbedor, alegando que la mejora de éste detalle en el sistema de colección de energía podía suponer mejoras de hasta un 20% en el coeficiente de transmisión del calor.

Además de los estudios considerados para la mejora de la transmisión del calor en sistemas de colección de energía solar térmica, se han realizado investigaciones para obtener una mayor energía del sol realizando mejoras en la instalación, lo que se denota como mejoras físicas.

Asimismo, Cindrella [1991], propuso la colocación de conductos de aleación de cobalto y cadmio recubiertos con una capa de color negro, alegando que este sistema presentaba una mayor absorción y una menor emisividad.

Por otro lado, Pucar et al. [2005], realizaron un estudio que versaba sobre el efecto de la luz difusa e indirecta que intervenía en la ganancia de energía térmica en los colectores, pudiendo calentar los fluidos incluso con baja iluminación. Este estudio concluyó proponiendo la instalación de colectores ajustables para tomar en todo momento la mayor cantidad de energía posible de sol.

Finalmente, para la redacción de este proyecto, se han considerado como fuentes más destacables, las siguientes que citamos, por sus similitudes a la línea de investigación del proyecto a realizar. Dichas fuentes son explicadas más detalladamente bajo estas líneas:

KUMAR, A. PRASAD, B. N: "Investigation of twisted tape inserted solar water heaters, heat transfer, friction factor and thermal performance results" Renewable Energy, Vol. 19, pags. 379-398, año 2000.

HOBBI, ALIREZA: "Design of solar water heating systems for cold climate and study of heat transfer enhancement devices in flat plate solar collectors". Director: Dr. Kamran Siddiqui, Concordia University (Montreal). Departamento de Ingeniería industrial y mecánica, Marzo de 2007.

JAISANKAR, S. et al: "Experimental studies of heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes". Applied Thermal Engineering 29 pags. 1224-1231, Julio 2007 (fecha recepción del artículo).

A continuación se procede a estudiar en detalle las fuentes tomadas y a discutir qué tipo de investigaciones llevaron a cabo, destacando como principal las líneas más similares a las investigaciones realizadas por el equipo que suscribe.

5.5.1.- Kumar-Prasad.-

En referencia al artículo publicado por **Kumar y Prasad**, se aprecian datos relevantes para la investigación del grupo:

Se tiene un ensayo para analizar la mejora de colectores solares planos mediante inserción de muelles en el sistema de tuberías del absorbedor obteniendo mejoras notables. Las condiciones de operación de la experiencia son las siguientes:

- Reynolds sobre 12000 (se contempla que se mueve en rangos de Reynolds entre 4000 y 23000).
- Orientación de las placas: Inclinación de 43°
- Disposición de conductos en el colector: Serpentin (ensayos simultáneos).
- Tuberías de 1,6 cm de diámetro
- Intensidad de radiación solar entre 800 y 1000 W/m².
- $Nu_s/Nu = 1,3 + 2,88/y$ (Donde Nu_s/Nu es la mejora del número de Nusselt en base a la distancia y , e y es la distancia de paso entre espiras del muelle).
- Ensayo en el exterior en la franja horaria entre las 11 y las 14 horas.

Se obtienen como conclusiones principales que al insertar dispositivos en el sistema de tuberías que compone el sistema de colección, más en concreto en el absorbedor, se observan mejoras experimentales en el rendimiento de absorción de energía solar y mejoras notables en la transferencia de calor, fijando en un 30% el porcentaje mínimo de mejora del sistema.

Otra de las conclusiones destacables del citado artículo figura que, para un menor paso entre muelles, la transferencia de calor será mayor, presentando también una mayor pérdida de carga, hecho que se deberá tener en cuenta en el dimensionado de la instalación y en base a la relación de energía obtenida frente a energía invertida.

No obstante, tras la lectura del artículo por parte del equipo investigador se consideraron algunos puntos no muy detallados. Así, se observa que los valores de convección natural no son analizados, hecho demostrado al observar la disposición de los termopares en la instalación, ya que no contemplan la variación de temperatura en una misma sección transversal en ningún punto de la instalación.

Por otra parte, también se observa en el artículo un postulado por parte de Kumar y Prasad, por el cual se afirma que para una mayor radiación se obtendrán unos valores de transferencia de energía mayores, revirtiendo esto en un mayor rendimiento de transferencia de calor. Este hecho no es probado con medidas experimentales ni es basado en una experiencia concreta. La afirmación por parte de los investigadores está basada en una ligera tendencia de las medidas tomadas pero no ahondan en este dato. Se considerará, por parte del equipo investigador que suscribe, que este postulado no reviste de una veracidad total, ya que ésta debe ser demostrada.

5.5.2. Alireza Hobbi.-

De la revisión documental realizada a la tesis de **Alireza Hobbi** se abstraen las siguientes conclusiones:

Se realiza un ensayo para observar la posible mejora al insertarle dispositivos de 4 tipos a los conductos del absorbedor. Se mide la transferencia de calor experimentada y se realiza el ensayo de forma experimental y a través del software TRANSYS.

- Valores de Reynolds: Oscilan entre 200 y 5500.
- Tipo de captador: Captador solar plano con eficiencias sobre el 50%
- Fluido de trabajo: Disolución Agua-Propilenglicol al 50%.
- Área de colector: 0,145 m².
- Diámetro conductos: 13,38 mm.
- Condiciones ensayo: Interior, colector sin inclinación.

Por parte del equipo investigador se han encontrado similitudes y divergencias hacia el artículo citado. Por una parte, se observa la consideración de la convección natural haciendo referencia a que los mecanismos de transmisión de calor que intervienen en la experiencia son principalmente la radiación y de forma menos relevante la convección mixta.

En base a las condiciones de operación dadas para el sistema, el equipo investigador encabezado por Alireza Hobbi concluye determinando que no se aprecian mejoras significativas para los 4 tipos de mejoras propuestas en el desarrollo de sus

investigaciones. No obstante, se consideran algunas objeciones que el equipo investigador considera destacables y que fomentan una pequeña divergencia con las investigaciones que el citado equipo contempla.

En primer lugar, se observa que, pese a versar la investigación en un colector solar plano, que presumiblemente será empleado para la obtención de ACS en latitudes frías, no se recrean condiciones para el comportamiento de un sistema de captación solar real. Estos datos cabe destacarlos por la extremadamente reducida área del colector y la no inclinación del mismo. Se destacará también la no inclinación del colector en los ensayos además de la realización de los mismos en el interior con una lámpara tipo flexo que pretende “recrear” la radiación solar incidente en un colector. Por tanto, y a criterio del equipo que suscribe, pese al empeño de tratar de recrear las condiciones de termosifón empleando bajas velocidades de flujo, no se consigue con esta única consideración las condiciones de una instalación de captación de energía solar real.

Además, no refleja un criterio de ensayo ni datos experimentales para la experimentación del sistema en tubo liso, lo que no permite al lector comparar los datos para corroborar la no mejora postulada. También se destaca la influencia de la convección natural en la transferencia de calor pero no es medida experimentalmente, no se ofrecen datos experimentales que corroboren que exista un gradiente circunferencial de temperaturas.

Finalmente, y estando acorde a esta última conclusión el equipo que suscribe, se aprecia, por parte de los autores la gran necesidad de futuros trabajos a corto y largo plazo, además de practicar experiencias en exteriores y destaca la gran escasez de literatura referente a mejoras de colectores solares planos además de la necesidad de más investigaciones para una correcta mejora del funcionamiento de los mismos.

Otra de las conclusiones destacables del citado artículo figura que, para un menor paso entre muelles, la transferencia de calor será mayor, presentando también una mayor pérdida de carga, hecho que se deberá tener en cuenta en el dimensionado de la instalación y en base a la relación de energía obtenida frente a energía invertida.

No obstante, tras la lectura del artículo por parte del equipo investigador se consideraron algunos puntos no muy detallados. Así, se observa que los valores de convección natural no son analizados, hecho demostrado al observar la disposición de los termopares en la instalación, ya que no contemplan la variación de temperatura en una misma sección transversal en ningún punto de la instalación.

Por otra parte, también se observa en el artículo un postulado por parte de Kumar y Prasad, por el cual se afirma que para una mayor radiación se obtendrán unos valores de transferencia de energía mayores, revirtiendo esto en un mayor rendimiento de transferencia de calor. Este hecho no es probado con medidas experimentales ni es basado en una experiencia concreta. La afirmación por parte de los investigadores está basada en una ligera tendencia de las medidas tomadas pero no ahondan en este dato. Se considerará, por parte del equipo investigador que suscribe, que este postulado no reviste de una veracidad total, ya que ésta debe ser demostrada.

5.5.3.- Jaisankar.-

Por último, se procede a la revisión del artículo publicado por el grupo investigador de **Jaisankar**, del departamento de ingeniería química del instituto nacional de tecnología de la India.

En este artículo se observa la continuación de las mejoras en los conductos del absorbedor propuestas por Kumar y Prasad. Estas mejoras versaban en la inserción de dispositivos en los conductos a fin de obtener un flujo en espiral y favorecer el intercambio de calor, obteniendo mejores eficiencias del sistema instalado. Para el caso del equipo de Jaisankar se tiene la aplicación en un colector solar plano que emplea el sistema de flujo por termosifón. En el citado estudio expresa las siguientes condiciones experimentales:

- Área de colector: 1 m^2 .
- Volumen tanque acumulador: 100 litros.
- Tuberías: Cobre con espesor de 0,3 mm y diámetro interior de 11 mm.

- Valor de paso entre muelles (y): de 3 a 5.
- Ensayo: realizado en exteriores a lo largo del día.
- Distribución de los conductos en el colector: Distribución en parrilla.

Observamos así diferencias con las condiciones experimentales de los estudios realizados por Kumar y Prasad, en los que se realizaban las medidas entre las 11 y las 13 horas y la disposición de los conductos era en serpentín.

Las medidas son más convincentes y presenta una mayor toma de datos que los experimentos realizados anteriormente por Kumar y Prasad. A diferencia de los mismos, la expresión empleada para el cálculo del factor de fricción está basada en la ecuación de Fanning.

Las conclusiones obtenidas, en las que se expresa su mejora en el intercambio de calor para ambos tipos de dispositivos insertados, son análogas a las obtenidas por Kumar y Prasad, lo que conduce al equipo investigador que suscribe a plantear la mejora de la eficiencia térmica como una opción en la inserción de dispositivos en los conductos.

Como objeción a presentar en el artículo sobre las investigaciones llevadas a cabo, cabe destacar nuevamente la referencia a la convección como mecanismo principal de transmisión del calor en el sistema pero no ahondando en el tipo de convección dominante, ni dando valores experimentales para tal fin.

5.5.4. Experiencia del equipo investigador.

Además de los estudios de mejora realizados por Prasad [1988], Kumar [1999], Jaisankar et al. [2008] y Hobbi [2007], cuyo contenido ya se ha revisado y detallado en capítulos anteriores, el estudio de la inserción de dispositivos para la mejora de eficiencia de colectores solares térmicos ha sido investigado por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UPCT.

De este modo, tras llevar a cabo una documentación sobre la línea de investigación del departamento, en la cual se incluye el presente proyecto, hasta la fecha de redacción del mismo, se han obtenido los siguientes resultados.

Por un lado, Alberto García Pinar [2006], en su tesis doctoral, estudió la mejora de transmisión del calor a través de tubos corrugados y dispositivos insertados en tubos lisos con fluidos Newtonianos.

Por otra parte y siguiendo la línea del departamento, Elena López Galiana [2009], comenzó a modelar una instalación solar térmica y a aportar las mejoras postuladas usando como software TRNSYS. Para el caso de López, la inserción del muelle se centró en un p/d de 1.65 y un e/d de 0.07, demostrando una leve mejora en la eficiencia del sistema para las condiciones dadas.

Continuando el camino marcado, Agustín Villa Ortiz [2010], realizó ensayos a la instalación solar térmica a través del software TRNSYS, probando un rango más amplio de muelles con diferentes pasos adimensionales y distintos espesores, lo que llevó también a resultados positivos en la línea de investigación.

Más tarde llegó el proyecto de Francisco José Lorente Navarro [2011], que pretendía realizar mejoras e investigar los resultados obtenidos por García y Villa, mediante la inserción de muelles en un modelo matemático a través del software Matlab, dando lugar a nuevos resultados, se determina que geometrías se deben usar en instalaciones de colectores solares, así como otras variables que tienen influencia o no en la inserción de muelles.

Coetáneamente llevó a cabo su proyecto Samuel Espín Tolosa [2011], cuyo objetivo es facilitar las herramientas de software para el estudio del flujo oscilatorio en los tubos con muelles insertados y poder llevar a cabo la generación paramétrica de mallados en este tipo concreto de geometrías y el desarrollo de una aplicación para el análisis mediante la inyección de partículas. Sobre este proyecto hablaremos un poco más adelante en este apartado, ya que es a partir de esta geometría de la que se parte para generar el mallado del codo del presente proyecto.

Más adelante presentó como Trabajo Fin de Periodo Formativo de Doctorado de David Saura Pérez [2013], cuyo objetivo era usar el CFD para analizar los fenómenos de convección mixta en colectores solares planos de tipo serpentín, en particular se buscaba la solución del campo de velocidad, presión y temperatura del flujo circulante, considerando la absorción de calor a través de la soldadura de unión entre el colector

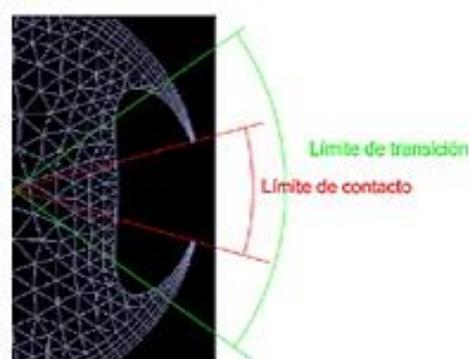
solar y el absorbedor. Sobre este último punto, se confirmó una mejora de la transferencia del calor con la penetración del calor a través de la soldadura que considerando calor uniforme sobre la pared.

Aparte de estos estudios se pueden incorporar proyectos experimentales como son el de Emmanuel Pérez Jiménez [2009], cuyo principal objetivo era evaluar cómo mejorar la transferencia del calor, los muelles en espiral cuando trabajan con fluidos no Newtonianos, comparándolos con la que mejora que producen, con el uso de fluidos Newtonianos. Para ello, se evaluó el comportamiento termo-hidráulico de los muelles en espiral de diferentes geometrías.

Cabe destacar, como se ha escrito previamente en este capítulo que el diseño que se ha realizado del codo, parte de un estudio previo de simulación de la tubería con muelle integrado en un captador solar.¹

Para entender un poco mejor los pasos que se han seguido en el presente diseño, se hace una breve explicación de los pasos seguidos por el compañero anterior.

El proyecto de integración de un muelle en una tubería para su análisis computacional, se tuvo que enfrentar en primer lugar a la problemática de representar la geometría. El primer paso fue generar la superficie transversal de paso del flujo por la tubería, en la cual se despreció la zona de contacto del muelle con el tubo, al ser un área tan reducida para cualquier tipo de mallado, además de que los efectos del flujo en esa zona no sería relevante, lo cual podemos apreciar en la Figura 5.8.



¹ S. Espin Tortosa. Generación automática del mallado y análisis lagrangiano del flujo oscilatorio en tubos con muelles insertados. PFC of Technical University of Cartagena, 2012

Figura 5.8. Superficie transversal donde se representa el límite de transición y el límite de contacto.

El término de contacto se refiere al ángulo de contacto entre la pared interior del conducto y el muelle, es decir en la zona de soldadura. El otro término que se encuentra, es el límite de transición, que se refiere al ángulo de la zona de transición, que va desde la zona soldadura hasta el límite donde comienza el mallado denso. Esta zona indica el hueco de menor tamaño que hay entre el muelle y la pared. La zona a mallar para esas caras será el límite de transición menos el límite de contacto.

Para facilitar el mallado se crearon 3 caras diferenciadas, donde una ocupaba la mayor parte del paso del fluido por la tubería, mientras que las otras dos eran las oquedades que se acercan al punto de contacto entre muelle y tubería. Finalmente se queda con esta geometría:

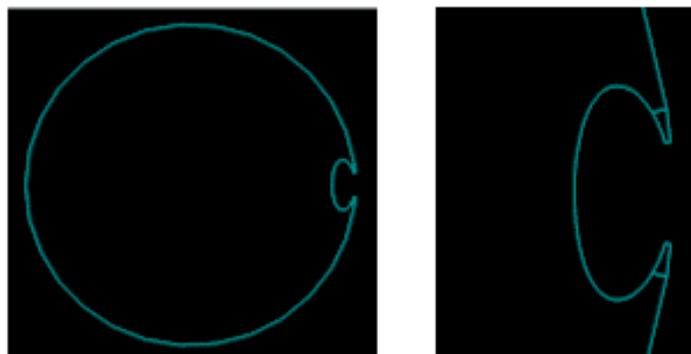


Figura 5.9. Superficie transversal de generación de la tubería recta.

Después de esto, se procedió a mallar las tres caras de la superficie. Para las dos caras simétricas de aproximación al punto de contacto muelle-tubería se utilizó una capa límite para mallarlas; mientras que en caso de la otra cara se utilizó una malla de capa límite en la zona cercana a la pared para ver los efectos de pared, ya que es la zona donde los esfuerzos cortantes son mayores, mientras que para la parte central de la tubería se empleó un mallado triangular con mayor discretización que cerca de la capa límite. Finalmente quedó un mallado de la siguiente forma:

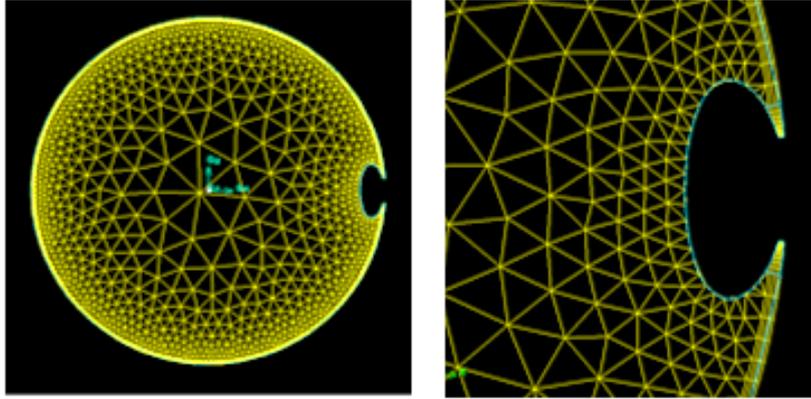


Figura 5.10. Superficie transversal de generación de la tubería recta mallada.

Posteriormente se llevó a cabo el mallado del volumen de un paso de muelle dentro del fluido y se automatizó usando un journal en Gambit para la generación de la geometría paramétrica de manera automatizada de varios pasos de muelle y poder así simular una tubería con un muelle integrado.

Como conclusión, se deberá destacar que resulta sorprendente que una vía de investigación en auge por la coyuntura ambiental actual, haya sido tan poco evolucionada en comparación con lo que debería estarlo.

Se cierra así la revisión bibliográfica concluyendo que son pocos los proyectos de investigación llevados a cabo para la mejora de este tipo de colección de energía y remarcando la necesidad de un mayor número de investigaciones para conseguir la mayor optimización posible en esta vía de energías renovables.

PARTE III: FUNDAMENTOS DE CFD

Capítulo 6: Introducción a la mecánica de fluidos computacional

6.1. Visión global de CFD

La mecánica de fluidos y su aplicación práctica se ha desarrollado desde la época de Newton.

El desarrollo teórico de la mecánica de fluidos tiene como objetivo dar una explicación a los distintos fenómenos que ocurren en los fluidos por medio del desarrollo y la resolución de ecuaciones fundamentales para las diferentes categorías dentro de la mecánica de fluidos y la obtención de aproximaciones de estas ecuaciones.

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos newtoniana son las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales se conocen desde hace aproximadamente 150 años. Sin embargo, no es un sector estancado ya que las ecuaciones de fluidos newtonianos siguen en continua investigación a la hora de conseguir ecuaciones más reducidas; mientras que los fluidos no newtonianos no han experimentado dicho crecimiento.

Por un lado la experimentación en la mecánica de fluidos ha jugado un papel muy importante en la validación y acotación de las diferentes aproximaciones a las ecuaciones fundamentales. El túnel de viento es una instalación experimental que es una muestra de ello, ya que ha permitido el estudio de fluidos o de sólidos a los que se aplica un fluido sobre él, por medio del fenómeno de la semejanza física, que nos permite hacer un estudio experimental a una menor escala o sí interesase mayor escala. Por lo tanto se ha convertido en un método de experimentación que ha implicado unos costes económicos inferiores con respecto a realizar ensayos con modelos a escala real. Por otro lado, el desarrollo de los ordenadores desde los años 50 ha permitido a aparición de la mecánica de fluidos computacional (CFD). Esta rama de la mecánica de fluidos aparece para complementar los estudios teóricos y experimentales, ofreciendo una alternativa de bajo coste para la simulación de flujos reales. De tal manera nos permite realizar estudios en el caso de no disponer instalaciones experimentales o como método de conocer el comportamiento de un fluido antes de llevar a cabo el estudio experimental.

Además, en la CFD es posible despreciar diversos términos de las ecuaciones fundamentales, de forma que se pueden comprobar diversos modelos teóricos, así como sugerir nuevos caminos dentro de la exploración teórica.

El desarrollo de ordenadores más potentes en los últimos años ha generado el interés en el uso de la CFD, dando lugar a una mejora en la eficiencia de las técnicas computacionales asociadas, dando lugar a unos tiempos de procesado menores y la posibilidad de abarcar mayor número de datos. Esto ha provocado que la CFD sea el método preferido para la comprobación de diseños, en diversos ámbitos como la aerodinámica, flujos en maquinaria, industria de automoción, etc.

Podemos considerar la mecánica de fluidos computacional como una rama intermedia entre la mecánica de fluidos puramente teórica y la mecánica de fluidos puramente experimental, ya que es el nexo entre ambas.

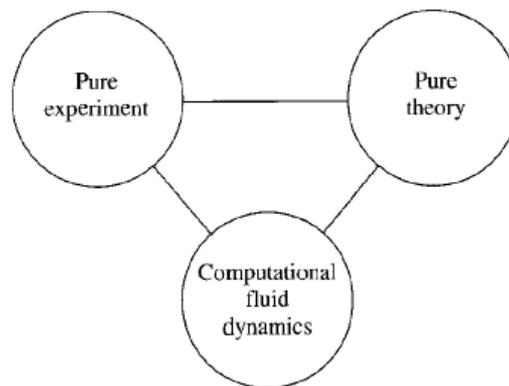


Figura 6.1 Dimensiones de la mecánica de fluidos

Las ecuaciones fundamentales para flujos de interés práctico son normalmente tan complicadas que se hace casi imposible obtener una solución exacta, por lo que es necesario obtener una solución computacional. Las técnicas computacionales se encargan de reemplazar las ecuaciones en derivadas parciales por un sistema de ecuaciones algebraicas, de manera que se pueda emplear un ordenador para la obtención de la solución por medio de un problema matricial. De esta forma se pasa de estudiar un sistema continuo a estudiar uno discreto, de forma que este segundo sea capaz de acercarse a la solución verdadera del sistema continuo.

Para los métodos locales, tales como las diferencias finitas y los métodos de elementos y volúmenes finitos, las ecuaciones algebraicas unen a las diferentes variables de los distintos puntos adyacentes de una malla, que está distribuida a través del dominio computacional, es decir, localizada en el espacio y en el tiempo del cálculo. Por lo que las ecuaciones fundamentales, expresadas de forma continua han de expresarse de forma discreta para dar lugar a un sistema de ecuaciones algebraico.

Debido a que las ecuaciones fundamentales en la mayoría de los casos no son lineales, la solución numérica no se obtiene de manera directa sino que se alcanza mediante un proceso iterativo, por lo que el valor de cada variable de cada punto de la malla es corregido secuencialmente, empleando las ecuaciones fundamentales en forma discreta. El proceso iterativo finaliza cuando se cumple que nuestra solución alcanza un error inferior a un valor inicialmente prefijado.

El proceso de discretización da lugar a un error que puede ser reducido, en un principio, refinando la malla, de forma que las ecuaciones discretas sean representación lo más fieles posibles a las continuas. Es por tanto crucial para obtener una solución óptima, emplear la discretización que ofrezca el resultado más adecuado, sin emplear una malla excesivamente densa que ralentice los tiempos de convergencia del problema.

6.1 Ventajas del uso de la CFD

Las ventajas de la mecánica de fluidos computacional respecto a la experimentación son:

- Disminución del tiempo empleado en el diseño y el desarrollo del experimento.

La construcción adecuada de un modelo para ensayar un experimento ocupa parte importante de la investigación. Empleando un código adecuado en CFD se hace posible evaluar diferentes diseños alternativos, variando diferentes condiciones como tipo de fluido, materiales empleados, diferentes velocidades de flujo, diferentes flujos de calor, diferentes condiciones de operación, etc. Cada caso necesita un tiempo de evaluación; pero es el investigador el que tiene que optimizar el diseño a partir de la evaluación de los resultados computacionales. Generalmente la mecánica de fluidos computacional se emplea para determinar el diseño más adecuado, que finalmente se experimenta en una instalación real.

- La mecánica de fluidos computacional puede simular condiciones de flujo que no son reproducibles en ensayos experimentales, ya sea por el rango de las magnitudes que se pueden evaluar (temperatura, reacciones químicas, tamaño del modelo, decisión de los equipos de medida en la instalación real, etc.), así como la imposibilidad de reproducir ciertos fenómenos o poder anticiparse a los mismos, tales como los meteorológicos. Por lo tanto con el CFD se pueden obtener aproximaciones a dichos casos irrealizables en las instalaciones experimentales.

- A partir de la mecánica de fluidos computacional también podemos obtener información más detallada y completa, como los perfiles de velocidades y presión de los modelos u obtener información en diversos puntos, lo que de forma experimental entrañaría un elevado coste económico y gran dificultad de estudio.

- La mecánica de fluidos computacional, como ya hemos comentado anteriormente tiene un coste significativamente mucho más reducido que la experimentación, tanto en los equipos empleados como la energía consumida para el desarrollo de la investigación. Esto, acompañado de la mejora y del menor coste de los equipos y algoritmos de cálculo ha propiciado que el CFD se convierta en una disciplina en auge.

- En consumo de energía de CFD es inferior al de los ensayos experimentales. La mejora del hardware y de los algoritmos ha dado lugar a que se reduzca el consumo de recursos por parte de los equipos informáticos a la hora de la resolución de un problema.

6.2. Inconvenientes de la mecánica de fluidos computacional

Los inconvenientes de la mecánica de fluidos computacional respecto a la experimentación son:

- La fiabilidad de los resultados de la mecánica de fluidos computacional está ligada a la correcta discretización y la elección del modelo adecuado para la resolución de cada caso. Esto implica que los resultados computacionales obtenidos deben de ser validados con ensayos experimentales pertinentes.

- Dependiendo del caso a resolver, los tiempos de cálculo pueden ser excesivos. Si la instalación experimental está ya realizada, el tiempo en discretizar y simular un caso posiblemente sea mayor que la toma de datos en la propia instalación.

6.3. Metodología de CFD

Como se ha indicado anteriormente, la resolución de un problema empleando la mecánica de fluidos computacional se basa en la discretización de las ecuaciones fundamentales y su posterior resolución. Tras esto, se analizan los resultados obtenidos para contrastar con la solución real del problema.

Todo problema basado en elementos o volúmenes finitos se realiza en tres procesos o módulos, representados en la Figura 6.2, que son los siguientes:

- **Pre-processing o pre-procesado:** donde se define la geometría, condiciones de contorno y el modelo de elementos o volúmenes finitos.
- **Solver o análisis:** donde se analiza el modelo anterior mediante las ecuaciones correspondientes, hasta alcanzar una solución.
- **Post-processing o post-procesado:** donde se analizan y se visualizan los resultados del análisis y a partir de esto se sacan las conclusiones oportunas.

Para el primer módulo se emplea un programa de tipo CAD o mediante ejecución de instrucciones. Por otro lado, para el post-processing alguna aplicación de solver o emplear algún entorno matemático para el procesado de datos.

En el capítulo 7 se detallan los tres módulos de trabajo en la mecánica de fluidos computacional. Para la realización de este PFC se han empleado ANSYS Gambit 2.4.6 como pre-procesador, ANSYS Fluent como solver del problema y Scripts para ejecutar en MATLAB 2013 con la ayuda del ANSYS Fluent para la generar archivos journals.

Si bien es cierto que cualquiera de los procesos puede realizarse con otro software similar que ofrece el mercado. Por lo tanto, estos módulos tienen contenidos obtenidos y relacionados con dichos programas.

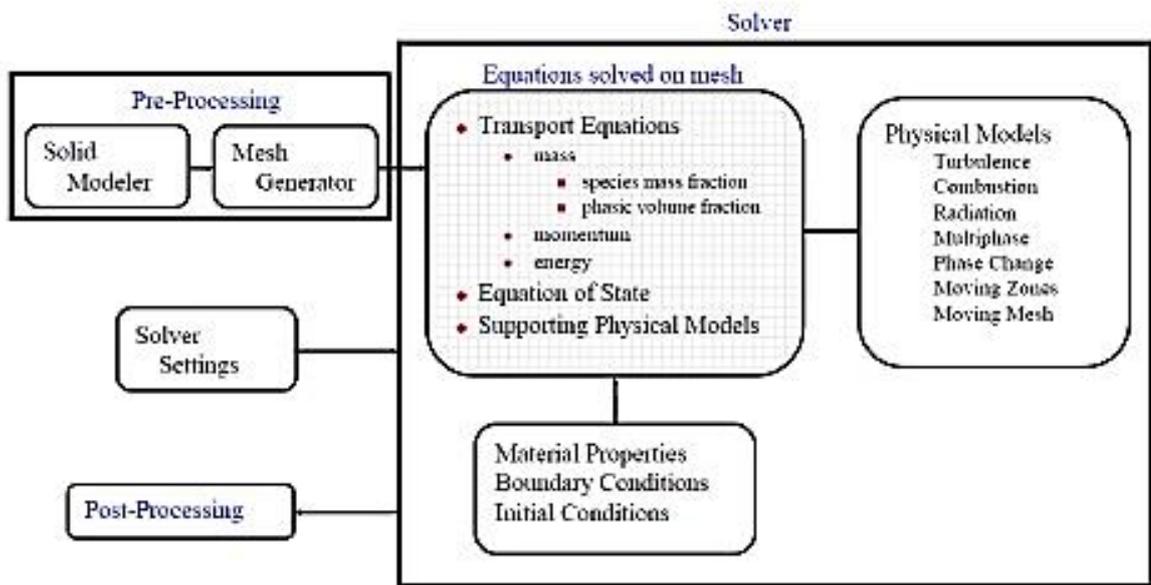


Figura 6.2 Fases de trabajo en CFD.

Capítulo 7: Metodología de trabajo en CFD

7.1. Pre-processing con Gambit 2.4.6

El pre-procesado de un caso se divide en las siguientes etapas:

1. Desarrollo de la geometría: donde se desarrolla el modelo continuo a estudiar
2. Desarrollo del mallado: donde se lleva a cabo la discretización del modelo anterior.
3. Adjudicación de las condiciones de contorno: donde se indican las condiciones de contorno de los elementos que componen la malla.

Es cierto que estos son los pasos a seguir pero a veces se puede desarrollar la geometría y el mallado de manera simultánea, lo cual puede reducir nuestro tiempo de pre-procesado; como he procedido en el diseño de mi codo.

Como se dice en el capítulo 6, emplearemos el software Gambit 2.4.6, perteneciente a la empresa ANSYS. Este software nos permite desarrollar el pre-procesado de nuestro diseño y posteriormente exportarlo en distintos formatos, que permitirán a un solver donde analizar el fluido o realizar las simulaciones pertinentes, que en nuestro caso se calcula con Fluent ANSYS. El mallado de la geometría en GAMBIT se puede realizar con la interfaz que el programa nos presenta de manera automática a partir de la utilización de journals, que permite generar geometrías malladas automáticamente a partir de un diseño previo para evitar la repetitividad en el proceso de desarrollo de la geometría y mallado; pero no lo hemos incluido en este proyecto por la dificultad que entrañó la generación de la geometría y su posterior mallado y los problemas para que fuese posible simularlo en Fluent .

7.1.1. Cálculos previos al desarrollo de la geometría

Tras una breve presentación del trabajo desarrollado por otros compañeros en el capítulo 5, dentro del ámbito de investigaciones del Departamento, se procede ahora a comentar más detalladamente los aspectos del presente trabajo. Para el desarrollo de la geometría se parte de un paso de muelle cuyas principales características son las siguientes:

Muelle W01

- Espesor del muelle: 0,5 mm
- Paso de muelle (tubería): 10,5 mm
- Límite de contacto: 8°
- Límite de transición: 15°

Para el mallado del volumen de un paso de muelle en la tubería recta se han utilizado 25 divisiones; en una primera diseño de prueba utilicé en el diseño del muelle integrado en el codo 10 divisiones por paso, pero la geometría era muy rectificadora y no se aproximaba a una trayectoria circular por lo que se optó a seguir generando 25 divisiones por paso, las cuales se tuvieron que realizar a mano.

Pero previa explicación del diseño de la geometría hay que detallar algunos cálculos necesarios para proceder a construir cada uno de los pasos del codo.

Condiciones que debe de cumplir el codo:

- D_i : 7 mm
- R_{codo} : 45 mm
- Paso de muelle en codo: 10,5 mm
- Además de las que ya cumple la superficie transversal del flujo por partir del diseño anterior, detalladas más arriba.

Con todo esto, se tiene que implementar un muelle integrado en un codo de 180°, lo que es conocido a nivel industrial como un UBend; para ello se procede moviendo la superficie transversal del flujo, realizando dos giros:

- **Giro en el plano medio del codo (α y α^*):** los cuales nos permitirán posicionar las superficies transversales a lo largo de la trayectoria semi-circular del codo de 180°.

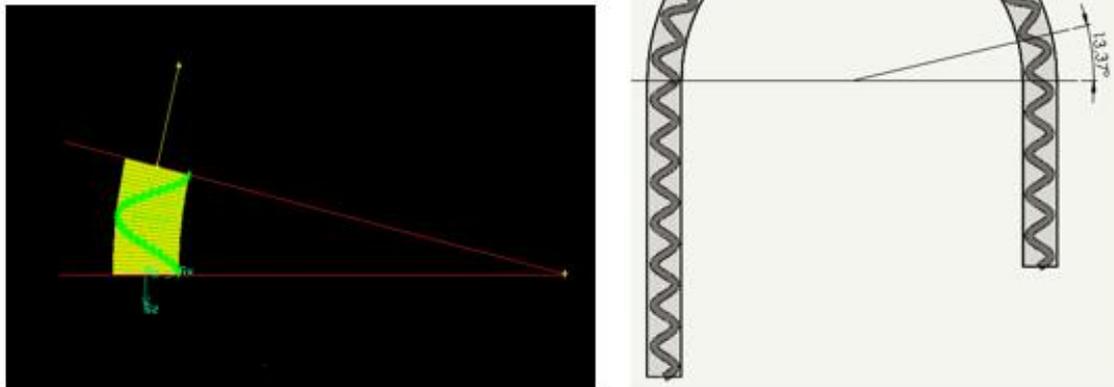


Figura 7.1. Angulo entre pasos “ α ” con respecto al plano medio del codo.

Por lo tanto denotamos α , como el ángulo entre pasos de muelle en el codo o el giro de un paso sobre el plano medio del codo, mientras que α^* se trata del giro de cada una de las divisiones del paso del codo sobre el plano medio del propio codo. Para poder facilitar este giro se genera una línea que una los puntos (45,0,0) y (45,2,0) que se convierte en el eje de revolución del codo.

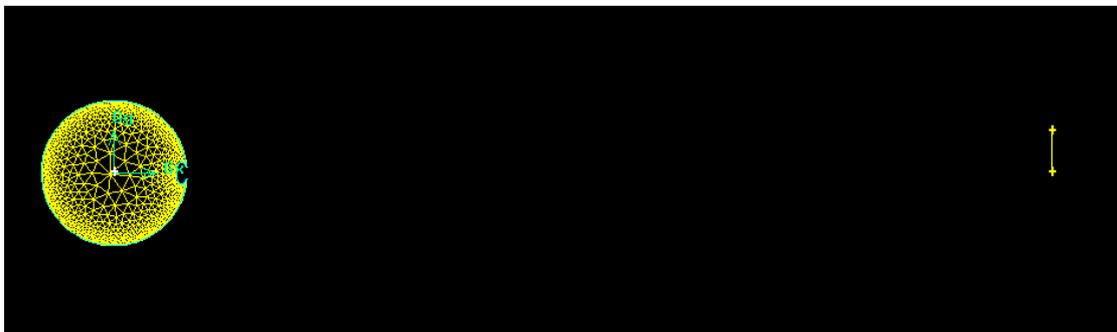


Figura 7.2. Línea o eje de revolución para girar con respecto al centro del codo las superficies transversales que constituyen el codo.

- **Giro sobre el plano de la superficie transversal del flujo (β):** como bien se puede apreciar, con el giro de las superficies transversales con respecto al centro del codo, no es suficiente ya que deben ser giradas sobre si mismas para poder representar el giro del muelle y que la geometría del muelle quede reproducida de manera correcta.

Por lo tanto se denota β , como el giro que sufre una superficie transversal movida con respecto a sí misma. Para poder llevar a cabo se crea una línea de revolución sobre la superficie transversal inicial, que se hace girar con el mismo ángulo, con el que se ha girado previamente la superficie transversal, convirtiéndose esta línea en el eje instantáneo de rotación para cada una de las superficies y que presentará una inclinación diferente por cada división ya que tiene que girar acompañando a la superficie transversal.

Por lo tanto antes de crear el codo se tiene que conocer exactamente cuáles son los ángulos de giro α^* y β , para poder generar un paso de muelle dentro del codo.

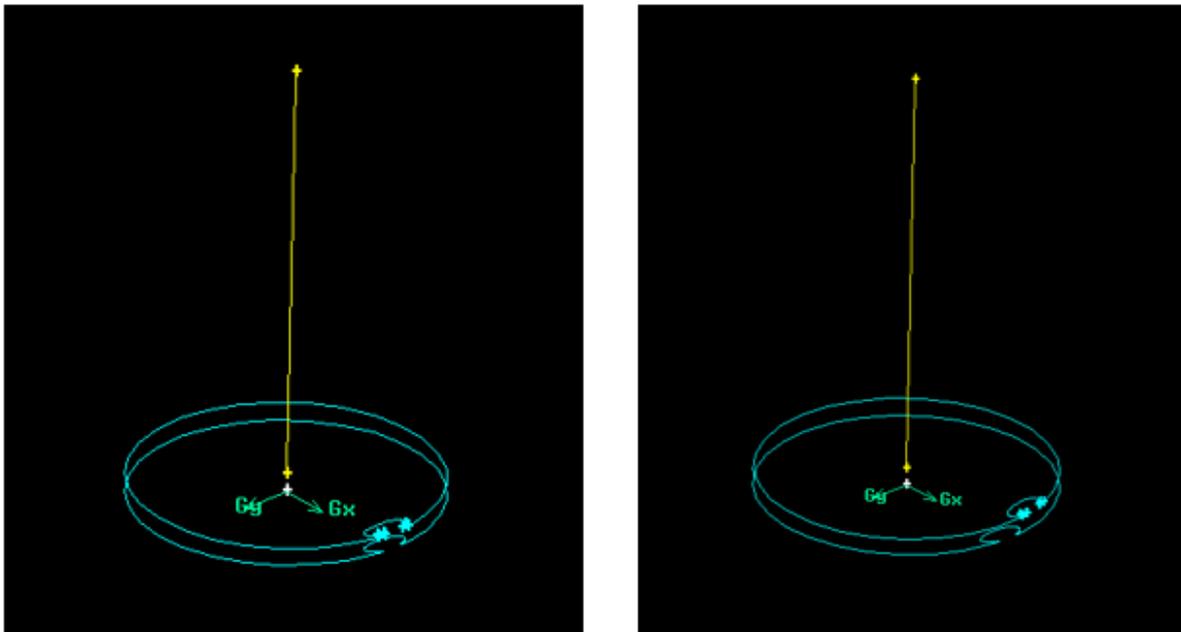


Figura 7.3. Izquierda, se pueden apreciar dos secciones transversales sin haber girado con respecto al eje instantáneo de rotación de la segunda superficie transversal. Derecha, se aprecian dos secciones transversales donde la segunda ha sido girado con respecto a su eje instantáneo de rotación de $\beta=14,4^\circ$.

Por lo tanto se tiene que proceder a calcular los ángulos requeridos para poder obtener el codo de 180° deseado.

Como bien se conoce la longitud de una circunferencia viene definida por el producto del número Π y el diámetro; como se aprecia en la siguiente ecuación que define un codo o semicircunferencia será:

$$L_{\text{codo}} = L_{\text{semi-circunferencia}} = \Pi \times R_{\text{codo}} = \Pi \times 45 \cdot 10^{-3} = 141,372 \text{ m} \quad (7.1)$$

Esta es la longitud que abarca un codo de 180° de 45 milímetros de radio. Como se conoce que el paso de la tubería era de 10,5 milímetros por paso y en el codo tiene que ser igual; dividiendo la longitud total por el tamaño de paso de muelle dará el número de pasos en la trayectoria del codo.

$$n^{\circ} \text{ Pasos} = \left(\frac{L_{\text{codo}}}{\text{Paso}} \right) = \left(\frac{141,372}{10,5} \right) = 13,464 \text{ pasos en el codos} \quad (7.2)$$

Como se aprecia en el trayecto del codo se tiene que crear unos 13 pasos y medio, pero no se redondea esta cifra, incluso se trabaja hasta con 6 cifras decimales ya que es necesaria a la hora de cerrar el último paso de codo y que encaje perfectamente con la tubería recta de salida; la cual ha sido uno de los quebraderos de cabeza en el diseño del codo. Para saber el giro de cada paso sobre el plano medio del codo, basta con dividir los 180° que tiene el codo por el número de pasos que tiene:

$$\alpha = \left(\frac{180^{\circ}}{n^{\circ} \text{ Pasos}} \right) = \left(\frac{180^{\circ}}{13,464} \right) = 13,369015^{\circ} \quad (7.3)$$

Teniendo el giro de cada uno de los pasos de muelle en el codo (α), obtener el giro de cada una de las veinticinco divisiones del paso (α^*) es tan sencillo como dividir por ese número de divisiones:

$$\alpha^* = \left(\frac{\alpha}{n^{\circ} \text{ Divisiones Paso}} \right) = \left(\frac{13,369015}{25} \right) = 0,5347606^{\circ} \quad (7.4)$$

Por otro lado, el giro de cada una de las divisiones del paso respecto de la anterior se calcula sabiendo que la revolución que sufre un paso completo de un muelle es un giro completo, lo que son 360° y como tenemos 25 divisiones en un paso, el resultado será:

$$\beta = \left(\frac{\text{Revolucion Paso Muelle}}{n^{\circ} \text{ Divisiones Paso}} \right) = \left(\frac{360^{\circ}}{25} \right) = 14,4^{\circ} \quad (7.5)$$

Pero como se comenta anteriormente se debe crear el decimocuarto paso del codo, pero no es completo por lo que se procede a plantear los cálculos que se realizan para poder obtener el giro exacto donde se tiene que mover la superficie transversal para

que coincida con el ángulo de 180° y de tal manera encaje con el tramo recto de la tubería de salida, al fusionarlo en Fluent.

Los trece pasos de muelle anteriores al último cubren un giro con respecto al plano medio de:

$$\alpha_{tramos(1-13)} = 13(pasos) * 13,369015(°) = 173,79719° \quad (7.6)$$

Que hasta la salida del codo dejan un paso de:

$$\alpha_{tramo(14)} = 180 - 173,79719 = 6,202802° \quad (7.7)$$

Este ángulo al dividirlo entre el giro de cada una de las divisiones del paso respecto del plano medio, proporciona un total de divisiones:

$$\begin{aligned} n^\circ \text{ Divisiones Paso}_{Tramo 14} &= \left(\frac{\alpha_{tramo(14)}}{\alpha^*} \right) \left(\frac{6,202802^\circ}{0,5347606^\circ} \right) \quad (7.8) \\ &= 11,5992 \text{ divisiones} \end{aligned}$$

Por lo que el último tramo del codo está compuesto por 11,5992 divisiones, donde los decimales de este suponen un giro de:

$$\alpha^*_{final} = 0,5992 \times 0,5347606 = 0,3204354° \quad (7.9)$$

Y el ángulo de giro sobre la propia superficie transversal de paso del flujo con respecto a la división anterior, que coincide con el final del codo es:

$$\beta_{final} = \left(\frac{14,4}{0,5992} \right) = 8,628665° \quad (7.10)$$

Por lo tanto los valores de los giros de los trece pasos de muelle iguales, son:

$$\alpha^* = 0,5347606° \quad (7.11)$$

$$\beta = 14,4°$$

Mientras que los valores de los giros de la última superficie que son diferentes al resto, para que pueda encajar la geometría de salida del codo con la de entrada del tramo de tubería.

$$\alpha^*_{final} = 0,3204354° \quad (7.12)$$

$$\beta_{final} = 8,628665^\circ$$

Ahora ya se puede empezar a construir un único paso de muelle, ya que en primer lugar se realizó un diseño de codo completo y cuando se lanzó el caso en el solver de Fluent este no convergía. Por lo que se optó por una segunda alternativa en el proceso de trabajo creando un único paso de muelle e ir girándolo paso a paso, guardando cada uno de estos pasos por separado, hasta que se tiene el total de los tramos procediendo entonces a fusionar todos los tramos en un único volumen. Es recomendable, realizar esta fusión de los tramos para cada uno de los pasos de muelle y comprobar que la solución converge y no se genera ningún tipo de problema, aunque este proceso resulte mucho más laborioso y conlleve una mayor carga de trabajo de análisis.

Los únicos problemas que se encontraron en este proceso se dieron al no encajar la salida de un paso con la entrada del siguiente, siendo algo más crítico el proceso de la unión del último paso de codo y la entrada a la tubería de salida.

7.1.2. Desarrollo de la Geometría y del Mallado

Como se ha comentado con anterioridad, para desarrollar el codo parto de la geometría empleada en investigaciones previas.

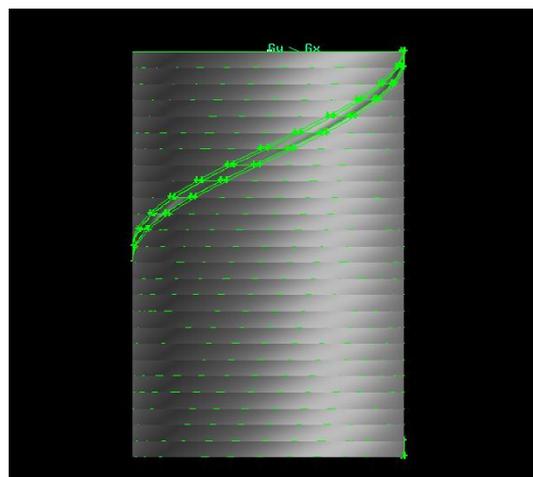


Figura 7.4. Geometría inicial.

Por lo que el primer paso que se debe realizar es borrar la totalidad del paso de codo con muelle insertado a excepción de la superficie transversal que se encuentra centrada en eje de coordenadas cartesianas (x, y, z) porque a partir de ella y en dirección de Z

negativas se genera la geometría de la tubería acodada con el muelle insertado. En la Figura 7.5, se aprecia cómo se elimina la geometría existente, mientras que en la Figura 7.6, se representa la superficie transversal mallada a partir de la cual se genera el codo de 180°, con muelle helicoidal insertado.

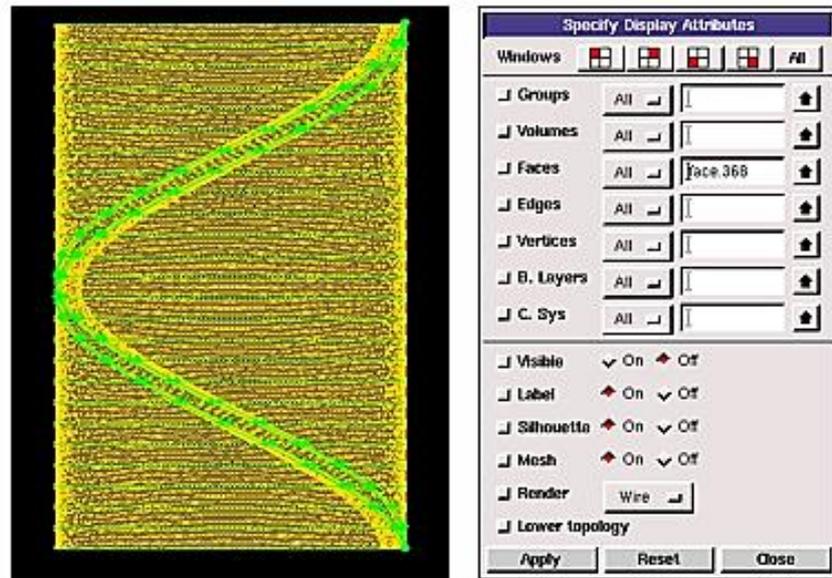


Figura 7.5. Eliminación de la geometría inicial, a excepción superficie transversal.

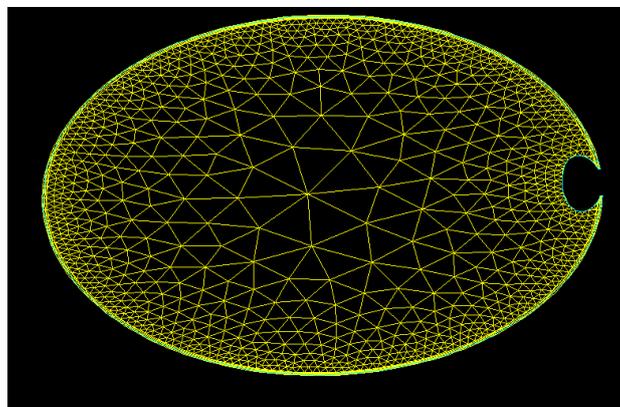


Figura 7.6. Superficie transversal mallada empleada para generar U-Bend.

Tras la eliminación de todos los volúmenes y caras, dejando únicamente la superficie trasversal de paso del flujo que se desean utilizar para generar el codo, usando las operaciones de geometría se crean las líneas de revolución que propician los giros.

- **Línea de revolución del codo:** esta línea estará constituida por los puntos cartesianos (45, 0, 0) y (45, 2, 0); con respecto a (x, y, z) y con la cual se girarán cada una de las superficies transversales de paso del flujo y que finalmente para poder representar el giro del muelle a lo largo del codo, se utiliza el eje instantáneo de rotación propio de cada una de las superficies transversales, que se describen en el próximo renglón.
- **Línea de revolución del muelle o centro instantáneo de rotación de las superficies transversales del flujo:** se genera una línea constituida por los puntos (0, 0, 0) y (0, 0, -10) con respecto a (x, y, z).

El procedimiento para poder hacerlo efectivo, consiste en girar cada una de las superficies transversales con respecto al plano medio del codo, acompañadas con el eje instantáneo de rotación, lo que permitirá tras realizar ese giro, poder revolucionar la sección transversal con respecto a su mismo plano y de tal manera representar el giro de la sección vacía que representa el muelle en cada una de las secciones transversales. Tras llevar a cabo las 25 divisiones o secciones transversales que constituyen el paso de muelle dentro del codo, podemos apreciar que se genera un muelle con 360°, lo equivalente a un paso.

Definido esto, ya se puede proceder a girar la superficie transversal de paso del flujo y la línea de rotación instantánea, el giro α^* calculado anteriormente para posicionar tanto la siguiente división como la línea que permita revolucionar dicha superficie sobre su mismo plano.

Esto se puede apreciar en la Figura 7.7, en la que se evoluciona la cara con respecto a la línea de revolución del codo, quedando como resultado dos superficies transversales y eje de rotación instantáneo sobre la cara superior.

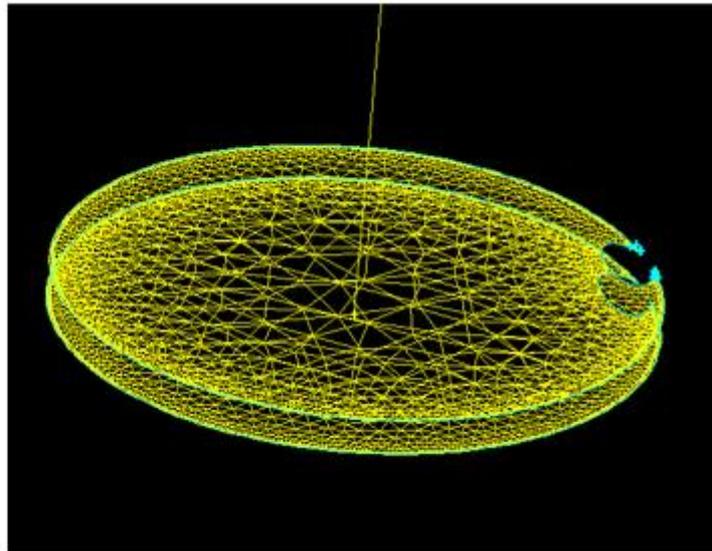
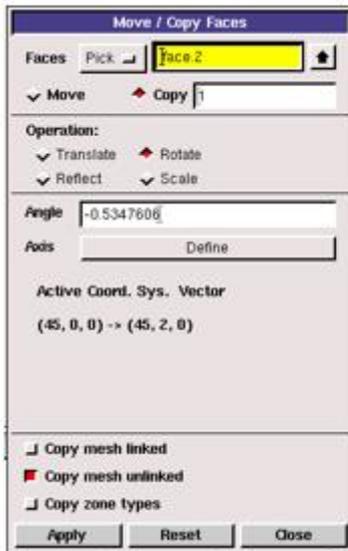


Figura 7.7. Superficies transversales inicial y girada respecto al plano medio o línea de revolución del codo.

Una vez creada la segunda superficie transversal se tiene que hacer girar sobre sí misma, usando el eje de rotación instantánea, por medio del giro β que permita crear el efecto de revolución que sufre el giro del muelle dentro del codo. Por tanto cada una de las veinticinco divisiones del paso, se rotan $14,4^\circ$ con respecto a la sección anterior, para crear este fenómeno de revolución.

Las características del giro se pueden ver en la Figura 7.8, donde se tienen que configurar la superficie a rotar para moverla y no copiarla, con un ángulo de $14,4^\circ$ como se ha calculado previamente y en una pestaña se introducen las coordenadas del eje de rotación que se pueden apreciar en la pestaña utilizada para mover o copiar las caras. Al final, las dos superficies tienen que quedar posicionadas como en la Figura 7.9; donde ya está lista para crear el volumen intermedio.

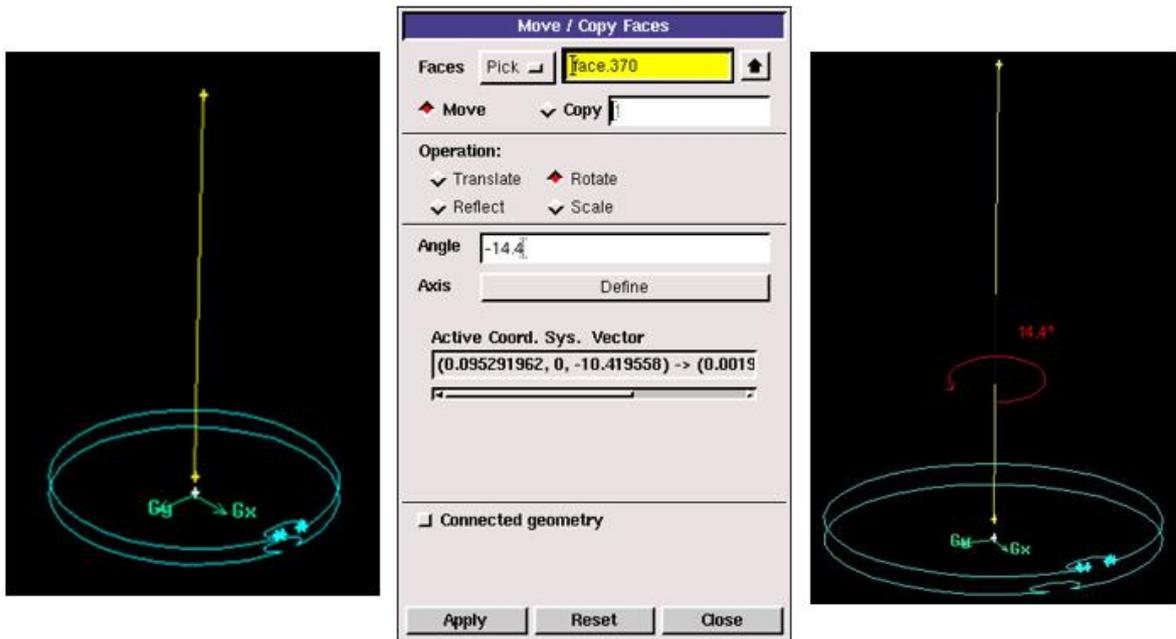


Figura 7.8. Superficie transversal superior girada con respecto al eje de rotación instantáneo.

Tras realizar estos pasos, se ha obtenido la primera superficie transversal girada con respecto a su eje de rotación instantánea, como se puede apreciar en la Figura 7.9:

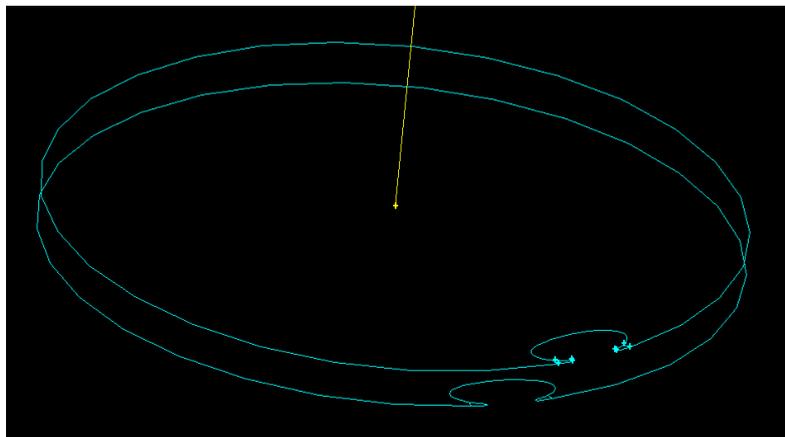


Figura 7.9. Superficies transversales preparadas para la creación del mallado del volumen.

Para generar la unión de ambas secciones, se recomienda aproximarse un poco para ver los puntos más cerca y se generan unas líneas que unan esos puntos, a partir de estas

se crean las caras que constituyen la geometría entre superficies y finalmente se crean los tres volúmenes a partir de estas caras.

Este proceso de creación de los volúmenes, se puede visualizar en las siguientes figuras; Figura 7.10., Figura 7.11. y Figura 7.12.

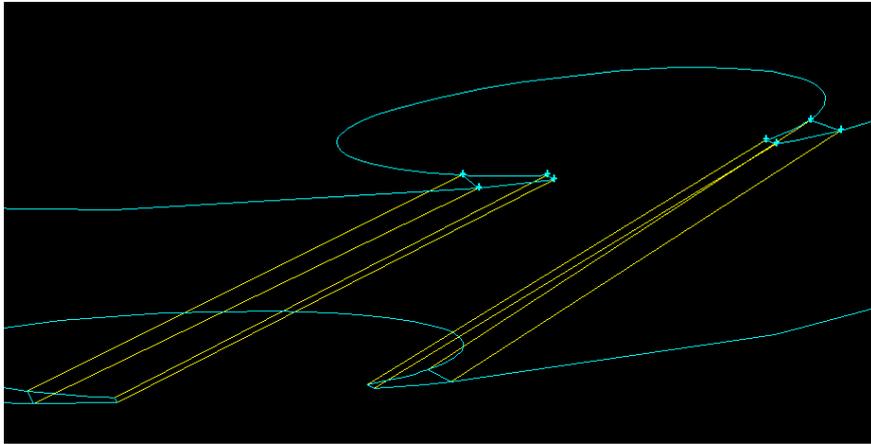


Figura 7.10. Generación de las líneas de unión de las superficies transversales.

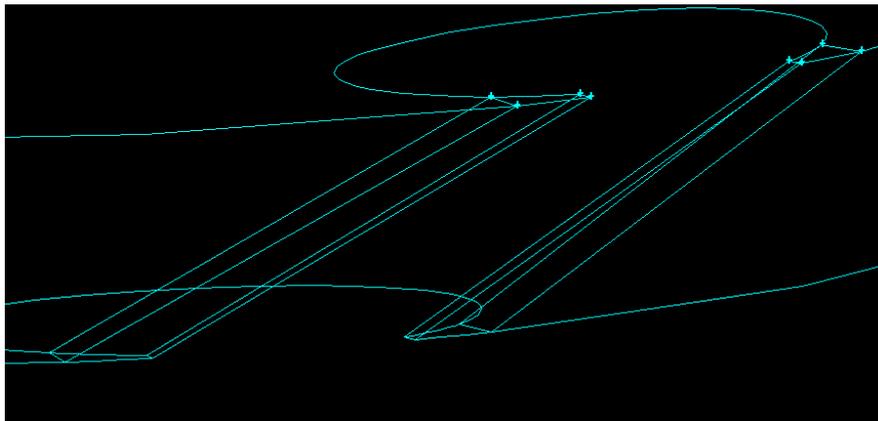


Figura 7.11. Generación de las caras de unión de las superficies transversales.

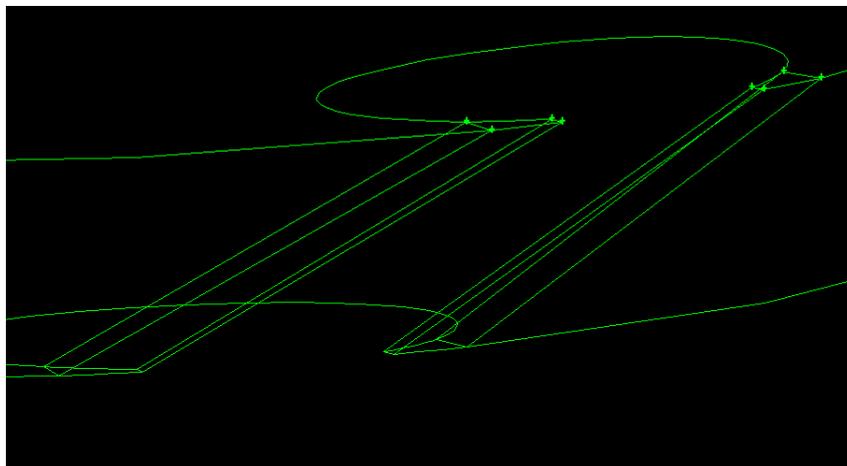


Figura 7.12. Generación de los volúmenes de unión de las superficies transversales.

Generados los volúmenes, se procede a crear el mallado entre superficies transversales. Por lo que primero se hace un mallado de las líneas de unión de las dos divisiones con un "interval count" de un nodo por línea.

Tras este paso, se prosigue mallando los tres volúmenes de los que se dispone. Tras las pruebas realizadas sobre el mallado de los volúmenes, se llega a la conclusión de que existen diferentes posibles soluciones para obtener un mallado adecuado. Dichas soluciones son:

- Mallado del Volumen seleccionando la opción de elementos Hex/Wedge usando el tipo Cooper. Cabe destacar que para que el mallado fuese correcto se deben seleccionar las caras superior o inferior como las referencias de mallado interior.
- Mallado del Volumen seleccionando la opción de elementos Hex, usando como tipo el mallado Cooper. Para obtener un mallado correcto hay que seleccionar en la pantalla de fuentes las secciones de las superficies superior e inferior las cuales están malladas y por lo tanto se toman como referencia del mallado.

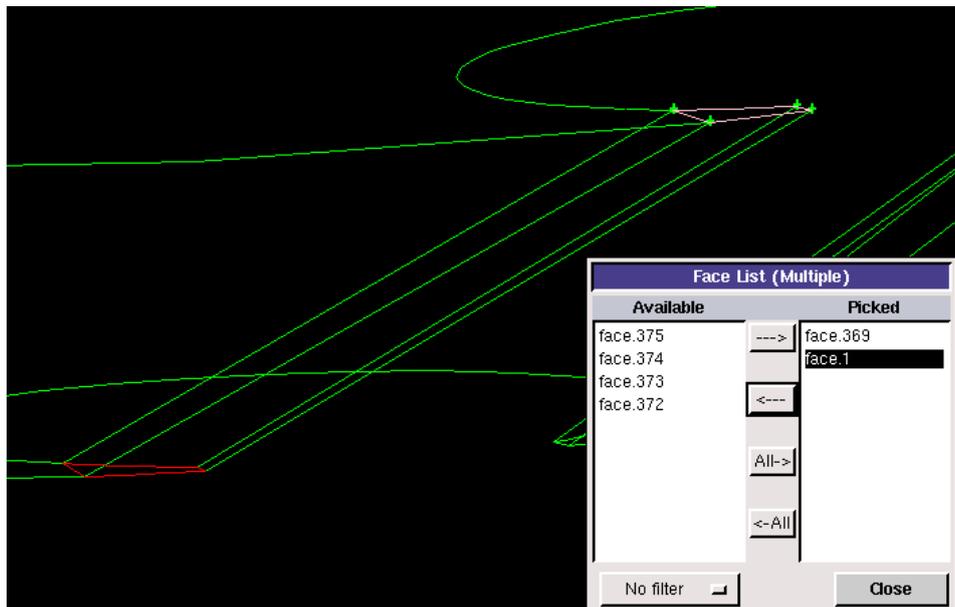


Figura 7.13. Selección de las caras malladas que se utilizan como referencia para el mallado del volumen.

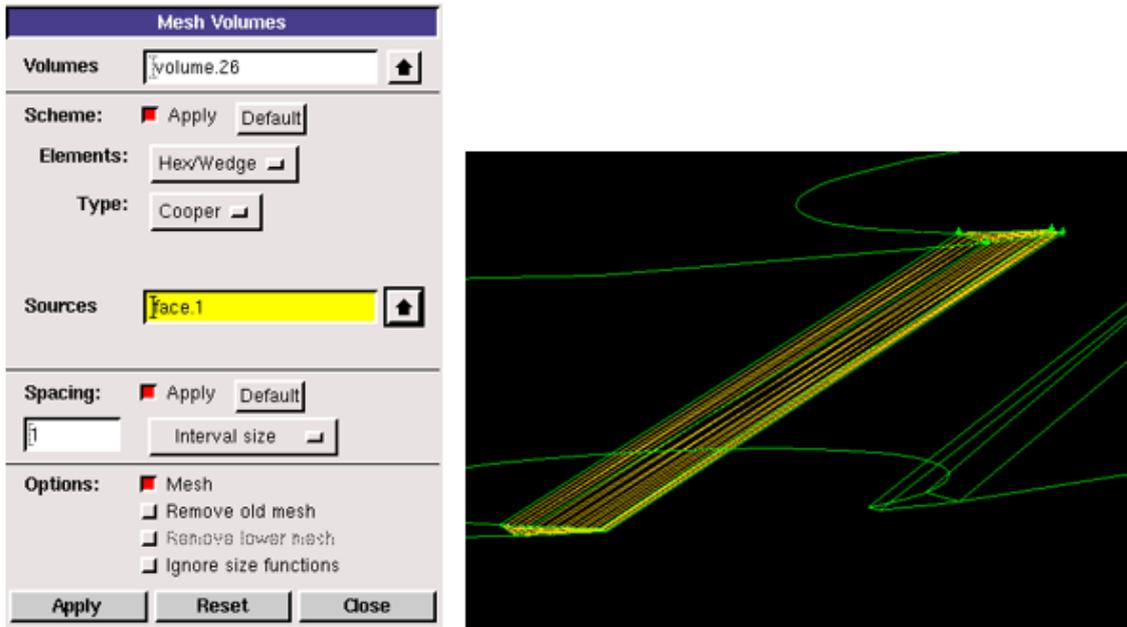


Figura 7.14. Generación del mallado en los volúmenes entre las superficies transversales a partir de las caras malladas.

Al final del proceso de construcción del volumen entre las superficies transversales, quedan los tres volúmenes mallados como aparece en la Figura 7.15:

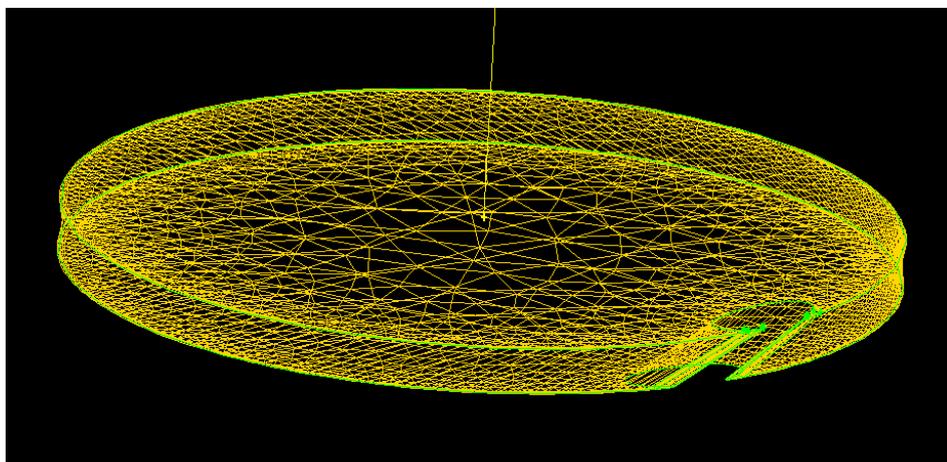


Figura 7.15. Mallado final de los 3 volúmenes que hay entre 2 superficies transversales.

Y después de mallar el primer volumen de un paso de muelle hay que realizar el resto de los veinticinco volúmenes que constituyen un paso completo del diseño del muelle. Para llevarlo a cabo, se realiza el mismo proceso, pero para facilitar el desarrollo de un nuevo volumen entre superficies, se elimina la visualización de algunos contornos, para

lo cual se accede a la pantalla de “atributos de representación específicos” y se ocultan los volúmenes creados, se hacen visibles las caras y finalmente se ocultan todas estas caras para quedarse únicamente con la última superficie transversal de paso del flujo creada y comenzar a girar esa superficie con respecto al plano medio del codo y con respecto a si mismo, habiendo girado la superficie previamente, como se ha detallado anteriormente.

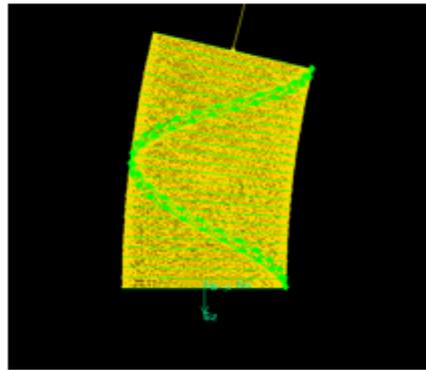
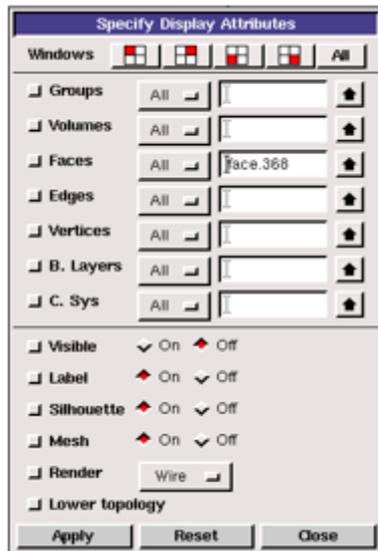


Figura 7.16. Generación del mallado del resto de volúmenes del paso de muelle.

Al final el diseño final del paso, constituido por 25 volúmenes transversales queda como en la Figura 7.17:

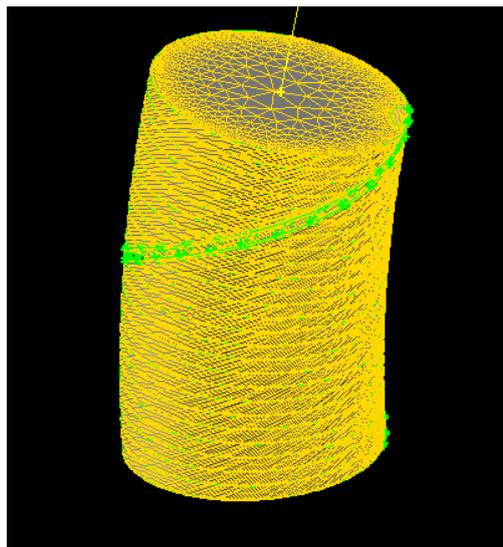


Figura 7.17. Tramo de codo con muelle insertado totalmente mallado.

7.1.3. Adjudicación de las condiciones de contorno y condiciones de medio.

Tras crear el primer tramo del muelle dentro del codo se tiene que darle unas condiciones de contorno de entrada y de salida.

En el tercer apartado de operaciones de Gambit nos presenta las dos posibles condiciones que se pueden plantear; por un lado se pueden especificar las condiciones de contorno del medio fluido y por otro, las condiciones continuas del medio que hacen referencia a que tipo de medio vamos a estudiar, ya sea fluido o sólido, en este caso claramente se trata de un fluido y se genera por defecto en Gambit.

Sobre las primeras, se asignan unas condiciones de contorno de “velocity-inlet” a la entrada, de “pressure-outlet” a la salida y “wall” en las caras que constituyen la pared del volumen. Dichas condiciones se pueden ver reflejadas en la pantalla de la Figura 7.20, además de un paso de muelle mallado marcando la superficie de entrada como “velocity-inlet”.

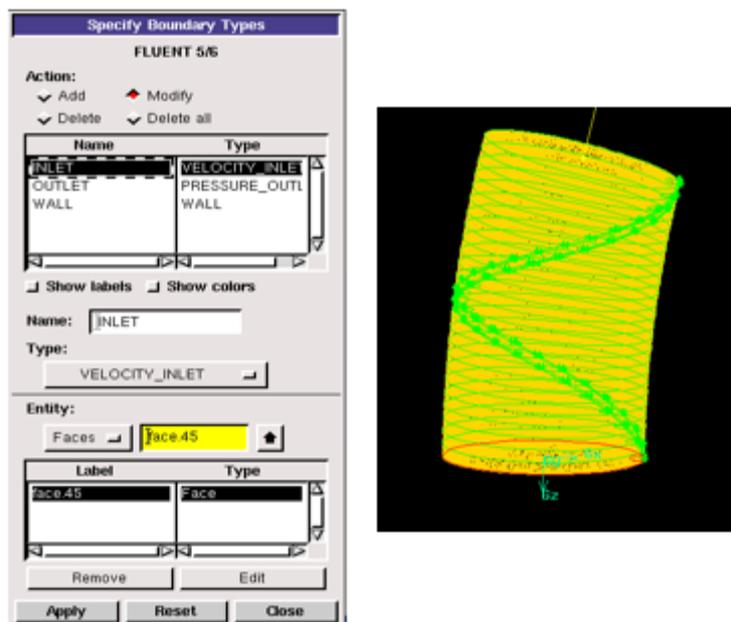


Figura 7.18. Adjudicación de las condiciones de contorno del diseño.

Y finalmente se procede a guardar el archivo y lo que ocurre es que se genera un “default-interior” correspondiente a cada uno de los volúmenes del paso del muelle insertado en el codo, que hace referencia al flujo interior del recinto del tramo del codo. Definidas estas condiciones de contorno, estamos listos para poder guardar la geometría al completo.

7.1.4. Exportación de la geometría mallada

El último paso a realizar es exportar esta geometría en formato “.msh” para que pueda ser abierta por el programa de Fluent donde se procesa la geometría y se realizan los análisis pertinentes, después de haber unido cada uno de los pasos de muelle helicoidal generados en Gambit.

7.1.5. Generación de la geometría de codo con muelle integrado

Se ha diseñado un paso de muelle, pero se sabe que son trece tramos completos y otro paso incompleto, para completar el codo de 180°.

Para generar cada uno de los volúmenes que constituyen el codo se procede a girar el volumen obtenido con el ángulo entre pasos del muelle (α) y nos permite obtener la nueva disposición del siguiente paso de muelle, el que sería el segundo paso del codo; sobre este nuevo paso se deben asignar nuevas condiciones de contorno de entrada (velocity-inlet) y de salida (pressure-outlet), las cuales se denotan como Entrada.Paso2 y Salida.Paso2, respectivamente. Este procedimiento se sigue hasta generar los trece pasos de muelle que conforman el codo, a excepción del último paso incompleto.

El paso catorce como queda calculado en el apartado 7.1.1, consta de menos divisiones por paso, además del último volumen entre divisiones más pequeño para poder encajar el final del codo con el comienzo del tramo recto del tubo de salida.

Para finalizar la fase de pre-procesado se hace primordial introducir un par de pasos de muelle antes de llegar al codo para que el flujo entre en el codo totalmente desarrollado, en el que queda representado un perfil de velocidades parabólico como la Ecuación de Hagen-Poiseuille, lo cual se ha detallado en el Capítulo 4, apartado 4.1.5, denotado como Efecto de entrada. Mientras que en la salida no están importante pero se simulan unos pasos de muelle para poder dar una guía o salida al flujo. Por lo tanto se incluyen siete pasos de muelle para el tramo recto de la entrada y cinco pasos de muelle para la salida.

Finalmente quedará una geometría como la representada a continuación en la Figura 7.19:

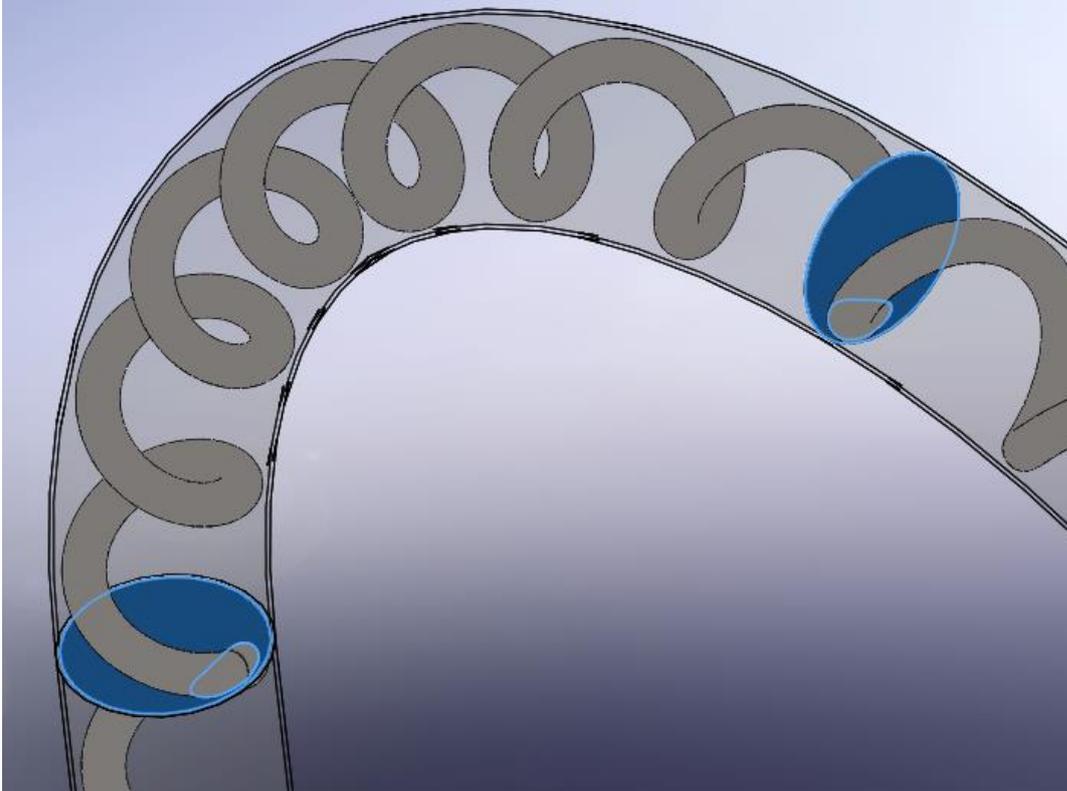


Figura 7.19. Geometría del codo, representando las superficies transversales a mallar en el codo

7.2. Solver o Analisis con Fluent ANSYS

Siguiendo con el esquema de la Figura 6.2, tras elaborar la malla se procede al cómputo de la misma. Para ello se han de tener en cuenta ciertas consideraciones, tales como los materiales, las condiciones de contorno, los modelos físicos empleados en la resolución del problema, etc. Así como parámetros en función del método numérico a emplear, como la inicialización de incógnitas, los rangos de convergencia de la solución, el número de iteraciones, etc.

Como en este PFC se ha empleado ANSYS Fluent como solver, las explicaciones a estos aspectos se realizan sobre dicha plataforma.

7.2.1. Read&Write – Case &Data

Para abrir el archivo que se ha guardado previamente en Gambit con una extensión “.msh”, se tiene que pinchar en la pestaña de “File/Read/Case” y entrar en el directorio donde este guardado el archivo que se busca.

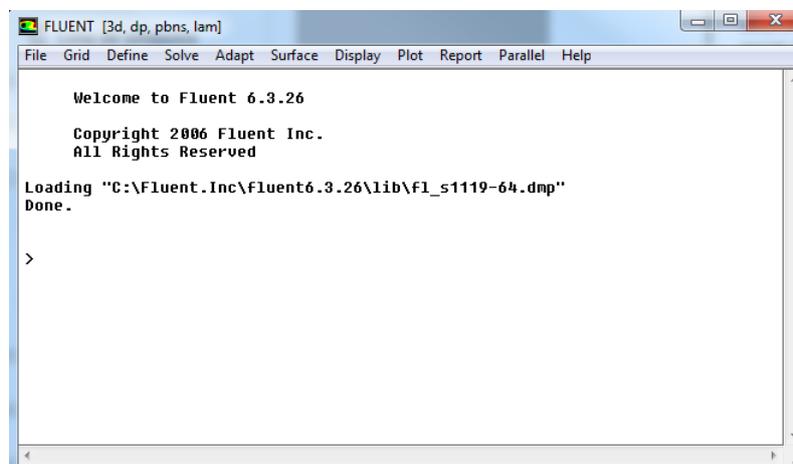


Figura 7.20. Entrada a la plataforma de Fluent ANSYS.

7.2.2. Comprobaciones o Checking

Es recomendable hacer un chequeo de la geometría creada, en donde se aprecien las coordenadas del diseño (x,y,z), el número de celdas y lo más importante, los valores de volumen mínimo, volumen máximo y el volumen total, donde todos estos han de ser positivos, sino indicaría que la geometría está mal generada.

7.2.3. Escalar la geometría

Tras abrir el archivo se procede a escalar la geometría, ya que se diseñó con medidas en milímetros pero el software ANSYS Fluent interpreta que esos valores corresponden a unidades del Sistema Internacional y por ello se tienen que convertir en milímetros. Para ello se pincha sobre la pestaña “Grid/Scale” donde se impone que el diseño fue creado en milímetros y se presiona sobre el botón de escalar, quedando toda la geometría escalada en milímetros.

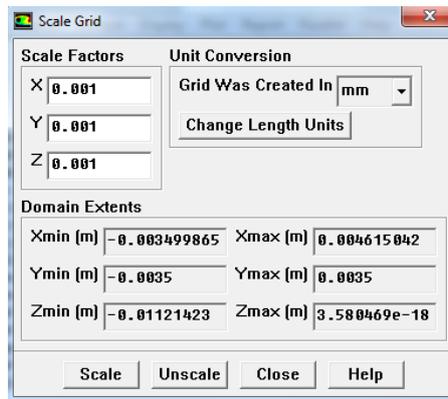


Figura 7.21. Escalar geometría generada en Gambit para convertirlos en milímetros.

Como lo que se debe hacer es abrir las geometrías de cada uno de los tramos de codo para fusionarlos con el resto de pasos de muelle y con los tramos rectos de entrada y de salida, se podría haber unido todos los tramos y cuando estuviesen unidos, escalar toda la geometría en un único paso. El problema es que ocurrieron diversas dificultades en el mallado inicial, se fue uniendo y analizando tramo a tramo, para demostrar la correcta convergencia del método y por lo tanto, a esto se debe que haya escalado todos los tramos por separado.

7.2.4. Unión de geometrías y fusión de superficies

Como ya se disponen de todos los pasos de muelle, tanto del codo como de los tramos rectos de entrada y de salida, se procede a cargarlos juntos y a fuselarlos. Para ello se procede de la siguiente manera:

Estando en el archivo de un paso del codo, se tiene que pinchar sobre la pestaña de “Grid/Zone/Append Case File” y seleccionar el archivo del paso de muelle previo o el

siguiente al que se tiene abierto para poder unirlo. Cabe destacar que para poder unirlo tienen que tener la misma escala, por lo que o los dos archivos están escalados previamente o no lo están; pero de ninguna manera se puede dar el caso que uno lo esté y el otro no, ya que ocasionaría un error en el fuselaje.

Después de tener cargados los archivos de dos pasos colindantes; como en este caso que se muestra el paso 1 y paso 2 del codo, se procede a fuselarlos presionando la pestaña “Grid/Fuse”.

Para unir ambos tramos se tienen que asignar dos superficies coincidentes; en este caso la sección de salida del paso 1 será la misma que la sección de entrada del paso 2, considerando una tolerancia dada por defecto de 0,05; la cual podríamos modificar.

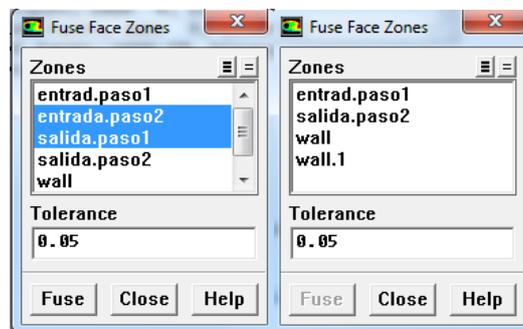


Figura 7.22. Fuselaje de secciones coincidentes de dos pasos contiguos.

Siguiendo los pasos detallados, aparecerá en la pantalla principal de Fluent el siguiente mensaje:

“all 2648 faces matched for zones 10 and 4.

Fusing created new thread, interior-12”

Dicho mensaje indica que las geometrías se han unido de manera correcta y que se genera una superficie intermedia, entre dichos volúmenes que recibe el nombre de interior-12, en nuestro caso. Esta superficie sustituye a la salida del paso 1 y la de entrada del paso 2. En el caso de que apareciese otro mensaje es debido a que las superficies que deben ser coincidentes no lo son por diversos motivos: alguno de los volúmenes esta escalado cuando el resto no lo están o viceversa o por una mala construcción de la geometría, debida al uso de un giro entre pasos “ α ” diferente. En el caso de que las superficies no sean coincidentes o se quieran visualizar las superficies

transversales previamente a la operación de fuselaje, se puede utilizar la representación de la geometría, pinchando sobre “Display/Grid”, seleccionando las caras que queramos visualizar y apreciar si son coincidentes o no.

Ya no queda más que decir, simplemente que este procedimiento se realiza para unir todos los pasos del muelle, tanto del codo como los de tramo recto de entrada y de salida, hasta que quede definida la geometría final.

7.2.5. Materiales

A la hora de simular un caso es necesario indicar las propiedades de los fluidos y los materiales sólidos implicados, que se adjudican a los medios continuos especificados en Gambit. En función del modelo y de las condiciones empleadas será necesario definir aparte de materiales o materiales fluidos, materiales sólidos o zonas de mezclas de especies; el cual no es nuestro caso. Fluent posee una gran base de datos con diferentes materiales y fluidos y sus correspondientes propiedades, también es posible modificar las propiedades de los materiales de Fluent que trae por defecto o añadir nuevos materiales.

En nuestro caso en particular se añade el agua líquida como fluido de trabajo para el estudio arealizar y como tiene las propiedades físicas que se buscan, no se modifican pero se podría. La elección del material se hace pulsando sobre la pestaña “Define/Materials” y dentro de la pantalla se entra en la base de datos de Fluent y se selecciona el agua líquida con las siguientes propiedades obligadas para el diseño.

$$\rho = 998,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$\mu = 0,001003 \left(\frac{kg}{m.s} \right)$$

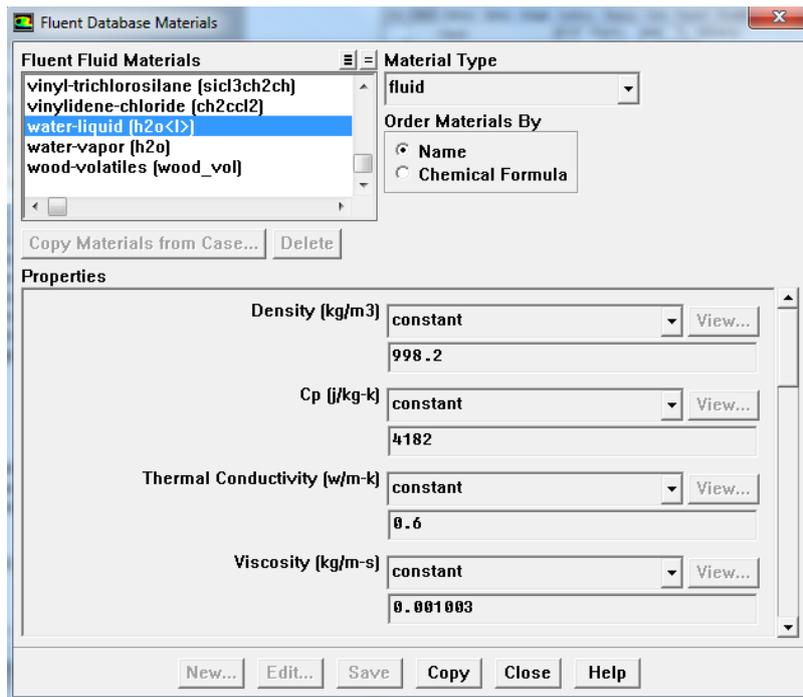


Figura 7.23. Selección del material de operación en el análisis.

7.2.6. Condiciones de operación

En Fluent, también se deben de determinar las condiciones de operación, tales como la presión de trabajo, la temperatura de trabajo, el efecto de la gravedad, etc. En este caso, no se activará ninguna casilla despreciando incluso el efecto de la gravedad en nuestro estudio porque no está dentro de nuestra finalidad de estudio.

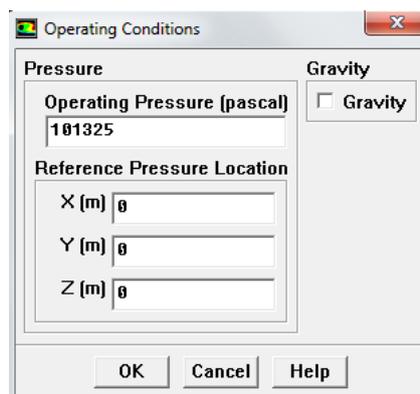


Figura 7.24. Condiciones de operación del problema.

7.2.7. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se especifican los materiales, el fluido y las condiciones del flujo. En esta ventana también es posible modificar el tipo de condición asignada a los determinados elementos. Una vez seleccionada la condición de contorno deseada es posible modificar sus parámetros (velocidad de entrada, temperatura de entrada, presión a la salida, etc.).

Para la determinación del factor de fricción, se procede variando la velocidad del fluido a la entrada de la tubería, para poder simular distintos números de Reynolds. Para modificar este parámetro se tiene que seleccionar en el apartado "Zone" la cara de entrada del paso a simular, que en el diseño completo del muelle resulta ser "entrada.tre.paso7", que se trata de la superficie transversal inicial del tramo recto de entrada y en "Type" seleccionar "Velocity-inlet". Tras esto se pulsa "Set". En la ventana que aparece y se puede modificar las condiciones de entrada del fluido. En el caso del proyecto, nos interesa el apartado de "Velocity Magnitude", que es donde se especificará la velocidad para uno de los casos. Por ejemplo para el caso de Reynolds 200, se introduce el valor de velocidad correspondiente en la tramo recto de entrada del codo, que resulta ser 0,02870882 m/s.

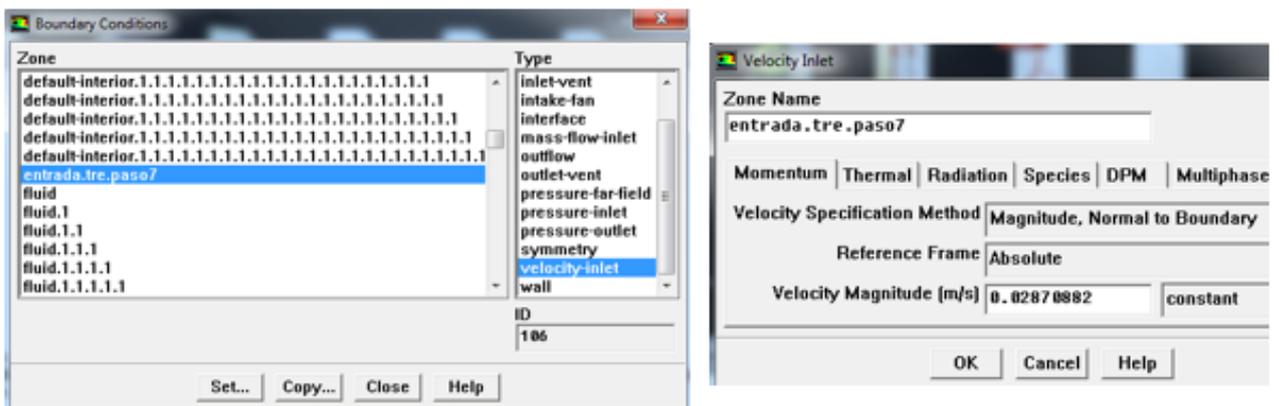


Figura 7.25. Condiciones de contorno- Velocidad de entrada al codo completo.

Además de la velocidad a la entrada, se tiene que aportar la condición de “pressure-outlet” en la sección transversal final del tramo recto de salida. En esta sección se fija un valor de presión 0.

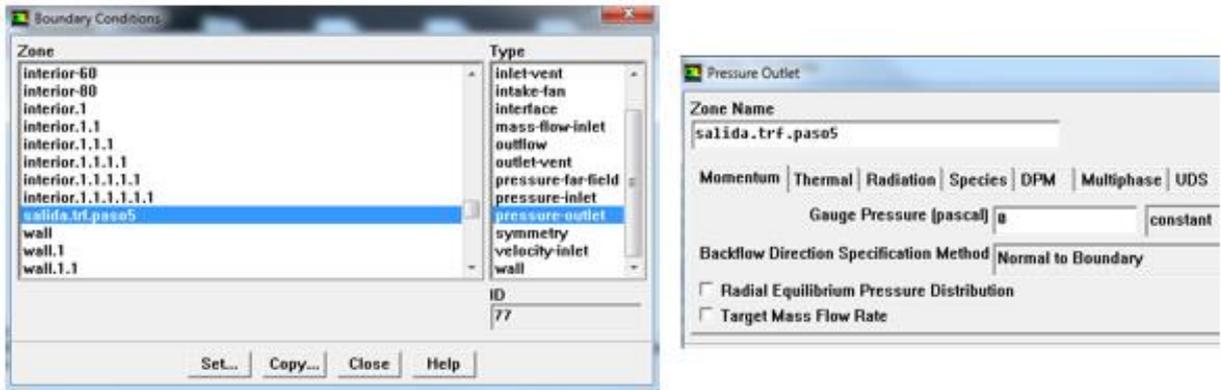


Figura 7.26. Condiciones de contorno- Presión en la sección de salida del codo completo.

Como ya se ha definido en la pestaña de materiales el fluido a emplear, que en este caso se trata de agua líquida, se ha de definir que el agua, es el flujo que circula por cada uno de los volúmenes mallados de nuestra geometría. Para ello se pincha sobre la pestaña “Define/Boundary Conditions” y se selecciona uno de los volúmenes fluidos que en este caso recibe distintos nombres, empezando todos por interior. Lo que se tendrá que hacer es entrar en él, seleccionar el agua líquida como el fluido y finalmente copiar este volumen como la referencia para el resto de volúmenes.

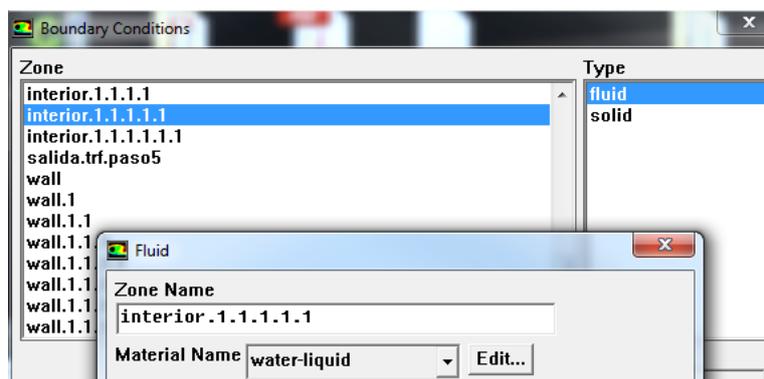


Figura 7.27. Condiciones de contorno-Selección del agua líquida como fluido de trabajo para todos los volúmenes.

Y estas son las condiciones a fijar para el problema de presión o de fricción. En el problema de transferencia del calor se tendrán que añadir la condición de flujo de calor de aplicación exterior sobre las paredes que rodean al flujo. Se ha de añadir un flujo de calor en todas las paredes “Wall” de 30.000 W/m², por lo que el procedimiento será adjudicarle a una pared esta condición y luego copiarla como referencia para el resto de paredes.

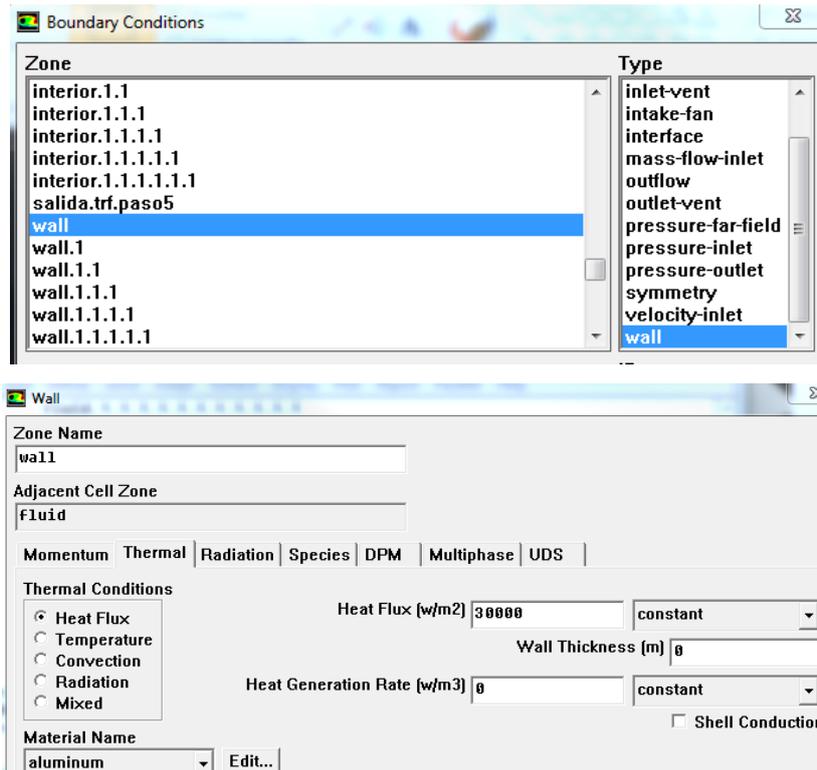


Figura 7.28. Condiciones de contorno-Flujo de calor en las paredes para el problema de transferencia del calor.

En la imagen de la Figura 7.29, se pueden apreciar las secciones transversales con las que se trabajan a lo largo del proyecto:

En primer lugar se encuentra la superficie de entrada al tramo recto, denotada como “entrada.tre.paso7”; de color naranja, la siguiente es la entrada al codo, denotado como “S1”; de color granate, la siguiente es la sección que forma 90° con respecto a la entrada del codo, denominada como “M90”; de color verde, la salida del codo denotada como “S2”; de color azul marino y por último la sección de salida del tramo recto de salida denotada como “salida.trf.paso5”; de color azul turquesa.

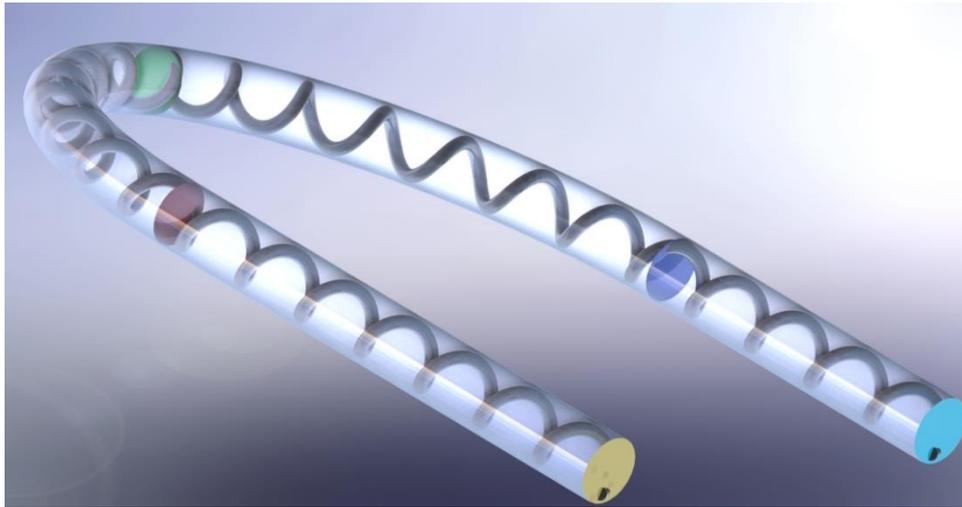


Figura 7.29. Secciones transversales a estudiar en el proyecto.

7.2.8. Modelo Físico

Este apartado se centra, en cómo Fluent adapta mediante modelos y ecuaciones los fenómenos físicos que son objeto de estudio. Aquí existe un amplio abanico de posibilidades, por lo cual es esencial conocer previamente cada uno de ellos para elegir el mejor modelo de resolución y que los resultados de las simulaciones concuerden con lo esperado y obtenido experimentalmente.

7.2.9. Modelo temporal

Mediante este modelo, se determinará si se emplea una resolución estacionaria, “steady” o no estacionaria, “unsteady” del caso.

En el caso de tratarse de un problema estacionario habrá que inicializarlo y dar un número de iteraciones pero si se trata de no estacionario, se habrán de indicar unos parámetros adicionales, relacionados con el intervalo de tiempo a simular.

En el caso de este proyecto, se emplean los modelos estacionarios inicializando para un total de 1000 iteraciones y también usaremos modelos no estacionarios con unos parámetros referidos al tiempo. El uso combinado de los dos modelos se utiliza con el fin de acelerar la convergencia, utilizando en primer lugar una convergencia no estacionaria y finalmente estacionaria.

7.2.10. Modelo energético

Mediante este modelo se activa o desactiva la ecuación de la energía. Esto permite la resolución de casos en los que esté presente la transmisión de calor ya sea mediante conducción, convección (natural, forzada o mixta) o por radiación.

En función de la transferencia de calor que se dé el caso, Fluent empleará una variación de la ecuación de la energía u otra, de forma que se adapte correctamente al caso.

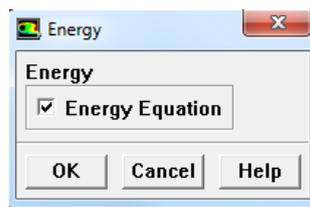


Figura 7.30. Activación de la ecuación de la energía para el problema de transferencia de calor.

7.2.11. Modelo numérico

En este apartado se indica a Fluent la forma en la que debe de proceder para la resolución del problema. Se deben de seleccionar distintos tipos de metodología de resolución.

7.2.11.1 Solver acoplado o segregado

La diferencia entre solver acoplado y uno segregado está en la forma de resolver las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos. Mientras que un solver segregado resuelve estas ecuaciones de forma secuencial, un solver acoplado las resuelve simultáneamente. En ambos casos, al tratarse de ecuaciones no lineales, el número de iteraciones necesarias para llegar a la convergencia es elevado.

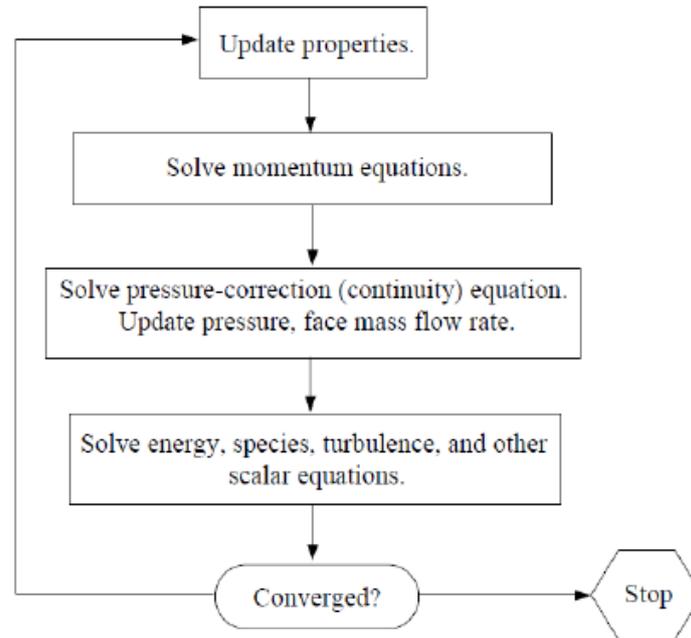


Figura 7.31. Algoritmo iteración para Solver segregado.

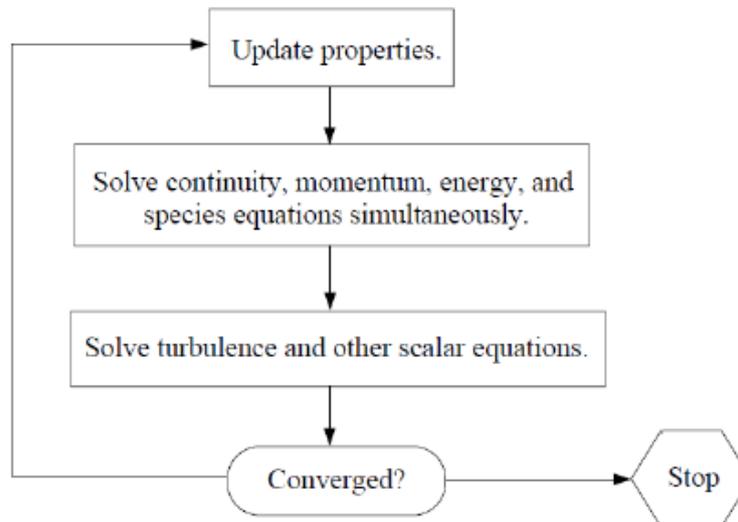


Figura 7.32. Algoritmo de iteración Solver acoplado.

7.2.11.2 Solver basado en presión o densidad

El solver basado en presión resuelve sistema de ecuaciones fundamentales empleando una expresión que corrige la presión, mientras que el solver basado en la densidad, se

trata de un solver acoplado donde las ecuaciones se resuelven de forma matricial. La mayoría de casos se pueden resolver indistintamente con solver basado en presión o basado en densidad, pero tradicionalmente se ha empleado solver basado en presión para cálculos con flujo incompresible y el solver basado en densidad para casos donde el flujo es compresible.

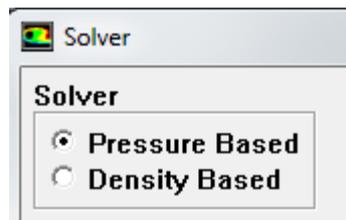


Figura 7.33. Selección del Solver basado en presión para resolución de problemas.

7.2.11.3 Solver seleccionado

Por lo tanto en el caso del proyecto, como el fluido de trabajo es el agua líquida (fluido incompresible) se realizan los análisis con el solver basado en la presión.

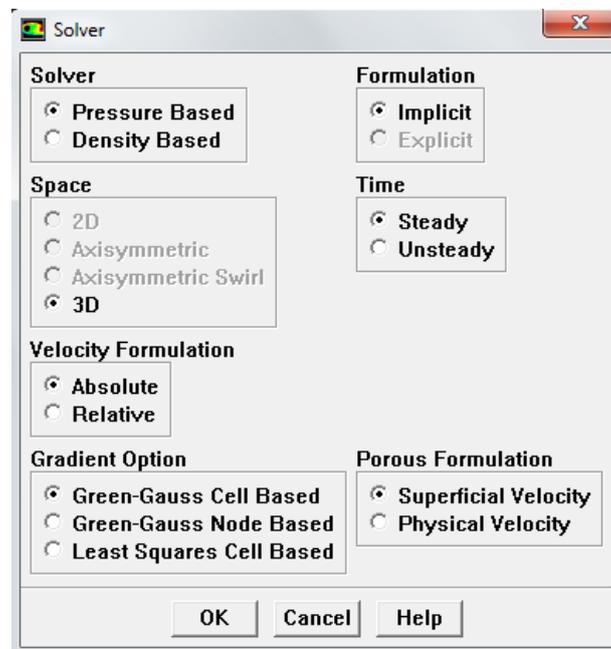


Figura 7.34. Selección del Solver basado en presión, utilizando Modelo temporal estacionario para resolución de problemas.

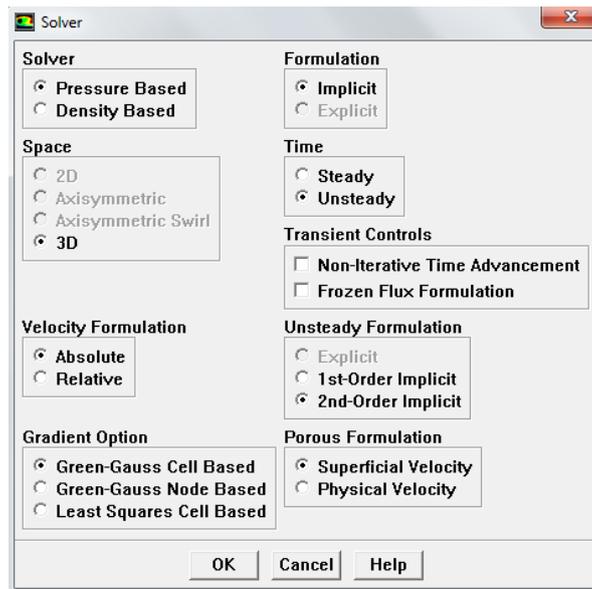


Figura 7.35. Selección del Solver basado en presión, utilizando Modelo temporal no estacionario con método implícito de 2nd orden para resolución de problemas.

7.2.12 Linealización implícita o explícita

En el apartado anterior se ha seleccionado un método implícito o explícito para la resolución del problema; ahora procedemos a explicar en qué consiste cada uno de estos.

- Linealización implícita

Respecto a la formulación implícita, los valores de cada variable desconocidos en una celda se relacionan tanto con los valores conocidos y desconocidos de esa variable en las celdas adyacentes. Así, cada una de las incógnitas aparecerá en más de una ecuación del sistema, resolviéndose simultáneamente.

- Linealización explícita

El caso la formulación explícita, los valores de cada variable desconocidos en una celda se relacionan únicamente con los valores conocidos de esa variable. Así, cada incógnita aparece sólo en una ecuación.

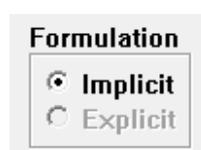


Figura 7.36. Selección del tipo de linealización.

7.2.13. Inicialización del problema

La inicialización del problema se hace pinchando en la pestaña “Solve/Initialize/Initialize” y marcar la opción de Init, con lo que el problema se inicia. Si se hubiesen ensayado casos anteriormente, quedarían de nuevo inicializados, lo que supondría calcular de nuevo el problema.

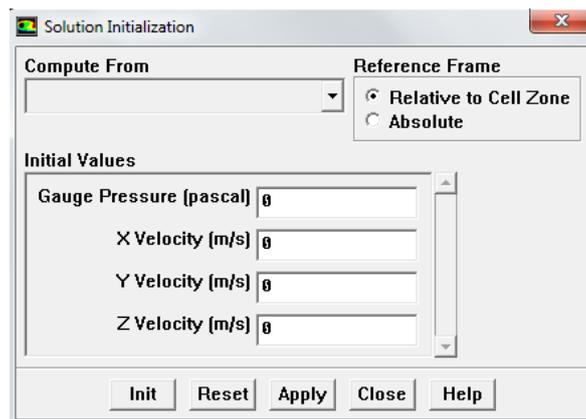


Figura 7.37. Inicialización del problema.

7.2.14. Monitorización de la convergencia de la solución

Respecto a la convergencia de la solución se debe de indicar en Fluent el valor de los residuos a partir de los cuales se considera que la solución ha convergido. Unos residuos muy elevados no garantizan una buena solución, mientras que unos residuos demasiado bajos implicarían un mayor tiempo de cálculo cuando la solución se podría haber alcanzado con unos residuos menores. En el caso del problema de fricción se cumplirán los siguientes residuos, que se configuran pinchando en la pestaña de “Solve/Monitors/Residual”, como se puede apreciar en la Figura 7.38:

- 1e-4 ---- Continuidad
- 1e-3-----Velocidad de X
- 1e-3 ----- Velocidad de Y
- 1e-3 ----- Velocidad de Z

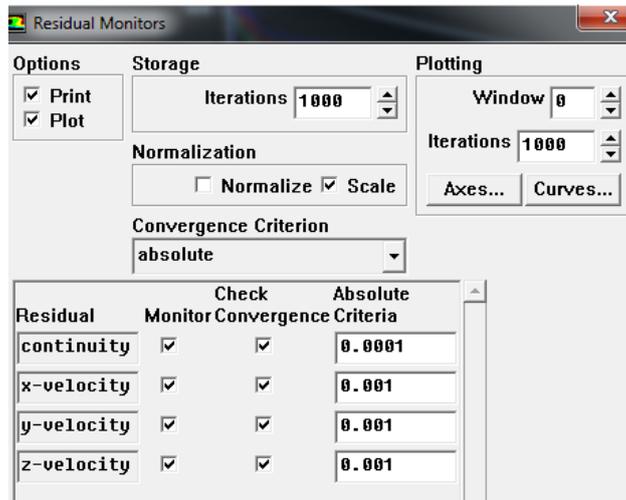


Figura 7.38. Residuos de problema de fricción.

Mientras que para la resolución o análisis del problema de transferencia de calor, se utilizan unos residuos como los marcados en la Figura 7.39:

- 1e-4 ---- Continuidad
- 1e-3-----Velocidad de X
- 1e-3 ----- Velocidad de Y
- 1e-3 ----- Velocidad de Z
- 1e-9-----Ecuación de Energía

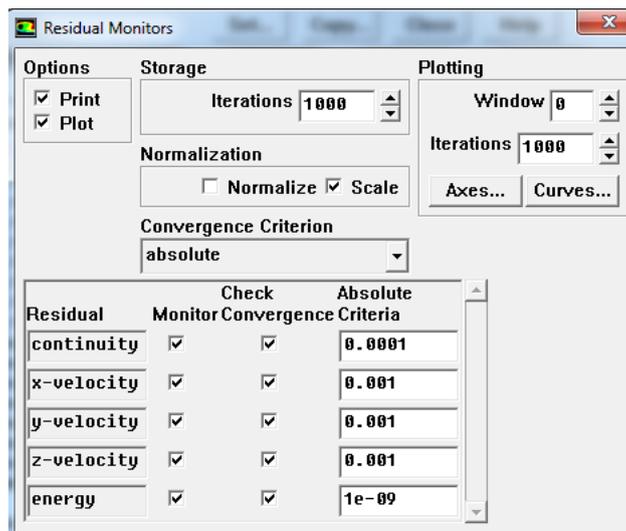


Figura 7.39. Residuos de problema transferencia del calor.

Además en la resolución de ambos problemas se marca la casilla de representación “Plot”, para que genere una gráfica en la que se pueda apreciar cómo avanza la convergencia y de tal manera con pocas iteraciones poder apreciar si la solución tiene buena tendencia de convergencia o por lo contrario parece contener un error por el mal desarrollo de la curva.

7.2.15. Análisis del modelo-Puesta en marcha de las iteraciones

Tras la configuración del solver, las condiciones de contorno, etc. Es el momento de ejecutar las simulaciones.

Dado que se emplea un método iterativo, es necesario indicar el número de iteraciones a llevar a cabo. La simulación en Fluent puede finalizar de dos formas; por cumplirse el criterio de convergencia establecido en cada uno de los casos o por alcanzar el número especificado de iteraciones.

En el caso inicial, cuando se trabaja con un modelo temporal en estacionario “steady” y se aporta un total de 1000 iteraciones, si se alcanzan 1000 iteraciones y la solución no ha convergido, el análisis se pararía sin obtención de solución.

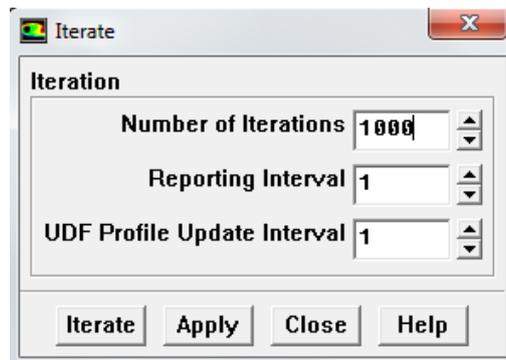


Figura 7.40. Iteraciones para un modelo temporal estacionario.

Pero como se ha comentado con anterioridad, para la resolución de ciertos problemas se hace necesario la utilización combinada de un modelo temporal estacionario y otro no estacionario, trabajando en primer lugar con un modelo no estacionario para acelerar el tiempo de convergencia.

Cabe destacar que previamente se han seleccionado para ello en la pestaña “Models/Solver” la opción de modelo temporal no estacionario “unsteady” y como método implícito, uno de segundo orden. Cuando se configuran las iteraciones tenemos en cuenta los parámetros, que cito a continuación y que se muestran en la Figura 7.41:

- Paso de tiempo: donde se suele tomar un rango entre 0.1-0.5 segundos. Cuanto más pequeño sea, proporcionará una mejor convergencia. En dicho proyecto se fija un valor de 0.05.
- Número máximo de iteraciones por paso de tiempo: en un principio se prueba con 100, pero los análisis se hacían bastante largos así que se reduce a 40.
- Número total de pasos de tiempo: en este caso se toman 20.

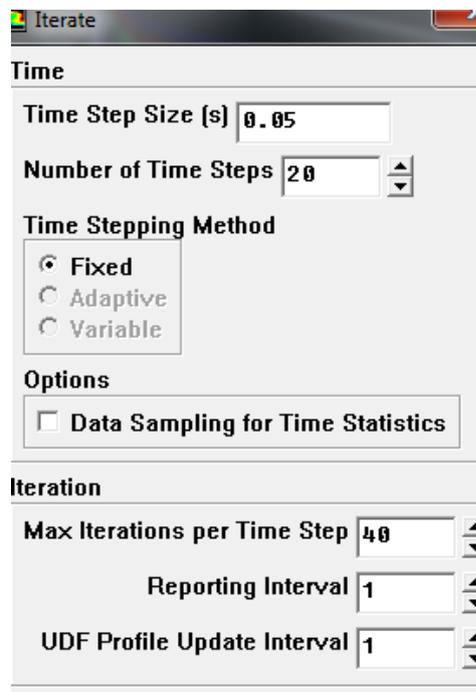


Figura 7.41. Iteraciones para un modelo temporal no estacionario.

También es posible indicar la frecuencia a la que se comprueba la convergencia del problema. Esto en casos del empleo de computadoras en paralelo es importante, pues determinará la frecuencia de envío y recepción de datos del resto de equipo.

Cabe destacar que para comprobar que un problema tiene una solución correcta hay que comprobar la gráfica de convergencia que puede dar unas trayectorias erróneas o

correctas, según la tendencia que lleve. En el caso que sea errónea no se conseguirá alcanzar el criterio de convergencia.

En la Figura 7.42 que se muestra a continuación, podemos apreciar como la ecuación de la continuidad comienza a crecer de modo exponencial, lo que indica que este caso está mal diseñado y que por lo tanto su solución no convergerá.

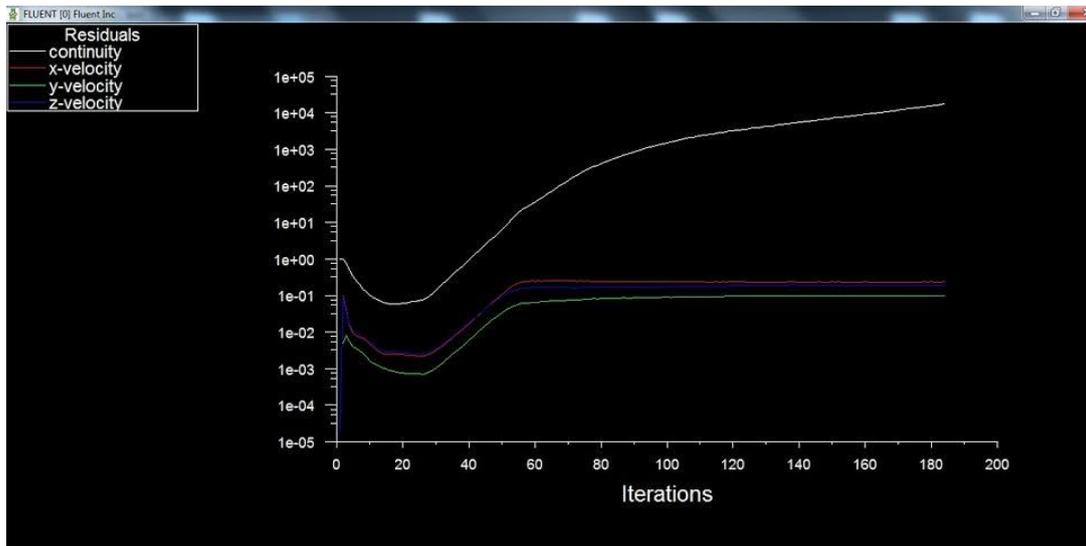


Figura 7.42. Monitorización de convergencia errónea.

Por otro lado se puede ver como converge un problema de fricción para Reynolds 200, en el que la convergencia es correcta y se alcanza para la iteración número 285, como indican respectivamente las figuras Figura 7.43 y Figura 7.44:

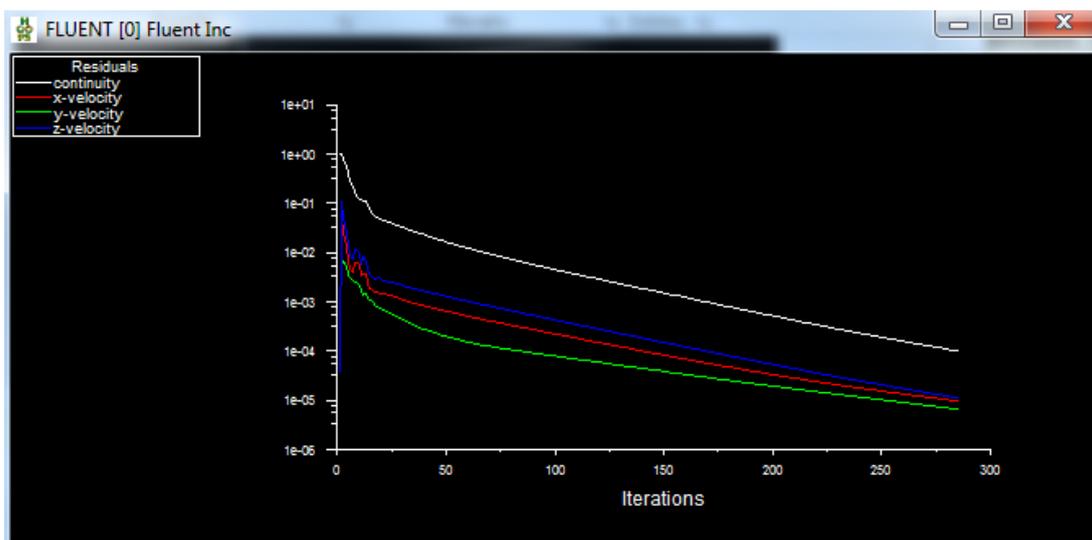


Figura 7.43. Monitorización de convergencia de problema fricción para $Re=200$.

```

reversed flow in 197 faces on pressure-outlet 77.
283 1.0305e-04 9.8143e-06 6.6920e-06 1.1458e-05 2:18:45 717

reversed flow in 197 faces on pressure-outlet 77.
284 1.0035e-04 9.6838e-06 6.6005e-06 1.1274e-05 2:17:06 716

reversed flow in 197 faces on pressure-outlet 77.
! 285 solution is converged
285 9.8507e-05 9.5569e-06 6.5133e-06 1.1092e-05 2:15:44 715

```

Figura 7.44. Número de iteraciones para llegar a la convergencia para problema fricción de $Re=200$.

Cabe destacar que el análisis de un problema se desarrolla para una serie de números de Reynolds, por lo que para no repetir el mismo proceso para cada uno de los números de Reynolds; lo que supone únicamente cambiar el valor de la velocidad en la sección de transversal del tramo recto de entrada.

Lo que se hace en el problema de fricción y en el de transferencia del calor para agilizar el tiempo de análisis, es comprobar la convergencia del caso a estudiar para un número de Reynolds y cuando se confirma que se cumple la convergencia y que las soluciones son correctas, se genera un documento journal a partir de ANSYS Fluent para poder lanzar en un único caso todos los números de Reynolds que se deseen ensayar y lanzarlos en un servidor mediante el protocolo SSH, en el que se generan los archivos que se usan para dar instrucciones, los problemas son resueltos en un ordenador con mejores características de procesamiento de datos.

Con este método llegar a la situación de convergencia es mucho más rápido y aunque requiera un entendimiento de como programar los casos, nos permitirá obtener todos los casos que se quieran de manera automatizada.

Una vez concluido el cálculo, finaliza el análisis numérico del problema.

7.3. Post-procesado con MATLAB y Journals

Una vez analizada la malla, es el momento de realizar el post-procesado del problema.

Este se divide a su vez en dos fases:

7.3.1. Examen de los resultados

En esta fase del estudio Computacional de Fluidos (CFD), se evalúan los resultados obtenidos a partir de las soluciones obtenidas de las simulaciones realizadas, comparándola con otras simulaciones previas, ecuaciones comprobadas empíricamente o datos tabulados.

Para el caso del proyecto, será interesante conocer los siguientes parámetros:

- Coeficiente de Fanning; f :

Para evaluar este número, lo que se hace es procesar una serie de datos en la sección de entrada del codo y la sección de salida del codo; las cuales se denotan como S1 y S2 respectivamente, secciones que permiten evaluar la caída de presión en el codo, ΔP_{codo} ; y de tal manera poder obtener el coeficiente de Fanning, que para tubo de sección circular queda definido por la imagen de la Figura 7.45:

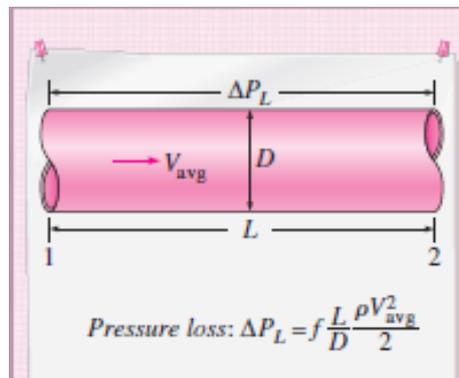


Figura 7.45. Ecuaciones de caída de presión (ΔP_{codo}).

Las secciones procesadas para la resolución del problema las representamos en las Figura 7.46:

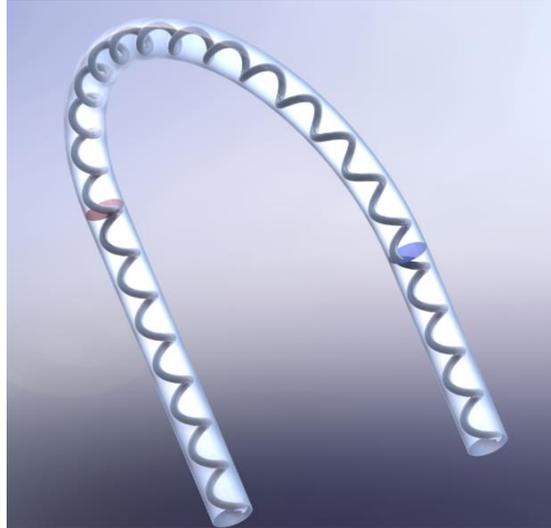


Figura 7.46. Geometría del codo para procesamiento de la caída de presión (ΔP_{codo}) y obtención del coeficiente de Fanning, a partir de las secciones de entrada y salida del codo, S1 (granate) y S2 (azul), respectivamente.

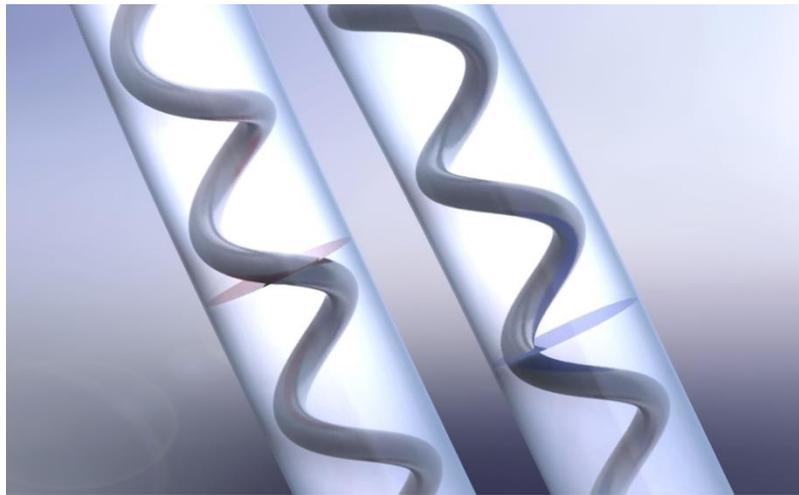


Figura 7.47. Zoom de la geometría del codo, donde visualizamos S1 y S2.

- Patrón de flujo:

Para evaluar el patrón de flujo, se procesa una serie de datos en la sección de entrada al codo y en la sección que forma 90° con la entrada del codo, para poder sobre todo visualizar la diferencia de importancia de los flujos secundarios en función del Reynolds, así como otros resultados derivados del estudio. En la Figura 7.48, se pueden apreciar

las secciones transversales sobre las que se estudia el problema de transferencia del calor:

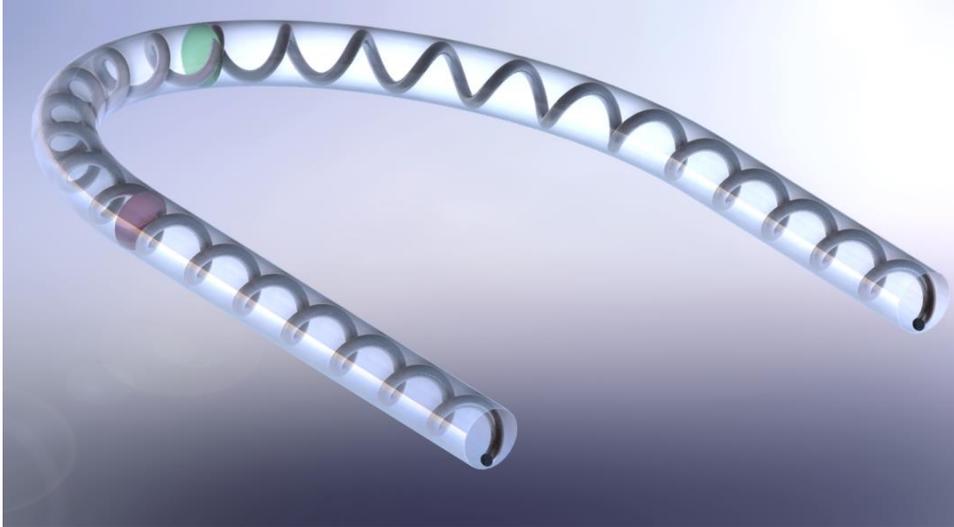


Figura 7.48. Geometría del codo para procesamiento del patrón de flujo a partir de las secciones de entrada, "S1" (granate) y la que forma 90° con la entrada del codo, "M90" (verde).

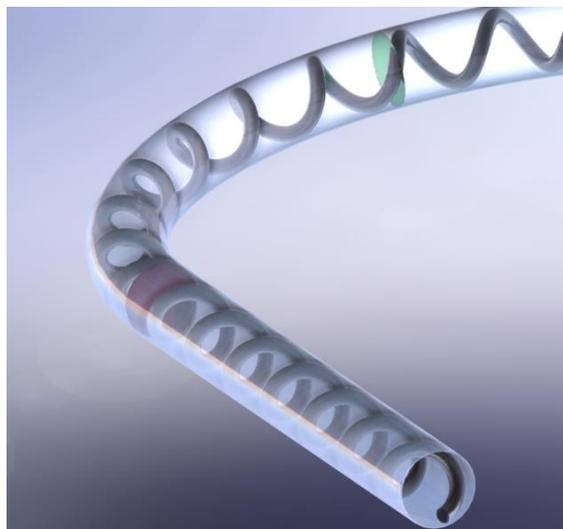


Figura 7.49. Zoom de la geometría del codo, donde visualizamos S1 y M90.

Además se pueden representar gráficos de las distribuciones de velocidad en dichas secciones que me permitan apreciar la importancia de los flujos secundarios, así como gráficas, que relacionen distintas variables con el número adimensional del Nusselt.

- Número adimensional de Nusselt; Nu:

Para el procesado de este número adimensional, se exportan ciertas variables de interés sobre las paredes y el fluido que conforman nuestra geometría. Se exportaran por separado las variables de las paredes que contienen al fluido y las variables del fluido que circula por la geometría diseñada; separándolo por tramos, discretizando estas por tramos, el tramo recto de la entrada al codo, el tramo del codo y el tramo recto de la salida del codo. Esta separación en zonas y además por elementos, nos permite en primer lugar distinguir como se produce la evolución del Nusselt en cada uno de los tramos. Mientras que la separación de variables de la pared y del fluido, nos permite conocer la intensidad del coeficiente de transferencia de calor para los distintos Reynolds, así como el gradiente de temperaturas entre la pared y el fluido.

7.3.2. Método utilizado para procesado de datos

En esta fase de post-procesado, se comprueban las variables resultantes de la simulación, y se extrae la información necesaria para sacar conclusiones.

Para ello se puede emplear Fluent, ya que permite visualizar las variables del flujo que intervienen en el problema y obtener los valores numéricos; aunque para otros parámetros que el programa no tenga guardados, da la posibilidad de crear una función dependiente de otras variables y poder comprobarla y visualizarla. En el caso del proyecto, aunque se podía haber empleado las visualizaciones de Fluent se ha elegido utilizar otro software específico como es Tecplot para poder visualizar mejor las variables del flujo.

Por otro lado en esta etapa de post-procesado, se pueden sacar conclusiones a partir de gráficos. Hay muchos y diversos métodos para el análisis de los datos, tales como hojas de cálculo o entornos matemáticos. Pero en nuestro caso, se han empleado archivos

journals programados en el propio ANSYS Fluent para la extracción de los valores de ciertas variables fluidas en algunas superficies de la geometría que son de interés para analizar, pudiendo ser utilizados para la representación de capturas de pantalla de ciertas superficies de interés, así como para la generación de curvas teóricas, representaciones gráficas o relaciones entre variables, por medio de su interpretación con scripts programados en Matlab 2013, lo que proporciona herramientas suficientes para realizar un análisis en detalle de los problemas planteados, como justificar las conclusiones que tomemos.

Por lo que, teniendo todos los parámetros deseados, se pueden analizar, pudiendo responder a las cuestiones formuladas en el planteamiento del problema.

7.3.3. Estudio de validación del método

Este apartado consiste en comprobar si se cumplen las premisas del proyecto, obteniendo unas ventajas con la utilización del diseño con muelle integrado o si por lo contrario no lo hacen y sacamos conclusiones negativas en la utilización de nuestro diseño con respecto a las condiciones de trabajo habituales.

Para llegar a estas conclusiones, por la dificultad de encontrar correlaciones tanto para el problema de presión como el de transferencia de calor para un codo liso, para distintos números de Reynolds; se decide generar una malla idéntica de un codo liso sin muelle insertado, para comparar los resultados ya obtenidos en los casos de estudio con las nuevas visualizaciones de los campos fluidos sobre la nueva geometría, así como la representación de los gráficos o relaciones entre variables del flujo. Esto será explicado más detalladamente en el capítulo 9 y capítulo 11.

7.3.4. Consideraciones del método

Finalmente en último lugar, con los resultados obtenidos en la simulación es posible que no se haya satisfecho la razón por la cual se planteó el problema. Por lo que se hace necesario, revisar los modelos empleados, así como las condiciones de contorno y el

mallado, para actuar consecuentemente con él y volver a analizar el problema en búsqueda de una solución satisfactoria.

PARTE IV: SIMULACIONES Y RESULTADOS

C pítulo 8: Simulaciones a realizar

Los objetivos realizados en este proyecto son el estudio del factor de fricción o coeficiente de Fanning “ λ ” para el problema de presión en un codo con muelle insertado perteneciente a un colector solar. Mientras que por otro lado queremos obtener el número de Nusselt para el problema de transferencia del calor para la misma geometría; los dos problemas se ensayan o se analizan para valores de Reynolds comprendidos entre 5 y 2000.

- Estudio del factor de fricción en condiciones de flujo isoterma similares a las existentes en el codo con muelle integrado en un colector solar plano.
- Estudio del factor de fricción en condiciones de flujo isoterma, para un codo liso sin muelle integrado en su interior para la validación del método del estudio anterior.
- Análisis del número adimensional de Nusselt en función distintos números de Reynolds, para un valor de transferencia de calor de $30.000\text{W}/\text{m}^2$ sobre la pared del codo con muelle integrado.
- Análisis del número adimensional de Nusselt en función de distintos números de Reynolds, para un valor de transferencia de calor de $30.000\text{W}/\text{m}^2$ sobre la pared del codo sin muelle integrado, que se emplea para la validación del método del análisis previo.

Capítulo 9: Estudio del factor de fricción en condiciones de flujo isotermas, para un codo liso sin muelle integrado en su interior para la validación del método del estudio anterior.

Para la comprobación de las simulaciones realizadas sobre el codo con un reactor oscilatorio insertado; que en dicho caso se trata de un muelle helicoidal, se procede a crear un codo con las mismas características geométricas sin muelle insertado para en el apartado de post-procesado poder sacar diferencias y obtener consecuencias.

9.1. Geometría y mallado empleados

Por lo tanto se procede a generar la geometría del codo liso sin muelle insertado en su interior.

Como para la generación del codo con muelle insertado, utilizamos el software Gambit 2.4.6.

En primer lugar, se genera la superficie transversal del flujo, que en este caso coincide con una circunferencia de radio 3.5 milímetros, que permite representar la tubería acodada con diámetro de paso de flujo de 7 milímetros. Para ello se crean unos puntos en el eje de coordenadas para poder generar una línea con trayectoria circular. Se usarán los puntos $(3.5, 0, 0)$ y $(0, 3.5, 0)$ como puntos que definen la trayectoria circular, mientras que el centro de coordenadas, $(0, 0, 0)$ se utiliza como centro de la circunferencia. El siguiente paso es convertir esta línea circular en una superficie para poder mallarla.

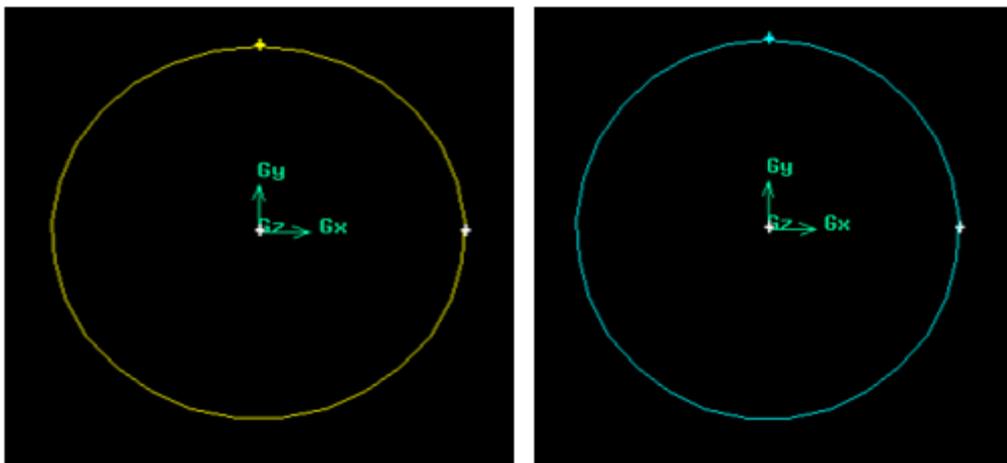


Figura 9.1. Generación de línea y cara de trayectoria circular en la sección transversal.

Habiendo generado una superficie ya puedo crear el mallado.

En primera instancia, interesa crear una capa límite en la línea circular de la superficie transversal, para hacer un estudio más exhaustivo en esa zona de transcurso del flujo, para hacer visible el efecto pared del flujo.

Para ello se configura una capa límite bastante amplia que ocupa como una cuarta parte de la sección del flujo.

Para la capa límite se elige el tamaño que se desea así como las filas que se quieren, como se aprecia en la Figura 9.2.

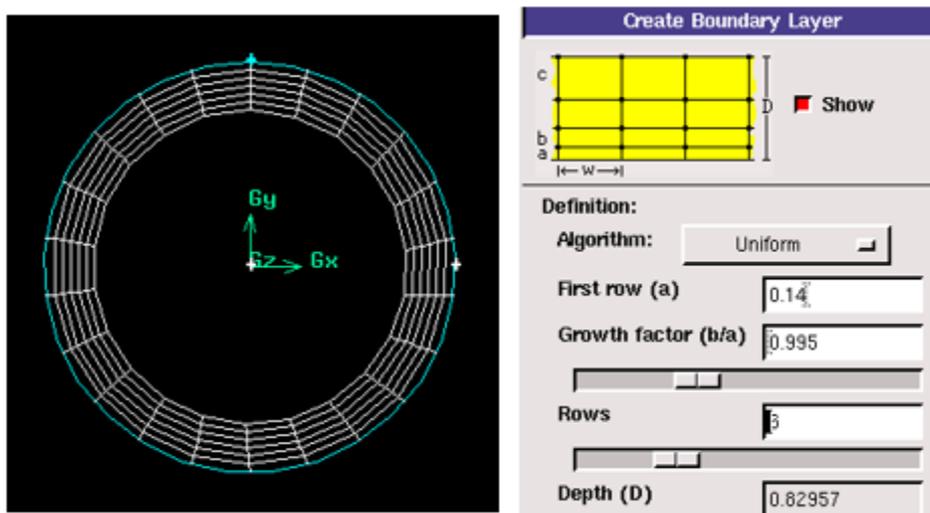


Figura 9.2. Generación de la capa límite de la sección transversal.

Tras esto, se genera un mallado de la superficie transversal de paso del flujo, utilizando el mallado de la cara con elementos cuadráticos del tipo "pave", configurando un espaciado con el "interval size" de 0,4. El resultado del mallado será el obtenido en la Figura 9.3.

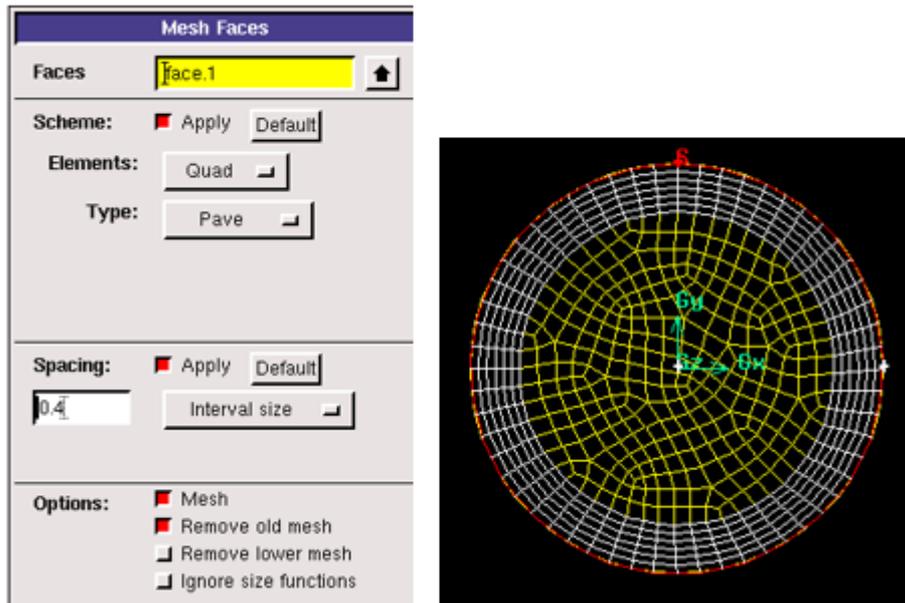


Figura 9.3. Generación de la capa límite de la sección transversal.

Para crear el mallado final de la cara, basta con eliminar la capa límite, tras mallar la cara, lo que permite apreciar la cara mallado de color amarillo, que más tarde se utiliza para mallar los volúmenes del tramo recto de entrada y de salida, así como los del codo. Se puede apreciar el mallado de la sección transversal en la Figura 9.4:

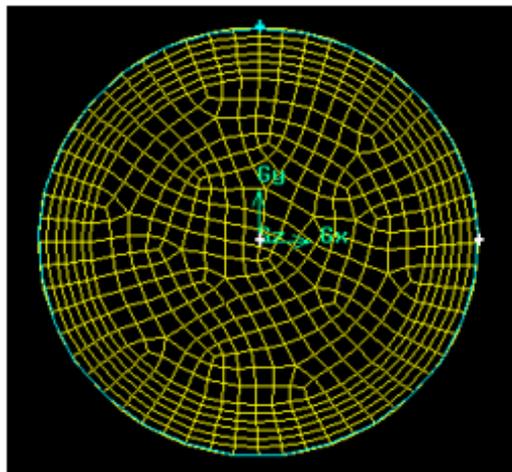


Figura 9.4. Superficie transversal finalmente mallada.

Y a partir ahora, hay que generar unas líneas que actúen de ejes para hacer el barrido de esta superficie trasversal por todo el volumen del codo y de los tramos rectos.

Para la generación de la líneas rectas de guía, se parte creando una línea que una los puntos $(0, 3.5, 0)$ y $(0, 3.5, 73.5)$, la cual genere el tramo recto de entrada del flujo.

Por otro lado se genera una línea de trayectoria semicircular, que tendrá que ser descompuesta en dos arcos de 90° , donde el primer arco consta de los puntos (0, 3.5, 73.5) y (45, 3.5, 118.5), mientras que el segundo arco consta de los puntos (45,3.5, 118.5) y (90, 3.5, 73.5); utilizando ambos arcos como punto central (45, 3.5, 73.5). Tras crear estos arcos se deben de unir ambos arcos en un solo tramo recto que permita tener definida una trayectoria semicircular, que se utilizará para generar el volumen del codo.

Y finalmente se genera una línea recta que una los puntos (90, 3.5, 73.5) y (90, 3.5, 21), que permita poder obtener el tramo recto de salida del flujo.

En la Figura 9.5, se puede apreciar la geometría de líneas que se usa como ejes de barrido a lo largo de los volúmenes de acción del flujo, de la sección transversal mallada inicialmente.

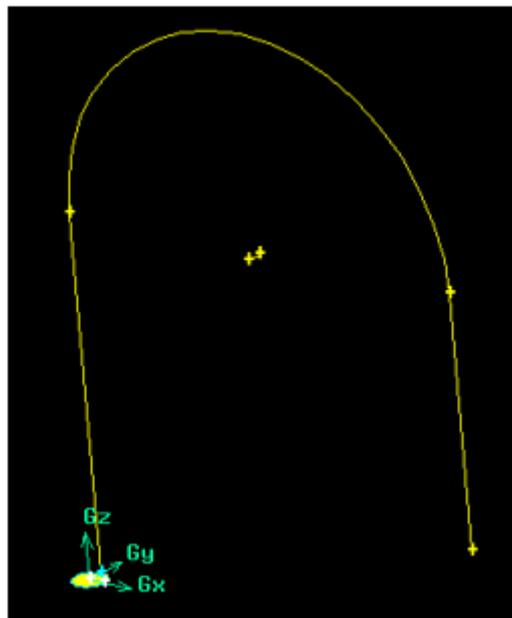


Figura 9.5. Ejes de desarrollo del barrido de los volúmenes.

Ahora es el momento de llevar a cabo el barrido de la superficie transversal que se encuentra en el centro de coordenadas del sistema de referencia cartesiano.

En primer lugar, se genera el barrido del volumen del tramo recto de entrada, con una configuración rígida, seleccionando la sección que utilizamos como referencia para

mallar todo el volumen y la línea a seguir por el barrido. El volumen de este tramo se puede apreciar en la Figura 9.6.

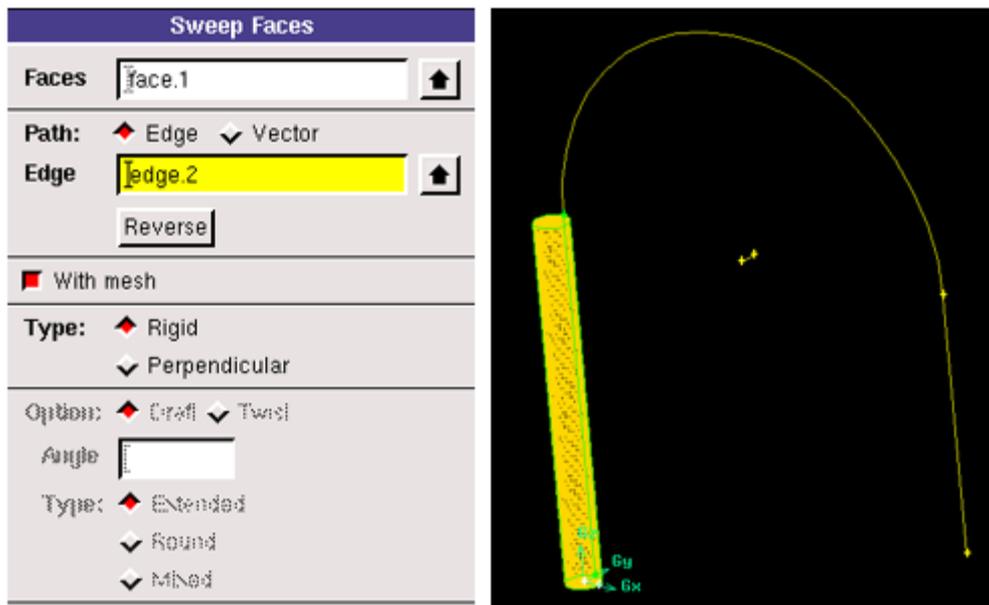


Figura 9.6. Generación del tramo recto de entrada con uso de barrido de volumen.

Con respecto a la generación del codo, se crea un volumen hasta la sección del codo, que forma 90° con respecto a la sección de entrada del codo, que permita evitar errores en el mallado generado por medio del barrido, así como eludir los errores en la convergencia que aporta resultados incorrectos cuando se usa un barrido perpendicular para la generación del codo de 180° ; mientras que por otro lado permite disponer de una sección transversal en el plano que forma 90° , con respecto a la entrada como a la salida del codo, ya que es de interés para el estudio de transferencia del calor.

Para llevar a cabo el codo, se puede hacer por medio de un barrido o de giro de las secciones. En el caso estudiado, se ha usado la revolución o giro de la sección de entrada al codo, usando como línea de referencia para el barrido el arco de 90° que hemos generado. Por lo tanto, se malla esta primera zona y luego procedemos a partir de esta sección transversal a 90° , a girarla para completar el volumen del codo. Finalmente queda un mallado del codo, como el mostrado en la Figura 9.7 Y Figura 9.8.

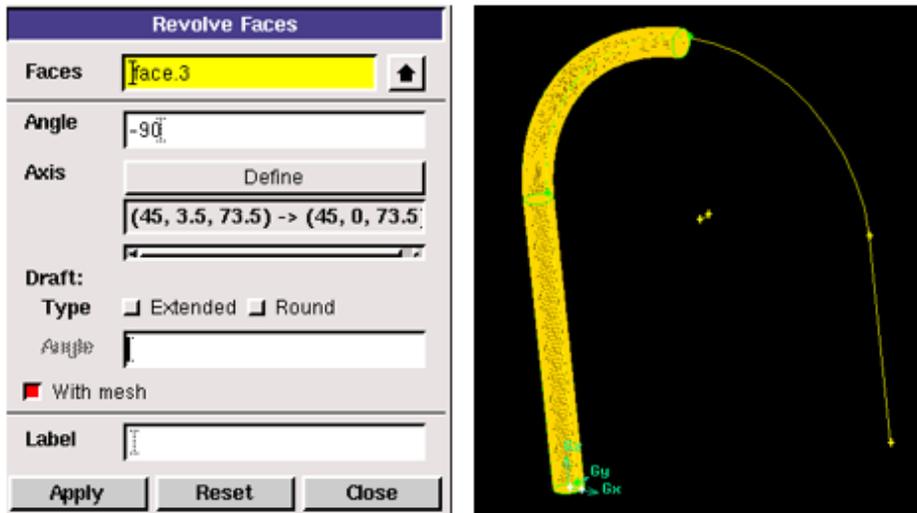


Figura 9.7. Generación de 0° a 90° del codo.

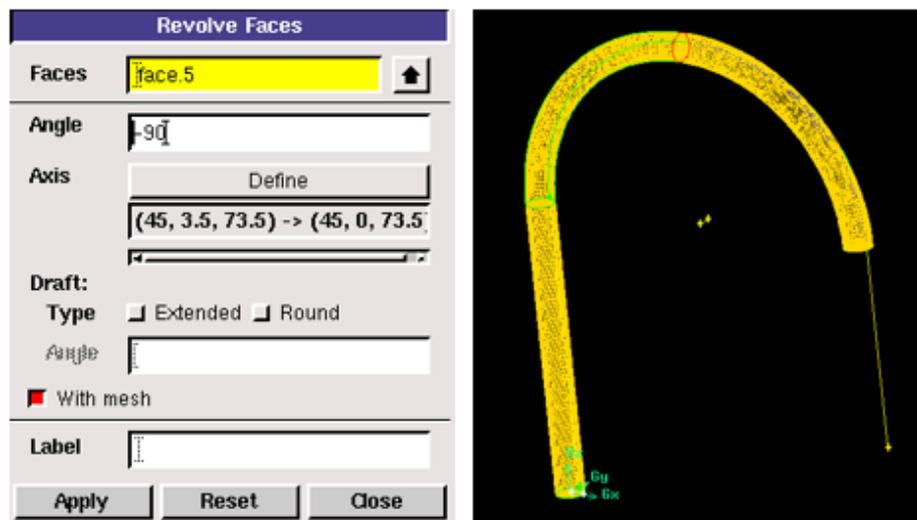


Figura 9.8. Generación de 90°-180° del codo.

Finalmente tenemos que generar el tramo recto de salida por medio de un barrido usando como línea de referencia la línea recta.

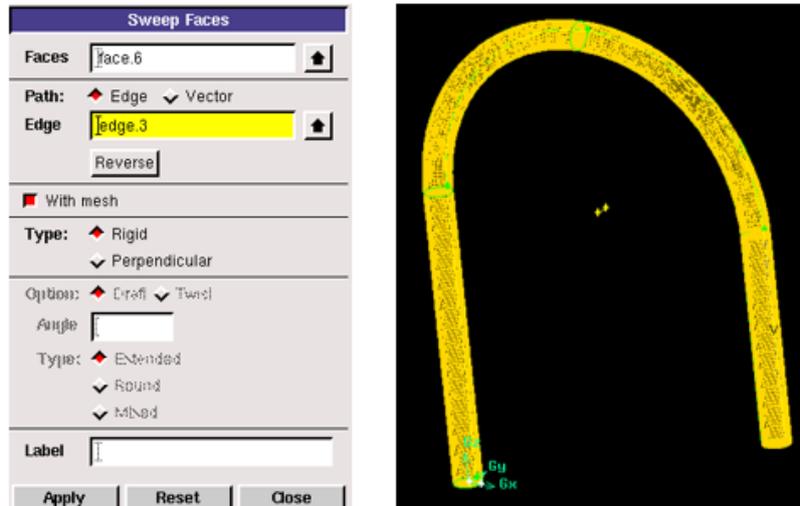


Figura 9.9. Generación del tramo recto de salida con uso de barrido de volumen.

Generada la geometría completa del codo, se tienen que asignar las condiciones de contorno sobre la geometría y las condiciones del flujo.

Por un lado se tienen que asignar las secciones de entrada del flujo; “velocity-inlet”, la superficie transversal situada sobre el sistema de coordenadas cartesianas y la sección de salida del flujo; “pressure-outlet”, la superficie transversal que se encuentra a la salida del tramo de salida.

Por otro lado hay que definir ciertas superficies internas del codo liso como “interior”, por su interés en el procesamiento de los datos.

Estas superficies son las superficies transversales de entrada y salida del flujo del codo, es decir las secciones que se encuentran en el ángulo 0° y en el 180° , llamándolas respectivamente S1 y S2, de las cuales se extrae la caída de presión que existe en el codo liso sin muelle insertado para compararlo con la simulación del codo con muelle insertado y apreciar la influencia del reactor oscilatorio en dichos resultados.

En último lugar, se definen las paredes de las que está constituido el codo y a las cuales se las denomina según su secuencia de paso, como Wall-tramo1, Wall-tramo -2, Wall-tramo3 y Wall-tramo4; tratándose de tal manera las dos paredes intermedias las que constituyen las paredes del codo, la primera la del tramo de entrada y la última la del tramo de salida.

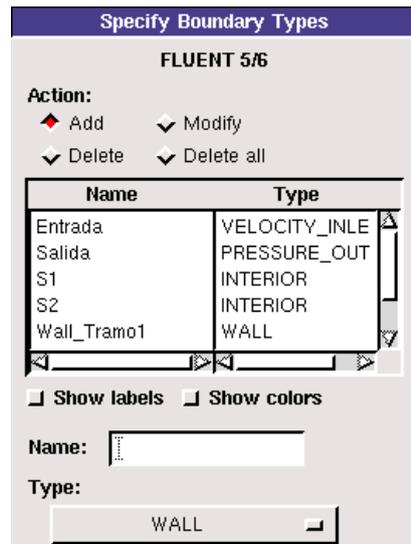


Figura 9.10. Selección de las condiciones de contorno

Por otro lado se tienen que definir los fluidos que circulan por la geometría de codo liso, para la que se utiliza la metodología empleada en la numeración de las paredes. Por lo que los flujos o “default-interior”, reciben el nombre de forma secuencial en función de cómo atraviesen el diseño. Por lo tanto serán denotados como “Fluid-tramo1”, “Fluid-tramo2”, “Fluid-tramo3” y “Fluid-tramo4”, donde sucede que los dos intermedios son los flujos que pasan por los tramos del codo, el primero el flujo que pasa por el tramo de entrada y el último correspondiente al tramo recto de salida.

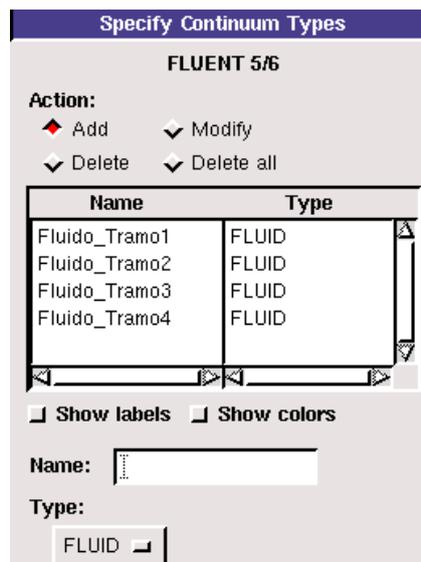


Figura 9.11. Selección de los volúmenes fluidos.

Después de haber generado la geometría del codo liso sin muelle insertado, se procede a guardar el archivo y se exporta en formato de mesh, que tiene por extensión “.msh”.

9.2. Introducción a las simulaciones del factor de fricción

En este conjunto de simulaciones se va a analizar la caída de presión entre la entrada y la salida del codo que permite obtener el factor de fricción correspondiente al caso de una tubería sin muelle integrado. Se obtendrá una representación gráfica del coeficiente de Fanning para el problema y se compararán los resultados de las simulaciones con la ecuación empírica del factor de fricción, correspondiente a una tubería de sección circular lisa.

Para ello, se simulan una serie de flujos isoterms con números de Reynolds comprendidos entre $Re=5$ y $Re=2000$, intervalo suficiente para evaluar el flujo de agua portador del calor en un colector solar.

Como se sabe que para una tubería lisa de sección circular, a partir de Reynolds 2000 se alcanzaría la turbulencia y obviamente en el caso de introducir un muelle en su interior la turbulencia se adelanta, pero no se ha considerado la turbulencia en este proyecto, ya que es la primera vez que se simula un codo con muelles insertados y no es el aspecto primordial a estudiar, pero si es cierto que en un futuro se debe de ensayar teniendo en cuenta los modelos viscosos.

Por otro lado, tenemos que decir que en este ensayo, se empleará un fluido con un número de Prandtl de $Pr=7$; lo que significa que al ser el número de Prandtl mayor que la unidad el gradiente de temperaturas es mucho mayor en la pared de la tubería que el gradiente de velocidad, por lo que la capa límite térmica en la pared es menor que la capa límite de velocidad.

En el caso de un tubo sin elementos insertados, las regiones de flujo laminar, transitorio y turbulento se identifican claramente al representar el factor de fricción con respecto al valor de Reynolds.

Y para el desarrollo la simulación del codo liso, los parámetros que utilizamos para inicializar los casos seguirán siendo en función de los distintos valores de Reynolds y aunque la velocidad sigue siendo la misma, como la sección transversal de paso del flujo

en este caso es mayor y como el caudal (m³/s) y el gasto másico (kg/s) son dependientes a ella y sus valores resultan ser mayores con respecto al codo con muelle insertado.

Los valores utilizados para la configuración de los distintos casos vienen dados por la Tabla 9.1:

Re	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Gasto (kg/s)
5	7,177205E-04	2,762112E-08	2,757140E-05
30	4,306323E-03	1,657267E-07	1,654284E-04
55	7,894925E-03	3,038323E-07	3,032854E-04
80	1,148353E-02	4,419379E-07	4,411424E-04
100	1,435441E-02	5,524224E-07	5,514281E-04
200	2,870882E-02	1,104845E-06	1,102856E-03
300	4,306323E-02	1,657267E-06	1,654284E-03
400	5,741764E-02	2,209690E-06	2,205712E-03
500	7,177205E-02	2,762112E-06	2,757140E-03
600	8,612646E-02	3,314534E-06	3,308568E-03
700	1,004809E-01	3,866957E-06	3,859996E-03
800	1,148353E-01	4,419379E-06	4,411424E-03
900	1,291897E-01	4,971802E-06	4,962852E-03
1000	1,435441E-01	5,524224E-06	5,514281E-03
1250	1,794301E-01	6,905280E-06	6,892851E-03
1500	2,153161E-01	8,286336E-06	8,271421E-03
1750	2,512022E-01	9,667392E-06	9,649991E-03
2000	2,870882E-01	1,104845E-05	1,102856E-02

Tabla 9.1. Condiciones de trabajo para codo liso sin muelle insertado

De donde la velocidad se obtiene a partir de la definición del número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \Rightarrow V = \frac{Re(1) \cdot \mu \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)}{\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot D(m)} = [m/s] \quad (9.1)$$

Por otro lado la obtención del caudal se obtiene por medio de:

$$Q = V(m/s) \cdot A(m^2) = [m^3/s] \quad (9.2)$$

Y finalmente para calcular el flujo másico o el gasto, será de la siguiente forma:

$$m = \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot Q \left(\frac{m^3}{s} \right) = \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot V \left(\frac{m}{s} \right) \cdot A \left(m^2 \right) = \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (9.3)$$

Cabe destacar que hemos preparado archivos con instrucciones previas para lanzar en un servidor, llamados "journals", lo que permite simular de manera secuencial varios números de Reynolds en un mismo programa, empleando un ordenador con mayor capacidad de proceso que un ordenador convencional, lo que da la posibilidad de obtener los resultados de manera más rápida. El código utilizado para el problema de presión o de fricción para codo liso sin muelle insertado se incorpora en el Anexo 2.

9.3. Propiedades del fluido empleado

En este estudio se ha empleado el agua como fluido de trabajo a 20°C, de manera que las propiedades físicas del agua son constantes y no varían con la temperatura, Dichas propiedades son:

$$\rho = 998,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$
$$\mu = 0,001003 \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

9.4. Algoritmo o solver empleado

En lo que se refiere al algoritmo empleado para la resolución del problema de fricción en un codo liso sin muelle insertado, se podrá utilizar el mismo solver e incluso el mismo código de los journals, modificando únicamente los nombres de las superficies de entrada, paredes, etc. En este caso se resuelve el problema de fricción para la geometría de codo liso sin muelle insertado para Reynolds 200.

Al final, estas ecuaciones ofrecen una convergencia que se obtiene para la iteración 30 con la siguiente gráfica, ambas representadas en las figuras Figura 9.12 y Figura 9.13:

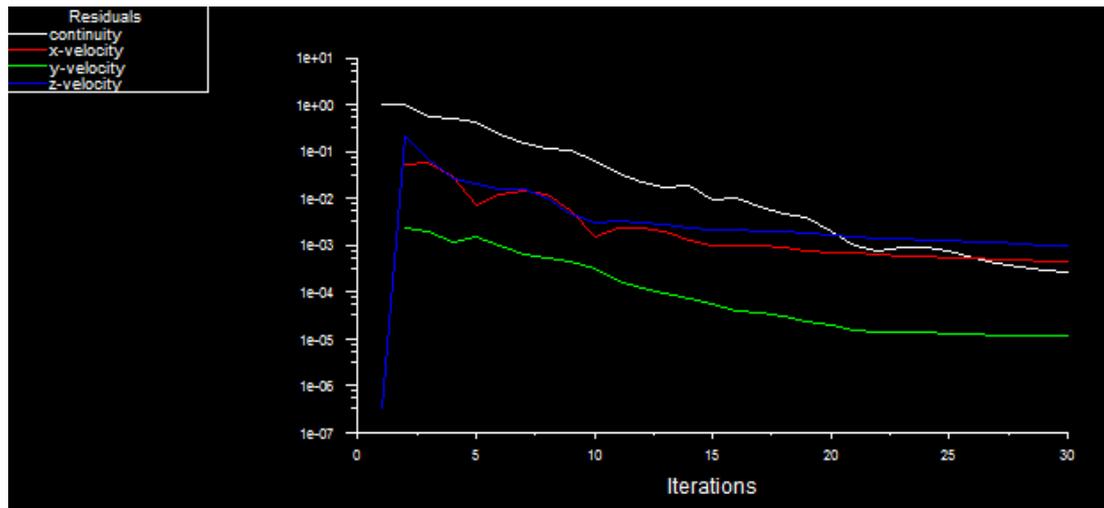


Figura 9.13. Gráfica de convergencia del problema presión de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo liso para $Re=200$.

FLUENT [3d, dp, pbns, lam]										
File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Report	Parallel	Help
14	1.8285e-02	1.2503e-03	7.1814e-05	2.3041e-03	1:22:51	986				
15	9.5648e-03	9.8564e-04	5.5731e-05	2.1745e-03	1:25:55	985				
16	1.0264e-02	9.9034e-04	3.9911e-05	2.2225e-03	1:25:04	984				
17	6.8514e-03	1.0051e-03	3.7482e-05	2.0421e-03	1:24:22	983				
18	4.5665e-03	8.9267e-04	2.9793e-05	1.8947e-03	1:27:04	982				
19	3.7972e-03	7.9374e-04	2.4322e-05	1.7459e-03	1:25:56	981				
20	2.0561e-03	7.2097e-04	2.0258e-05	1.6266e-03	1:25:00	980				
21	1.0070e-03	6.7501e-04	1.5738e-05	1.5278e-03	1:27:31	979				
22	7.3061e-04	6.3768e-04	1.4402e-05	1.4407e-03	1:32:46	978				
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	time/iter					
23	8.8301e-04	6.0721e-04	1.3738e-05	1.3723e-03	1:30:25	977				
24	8.7214e-04	5.8170e-04	1.3578e-05	1.3113e-03	1:35:02	976				
25	7.3187e-04	5.5870e-04	1.3257e-05	1.2540e-03	1:38:42	975				
26	5.4669e-04	5.3399e-04	1.2860e-05	1.1977e-03	1:35:07	974				
27	4.1273e-04	5.0751e-04	1.2153e-05	1.1363e-03	1:35:28	973				
28	3.6186e-04	4.8258e-04	1.1889e-05	1.0829e-03	1:38:59	972				
29	3.0311e-04	4.5858e-04	1.1569e-05	1.0286e-03	1:41:45	971				
?	30	2.6897e-04	4.3617e-04	1.1299e-05	9.8153e-04	1:40:43	970			

Figura 9.12. Número de iteraciones para alcanzar la convergencia del problema presión de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo liso para $Re=200$.

Como se han de representar los resultados procesados, tendrán que ser comparados con otros resultados o ecuaciones validadas.

En dicho caso la representación gráfica que se obtenga del factor de fricción para el diseño de codo liso en función del Reynolds, se comparará con la expresión:

- Ecuación de fricción para Reynolds en tubería lisa recta para sección circular, para régimen laminar:

$$f_s = \left(\frac{16}{Re_D} \right) \quad (9.4)$$

9.5. Resultados del factor de fricción de codo liso sin muelle y comparación con codo liso con muelle insertado.

A partir de los casos obtenidos del análisis del factor de fricción o presión, para el codo sin muelle insertado se extraen ciertas variables sobre las superficies transversales de paso del flujo de entrada del codo, la cual denotamos como S1 y la sección trasversal de salida del flujo del codo, a la que denotamos como S2.

Las variables que se extraen de los casos analizados en Fluent, a través del servidor, son la presión estática, la velocidad en la dirección Z y los volúmenes de las celdas, para la identificación de las variables por celdas del mallado; dichas variables permiten evaluar la caída de presión que se produce en el codo, lo que da la opción de calcular el coeficiente de Fanning o de fricción para cada uno de los valores de Reynolds ensayados. De tal manera hace capaz la representación gráfica del coeficiente de Fanning en función de los distintos valores de Reynolds y ver cuál es su tendencia en la geometría de codo liso sin muelle insertado y compararla con la ecuación del coeficiente de Fanning para tubería lisa de sección circular, para apreciar cual es la importancia que tiene la caída de presión en el codo, la cual está producida por los flujos secundarios, giros en el flujo debidos a la introducción de un reactor de oscilación y los vórtices de Dean debidos a la curvatura de la tubería. En nuestro caso en estudio lo que se quiere hacer es obtener una curva de comparación para evaluarla con respecto a la curva del codo liso con muelle incorporado.

Esta extracción de variables o exportación de datos se ejecuta desde Fluent y se desarrolla por medio de la generación de un archivo en formato ASCII que permite obtener todos los archivos de manera secuencial, al ejecutar dicho archivo, llamado "journal" en Fluent, creando una serie de archivos de extensión ".dat", que

posteriormente serán utilizados para ser procesados por medio de otros programas, llamados Script, en Matlab R2013a.

En primer lugar aportamos el Anexo 2, en el que se presenta la configuración para obtener los archivos “.cas” y “.dat” de convergencia de los problemas para distintos Reynolds en un codo liso sin muelle insertado.

Además se ha hecho una copia del documento ASCII para la obtención de las variables de interés en la sección S1 y S2 y lo hemos recogido en el Anexo 4.

Finalmente se representa la gráfica que relaciona el coeficiente de Fanning con respecto a los distintos números de Reynolds para el codo liso sin muelle insertado, que permite confeccionar una gráfica compuesta por una curva de puntos rojos, la cual se compara con la curva del coeficiente fricción para una tubería con sección circular lisa, quedando una gráfica como la que se representa a continuación:

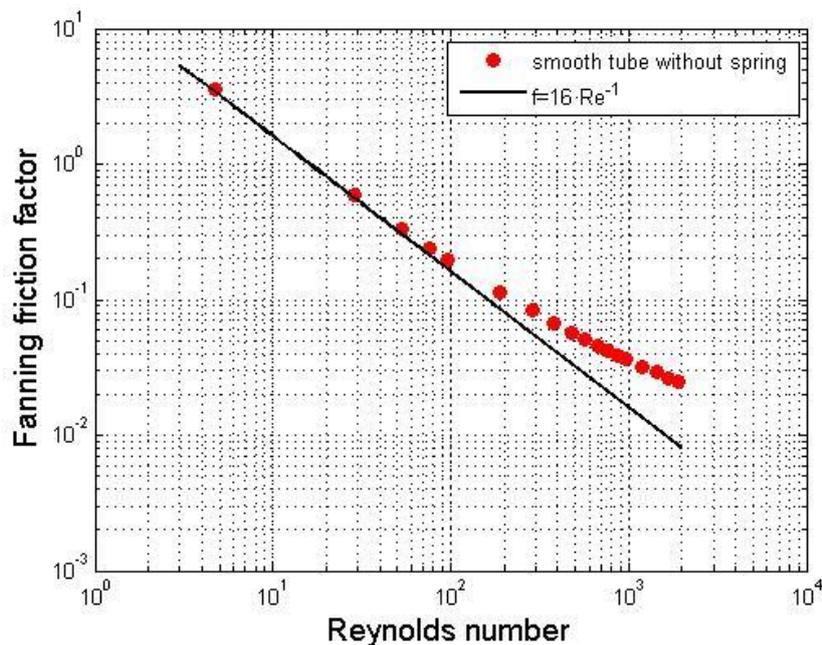


Figura 9.14. Representación del Coeficiente de Fanning en función del número de Reynolds para codo sin muelle insertado (rojo) y tubo liso de sección circular para régimen laminar (negro).

Capítulo 10: Estudio del factor de fricción en condiciones de flujo isoterma similares a las existentes en el codo con muelle integrado en un colector solar plano.

10.1. Geometría y mallado empleados

La geometría y el mallado utilizados son los que hemos definido en el capítulo 7.

10.2. Introducción a las simulaciones del factor de fricción

En este conjunto de simulaciones se va a analizar la caída de presión entre la entrada y la salida del codo que permite obtener el factor de fricción correspondiente al caso de un tubo con muelle integrado. Se obtendrá una representación gráfica del coeficiente de Fanning para el problema y se compararán los resultados de las simulaciones con la ecuación empírica del factor de fricción, correspondiente a una tubería de sección circular lisa.

Para ello, se simulan una serie de flujos isoterma con números de Reynolds comprendidos entre $Re=5$ y $Re=2000$, intervalo suficiente para evaluar el flujo de agua portador del calor en un colector solar.

Que aunque como se conoce que para una tubería lisa de sección circular, a partir de Reynolds 2000 se alcanzaría la turbulencia y obviamente en el caso de introducir un muelle en su interior la turbulencia se adelanta, pero no ha sido considerado en este proyecto porque es la primera vez que se estudia un codo con muelles insertados y no es el aspecto primordial a estudiar, pero si es cierto que en un futuro se tiene que ensayar teniendo en cuenta los modelos viscosos.

Por otro lado, se ha de comentar que en nuestro ensayo se emplea un fluido con un número de Prandtl de $Pr=7$; lo que significa que al ser el número de Prandtl mayor que la unidad el gradiente de temperaturas es mucho mayor en la pared de la tubería que el gradiente de velocidad, por lo que la capa límite térmica en la pared es menor que la capa límite de velocidad.

En el caso de un tubo sin elementos insertados, las regiones de flujo laminar, transitorio y turbulento se identifican claramente al representar el factor de fricción con respecto

al valor de Reynolds. Sin embargo al emplear elementos o reactores de oscilación del flujo, como es en este caso la integración del muelle, es más difícil apreciar el paso de régimen laminar a transitorio, y de transitorio a turbulento. Por lo tanto es posible que para el rango de flujo de estudio éste corresponda a un régimen de transición o transitorio.

Y para el desarrollo la simulación del codo con muelle insertado, se utiliza el Reynolds como parámetro para inicializar en cada caso la velocidad correspondiente a cada número de Reynolds. Y a cada uno de estos números de Reynolds se procede a calcular el caudal (m³/s) y el gasto másico (kg/s), que se encuentran en función de la sección transversal de paso del flujo, que será menor que el área de sección circular de mismo diámetro, por lo tanto aportará una velocidad axial un poco menor.

Los valores utilizados para la configuración de los distintos casos vienen dados por la Tabla 10.1:

Re	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Gasto (kg/s)
5	7,177205E-04	2,730667E-08	2,725751E-05
30	4,306323E-03	1,638400E-07	1,635451E-04
55	7,894925E-03	3,003733E-07	2,998327E-04
80	1,148353E-02	4,369067E-07	4,361202E-04
100	1,435441E-02	5,461333E-07	5,451503E-04
200	2,870882E-02	1,092267E-06	1,090301E-03
300	4,306323E-02	1,638400E-06	1,635451E-03
400	5,741764E-02	2,184533E-06	2,180601E-03
500	7,177205E-02	2,730667E-06	2,725751E-03
600	8,612646E-02	3,276800E-06	3,270902E-03
700	1,004809E-01	3,822933E-06	3,816052E-03
800	1,148353E-01	4,369067E-06	4,361202E-03
900	1,291897E-01	4,915200E-06	4,906352E-03
1000	1,435441E-01	5,461333E-06	5,451503E-03
1250	1,794301E-01	6,826666E-06	6,814378E-03
1500	2,153161E-01	8,192000E-06	8,177254E-03
1750	2,512022E-01	9,557333E-06	9,540130E-03
2000	2,870882E-01	1,092267E-05	1,090301E-02

Tabla 10.1. Condiciones de trabajo.

De donde la velocidad se obtiene a partir de la definición del número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \Rightarrow V = \frac{Re(1) \cdot \mu \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)}{\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot D(m)} = [m/s] \quad (10.1)$$

Por otro lado la obtención del caudal se obtiene por medio de:

$$Q = V(m/s) \cdot A(m^2) = [m^3/s] \quad (10.2)$$

Y finalmente para calcular el flujo másico o el gasto, será de la siguiente forma:

$$m = \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot Q(m^3/s) = \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot V(m/s) \cdot A(m^2) = [kg/s] \quad (10.3)$$

Cabe destacar que hemos preparado unos archivos con instrucciones previas para lanzar en un servidor, llamados “journals”, lo que permite simular de manera secuencial varios números de Reynolds en un mismo programa, empleando un ordenador con una mayor capacidad de proceso que un ordenador convencional, lo que permite obtener los resultados de manera más rápida. El código utilizado para el problema de presión o de fricción para codo liso con muelle insertado lo hemos incorporado en el Anexo 1.

10.3. Propiedades del fluido empleado

En este estudio se ha empleado el agua como fluido de trabajo a 20 °C, de manera que las propiedades físicas del agua son constantes y no cambian con la temperatura. Son las siguientes:

$$\rho = 998,2 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$\mu = 0,001003 \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$$

10.4. Algoritmo o solver empleado

Como ya se ha explicado en el capítulo 7, el proceso para la elección del algoritmo y solver adecuado para la resolución del problema; simplemente se presenta, el solver elegido para el problema de fricción para un número de Reynolds de 200:

```
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada.tre.paso7
0,02870882 (velocidad correspondiente para Re=200)
define/models/unsteady-2nd-order (1º elijo modelo no-estacionario)
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
```

- Número total de pasos de tiempo (20 por ejemplo)
- Número máximo de iteraciones por paso de tiempo

```
define/models/steady yes (2º elijo modelo estacionario)
solve/iterate 1000
```

Criterio de convergencia empleado:

```
/solve/monitors/residual/convergence-criteria
1e-4 -----Continuidad
1e-3-----Velocidad de X
1e-3 -----Velocidad de Y
1e-3 -----Velocidad de Z
```

Al final estas ecuaciones ofrecen una convergencia que se obtiene para la iteración 131 con la siguiente gráfica, ambas representadas en las figuras Figura 10.1 y Figura 10.2.

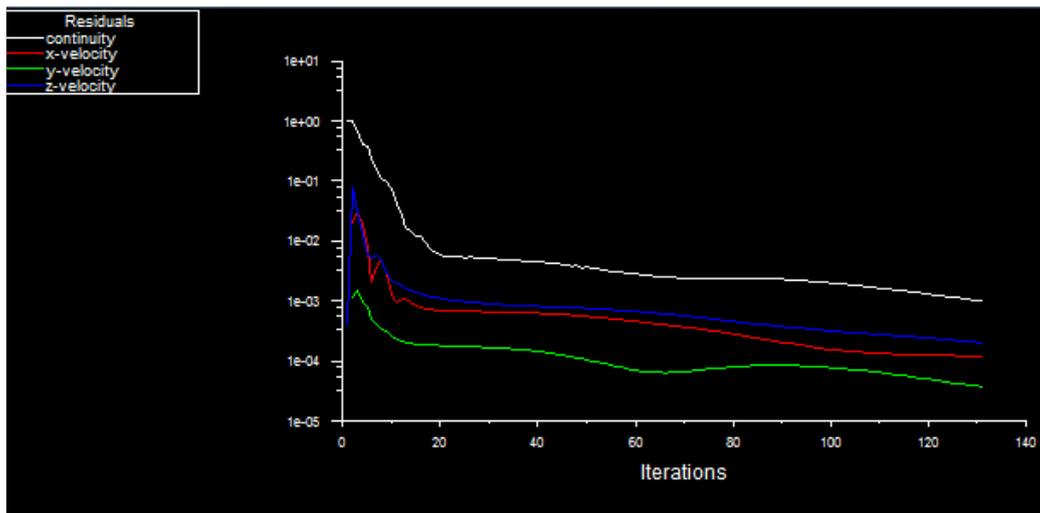


Figura 10.1. Gráfica de convergencia del problema presión de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo liso para $Re=200$.

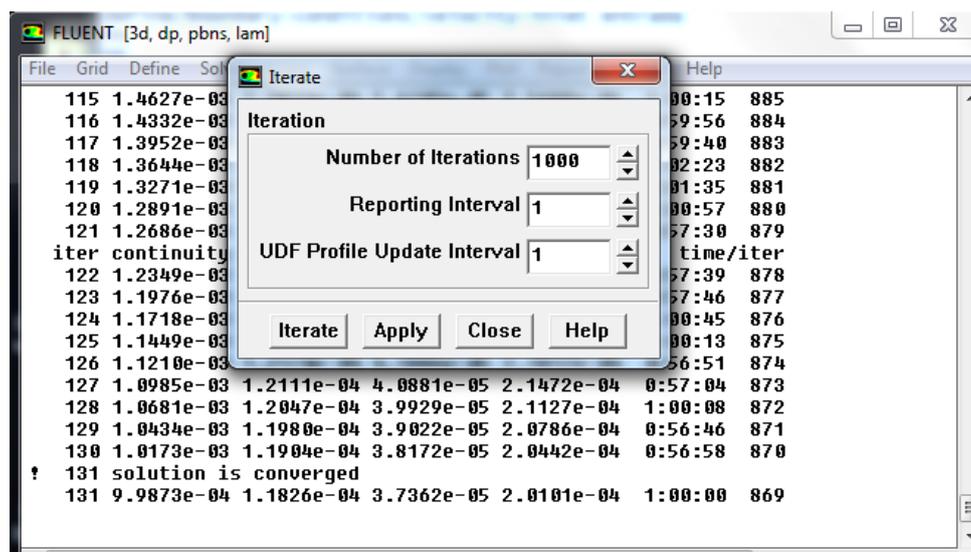


Figura 10.2. Número de iteraciones para alcanzar la convergencia del problema presión de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo liso para $Re=200$.

10.5. Ecuaciones de comparación

Los resultados procesados, han de ser compararlos con otros resultados o ecuaciones validadas, por medio de una representación gráfica.

En dicho caso, la representación gráfica que se obtenga del factor de fricción para nuestro diseño en función del Reynolds, se compara con la expresión:

- Ecuación de fricción para Reynolds en tubería lisa recta:

$$f_s = \left(\frac{16}{Re_D} \right) \quad (10.4)$$

10.6. Resultados del factor de fricción

A partir de los casos obtenidos del análisis del factor de fricción o presión, para el codo con muelle insertado se extraen ciertas variables del flujo sobre las superficies transversales de paso del flujo de entrada del codo, la cual se la denota como S1 y la sección trasversal de salida del flujo del codo, a la cual denominamos S2.

Las variables que se extraen de los casos analizados en Fluent o en el servidor, son las Presión estática, la velocidad en la dirección Z y los volúmenes de las celdas, para la identificación de las variables por celdas del mallado; dichas variables permiten evaluar la caída de presión que se produce en el codo, lo que permite calcular el coeficiente de Fanning o de fricción para cada uno de los valores de Reynolds ensayados. De tal manera posibilita poder obtener una representación gráfica del coeficiente de Fanning en función de los distintos valores de Reynolds y ver cuál es su tendencia en la geometría de codo liso con muelle insertado y compararla con la ecuación del coeficiente de Fanning para tubería lisa de sección circular, para apreciar cual es la importancia que tiene la caída de presión en el codo, la cual está producida por los flujos secundarios, giros en el flujo debidos a la introducción de un reactor de oscilación y los vórtices de Dean debidos a la curvatura de la tubería. Se quiere identificar si estos fenómenos son mayores que los del codo liso sin muelle integrado, que se analizarón en el apartado 9.6, en el capítulo 9 y relacionar el aumento de estos con una mayor transferencia del calor, debido al aumento de las fuerzas centrífugas por los flujos secundarios lo que permite una convección forzada más intensa.

Esta extracción de variables o exportación de datos se ejecuta desde Fluent y se ha desarrollado por medio de la generación de un archivo en el que se incluyen las propiedades a ejecutar en formato ASCII que permite obtener todos los archivos de manera secuencial, al ejecutar dicho archivo, llamado "journal" en Fluent, creando una

serie de archivos de extensión “.dat”, que posteriormente serán utilizados para ser procesados por medio de otros documentos, llamados Script en Matlab R2013a.

En primer lugar aportamos el Anexo 1, en el que se presenta la configuración para obtener los archivos .cas y .dat de convergencia de los problemas para distintos Reynolds en un codo con muelle insertado.

Además se ha presentado una copia del documento ASCII para la obtención de las variables de interés en la sección S1 y S2 y lo hemos recogido en el Anexo 3.

Sobre las gráficas a presentar, se visualiza una gráfica en la que aparezca la relación entre Reynolds y el coeficiente de Fanning; para la geometría del codo con muelle y se compara con la ecuación para tubería lisa de sección circular, cuya fórmula hemos aportado anteriormente; y cómo se aprecia el resultado es bastante adecuado.

Finalmente la gráfica que relaciona el coeficiente de Fanning con respecto a los distintos números de Reynolds para el codo con muelle insertado, permite confeccionar una curva formada por puntos azules, la cual se compara con la curva del coeficiente fricción para una tubería con sección circular lisa, quedando una gráfica como la que se representa a continuación:

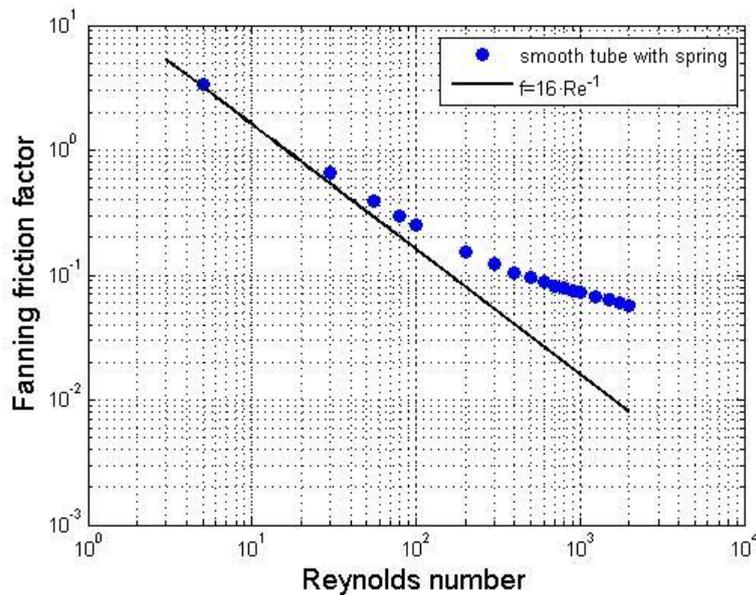


Figura 10.3. Representación del Coeficiente de Fanning en función del número de Reynolds para codo con muelle insertado (azul) y tubería lisa de sección circular para régimen de flujo laminar (negro).

10.7. Resultados del factor de fricción de codo liso sin muelle y comparación con codo liso con muelle insertado.

En este apartado lo que se pretende es comparar en el problema de presión, las diferencias o ventajas que existen en la implementación de un muelle en el diseño del codo o la utilización de una tubería sin la introducción del muelle.

Se plantean dos tipos de resultados del caso de Fricción, en el que se aunan las soluciones para codo con muelle insertado y codo liso:

- Representaciones del coeficiente de Fanning con respecto a los valores del número de Reynolds, para codo con muelle y codo liso, interpretando los resultados obtenidos.
- Capturas de pantalla para representar las distribuciones de velocidad adimensional sobre superficies transversales de paso del flujo en la geometría del codo; tanto para codo con muelle como codo liso.

10.7.1. Representación de coeficiente de Fanning con respecto a los valores del número de Reynolds, para codo con muelle y liso.

Por un lado, se pueden representar en una misma gráfica, las curvas del coeficiente de Fanning en función de los distintos valores de Reynolds para el codo con muelle insertado, para el codo sin muelle insertado y la referencia de la tubería lisa con sección circular.

Por lo que queda una representación gráfica como la que se puede apreciar en la Figura 10.15:

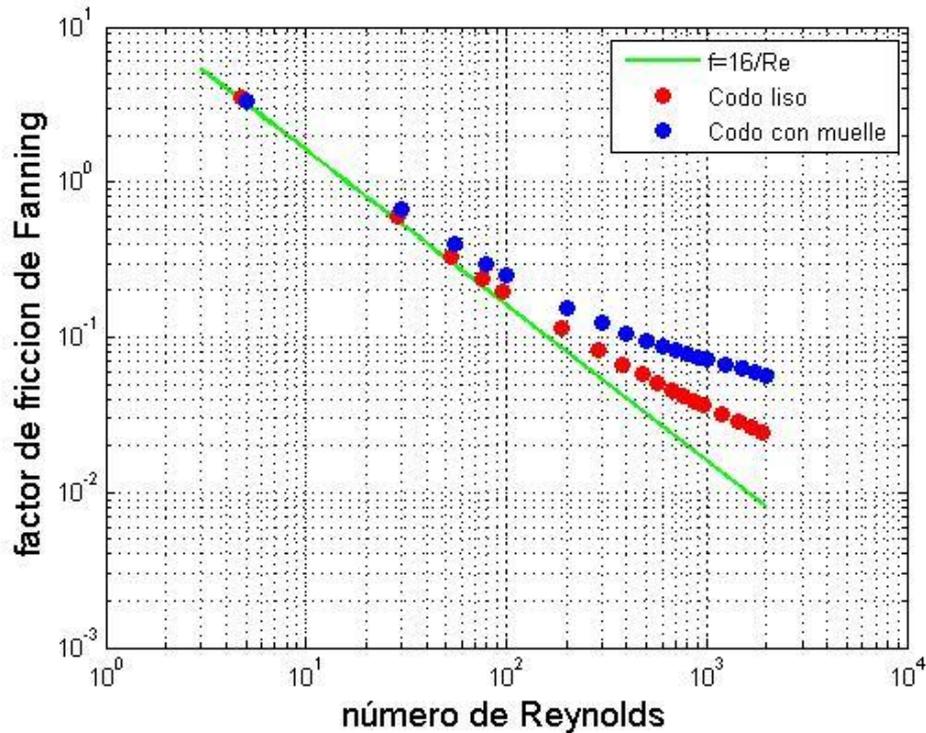


Figura 10.4. Representación del Coeficiente de Fanning en función del número de Reynolds para codo con muelle insertado (azul), codo sin muelle insertado (rojo) y codo liso de sección circular (verde).

De esta representación gráfica se pueden sacar las siguientes conclusiones con respecto al codo liso sin muelle insertado y del codo que presenta un muelle helicoidal insertado como reactor oscilatorio. Por lo que se presentan estas por separado a continuación:

Codo liso sin muelle insertado:

1. Apreciamos que para $Re < 200$, el factor de fricción es prácticamente idéntico al valor para tubo liso. Podríamos decir que con estos valores tan bajos de Re , el flujo no se ve afectado por el cambio de dirección que proporciona el codo y por tanto por las fuerzas centrífugas: es un flujo dominado por fuerzas viscosas, en las que no aparecen flujos secundarios (vórtices de Dean) o estos son de muy baja intensidad. Como se puede apreciar en las capturas del patrón de flujo del apartado 10.7.2; se aprecian para el rango definido unos vórtices de Dean con una única recirculación. Se puede considerar flujo laminar.

2. De hecho, sólo se observa que los puntos se alejan claramente de la curva de tubo liso ($f=16/Re$) para $Re>200$. Esto es interesante, porque coincide con el cambio de tendencia que se observará en el problema de transferencia de calor.

Parece que existe la aparición de algún fenómeno fluidomecánico a partir de $Re=200$ que aumenta la caída de presión en el codo y también la transferencia de calor. Este fenómeno debe de tener que ver con los vórtices de Dean.

3. Para $Re>200$ la curva deja de ser proporcional a Re^{-1} , como lo hace en la ecuación del codo liso y dicho coeficiente cambia. Se parece al comportamiento de un flujo turbulento. Como se puede apreciar en las capturas del patrón de flujo del apartado 10.7.2; se aprecian para el rango de $Re>200$, unos vórtices de Dean con más de una recirculación, que lo que producen es una mayor separación del flujo y mezcla de las partículas fluidas del grueso del fluido con las partículas de la capa límite. Este fenómeno se va incrementando y por ello va aumentando la transferencia del calor. A partir de $Re>800$, en función de los vectores de flujo obtenidos, se puede considerar un flujo turbulento; para los valores $200<Re<800$, puede ser considerado flujo en transición.

Codo con muelle:

1. Para $Re=5$ prácticamente la solución coincide con tubo liso: ni hay efecto del codo ni del muelle. Se trata de un flujo dominado por las fuerzas viscosas, sin separación de flujo y previsiblemente sin aparición de flujos secundarios (ni giros del flujo producidos por la geometría del muelle, denominados como "Swirl" o los vórtices de Dean)

2. Para $Re=30$ ya se observa que la tendencia se separa de $f=16/Re_D$. Se generan flujos secundarios, separaciones, etc; que aumentan la caída de presión. Estos valores siempre están por encima de los que se detectan con codo liso, lo que será indicativo que esa mayor caída de presión que se produce entre la entrada y salida del codo es debido a la intensificación de los flujos secundarios con la utilización del muelle, que puede proporcionar una mayor transferencia del calor, lo cual comprobaremos en el capítulo 12.

10.7.2. Representación del patrón del flujo de las distribuciones de velocidad adimensional en las secciones transversales de paso del flujo para codo con muelle y liso.

Por otro lado, se llevan a cabo la visualización de capturas de pantalla de distribuciones de velocidad adimensional de secciones transversales de paso de flujo, tanto para codo con muelle o codo liso. En el caso de codo con muelle insertado se representan las superficies transversales de entrada al codo, denotada tal superficie como S1 y la sección del codo que forma 90° con respecto con la entrada al codo, denotada como M90 y mientras que para el codo liso sin muelle insertado, se representan las mismas superficies transversales respectivamente; la superficie transversal de entrada al codo, S1 y la superficie transversal que forma 90° con respecto a la entrada del codo.

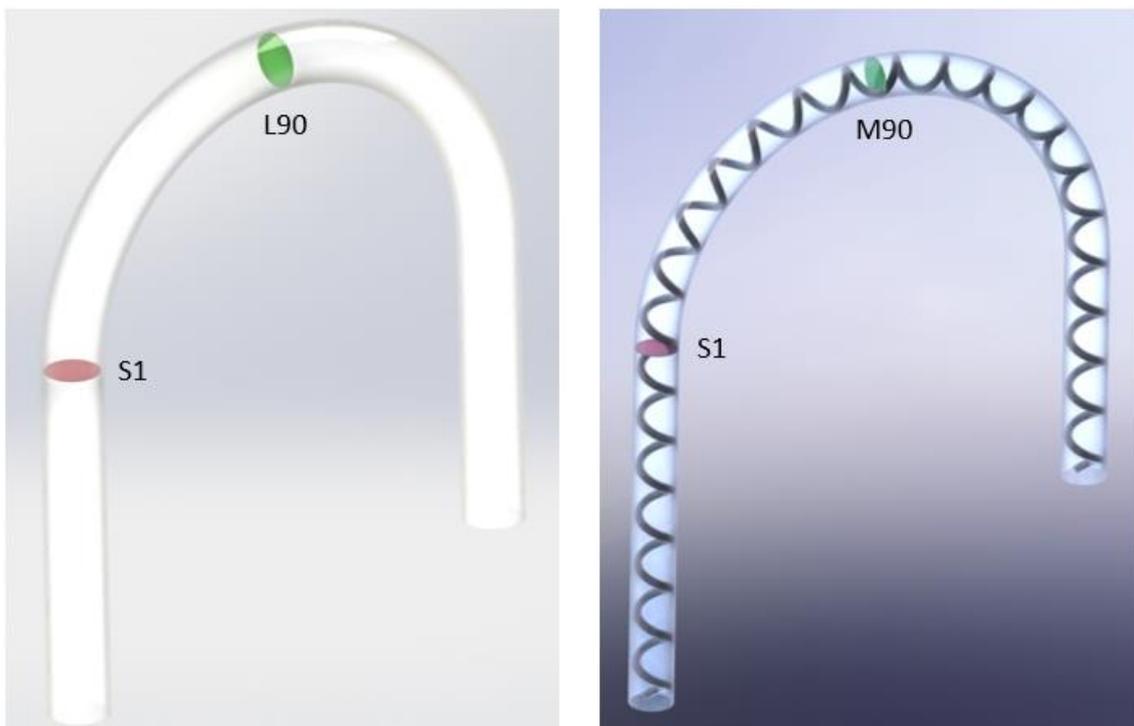


Figura 10.5. Representación de las secciones transversales a representar del codo liso y del codo con muelle insertado, sobre sus distribuciones de velocidad.

Se pretende apreciar los distintos efectos que ocurren en el codo con la integración de un reactor oscilatorio.

En estas imágenes se puede apreciar una distribución de velocidades adimensional en las distintas superficies para los diferentes valores de Reynolds; donde:

$$V_{adimensional} = \frac{V_{magnitudo}}{V_{entrada-tubo}} \quad (10.5)$$

Lo que se pretende reflejar con estas visualizaciones, no es la velocidad que lleva el flujo sino conocer que magnitud de velocidad corresponde a flujos secundarios, los cuales fomentarán la mejora de la transmisión del calor. Como ya se sabe que:

$$V_{magnitudo} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (10.6)$$

Y como se conoce que el flujo entra en nuestro caso con dirección Z; donde:

$$V_{axial} = V_z \quad (10.7)$$

Por lo tanto como se ha comentado antes, el flujo secundario resulta ser:

$$Flujo_{secundario} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (10.8)$$

Además a cada una de las representaciones tendrá asociado su número de Dean, el cual es un número adimensional que tiene importancia en el estudio de flujos para tubos curvados o en canales, al ser un fenómeno que ocurre en dichas configuraciones. Teniendo en cuenta que nuestra geometría tiene un diámetro de tubería acodada de 7 milímetros y un radio de codo de 45 milímetros, lo que permite obtener la siguiente expresión del número de Dean.

$$\begin{aligned}
 De &= \frac{\sqrt{(Fzas\ centripetas) \cdot (Fzas\ Inercia)}}{Fzas\ viscosas} & (10.9) \\
 &= 4 \sqrt{\frac{\left(\rho \cdot \frac{R}{D} \cdot \frac{V^2}{(R/D)^2}\right) \cdot (\rho \cdot V^2)}{\mu \cdot \frac{V}{D}}} = \sqrt{\frac{D}{2 \cdot R} \cdot \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}} \\
 &= \sqrt{\frac{D}{2 \cdot R}} Re = \sqrt{\frac{7}{2.45}} \cdot Re = 0.279 \cdot Re
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el número de Dean para nuestro caso, queda en función de los números de Reynolds que se han analizado en nuestro estudio.

$$De = 0.279 \cdot Re \quad (10.10)$$

Re	De
5	1,4
30	8,4
55	15,3
80	22,3
100	27,9
200	55,8
300	83,7
400	111,6
500	139,4
600	167,3
700	195,2
800	223,1
900	251,0
1000	278,9
1250	348,6
1500	418,3
1750	488,1
2000	557,8

Tabla 10.2. Valores del número de Dean en función del número de Reynolds.

Como se puede apreciar en las siguientes representaciones por separado:

- Para la sección "S1" en codo liso, los vectores se visualizan como unos puntos y esto es debido a que en el plano XY aparecen unos vectores en dirección Z, debido que el flujo tiene únicamente componente axial en la dirección Z, en donde el flujo no ha sufrido oscilación aún.
- Por otro lado para "L90" en codo liso, es una sección en la que se aprecia la aparición de los vórtices de Dean, los cuales crecen con el aumento del número de Reynolds y que la sección central de máxima velocidad se ve reducida, además de que se produce un desplazamiento de la misma hacia la pared de la tubería según la dirección que marca para la sección los vórtices de Dean, los cuales son los responsables de tal efecto.
- Para la sección "S1" en codo con muelle, se puede apreciar como aparece un Swirl en el flujo debido a los flujos secundarios inducidos por la introducción de un muelle en la tubería recta, que hace que antes de llegar al codo, exista el fenómeno del giro.
- De igual modo, para la sección "M90", sigue estando presente el giro del flujo en la sección transversal pero en este caso más acentuada y donde se aprecia que la sección central de máxima velocidad se ve reducida.

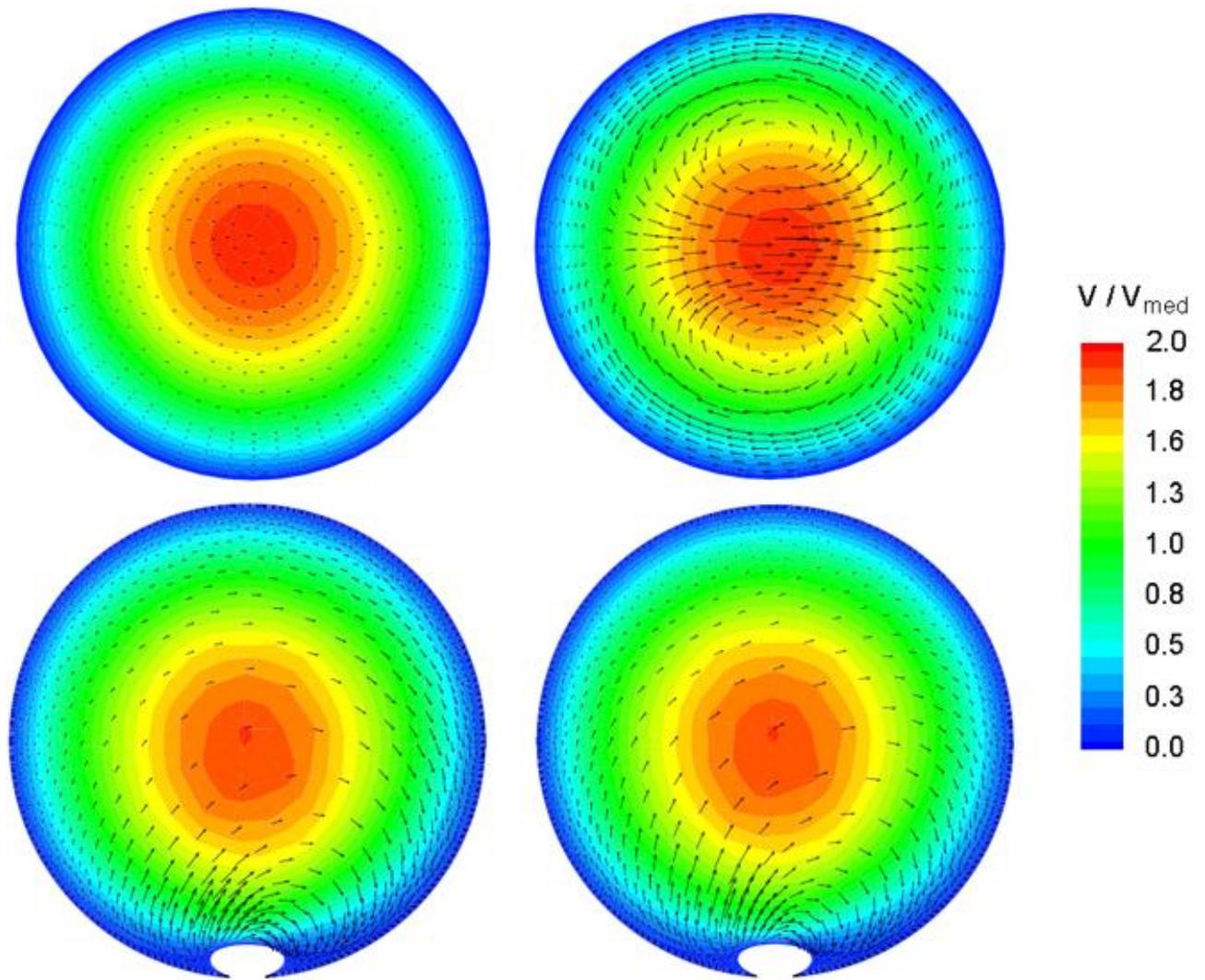


Figura 10.6. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=30$; $De=8,4$

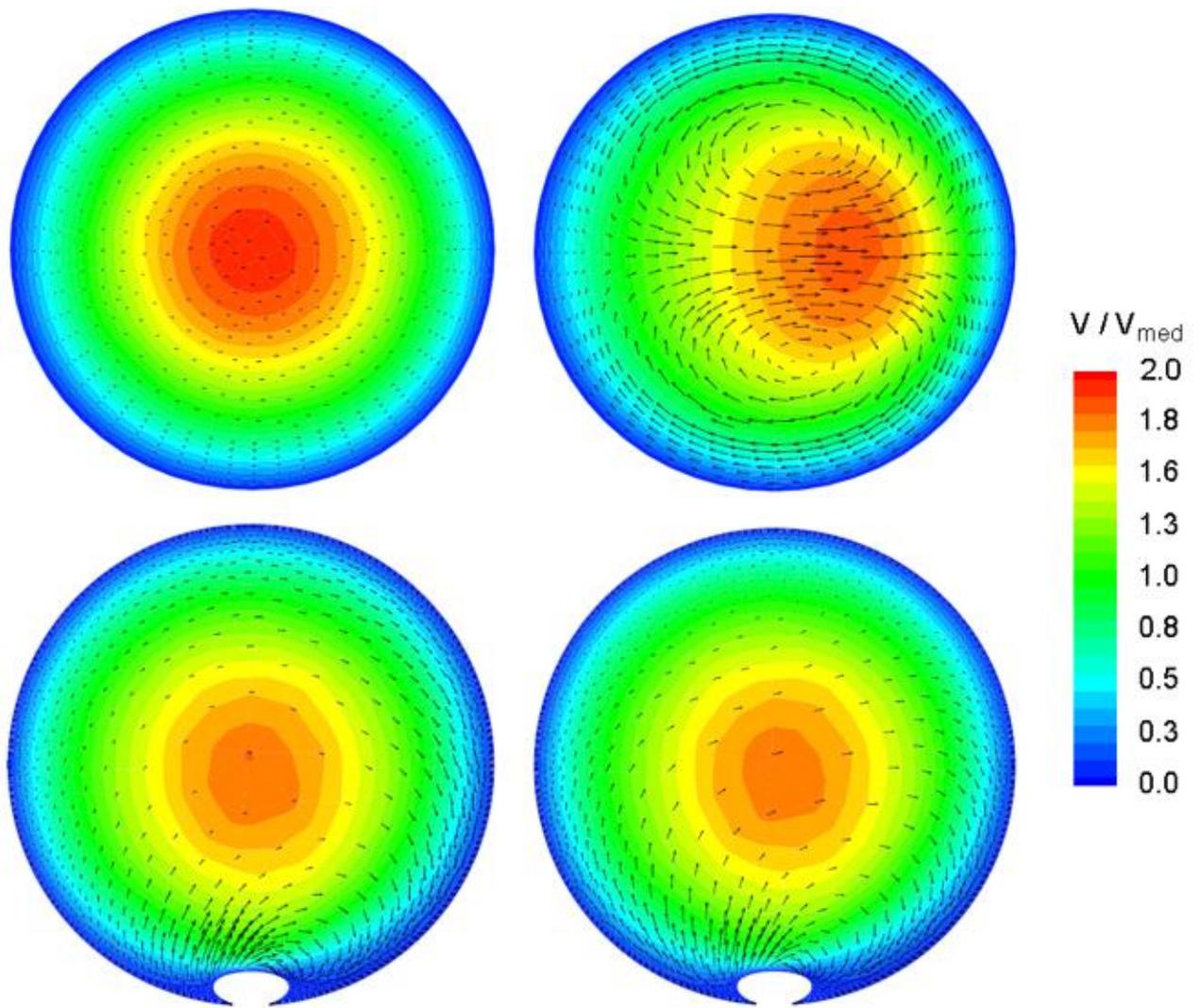


Figura 10.7. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=100$; $De= 27,9$

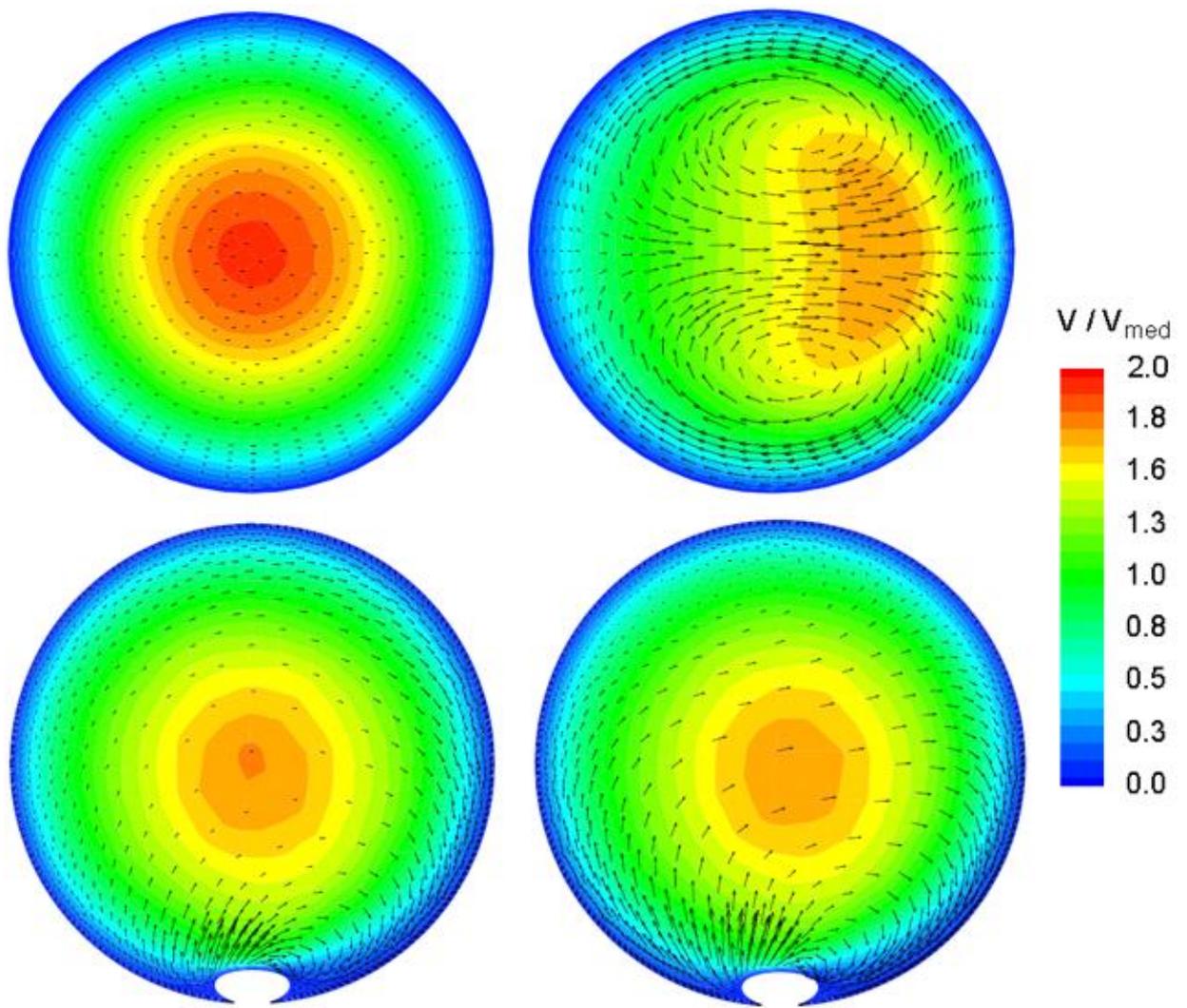


Figura 10.8. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=200$; $De= 55,8$

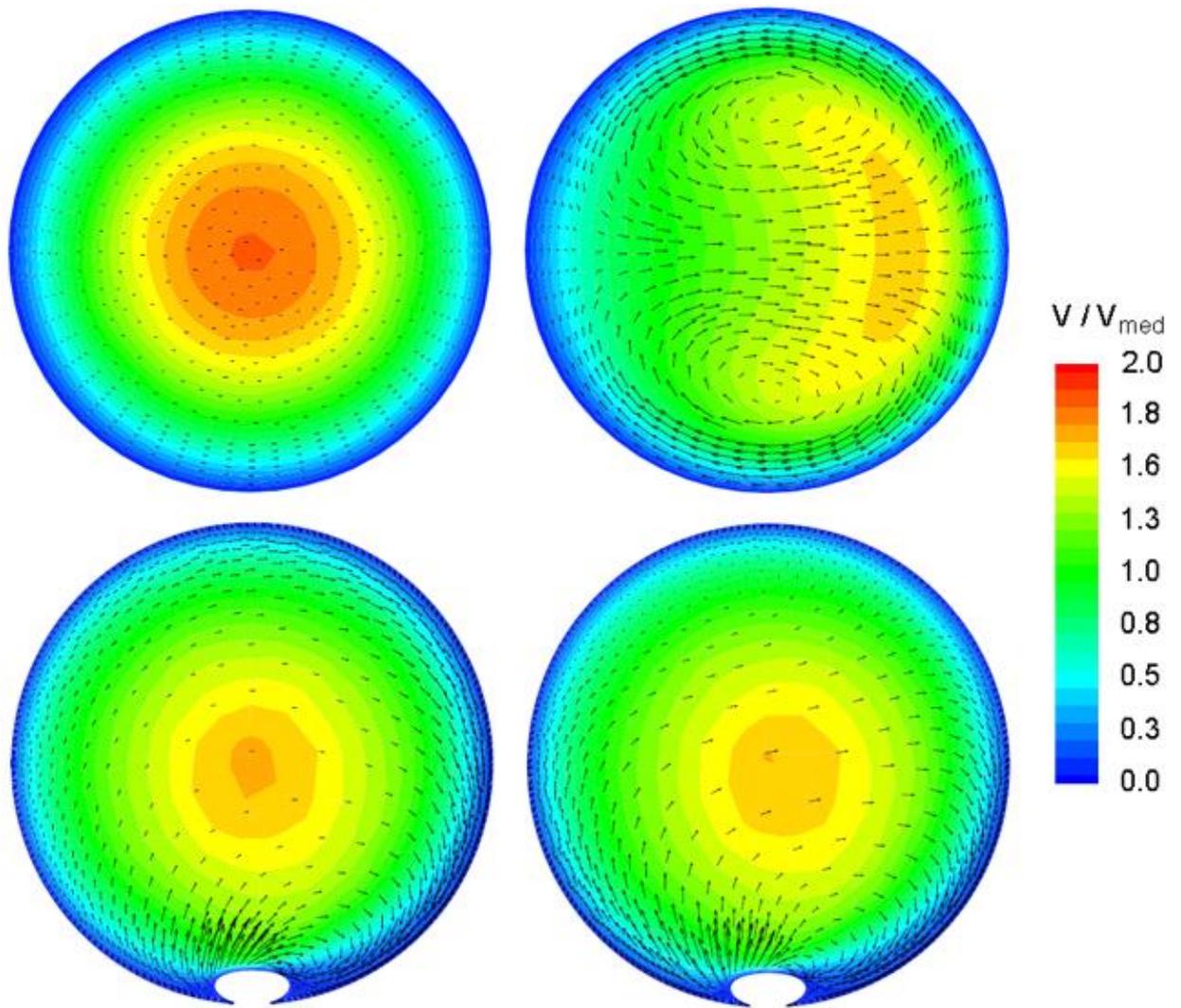


Figura 10.9. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=400$; $De= 111,6$

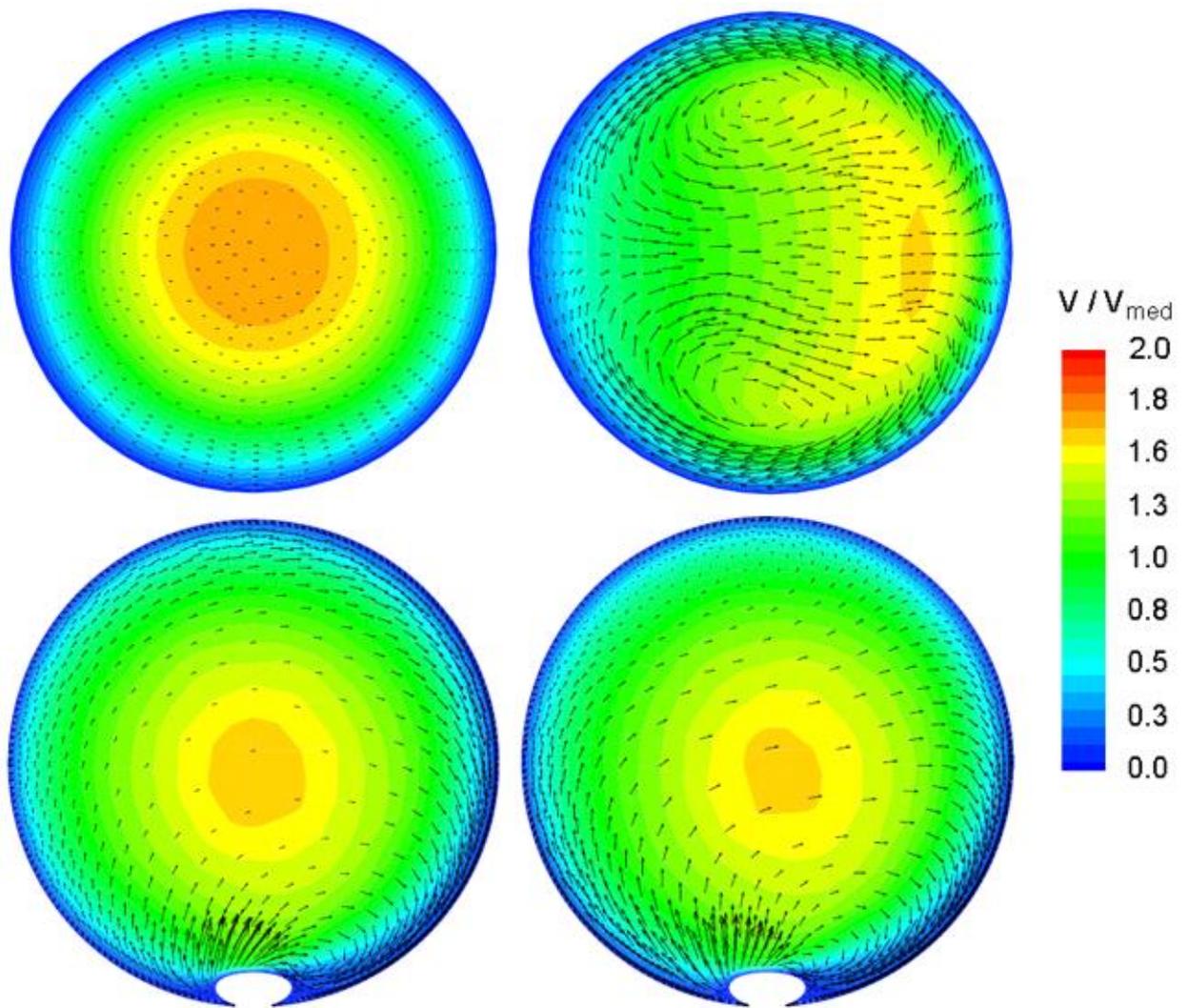


Figura 10.10. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=600$; $De= 167,3$

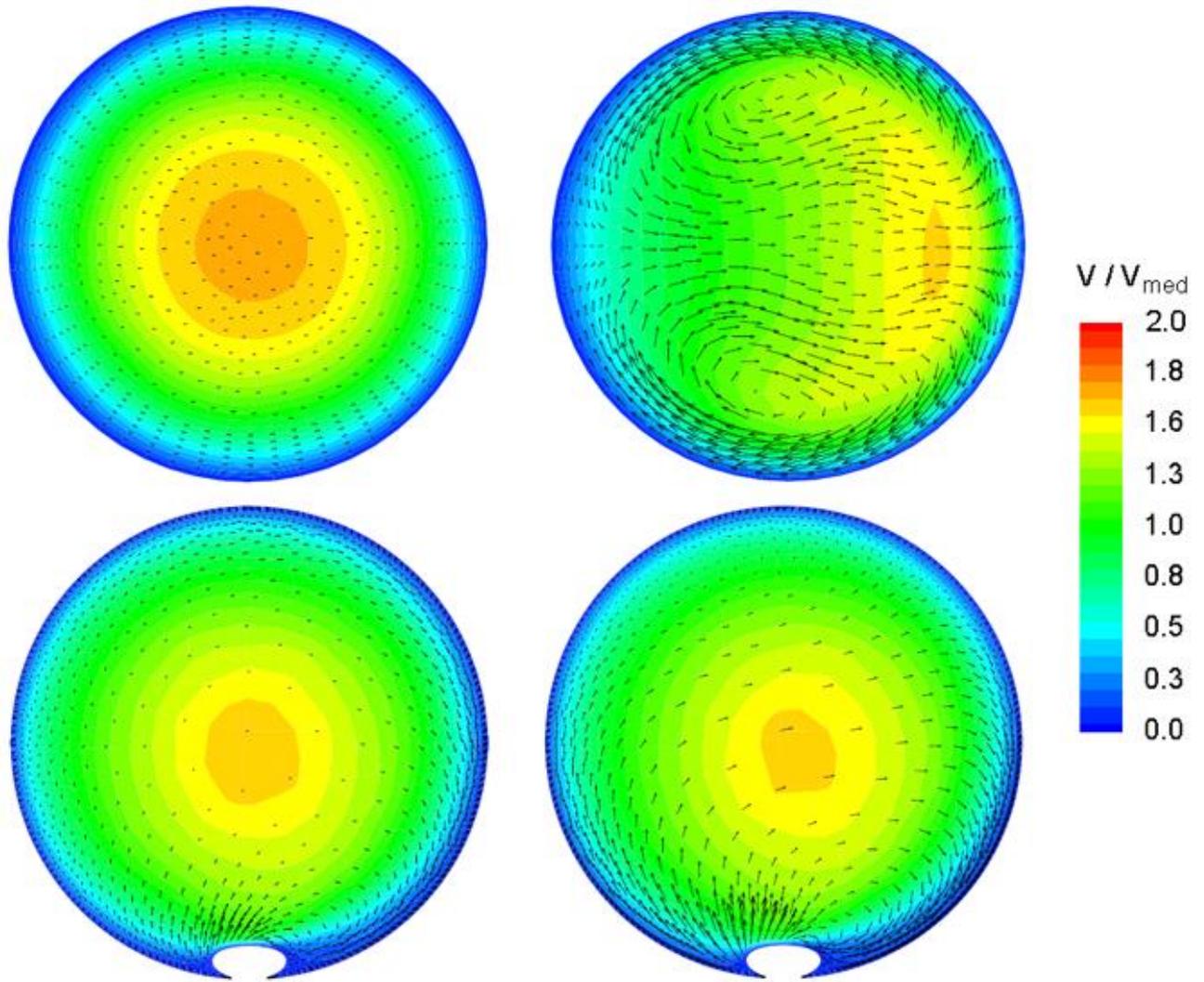


Figura 10.11. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=700$; $De= 195,2$

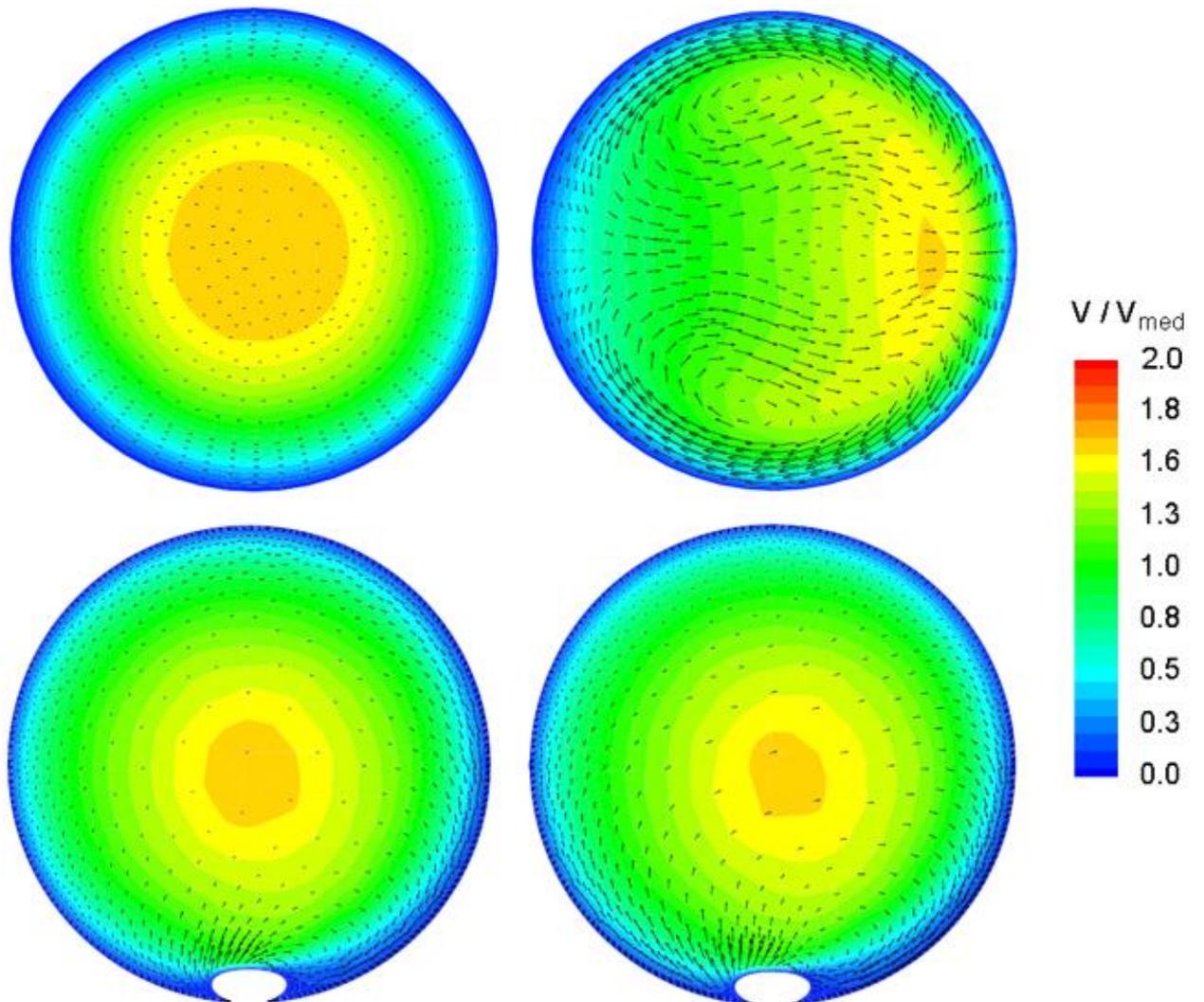


Figura 10.12. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=800$; $De= 223,1$

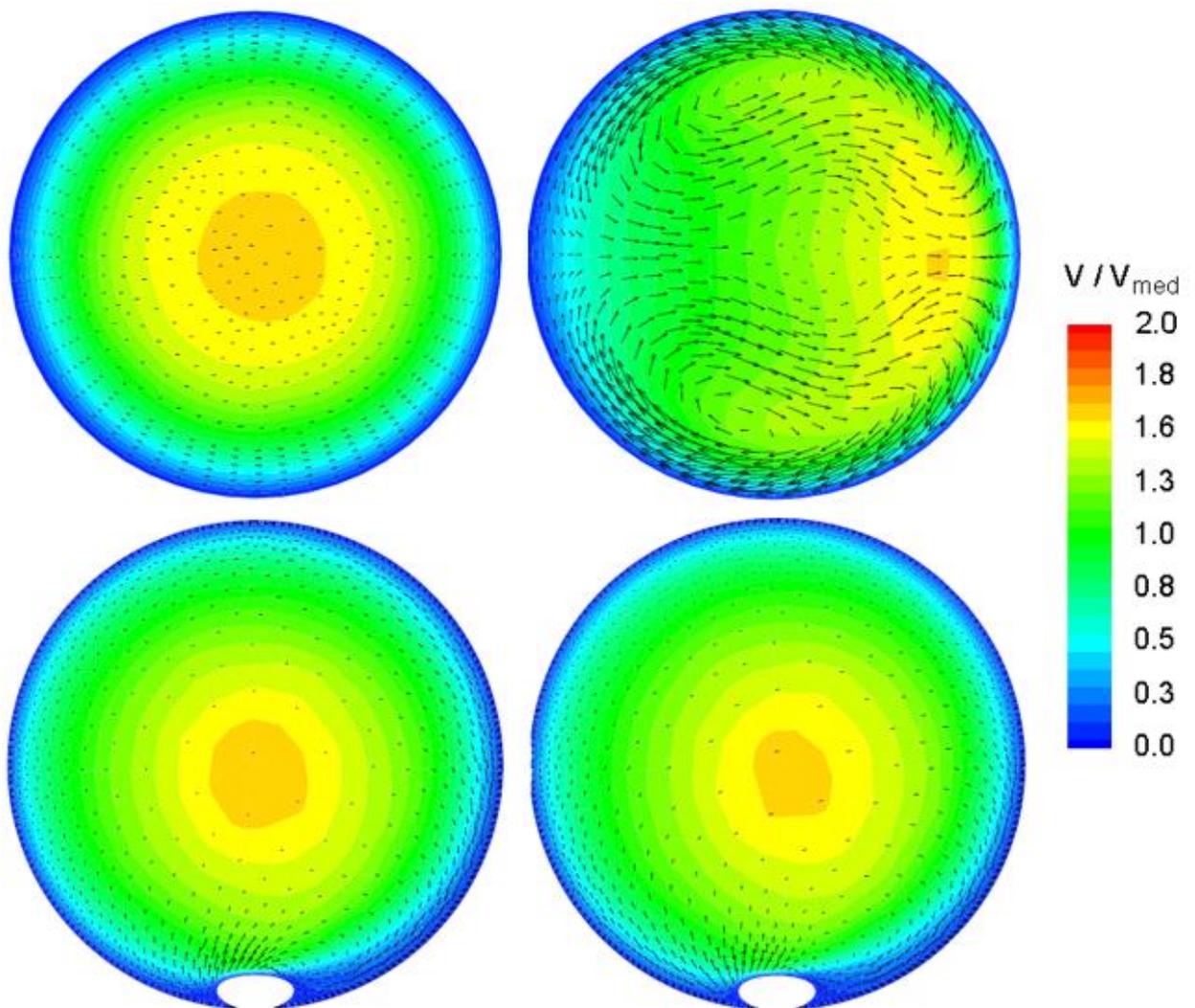


Figura 10.13. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=1000$; $De= 278,9$

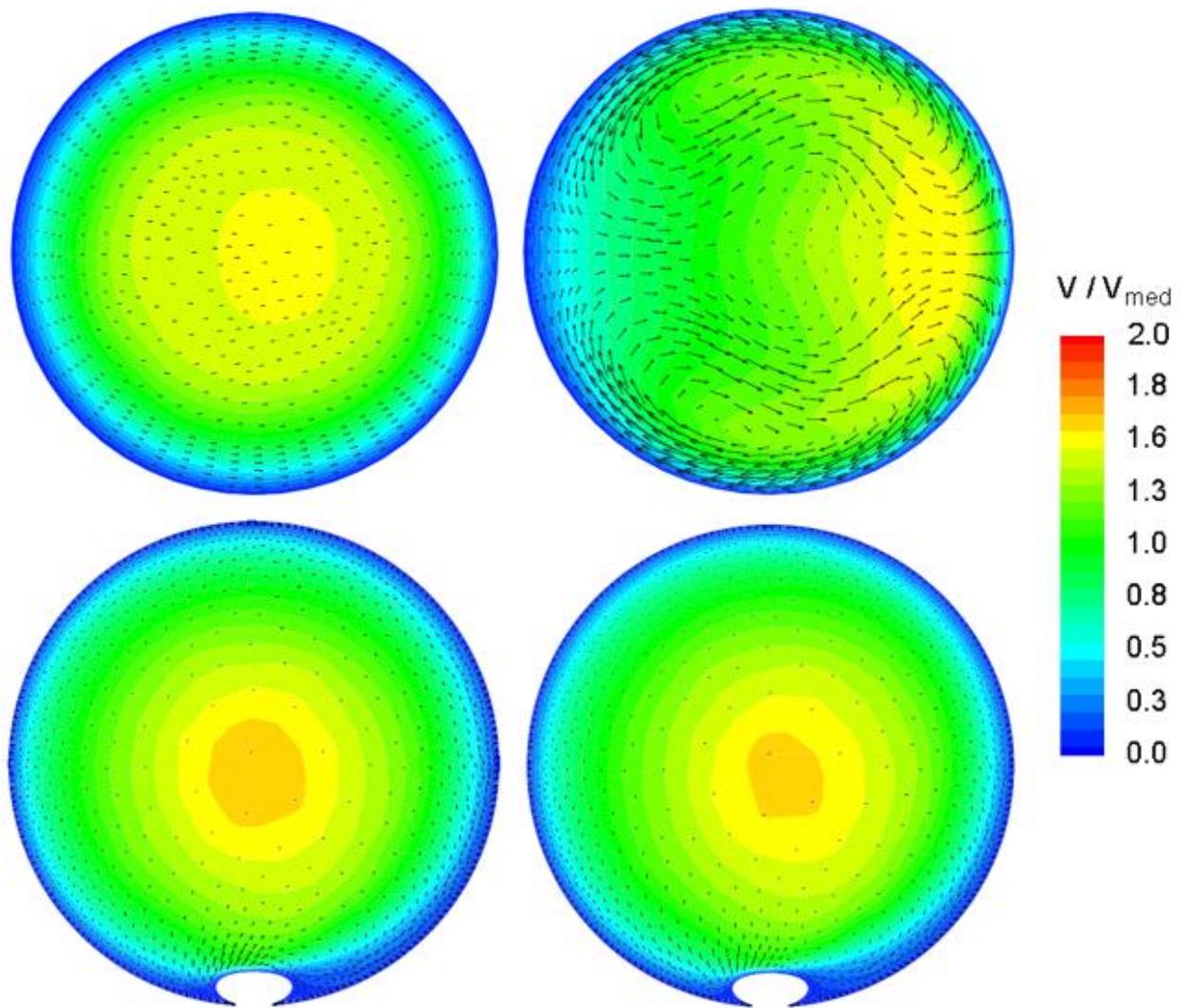


Figura 10.14. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=1500$; $De= 418,3$

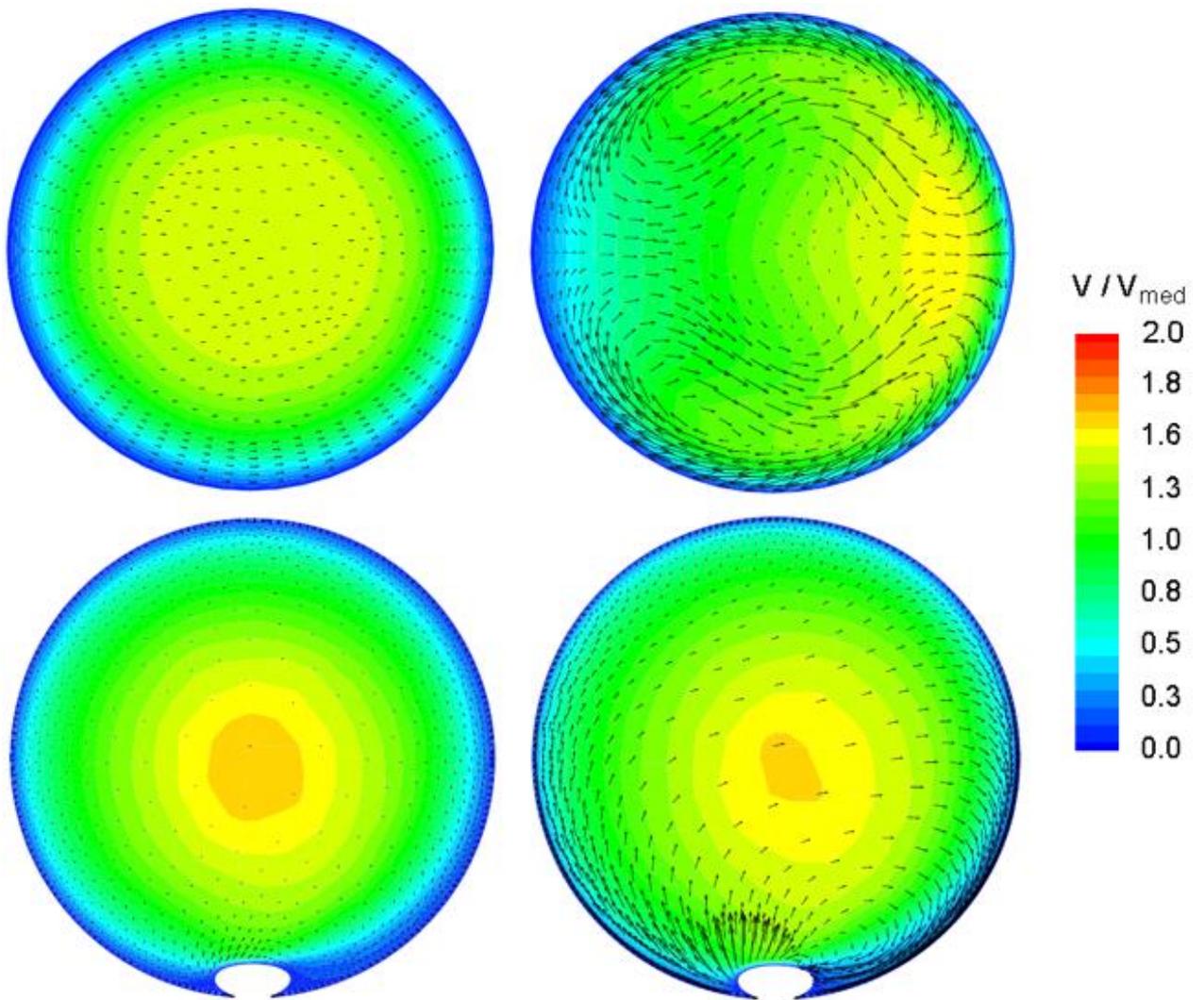


Figura 10.15. Distribución de velocidad adimensional representando el flujo secundario en tubo liso y tubo con muelle insertado. Fila superior: Codo liso: Izquierda (S1). Derecha (L90). Fila inferior: Codo con muelle: Izquierda (S1); Derecha (M90). Para $Re=2000$; $De= 557,8$

Capítulo 11: Análisis del número adimensional de Nusselt en función distintos números de Reynolds, para un valor de transferencia de calor de 30.000W/m^2 sobre la pared del codo sin muelle integrado.

11.1. Geometría y mallado empleados

La geometría que se utiliza para el codo liso sin muelle insertado queda definida en el apartado 9.1, del capítulo 9.

11.2. Introducción a las simulaciones de transferencia del calor

Con respecto a la simulación del caso de transferencia de calor para el codo sin muelle insertado, llamados “journals”, se parte de la “Introducción a las simulaciones del factor de fricción para codo sin muelle insertado” descrita en el punto 9.2 del capítulo 9; ya que en la simulación de transferencia del calor, la única diferencia con respecto al caso de presión o de fricción, consiste en añadir en las condiciones de contorno el flujo de calor sobre las paredes que rodean al flujo, que permitan simular el flujo de calor que recibe la tubería por la radiación solar. Y la diferencia entre el codo con muelle insertado y este caso, es que el primero está constituido por una mayor cantidad de paredes, mientras que el segundo son únicamente 4 paredes; la pared del tramo recto de entrada, las dos paredes que conforman el codo y la pared del tramo recto de salida, lo que implica en este último caso un menor tiempo de convergencia.

Cabe destacar que se han preparado unos archivos con instrucciones previas para lanzar en un servidor, lo que permite simular de manera secuencial varios números de Reynolds en un mismo programa, empleando un ordenador con una mayor capacidad de proceso que un ordenador convencional, lo que permite obtener los archivos o resultados de manera más rápida.

11.3. Propiedades del fluido empleado

Las propiedades del fluido quedan definidas en el punto 9.3 del capítulo 9, para un codo liso.

11.4. Algoritmo o solver empleado

En lo que se refiere al algoritmo empleado para la resolución del problema de transferencia del calor en un codo liso sin muelle insertado, se podrá utilizar el mismo solver e incluso el mismo código de los journals, modificando únicamente los nombres de las superficies de entrada, paredes, etc. En este caso se ha resuelto el problema de transferencia del calor para la geometría de codo liso sin muelle insertado para Reynolds 200.

Al final, estas ecuaciones ofrecen una convergencia del problema de calor, la cual se alcanza en la iteración 398. En las siguientes imágenes se puede apreciar la monitorización de la convergencia, para el problema de calor en codo liso; en la Figura 11.1 y el número de iteraciones que necesita para alcanzar la convergencia en la Figura 11.2.

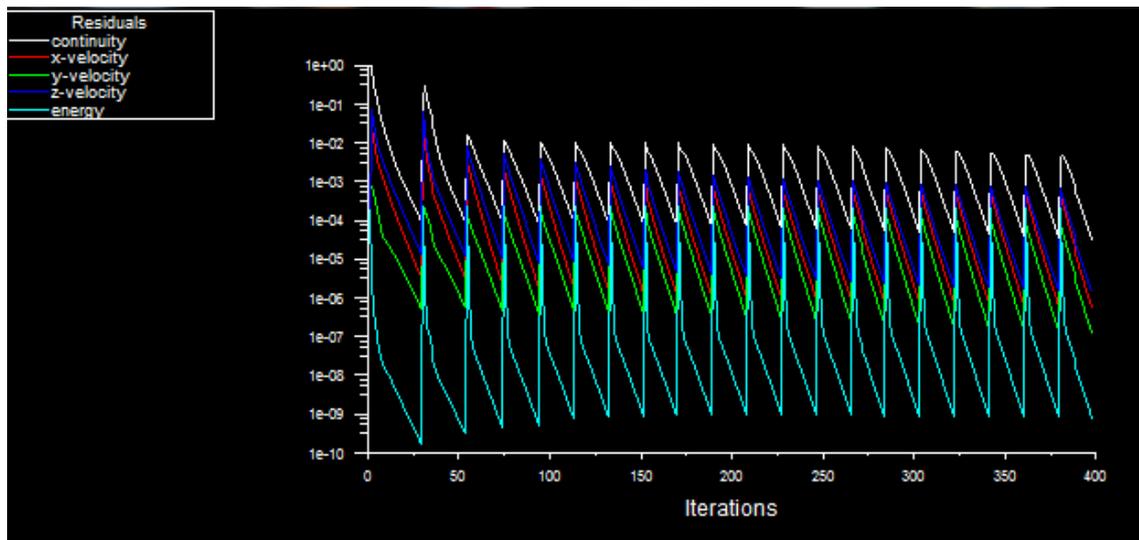


Figura 11.1. Gráfica de convergencia del problema transferencia. calor de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo liso para $Re=200$.

```

383 3.3818e-03 1.4167e-04 2.5263e-05 2.2025e-04 1.2595e-07 0:01:28 36
384 2.5347e-03 9.5419e-05 1.7347e-05 1.5395e-04 9.0218e-08 0:01:29 35
385 1.9400e-03 6.4700e-05 1.2001e-05 1.0816e-04 6.4930e-08 0:01:23 34
386 1.4479e-03 4.4059e-05 8.3469e-06 7.6371e-05 4.6698e-08 0:01:18 33
387 1.0708e-03 3.0127e-05 5.8279e-06 5.4151e-05 3.3478e-08 0:01:19 32
388 7.8583e-04 2.0690e-05 4.0819e-06 3.8546e-05 2.3988e-08 0:01:20 31
389 5.7585e-04 1.4263e-05 2.8654e-06 2.7530e-05 1.7158e-08 0:01:14 30
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy time/iter
390 4.2136e-04 9.8662e-06 2.0146e-06 1.9718e-05 1.2339e-08 0:01:15 29
391 3.1414e-04 6.8470e-06 1.4174e-06 1.4156e-05 8.6725e-09 0:01:09 28
392 2.2591e-04 4.7700e-06 1.0003e-06 1.0194e-05 6.2051e-09 0:01:09 27
393 1.6408e-04 3.3391e-06 7.0682e-07 7.3767e-06 4.4592e-09 0:01:04 26
394 1.2091e-04 2.3363e-06 4.9960e-07 5.3313e-06 3.1511e-09 0:00:59 25
395 8.8159e-05 1.6395e-06 3.5390e-07 3.8619e-06 2.2471e-09 0:01:00 24
396 6.4093e-05 1.1526e-06 2.5109e-07 2.7984e-06 1.6021e-09 0:00:55 23
397 4.6565e-05 8.1160e-07 1.7843e-07 2.0307e-06 1.1448e-09 0:00:55 22
! 398 solution is converged
398 3.3844e-05 5.7280e-07 1.2707e-07 1.4755e-06 8.2020e-10 0:00:51 21
Flow time = 1, time step = 20

```

Figura 11.2. Número de iteraciones para alcanzar convergencia del problema transferencia calor de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo liso para $Re=200$.

11.5. Resultados del número de Nusselt de codo liso sin muelle.

A partir de los casos obtenidos del análisis de transferencia del calor, para el codo sin muelle insertado se extraen ciertas variables del flujo sobre los tramos de flujo (default-interior) y de pared (Wall) que permiten evaluar ciertos parámetros de interés para la transferencia del calor, como son la representación de las curvas del número adimensional de Nusselt en los tramos rectos de entrada y salida y en el codo, haciendo hincapié en el último caso, ya que es la motivación principal de este proyecto. Además será interesante poder representar el incremento de temperaturas que se efectúa en el codo y el gradiente de temperaturas entre la pared y el fluido, además de otras representaciones.

En este caso se extrae, para los contornos fluidos las variables de densidad del fluido, velocidad en la dirección de Z (teniendo en cuenta en el codo también la velocidad en la dirección de X, debido a la aparición de los flujos secundarios), la temperatura estática y las celdas de volumen. Por otro lado, para los tramos de pared se extraen las variables de temperatura estática y las celdas de volumen correspondientes.

Esta extracción de variables o exportación de datos se ejecuta desde Fluent y se ha desarrollado, por medio de la generación de un archivo en el que se incluyen las

propiedades a ejecutar en formato ASCII, lo que permite obtener todos los archivos de manera secuencial, al ejecutar este archivo, llamado "journal" en Fluent, creando una serie de archivos de extensión ".dat", que posteriormente serán utilizados para ser procesados por medio de otros documentos llamados Script en Matlab. Debido a que en el caso de codo liso sin codo integrado en la geometría, existen menos paredes y contornos de volumen fluido, el tiempo de extracción y generación de estos archivos es menor.

11.5.1. Representación del gradiente de temperatura de la pared del codo y el fluido

Como se puede apreciar en la Figura 12.3, la temperatura del fluido va aumentando al circular a lo largo del serpentín, al producirse la transferencia del calor entre el fluido y el tubo. Mientras que la temperatura en las paredes de tubo, que es el medio encargado de transferir el calor de las placas al fluido, aumenta también en los tramos rectos de entrada y salida del codo, debido a que el fluido también tienen una temperatura mayor, pero es en los codos donde se pueden apreciar unas caídas bruscas en la temperatura, aproximándose la temperatura en la pared del tubo a la del fluido en ese punto, lo que ocasiona que se disparen en esa zona los valores de Nusselt, como se ocurre en el punto 11.5.2, en el que se explica cómo aumenta el Nusselt instantáneo evaluado en función del ángulo de la sección transversal de paso del flujo en el codo. Como ya se conoce, la definición del número de Nusselt, viene dada por:

$$Nu = \frac{q''}{T_{pared} - T_{fluido}} \cdot \frac{d}{k} \quad (11.1)$$

Donde el T_{pared} y T_{fluido} , corresponden a la temperatura local media de la pared y de temperatura media ponderada de una sección local del tubo respectivamente, además al tratarse de flujo laminar, las propiedades físicas del fluido en el problema de transferencia de calor presenta una fuerte dependencia de la temperatura.

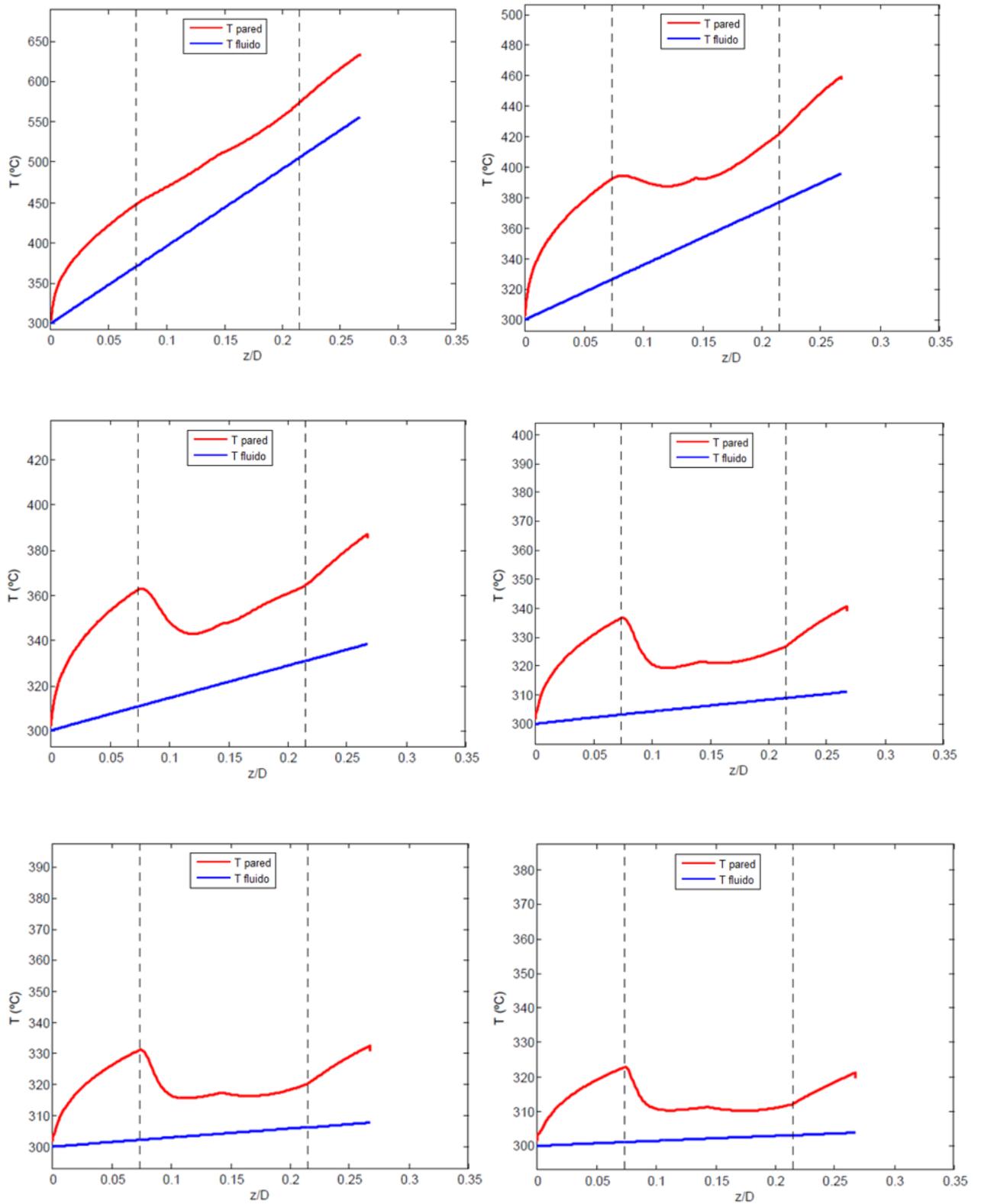


Figura 11.3. Curvas de Temperatura sobre la pared y la temperatura del fluido en nuestra geometría para codo liso. Fila1: Izquierda, $Re=30$. Derecha, $Re=80$. Fila2: Izquierda, $Re=200$. Derecha, $Re=700$. Fila3: Izquierda, $Re=1000$. Derecha, $Re=2000$.

11.5.2. Representación de la evolución de la curva del Nusselt local particularizada para cada Reynolds

En estas gráficas se pueden observar a partir de los números de Reynolds simulados, las diferencias en la transmisión de calor obtenidas, según los valores de Nusselt. Por lo tanto, en estas gráficas se visualizan los efectos que se producen en el codo sin muelle integrado en la tubería acodada y la variación de la transferencia del calor.

En la sección que forma 90° con la sección de entrada del codo se aprecia, una discontinuidad, de la cual se ha llegado a la conclusión de que es un error en el mallado porque al representar la temperatura de la pared y el flujo de calor, ambos para el problema de calor de $Re=400$, no se observa ningún salto ni discontinuidad; por lo que la evolución del Nusselt debería de ser suave también, representado en la Figura 11.4 y el flujo de calor en la pared del codo liso es constante, como se aprecia e la figura 11.5.

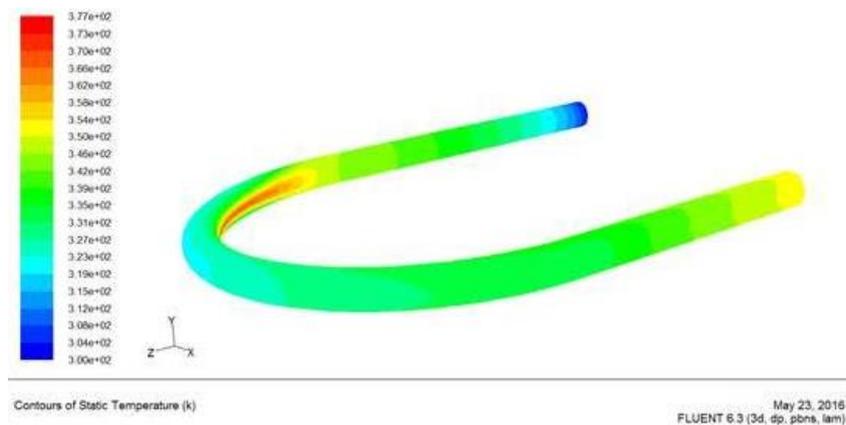


Figura 11.4. Temperatura estática del codo para $Re=400$

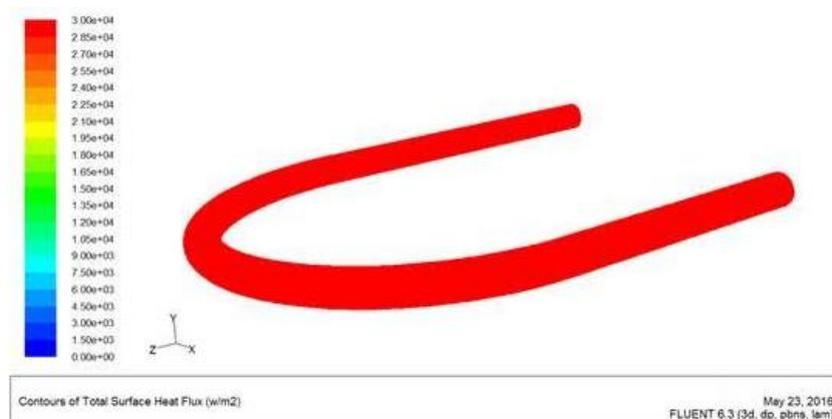


Figura 11.5. Flujo de calor en la pared del codo para $Re=400$

Además en este apartado de resultados se visualizan unas graficas de la representación de la curva del número Nusselt local, particularizada en cada valor de Reynolds para codo liso sin muelle insertado. A continuación se presentan, algunos de los casos estudiados en la Figura 11.6:

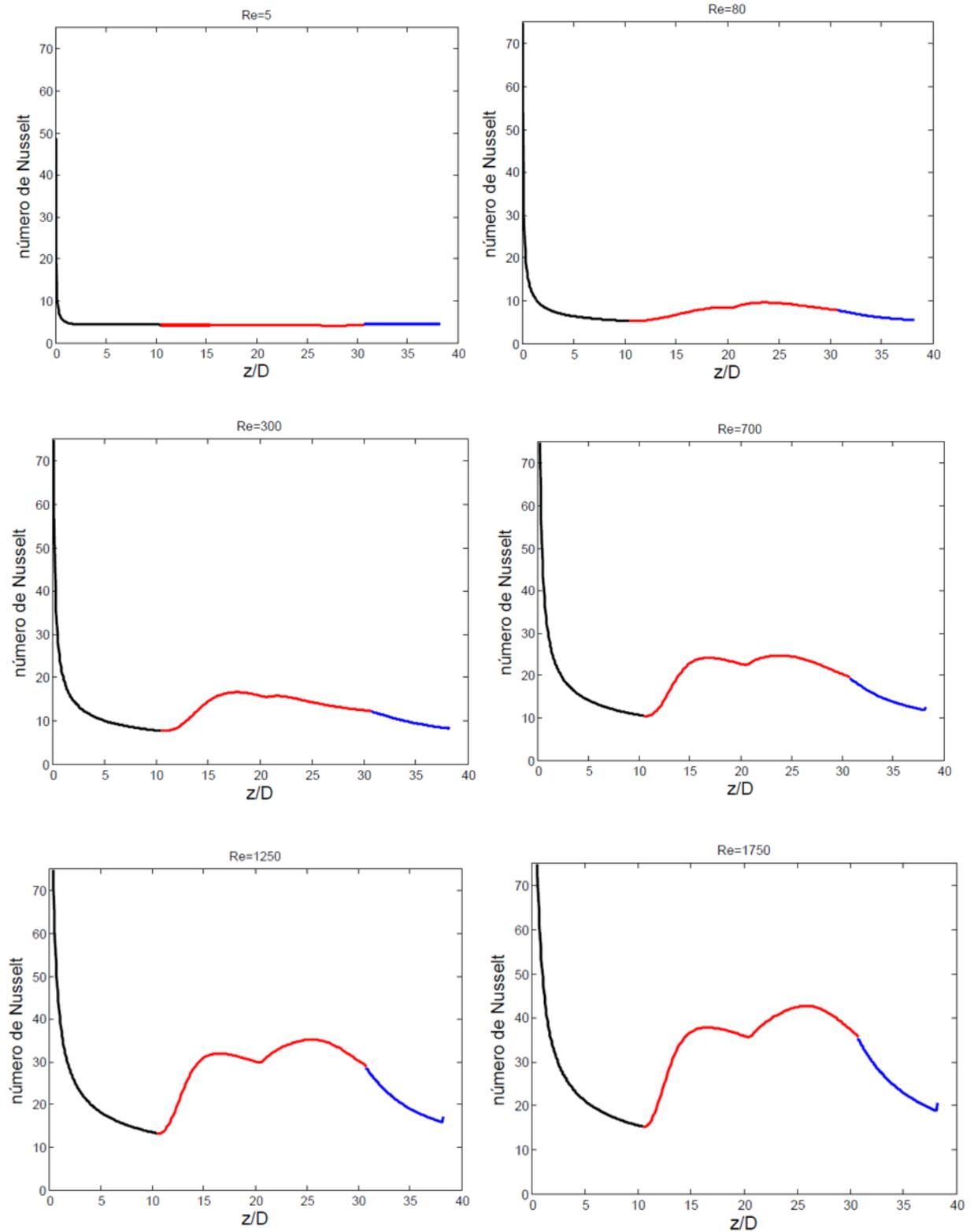


Figura 11.6. Curvas de Nusselt para la geometría del codo particularizada por colores para los tramos de entrada, codo y tramo de salida para distintos Reynolds. Fila1: Izquierda, $Re=5$. Derecha, $Re=80$. Fila2: Izquierda, $Re=300$. Derecha, $Re=700$. Fila3: Izquierda, $Re=1250$. Derecha, $Re=1750$.

En primer lugar en las capturas de las curvas de Nusselt locales, para los distintos valores de Reynolds, se puede comprobar el comportamiento del fluido en régimen laminar, como todos los presentados en este trabajo. Por ejemplo, para un valor de $Re=1000$, se aprecia que el flujo se estabiliza en el trayecto del tramo recto, cuando cumple la condición de entrada y al entrar en el codo se distingue un aumento bastante considerable en el número de Nusselt, pudiéndose deducir que los flujos secundarios, así como la variación de temperatura entre la T_{pared} y T_{flujo} , es la causante de esta variación. Es muy interesante visualizar lo que ocurre en esta zona, por eso se ha representado la curva para $Re=1000$, junto a las curvas de otros números de Reynolds en la Figura 11.6, para poder apreciar en una estimación general, que la transferencia del calor expresada según el Nusselt que circulan por los tramos rectos en paralelo (Tramo recto de entrada y de salida), cuando se estabiliza, no supera el valor de $Nu=16$, para los Reynolds más altos analizados mientras que en el caso de la mayoría de los Reynolds no llega a alcanzar el valor de $Nu=10$. Por otro lado, al llegar al codo el valor del Nusselt se dispara conforme entra el flujo en el codo, encontrándose los valores máximos entre 10 y 46.

Los valores de Nusselt a la salida del codo son un poco superiores a los de estabilización anteriormente comentados, pero puede que sea por la necesidad de una tubería más larga que permita un desarrollo completo del flujo a la salida del codo; al igual que en la tubería de entrada para los números de Reynolds más altos la estabilización del flujo se alcanza para valores de Nusselt más altos, simplemente debido a que el resto lo hace para $Nu < 10$. Simplemente como en el caso de tramo recto de salida, puede que necesite un tramo más largo, para que se desarrolle el flujo de manera completa.

Por otro lado para $Re=5$, podemos apreciar que en el tramo del codo el Nusselt no experimenta una variación acentuada, ya que permanece constante y esto es debido a que para un valor de flujo tan pequeño, los efectos de los vórtices de Dean aún son tan bajos, lo que hace que las fuerzas centrífugas sean prácticamente despreciables.

11.5.3. Representación del número de Nusselt dentro del codo expresado en función del ángulo que ocupa dentro del volumen acodado.

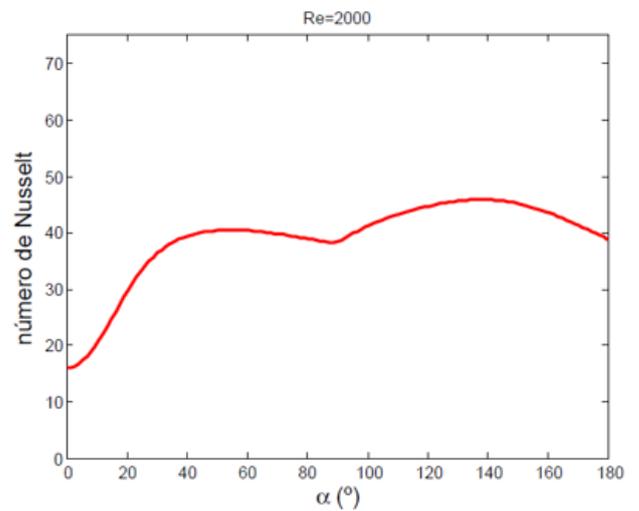
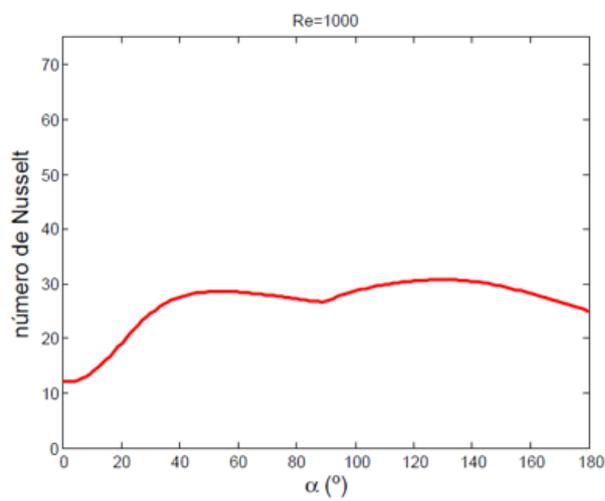
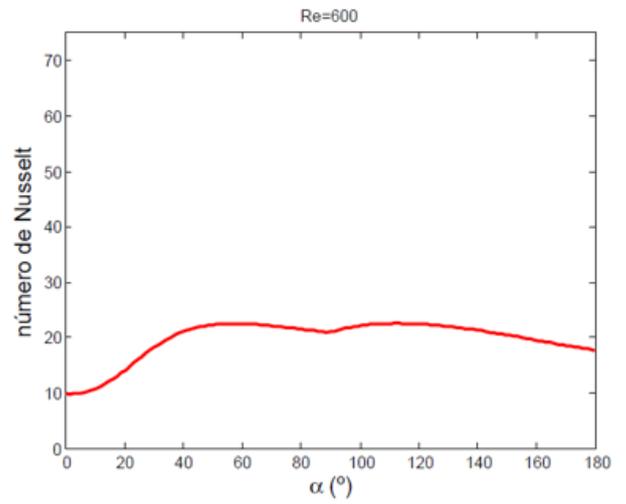
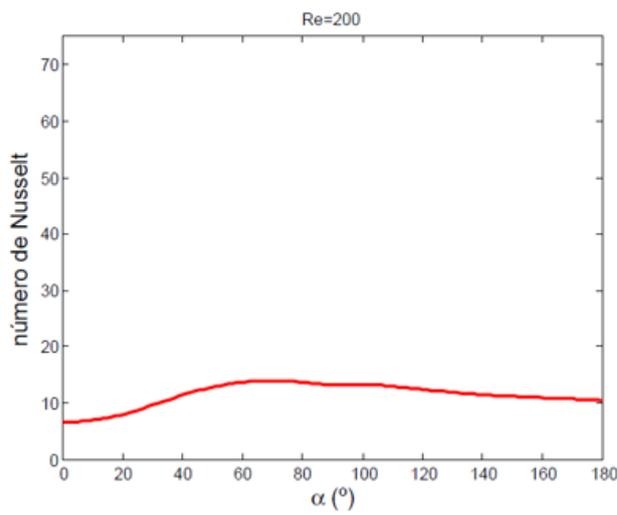
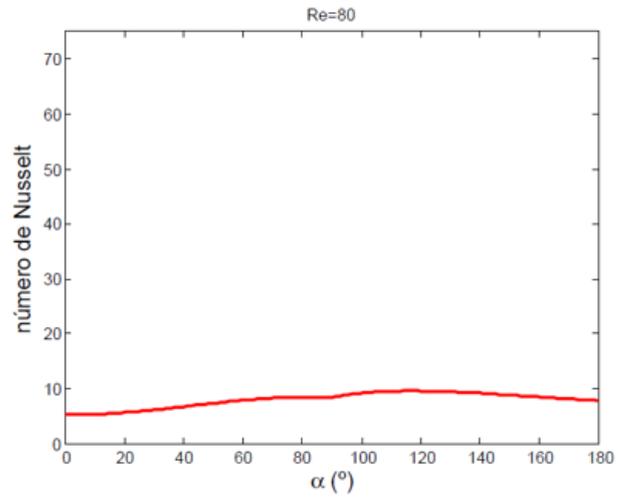
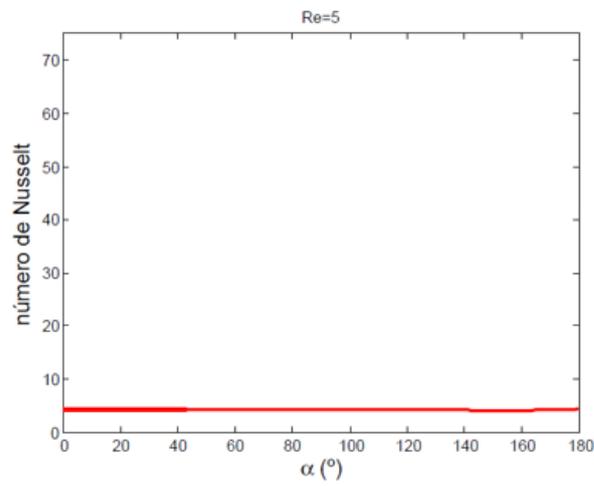


Figura 11.7. Curvas de Nusselt en función del ángulo en las superficies transversales de paso del flujo, para distintos Reynolds. Fila1: Izquierda, Re=5. Derecha, Re=80. Fila2: Izquierda, Re=200. Derecha, Re=600. Fila3: Izquierda, Re=1000. Derecha, Re=2000.

Como se puede apreciar el valor del Nusselt en el interior del codo es creciente hasta que alcanza un máximo que oscila entre valores de $Nu=[10-45]$; pero llama la atención una discontinuidad que tiene lugar justo en el ángulo que forma 90° con la sección de entrada del codo, que se considera, que se trata de un error en el mallado, el cual genera dicha discontinuidad como se ha comentado anteriormente y se ha argumentado que la temperatura en la pared del codo, así como el flujo de calor, tiene una variación suave y no drástica, por lo que no se considera un fallo en la convergencia.

Finalmente, se representa unas curvas de Nusselt en el codo para ver, cómo evoluciona dicho número adimensional al aumentar el número de Reynolds, lo cual se puede apreciar en la Figura 11.8:

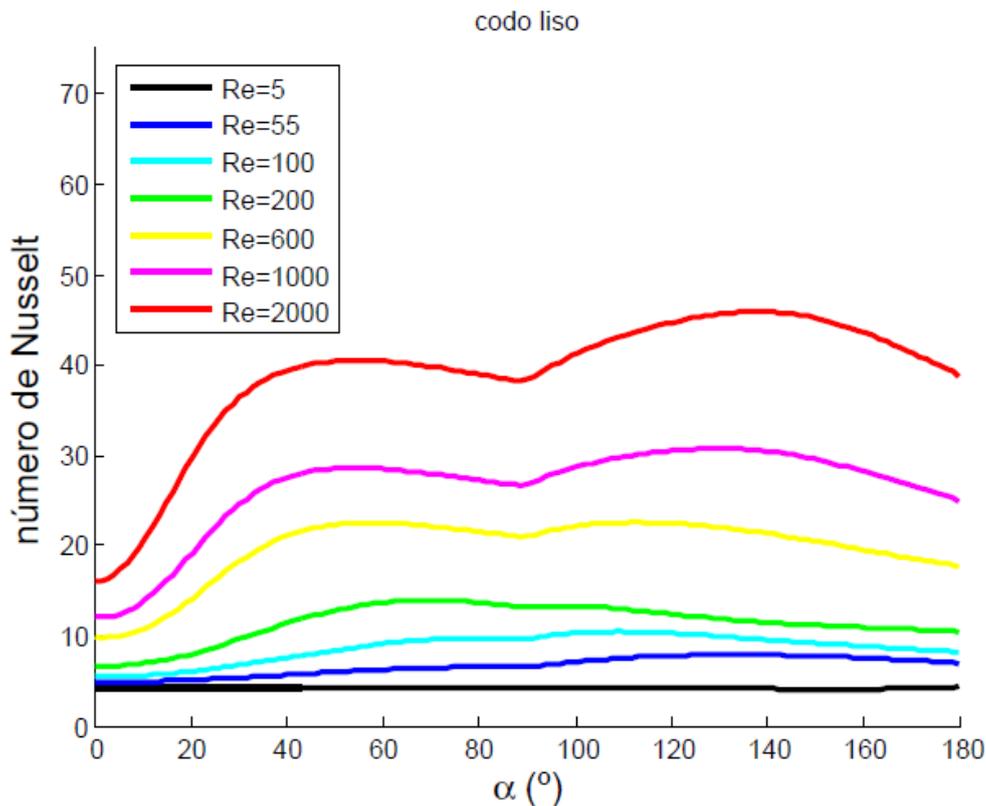


Figura 11.8. Curvas de Nusselt en función del ángulo en las superficies transversales de paso del flujo para distintos valores de Reynolds.

11.5.4. Representación logarítmica del número de Nusselt en función de Reynolds para el codo liso, para toda la geometría.

En este apartado de resultados se representa una gráfica logarítmica de la relación del número Nusselt en función de los distintos números de Reynolds estudiados y se aprecia en dicha representación de los puntos, que el Nusselt aumenta de manera logarítmica con el aumento en el número de Reynolds, ya que la en la gráfica aumenta de manera lineal pero se trata de una gráfica de ejes logarítmicos. En la Figura 11.9, se visualiza la representación de Nusselt en función del Reynolds para codo liso sin muelle integrado:

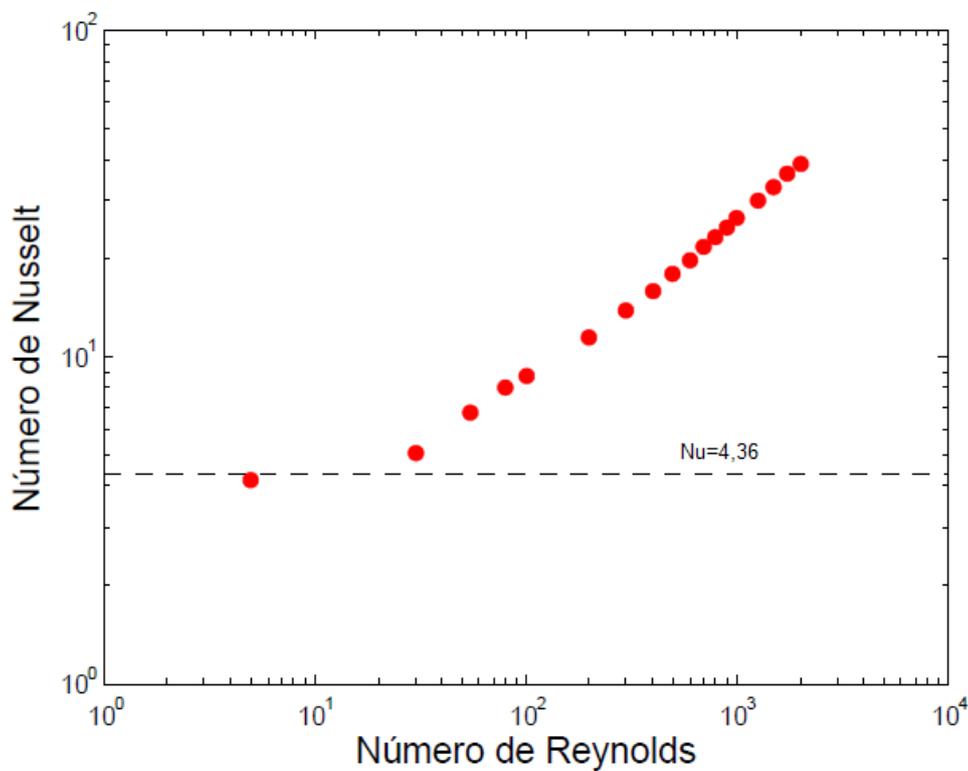


Figura 11.9. Representación logarítmica de Nusselt frente a Reynolds en codo liso.

Tras visualizar la gráfica apreciamos que $Re=5$, se sale fuera de la tendencia logarítmica. Pero de todos modos, se aprecia que dicho dato se encuentra sobre la línea de $Nu=4,36$ constante, número de Nusselt resultante para la tubería lisa de sección circular en régimen laminar.

Capítulo 12: Análisis del número adimensional de Nusselt en función distintos números de Reynolds, para un valor de transferencia de calor de 30.000W/m^2 sobre la pared del codo con muelle integrado.

12.1. Geometría y mallado empleados

La geometría y el mallado utilizados son los que hemos definido en el capítulo 7.

12.2. Introducción a las simulaciones de transferencia del calor

Con respecto a la simulación del caso de transferencia de calor para el codo con muelle insertado, llamados “journals”, partimos de la “Introducción a las simulaciones del factor de fricción” descrito en el punto 10.2 del capítulo 10; ya que en la simulación de transferencia del calor, la única diferencia con respecto al caso de presión o de fricción, consiste en añadir en las condiciones de contorno un flujo de calor de 30.000 W/m^2 en las paredes que rodean al flujo, que permitan simular el flujo de calor que recibe la tubería por la radiación solar. La mayor problemática es que se trata de una gran cantidad de paredes, por lo que el tiempo de convergencia es bastante más elevado que en el problema de presión.

Cabe destacar que hemos preparado unos archivos con instrucciones previas para lanzar en un servidor, lo que nos permite simular de manera secuencial varios números de Reynolds en un mismo programa y empleando un ordenador con una mayor capacidad de proceso que un ordenador convencional, lo que permite obtener los archivos o resultados de manera más rápida.

12.3. Propiedades del fluido empleado

Las propiedades del fluido quedan definidas en el punto 10.3 del capítulo 10, para un codo con muelle insertado.

12.4. Algoritmo o solver empleado

Como ya queda explicado en el capítulo 7, el proceso para la elección del algoritmo y solver adecuado para la resolución de nuestros problemas; simplemente se presenta como ejemplo, el solver elegido para el problema de calor para un número de Reynolds de 200:

Modelo empleado:

```
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada.tre.paso7
```

```
0,02870882 (velocidad correspondiente para Re=200)
```

```
define/models/unsteady-2nd-order (1º se elige modelo no-estacionario)
```

```
solve/set/time-step 0.05
```

- Paso de tiempo

```
solve/dual-time-iterate 20 40
```

- Número total de pasos de tiempo (20 por ejemplo)
- Número máximo de iteraciones por paso de tiempo

```
define/models/steady yes (2º se elige modelo estacionario)
```

```
solve/iterate 1000
```

Criterio de convergencia empleado:

```
/solve/monitors/residual/convergence-criteria
```

```
1e-4 ---- Continuidad
```

```
1e-3 ---- Velocidad de X
```

```
1e-3 ---- Velocidad de Y
```

```
1e-3 ---- Velocidad de Z
```

```
1e-9 ---- Ecuación de Energía
```

Finalmente, estas ecuaciones ofrecen una convergencia del problema de calor, la cual se alcanza en la iteración 836. En las siguientes imágenes se visualiza la monitorización de la convergencia para el problema de calor en tubo con muelle insertado; en la Figura 12.1 y el número de iteraciones que necesita para alcanzar la convergencia en la Figura 12.2.

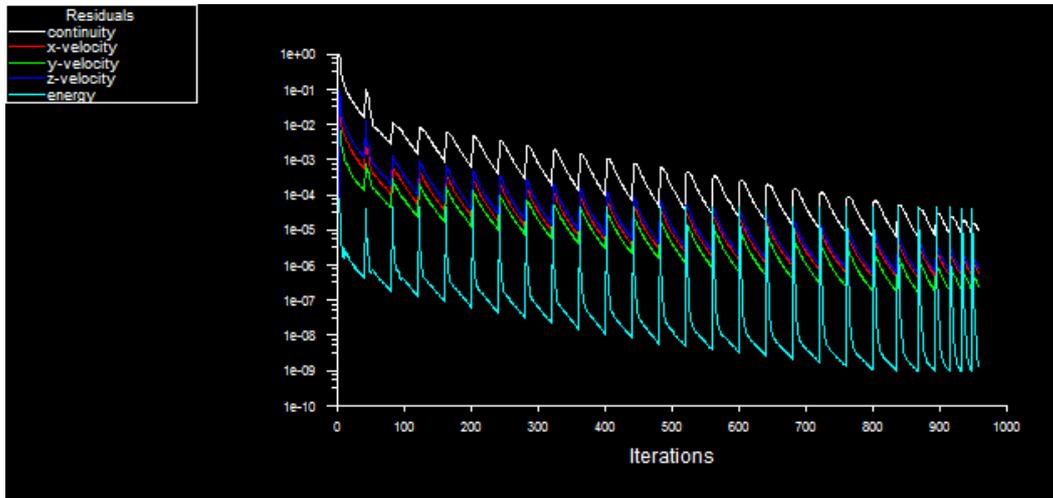


Figura 12.1. Gráfica de convergencia del problema transferencia calor de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo con muelle para $Re=200$.

```

833 7.4204e-06 5.2853e-07 2.0103e-07 6.8717e-07 1.1134e-09 0:01:40 7
reversed flow in 197 faces on pressure-outlet 77.
834 6.9723e-06 5.0070e-07 1.9036e-07 6.4971e-07 1.0639e-09 0:01:28 6
reversed flow in 197 faces on pressure-outlet 77.
835 6.6284e-06 4.7591e-07 1.8048e-07 6.1739e-07 1.0122e-09 0:01:13 5
reversed flow in 197 faces on pressure-outlet 77.
! 836 solution is converged
836 6.2970e-06 4.5507e-07 1.7093e-07 5.9077e-07 9.6572e-10 0:00:59 4
Flow time = 1.05, time step = 21
19 more time steps

Updating solution at time levels N and N-1.
done.
iter continuity x-velocity y-velocity z-velocity energy time/iter
! 836 solution is converged
836 6.2970e-06 4.5507e-07 1.7093e-07 5.9077e-07 9.6572e-10 0:09:52 40

```

Figura 12.2. Número de iteraciones para alcanzar la convergencia del problema transferencia calor de las ecuaciones de fluidos aplicadas a codo liso para $Re=200$.

12.5. Resultados del número de Nusselt con codo con muelle insertado

A partir de los casos obtenidos del análisis de transferencia del calor, para el codo con muelle insertado se extraen ciertas variables del flujo sobre los tramos de flujo (default-interior) y de pared (Wall) que permitan evaluar ciertos parámetros de interés para la

transferencia del calor, como son la representación de las curvas del número adimensional de Nusselt en los tramos rectos de entrada y salida y en el codo, haciendo hincapié en el último caso, ya que es la motivación principal de este proyecto. Además será interesante poder representar el gradiente de temperaturas entre la pared y el fluido.

Para este caso se extrae para los contornos fluidos las variables de densidad, velocidad en la dirección de Z (teniendo en cuenta en el codo también la velocidad en la dirección de X, debido a la aparición de los flujos secundarios), la temperatura estática y las celdas de volumen. Por otro lado, para los tramos de pared se extraen las variables de temperatura estática y las celdas de volumen correspondientes.

Esta extracción de variables o exportación de datos se ejecuta desde Fluent y se desarrolla por medio de la generación de un archivo a ejecutar en formato ASCII que permite obtener todos los archivos de manera secuencial, al ejecutar este archivo, llamado "journal" en Fluent, creando una serie de archivos de extensión ".dat", que posteriormente serán utilizados para ser procesados por medio de otros documentos llamados Script en Matlab R2013a.

12.5.1. Representación del gradiente de temperatura de la pared del codo y el fluido

Como se puede apreciar en la Figura 12.3, la temperatura del fluido va aumentando de manera lineal al circular a lo largo del serpentín, al producirse la transferencia del calor entre el fluido y el tubo. Mientras que la temperatura en las paredes del tubo, en el tramo recto de entrada parte desde temperatura 0° y aumenta hasta la temperatura en la que el flujo se uniformiza la temperatura, a partir de la cual sigue aumentando la temperatura de la pared conforme transcurre en el codo y el tramo recto de salida, pero también de manera lineal sin ninguna discontinuidad o caída realmente pronunciada. Al final del tramo recto de salida se aprecia una disminución de la temperatura, pero debido al final de la geometría para igualar la temperatura en la pared de salida fijada. Esta representación del gradiente de temperatura entre la pared y el fluido, nos permite entender la evolución del Nusselt instantáneo, evaluado en función del ángulo de la sección transversal de paso del flujo en el codo con muelle insertado, nos demuestra que como el número Nusselt en el codo adquiere un valor constante, eso propicia que

la temperatura en el codo vaya aumentando pero de manera lineal. Como ya sabemos la definición del número de Nusselt, viene dada por:

$$Nu = \frac{q''}{T_{pared} - T_{fluido}} \cdot \frac{d}{k} \quad (12.1)$$

Donde el T_{pared} y T_{fluido} , corresponden a la temperatura local media de la pared y de temperatura media ponderada de una sección local del tubo respectivamente, además al tratarse de flujo laminar, las propiedades físicas del fluido en el problema de transferencia de calor presenta una fuerte dependencia de la temperatura.

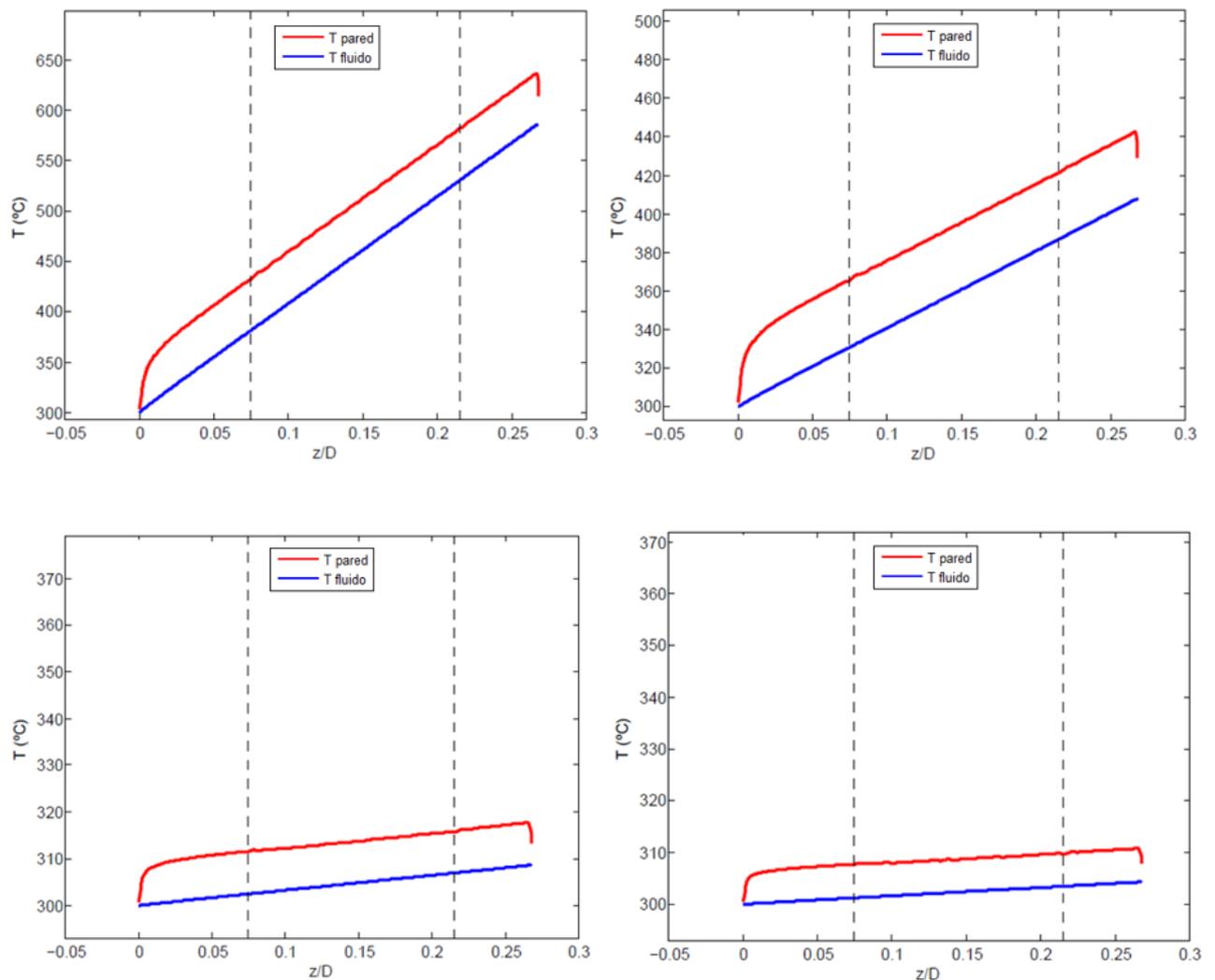
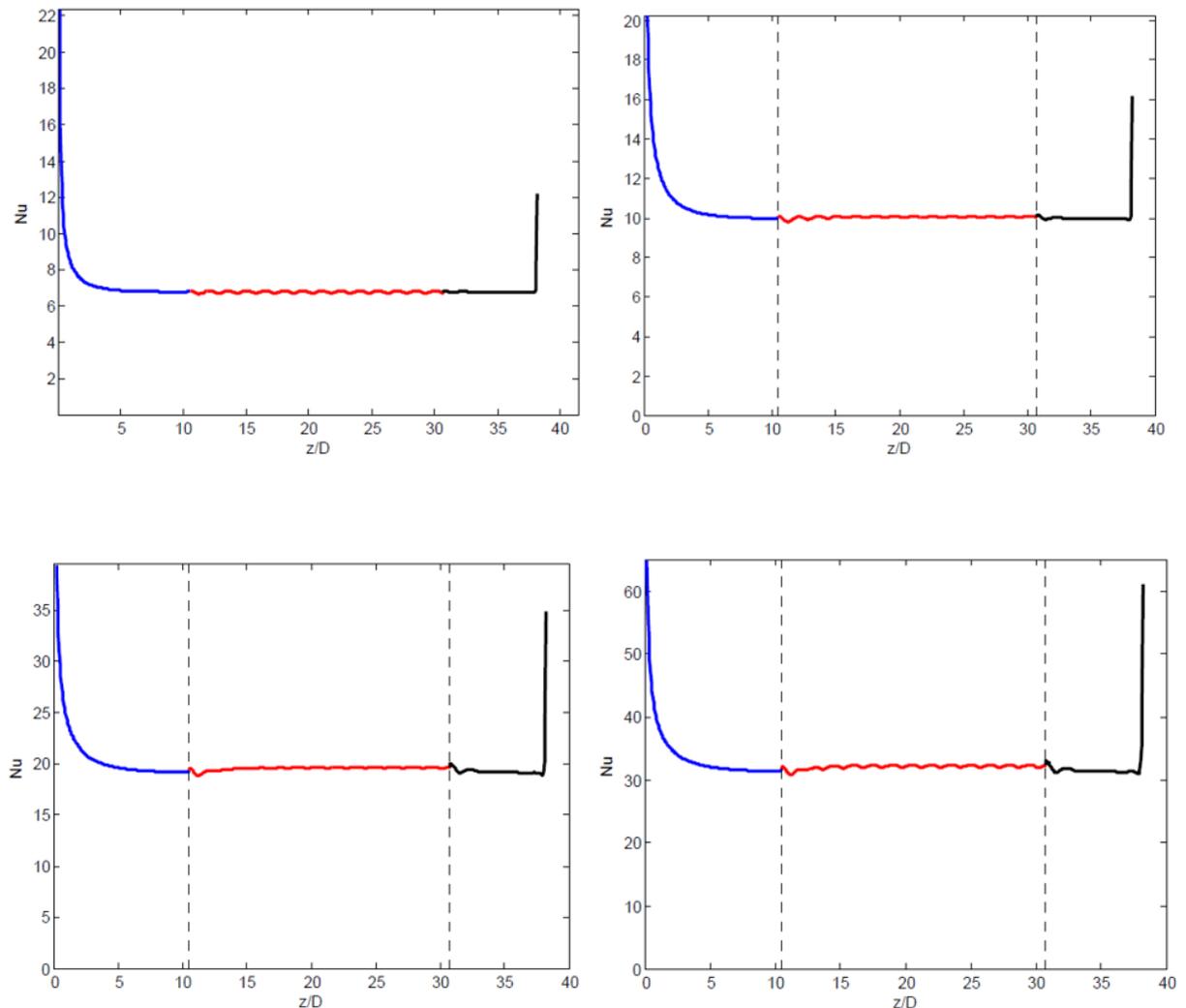


Figura 12.3. Curvas de Temperatura sobre la pared y la temperatura del fluido en nuestra geometría de codo con muelle. Fila1: Izquierda, $Re=30$. Derecha, $Re=80$. Fila2: Izquierda, $Re=1000$. Derecha, $Re=2000$.

12.5.2. Representación de la evolución de la curva del Nusselt local particularizada para cada Reynolds

En estas gráficas se pueden observar a partir de los números de Reynolds simulados, las diferencias en la transmisión de calor obtenidas, según los valores de Nusselt. Por lo tanto, en estas gráficas podemos observar los efectos que se producen en el codo con muelle integrado en la tubería acodada y la variación de la transferencia del calor.

En este apartado de resultados representamos unas gráficas de la curva del número Nusselt local, particularizada para cada valor de Reynolds del codo con muelle insertado. Podemos apreciar algunos de los casos estudiados en la Figura 12.4:



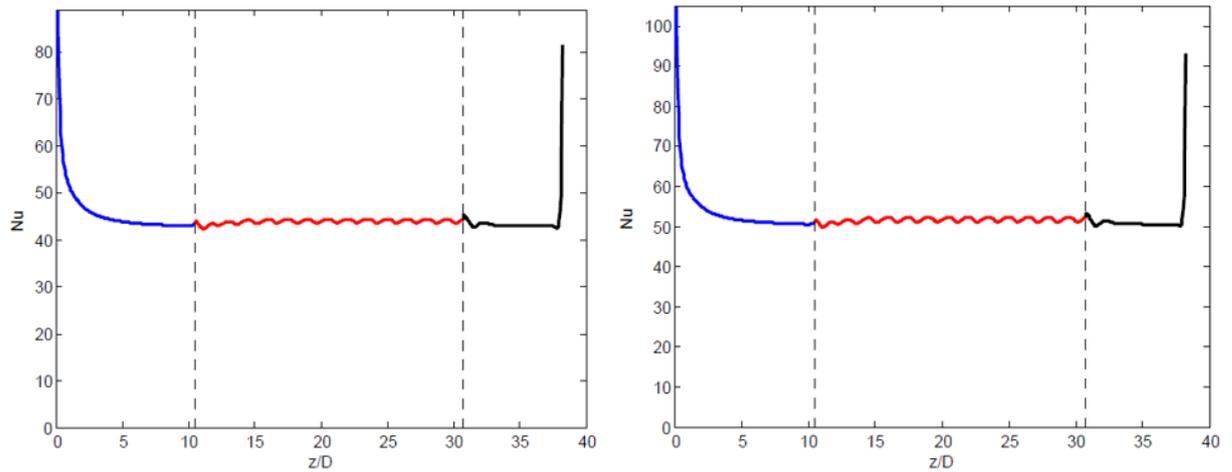


Figura 12.4. Curvas de Nusselt para la geometría del codo, particularizadas por colores para los tramos de entrada, codo y tramo de salida para distintos Reynolds. Fila1: Izquierda, $Re=30$. Derecha, $Re=80$. Fila2: Izquierda, $Re=300$. Derecha, $Re=700$. Fila3: Izquierda, $Re=1250$. Derecha, $Re=1750$.

En primer lugar en las capturas de las curvas de Nusselt locales, para los distintos valores de Reynolds, se puede comprobar el comportamiento del fluido en régimen laminar, como todos los presentados en este trabajo. Por ejemplo, para un valor de $Re=700$, se aprecia que el flujo se estabiliza en el trayecto del tramo recto, cuando cumple la condición de entrada, mientras que a diferencia del codo liso, para codo con muelle insertado no se aprecia una discontinuidad brusca en el valor del Nusselt, simplemente unas leves variaciones a lo largo del codo, permaneciendo constante con respecto al número del Nusselt de salida del tramo recto de entrada; es decir, no hay efecto significativo de los vórtices de Dean en la tubería acodada. Los vórtices de Dean no empeoran el número de Nusselt pero tampoco lo mejoran. Por otro lado, cabe destacar que la constancia del valor del Nusselt en el codo, se conserva también en el tramo de salida, hasta que este asciende.

Esta constancia en el valor del Nusselt en el codo, es esperable después de observar el gradiente de temperatura entre la temperatura de la pared y del fluido, que hemos visto en el apartado 12.5.1. Pero tras representar los resultados para varios números de Reynolds, podemos apreciar que el Nusselt aunque permanezca constante crece con el Reynolds y esto es debido a la presencia de los flujos secundarios, en este caso de Swirl o giro presente desde la entrada al tramo recto de entrada.

12.5.3. Representación logarítmica del número de Nusselt en función de Reynolds para el codo con muelle insertado en toda su geometría.

En este apartado de resultados, se representa una gráfica logarítmica de la relación del número Nusselt en función de los distintos números de Reynolds estudiados y se puede apreciar en la representación de los puntos, que el Nusselt aumenta de manera logarítmica con el aumento en el número de Reynolds, ya que la en la gráfica aumenta de manera lineal pero se trata de una gráfica de ejes logarítmicos. En la Figura 12.3, se visualiza la representación de Nusselt en función del Reynolds para codo con muelle integrado:

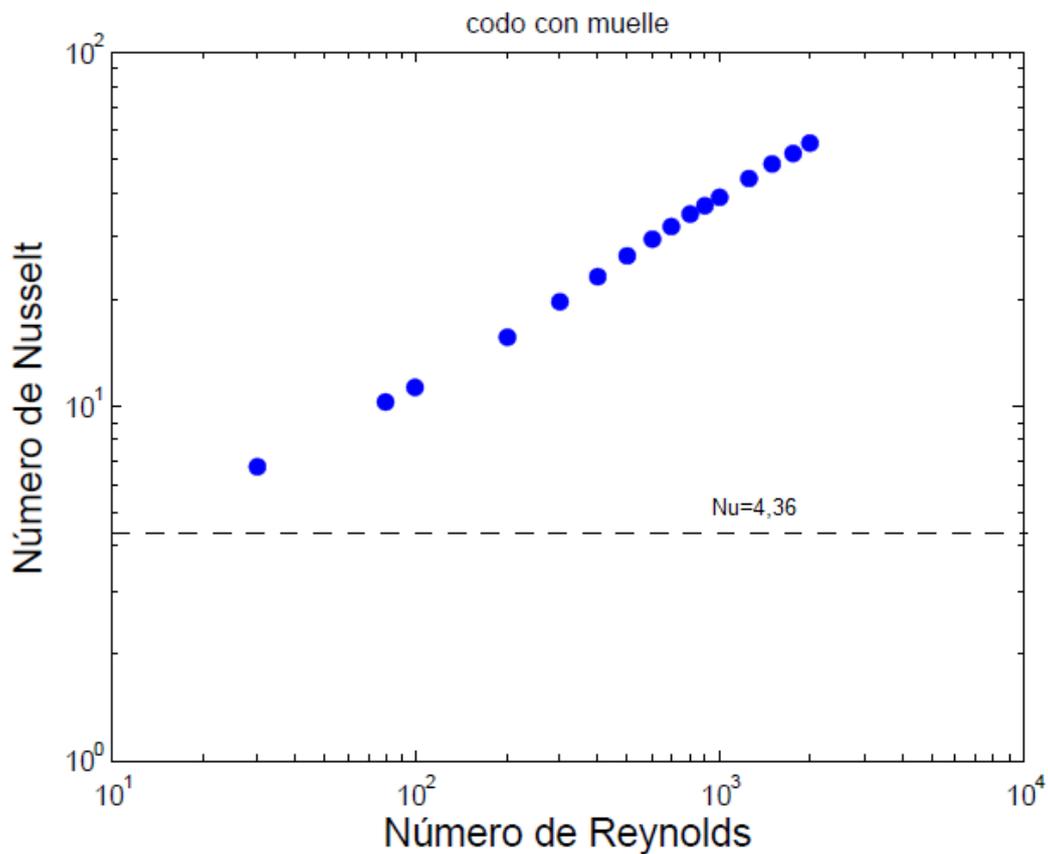


Figura 12.5. Representación logarítmica de Nusselt en función de Reynolds para codo con muelle.

12.6. Resultados del número de Nusselt de codo liso sin muelle y comparación con codo liso con muelle insertado.

En este apartado, se quiere comparar para el problema de transferencia de calor los resultados de la curva de Nusselt para codo con muelle con respecto de codo liso y apreciar cuales son las diferencias o ventajas que existen en la implementación de un muelle en el diseño del codo o la utilización de una tubería sin la introducción del muelle. Los resultados que se entresacan y se cree importantes de reflejar, son los siguientes:

12.6.1. Comparación de las curvas de Nusselt en el tramo de codo, entre el codo con muelle y el codo liso

Como resultado final del proyecto se representan las curvas del número de Nusselt en función del ángulo dentro del codo, ya que el fundamento de este proyecto consiste en estudiar la viabilidad de la integración de muelles helicoidales en el interior de las tuberías de un colector solar, con la finalidad de aumentar la transferencia del calor, con respecto a una tubería acodada sin ningún elemento oscilador del flujo, de lo que se encarga en nuestro estudio el codo.

Como se puede apreciar, estas representaciones son capturas de las diferencias entre las curvas del número de Nusselt dentro del codo, tanto para el codo con muelle y el codo liso; expresadas en cada una de las secciones transversales de paso del flujo, denotadas según el ángulo " α " que forma cada una de estas secciones desde la sección de entrada al codo, coincidente con 0° , a la salida del codo con 180° .

Se anticipa que la curva de Nusselt para el codo con muelle insertado dentro del codo, se encuentra siempre por encima de la curva para codo liso, por lo que se saca como conclusión que la transferencia, usando este tipo de reactor de oscilación en un codo aumenta la transferencia del calor.

En las siguientes figuras, se puede apreciar cómo se disponen las diferencias de transferencia del calor expresadas en función del número de Nusselt para los distintos valores de Reynolds:

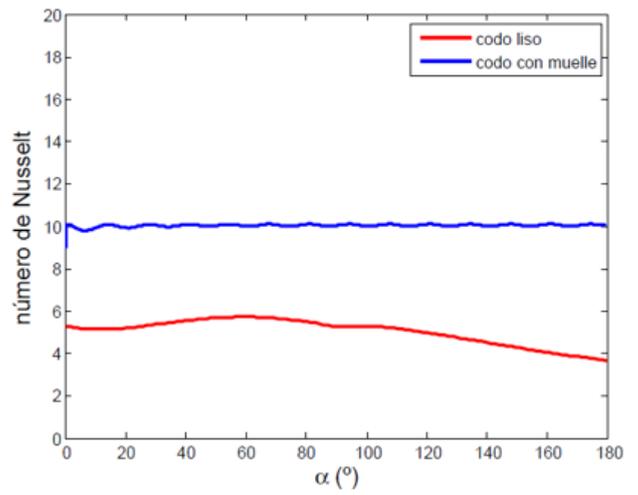
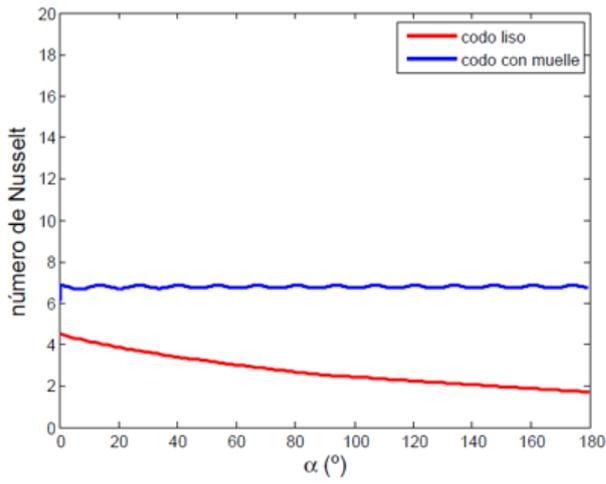


Figura 12.9. Curvas de Nusselt en el tramo acodado para codo con muelle y codo liso.

Izquierda: $Re=30$. Derecha: $Re=80$.

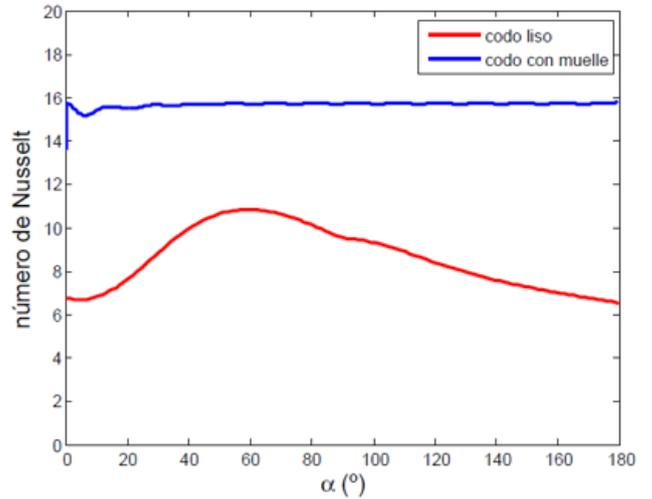
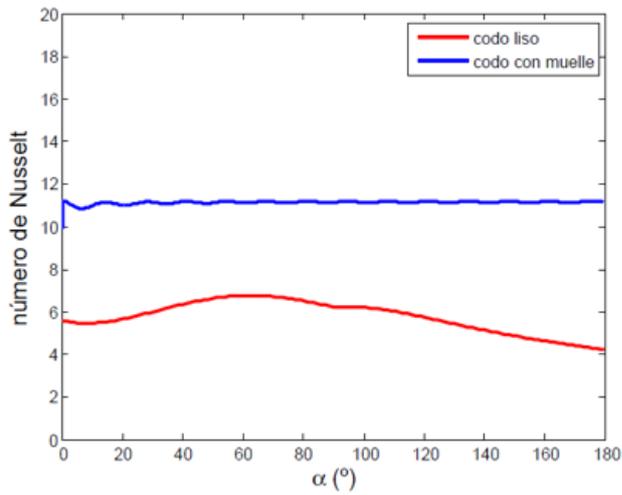


Figura 12.10. Curvas de Nusselt en el tramo acodado para codo con muelle y codo liso.

Izquierda: $Re=100$. Derecha: $Re=200$.

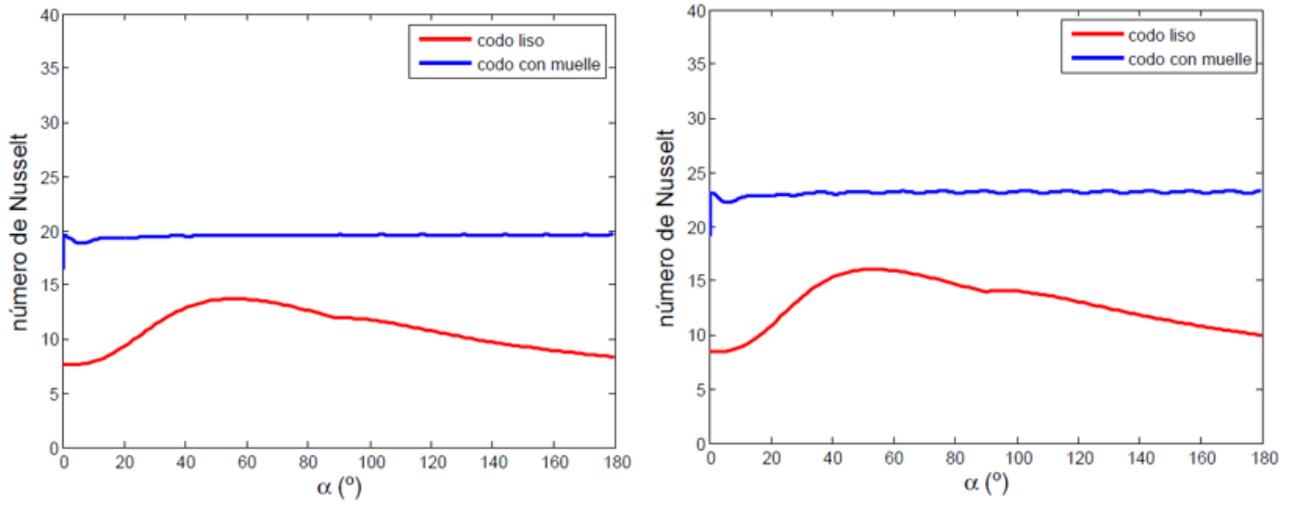


Figura 12.11. Curvas de Nusselt en el tarmo acodado para codo con muelle y codo liso.

Izquierda: $Re=300$. Derecha: $Re=400$.

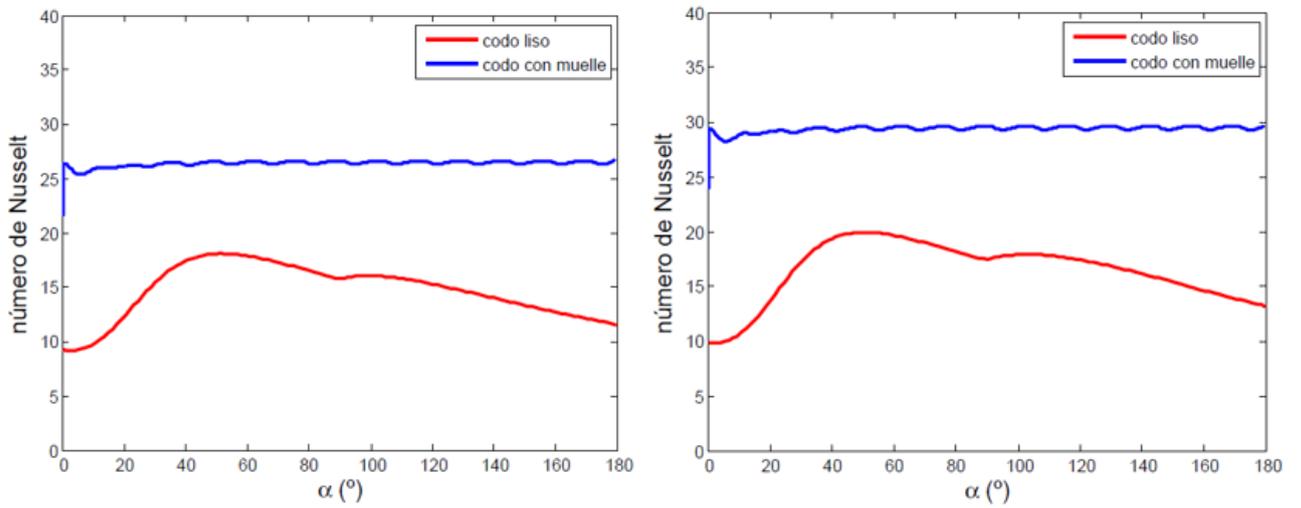


Figura 12.12. Curvas de Nusselt en el tarmo acodado para codo con muelle y codo liso.

Izquierda: $Re=500$. Derecha: $Re=600$.

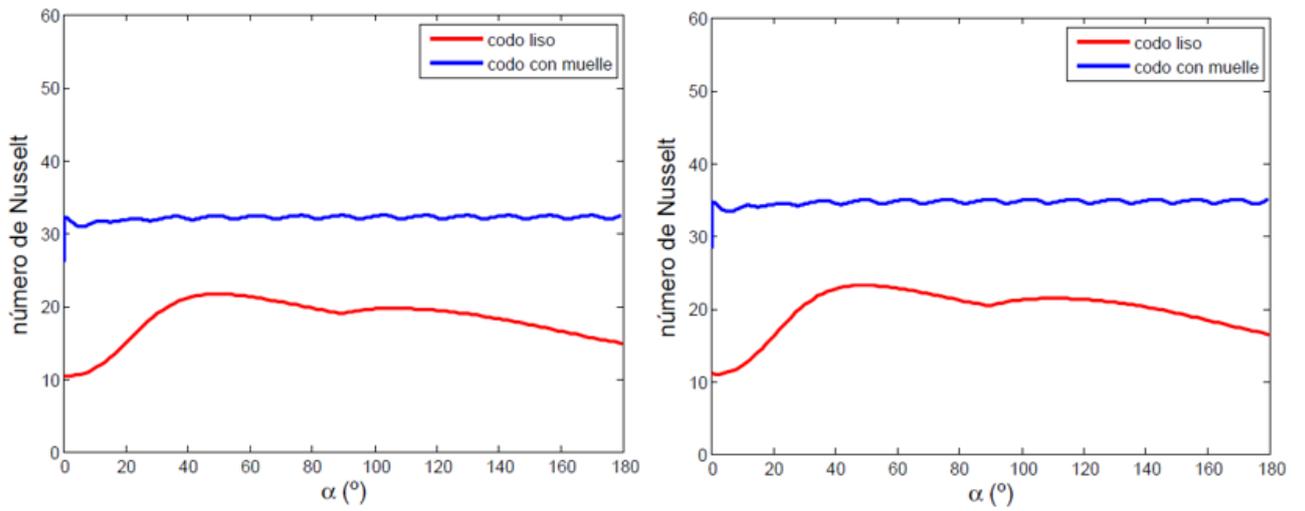


Figura 12.13. Curvas de Nusselt en el tarmo acodado para codo con muelle y codo liso.
Izquierda: $Re=700$. Derecha: $Re=800$.

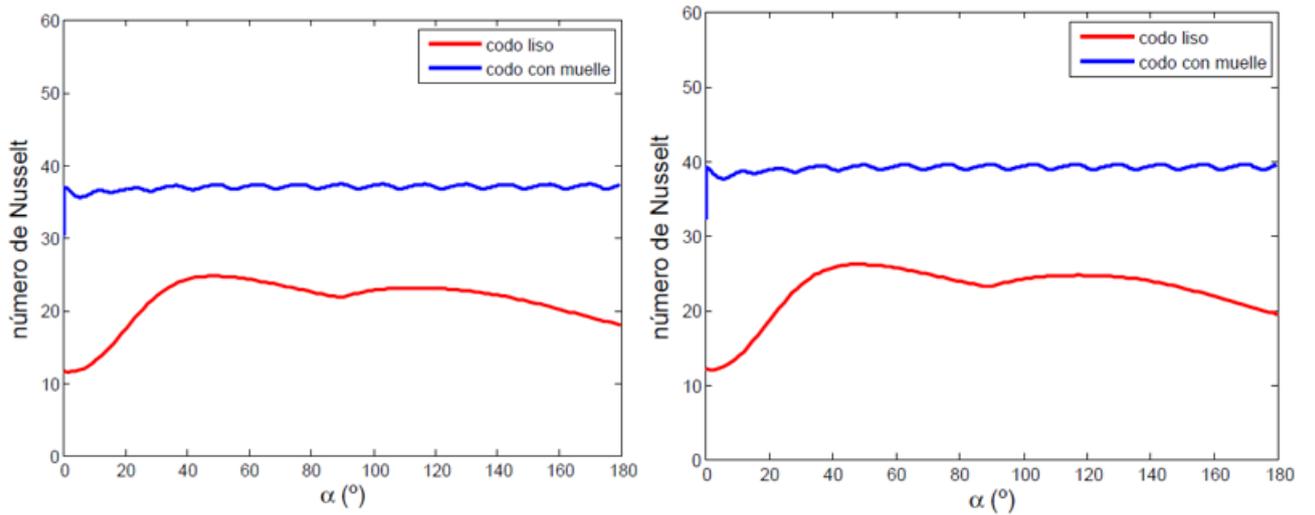


Figura 12.14. Curvas de Nusselt en el tarmo acodado para codo con muelle y codo liso.
Izquierda: $Re=900$. Derecha: $Re=1000$.

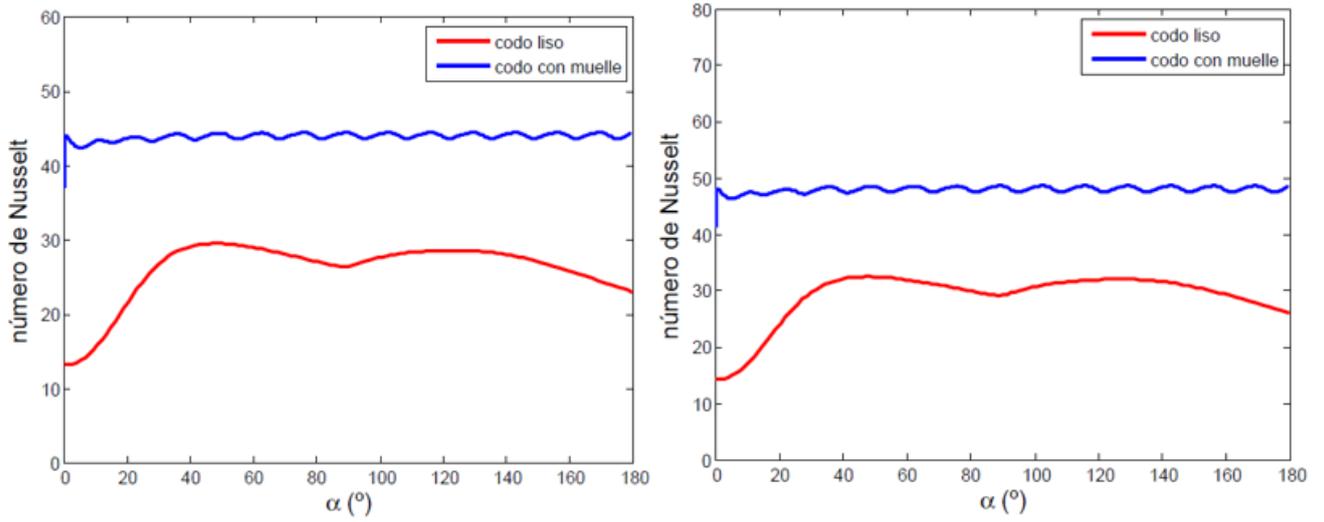


Figura 12.15. Curvas de Nusselt en el tarmo acodado para codo con muelle y codo liso.

Izquierda: $Re=1250$. Derecha: $Re=1500$.

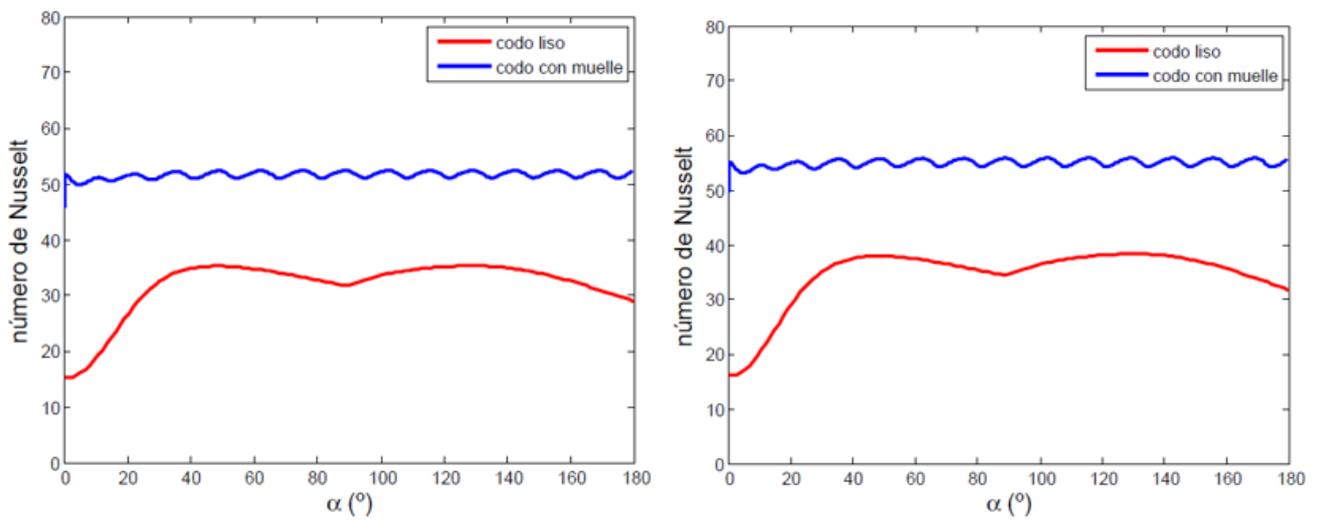


Figura 12.16. Curvas de Nusselt en el tarmo acodado para codo con muelle y codo liso.

Izquierda: $Re=1750$. Derecha: $Re=2000$.

12.6.2. Gráfica comparativa del número de Nusselt medio en función del Reynolds para codo con muelle insertado y codo liso; comparándolo con la representación para tubería lisa de sección circular

En este apartado de resultados, se presentan las graficas de la representación de la curva del número Nusselt local, particularizada en cada Reynolds para codo liso sin muelle insertado.

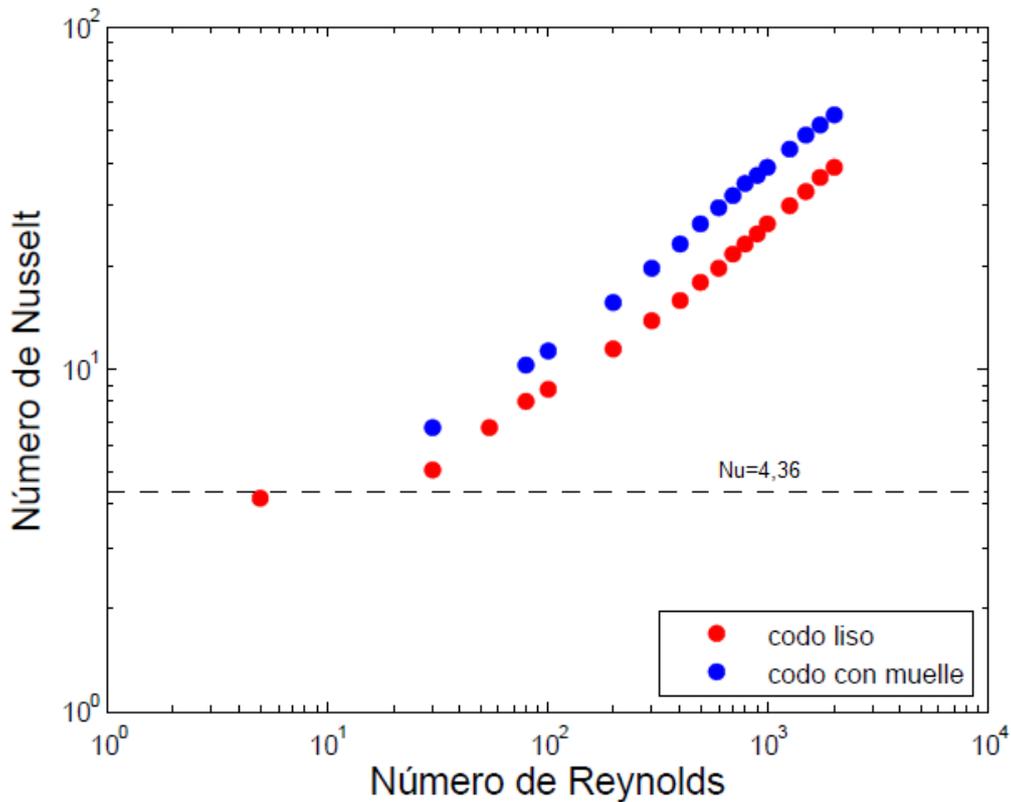


Figura 12.6. Representación de Nusselt medio en función de Reynolds para codo con muelle, codo liso y tubería de sección circular, usando una escala logarítmica.

En esta gráfica de representación de la curva del número Nusselt, en función del Reynolds para codo con muelle y codo liso sin muelle integrado, se puede apreciar que la curva del codo con reactor de oscilación para todos los valores de Reynolds, presenta valores mayores de Nusselt, con respecto a la curva del codo liso sin reactor de oscilación. Además se ha presentado una línea recta de trazo discontinuo negra que se representa de manera horizontal para el valor de $Nu=4,36$. Y como se aprecia de manera clara, el punto de la curva de codo liso para $Re=5$, se encuentra sobre la línea

recta horizontal de trazo discontinuo, ya que representa el número de Nusselt en tubo recto de sección circular, con convección forzada, flujo plenamente desarrollado y en régimen laminar.

En la siguiente gráfica de la Figura 12.7, se representa de nuevo la evolución del número de Nusselt, en función del número de Reynolds para codo con muelle y para codo liso, solo que en este caso se emplea una escala lineal en vez de logarítmica, con el único fin de poder apreciar con mayor claridad los aumentos absolutos o diferencias entre los valores de las curvas.

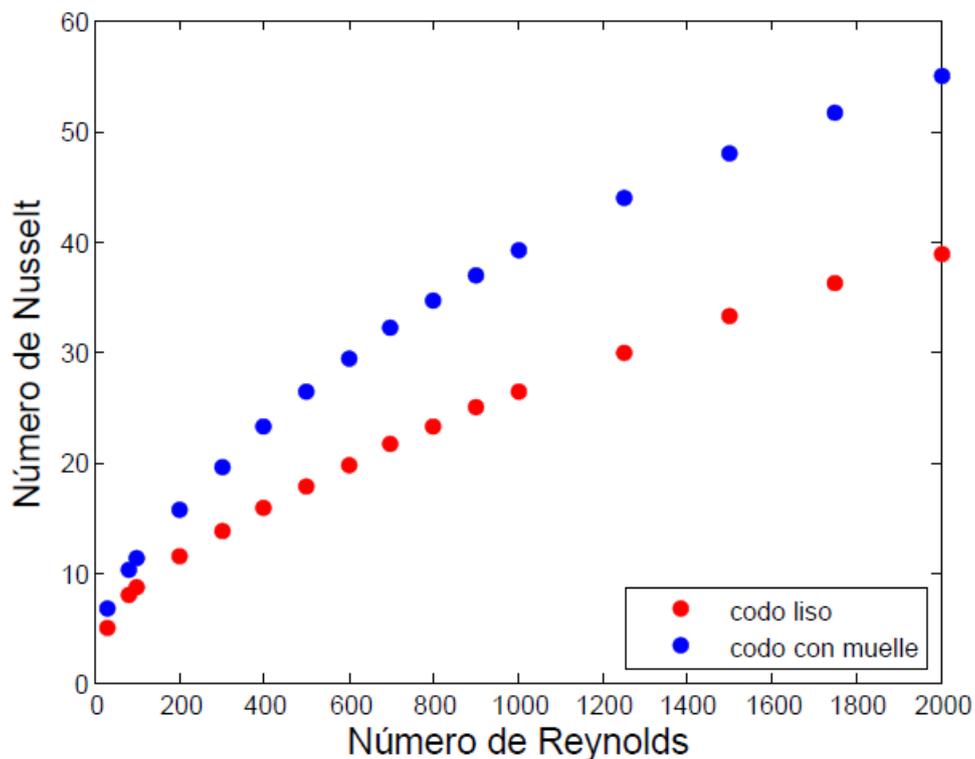


Figura 12.7. Representación de Nusselt en función de Reynolds para codo con muelle y codo liso usando una escala lineal.

Como se puede apreciar, la variable definida por las diferencias, $(Nu_{\text{codo muelle}} - Nu_{\text{codo liso}})$; va aumentando con el número de Reynolds como se aprecia en las gráficas de la Figura 12.6 y la Figura 12.7; aunque la variable del cociente $(Nu_{\text{codo muelle}} / Nu_{\text{codo liso}})$ o de la diferencia relativa, $[(Nu_{\text{codo muelle}} - Nu_{\text{codo liso}}) / Nu_{\text{codo liso}}]$; no tienen

por qué seguir esa tendencia. Esto se demuestra en la gráfica de la Figura 12.8, en la que se representa el cociente entre el Nusselt del codo con muelle y el Nusselt del codo liso en función de los valores de Reynolds ensayados.

Por ejemplo, para comprobar los resultados obtenidos en la gráfica de representación de Nusselt en función del Reynolds, para $Re=300$ se obtienen un valor de $Nu_{\text{codo muelle}}=19,59$ y $Nu_{\text{codo liso}}=13,77$. El cociente de ambos números da como resultado $(Nu_{\text{codo muelle}} / Nu_{\text{codo liso}}) = 1,422 \sim 1,423$, número que coincide con el valor de la gráfica.

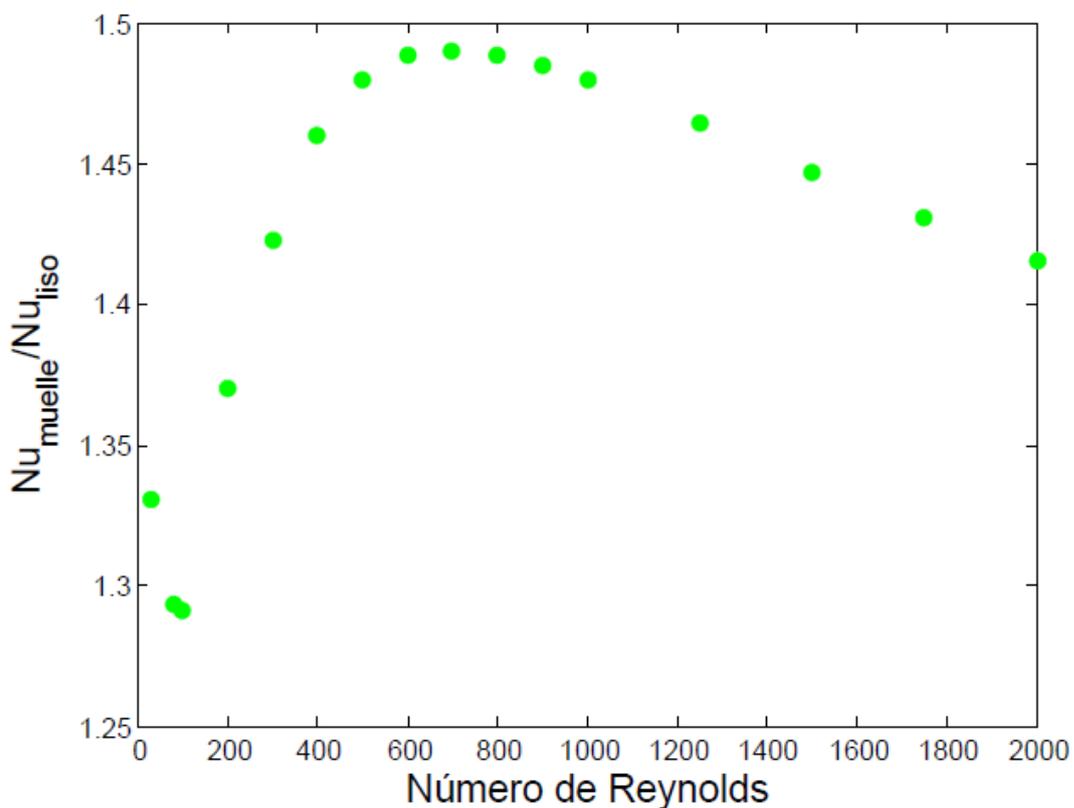


Figura 12.8. Representación del cociente entre el Nusselt para codo con muelle y el Nusselt para codo liso en función de los números de Reynolds ensayados.

Sobre la gráfica de la Figura 12.8, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Para números de Reynolds muy bajos, el flujo es prácticamente similar al que circula por el codo liso que al de un tubo recto, con unos efectos nulos o despreciables de las fuerzas centrífugas. Mientras que a ese régimen, el muelle ya trabaja con swirl, aunque el swirl es muy pequeño.
- Además en el rango de número de Reynolds estudiado se cumple siempre que el valor de $Nu_{\text{codo muelle}} > Nu_{\text{codo liso}}$.
- Por otro lado el cociente entre los Nusselt para los codos ensayados resulta ser creciente hasta $Re=700$, en el que encuentra el valor de cociente entre los valores de Nusselt máximo, donde $(Nu_{\text{codo muelle}} / Nu_{\text{codo liso}}) = 1,49$ y a partir de $Re=800$, el Nusselt comienza a descender. Esto indica que el efecto de las fuerzas centrífugas para el codo liso, van tomando más importancia con respecto al efecto de los vórtices de Dean, y esto es más acusado cuanto mayor sea el número de Reynolds.

Cabría preguntarse si, para un número de Reynolds suficientemente grande, el cociente, $(Nu_{\text{codo muelle}} / Nu_{\text{codo liso}})$ podría hacerse menor que la unidad en cuyo caso los vórtices de Dean en codo liso podrían ser tan poderosos como para inducir mayores coeficientes convectivos sobre el flujo, que los del swirl del codo con muelle interado para el mismo número de Reynolds.

PARTE V: CONCLUSIONES

Capítulo 13: Conclusiones de los análisis.

En primer lugar se ha conseguido estudiar por primera vez la inserción de un muelle en un codo de 180° del serpentín de un captador solar, por lo que se ha diseñado su geometría y mallado de la tubería acodada para luego simular el caso de fricción y la transferencia del calor.

Se obtienen conclusiones de ambos ensayos realizados; tanto para el ensayo de fricción como para el ensayo de transferencia del calor en función del número adimensional de Nusselt; pero ambas me llevan a que la transmisión del calor por convección forzada con la integración de un muelle es mayor que usando un codo convencional.

En el problema de fricción a través de la representación de las gráficas del coeficiente de Fanning en función del codo liso y con muelle, comparándolas con el coeficiente de Fricción para tubería lisa de sección circular; se aprecia que para valores de Reynolds bajos los coeficientes de Fanning de ambos, serán bastante similares a los de la tubería de sección circular, pero a partir de $Re > 200$, estos valores ascienden mucho más, debido a una mayor ΔP entre las secciones de entrada y salida del codo, debida esta al aumento de las fuerzas centrífugas en el codo por el desarrollo de flujos secundarios más intensos; ganando peso las recirculaciones en el codo con muelle y los vórtices de Dean en el codo liso.

Aún en el problema de Fricción, visualizando las capturas, se puede apreciar fácilmente como a la entrada del codo liso la distribución de velocidades está desarrollada, mientras que para la sección que forma 90° con respecto a la entrada, se da la aparición de los vórtices de Dean, apreciándose una mayor presencia de estos a mayores números de Reynolds. Por otro lado, en el caso de codo con muelle insertado, se aprecia en la sección de entrada una distribución de velocidades adimensional con un swirl, mientras que en la sección que forma 90° con respecto a la entrada se encuentra una distribución de velocidad y swirl similares, un poco más acentuados en esta última sección. Lo que sucede es que no se produce un cambio de presión tan brusco y eso es lo que ayuda a que se obtenga para el caso de codo con muelle, una mayor transferencia del calor.

Por lo tanto los patrones de flujo serán diferentes según el codo; en el caso de codo liso, el flujo está gobernado por las fuerzas centrífugas por la aparición de 2 recirculaciones asimétricas en el plano, que se conocen como vórtice de Dean, mientras que en el codo con muelle incorporado podemos apreciar que las fuerzas centrífugas que aparecen están controladas por los flujos secundarios que surgen por el fenómeno de giro o swirl.

Con respecto al problema de transferencia del calor, se han obtenido una gran cantidad de datos, pero de entre ellos se puede destacar que la transferencia del calor por convección puramente forzada, es mayor en el codo con muelle insertado que con un codo convencional.

Pero se puede apreciar, que aunque la relación del número de Nusselt en función de Reynolds; para codo liso y codo con muelle, siempre es creciente. Cabe destacar que planteando una variable que siga la relación ($Nu_{\text{codo liso}} / Nu_{\text{codo muelle}}$), el Nusselt no siguen creciendo para cualquier valor de Reynolds. Por ello se aprecian los siguientes intervalos:

- Para Reynolds bajos no tiene un valor de Nusselt elevado, debido a que el flujo es tan bajo que no se hacen presentes las recirculaciones, transferencia del calor por conducción.
- Entre $80 < Re < 700$, la relación expresada anteriormente crece con el Reynolds. Esto es debido a que la aparición de los flujos secundarios se utiliza en beneficio de la transferencia del calor. Para $Re = 700$, se obtiene el máximo de la función, para los valores de Reynolds analizados.
- Mientras que entre $700 < Re < 2000$, la función expresada anteriormente baja con el Reynolds. Esto indica que el efecto de las fuerzas centrífugas para el codo liso, van tomando más importancia con respecto al efecto de los vórtices de Dean, y esto es más acusado cuanto mayor sea el número de Reynolds.

Cabría preguntarse si, para un número de Reynolds suficientemente grande, el cociente, ($Nu_{\text{codo muelle}} / Nu_{\text{codo liso}}$) podría hacerse menor que la unidad, en cuyo caso los vórtices de Dean en codo liso podrían ser tan poderosos como para inducir mayores coeficientes convectivos sobre el flujo, que los del swirl del codo con muelle integrado para el mismo número de Reynolds.

Por otro lado se ha desarrollado un estudio del gradiente de temperaturas entre la pared y el fluido para el codo liso y el codo con muelle; para el codo liso se ha apreciado una disminución drástica de la temperatura de la pared en el codo, que concuerda con el aumento del número de Nusselt que ocurre en el codo también.

Mientras que en el codo con muelle se distingue un gradiente de temperaturas que permanecerá paralelo y en el que la temperatura de la pared no sufre ninguna disminución, lo que concuerda con la constancia del número de Nusselt en el codo.

Capítulo 14: Líneas de proyectos futuros.

Los aspectos a tener en cuenta en siguientes proyectos podrían ser los siguientes:

- Hacer una herramienta para generar journals que permita obtener de forma paramétrica una geometría determinada, de un codo de 180°.
- Realizar un estudio simulando distintos fluidos de trabajo, ya que se ha utilizado únicamente agua, pero en la industria se trabaja con mezclas, como es agua y propilenglicol; lo que nos aporta un fluido mucho más viscoso. Para el uso de fluidos más viscosos esto llevaría a tener que utilizar Prandtl mayores.
- Además en nuestros ensayos se ha tomado una temperatura ambiental de 20°, la cual se puede modificar.
- Modelar el estudio del codo para flujos turbulentos, ya que para Reynolds mayores de 2.000 y en el caso de codo con muelle insertado incluso antes, se encuentra la etapa de transición del flujo. Por lo tanto se hace muy interesante plantear los distintos modelos viscosos para la resolución de los problemas. En este proyecto no se han tenido en cuenta, sabiendo que se iban a estudiar valores de Reynolds en régimen laminar.
- Al estudiar valores de Reynolds en régimen turbulento, permitirá poder analizar la variable que relaciona ($Nu_{\text{codo muelle}} / Nu_{\text{codo liso}}$), para valores de Reynolds muy altos y averiguar si esa variable alcanza un valor menor que la unidad, lo que propiciaría que los vórtices de Dean generasen esfuerzos convectivos mayores que los que se obtienen por la inserción del muelle, por lo que no sería conveniente instalar un muelle para esos hipotéticos rangos de Reynolds.

Bibliografía

- [1] F. Inc., "Gambit modeling guide."
- [2] F. Inc., "Gambit user's guide."
- [3] Antonio Viedma Robles, Mecanica de fluidos general. UPCT, 2009.
- [4] J. Pruvost, J. Legrand, "Numerical investigation of bend and torus flows- Part I. Effect of swirl motion on flow structure in U-Bend", Article in Chemical Engineering Science, 2004.
- [5] F. Inc., "Flow in Pipes-Chapter 8", 2004
- [6] Yu. Gelfgat, A. L. Yarin, P. Z. Bar-Yoseph, "Dean vortices-induced enhancement of mass transfer through an interface separating two immiscible liquids", American Institute of Physics, 2003.
- [7] F. Rütten, W. Schröder, M. Meinke, "Large-eddy simulation of low frequency oscillations of the Dean vortices in turbulent pipe bend flows", 2004.

ANEXOS

Anexo 1: Documento para la obtención de archivos .cas y .dat en el servidor del caso de Fricción para el codo con muelle insertado por medio del uso de un journal.

```
rc ProblemaFriccion1.cas.gz
solve/initialize/initialize-flow
/solve/monitors/residual/convergence-criteria
1e-4
1e-3
1e-3
1e-3
;
;****Re=5*****
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada.tre.paso7
no
no
yes
yes
no
0.00071772046827146
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12
yes
```

pressure

q

no

wcd problemafriccion_re5.cas.gz

define/models/unsteady-2nd-order

yes

;

;****Re=30*****

define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada.tre.paso7

no

no

yes

yes

no

0.00430632280962876

yes

solve/set/time-step 0.05

solve/dual-time-iterate 20 40

define/models/steady yes

solve/iterate 1000

file/export/ascii

prueba.txt

12

yes

pressure

q

no

```
wcd problemafriccion_re30.cas.gz
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;
;****Re=55*****
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada.tre.paso7
no
no
yes
yes
no
0.00789492515098606
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12

yes
pressure
q
no

wcd problemafriccion_re55.cas.gz
```

```
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;
;****Re=80*****
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada.tre.paso7
no
no
yes
yes
no
0.0114835274923434
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12

yes
pressure
q
no

wcd problemafriccion_re80.cas.gz
define/models/unsteady-2nd-order
yes
```

```
;
;****Re=100*****
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada.tre.paso7
no
no
yes
yes
no
0.0143544093654292
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12

yes
pressure
q
no

wcd problemafriccion_re100.cas.gz
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;
end
```

Anexo 2: Documento para la obtención de archivos .cas y .dat en el servidor del caso de Fricción para el codo sin muelle insertado por medio del uso de un journal.

```
rc CodoLisoQuad.cas.gz
solve/initialize/initialize-flow
/solve/monitors/residual/convergence-criteria
1e-4
1e-3
1e-3
1e-3
;
;****Re=5*****
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada
no
no
yes
yes
no
0.00071772046827146
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12
yes
```

```
pressure
q
no
wcd CodoLiso_Friccion_re5.cas.gz
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;
;****Re=30*****
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada
no
no
yes
yes
no
0.00430632280962876
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12
yes
pressure
q
no
wcd CodoLiso_Friccion_re30.cas.gz
```

```
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;
;****Re=55*****
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada
no
no
yes
yes
no
0.00789492515098606
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12
yes
pressure
q
no
wcd CodoLiso_Friccion_re55.cas.gz
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;
;****Re=80*****
```

```
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada
no
no
yes
yes
no
0.0114835274923434
yes
solve/set/time-step 0.05
solve/dual-time-iterate 20 40
define/models/steady yes
solve/iterate 1000
file/export/ascii
prueba.txt
12
yes
pressure
q
no
wcd CodoLiso_Friccion_re80.cas.gz
define/models/unsteady-2nd-order
yes
;
;****Re=100****
;
define/boundary-conditions/velocity-inlet entrada
no
no
```

yes

yes

no

0.0143544093654292

yes

solve/set/time-step 0.05

solve/dual-time-iterate 20 40

define/models/steady yes

solve/iterate 1000

file/export/ascii

prueba.txt

12

yes

pressure

q

no

wcd CodoLiso_Friccion_re100.cas.gz

define/models/unsteady-2nd-order

yes

;

end

Anexo 3: Documentos para el procesamiento de las variables a extraer para el estudio del caso de Fricción para codo con muelle insertado

```
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re5.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do                                     cx-set-toggle-button
"Export*Frame1*Table1*Frame10(Location)*ToggleBox10(Location)*Cell Center" #f)
(cx-gui-do                                     cx-activate-item
"Export*Frame1*Table1*Frame10(Location)*ToggleBox10(Location)*Cell Center")
(cx-gui-do cx-set-toggle-button "Export*Frame1*Table1*Frame1(File Type)*ToggleBox1(File
Type)*ASCII" #f)
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame1(File Type)*ToggleBox1(File
Type)*ASCII")
(cx-gui-do                                     cx-set-toggle-button
"Export*Frame1*Table1*Frame10(Location)*ToggleBox10(Location)*Node" #f)
(cx-gui-do                                     cx-activate-item
"Export*Frame1*Table1*Frame10(Location)*ToggleBox10(Location)*Node")
(cx-gui-do                                     cx-set-toggle-button
"Export*Frame1*Table1*Frame8(Delimiter)*ToggleBox8(Delimiter)*Space" #f)
(cx-gui-do                                     cx-activate-item
"Export*Frame1*Table1*Frame8(Delimiter)*ToggleBox8(Delimiter)*Space")
(cx-gui-do                                     cx-set-toggle-button
"Export*Frame1*Table1*Frame10(Location)*ToggleBox10(Location)*Cell Center" #f)
(cx-gui-do                                     cx-activate-item
"Export*Frame1*Table1*Frame10(Location)*ToggleBox10(Location)*Cell Center")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
```

```

(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re5_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re5_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re30.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re30_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re30_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re55.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")

```

```

(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re55_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re55_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re80.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re80_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re80_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re100.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")

```

```

(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re100_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re100_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re200.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")

```

```

(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re200_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re200_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re300.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re300_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re300_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re400.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0 11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0 11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re400_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re400_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re500.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")

```

```

(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re500_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re500_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")

```

```

(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re600.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '(27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(0
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re600_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '(51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re600_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re700.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re700_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re700_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re800.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re800_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re800_s2.dat")

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re900.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re900_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re900_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re1000.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1000_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")

```

```

(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1000_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re1250.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '(
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1250_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")

```

```

(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1250_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re1500.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")

```

```

(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1500_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1500_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re1750.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1750_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1750_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-activate-item "Warning*OK")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "problemafriccion_re2000.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 27))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")

```

```
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re2000_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 51))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re2000_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*WriteSubMenu*Stop Journal")
;
;acabar
end
```

Anexo 4: Documentos para el procesamiento de las variables a extraer para el estudio del caso de Fricción para codo sin muelle insertado

```
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re5.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do
                                                                                               cx-set-toggle-button
"Export*Frame1*Table1*Frame8(Delimiter)*ToggleBox8(Delimiter)*Space" #f)
(cx-gui-do
                                                                                               cx-activate-item
"Export*Frame1*Table1*Frame8(Delimiter)*ToggleBox8(Delimiter)*Space")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re5_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re5_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re30.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re30_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re30_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re55.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re55_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re55_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
;
;
;
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re80.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re80_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re80_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re100.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re100_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re100_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;

```

```

;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re200.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re200_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re200_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re300.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re300_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re300_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re400.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re400_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re400_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re500.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re500_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re500_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re600.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re600_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re600_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;

```

```

;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re700.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re700_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re700_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re800.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re800_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re800_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re900.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re900_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re900_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re1000.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1000_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1000_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re1250.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1250_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1250_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;

```

```

;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re1500.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1500_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1500_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re1750.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))

```

```

(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1750_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re1750_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*ReadSubMenu*Case & Data...")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "codoliso_friccion_re2000.cas.gz")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)" '( 0
11 57))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame9*List9(Functions to Write)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '())
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "MenuBar*FileMenu*Export...")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")

```

```
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re2000_s1.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 5 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-set-list-selections "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)" '( 6))
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*Frame1*Table1*Frame2*List2(Surfaces)")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton1(OK)")
(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "re2000_s2.dat")
(cx-gui-do cx-activate-item "Select File*OK")
(cx-gui-do cx-activate-item "Export*PanelButtons*PushButton2(Cancel)")
;
;
;
end
```

