



Comparativa de Modelación CFD: Casos Tipo Industria Minera en *OpenFOAM* vs ANSYS Fluent

Matias Gonzalo Sepulveda Ortiz

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dr.-ing. Cristian Cuevas.
Profesor asistente:
Ing. Daniel Sacasas
Julio 2026
Concepción, Chile

Agradecimientos

Me gustaría partir agradeciendo primeramente a Dios por permitirme las oportunidades y darme las cualidades que me trajeron hasta este punto de mi carrera profesional.

Quiero agradecer a mi familia, por apoyarme en cada paso de este camino desde el día uno, a mi abuela por sembrar en mí la semilla del estudio, a mi tía por todos los onces antes de los certámenes y las celebraciones después de semestre, a mi padrino por bancarme y ayudarme en situación de la carrera. Y especialmente a mi padre cuyo esfuerzo palabra de aliento, enseñanza y guía siempre estuvieron presentes y a mi madre, quién me acompaña cada día siendo un ejemplo de resiliencia y perseverancia, y sin quien no podría haber llegado tan lejos. No podría haber escogido mejores padres.

Agradecer a todos aquellos profesores y colegas que, desde un ámbito profesional pusieron toda su disposición a enseñarme y guiarme, especialmente a Emilio quién se ha convertido en más que un colega en este tiempo.

A mi pareja, quien estuvo desde el primer año y me vio crecer, madurar y formarme como ingeniero, gracias por cada palabra de aliento, ánimo, apoyo y paciencia. Tanto ella como su familia son y será siempre una parte importante de este proceso.

A mis amigos, quienes han estado ahí desde la enseñanza básica y aún hoy puedo festejar con ellos cada semestre aprobado, por las noches de juegos, de desahogo, por los “bromomentos”, los cumpleaños, acampadas risas y llantos, gracias “MiaFamilia”.

A los amigos que se hicieron en el camino, cuya compañía es parte fundamental de mi carrera profesional y con quienes disfrute y sufrí cada ramo, quienes hicieron más amena cada noche de estudio, no podría haber tenido mejores compañeros, gracias “WenaLosXikillos”, en especial a joaco por... Gracias.

Finalmente, te agradezco a ti como lector, que no haces de este un conocimiento olvidado.

Desde lo más profundo de mi corazón y alma, muchas gracias.

Resumen

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta indispensable en la industria minera para optimizar el diseño de infraestructuras. Sin embargo, la dependencia de *softwares* comerciales como *ANSYS Fluent* conlleva elevados gastos operativos en licencias comerciales, posicionando a *OpenFOAM* como una alternativa de código abierto atractiva por su escalabilidad sin costos de licenciamiento. Pese a esto, aún existe incertidumbre sobre la precisión de *OpenFOAM* frente a estándares comerciales al simular fluidos complejos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue comparar la fiabilidad técnica y el rendimiento computacional de ambas plataformas mediante la evaluación de dos escenarios comunes en la minería: un modelo en régimen permanente de transferencia de calor en tuberías y un modelo transitorio multifásico para el transporte de relaves.

Para comparar estrictamente los algoritmos de resolución, se emplearon mallas poliédricas idénticas generadas en *ANSYS Meshing*. Las discrepancias en los perfiles térmicos, campos de velocidad y tiempos de cómputo se cuantificaron utilizando el Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE). En el régimen estacionario térmico, *OpenFOAM* demostró una equivalencia técnica sobresaliente, calculando el equilibrio de temperaturas con desviaciones inferiores a 0,3 °C y procesando las ecuaciones en un 65% menos de tiempo que *Fluent*. Por el contrario, en el modelo transitorio multifásico (método VOF), las diferencias en la captura de la interfaz generaron discrepancias numéricas en *OpenFOAM*, induciendo errores cinemáticos del 27,82 % en la aproximación bidimensional, los cuales solo pudieron reducirse a un 9.5% en un dominio tridimensional tras una exhaustiva sintonización de esquemas limitadores de gradiente.

Los hallazgos demostraron que la viabilidad técnica de sustituir el estándar comercial por código abierto depende directamente del régimen de flujo modelado. Se concluye que *OpenFOAM* es una herramienta financieramente óptima y de alta precisión para estudios termodinámicos estacionarios, pero su inestabilidad transitoria frente a fuertes gradientes de presión hidrostática limita su aplicación directa en procesos de transporte de pulpas. Superar esta limitación en ingeniería de detalle exigirá en el futuro una validación empírica en laboratorio y el desarrollo de funciones de amortiguación interna en los solucionadores de código abierto.

Abstract

Computational Fluid Dynamics (CFD) is an indispensable tool in the mining industry for optimizing infrastructure design. However, the reliance on commercial software such as ANSYS Fluent entails high operating expenses for commercial licenses, positioning *OpenFOAM* as an attractive open-source alternative due to its scalability without licensing costs. Despite this, there is still uncertainty regarding the accuracy of *OpenFOAM* compared to commercial standards when simulating complex fluids. Therefore, the objective of this study was to compare the technical reliability and computational performance of both platforms by evaluating two common scenarios in mining: a steady-state model of heat transfer in pipes and a transient multiphase model for tailings transport.

To strictly compare the solving algorithms, identical polyhedral meshes generated in ANSYS Meshing were used. The discrepancies in the thermal profiles, velocity fields, and computation times were quantified using the Normalized Root Mean Square Error (NRMSE). In the thermal steady state, *OpenFOAM* demonstrated outstanding technical equivalence, calculating the temperature equilibrium with deviations of less than 0.3 °C and processing the equations in 65% less time than Fluent. Conversely, in the transient multiphase model (VOF method), differences in interface capturing generated numerical discrepancies in *OpenFOAM*, inducing kinematic errors of 27.82% in the two-dimensional approximation, which could only be reduced to 9.5% in a three-dimensional domain after exhaustive tuning of gradient limiter schemes.

The findings demonstrated that the technical feasibility of replacing the commercial standard with open-source software depends directly on the modeled flow regime. It is concluded that *OpenFOAM* is a financially optimal and highly accurate tool for steady-state thermodynamic studies, but its transient instability in the face of strong hydrostatic pressure gradients limits its direct application in slurry transport processes. Overcoming this limitation in detailed engineering will require future empirical laboratory validation and the development of internal damping functions in open-source solvers.

Contenidos

Agradecimientos	<i>ii</i>
Resumen.....	<i>iii</i>
Abstract	<i>iv</i>
Lista de Figuras	1
Lista de Tablas.....	11
Nomenclatura	12
Acrónimos y siglas	12
Símbolos griegos	12
Otros símbolos	13
Introducción	14
1.1 Contexto	14
1.2 Estado del arte.....	15
1.3 Hipótesis.....	16
1.4 Objetivos.....	16
1.4.1 Objetivo general.....	16
1.4.2 Objetivos específicos	16
1.5 Descripción del trabajo	17
1.6 Caso 1: Modelo en régimen permanente	18
1.7 Caso 2: Modelo en régimen transitorio multifásico	18
2 Marco teórico.....	19
2.1 Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	19
2.2 Ecuaciones Gobernantes del Flujo	19
2.3 Modelación de la Turbulencia (RANS)	19
2.4 Modelación Multifásica: Método VOF (<i>Volume of Fluid</i>).....	20
2.5 Reología de Fluidos No Newtonianos: Plástico de Bingham	20
2.6 Algoritmos de Acoplamiento Presión-Velocidad	20
3 Metodología	21
3.1 Modelación en Régimen Permanente (Flujo con Transferencia de Calor)	21
3.1.1 Descripción del caso de estudio	21
3.1.2 Geometría	22

3.1.3	Mallado y exportación de la malla	23
3.1.4	Configuración y post-procesamiento en ANSYS Fluent	25
3.1.5	Importación y configuración en <i>OpenFOAM</i>	26
3.2	Modelación en Régimen Transitorio Multifásico (Fluido No Newtoniano)	28
3.2.1	Caso Transitorio 2D	28
3.2.2	Caso Transitorio 3D	31
4	Resultados.....	34
4.1	Modelo en régimen permanente (Flujo con Transferencia de Calor)	34
4.2	Modelación en régimen transitorio multifásico (Fluido No Newtoniano)	38
4.2.1	Resultados Transitorios 2D	38
4.2.2	Resultados Transitorios 3D	42
4.2.3	Costo computacional transitorio.....	46
5	Discusión.....	47
5.1	Interpretación de los Resultados y Evaluación de la Hipótesis.....	47
5.2	Contextualización con el Estado del Arte	47
5.2.1	Régimen permanente	47
5.2.2	Régimen transitorio	48
5.3	Viabilidad comercial	48
5.4	Limitaciones del Estudio.....	49
5.5	Implicaciones y Trabajo Futuro	49
6	Conclusiones.....	51
6.1	Conclusiones generales	51
6.1.1	Modelo en régimen permanente	52
6.1.2	Modelo transitorio (Tanto 2D como 3D).....	52
6.1.3	Recomendaciones de replicabilidad y trabajo futuro	52
	Referencias.....	53
7	Anexo	54
7.1	Configuraciones estacionarias ANSYS	54
7.1.1	Geometría	54
7.1.2	Mallado	58
7.1.3	Configuración (Set-Up).....	68
7.2	Configuración y archivos estacionarios <i>OpenFOAM</i>	76
7.2.1	Condiciones iniciales y de borde.....	76
7.2.2	Archivos de control	93
7.2.3	Constantes.....	96
7.2.4	Control de residuos.....	100
7.3	Resultados caso estacionario	101

7.4	Configuraciones ANSYS Fluent caso transitorio 2D	108
7.4.1	Geometría	108
7.4.2	Mallado	108
7.4.3	Configuración caso aire relave (Set Up)	109
7.4.4	Configuración caso aire agua (Set Up)	117
7.5	Configuraciones <i>OpenFOAM</i> caso transitorio 2D relave aire	117
7.5.1	Carpeta system	117
7.5.2	Carpeta Constant	120
7.5.3	Carpeta 0 (Condiciones iniciales)	121
7.6	Configuraciones <i>OpenFOAM</i> caso transitorio 2D agua aire	126
7.7	Configuraciones ANSYS Fluent caso transitorio 3D	127
7.7.1	Geometría	127
7.7.2	Mallado	128
7.7.3	Configuración inicial (Set Up).....	132
7.7.4	Segunda configuración.....	141
7.8	Archivos complementarios.	141
7.9	Configuraciones <i>OpenFOAM</i> caso transitorio 3D	143
7.9.1	Primera iteración.....	143
7.9.2	Segunda iteración	153
7.9.3	Tercera iteración	154
7.9.4	Cuarta iteración	155
7.10	Resultados <i>OpenFOAM</i> caso transitorio 3D (Fracción volumétrica).....	158
7.10.1	Primera y segunda iteración	158
7.10.2	Tercera y cuarta iteración.....	164
7.11	Resultados ANSYS caso transitorio 3D (Fracción volumétrica).....	169
7.11.1	Primera y segunda iteración	169
7.12	Resultados <i>OpenFOAM</i> caso transitorio 3D (Velocidad	175
7.12.1	Primera y segunda iteración	175
7.12.2	Tercera y cuarta iteración.....	181
7.13	Resultados ANSYS caso transitorio 3D (Velocidad)	186
7.13.1	Primera y segunda iteración	186
7.14	Resultados <i>OpenFOAM</i> caso transitorio 3D (Presiones).....	191
7.14.1	Primera y segunda iteración	191
7.14.2	Tercera y cuarta iteración.....	196
7.15	Resultados ANSYS caso transitorio 3D (Presión)	201
7.15.1	Primera y segunda iteración	201

Lista de Figuras

Figura 1: Representación general caso de estudio	21
Figura 2: Dimensiones externas mínimas para flujo completamente desarrollado	22
Figura 3: Malla generada tubería 6" con 1" de aislante	25
Figura 4: Malla tubería 6" con 1" de aislante acercamiento.....	25
Figura 5: Monitores de velocidad para cajón de traspaso	29
Figura 6: Contorno de temperatura tubería 6" 1" de aislante ANSYS	34
Figura 7: Contorno de temperatura tubería 6" 1" de aislante OpenFOAM.....	34
Figura 8: Contorno de temperatura tubería 6" 1/2" de aislante ANSYS	35
Figura 9: Contorno de temperatura tubería 6" 1/2" de aislante OpenFOAM.....	35
Figura 10: Contorno de temperatura tubería 6" sin aislante ANSYS	35
Figura 11: Contorno de temperatura tubería 6" sin aislante OpenFOAM.....	35
Figura 12: Residuos estacionarios ANSYS	37
Figura 13: Residuos obtenidos en OpenFOAM.....	37
Figura 14: Fracción volumétrica agua ANSYS instante final caso transitorio 2D	39
Figura 15: Fracción volumétrica agua OpenFOAM instante final caso transitorio 2D	39
Figura 16: Perfil de velocidades agua ANSYS instante final caso transitorio 2D	39
Figura 17: Perfil de velocidades agua OpenFOAM instante final caso transitorio 2D	39
Figura 18: Contorno de presiones agua ANSYS instante final caso transitorio 2D	39
Figura 19: Contorno de presiones agua OpenFOAM instante final caso transitorio 2D	39
Figura 20: Fracción volumétrica relave ANSYS instante final caso transitorio 2D	40
Figura 21: Fracción volumétrica relave OpenFOAM instante final caso transitorio 2D	40
Figura 22: Perfil de velocidades relave ANSYS instante final caso transitorio 2D	40
Figura 23: Perfil de velocidades relave OpenFOAM instante final caso transitorio 2D	40
Figura 24: Contorno de presiones relave ANSYS instante final caso transitorio 2D	40
Figura 25: Contorno de presiones relave OpenFOAM instante final caso transitorio 2D ..	40
Figura 26: Nube de puntos generada para caso transitorio 2D	41
Figura 27: Perfil de velocidades segundo 0.6 primera iteración ANSYS	44
Figura 28: Perfil de velocidades segundo 0.6 primera iteración OpenFOAM	44
Figura 29: Perfil de velocidades segundo 0.6 segunda iteración ANSYS	44
Figura 30: Perfil de velocidades segundo 0.6 segunda iteración OpenFOAM.....	44
Figura 31: Perfil de velocidades segundo 0.6 tercera iteración ANSYS	44
Figura 32: Perfil de velocidades segundo 0.6 tercera iteración OpenFOAM	44
Figura 33: Perfil de velocidades segundo 0.6 cuarta iteración ANSYS.....	45
Figura 34: Perfil de velocidades segundo 0.6 cuarta iteración OpenFOAM.....	45
Figura 35: Perfil de velocidades segundo 0.6 quinta iteración ANSYS	45
Figura 36: Perfil de velocidades segundo 0.6 quinta iteración OpenFOAM.....	45
Figura 37: Dimensiones exteriores generales para el dominio	54
Figura 38: Dimensiones de tubería 6" con distintos espesores de aislante	55
Figura 39: Dimensiones de tubería 4" con distintos espesores de aislante	55
Figura 40: Dimensiones de tubería 3" con distintos espesores de aislante	55
Figura 41: Named selection "Aire inlet"	56

Figura 42: Named selection "Aire outlet"	56
Figura 43: Named selection "Aire X"	56
Figura 44: Named selection "Aire Y"	57
Figura 45: Named selection "Agua inlet"	57
Figura 46: Named selection "Agua outlet"	57
Figura 47: Configuración de mallado paso 1	58
Figura 48: Configuración de mallado paso 2	59
Figura 49: Configuración de mallado paso 3	59
Figura 50: Configuración de mallado paso 4	60
Figura 51: Configuración de mallado paso 5	60
Figura 52: Configuración de mallado paso 6	61
Figura 53: Configuración de mallado paso 7	61
Figura 54: Configuración de mallado paso 8	62
Figura 55: Configuración de mallado paso 9	62
Figura 56: Configuración de mallado paso 10	63
Figura 57: Malla tubería 6" con 1" de aislamiento	63
Figura 58: Malla tubería 6" con 1" de aislamiento acercamiento	63
Figura 59: Malla tubería 6" con 1/2" de aislamiento	64
Figura 60: Malla tubería 6" con 1/2" de aislamiento acercamiento	64
Figura 61: Malla tubería 6" sin aislamiento	64
Figura 62: Malla tubería 6" sin aislamiento acercamiento	65
Figura 63: Malla tubería 4" con 1" de aislamiento	65
Figura 64: Malla tubería 4" con 1" de aislamiento acercamiento	65
Figura 65: Malla tubería 4" con 1/2" de aislamiento	65
Figura 66: Malla tubería 4" con 1/2" de aislamiento acercamiento	66
Figura 67: Malla tubería 4" sin aislamiento	66
Figura 68: Malla tubería 4" sin aislamiento acercamiento	66
Figura 69: Malla tubería 3" 1" de aislamiento	66
Figura 70: Malla tubería 3" 1" de aislamiento acercamiento	67
Figura 71: Malla tubería 3" 1/2" de aislamiento	67
Figura 72: Malla tubería 3" 1/2" de aislamiento	67
Figura 73: Malla tubería 3" sin aislamiento	67
Figura 74: Malla tubería 3" sin aislamiento acercamiento	68
Figura 75: Configuración general de fluent	68
Figura 76: Configuración modelo de turbulencia	69
Figura 77: Materiales utilizados por fluent	69
Figura 78: Propiedades del agua en fluent	69
Figura 79: Propiedades del aire en fluent	70
Figura 80: Propiedades del aislante en fluent	70
Figura 81: Propiedades del acero en fluent	70
Figura 82: Condiciones de borde en fluent	71
Figura 83: Configuración entrada de agua en fluent	71
Figura 84: Configuración entrada de aire en fluent	71
Figura 85: Configuración entrada de aire superior e inferior en fluent	72

Figura 86: Configuración salida de agua en fluent	72
Figura 87: Configuración salida de aire en fluent	73
Figura 88: Configuración paredes en fluent	73
Figura 89: Configuración de solver y esquemas en fluent.....	74
Figura 90: Factores de relajación en fluent	74
Figura 91: Configuración de residuos en fluent.....	75
Figura 92: Configuración de simulación en fluent.....	75
Figura 93: Contorno de temperatura tubería 4" con 1" aislante ANSYS	101
Figura 94: Contorno de temperatura tubería 4" con 1" aislante OpenFOAM	102
Figura 95: Contorno de temperatura tubería 4" con 1/2" aislante ANSYS	102
Figura 96: Contorno de temperatura tubería 4" con 1/2" aislante OpenFOAM	103
Figura 97: Contorno de temperatura tubería 4" sin aislante ANSYS	104
Figura 98: Contorno de temperatura tubería 4" sin aislante OpenFOAM	104
Figura 99: Contorno de temperatura tubería 3" con 1" aislante ANSYS	105
Figura 100: Contorno de temperatura tubería 3" con 1" aislante OpenFOAM	105
Figura 101: Contorno de temperatura tubería 3" con 1/2" aislante ANSYS	106
Figura 102: Contorno de temperatura tubería 3" con 1/2" aislante OpenFOAM	106
Figura 103: Contorno de temperatura tubería 3" sin aislante ANSYS.....	107
Figura 104: Contorno de temperatura tubería 3" sin aislante OpenFOAM	107
Figura 105: Geometría caso transitorio 2D	108
Figura 106: Mallado cajón de traspaso	108
Figura 107: Inflation layer cajón sección 1	109
Figura 108: Inflation layer cajón sección 2	109
Figura 109: Inflation layer cajón sección 3	109
Figura 110: Configuración caso transitorio 2D parte 1.....	110
Figura 111: Configuración caso transitorio 2D parte 2.....	110
Figura 112: Configuración caso transitorio 2D parte 3.....	111
Figura 113: Configuración caso transitorio 2D parte 4.....	111
Figura 114: Configuración caso transitorio 2D parte 5.....	112
Figura 115: Configuración caso transitorio 2D parte 6.....	112
Figura 116: Configuración caso transitorio 2D parte 7.....	113
Figura 117: Configuración caso transitorio 2D parte 8.....	113
Figura 118: Configuración caso transitorio 2D parte 9.....	114
Figura 119: Configuración caso transitorio 2D parte 10.....	114
Figura 120: Configuración caso transitorio 2D parte 11.....	115
Figura 121: Configuración caso transitorio 2D parte 12	115
Figura 122: Configuración caso transitorio 2D parte 13	116
Figura 123: Configuración caso transitorio 2D parte 14	116
Figura 124: Geometría caso transitorio 3D parte 1	127
Figura 125: Geometría caso transitorio 3D parte 2	128
Figura 126: Mallado caso transitorio 3D parte 1.....	128
Figura 127: Mallado caso transitorio 3D parte 2.....	129
Figura 128: Mallado caso transitorio 3D parte 3.....	129
Figura 129: Mallado caso transitorio 3D parte 4.....	130

Figura 130: Mallado caso transitorio 3D parte 5.....	130
Figura 131: Mallado caso transitorio 3D parte 6.....	131
Figura 132: Mallado caso transitorio 3D parte 7.....	131
Figura 133: Configuración caso transitorio 3D parte 1	132
Figura 134: Configuración caso transitorio 3D parte 2	132
Figura 135: Configuración caso transitorio 3D parte 3	133
Figura 136: Configuración caso transitorio 3D parte 4	133
Figura 137: Configuración caso transitorio 3D parte 5	134
Figura 138: Configuración caso transitorio 3D parte 6	134
Figura 139: Configuración caso transitorio 3D parte 7	135
Figura 140: Configuración caso transitorio 3D parte 8	135
Figura 141: Configuración caso transitorio 3D parte 9	136
Figura 142: Configuración caso transitorio 3D parte 10	136
Figura 143: Configuración caso transitorio 3D parte 11.....	137
Figura 144: Configuración caso transitorio 3D parte 12	137
Figura 145: Configuración caso transitorio 3D parte 13	138
Figura 146: Configuración caso transitorio 3D parte 14	139
Figura 147: Configuración caso transitorio 3D parte 13	139
Figura 148: Configuración caso transitorio 3D parte 14	140
Figura 149: Configuración caso transitorio 3D parte 15	140
Figura 150: Configuración caso transitorio 3D parte 16	141
Figura 151: Cambios en configuración segunda iteración caso transitorio 3D	141
Figura 152 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.1.....	159
Figura 153 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.1	159
Figura 154 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.2.....	159
Figura 155 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.2.....	159
Figura 156 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.3.....	159
Figura 157 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.3.....	159
Figura 158 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.4.....	160
Figura 159 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.4	160
Figura 160 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.5.....	160
Figura 161 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.5.....	160
Figura 162 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.6.....	160
Figura 163 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.6.....	160
Figura 164 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.7.....	161
Figura 165 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.7	161
Figura 166 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.8.....	161
Figura 167 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.8.....	161
Figura 168 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.9.....	161
Figura 169 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.9.....	161
Figura 170 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.0.....	162
Figura 171 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.0.....	162
Figura 172 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.1.....	162
Figura 173 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.1	162

Figura 262 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.1	179
Figura 263 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.1	179
Figura 264 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.2	179
Figura 265 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.2	179
Figura 266 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.3	180
Figura 267 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.3	180
Figura 268 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.4	180
Figura 269 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.4	180
Figura 270 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.5	180
Figura 271 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.5	180
Figura 272 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.1	182
Figura 273 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.1	182
Figura 274 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.2	182
Figura 275 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.2	182
Figura 276 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.3	182
Figura 277 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.3	182
Figura 278 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.4	183
Figura 279 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.4	183
Figura 280 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.5	183
Figura 281 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.5	183
Figura 282 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.6	183
Figura 283 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.6	183
Figura 284 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.7	184
Figura 285 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.7	184
Figura 286 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.8	184
Figura 287 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.8	184
Figura 288 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.9	184
Figura 289 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.9	184
Figura 290 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.0	185
Figura 291 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.0	185
Figura 292 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.1	185
Figura 293 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.1	185
Figura 294 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.2	185
Figura 295 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.2	185
Figura 296 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.3	186
Figura 297 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.3	186
Figura 298 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.4	186
Figura 299 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.4	186
Figura 300 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.5	186
Figura 301 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.5	186
Figura 302 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.1	187
Figura 303 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.1	187
Figura 304 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.2	187
Figura 305 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.2	187

Figura 306 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.3	187
Figura 307 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.3	187
Figura 308 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.4	188
Figura 309 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.4	188
Figura 310 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.5	188
Figura 311 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.5	188
Figura 312 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.6	188
Figura 313 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.6	188
Figura 314 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.7	189
Figura 315 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.7	189
Figura 316 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.8	189
Figura 317 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.8	189
Figura 318 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.9	189
Figura 319 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.9	189
Figura 320 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.0	190
Figura 321 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.0	190
Figura 322 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.1	190
Figura 323 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.1	190
Figura 324 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.2	190
Figura 325 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.2	190
Figura 326 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.3	191
Figura 327 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.3	191
Figura 328 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.4	191
Figura 329 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.4	191
Figura 330 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.5	191
Figura 331 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.5	191
Figura 332 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.1	192
Figura 333 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.1	192
Figura 334 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.2	192
Figura 335 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.2	192
Figura 336 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.3	192
Figura 337 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.3	192
Figura 338 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.4	192
Figura 339 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.4	192
Figura 340 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.5	193
Figura 341 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.5	193
Figura 342 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.6	193
Figura 343 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.6	193
Figura 344 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.7	193
Figura 345 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.7	193
Figura 346 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.8	193
Figura 347 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.8	193
Figura 348 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.9	194
Figura 349 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.9	194

Figura 394 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.2	202
Figura 395 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.2	202
Figura 396 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.3	202
Figura 397 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.3	202
Figura 398 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.4	203
Figura 399 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.4	203
Figura 400 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.5	203
Figura 401 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.5	203
Figura 402 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.6	203
Figura 403 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.6	203
Figura 404 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.7	204
Figura 405 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.7	204
Figura 406 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.8	204
Figura 407 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.8	204
Figura 408 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.9	204
Figura 409 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.9	204
Figura 410 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.0	205
Figura 411 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.0	205
Figura 412 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.1	205
Figura 413 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.1	205
Figura 414 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.2	205
Figura 415 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.2	205
Figura 416 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.3	206
Figura 417 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.3	206
Figura 418 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.4	206
Figura 419 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.4	206
Figura 420 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.5	206
Figura 421 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.5	206

Lista de Tablas

Tabla 1: Datos del caso.....	21
Tabla 2: Dimensiones principales tuberías caso estacionario.....	23
Tabla 3: Alturas primera capa por caso de estudio.....	24
Tabla 4: Propiedades de los fluidos caso transitorio 2D	30
Tabla 5: Configuraciones caso transitorios 2D ANSYS y <i>OpenFOAM</i>	30
Tabla 6: Propiedades de los fluidos caso transitorio 3D	31
Tabla 7: Configuraciones entre iteraciones caso transitorio 3D	32
Tabla 8: Comparación de temperaturas en Celsius caso estacionario	36
Tabla 9: Tiempos de cálculo para el caso en régimen permanente	37
Tabla 10 Error porcentual entre ANSYS y <i>OpenFOAM</i> casos transitorios 2D	41
Tabla 11 Velocidades en monitores del cajón de traspaso ANSYS y <i>OpenFOAM</i>	42
Tabla 12: Error porcentual de presión casos transitorios 3D	45
Tabla 13: Error porcentual de velocidad casos transitorios 3D	45
Tabla 14: Error porcentual de fracción volumétrica casos transitorios 3D.....	46
Tabla 15: Tiempos de cálculo para los casos transitorios.....	46

Nomenclatura

Acrónimos y siglas

CFD	: Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
CHT	: Transferencia de Calor Conjugada (Conjugate Heat Transfer)
DIC	: Diagonal Incomplete Cholesky (Precondicionador matricial)
DNS	: Simulación Numérica Directa (Direct Numerical Simulation)
FMV	: Método de Volúmenes Finitos (Finite Volume Method)
GAMG	: Generalized Geometric-Algebraic Multi-Grid (Algoritmo de resolución matricial)
GUI	: Interfaz Gráfica de Usuario (Graphical User Interface)
HPC	: Computación de Alto Rendimiento (High Performance Computing)
HRIC	: Captura de Interfaz de Alta Resolución (High Resolution Interface Capturing)
MPI	: Interfaz de Paso de Mensajes (Message Passing Interface)
MULES	: Multidimensional Universal Limiter with Explicit Solution
NRMSE	: Error Cuadrático Medio Normalizado (Normalized Root Mean Square Error)
PCG	: Preconditioned Conjugate Gradient (Algoritmo de resolución matricial)
PIMPLE	: Algoritmo combinado PISO-SIMPLE para régimen transitorio en <i>OpenFOAM</i>
PISO	: Pressure-Implicit with Splitting of Operators
RANS	: Ecuaciones de Navier-Stokes Promediadas por Reynolds
SIMPLE	: Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
VOF	: Volumen de Fluido (Volume of Fluid)

Símbolos griegos

α	: Fracción de volumen o volumétrica de una fase (Método VOF)
γ	: Tasa de deformación en fluidos no newtonianos
ϵ	: Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta
μ	: Viscosidad dinámica o viscosidad plástica del fluido
ν	: Viscosidad cinemática
ρ	: Densidad del material o de la mezcla multifásica
σ	: Tensión superficial
τ	: Tensor de esfuerzos / Esfuerzo de corte aplicado

τ_0 : Esfuerzo de fluencia (Yield stress) para modelo plástico de Bingham

Otros símbolos

C_p : Calor específico

F : Fuerzas de cuerpo y superficie aplicadas al fluido

g : Aceleración de la gravedad

k : Energía cinética turbulenta / Índice de consistencia reológica (Modelo de Bingham)

n : Índice de comportamiento de flujo (Power-Law Index)

p : Presión estática o presión cinemática

Pr : Número de Prandtl

T : Temperatura

t : Tiempo de flujo o paso de tiempo en simulación transitoria

U : Vector de velocidad del fluido (*OpenFOAM*)

v : Componente direccional de velocidad del flujo

Introducción

1.1 Contexto

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) constituye una rama avanzada de la mecánica de fluidos dedicada al análisis numérico de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados. En la actualidad, el CFD es una herramienta indispensable en las industrias de minería, energía y manufactura, debido a su capacidad para resolver sistemas de ecuaciones no lineales que, mediante métodos tradicionales, resultarían inviables en términos de complejidad, costo y tiempo. Actualmente, ANSYS Fluent se posiciona como el estándar comercial de referencia debido a su robusto soporte técnico. En contraste, *OpenFOAM* emerge como la alternativa de código abierto más utilizada a nivel mundial, permitiendo el uso y desarrollo de simulaciones sin las restricciones de costo que imponen las licencias propietarias.

La dependencia de soluciones comerciales implica gastos operativos significativos, mientras que *OpenFOAM* representa una oportunidad de optimización financiera para empresas como TNA Engineering, permitiendo la escalabilidad de simulaciones en paralelo sin costos adicionales por núcleo de procesamiento. Desde una perspectiva socioambiental, la precisión en estas herramientas es vital para garantizar la seguridad en el transporte de fluidos críticos y la eficiencia energética. Desde un punto de vista tecnológico, predecir el comportamiento de fluidos complejos, como pulpas mineras o relaves, permite optimizar infraestructuras, reducir riesgos operacionales y aumentar la vida útil de los equipos.

La literatura comparativa indica que, aunque ambos programas entregan resultados similares, *OpenFOAM* tiende a ser menos conservador, evidenciando mayores rangos de valores y dispersión de datos. Además, presenta una mayor sensibilidad a la calidad del mallado, siendo menos robusto que Fluent ante celdas con altos factores de deformación (skewness). Investigaciones previas han detectado discrepancias críticas de hasta un 27% en magnitudes de velocidad en puntos equivalentes (Pogorelow Morales, 2021). Estas diferencias generan una incertidumbre técnica que limita la adopción directa de herramientas de código abierto en ingeniería de detalle sin una validación previa de sus capacidades predictivas.

Pese a estos hallazgos, persiste el desafío de estandarizar criterios de fiabilidad para casos específicos de la industria minera nacional, particularmente en modelos multifásicos (VOF) y flujos con transferencia de calor. Existe una necesidad crítica de cuantificar las discrepancias existentes al configurar fluidos no newtonianos en entornos de código abierto frente a los modelos nativos de Fluent. Por tanto, este estudio busca establecer las capacidades y limitaciones de *OpenFOAM* para sentar las bases de una biblioteca interna de simulación en TNA, asegurando que el flujo de trabajo cumpla con los estándares de fiabilidad industrial exigidos para proyectos de alta complejidad técnica.

1.2 Estado del arte

La validación de plataformas de código abierto como alternativas viables a los estándares comerciales ha sido un tema de constante interés en la comunidad científica orientada a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). En los últimos años, diversos autores han evaluado las discrepancias entre ANSYS Fluent y *OpenFOAM*.

En 2016, Welahettige y Vaagsaether demostraron la sensibilidad de *OpenFOAM* ante la calidad de la malla, presentando divergencias con un factor de deformación (skewness) máximo de 0.78, mientras que ANSYS Fluent logró converger con valores de hasta 0.93. Posteriormente, Tisovská et al. (2017) evidenciaron que los tiempos de cómputo pueden variar drásticamente, reportando que *OpenFOAM* requirió 75 minutos frente a los 20 minutos de Fluent para alcanzar una solución similar en flujos con transferencia de calor.

Profundizando en las causas de estas diferencias, Ariza et al. (2018) determinaron que radican en los métodos de resolución interna: ANSYS Fluent calcula explícitamente los flujos de velocidad en las caras de las celdas y la presión implícitamente en el centro, mientras que *OpenFOAM* resuelve la velocidad explícitamente en el centro de la celda y la presión en las caras. Esta diferencia algorítmica explica el mayor consumo de memoria y tiempo de cálculo en Fluent frente a los posibles problemas de convergencia en *OpenFOAM*.

En 2019, la comparativa se extendió a flujos multifásicos; Venier et al. modelaron lechos fluidizados, observando que *OpenFOAM* tiende a predecir tamaños de burbuja menores a los experimentales, mientras que Fluent las sobreestima. En paralelo, Chiriac et al. (2019) detectaron desajustes en la distribución de presiones en micro canales debido a las diferencias algorítmicas en el acoplamiento presión-velocidad, a pesar de obtener una buena concordancia en los perfiles de velocidad.

Finalmente, Kutkan y Guerrero (2021) concluyeron que, para problemas estacionarios con modelos físicos complejos, los solvers acoplados (disponibles en Fluent) presentan un rendimiento y robustez notablemente superiores a los solvers segregados típicos de *OpenFOAM*. Por su parte, Pogorelow Morales (2021) analizó sistemas de ventilación industrial, encontrando que *OpenFOAM* exhibe un comportamiento menos conservador y una mayor dispersión de datos. El hallazgo más crítico fue la detección de diferencias de hasta un 27% en las magnitudes de velocidad en puntos de medición equivalentes.

Pese a las ventajas de *OpenFOAM* en escalabilidad y costos, las diferencias en sus algoritmos y su alta sensibilidad a la calidad del mallado generan incertidumbres técnicas que limitan su aplicación directa en ingeniería de detalle sin una validación previa. En la industria minera, persiste un vacío metodológico para validar esta herramienta en procesos críticos, especialmente en flujos de fluidos no newtonianos modelados mediante métodos VOF y análisis térmicos de tuberías. Por consiguiente, cuantificar estas discrepancias bajo condiciones operativas realistas es fundamental para establecer un flujo de trabajo confiable y estandarizado que permita a empresas como TNA Engineering optimizar sus diseños de infraestructura.

1.3 Hipótesis

La implementación de *OpenFOAM* como plataforma de simulación para procesos críticos en la industria minera permitirá alcanzar una equivalencia técnica frente al estándar comercial ANSYS Fluent, logrando disminuir las discrepancias numéricas en variables de temperatura, velocidad y continuidad a márgenes inferiores al 1%. Asimismo, mediante la validación de un flujo de trabajo basado en software de código abierto, se logrará una mayor escalabilidad en simulaciones de alta complejidad y régimen transitorio sin incurrir en costos adicionales de licenciamiento. Este enfoque permitirá a TNA Engineering establecer una base de casos replicables con estándares de fiabilidad industrial, optimizando el uso de recursos computacionales de alto rendimiento con el propósito de garantizar resultados precisos y eficientes en el diseño de infraestructuras para pulpas y relaves.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Comparar los resultados obtenidos mediante simulación CFD en las plataformas *OpenFOAM* y ANSYS Fluent, evaluando las diferencias de los resultados físicos y el tiempo de simulación para dos categorías de modelos representativos de aplicaciones industriales.

1.4.2 Objetivos específicos

1.4.2.1 *Modelo en régimen permanente (Flujo con Transferencia de Calor)*

Desarrollar y comparar modelos CFD de flujo en tuberías con transferencia de calor en ambas plataformas, resolviendo las tres ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos:

- Ecuación de continuidad (conservación de masa).
- Ecuación de momentum (Navier-Stokes).
- Ecuación de energía (transferencia de calor convectiva y conductiva).

Los indicadores de comparación serán:

- Perfiles de velocidad, presión y temperatura en secciones transversales.
- Tiempo de cómputo hasta convergencia.
- Comportamiento de la convergencia.

1.4.2.2 Modelo en Régimen Transitorio Multifásico (Fluido No Newtoniano)

Desarrollar y comparar modelos CFD 2D de flujo de pulpa o relave con comportamiento reológico de Bingham plástico en una geometría tipo cajón de traspaso, utilizando el método VOF para capturar la interfaz libre.

Los indicadores de comparación serán:

- Forma y evolución de la superficie libre (interfaz gas-líquido).
- Campos de velocidad y presión en el fluido.
- Tiempo total de cómputo.
- Comportamiento de la convergencia.

1.5 Descripción del trabajo

Con el fin de realizar la comparación de manera correcta se definen dos casos tipo, representativos de la industria minera, un caso en régimen permanente o estacionario y un segundo caso en régimen transitorio. Para lo cual se comienza con una recopilación de información desde la teoría de mecánica de fluidos, hasta comparaciones actuales de ambos softwares.

Como segundo paso clave se desarrollan los casos utilizando el software estudiantil de ANSYS Fluent para posteriormente aprovechar un factor clave de *OpenFOAM* el cual es la compatibilidad de mallas desde Fluent, para este proceso se exporta un mallado con “*named selections*” previamente establecidas para ser posteriormente cargado y validado en *OpenFOAM* procurando que mantenga valores validos de calidad ortogonal, “*skewness*” y relación de aspecto, dicho proceso se realizará en ambos casos para la posterior simulación.

Durante el proceso de simulación se evaluarán indicadores clave de esta, como tiempo total de cómputo, tiempo total hasta la convergencia y comportamiento de esta, así como factores específicos para cada caso. Para lo cual se tomarán como base un trabajo realizado previamente durante el periodo de práctica profesional (Régimen estacionario) y un segundo caso realizado por TNA en régimen transitorio, ambos modelos validados para ANSYS Fluent. La descripción en detalle de ambos casos, sin entrar en detalles confidenciales de TNA, se presentan a continuación.

1.6 Caso 1: Modelo en régimen permanente

El primer caso consiste en evaluar la transferencia de calor por convección que ocurre en tuberías de refrigeración de acero en instalaciones mineras ubicadas en el norte de Chile, donde los vientos alcanzan temperaturas sobre 30°C. Dichas tuberías no debían sobrepasar los 27°C para un correcto funcionamiento de la planta.

Con el fin de determinar si era necesario utilizar algún tipo de aislamiento térmico se realizó un análisis CFD de las tuberías, con y sin aislante. Este caso será utilizado como base para realizar la comparación de resultados y metodologías de ambos softwares frente a modelos en régimen permanente.

1.7 Caso 2: Modelo en régimen transitorio multifásico

El segundo caso utilizado como base de estudio es la evaluación de un cajón de traspaso de relave con comportamiento de plástico de Bingham, dicho cajón a amortiguar y controlar el flujo de relave.

Para un correcto funcionamiento, la velocidad del relave debe mantenerse en rangos adecuados que eviten tanto la sedimentación en el fondo como el desgaste prematuro del mismo. Dicho caso será utilizado como base de estudio para comparar los resultados obtenidos por el análisis en *OpenFOAM*.

Este trabajo contempla una geometría y análisis más detallado que el primer caso, por lo que, será necesario realizar modificaciones al mismo para mantenerse en los márgenes de la licencia estudiantil de ANSYS Fluent, la cual posee limitaciones de geometría y uso de CPU, dichas modificaciones serán explicadas en detalle en la sección de metodología.

2 Marco teórico

2.1 Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite analizar el comportamiento de los fluidos mediante la resolución numérica de las ecuaciones gobernantes. Tanto ANSYS Fluent como *OpenFOAM* basan su arquitectura en el Método de Volúmenes Finitos (FVM). Este método discretiza el dominio espacial en un número finito de volúmenes de control contiguos, integrando las ecuaciones de conservación sobre cada volumen de forma que se garantice la conservación estricta de las propiedades (masa, momentum y energía) a través de las caras de las celdas contiguas.

2.2 Ecuaciones Gobernantes del Flujo

El comportamiento de un fluido continuo se rige por las leyes de conservación de la física clásica. Para un sistema de referencia euleriano, estas se expresan mediante las siguientes ecuaciones diferenciales parciales:

- **Ecuación de Continuidad (Conservación de Masa):** Establece que el balance neto de masa en un volumen de control es igual a la tasa de cambio de la densidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

- **Ecuaciones de Navier-Stokes (Conservación de Cantidad de Movimiento):** Relacionan las fuerzas inerciales con las fuerzas de cuerpo y superficie aplicadas al fluido:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

- **Ecuación de la Energía:** Modela el transporte térmico conductivo y convectivo en el dominio:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

2.3 Modelación de la Turbulencia (RANS)

Dado el alto grado de mezcla e inercia en procesos industriales, los flujos son predominantemente turbulentos. Para evitar el costo computacional prohibitivo de resolver todas las escalas de fluctuación (DNS), se emplea la formulación **RANS** (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), la cual descompone las variables de flujo en un componente promedio y uno fluctuante ($u = U + u'$). Esto introduce el tensor de esfuerzos de Reynolds, el cual requiere ecuaciones de cierre, como los modelos de dos ecuaciones (k-epsilon o k-omega), para calcular la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación.

2.4 Modelación Multifásica: Método VOF (*Volume of Fluid*)

Para la caracterización de flujos con interfaces libres, como la interacción aire-pulpa, se emplea el método VOF. Introduce una variable escalar de fracción de volumen (α) que determina la proporción de una fase dentro de una celda:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

Las propiedades globales del fluido en cada celda, como la densidad ρ , se determinan ponderando las propiedades individuales según α :

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (5)$$

2.5 Reología de Fluidos No Newtonianos: Plástico de Bingham

Las pulpas mineras y relaves presentan un comportamiento reológico donde la viscosidad no es constante. Para modelar fluidos que requieren un esfuerzo umbral para deformarse, se emplea el modelo Plástico de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad \text{para } |\tau| > \tau_0 \quad 6$$

Donde τ es el esfuerzo de fluencia (*yield stress*), la viscosidad plástica $\dot{\gamma}$ la tasa de deformación. Si el esfuerzo aplicado es menor a τ_0 , el fluido actúa como un sólido no deformable.

2.6 Algoritmos de Acoplamiento Presión-Velocidad

Debido a que la ecuación de continuidad actúa como una restricción geométrica para el campo de velocidades sin resolver directamente la presión, los códigos CFD utilizan algoritmos segregados o acoplados iterativos. Para regímenes estacionarios, destaca el algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), el cual emplea correcciones sucesivas para ajustar gradualmente los campos de presión y velocidad. En contraparte, para regímenes transitorios se utiliza el algoritmo PISO o su variante PIMPLE en *OpenFOAM*, los cuales incluyen correcciones adicionales por paso de tiempo para asegurar la estabilidad temporal conservando la condición de continuidad volumétrica.

3 Metodología

El diseño de la presente investigación es de carácter cuantitativo y comparativo. Cuyo objetivo principal es evaluar la fiabilidad y el rendimiento computacional de *OpenFOAM* frente a ANSYS Fluent en la modelación CFD de aplicaciones industriales de la minería. Para lograr esto, el estudio se estructura en torno a dos casos de estudio representativos del sector, definidos a partir de los objetivos específicos de la investigación y los intereses de TNA. La metodología contempla un flujo de trabajo estandarizado en donde se seguirá una secuencia lógica en cuatro etapas principales para cada caso: definición de la geometría, discretización espacial (mallado), configuración física y numérica (*setup*), y finalmente, la extracción y análisis de resultados. Este enfoque riguroso garantiza la validez y la estricta replicabilidad del estudio.

3.1 Modelación en Régimen Permanente (Flujo con Transferencia de Calor)

3.1.1 Descripción del caso de estudio

El caso de estudio seleccionado evalúa la transferencia de calor por convección forzada y conducción en tuberías de acero utilizadas para refrigeración en instalaciones mineras. Estas cañerías transportan agua a una temperatura de 27 °C y se encuentran expuestas a un flujo de aire externo que alcanza los 35,61 °C. La simulación asumió un estado estacionario para analizar el equilibrio térmico final del sistema bajo distintas combinaciones de diámetros nominales (3, 4 y 6 pulgadas) y espesores de aislamiento térmico (sin aislante, 0,5 pulgadas y 1 pulgada). Tal como se ejemplifica en la figura 1. Las condiciones de operación proporcionadas por TNA se presentan en la Tabla 1, además la siguiente metodología se utilizó para las 9 simulaciones estacionarias realizadas.

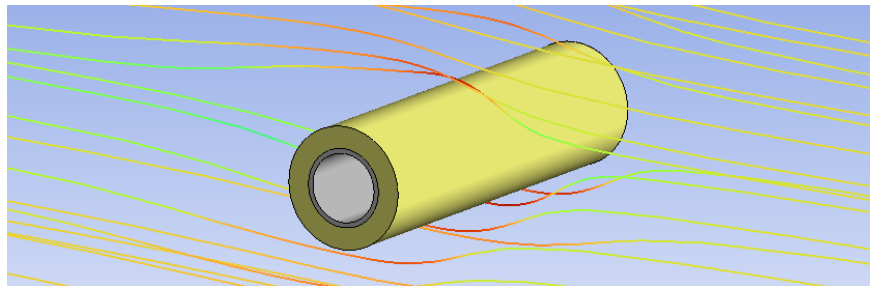


Figura 1: Representación general caso de estudio

Tabla 1: Datos del caso

Material	Densidad [kg/m³]	Calor Específico [J/(kg·K)]	Conductividad [W/(m·K)]	Velocidad [m/s]	Temperatura [°C]	Viscosidad [Pa·s]	Presión [Pa]
Acero	7850	470	52	-	-	-	-
Lana de roca	150	840	0.0263	-	-	-	-

Aire	0.95	1007	0.0263	4.7	35.6	1.905e-05	83060
Agua	995.53	4185	0.607	1.96	27	9.27e-04	612898

3.1.2 Geometría

La definición del dominio se realizó mediante la herramienta *ANSYS SpaceClaim*. Se estructuró un dominio tridimensional dividido en cuatro zonas claramente delimitadas para permitir el acoplamiento térmico. La región del fluido exterior (aire), la región sólida, compuesta por la pared de acero de la tubería (acero) y la capa de aislante térmico (lana de roca), en los casos correspondientes y la región del fluido interior (agua). Las medidas del dominio fueron seleccionadas a partir de la literatura, con tal de conseguir un flujo externo completamente desarrollado, de manera que el fenómeno de turbulencia y el cómo este afecta a la transferencia de calor se capturara de manera correcta. Tal como se muestra en la figura 2, las medidas mínimas para esto son un largo total de 17.5 veces el diámetro del cilindro principal, con un alto de 5 veces el diámetro.

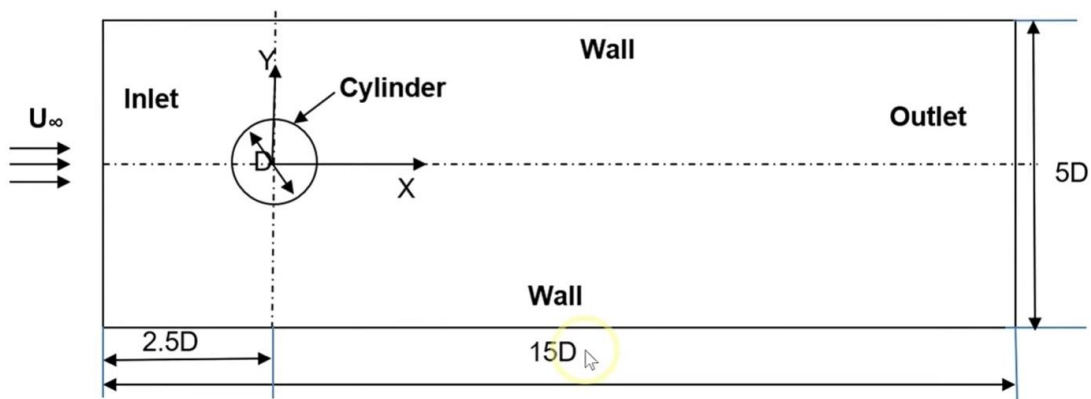


Figura 2: Dimensiones externas mínimas para flujo completamente desarrollado

Para el ancho del dominio, se consideró primeramente lo expuesto en el libro de Incropera, el cual menciona que el ancho necesario para que un flujo interno turbulento se desarrolle por completo es de entre 10 y 60 veces el diámetro. Este ancho se probó para la tubería de menor diámetro, obteniendo un ancho de 0.77 metros y se comparó con un ancho de 0.5 metros. Al no obtener diferencias significativas en el comportamiento del flujo interno, se decidió por mantener el ancho de 0.5 metros para todos los casos, esto con el fin de obtener un número correcto de elementos en el mallado, sin exceder el límite de la licencia estudiantil.

Al considerarse 3 diámetros de tubería distintos y 3 sub-casos para cada diámetro, se obtiene un total de 9 geometrías, sin embargo, con el fin de optimizar los tiempos y reutilizar geometrías se decidieron medidas externas del dominio de 7949 mm de largo y 3200 mm de alto, con una distancia horizontal al cilindro de 1749 mm y una distancia vertical de 1600 mm. Por su parte los diámetros internos y externos del cilindro varían en función del tamaño

de tubería y la cantidad de aislante, esto se muestra tanto en la Tabla 2 mientras que los planos de las distintas geometrías se muestran en el anexo 7.1.1

Tabla 2: Dimensiones principales tuberías caso estacionario

Diámetro interior de tubería [mm]	Espesor de la tubería [mm]	Espesor del aislante [mm]	Diámetro externo
154.1	7.11	25	218.3
154.1	7.11	12.5	193.3
154.1	7.11	0	168.3
102.3	6.02	25	164.3
102.3	6.02	12.5	139.3
102.3	6.02	0	114.3
77.9	5.49	25	138.9
77.9	5.49	12	114.3
77.9	5.49	0	88.9

Además, durante esta etapa, se definieron las selecciones nombradas (*named selections*), para las entradas, salidas e interfaces entre regiones. Se definieron un total de 6 selecciones, las cuales corresponden a “Aire inlet” y “Aire outlet” como la entrada y salida del flujo de aire, “Aire X” y “Aire Y” como los límites del aire tanto horizontales como verticales y “Agua inlet” y “Agua outlet” como la entrada y salida de aire por la cañería. De igual manera, la ubicación específica de estos en la geometría se muestra en el anexo 7.1.1

3.1.3 Mallado y exportación de la malla

El mallado se llevó a cabo utilizando *ANSYS Fluent Meshing*, aprovechando su interfaz gráfica para reducir los tiempos de preparación. Se generó una malla estructurada con asegurando un refinamiento adecuado en las zonas de capa límite. El tamaño de celda se ajustó para capturar los fenómenos termodinámicos sin exceder el límite de 1.048.576 celdas impuesto por la licencia estudiantil de *ANSYS*, además se configuran todas las mallas para mantener métricas las siguientes métricas de calidad: calidad ortogonal superior al 0.9, relación de aspecto menor a 20 y *skewness* menor al 0.25. Dichas métricas de calidad se mantienen para todas las mallas utilizadas en el presente informe. La configuración específica del mallado se explica a continuación.

Como primer paso se importa la geometría anteriormente creada en *SpaceClaim*. A continuación, se definen los tamaños de celda para el revestimiento y la tubería, donde se seleccionan tamaños de 6 y 4 milímetros, esto para que existan un mínimo de 2 elementos por sección, generando de esta manera gradientes internas de temperatura.

A continuación, se genera el mallado superficial, donde se define un tamaño mínimo de elementos de 5 milímetros esto pues se debe capturar con precisión la transferencia de calor ocurrida alrededor del tubo y un tamaño máximo de 8 centímetros, ya que en las zonas cercanas a los límites del dominio no se requiere un estudio en detalle, permitiendo disminuir el costo computacional y el número total de elementos.

El siguiente paso es describir la topología del dominio, donde se define la existencia de zonas sólidas y fluidas, sin configuraciones adicionales. Posteriormente se definen las zonas de borde, donde se definen las entradas y salidas antes mencionadas, correspondiendo en la imagen “aire inlet 2” a “Aire Y”

A continuación, se añaden *boundary layers* o capas de borde, estas se utilizan para generar celdas más delgadas en las zonas de interacción solido-fluido, esto con tal de capturar de manera correcta la capa límite de los fluidos. Se utilizó el método de *first layer height*, la altura de la primera capa se obtiene mediante la calculadora proporcionada por *Flow thermolab* donde se obtuvieron las alturas mostradas en las diferentes imágenes para cada diámetro, esto con el fin de mantener un valor de y^+ superior a 30. La altura de primera capa de cada diámetro de tubería se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Alturas primera capa por caso de estudio

Diámetro de tubería	Altura primera capa aire [mm]	Altura primera capa agua [mm]
6"	5	2
4"	5	2
3"	5	1

Finalmente, se genera el mallado volumétrico donde se define un largo máximo de celda de 64 milímetros y un tamaño mínimo de 4 milímetros por las razones antes explicadas, utilizando el método de poly-hexcore para que los nodos en la zona de interacción solido-fluido calcen de manera correcta y se capture la capa limite.

Con todo lo anterior se obtienen las distintas mallas para las 9 simulaciones, a modo de ejemplo se muestra la malla de la tubería de 6 pulgada con 1 pulgada de aislante en la figura 3 y 4, mientras que el resto de las mallas se presenta en el anexo 7.1.2

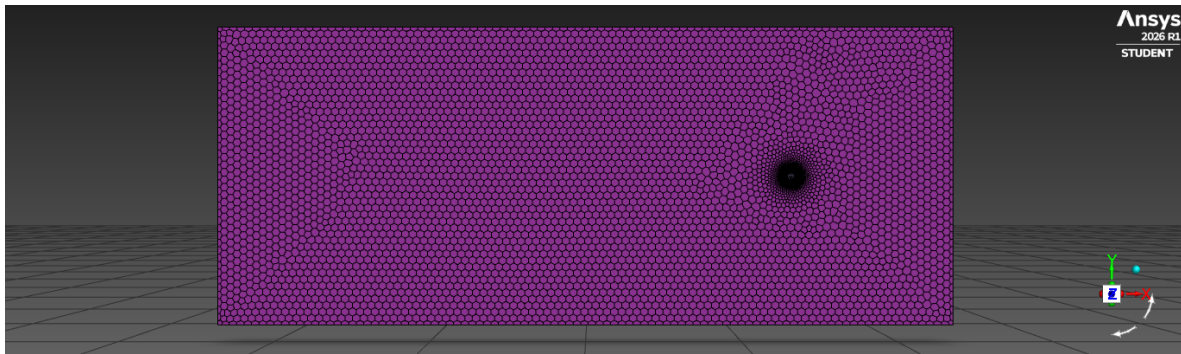


Figura 3: Malla generada tubería 6" con 1" de aislante

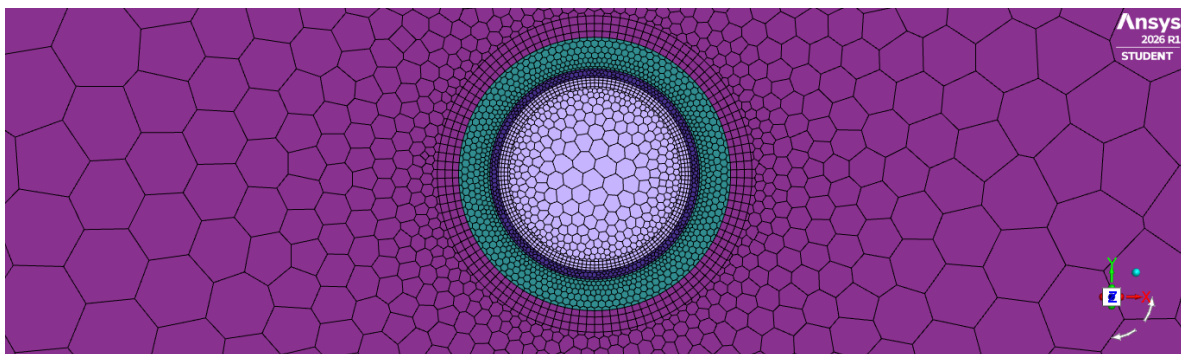


Figura 4: Malla tubería 6" con 1" de aislante acercamiento

Posteriormente, con el fin de garantizar que las diferencias numéricas observadas correspondieran exclusivamente a los algoritmos de resolución y no a discrepancias espaciales, la malla se exportó desde Fluent en formato ASCII (.msh). Este formato fue indispensable para asegurar una correcta importación topológica hacia *OpenFOAM*. De igual manera las configuraciones en detalle se encuentran en el anexo 6.1.2

3.1.4 Configuración y post-procesamiento en ANSYS Fluent

Para la simulación base en el software comercial, se configuró un *solver* basado en presión (*Pressure-Based*) empleando el algoritmo SIMPLE, adecuado para flujos incompresibles o débilmente compresibles en régimen estacionario. Se habilitó la ecuación de energía para el cálculo de la transferencia de calor y se seleccionó el modelo de turbulencia *RAS standard k-epsilon*, este modelo se selecciona sobre otros como *k-omega* o *LES* pues respeta las variaciones de velocidad y temperatura propias de la capa límite sin resolver de manera explícita los vórtices internos de la misma, de esta manera garantizando un correcto modelado de los fenómenos dinámicos sin aumentar de manera significativa el costo computacional de la simulación, además se usó el tratamiento de pared *enhanced wall treatment* para que se capturen de mejor manera las condiciones de no deslizamiento, se activa también la gravedad en el eje y.

Además, se definen los materiales presentes en la simulación y a partir de sus propiedades, en este caso se utilizan aire y agua con propiedades proporcionadas por TNA, las propiedades de los materiales y su configuración en ANSYS se muestra en el anexo 7.1.3

Con los materiales establecidos, se introdujeron las condiciones de borde, en este caso se establece la entrada de agua y aire como *velocity inlet* a raíz de las condiciones iniciales, de esta manera el programa calcula el flujo másico de manera interna. Por su parte la salida de aire se establece como salida a presión atmosférica al tratarse de un flujo ambiental, mientras que “Aire Y” se establece como una entrada de aire paralela al flujo, esto para simular el efecto del ambiente en los bordes del sistema, por otro lado, “Aire X” se establece como simetría al solo simular una sección en una tubería de varios metros de largo, se considera valido el uso de simetría ya que las condiciones ambientales e interiores se mantienen en toda la instalación de la tubería. Finalmente se establece la salida de aire sin variación de presión, pues la presión de trabajo se introduce en la entrada y las paredes, donde se establece la condición de no deslizamiento para todas las paredes solidas.

Como siguiente paso se seleccionaron los esquemas de cálculo y *solver* de la simulación, en este caso se utiliza el método SIMPLE, pues es el estándar industrial para escenarios estacionarios, además de discretizaciones de segundo orden para momento y presión, mientras que para k y épsilon se utiliza de primer orden, esto debido a su equilibrio entre costo computacional y exactitud en resultados. Con lo anterior definido se establecen las condiciones de convergencia de residuos en 1×10^{-3} para velocidad, continuidad, momento, k y épsilon, mientras que para energía se configuró en 1×10^{-6} para asegurar un correcto cálculo de las gradientes de temperatura, esto pues la temperatura fue la variable principal en el proyecto recreado, por su parte se configuran también, los factores de relajación para distintas variables.

Finalmente se inicializó la simulación, para esto se utilizó un tipo de inicialización híbrida y se estableció el límite máximo de iteraciones

Tras alcanzar los criterios de convergencia preestablecidos, el post-procesamiento nativo de ANSYS (*CFD-Post*) permitió extraer los perfiles de velocidad, presión y temperatura en las secciones transversales. La configuración mencionada anteriormente se puede ver en el Anexo 7.1

3.1.5 Importación y configuración en *OpenFOAM*

La importación de la malla se realizó utilizando la utilidad de conversión de *OpenFOAM* (*fluent3DMeshToFoam*), asegurando que la discretización espacial proveniente de ANSYS *Fluent* (.msh) se mantuviera inalterada. Esto garantizó que el estudio comparativo aislara las variables espaciales, atribuyendo cualquier divergencia de resultados puramente a los algoritmos de resolución matemática de cada plataforma.

A continuación, se adoptó como base la estructura del caso multiRegionHeater provisto por la guía de usuario oficial de *OpenFOAM*, adaptando los diccionarios principales (constant/, 0/ y system/) para reflejar la configuración previamente establecida en el software comercial.

El *solver* seleccionado fue *chtMultiRegionSimpleFoam*. Esta elección es el equivalente directo al *solver* basado en presión con algoritmo SIMPLE y ecuación de energía habilitada en Fluent. Se fundamentó en su capacidad nativa para resolver la Transferencia de Calor Conjugada (CHT) bidireccional, el manejo de múltiples mallas acopladas (aire, sólido y

agua), y su formulación compresible que permite el cálculo de variaciones de densidad en el fluido externo producto de los gradientes térmicos.

De manera análoga a la asignación de materiales en Fluent, se definieron las propiedades termo físicas en el directorio “*constant*” de cada región. Para los fluidos (aire y agua), se configuró el paquete termodinámico “*heRhoThermo*”, asumiendo una ecuación de estado de densidad constante para el agua y cálculo de energía mediante entalpía sensible. Para las zonas sólidas (acero y aislante), se utilizó “*heSolidThermo*” con conductividad isotrópica constante. Mientras que para la dinámica de fluidos se activó el modelo de turbulencia RAS k-épsilon estándar, preservando las constantes universales del modelo $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$) para asegurar equivalencia en el cálculo de la viscosidad turbulenta.

En el directorio “*0*”, se establecieron las condiciones de borde y de acoplamiento térmico equivalentes a las configuradas previamente. De igual manera que en ANSYS las entradas se definieron mediante vectores de velocidad uniforme y las salidas a presión atmosférica referencial. Por su parte, a todas las fronteras sólidas se impuso la condición de no deslizamiento (*no-slip*).

A continuación, en las interfaces que acoplan los dominios térmicos (como la frontera fluido sólido), se implementó la condición “*compressible:*” “*::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed*”. Durante esta etapa, se tomó la decisión de excluir cualquier componente de radiación (Rad) presente en algunas condiciones por defecto de *OpenFOAM*. Esto para mantener la misma configuración de *Fluent* (donde el modelo de radiación se mantuvo apagado), la eliminación de este término garantizó un balance puramente convectivo y/o conductivo, evitando inestabilidades matemáticas e incompatibilidad de fronteras entre regiones.

La discretización espacial y el acoplamiento de ecuaciones fueron configuradas en el archivo “*system*”. Para emular los métodos de solución de Fluent, en el archivo *fvSchemes* se configuraron esquemas de discretización de segundo orden (*linearUpwind*) para los términos de momento y energía.

Debido a que los esquemas de segundo orden en *OpenFOAM* poseen una tendencia algorítmica a generar sobre impulsos numéricos (*overshoots*) ante gradientes térmicos abruptos, se implementó una estrategia de estabilización. Para el cálculo de gradientes espaciales se utilizó el método de mínimos cuadrados acotado mediante un limitador estricto (*cellLimited leastSquares 1.0*). Esto restringió la interpolación matemática, forzando a que las temperaturas calculadas no superaran los límites físicos de entrada.

Por su parte, en el archivo “*fvSolution*”, se establecieron dos niveles de control. Para la resolución matricial interna de cada iteración, se empleó el solver GAMG para la presión con una estricta tolerancia de 10^{-7} garantizando la conservación de masa local. Paralelamente, para gobernar la convergencia global del estado estacionario, replicando los monitores de residuos de ANSYS *Fluent*, se configuró el bloque “*residualControl*” del algoritmo SIMPLE, definiendo criterios de detención de 10^{-3} para la continuidad y momento, y de 10^{-6} para la energía.

Para la resolución computacional, se configuró el archivo *decomposeParDict* particionando el dominio en 4 núcleos físicos mediante el método simple, replicando las condiciones de procesamiento empleadas en *Fluent*. La inicialización y cálculo se ejecutaron en paralelo mediante la interfaz de paso de mensajes (*MPI*).

Para monitorear la convergencia de la solución se aplicaron los mismos parámetros que en ANSYS Fluent, pero debido a la división de la geometría en regiones, fue necesario aplicar un monitoreo de residuos externo, esto se logra mediante el archivo “guardian.py” el cual es mostrado junto a los demás archivos utilizados en el Anexo 7.2.

Tras alcanzar la convergencia y reconstruir los dominios particionados (*reconstructPar -allRegions*), se evaluó la calidad del mallado en la pared mediante la función de post-procesado directamente desde el *solver (-postProcess -func yPlus -region aire)*, verificando que los valores adimensionales se mantuvieran en los márgenes esperados para las funciones de pared.

Finalmente, el archivo “.foam” con los resultados fue cargado en el software *ParaView*, el cual corresponde a la herramienta de visualización de resultados proporcionada por *OpenFOAM*, para realizar la comparación y análisis de resultados. Estos contornos de temperatura se muestran en la sección de resultados.

3.2 Modelación en Régimen Transitorio Multifásico (Fluido No Newtoniano)

Con el propósito de evaluar el comportamiento dinámico de interfaces libres, el análisis en régimen transitorio se dividió en dos aproximaciones topológicas: una bidimensional y una tridimensional, esto debido a diferencias en los esquemas de cálculo que soportan ambas plataformas al cambiar de un estado bidimensional a uno tridimensional. A continuación, se detalla la metodología aplicada para ambas variantes

3.2.1 Caso Transitorio 2D

Para el caso bidimensional, se diseñó la geometría de un cajón de traspaso minero. De igual manera que en el caso estacionario, la discretización espacial (mallado) se generó íntegramente en *ANSYS Fluent Meshing*. Posteriormente, la malla fue exportada en formato ASCII (.msh) e importada a *OpenFOAM* mediante la utilidad *fluent3DMeshToFoam*.

3.2.1.1 Geometría

La geometría del cajón de traspaso fue diseñada en *ANSYS SpaceClaim*, representando la sección transversal del receptáculo de pulpa mineral. Con el objeto de evaluar cuantitativamente el desarrollo de velocidades en el interior del dominio, se establecieron tres monitores de velocidad ubicados en secciones transversales estratégicas del cajón, dichos monitores se muestran en color verde en la Figura 5: Monitores de velocidad para cajón de traspaso. La geometría completa, incluyendo sus cotas dimensionales, se presenta en el Anexo 7.4.

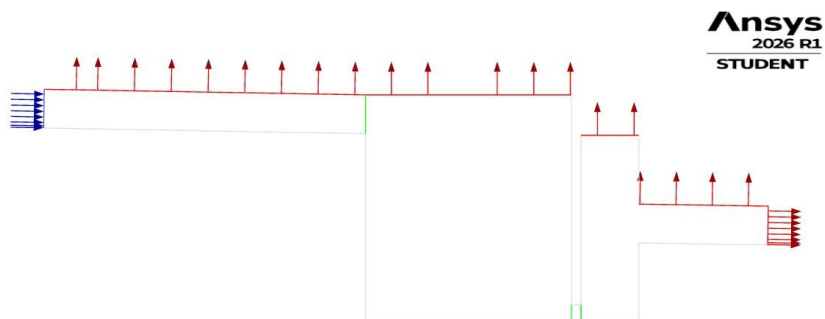


Figura 5: Monitores de velocidad para cajón de traspaso

Estos monitores resultan de real importancia a la hora de monitorear casos de traspaso de pulpa, pues el primer monitor ubicado en la entrada del mismo permite estudiar como ocurre el choque del relave con las paredes del tanque y determinar el deterioro de estas, mientras que los dos siguientes monitores permiten conocer la velocidad de entrada y salida de la sección de traspaso, el estudio de esta velocidad resulta clave pues una velocidad muy baja provocaría sedimentación y posterior obstrucción del cajón mientras que una velocidad muy alta provocaría un desgaste prematuro de la sección interior.

3.2.1.2 Mallado y exportación

El mallado se generó mediante ANSYS Fluent Meshing, obteniéndose una malla poliédrica compuesta por 21.699 elementos con un tamaño nominal de celda de 60 mm. Con el propósito de capturar con precisión la condición de no deslizamiento en las paredes sólidas del cajón y resolver adecuadamente el gradiente de velocidades en la capa límite, se incorporaron 12 capas de inflación en las paredes inferiores del dominio, configuradas con un factor de crecimiento de 1,2 y una altura de primera capa de 15 mm. La malla resultante, junto con sus métricas de calidad, se presentan en el Anexo 7.4.2.

3.2.1.3 Configuración (Set up)

En la etapa de configuración, se evaluaron dos fluidos de trabajo: una pulpa mineral con comportamiento reológico de plástico de Bingham y, de manera complementaria, agua pura (fluido newtoniano). Esta segunda iteración con agua se introdujo estratégicamente para aislar los efectos reológicos de los efectos puramente numéricos generados por los esquemas de la interfaz. La interacción gas-líquido se capturó mediante el método VOF. Los datos propios de la pulpa mineral, como densidad, así como su reograma se presentan en Tabla 4 y anexo 7.4 respectivamente

En *ANSYS Fluent*, la captura de la interfaz se configuró utilizando el esquema algebraico *Modified HRIC*. El acoplamiento presión-velocidad se manejó mediante una formulación transitoria de primer orden implícito, permitiendo un máximo de 20 iteraciones por paso de tiempo, con factores de sub-relajación para momento y presión. La discretización espacial empleó el método de mínimos cuadrados para los gradientes y “*Second Order Upwind*” para

el momento. De igual manera que en el caso estacionario, la configuración en detalle de la simulación se presenta en el Anexo 7.4

Para buscar la homologación en *OpenFOAM*, se utilizó el solver “*interFoam*”. Dado que el software de código abierto no posee el esquema *HRIC*, se empleó su algoritmo algebraico nativo equivalente: *MULES*. Para emular la estricta matemática iterativa de Fluent, se configuró el algoritmo PIMPLE con 20 iteraciones externas y factores de relajación idénticos. Los esquemas espaciales se homologaron utilizando “*leastSquares*” para gradientes, “*linearUpwind*” para momento y Euler para la derivada temporal, ajustando iterativamente el factor de compresión de la interfaz en distintos valores para intentar replicar la nitidez del *Modified HRIC*.

Las propiedades físicas de los fluidos empleados en ambas iteraciones del caso 2D se resumen en la Tabla 4. La Tabla 5 sintetiza la configuración numérica homologada entre *ANSYS Fluent* y *OpenFOAM* para el caso transitorio bidimensional.

Tabla 4: Propiedades de los fluidos caso transitorio 2D

Propiedad	Relave (Bingham)	Agua	Aire
Densidad ρ [kg/m ³]	1.594,35	1.000,00	1,225
Modelo reológico	Herschel-Bulkley ($n = 1$)	Newtoniano	Newtoniano
Viscosidad cinemática ν [m ² /s]	Modelo H-B	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,48 \times 10^{-5}$
Esfuerzo de fluencia τ_0 [Pa]	2,933	—	—
Índice de consistencia k	$1,548 \times 10^{-5}$	—	—
Velocidad de entrada [m/s]	2,0	2,0	—
Tensión superficial σ [N/m]	0	0	—

Tabla 5: Configuraciones caso transitorios 2D ANSYS y OpenFOAM

Parámetro	ANSYS Fluent	OpenFOAM (interFoam)
Solver	Pressure-Based, transitorio VOF	interFoam
Esquema de interfaz VOF	Modified HRIC	MULES (limitador nativo)
Factor de compresión de interfaz	Automático (interno)	cAlpha variable (0,25–1,0)
Esquema temporal	First Order Implicit	Euler (primer orden)
Iteraciones por paso de tiempo	Máx. 20	PIMPLE nOuterCorrectors: 3–20
Discretización de gradientes	Least Squares	leastSquares
Discretización de momento	Second Order Upwind	Gauss upwind
Modelo de turbulencia	k- ϵ Realizable	realizableKE (RAS)
Sub-relajación presión (p)	0,3	0,3

Parámetro	ANSYS Fluent	OpenFOAM (interFoam)
Sub-relajación velocidad (U)	0,7	0,7
Sub-relajación k, ϵ	0,8	0,8
Paso de tiempo	Adaptativo (maxCo = 2)	Adaptativo (maxCo = 2)
Tiempo total de simulación [s]	15	15
Procesamiento paralelo	N/A (GUI nativa)	4 núcleos, método scotch

3.2.2 Caso Transitorio 3D

Con el fin de superar las restricciones algorítmicas inherentes al entorno bidimensional descritas en la sección anterior (Problemas de la difusión MULES frente a HRIC al trabajar en pseudo 2D) la investigación escaló hacia un dominio puramente tridimensional. Para ello, se adoptó como caso de estudio el escenario de ruptura de presa (*DamBreak*), paradigma ampliamente validado en la literatura de mecánica de fluidos computacional para la verificación de solucionadores *VOF* ante choques violentos contra superficies sólidas. La interacción evaluada correspondió exclusivamente al sistema agua-aire (ambos fluidos newtonianos), eliminando la complejidad reológica del plástico de Bingham con el propósito de aislar el comportamiento numérico de los algoritmos de captura de interfaz libre.

3.2.2.1 Geometría

El dominio computacional correspondió a un prisma de base rectangular de dimensiones $0,5 \times 0,5 \times 0,1$ m. Las seis fronteras del dominio quedaron definidas de la siguiente manera: las cuatro paredes laterales y la base inferior se configuraron con condición de no deslizamiento (*no-slip*), mientras que la cara superior se definió como salida abierta (*outlet*). La condición inicial del campo de fracción volumétrica se estableció mediante la utilidad *setFields* de *OpenFOAM* mientras que en *ANSYS Fluent* se utilizó su equivalente *Patch* en la inicialización, delimitando una columna de agua en reposo dentro de una caja de coordenadas (0; 0; -0,05) a (0,3; 0,3; 0,05), equivalente a un volumen de $0,3 \times 0,3 \times 0,1$ m ubicado en la esquina inferior izquierda del dominio. En $t = 0$ s, la restricción virtual es liberada y el volumen de agua colapsa bajo la acción de la gravedad en el eje Y, generando el fenómeno de choque contra la pared opuesta. La geometría y las dimensiones del dominio se presentan en el Anexo 7.7.

3.2.2.2 Mallado

Al igual que en el caso bidimensional, la malla fue generada íntegramente en *ANSYS Fluent* Meshing y exportada en formato ASCII (.msh). La importación a *OpenFOAM* se realizó mediante la utilidad *fluent3DMeshToFoam*, garantizando la equivalencia de la discretización espacial en ambas plataformas. Las propiedades físicas de los fluidos se recogen en la Tabla 6. La configuración específica del mallado, incluyendo métricas de calidad, se presenta en el Anexo 7.7.

Tabla 6: Propiedades de los fluidos caso transitorio 3D

Propiedad	Agua	Aire
Densidad ρ [kg/m ³]	998,2	1,225

Propiedad	Agua	Aire
Viscosidad cinemática ν [m ² /s]	$1,0048 \times 10^{-6}$	$1,4607 \times 10^{-5}$
Modelo reológico	Newtoniano	Newtoniano
Tensión superficial σ [N/m]	0 (desactivada)	0 (desactivada)

3.2.2.3 Configuración (Set Up)

En *ANSYS Fluent* se empleó un *solver* multifásico VOF con formulación transitoria con modelo de turbulencia *Realizable k-epsilon*. Se activó la herramienta *Implicit Body Force* para amortiguar las variaciones bruscas de velocidad inducidas por los gradientes de presión hidrostática. El tiempo total de simulación se estableció en 1.5 segundos, con un paso de tiempo fijo de 0.0005 segundos por iteración, y se registraron resultados para los instantes 0.1, 0.4, 0.6, y 1.5. La configuración completa de ANSYS se presenta en el Anexo 7.7.

En *OpenFOAM*, se empleó el *solver* *interFoam*. Como configuración base, se aplicó el esquema temporal *Crank-Nicolson* con coeficiente 0,9, la discretización de gradientes mediante mínimos cuadrados (*leastSquares*) y el esquema *linearUpwind* para el transporte del momento. La fracción volumétrica se resolvió con el esquema *vanLeer* para los términos convectivos e *interfaceCompression* para el término de compresión de interfaz, con un factor *cAlpha* de 0.5. A continuación, el acoplamiento presión-velocidad se gestionó mediante el algoritmo PIMPLE con hasta 40 correctores externos. Los factores de sub-relajación adoptados fueron de 0.3 para presión y 0.7 para velocidad, en correspondencia con los valores empleados en *ANSYS Fluent*. El modelo de turbulencia seleccionado fue *realizableKE*, equivalente al *Realizable k-epsilon* de ANSYS. Los archivos de configuración de *OpenFOAM* se presentan en el Anexo 7.9.

Con el fin de reducir las discrepancias observadas entre plataformas, se realizaron cinco iteraciones sucesivas sobre la configuración de *OpenFOAM*, modificando progresivamente los esquemas de discretización espacial y el tipo de *solver*. La Tabla 7 resume las modificaciones realizadas y los resultados cualitativos obtenidos en cada iteración. Los archivos de configuración completos de cada versión se incluyen en el Anexo 7.9.

Tabla 7: Configuraciones entre iteraciones caso transitorio 3D

Iteración	Identificador	Modificación principal (fvSchemes / solver)	Resultado observado
1ª (base)	Iteración inicial sin limitadores	Configuración base: CrankNicolson 0,9; div(rhoPhi,U) linearUpwind; cAlpha = 0,5; PIMPLE nOuter = 40	Picos espurios de velocidad en $t = 0,4$ s
2ª	Con limitador en esquemas generales	div(rhoPhi,U): linearUpwind →	Mejora en tiempos iniciales; menor similitud en tiempos intermedios

Iteración	Identificador	Modificación principal (fvSchemes / solver)	Resultado observado
		limitedLinearV 1,0 (resto sin cambios)	
3ª	Limitadores en todos los esquemas	Esquemas de gradiente: leastSquares → cellLimited Gauss linear 1 (todos los esquemas)	Ligera mejora; persisten picos de velocidad
4ª	<i>OpenFOAM</i> con solver interIsoFoam	Solver: interFoam → interIsoFoam (reconstrucción geométrica isoAdvection, análogo a Geo-Reconstruct de Fluent)	Desempeño inferior a iteraciones anteriores
5ª (final)	Ansys sin implicit body force	<i>OpenFOAM</i> : esquemas de 3ª iteración. ANSYS: desactivación de Implicit Body Force + modo experto VOF	Error máximo de 9.5%; meta del 1 % no alcanzada

4 Resultados

A continuación, se exponen los hallazgos obtenidos a partir de las simulaciones anteriormente realizados. Los resultados se organizan en función de los dos regímenes de flujo evaluados, detallando en primera instancia el comportamiento estacionario térmico y, posteriormente, el análisis del flujo transitorio multifásico.

4.1 Modelo en régimen permanente (Flujo con Transferencia de Calor)

En esta etapa, se resolvieron las ecuaciones de continuidad, momento y energía para evaluar la transferencia de calor por convección y conducción en tuberías de refrigeración. Los datos recopilados corresponden a perfiles de temperatura transversales, comportamiento de los residuos y el costo computacional asociado a la convergencia en *ANSYS Fluent* y *OpenFOAM*.

El procesamiento visual de *OpenFOAM* incluyó la aplicación del filtro “*Cell Data to Point Data*” en *ParaView*, lo que permitió interpolar los datos desde los centros de las celdas hacia los nodos, generando gradientes suavizados comparables con los reportados de forma nativa por *ANSYS Fluent*. Durante los cálculos en ambas plataformas, la temperatura máxima global se estabilizó en 35.61 °C (corriente de aire externa) y la mínima en 27.00 °C (corriente de agua interna).

Las figuras 6 a 11 exhiben los contornos de temperatura obtenidos para la tubería de 6 con las condiciones de 1 pulgada de aislante, 0.5 pulgadas de aislante y sin aislante, respectivamente.

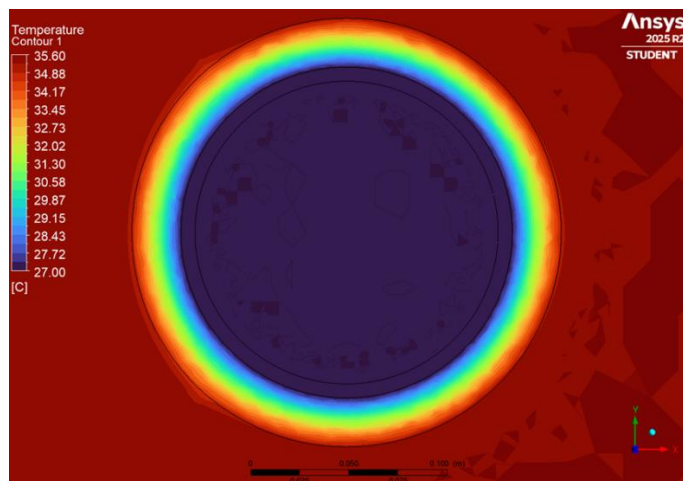


Figura 6: Contorno de temperatura tubería 6" 1" de aislante ANSYS

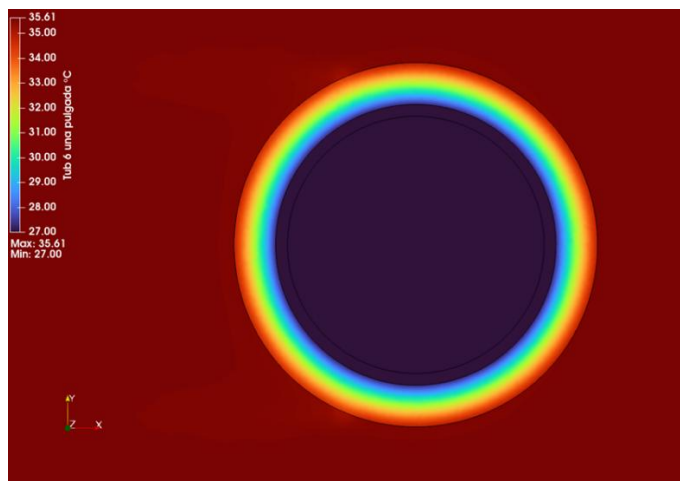


Figura 7: Contorno de temperatura tubería 6" 1" de aislante OpenFOAM

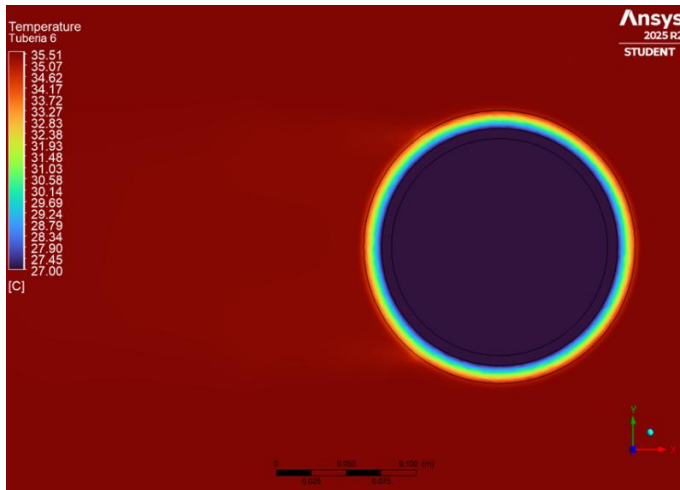


Figura 8: Contorno de temperatura tubería 6" 1/2" de aislante ANSYS

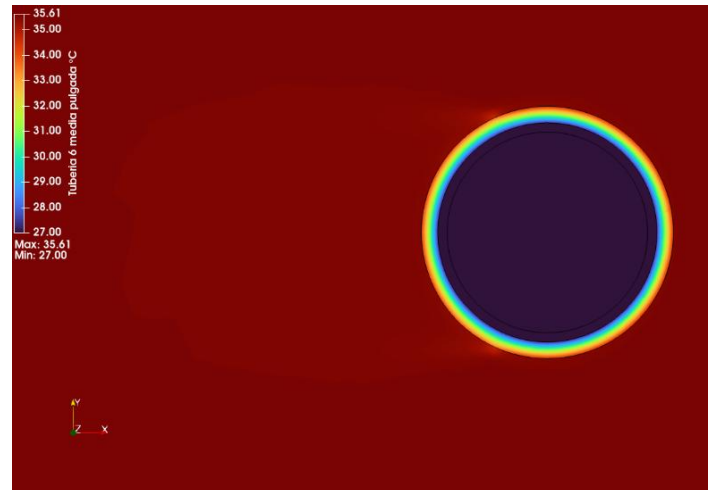


Figura 9: Contorno de temperatura tubería 6" 1/2" de aislante OpenFOAM

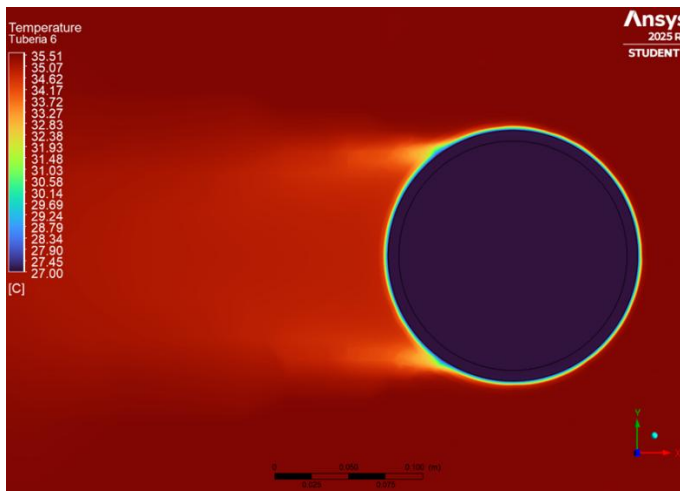


Figura 10: Contorno de temperatura tubería 6" sin aislante ANSYS

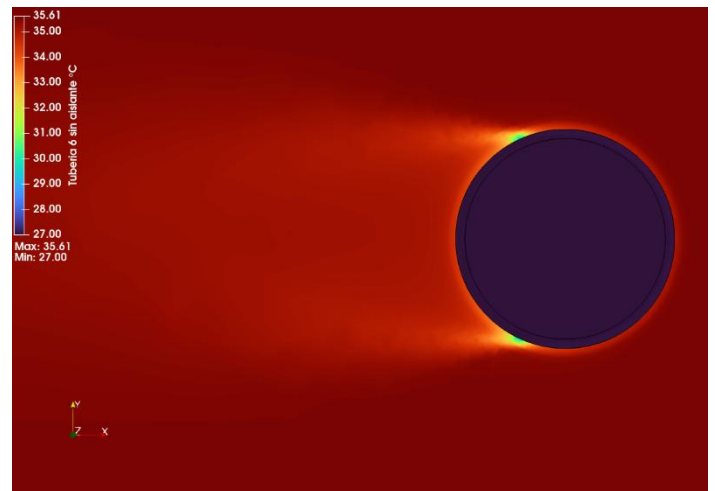


Figura 11: Contorno de temperatura tubería 6" sin aislante OpenFOAM

De manera homóloga, se presentan en el Anexo 7.3 los perfiles térmicos transversales correspondientes a la tubería de 4 pulgadas y 3 pulgadas en sus respectivas variaciones de aislamiento. En la totalidad de los escenarios evaluados sin aislante, se registró la formación de una estela térmica posterior al cilindro, cuya extensión y rango de temperaturas resultaron ser concordantes en ambos softwares.

De igual manera se registraron los valores promedio de temperatura por zona, utilizando el promedio volumétrico disponible tanto en *CFD-Post* y *ParaView* para ANSYS y OpenFOAM, respectivamente. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Comparación de temperaturas en Celsius caso estacionario

NPS	Aislante	ANSYS Fluent				OpenFOAM			
		T. Aire	T. Aislante	T. Tubería	T. Agua	T. Aire	T. Aislante	T. Tubería	T. Agua
6	1"	35.6	31.440	27.0	27	35.597	31.409	27.000	27
	0.5"	35.6	31.070	27.0	27	35.601	31.014	27.004	27
	0"	35.6	n/a	27.8	27	35.595	n/a	27.028	27
4	1"	35.6	32.000	27.0	27	35.891	31.761	27.000	27
	0.5"	35.6	31.200	27.0	27	35.581	31.46	27.008	27
	0"	35.6	n/a	27.8	27	35.579	n/a	27.053	27
3	1"	35.6	31.720	27.0	27	35.600	31.721	27.005	27
	0.5"	35.6	31.270	27.0	27	35.6	31.226	27.004	27
	0"	35.6	n/a	27.8	27	35.598	n/a	27.032	27

No se consideró en este caso la validación de los parámetros de presión dado que en este caso se mantienen constantes tanto la presión atmosférica como interna del tubo sin existir puntos reales de comparación de error, por lo que se pasó directamente a la evaluación de la convergencia.

Respecto al comportamiento de la convergencia, se monitoreó el historial iterativo para las ecuaciones gobernantes. En ANSYS Fluent, los residuos presentaron un decaimiento monótono hasta alcanzar los criterios absolutos definidos, 10^{-3} para continuidad y momento, y 10^{-6} para energía. En contraste, los monitores en *OpenFOAM* evidenciaron una rápida caída inicial seguida de una estabilización oscilatoria (comportamiento asintótico) tras superar las fases de ajuste numérico. A modo de ejemplo, la figuras 12 y 13 expone las curvas de residuos para la configuración de tubería 6 con 1 pulgada de aislante.

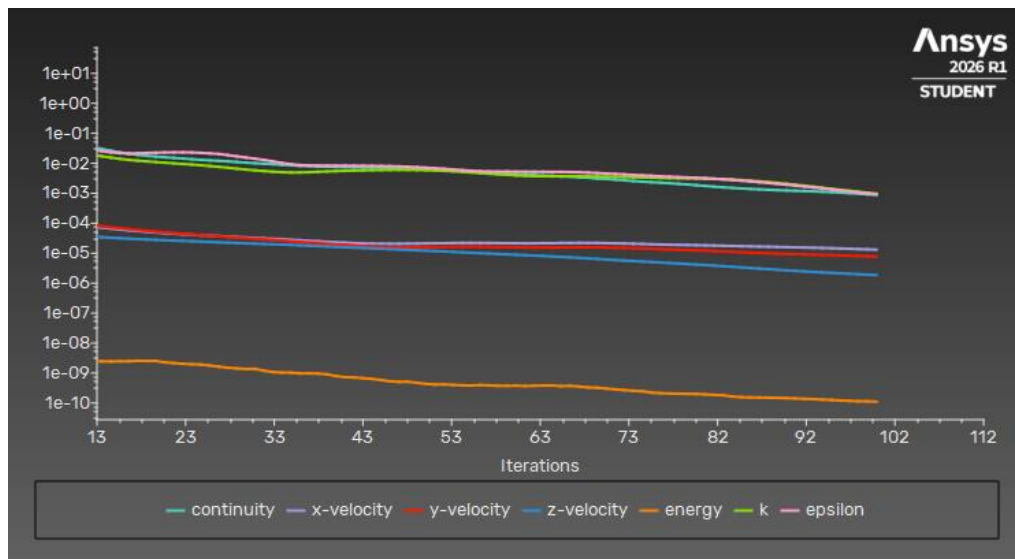


Figura 12: Residuos estacionarios ANSYS

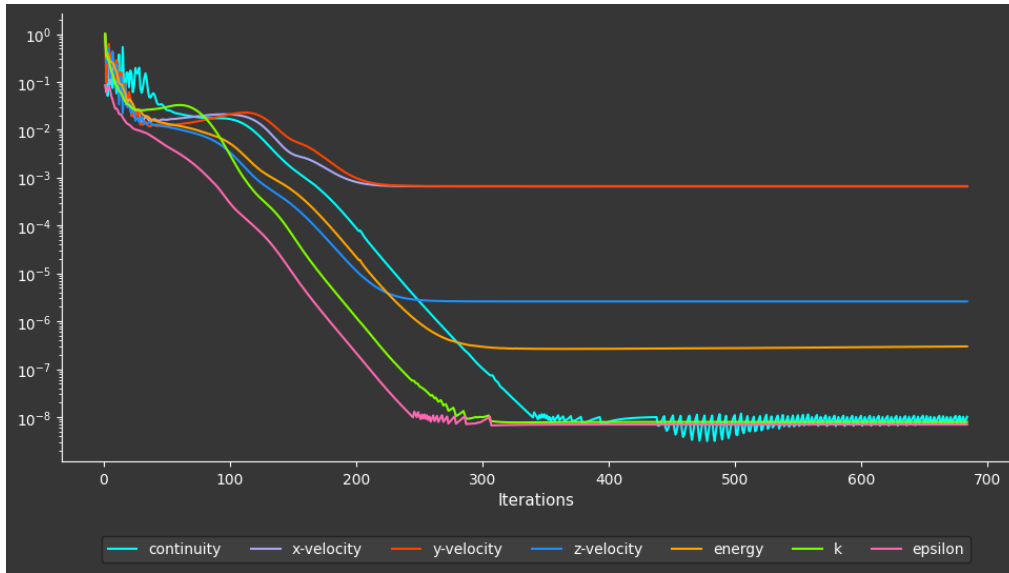


Figura 13: Residuos obtenidos en OpenFOAM

Finalmente se presentan los tiempos de cálculo registrados por cada software, pues la evaluación del costo computacional constituye una dimensión complementaria a la exactitud numérica en la comparación entre plataformas CFD. Los tiempos de computo registrados por cada simulación, así como la relación entre los tiempos de *OpenFOAM* y *ANSYS* se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Tiempos de cálculo para el caso en régimen permanente

NPS	Aislante	ANSYS Fluent [min]	OpenFOAM [min]	Relación OF/ANSYS
6"	1"	31	11	0.35
6"	0,5"	30	11	0.36
6"	Sin aislante	35	14	0.40
4"	1"	30	19	0.63
4"	0,5"	32	21	1.52
4"	Sin aislante	36	36	1.00
3"	1"	30	28	0.83
3"	0,5"	32	13	0.40

3"	Sin aislante	34	15	0.44
----	--------------	----	----	------

4.2 Modelación en régimen transitorio multifásico (Fluido No Newtoniano)

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones transitorias multifásicas, organizadas según los casos 2D y 3D. Por su parte, el caso bidimensional evaluó dos fluidos de trabajo, la pulpa mineral con reología de plástico de Bingham y el agua pura, donde se compararon los campos de fracción volumétrica y velocidad en el instante final. Mientras que en el caso tridimensional se estudió la dinámica del escenario *DamBreak* (agua-aire) para los segundos 0.1, 0.4, 0.6, y 1.5. En ambos casos, se utilizaron como referencia los resultados de *ANSYS Fluent* para la comparación, evaluándose la capacidad de *OpenFOAM* de reproducirlos con un margen de error máximo del 1%.

4.2.1 Resultados Transitorios 2D

En la evaluación de los campos de presión, velocidad y la evolución de la superficie libre en el caso 2D evidenció discrepancias cualitativas y cuantitativas significativas e insalvables entre ambas plataformas para el segundo 15 de simulación, imposibilitando alcanzar el margen de error objetivo del 1%.

Mientras que en *ANSYS Fluent*, el chorro de fluido central, al impactar contra el fondo del cajón, presentó una alta dispersión hidrodinámica, alimentando un vórtice estable en la zona izquierda del dominio. La magnitud de velocidad máxima registrada en esta zona de alto gradiente fue de aproximadamente 8.4 m/s. En *OpenFOAM* se observó un comportamiento físico divergente: una menor dispersión del fluido al momento del impacto. El chorro descendente actuó mecánicamente como una menor dispersión al impacto, produciendo trayectorias de flujo cualitativamente distintas a las de *ANSYS Fluent*. Las magnitudes de velocidad máxima alcanzaron los 10,0 m/s.

La evaluación de los contornos de presión confirma estas discrepancias, mostrando zonas de baja presión concordantes con los picos de velocidad, alcanzando una diferencia de hasta 10 kilo pascales en zonas específicas. Sin embargo, se evidencia una alta similitud estructural entre ambos softwares dado que los puntos de alta presión se desarrollan en las mismas coordenadas espaciales. Se destaca en esta ocasión una mayor estabilidad de presión atmosférica por parte de *OpenFOAM* en la zona de descarga, en comparación a los artefactos generados por *ANSYS*.

Las pruebas de control adicionales utilizando agua pura, realizadas para descartar posibles anomalías en la programación de la viscosidad no newtoniana (plástico de Bingham), arrojaron el mismo patrón de discrepancia espacial y de velocidad.

Estas discrepancias se presentan a continuación en las figuras 14 a 25.

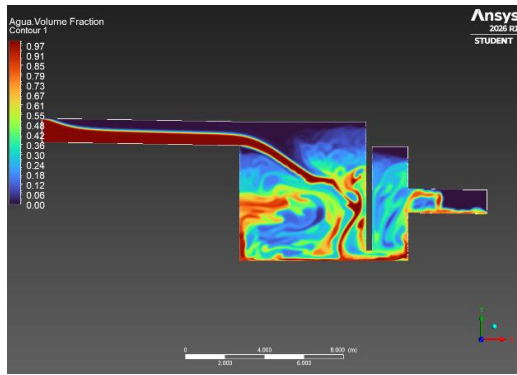


Figura 14: Fracción volumétrica agua ANSYS instante final caso transitorio 2D

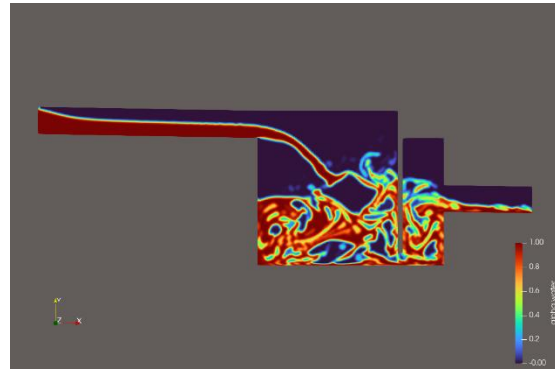


Figura 15: Fracción volumétrica agua OpenFOAM instante final caso transitorio 2D

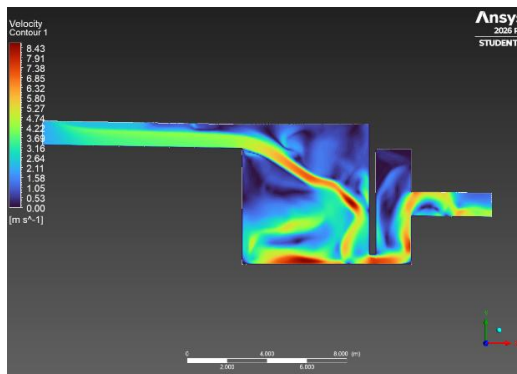


Figura 16: Perfil de velocidades agua ANSYS instante final caso transitorio 2D

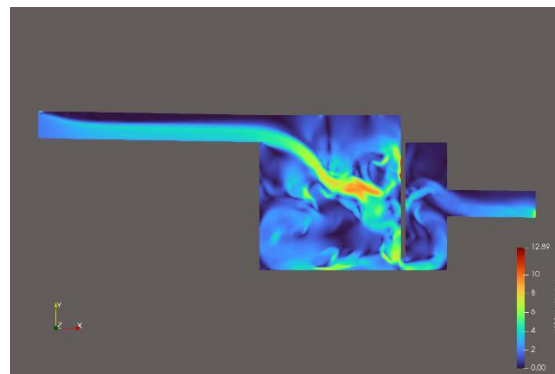


Figura 17: Perfil de velocidades agua OpenFOAM instante final caso transitorio 2D

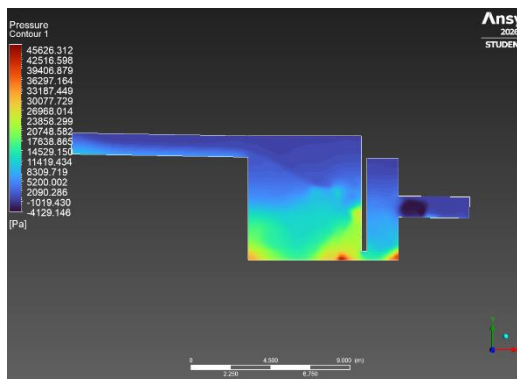


Figura 18: Contorno de presiones agua ANSYS instante final caso transitorio 2D

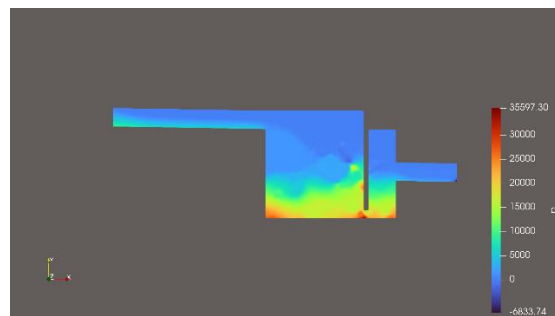


Figura 19: Contorno de presiones agua OpenFOAM instante final caso transitorio 2D

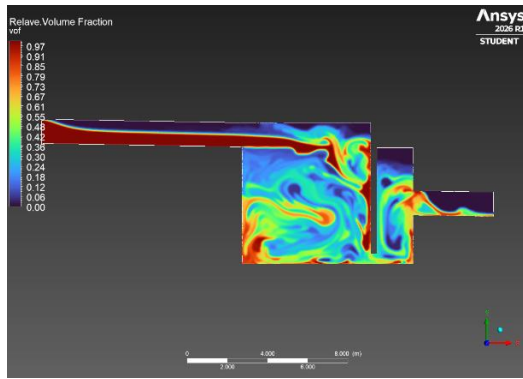


Figura 20: Fracción volumétrica relave ANSYS instante final caso transitorio 2D

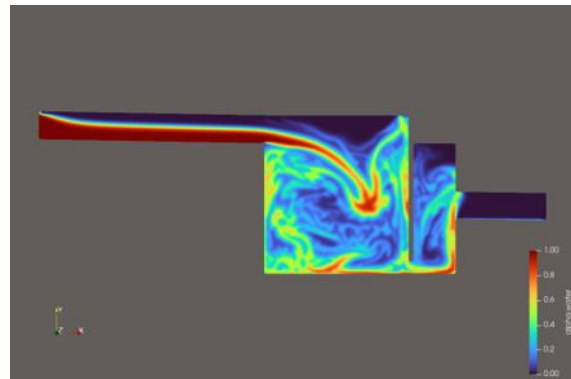


Figura 21: Fracción volumétrica relave OpenFOAM instante final caso transitorio 2D

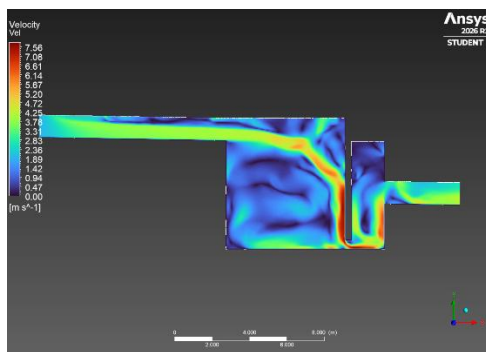


Figura 22: Perfil de velocidades relave ANSYS instante final caso transitorio 2D

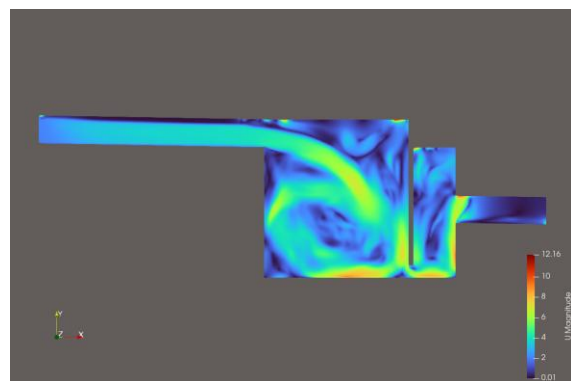


Figura 23: Perfil de velocidades relave OpenFOAM instante final caso transitorio 2D

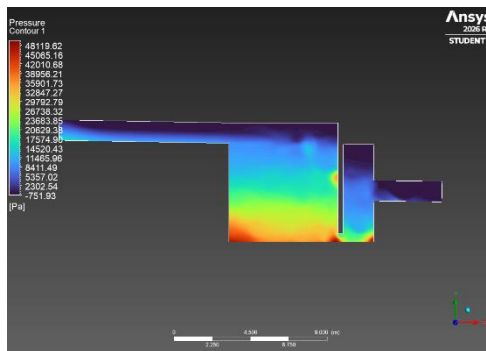


Figura 24: Contorno de presiones relave ANSYS instante final caso transitorio 2D

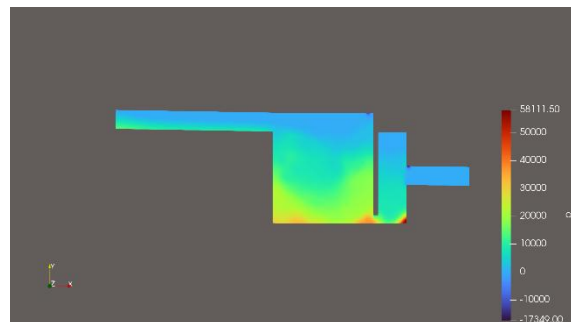


Figura 25: Contorno de presiones relave OpenFOAM instante final caso transitorio 2D

Para el posterior análisis de los resultados obtenidos, y al tratarse de un caso transitorio, no era posible evaluar las condiciones promedio por zona de manera representativa, por lo que se optó por realizar un mapeo espacial por nodos. Este método consistió en extraer las variables de presión, velocidad y fracción volumétrica en cada coordenada a modo de nube de puntos, obteniendo así un listado con una lectura exacta por nodo (22,276 puntos para este caso). Si bien se trabajó con la misma configuración de malla en ambos softwares, con

el fin de evitar cualquier discrepancia de interpolación milimétrica, se tomó como base la ubicación de los nodos extraídos de *ANSYS*. Estos datos base se importaron de *CFD-Post* a *ParaView*, donde, mediante el uso de los filtros *TableToPoints* y *ResampleWithDataset*, se obligó al modelo de *OpenFOAM* a calcular sus resultados exactamente en esa misma geometría de puntos, tal como se muestra en la Figura 26.

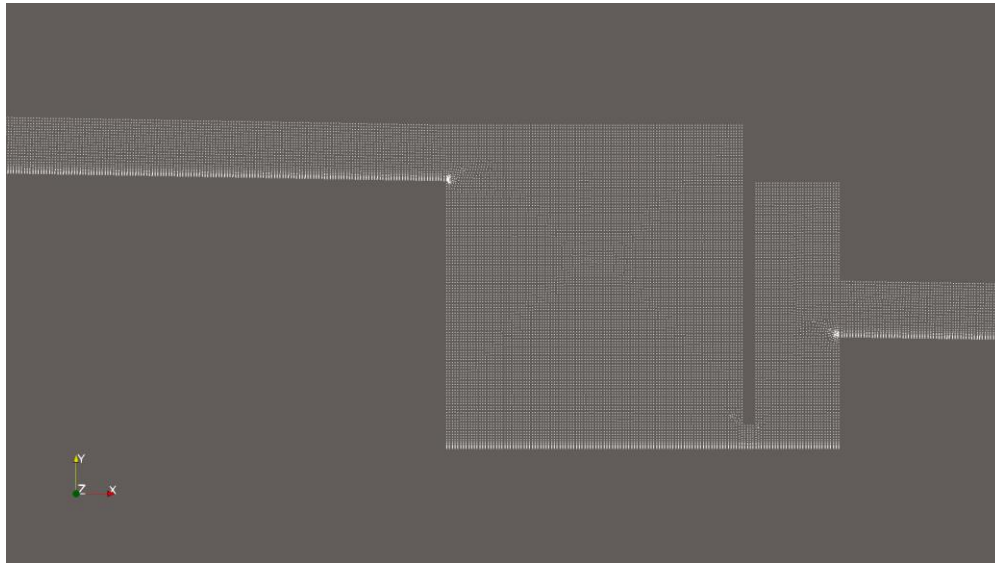


Figura 26: Nube de puntos generada para caso transitorio 2D

Lo anterior resultó en miles de lecturas emparejadas en las mismas coordenadas para ambos softwares, con lo que se procedió a realizar una comparación estadística mediante el Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE). Esto con el fin de cuantificar de manera rigurosa la desviación global entre las simulaciones, evitando que las subestimaciones y sobrestimaciones locales se cancelaran entre sí. Al normalizar el error cuadrático respecto al rango máximo y mínimo de cada variable independiente, se obtuvo un porcentaje de variación estandarizado que permite validar numéricamente la capacidad de *OpenFOAM* para replicar la física del software comercial en cada instante de tiempo.

De lo anterior, dadas las diferencias esquemáticas irresolubles existentes entre el 2D nativo de *ANSYS* y el pseudo 2D que trabaja *OpenFOAM*, se obtienen los siguientes resultados. Se compara únicamente el paso de tiempo final debido a que ambas simulaciones trabaron con tiempos adaptativos, lo que imposibilitaba evaluar en los mismos instantes de tiempo exactos.

Tabla 10 Error porcentual entre ANSYS y OpenFOAM casos transitorios 2D

	Presión	Velocidad	Fracción volumétrica
Agua	7.97	34.75	22.66
Relave	13.31	27.82	29.48

Por su parte, se evaluaron los 3 monitores de velocidad antes especificados para determinar las discrepancias en puntos clave de ambos programas, esto debido a la importancia de la velocidad en estas zonas específicas, las velocidades registradas en los distintos monitores se muestran en la Tabla 11 Velocidades en monitores del cajón de traspaso *ANSYS* y *OpenFOAM*.

Tabla 11 Velocidades en monitores del cajón de traspaso *ANSYS* y *OpenFOAM*

	Monitor 1	Monitor 2	Monitor 3
Agua <i>ANSYS</i>	3.61	3.14	3.03
Agua <i>OpenFOAM</i>	3.13	2.49	1.18
Relave <i>ANSYS</i>	3.33	2.58	1.78
Relave <i>OpenFOAM</i>	3.63	2.34	1.74

4.2.2 Resultados Transitorios 3D

Los resultados obtenidos en el caso tridimensional *DamBreak* revelaron una convergencia progresiva pero insuficiente entre *ANSYS Fluent* y *OpenFOAM* a lo largo de las cinco iteraciones realizadas. La diferencia máxima en los campos de velocidad se redujo desde valores considerables en la configuración base hasta aproximadamente un 9.5% en la iteración final, sin alcanzar la meta del 1% establecida en la hipótesis.

En la primera iteración, los contornos de fracción volumétrica presentaron una distribución morfológicamente consistente entre ambas plataformas para el segundo 0.1. Sin embargo, en el segundo 0.4, *OpenFOAM* generó falsos picos de velocidad en las regiones de interfaz gas-líquido. *ANSYS Fluent*, operando con el esquema *Modified HRIC*, mantuvo una interfaz más nítida y velocidades de impacto más bajas que *OpenFOAM* durante los instantes intermedios.

En la segunda iteración, la sustitución del esquema de advección del momento por *limitedLinearV* 1,0 redujo los picos de velocidad en los tiempos iniciales, mejorando la concordancia en el segundo 0.1. No obstante, en los instantes intermedios (0.4 s y 0.6 s), la diferencia entre plataformas se incrementó levemente

La tercera iteración incorporó limitadores de gradiente del tipo *cellLimited* en todos los esquemas de discretización. Esta modificación introdujo una mejora marginal en la estabilidad global de la solución, reduciendo ligeramente la amplitud de los picos de velocidad. Sin embargo, estos no se eliminaron por completo y los perfiles de fracción volumétrica permanecieron cualitativamente similares a los obtenidos en la iteración anterior.

En la cuarta iteración se sustituyó *interFoam* por *interIsoFoam*, *solver* basado en el método de reconstrucción geométrica *isoAdvection*, análogo al esquema *Geo-Reconstruct* disponible en *ANSYS Fluent*. Los resultados con este *solver* exhibieron un desempeño

inferior al de las iteraciones previas basadas en *MULES*: los perfiles de velocidad se distanciaron aún más de la referencia de *ANSYS Fluent* en todos los instantes evaluados.

En la quinta y última iteración, se combinó la configuración de *OpenFOAM* de la tercera iteración con una modificación en *ANSYS Fluent*, la desactivación de la herramienta *Implicit Body Force*, y la activación del modo experto para la resolución de la fracción volumétrica en cada iteración. Este ajuste redujo efectivamente los extremos de velocidad calculados por *ANSYS Fluent*, produciendo un acercamiento entre ambas soluciones. La diferencia máxima en los campos de velocidad se redujo a aproximadamente un 9.5% en el instante final, constituyendo el mejor resultado obtenido en todo el proceso iterativo, aunque sin alcanzar la meta del 1%.

A modo de ejemplo las figuras comparativas de velocidad el segundo 0.6, correspondientes a las iteraciones de la primera a la quinta, se presenta en las figuras 27 a 36. Se seleccionan los perfiles de velocidad y este segundo pues es donde se evidencian las discrepancias más significativas. Mientras que el resto de los contornos, como presión y fracción volumétrica, para todos los pasos de tiempo se presentan en el Anexo 7.10 a 7.12.

De igual manera que en el caso anterior se aplica un mapeo espacial de nube de puntos en los contornos de presión, velocidad y fracción volumétrica, esto con el fin de realizar una comparación cuantitativa válida del porcentaje de error obtenido en cada paso de tiempo analizado utilizando el método NRMSE y no únicamente una comparación de máximos. Utilizando el mismo método expuesto en el caso transitorio 2D se obtienen los resultados presentes de la Tabla 12 a la Tabla 14.

Cabe mencionar que en este caso al tener 15 archivos por cada simulación y tratarse de 6 simulaciones los 90 archivos csv fueron tratados con un archivo en Python el cual aplicaba la norma NRMSE, de esta manera agilizando el proceso. Dicho archivo se encuentra en el Anexo 7.8.

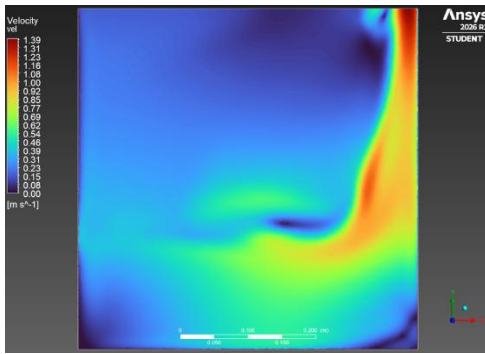


Figura 27: Perfil de velocidades segundo 0.6 primera iteración ANSYS

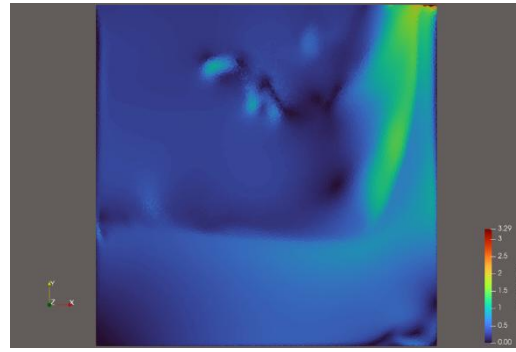


Figura 28: Perfil de velocidades segundo 0.6 primera iteración OpenFOAM

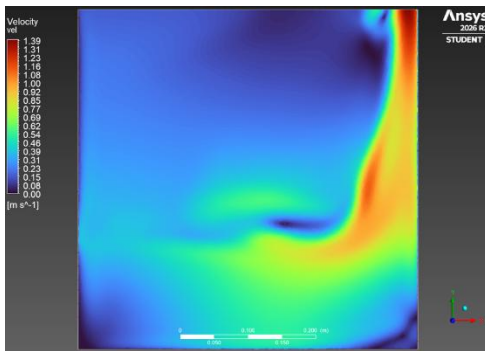


Figura 29: Perfil de velocidades segundo 0.6 segunda iteración ANSYS

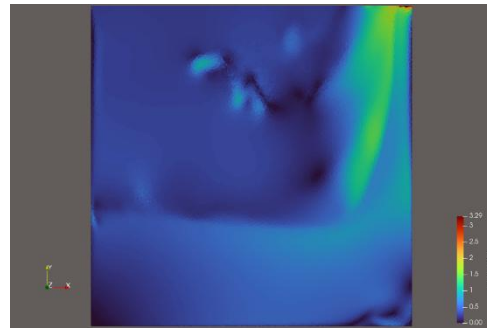


Figura 30: Perfil de velocidades segundo 0.6 segunda iteración OpenFOAM

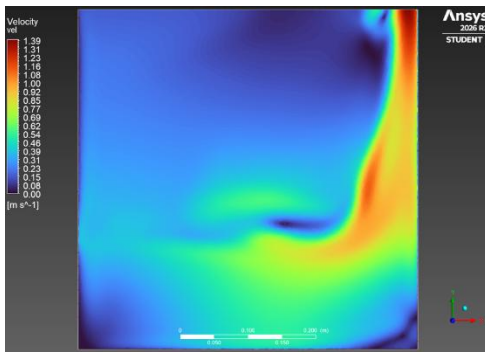


Figura 31: Perfil de velocidades segundo 0.6 tercera iteración ANSYS

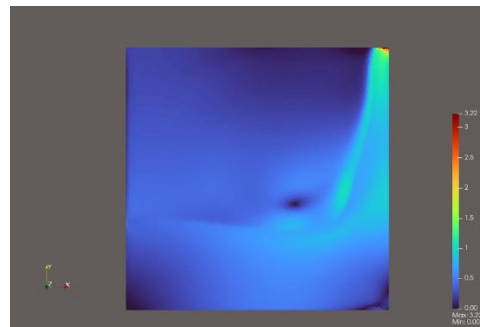


Figura 32: Perfil de velocidades segundo 0.6 tercera iteración OpenFOAM

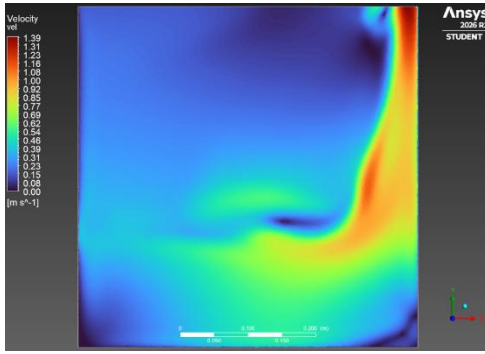


Figura 33: Perfil de velocidades segundo 0.6 cuarta iteración ANSYS

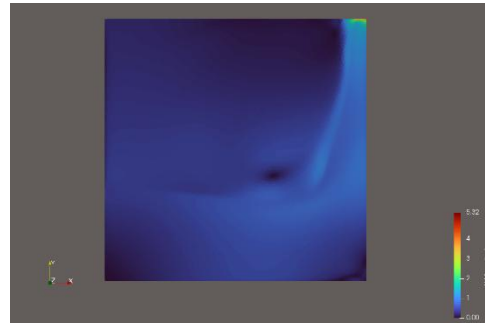


Figura 34: Perfil de velocidades segundo 0.6 cuarta iteración OpenFOAM

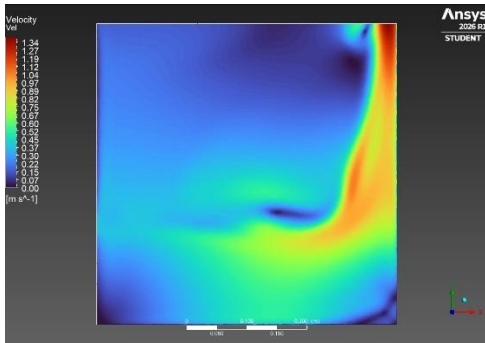


Figura 35: Perfil de velocidades segundo 0.6 quinta iteración ANSYS

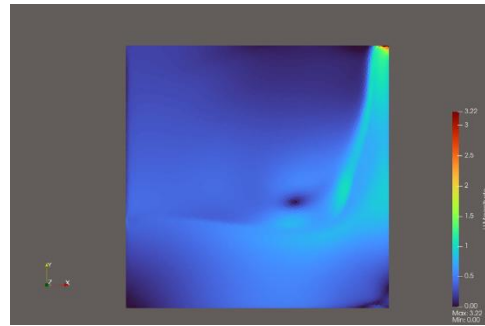


Figura 36: Perfil de velocidades segundo 0.6 quinta iteración OpenFOAM

Tabla 12: Error porcentual de presión casos transitorios 3D

Iteración	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s	1.1s	1.2s	1.3s	1.4s	1.5s	$\bar{x}$
1era	0.73	1.25	1.60	2.61	1.23	2.19	2.40	5.22	1.96	2.19	2.19	2.08	3.19	1.48	1.82	2.15
2 ^{da}	0.86	1.11	1.78	2.64	1.23	1.22	1.08	3.67	1.68	1.47	1.27	1.43	1.85	2.40	0.90	1.64
3 ^{era}	1.18	1.63	1.64	2.57	1.28	0.97	0.89	3.61	1.61	1.20	1.10	1.29	1.31	2.17	0.94	1.56
4 ^{ta}	1.29	1.55	1.41	3.21	1.22	2.62	3.36	8.81	2.62	2.53	3.12	4.39	5.01	1.48	2.85	3.03
5 ^{ta}	1.18	1.63	1.64	2.57	1.28	0.97	0.89	3.58	1.62	1.20	1.11	1.29	1.31	2.23	0.96	1.56

Tabla 13: Error porcentual de velocidad casos transitorios 3D

Iteración	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s	1.1s	1.2s	1.3s	1.4s	1.5s	$\bar{x}$
1era	5.09	34.73	12.64	17.68	13.42	7.01	8.45	10.00	9.52	8.00	14.37	9.98	10.66	9.93	20.06	12.76
2 ^{da}	4.55	6.85	6.63	7.71	7.14	5.23	5.99	10.51	10.09	7.74	14.52	12.81	16.15	11.80	13.81	9.44
3 ^{era}	4.87	6.53	6.13	8.24	7.69	5.10	5.86	9.51	9.93	8.37	14.90	11.56	14.58	13.20	16.07	9.50
4 ^{ta}	5.29	6.90	8.36	13.18	23.70	16.65	15.55	13.12	22.28	35.50	70.21	39.02	25.70	20.94	34.07	23.36
5 ^{ta}	4.87	6.53	6.13	8.24	7.67	5.10	5.97	9.56	10.01	8.42	14.72	11.54	14.60	12.72	16.00	9.47

Tabla 14: Error porcentual de fracción volumétrica casos transitorios 3D

Iteración	0.1s	0.2s	0.3s	0.4s	0.5s	0.6s	0.7s	0.8s	0.9s	1.0s	1.1s	1.2s	1.3s	1.4s	1.5s	$\bar{x}$
1era	3.64	5.60	5.95	5.45	6.92	8.62	9.71	12.10	13.10	14.48	14.91	13.67	12.30	10.47	10.49	9.85
2 ^{da}	3.68	5.51	5.38	6.39	6.64	9.41	8.84	10.81	13.75	14.81	16.05	14.90	12.65	11.41	8.31	9.90
3 ^{era}	4.90	6.82	5.43	6.31	6.66	9.58	8.72	10.61	13.87	15.35	15.44	13.61	11.69	10.27	9.34	9.91
4 ^{ta}	5.90	6.73	7.19	7.32	8.83	12.02	11.48	17.19	15.01	18.71	18.61	18.47	17.73	12.87	14.13	12.81
5 ^{ta}	4.91	6.86	5.43	6.29	6.64	9.59	8.71	10.63	13.90	15.43	15.49	13.64	11.80	10.42	9.35	9.94

4.2.3 Costo computacional transitorio

De igual manera que en el caso en régimen permanente, se registran los tiempos de cálculo necesario para cada simulación transitoria con el fin de realizar una posterior comparación de los mismos. Por la naturaleza de este tipo de simulaciones, los tiempos de cómputo transitorios resultan considerablemente mayores a los estacionarios. Dichos tiempos se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Tiempos de cálculo para los casos transitorios

Caso	Plataforma	T. sim. [s]	T. cálculo [hr]	Núcleos	T/paso [s/iter]
2D Relave	ANSYS Fluent	15	6.00	4	0.005
2D Relave	<i>OpenFOAM</i>	15	0.13	4	0.005
2D Agua	ANSYS Fluent	15	6.00	4	0.005
2D Agua	<i>OpenFOAM</i>	15	4.60	4	0.005
3D v2	<i>OpenFOAM</i>	1,5	4.87	4	0.0005
3D v3	<i>OpenFOAM</i>	1,5	4.49	4	0.0005
3D v4	<i>OpenFOAM</i>	1,5	7.23	4	0.0005
3D v2	ANSYS Fluent	1,5	20.00	4	0.0005

5 Discusión

5.1 Interpretación de los Resultados y Evaluación de la Hipótesis

El análisis demuestra que la capacidad de *OpenFOAM* para alcanzar una equivalencia técnica frente al estándar comercial ANSYS Fluent está condicionada de forma directa por el régimen de flujo y la complejidad fenomenológica de las ecuaciones gobernantes, lo que valida únicamente de manera parcial la hipótesis de investigación planteada.

En el modelo en régimen permanente con transferencia de calor, la hipótesis de lograr una equivalencia técnica con discrepancias inferiores al 1% se cumplió de manera exitosa. Los perfiles térmicos volumétricos transversales registraron desviaciones máximas absolutas inferiores a 0,3 °C entre ambas plataformas en la totalidad de los escenarios evaluados con aislamiento. Esto demuestra que los solucionadores termo físicos (*chtMultiRegionSimpleFoam* en el código abierto y el solucionador basado en presión en *Fluent*) resuelven de manera análoga la transferencia de calor por conducción y convección acopladas al modelo de turbulencia k-epsilon estándar, siempre que la discretización espacial (mallado) mantenga métricas estrictas de calidad ortogonal.

Por el contrario, en los modelos en régimen transitorio multifásico, la meta de reducir las diferencias a márgenes inferiores al 1% resultó inalcanzable bajo configuraciones operativas estándar. La evaluación bidimensional (2D) expuso un Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE) crítico en el campo de velocidades, alcanzando un 27,82% para el caso de la pulpa mineral y un 34,75% para el agua pura. Aunque la transición hacia el dominio tridimensional disminuyó notablemente estas anomalías cinemáticas mediante la sintonización progresiva de esquemas limitadores, el error NRMSE de velocidad en la iteración final se estabilizó en un promedio global de 9,47%, registrando un valor mínimo del 5,10% en instantes específicos como el segundo 0,6. Esto evidencia la persistencia de una brecha provocada por diferencias algorítmicas en la captura de interfaces libres, las cuales generan discrepancias que no pueden resolverse sin una sintonización avanzada que escape de las opciones por defecto.

5.2 Contextualización con el Estado del Arte

5.2.1 Régimen permanente

Los hallazgos de rendimiento computacional en el escenario estacionario introducen un importante matiz a las conclusiones documentadas por *Kutkan y Guerrero (2021)*, quienes sostienen que los solucionadores acoplados de Fluent presentan una robustez y rendimiento computacional invariablemente superiores ante problemas estacionarios con modelos físicos complejos. En este estudio, el solucionador segregado de *OpenFOAM* demostró una eficiencia temporal drásticamente superior, reduciendo el tiempo de procesamiento total hasta en un 65% frente a Fluent (registrando 11 minutos frente a los 31 minutos del entorno comercial para la tubería de 6 pulgadas con 1 pulgada de aislante). Esto demuestra que, para problemas de transferencia de calor monofásica en fluidos incompresibles, la resolución matricial iterativa desacoplada de *OpenFOAM* optimiza el uso

de CPU al evitar la sobrecarga masiva de memoria característica de la formulación acoplada de Fluent, alcanzando los criterios de convergencia global de forma más eficiente.

5.2.2 Régimen transitorio

En el régimen transitorio multifásico, la obtención de un NRMSE de velocidad del 27,82% en la simulación del relave 2D corrobora con exactitud matemática la discrepancia crítica de hasta un 27% en magnitudes de velocidad documentada por *Pogorelow Morales (2021)* en sistemas de ventilación e impactos dinámicos. El origen físico de esta desviación se aisló en el comportamiento del algoritmo algebraico de captura de interfaz: mientras Fluent opera con el esquema *Modified HRIC* que preserva una interfaz nítida y amortigua numéricamente los gradientes abruptos de fase en el frente de onda, el *solver interFoam* de *OpenFOAM* utiliza el algoritmo algebraico nativo *MULES*. Al carecer de amortiguadores adaptativos automáticos ante mallas pseudo-2D puras, *MULES* induce una difusión numérica severa que altera mecánicamente las trayectorias de flujo e incrementa artificialmente las velocidades máximas hasta 10.0 m/s frente a los 8.4 m/s de Fluent. Este fenómeno confirma la fragilidad e inestabilidad del código abierto ante gradientes cinemáticos intensos reportada por *Welahettige y Vaagsaether (2016)*.

Al analizar la evolución temporal del error estadístico en el caso tridimensional, las tablas estadísticas de NRMSE revelan que el error en el campo de presiones se mantiene notablemente bajo y estable a lo largo de los 1.5 segundos de simulación, promediando un 1.56% en la quinta iteración. No obstante, las variables de velocidad y fracción volumétrica experimentan oscilaciones marcadas, elevándose el error cinemático hasta un 14.72% en instantes intermedios de alta agitación hidrodinámica (segundo 1.1) antes de descender en las fases de estabilización final. Esta fluctuación se explica por la dinámica del colapso de la columna de agua bajo la acción de la gravedad y su violento choque contra la pared sólida opuesta. En estos instantes de transición violenta, la ausencia en *OpenFOAM* de una herramienta de amortiguación de fuerzas hidrostáticas equivalente a la función *Implicit Body Force* de *Fluent* genera falsos picos de velocidad espurios en las celdas compartidas por la interfaz gas-líquido. Esto valida la tesis de *Chiriac et al. (2019)* respecto a que las diferencias algorítmicas en el acoplamiento presión-velocidad degradan la robustez transitoria local a pesar de mantener una coherencia estructural global.

5.3 Viabilidad comercial

En términos de velocidad bruta en escenarios tridimensionales complejos, *OpenFOAM* respaldó mecánicamente lo expuesto por *Ariza et al. (2018)* al completar el caso *DamBreak 3D* en un rango de 4.49 a 7.23 horas frente a las 20.00 horas exigidas por Fluent utilizando la misma capacidad de hardware de 4 núcleos físicos. Esta brecha temporal radica en la formulación de resolución interna: *Fluent* calcula explícitamente los flujos de velocidad en las caras de las celdas y la presión implícitamente en el centro, elevando masivamente el consumo de CPU. *OpenFOAM* es drásticamente más rápido al resolver la velocidad en el centro de la celda, pero transfiere la carga operativa hacia el ingeniero de simulación, quien está obligado a implementar estrategias de estabilización avanzadas (como limitadores estrictos de gradiente *cellLimited leastSquares 1.0*) para restringir la interpolación matemática y evitar sobre impulsos numéricos (*overshoots*) ante gradientes abruptos.

Asimismo, es imperativo corregir desde una perspectiva industrial la noción de que el entorno comercial posee una limitación técnica nativa infranqueable en el número de núcleos físicos de procesamiento. La verdadera ventaja competitiva para empresas como TNA Engineering no se fundamenta en una restricción de software de *Fluent*, sino en el modelo financiero de escalabilidad. Mientras que expandir las capacidades de procesamiento paralelo en entornos propietarios exige la adquisición de costosas licencias complementarias por paquetes de núcleos (HPC), la arquitectura de código abierto de *OpenFOAM* permite la ejecución y masificación de simulaciones de alta resolución y régimen transitorio de manera totalmente libre y gratuita en infraestructuras clúster de alto rendimiento, optimizando los recursos operativos y dependiendo exclusivamente de la disponibilidad de hardware del usuario.

5.4 Limitaciones del Estudio

- El estudio garantizó una estricta equivalencia espacial al importar directamente los mallados estructurados y poliédricos generados en *ANSYS Fluent Meshing* hacia *OpenFOAM* en formato ASCII (.msh). Sin embargo, el refinamiento y la delgadez de los elementos en las zonas de capa límite se vieron restringidos de forma estricta por el tope máximo de 1.048.576 celdas impuesto por la licencia estudiantil de ANSYS. Esta limitación impidió realizar un análisis analítico profundo de independencia de malla en las geometrías tridimensionales más complejas.
- Al no disponer de datos empíricos de laboratorio, mediciones experimentales controladas o levantamientos históricos de terreno, la investigación se vio forzada a adoptar los resultados numéricos de *ANSYS Fluent* como un *pseudobaseline* relativo de validación. A pesar de que estos casos hayan sido previamente validados por ingenieros de TNA, el estudio carece de una referencia absoluta que permita determinar con certeza que *software* representa con mayor fidelidad la realidad del fenómeno físico real.
- El análisis del comportamiento multifásico dinámico se restringió exclusivamente a la formulación cinemática de la fracción de volumen (VOF) estándar. Las asimetrías numéricas remanentes identificadas en los perfiles de presión podrían estar influenciadas por variaciones metodológicas menores en la gestión interna de las condiciones de borde en la cara abierta del dominio (*outlet*) por parte de la formulación PIMPLE frente al solucionador segregado del entorno comercial.
- El estudio e investigación tiene un enfoque puramente práctico y aplicable a los tiempos y recursos comerciales, por lo que se dejan fuera modelos de turbulencia laminar o LES por su costo computacional y tiempos de cálculo que los vuelve inviable a estándares comerciales frente a alternativas como RANS

5.5 Implicaciones y Trabajo Futuro

Los resultados de esta investigación señalan que *OpenFOAM* es una alternativa industrial viable y altamente escalable para el diseño de infraestructura minera, especialmente en problemas térmicos estacionarios. No obstante, para procesos críticos de transporte de pulpas y relaves, su adopción exige extrema precaución.

Basado en las limitaciones e inestabilidades detectadas, se proponen los siguientes lineamientos para investigaciones futuras:

- **Validación Experimental:** Realizar experimentación empírica de los casos transitorios permitirá ajustar de mejor manera los modelos virtuales permitiendo determinar cuál de los dos códigos se acerca más a la realidad física de la dispersión del chorro. Casos como las tuberías y el cajón de traspaso pueden ser recreadas cambiando los materiales con acrílico que permitan una correcta visualización de los flujos internos, además del uso de tintes en soluciones que puedan recrear la viscosidad no newtoniana de la pulpa mineral, lo cual es ideal a la hora de comparar ya que ofrece un tercer punto de comparación con el que se puede ampliar el estudio.
- **Desarrollo de amortiguadores numéricos en el código abierto:** Dado que una de las mayores discrepancias era causada por la ausencia de una función del tipo *Implicit Body Force* de ANSYS. Se propone como línea de investigación la modificación del código fuente de *interFoam* para incorporar términos de amortiguación en la ecuación de momento, evaluando su capacidad para suprimir los picos espurios de velocidad derivados de gradientes abruptos de presión hidrostática sin comprometer la conservación de masa.

6 Conclusiones

6.1 Conclusiones generales

Como ya se mencionó, partir del análisis realizado entre *ANSYS Fluent* y *OpenFOAM*, se determina que la hipótesis de investigación se acepta de manera parcial.

Por un lado, se demostró una equivalencia técnica satisfactoria en la resolución de fenómenos térmicos, donde el error numérico en los perfiles de temperatura se mantiene por debajo del umbral del 1% establecido inicialmente. Esto valida la robustez de los *solvers* termodinámicos de *OpenFOAM* frente al estándar comercial. Por otro lado, la hipótesis se rechaza en el ámbito de las variables cinemáticas (velocidades) y transitorias, las cuales presentaron desviaciones superiores al 1% derivadas de las diferencias inherentes en la formulación de los algoritmos de acoplamiento presión-velocidad de cada software.

Desde la perspectiva de la viabilidad industrial, se concluye que *OpenFOAM* representa una alternativa operativa escalable y financieramente óptima para TNA Engineering. La capacidad de paralelizar simulaciones complejas sin restricciones de licenciamiento por núcleo compensa la mayor inversión de horas de ingeniería requeridas para el acondicionamiento de mallas y la configuración algorítmica de los solucionadores.

De lo anterior se obtienen las siguientes conclusiones generales:

- **Picos por compresión:** Los modelos de compresión artificial utilizados por *OpenFOAM* generan picos de velocidad al tratar de mantener una interfaz nítida.
- **Consideraciones de mallado:** Utilizar elementos no poliédricos provoca que en el paso a *OpenFOAM* estos se conviertan en poliedros, provocando mallas desiguales
- **Calidad del mallado:** *OpenFOAM* demostró una mayor sensibilidad a calidades de mallado inferior, una deformación sobre el 65% genera inconveniencias y estancamiento de la convergencia.
- **Curva de aprendizaje:** Al carecer de interfaz gráfica y ofrecer una mayor libertad en la configuración de esquemas y *solvers*, la curva de aprendizaje de *OpenFOAM* resulta más empinada que la de *ANSYS Fluent* para nuevos usuarios sin conocimiento previo en simulación CFD.
- **Nuevas tecnologías:** Las nuevas herramientas de IA y el uso de programación asistida por inteligencia artificial, ofrecen una disminución de la brecha inicial de dificultad en el aprendizaje de código libre, abriendo la posibilidad de un mayor estudio y refinado de la simulación en esta plataforma.

6.1.1 Modelo en régimen permanente

- **Homologación Térmica:** La resolución de la transferencia de calor exhibió una concordancia técnica óptima, evidenciando que *OpenFOAM* es capaz de reproducir los gradientes de temperatura.
- **Rendimiento Computacional:** Al resolver de manera iterativa y desacoplada, *OpenFOAM* evitó la sobrecarga de memoria y CPU, resultando más eficiente en tiempo de cómputo.
- **Estabilidad y Convergencia:** El código abierto exige un control más exhaustivo de residuos y esquemas para garantizar la estabilidad.

6.1.2 Modelo transitorio (Tanto 2D como 3D)

- **Captura de Interfaz Libre (VOF):** El análisis del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) expuso diferencias significativas insalvables en el caso 2D.
- **Respuesta Reológica de Bingham:** Ambas plataformas lograron reproducir morfológicamente las zonas de estancamiento y acumulación de material en los vértices del cajón. Los resultados visuales de acumulación confirman cualitativamente la capacidad de las plataformas de modelar zonas de nula deformación propias de los fluidos no newtonianos.
- **Efectos Tridimensionales (Caso 3D):** Mediante esta configuración iterativa, el error máximo en los campos de velocidad se redujo hasta aproximadamente un 9.5%, lo que supone una mejora considerable, sin embargo, resulta insuficiente para validar la meta original del 1%.
- **Eficiencia de Cómputo Transitorio 3D:** En el escenario tridimensional, *OpenFOAM* exhibió una ventaja de hasta 12 horas en el costo computacional, compensando sus dificultades numéricas con una mayor velocidad bruta.

6.1.3 Recomendaciones de replicabilidad y trabajo futuro

A continuación, se presenta una serie de recomendaciones con el fin de garantizar una buena replicabilidad y continuación de la investigación realizada en el presente informe.

- **Criterios de Calidad de Malla:** Como primer paso clave, debido a la sensibilidad de *OpenFOAM*, se recomienda que dicho mallado exportado desde *Fluent Meshing* mantenga un *skewness* inferior a 0.70 y una calidad ortogonal sobre el 0.65.
- **Criterios de Selección de Solvers:** Para lo cual se sugiere seguir con el testeo de *OpenFOAM* de manera correcta en casos térmicos, tomando como base los resultados obtenidos del 99% de similitud en los perfiles de temperatura. Para proyectos transitorios multifásicos, un factor clave es realizar un co-procesamiento inicial en ANSYS Fluent para posteriormente masificar las simulaciones en *OpenFOAM*.
- **Trabajo Futuro:** Como paso final se propone el desarrollo de *scripts* de automatización, así como evaluar el modelo de Herschel-Bulkley, el cual se utiliza para pulpas que exhiban un comportamiento de pseudoplasticidad combinado con esfuerzo de fluencia.

Referencias

- Ariza, C., Casado, C., Wang, R.-Q., Adams, E. E., & Marugán, J. (2018). Comparative evaluation of *OpenFOAM*® and ANSYS® Fluent for the modeling of annular reactors. *Chemical Engineering & Technology*, 41(7), 1303-1311. <https://doi.org/10.1002/ceat.201700455>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Chiriac, E., Broboană, D., & Balan, C. (2019). Comparative numerical study between *OpenFOAM* and ANSYS Fluent in a Y-junction microchannel. 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ATEE.2019.8725001>
- Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (3.^a ed.). Springer.
- Flowthermolab. (s.f.). Y plus calculator for internal and external flows. <https://www.flowthermolab.com/y-plus-calculator-for-internal-and-external-flows/>
- Kutkan, H., & Guerrero, J. (2021). Turbulent Premixed Flame Modeling Using the Algebraic Flame Surface Wrinkling Model: A Comparative Study between *OpenFOAM* and Ansys Fluent. *Fluids*, 6(12), 462. <https://doi.org/10.3390/fluids6120462>
- Pogorelow Morales, P. A. (2021). Análisis comparativo entre herramientas de simulación fluidodinámica (CFD) para la caracterización de sistemas de ventilación [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile]. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19622.68165>
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-layer theory* (9.^a ed.). Springer. The *OpenFOAM* Foundation. (2021).
- OpenFOAM* v7 User Guide. The *OpenFOAM* Foundation.
- Tisovská, P., Peukert, P., & Kolář, J. (2017). Verification of ANSYS Fluent and *OpenFOAM* CFD platforms for prediction of impact flow. EPJ Web of Conferences, 143, 02130. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714302130>
- Welahettige, P., & Vaagsaether, K. (2016). Comparison of *OpenFOAM* and ANSYS Fluent. Proceedings of the 57th SIMS Conference on Simulation and Modelling (SIMS 2016), 132(14), 1005–1012. Linköping University Electronic Press.
- White, F. M. (2006). *Viscous fluid flow* (3.^a ed.). McGraw-Hill.

7 Anexo

7.1 Configuraciones estacionarias ANSYS

A continuación, se presentan en orden las distintas configuraciones empleadas en ANSYS para la simulación definitiva del caso estacionario desde la geometría, mallado y configuración de simulación.

7.1.1 Geometría

A continuación, se presentan las configuraciones geométricas, tanto medidas, planos y ubicación de caras nombradas.

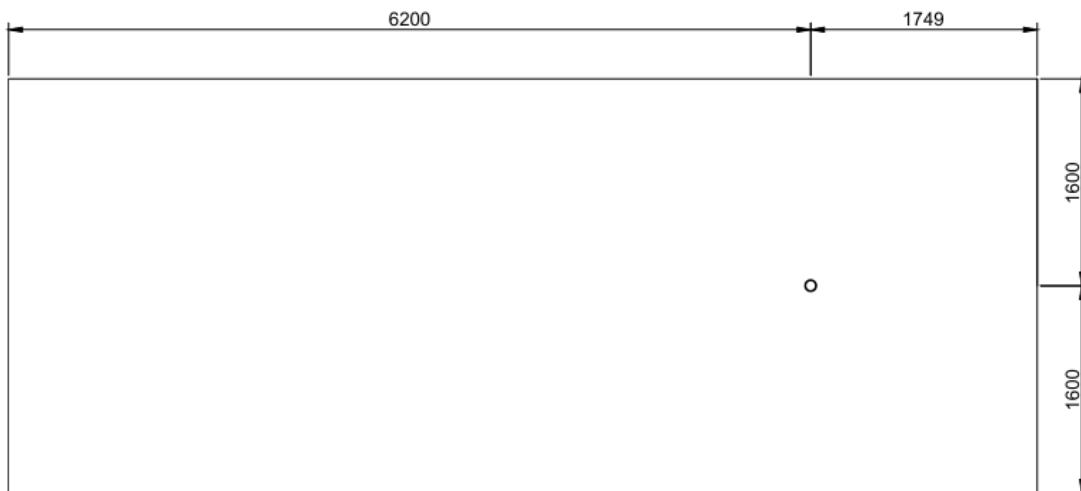


Figura 37: Dimensiones exteriores generales para el dominio

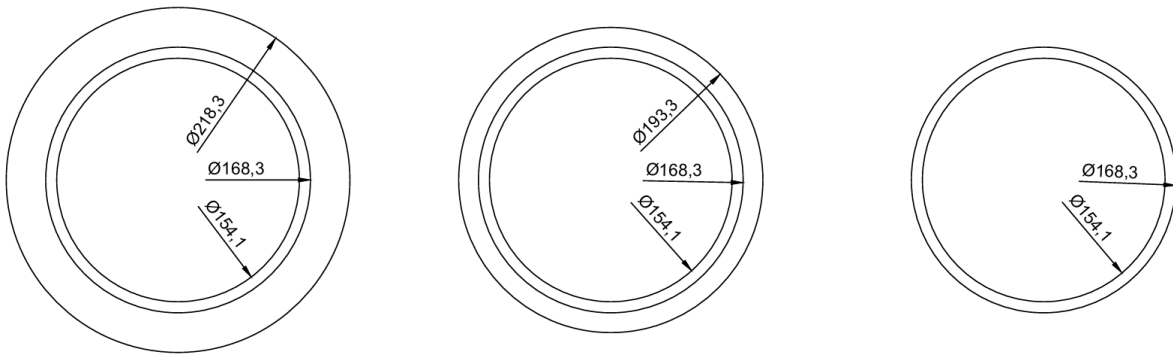


Figura 38: Dimensiones de tubería 6" con distintos espesores de aislante

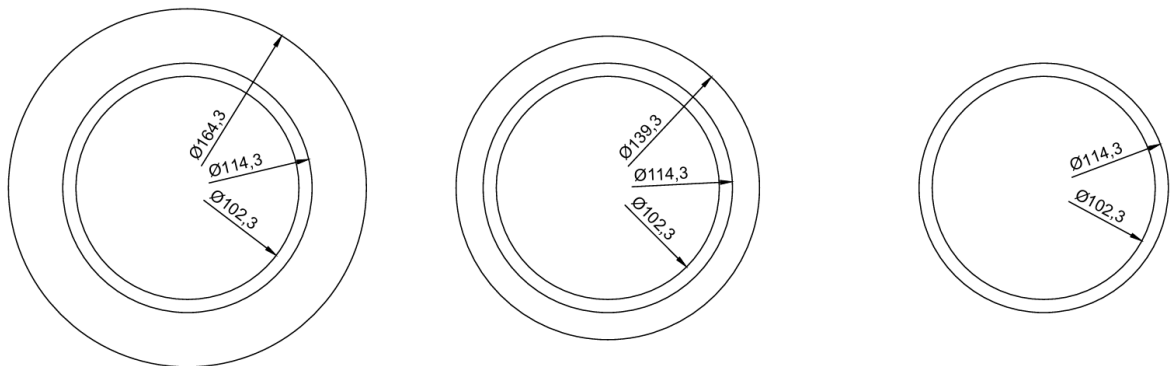


Figura 39: Dimensiones de tubería 4" con distintos espesores de aislante

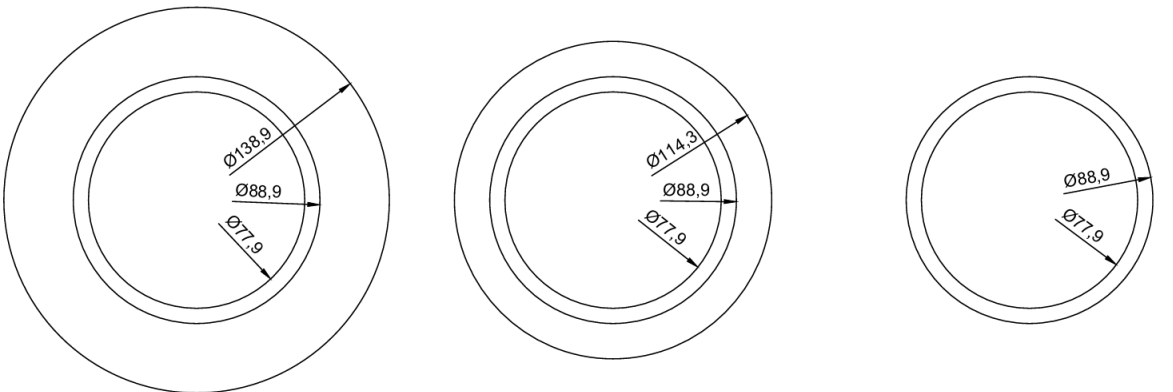


Figura 40: Dimensiones de tubería 3" con distintos espesores de aislante

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

Ansys
2026 R1
STUDENT

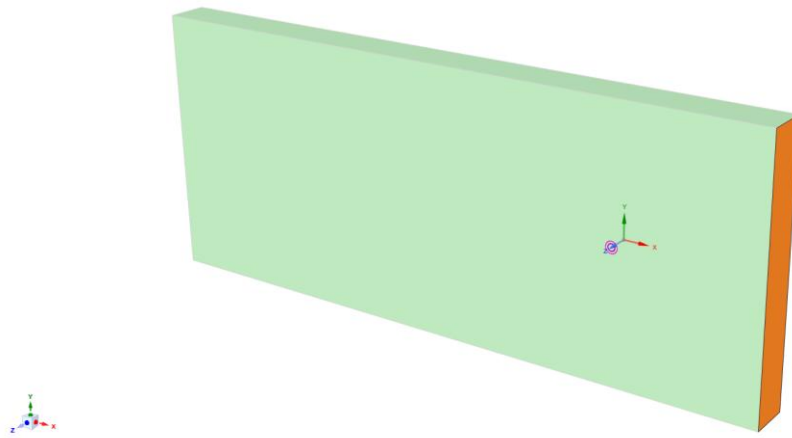


Figura 41: Named selection "Aire inlet"

Click a face to extend the current selection up to: Works for faces and edges.

Ansys
2026 R1
STUDENT

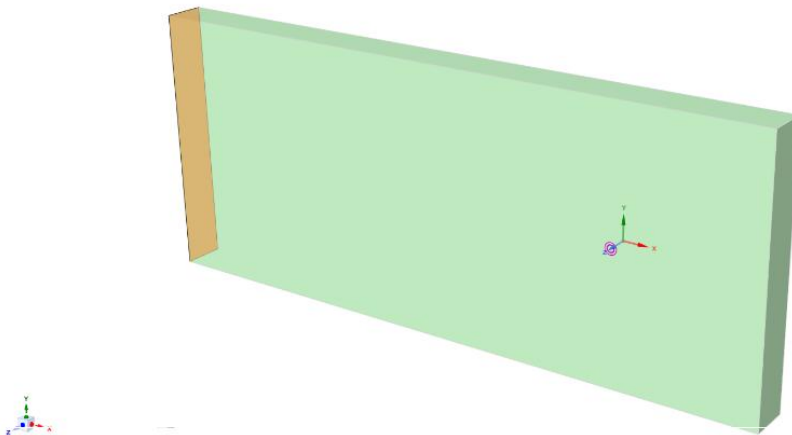


Figura 42: Named selection "Aire outlet"

Click a face to extend the current selection up to: Works for faces and edges.

Ansys
2026 R1
STUDENT

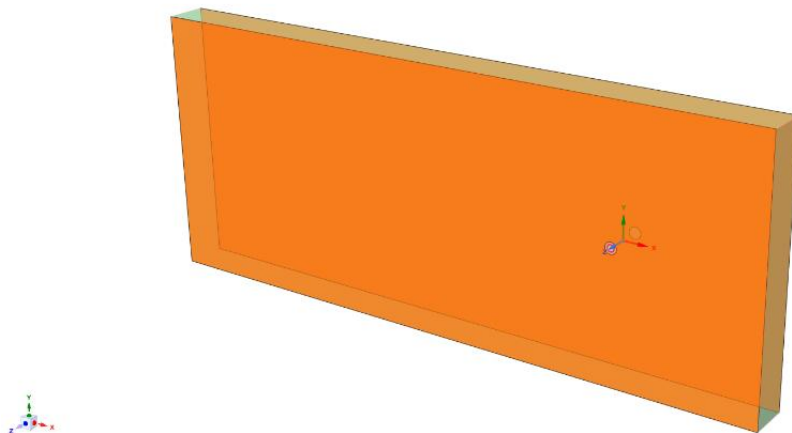


Figura 43: Named selection "Aire X"

Click a face to extend the current selection up to: Works for faces and edges.

Ansys
2026 R1
STUDENT

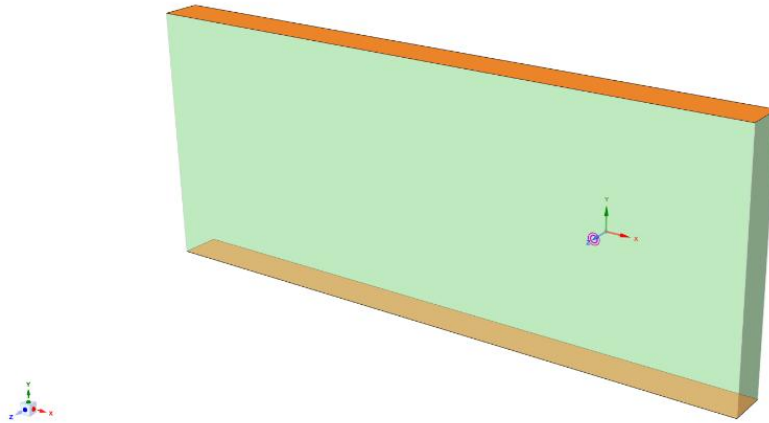


Figura 44: Named selection "Aire Y"

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

Ansys
2026 R1
STUDENT



Figura 45: Named selection "Agua inlet"

Click a face to extend the current selection up to: Works for faces and edges.

Ansys
2026 R1
STUDENT



Figura 46: Named selection "Agua outlet"

7.1.2 Mallado

A continuación, se presentan las configuraciones realizadas para el mallado de las 9 simulaciones estacionarias realizadas, dado que se utiliza la misma configuración general, con excepción del tamaño de primera capa, se muestra como ejemplo la configuración de la tubería de 3 pulgadas con 1 pulgada de aislante.

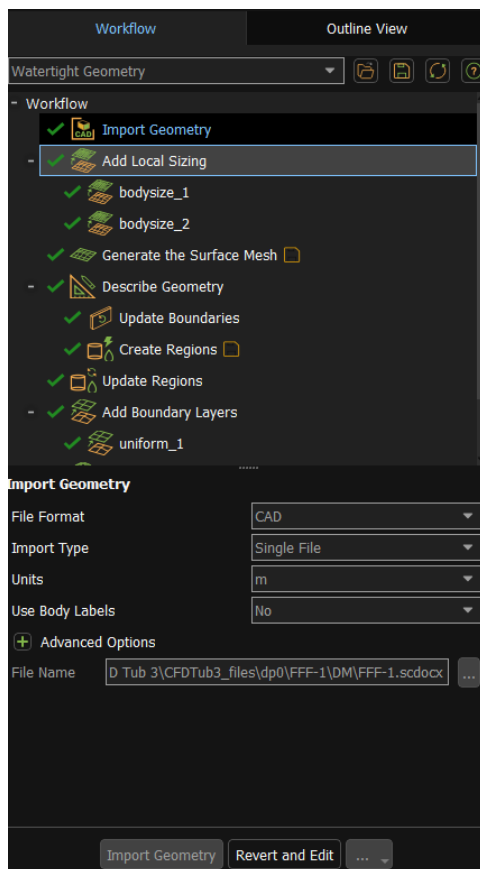


Figura 47: Configuración de mallado paso 1

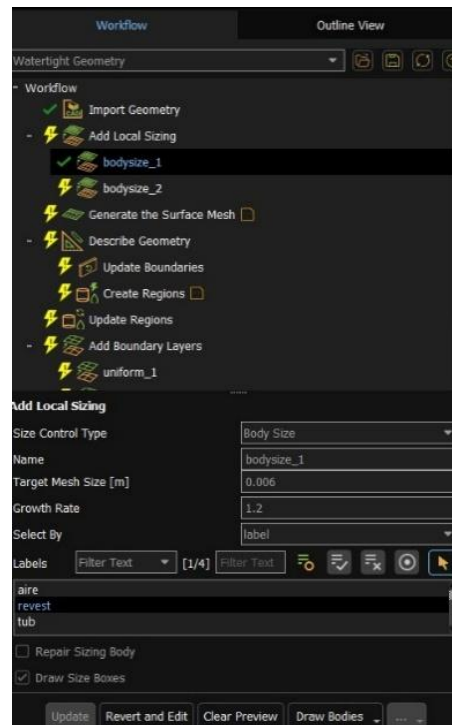


Figura 48: Configuración de mallado paso 2



Figura 49: Configuración de mallado paso 3



Figura 50: Configuración de mallado paso 4

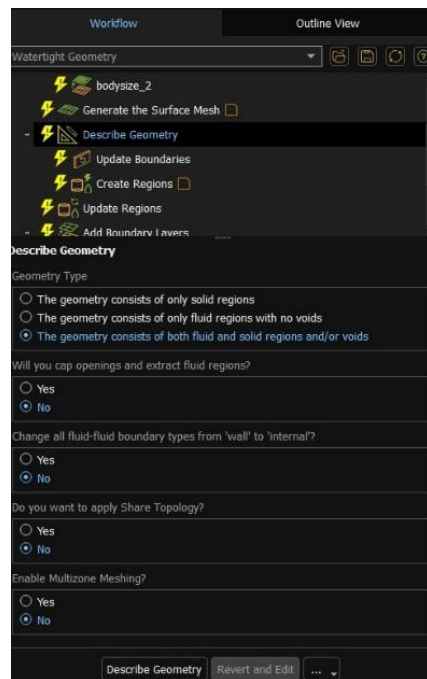


Figura 51: Configuración de mallado paso 5



Figura 52: Configuración de mallado paso 6



Figura 53: Configuración de mallado paso 7



Figura 54: Configuración de mallado paso 8



Figura 55: Configuración de mallado paso 9

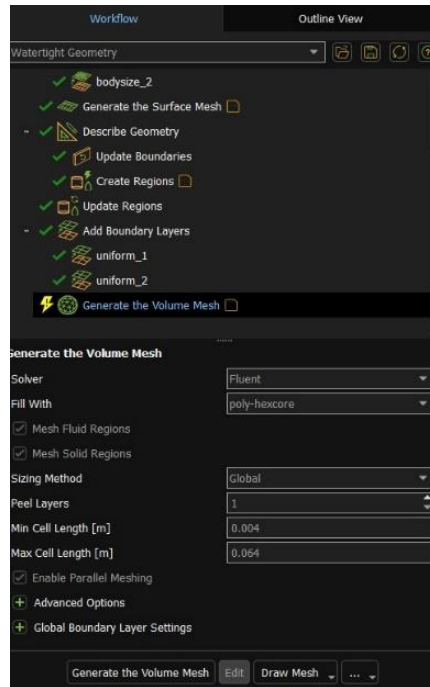


Figura 56: Configuración de mallado paso 10

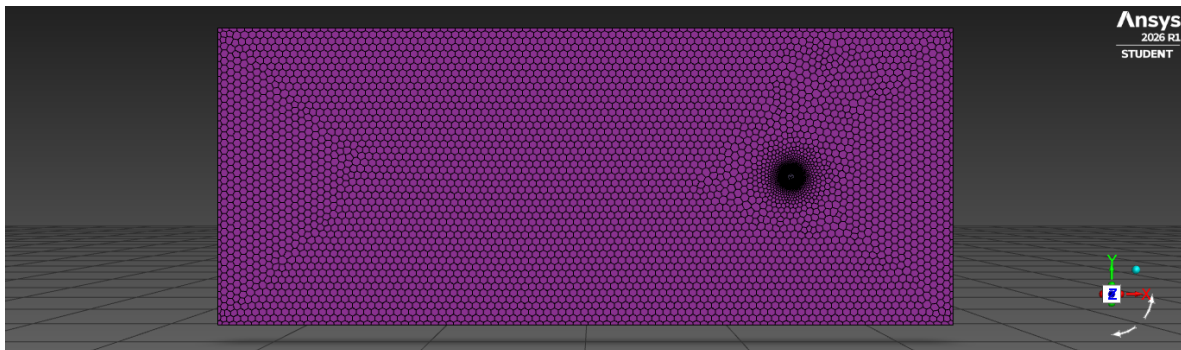


Figura 57: Malla tubería 6" con 1" de aislamiento

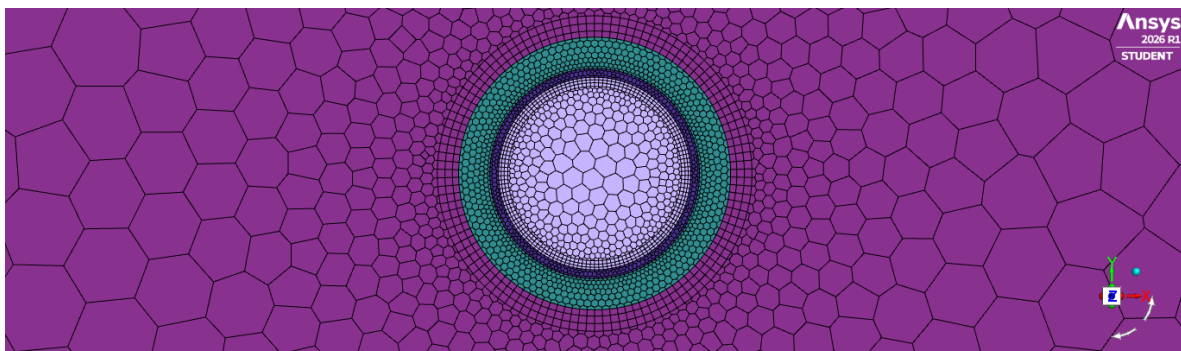


Figura 58: Malla tubería 6" con 1" de aislamiento acercamiento

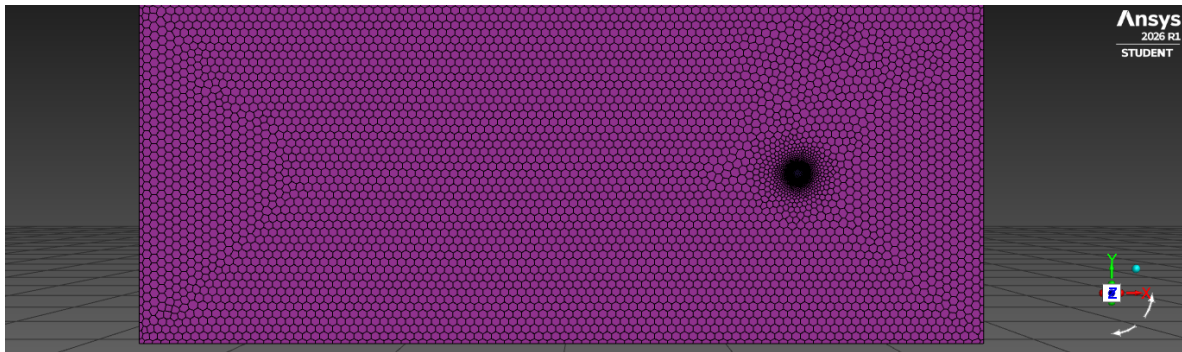


Figura 59: Malla tubería 6" con 1/2" de aislamiento

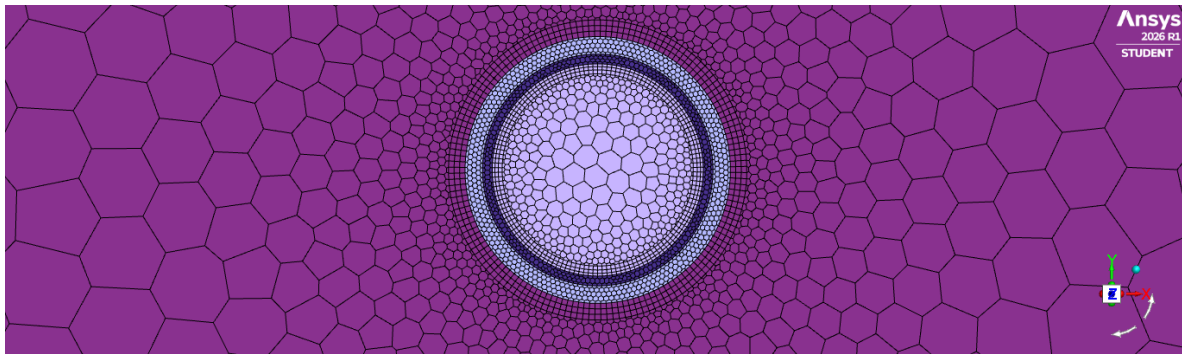


Figura 60: Malla tubería 6" con 1/2" de aislamiento acercamiento

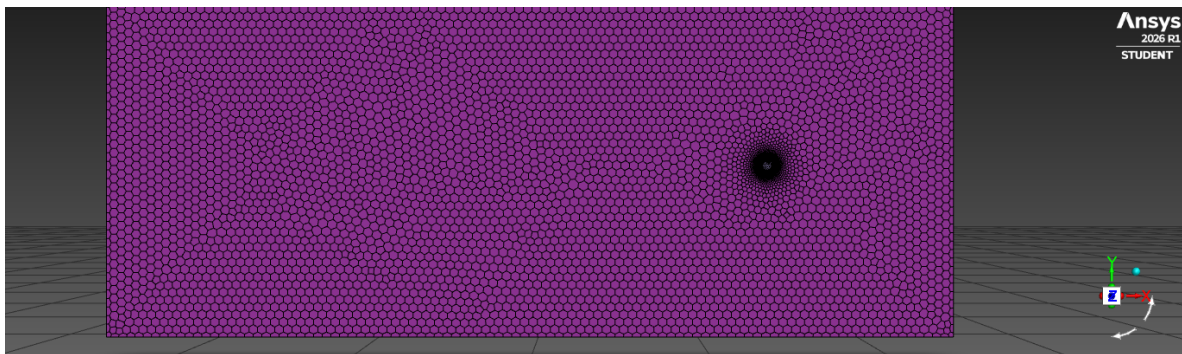


Figura 61: Malla tubería 6" sin aislamiento

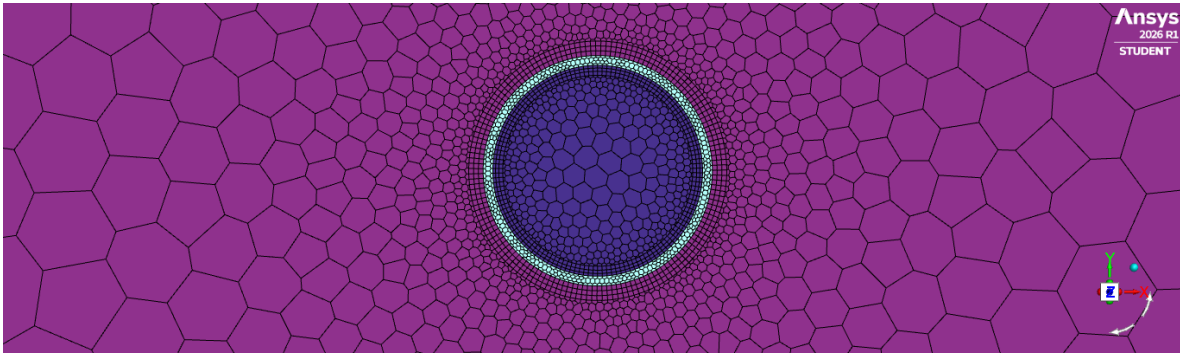


Figura 62: Malla tubería 6" sin aislamiento acercamiento

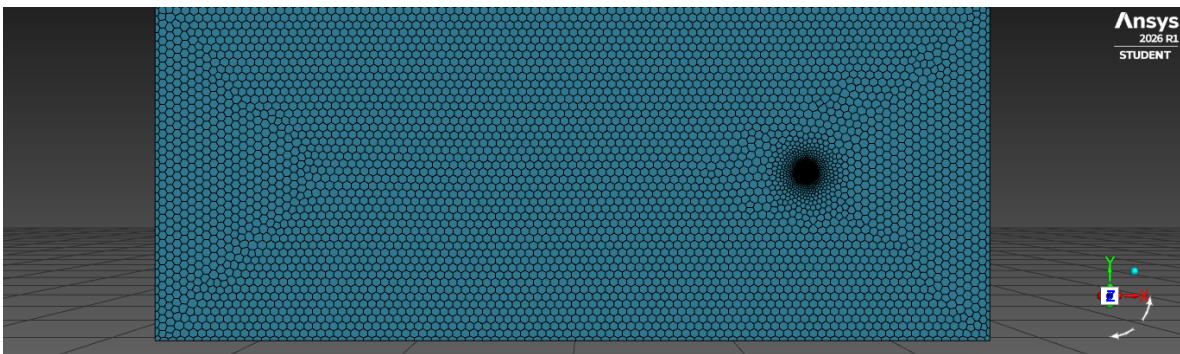


Figura 63: Malla tubería 4" con 1" de aislamiento

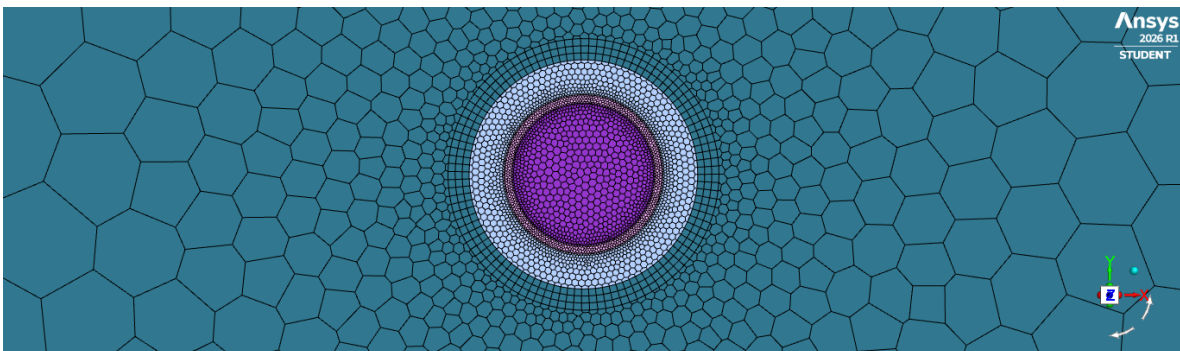


Figura 64: Malla tubería 4" con 1" de aislamiento acercamiento

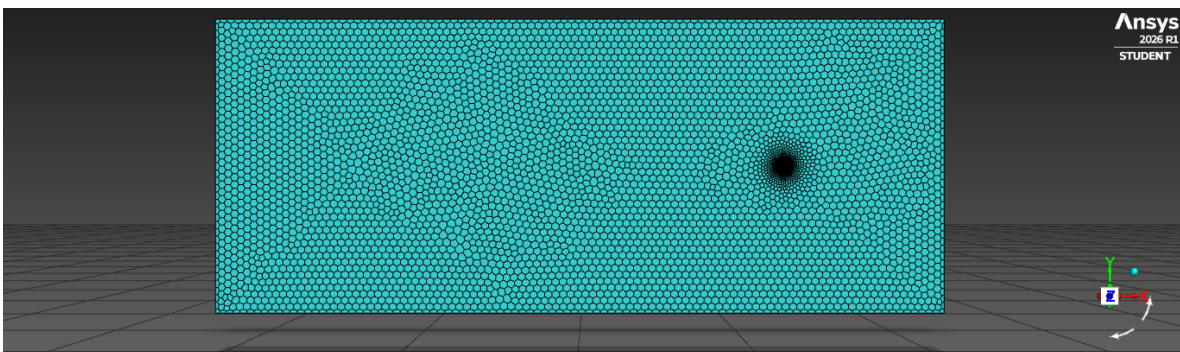


Figura 65: Malla tubería 4" con 1/2" de aislamiento

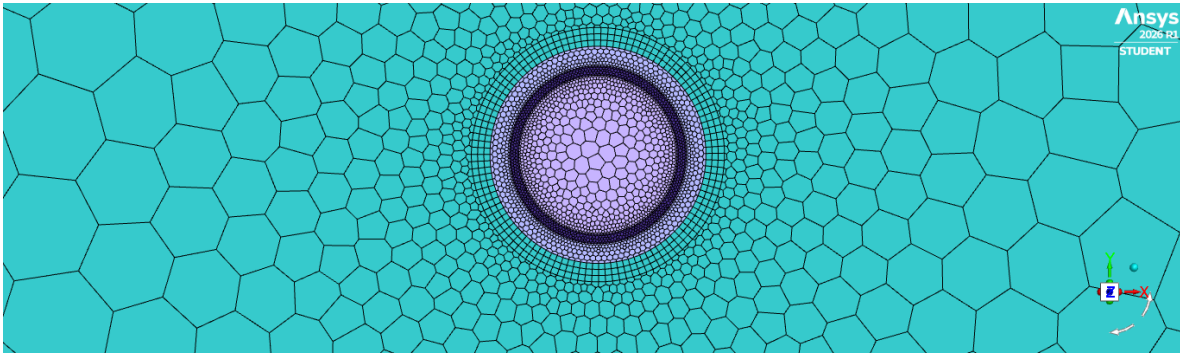


Figura 66: Malla tubería 4" con 1/2" de aislamiento acercamiento

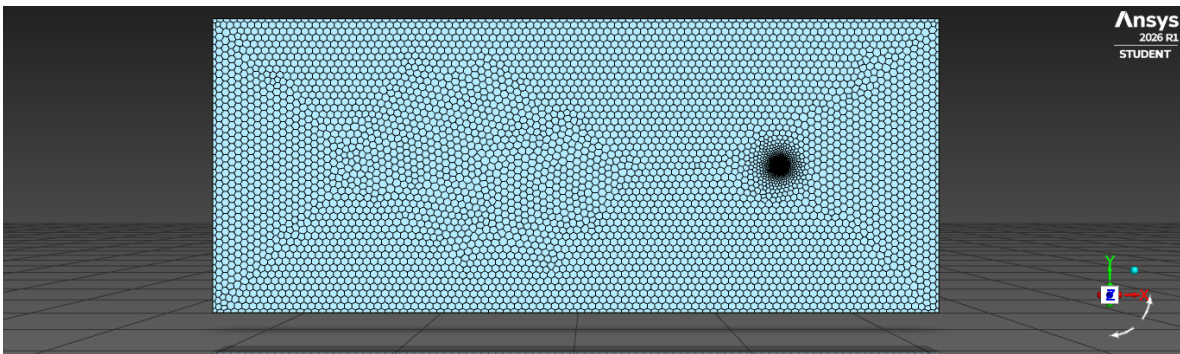


Figura 67: Malla tubería 4" sin aislamiento

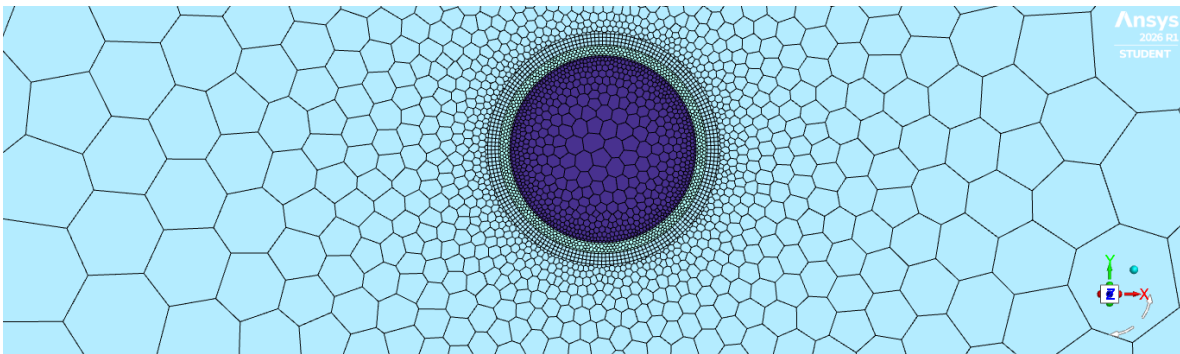


Figura 68: Malla tubería 4" sin aislamiento acercamiento

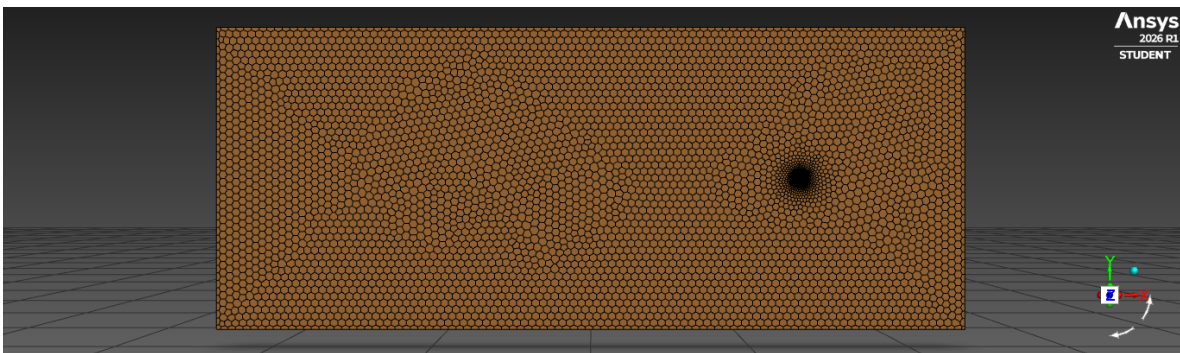


Figura 69: Malla tubería 3" 1" de aislamiento

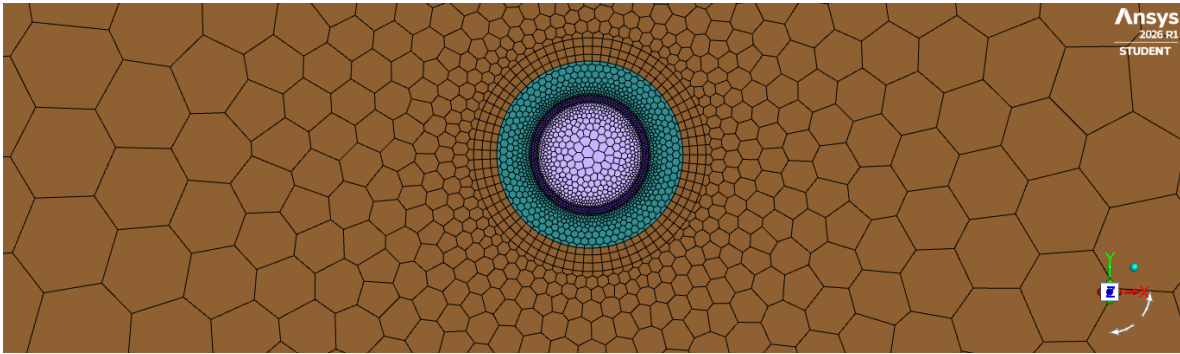


Figura 70: Malla tubería 3" 1" de aislamiento acercamiento

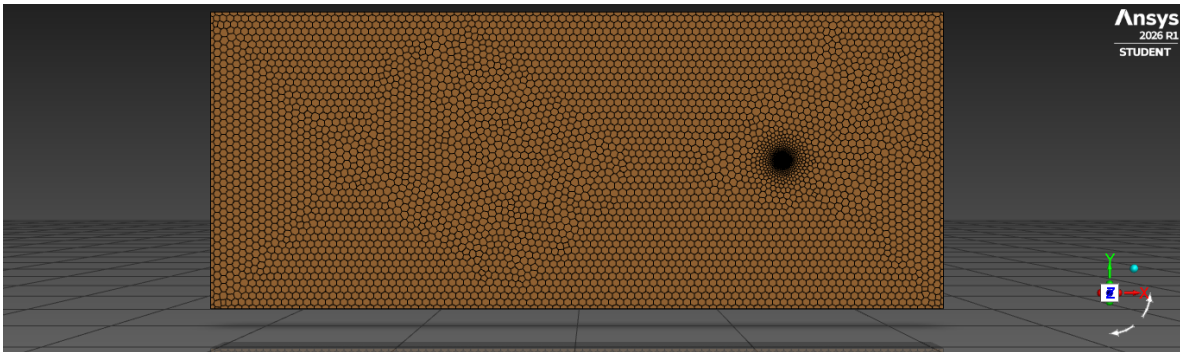


Figura 71: Malla tubería 3" 1/2" de aislamiento

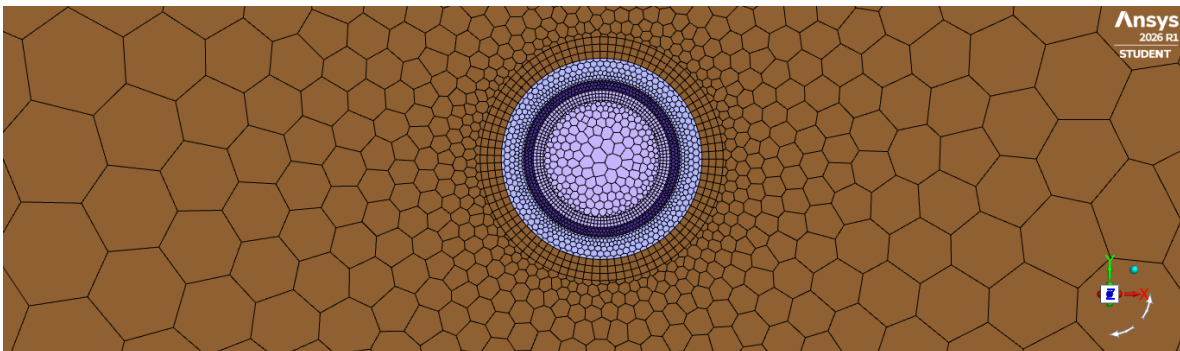


Figura 72: Malla tubería 3" 1/2" de aislamiento

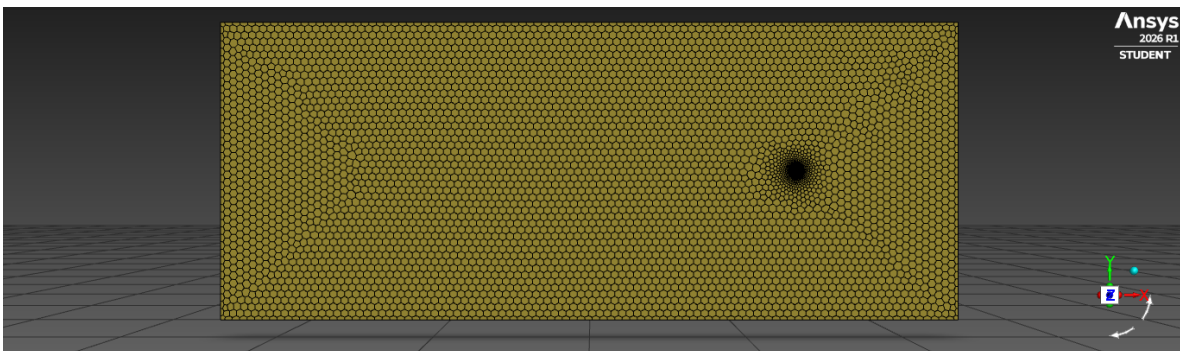


Figura 73: Malla tubería 3" sin aislamiento

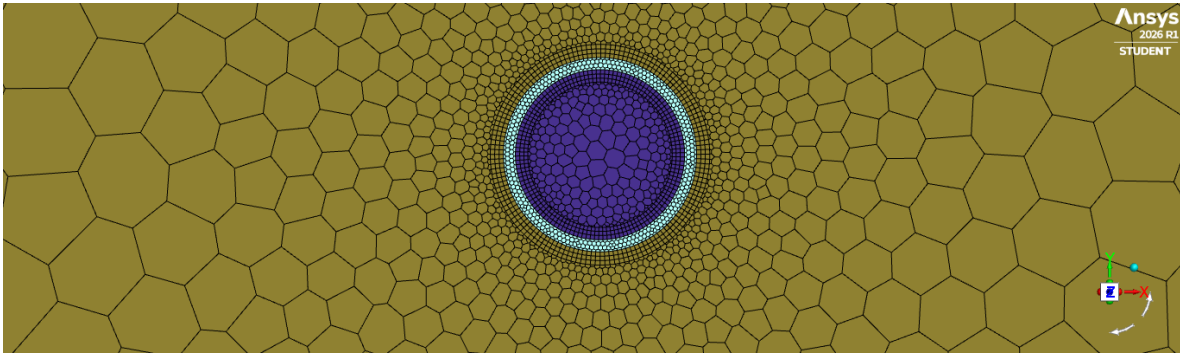


Figura 74: Malla tubería 3" sin aislamiento acercamiento

7.1.3 Configuración (Set-Up)

En el presente apartado se presentan las configuraciones ingresadas en Fluent para la simulación estacionaria, siendo la misma para todos los casos.

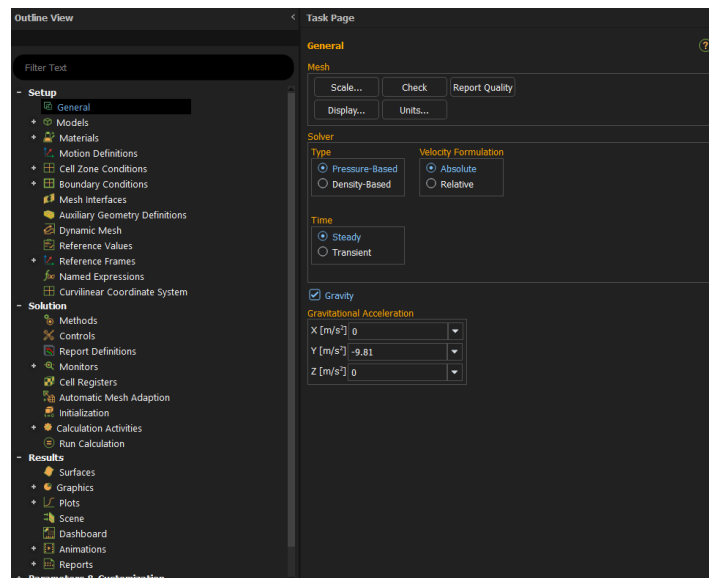


Figura 75: Configuración general de fluent

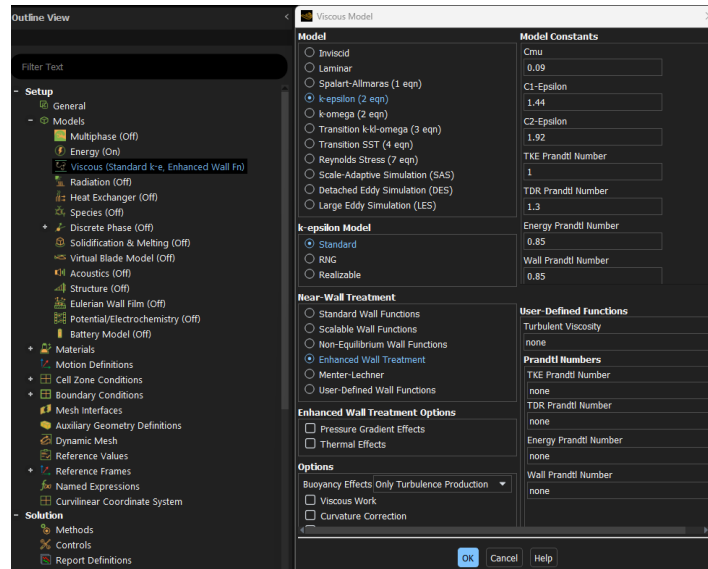


Figura 76: Configuración modelo de turbulencia

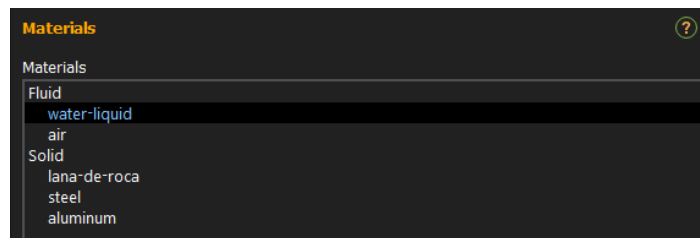


Figura 77: Materiales utilizados por fluent

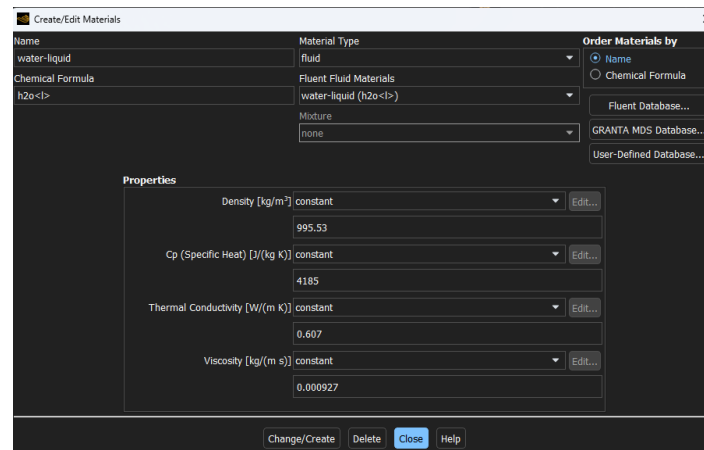
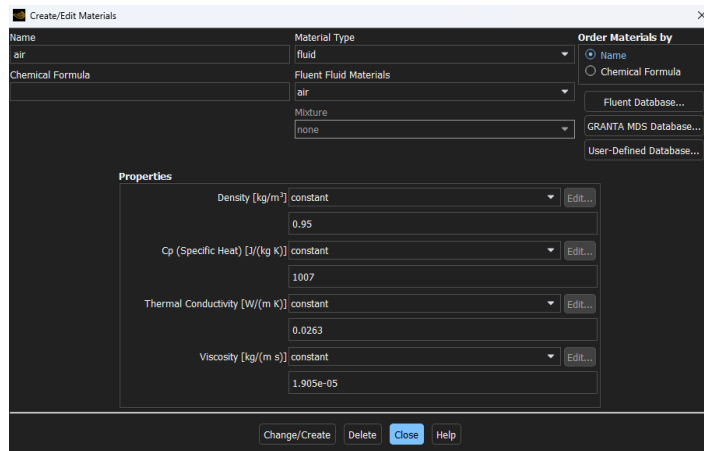


Figura 78: Propiedades del agua en fluent



Create/Edit Materials

Name: air

Material Type: fluid

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Chemical Formula:

Fluent Fluid Materials: air

Mixture: none

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: constant 0.95 Edit...

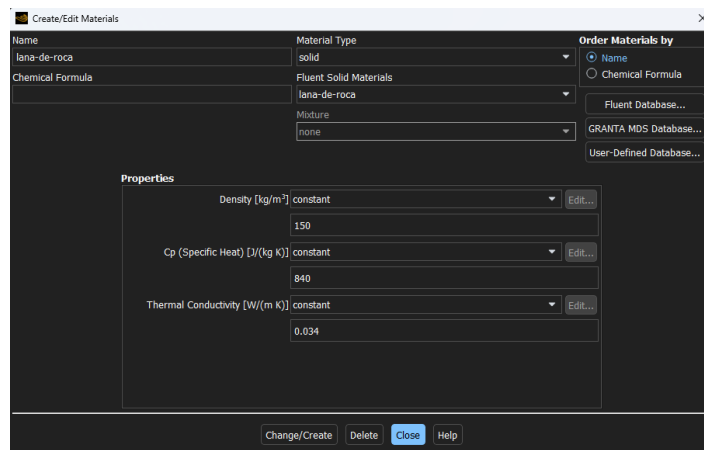
Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant 1007 Edit...

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant 0.0263 Edit...

Viscosity [kg/(m s)]: constant 1.905e-05 Edit...

Change/Create Delete Close Help

Figura 79: Propiedades del aire en fluent



Create/Edit Materials

Name: lana-de-roca

Material Type: solid

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Chemical Formula:

Fluent Solid Materials: lana-de-roca

Mixture: none

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

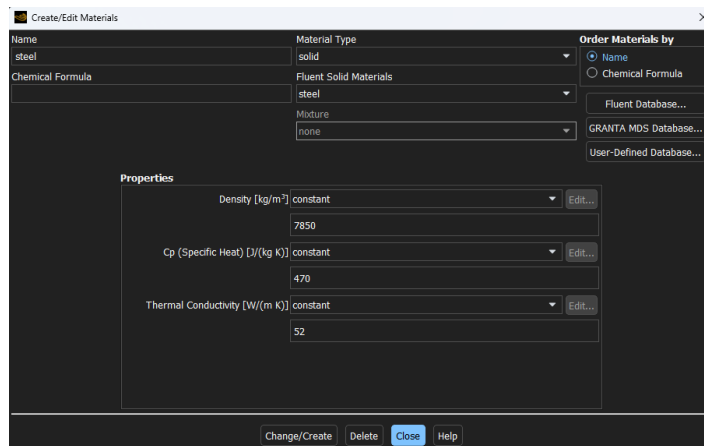
Density [kg/m³]: constant 150 Edit...

Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant 840 Edit...

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant 0.034 Edit...

Change/Create Delete Close Help

Figura 80: Propiedades del aislante en fluent



Create/Edit Materials

Name: steel

Material Type: solid

Order Materials by: ☒ Name ☐ Chemical Formula

Chemical Formula:

Fluent Solid Materials: steel

Mixture: none

Fluent Database...
GRANTA MDS Database...
User-Defined Database...

Properties

Density [kg/m³]: constant 7850 Edit...

Cp (Specific Heat) [J/(kg K)]: constant 470 Edit...

Thermal Conductivity [W/(m K)]: constant 52 Edit...

Change/Create Delete Close Help

Figura 81: Propiedades del acero en fluent

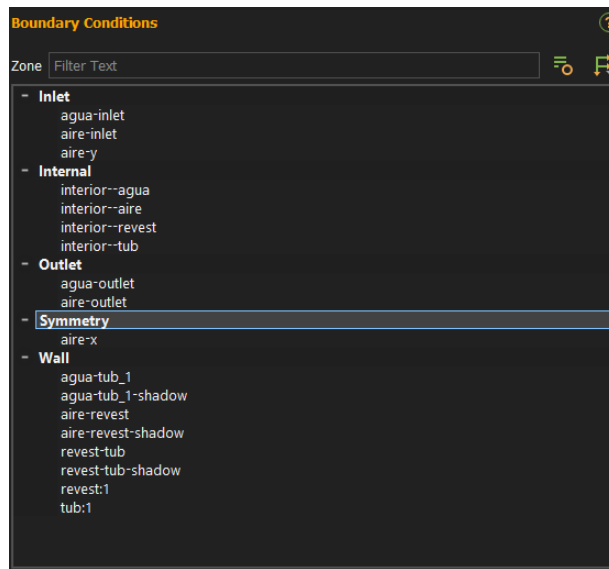


Figura 82: Condiciones de borde en fluent

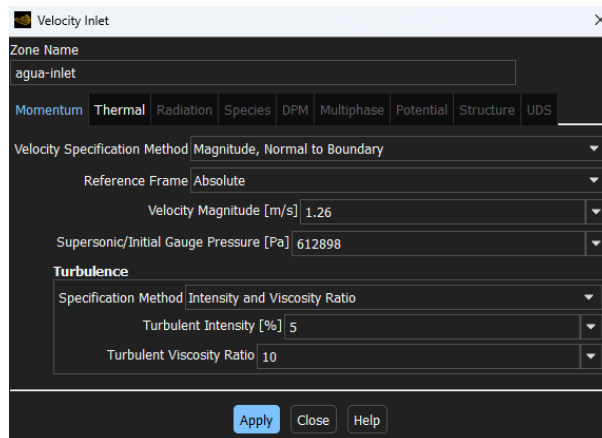


Figura 83: Configuración entrada de agua en fluent

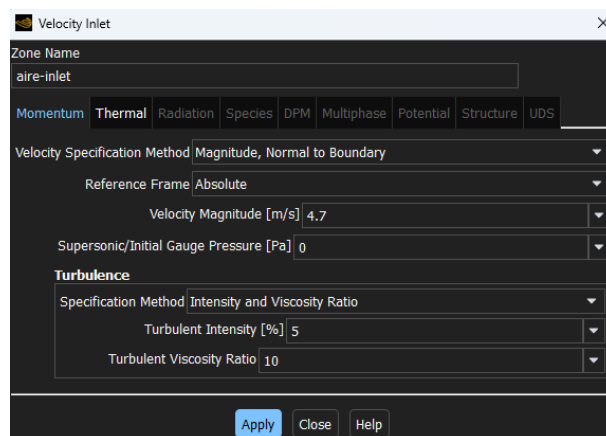


Figura 84: Configuración entrada de aire en fluent

Velocity Inlet

Zone Name
aire-y

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method Components

Reference Frame Absolute

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa] 0

Coordinate System Cartesian (X, Y, Z)

X-Velocity [m/s] -4.7

Y-Velocity [m/s] 0

Z-Velocity [m/s] 0

Turbulence

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%] 5

Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

Figura 85: Configuración entrada de aire superior e inferior en fluent

Pressure Outlet

Zone Name
agua-outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [Pa] 612898

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

☐ Prevent Reverse Flow

☐ Radial Equilibrium Pressure Distribution

☐ Average Pressure Specification

☐ Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%] 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

Figura 86: Configuración salida de agua en fluent

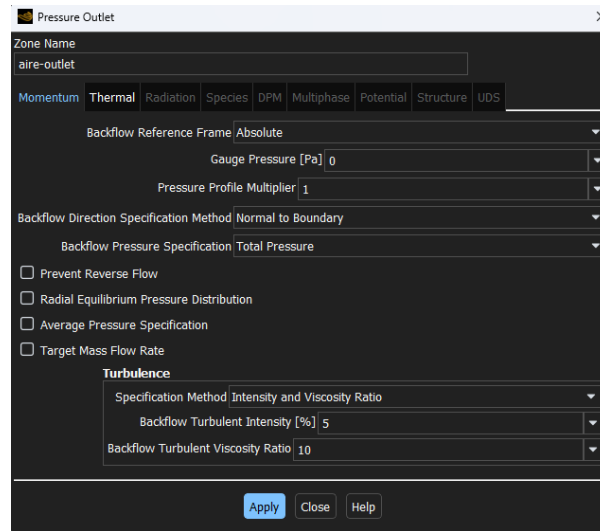


Figura 87: Configuración salida de aire en fluent

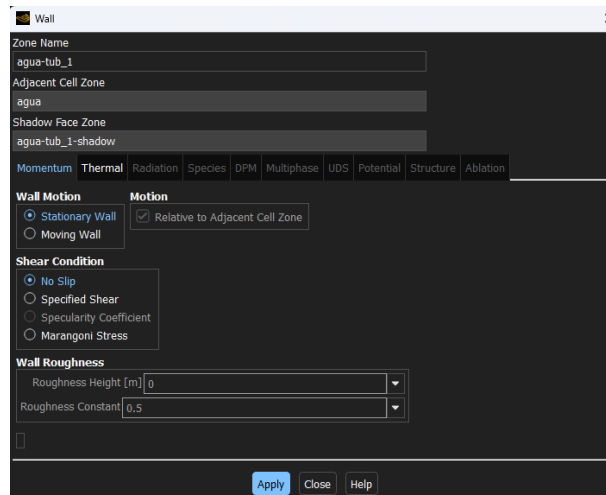


Figura 88: Configuración paredes en fluent

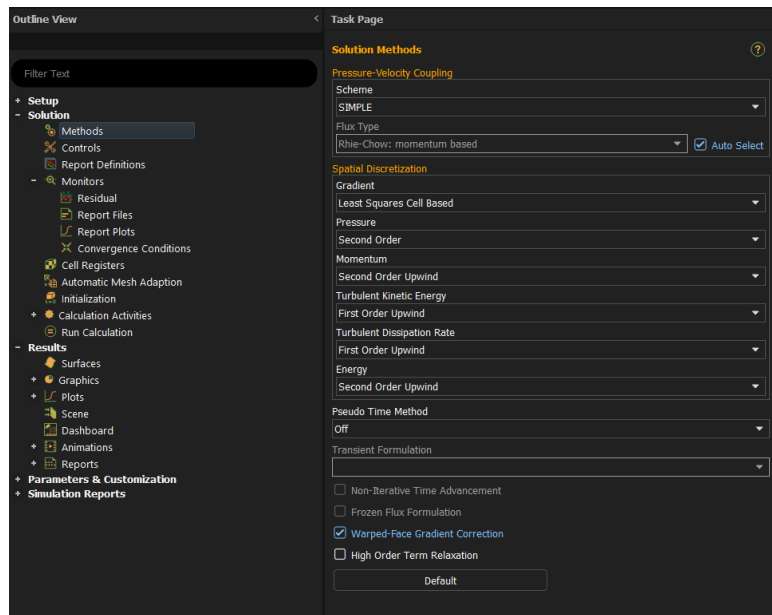


Figura 89: Configuración de solver y esquemas en fluent

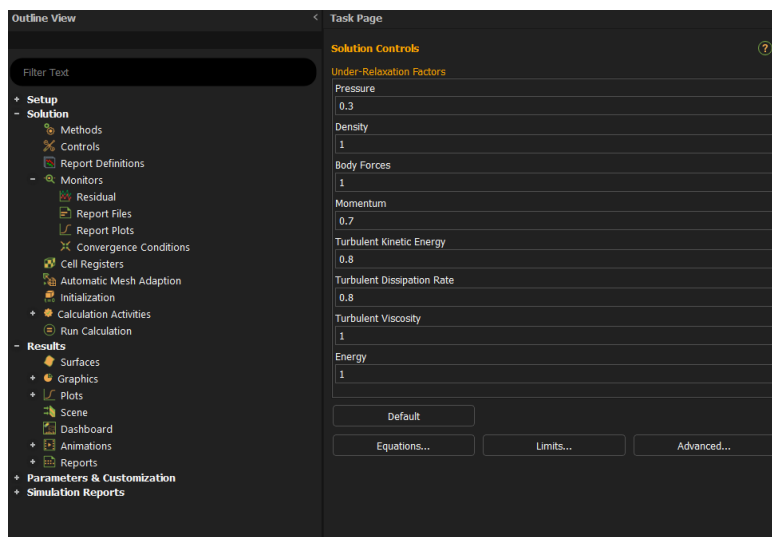


Figura 90: Factores de relajación en fluent

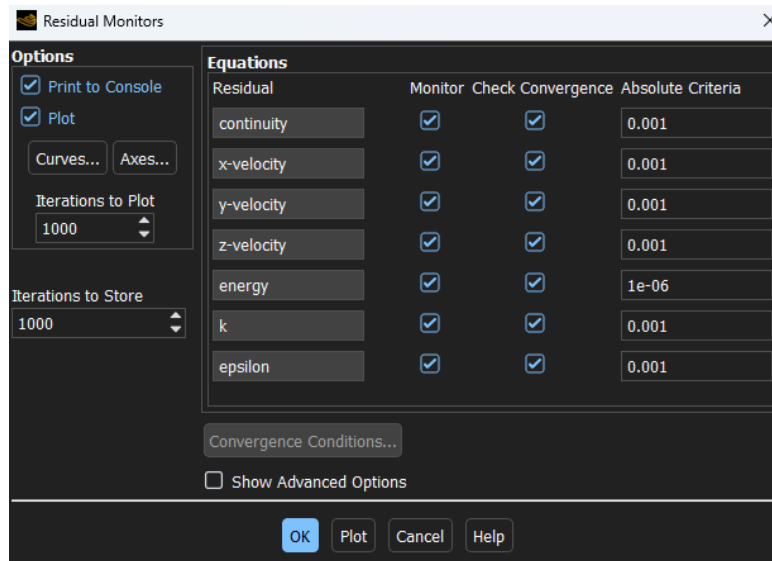


Figura 91: Configuración de residuos en fluent

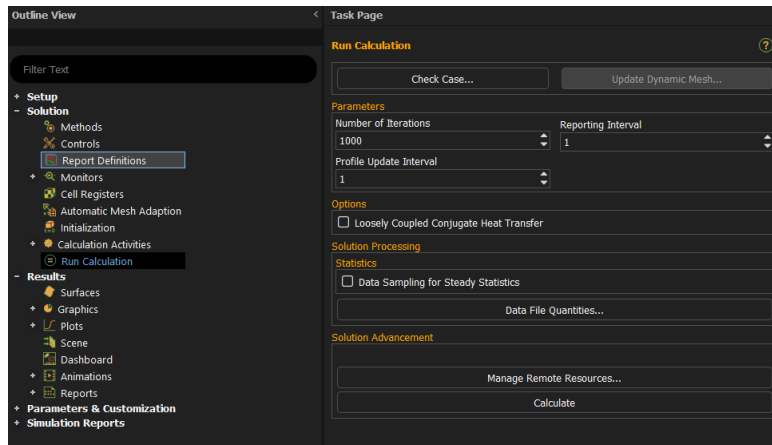


Figura 92: Configuración de simulación en fluent

7.2 Configuración y archivos estacionarios *OpenFOAM*

Dado que *OpenFOAM* maneja todo desde directorios de código, a continuación se presentan los archivos principales de la simulación estacionaria realizada en *OpenFOAM* dado que la única diferencia es el espesor y/o la existencia de aislante se presenta a modo de ejemplo los archivos de código de la tubería de 6 pulgadas con 1 pulgada de aislamiento.

7.2.1 Condiciones iniciales y de borde

Código 1: Condición inicial agua: alphas

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/agua";
    object       alphas;
}
// *****

dimensions      [1 -1 -1 0 0 0 0];
internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }
    "agua-outlet"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }
    "agua-tub_1"
    {
        type      compressible::alphasWallFunction;
        Prt       0.85;
        value      uniform 0;
    }
    ".*"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }
}
```

Código 2: Condición inicial del agua: epsilon

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
```

```

class      volScalarField;
location   "0/agua";
object     epsilon;
}
// * * * * *

dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];
internalField    uniform 0.05;
boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0.05;
    }

    "agua-outlet"
    {
        type      zeroGradient;
    }

    "agua-tub_1"
    {
        type      epsilonWallFunction;
        value      uniform 0.05;
    }

    ".*"
    {
        type      epsilonWallFunction;
        value      uniform 0.05;
    }
}

```

Código 3: Condición inicial del agua: k

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/agua";
    object       k;
}

// * * * * *

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField    uniform 0.0144;

boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0.0144;
    }
    "agua-outlet"
    {
        type      zeroGradient;
    }
    "agua-tub_1"
    {
        type      kLowReWallFunction;
        value      uniform 0.0144;
    }
    ".*"
    {
        type      kLowReWallFunction;
        value      uniform 0.0144;
    }
}
```

Código 4: Condición inicial del agua: nut

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/agua";
    object       nut;
}

// * * * * *

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];
internalField    uniform 0;
boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }
    "agua-outlet"
}
```

```
{
    type          calculated;
    value          uniform 0;
}
"agua-tub_1"
{
    type          nutkWallFunction;
    value          uniform 0;
}
"*.*)"
{
    type          nutkWallFunction;
    value          uniform 0;
}
}
```

Código 5: Condición inicial del agua: p

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/agua";
    object       p;
}
// *****

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 612898;

boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      calculated;
        value     uniform 612898;
    }
    "agua-outlet"
    {
        type      calculated;
        value     uniform 612898;
    }
    "agua-tub_1"
    {
        type      calculated;
        value     uniform 612898;
    }
    ".*"
    {
        type      calculated;
        value     uniform 612898;
    }
}
```

Código 6: Condición inicial del agua: p_rgh

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/agua";
    object       p_rgh;
}
// *****
dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];
internalField    uniform 612898;
boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      fixedFluxPressure;
        value      uniform 612898;
    }
    "agua-outlet"
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 612898; // Tu dato de presión
    }
    "agua-tub_1"
    {
        type      fixedFluxPressure;
        value      uniform 612898;
    }
    ".*"
    {
        type      fixedFluxPressure;
        value      uniform 612898;
    }
}
```

Código 7: Condición inicial del agua: T

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/agua";
    object       T;
}
dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
internalField    uniform 300.15;

boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 300.15;
    }
    "agua-outlet"
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue uniform 300.15;
        value      uniform 300.15;
    }
    "agua-tub_1"
    {
        type      compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        Tnbr      T;
        kappaMethod fluidThermo;
        value      uniform 300.15;
    }
    ".*"
    {
        type      zeroGradient;
    }
}
```

Código 8: Condición inicial del agua: U

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    location     "0/agua";
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    "agua-inlet"
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform (0 0 1.26);
    }
    "agua-outlet"
    {
        type      zeroGradient;
    }
    "agua-tub_1"
    {
        type      noSlip;
    }
    ".*"
    {
        type      noSlip;
    }
}
```

Código 9: Condición inicial del aire: alphasat

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/aire";
    object       alphasat;
}
// *****

dimensions      [1 -1 -1 0 0 0 0];
internalField    uniform 0;
boundaryField
{
    "aire-inlet"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }
    "aire-outlet"
    {
        type      calculated;
    }
}
```

```

        value            uniform 0;
    }
    "aire-revest"
    {
        type              compressible::alphatWallFunction;
        Prt               0.85;
        value             uniform 0;
    }
    "aire-x"
    {
        type              symmetry;
    }
    ".*"
    {
        type              calculated;
        value             uniform 0;
    }
}

```

Código 10: Condición inicial del aire: epsilon

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/aire";
    object       epsilon;
}
// *****

dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];

internalField   uniform 0.5;

boundaryField
{
    "aire-inlet"
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 0.5;
    }

    "aire-y"
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 0.5;
    }

    "aire-outlet"
    {
        type      zeroGradient;
    }

    "aire-x"
    {
        type      symmetry;
    }

    "aire-revest"
    {

```

```

        type      epsilonWallFunction;
        value      uniform 0.5;
    }

    ".*"
    {
        type      epsilonWallFunction;
        value      uniform 0.5;
    }
}

```

Código 11: Condición inicial del aire: k

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format        ascii;
    class        volScalarField;
    location      "0/aire";
    object        k;
}
// *****

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0.082;

boundaryField
{
    "aire-inlet"
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0.082;
    }
    "aire-y"
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0.082;
    }
    "aire-outlet"
    {
        type      zeroGradient;
    }
    "aire-x"
    {
        type      symmetry;
    }
    "aire-revest"
    {
        type      kqRWallFunction;
        value      uniform 0.082;
    }
    ".*"
    {
        type      kqRWallFunction;
        value      uniform 0.082;
    }
}

```

Código 12: Condición inicial del aire: nut

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/aire";
    object       nut;
}
// *****

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    "aire-inlet"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }

    "aire-y"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }

    "aire-outlet"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }

    "aire-x" // Symmetry
    {
        type      symmetry;
    }

    "aire-revest"
    {
        type      nutkWallFunction;
        value      uniform 0;
    }

    ".*"
    {
        type      nutkWallFunction;
        value      uniform 0;
    }
}
```

Código 13: Condición inicial del aire: p

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
```

```

        location      "0/aire";
        object        p;
    }
    // ***** //

    dimensions        [1 -1 -2 0 0 0];

    internalField      uniform 83060;

    boundaryField
    {
        "aire-inlet"
        {
            type        calculated;
            value        uniform 83060;
        }

        "aire-y"
        {
            type        calculated;
            value        uniform 83060;
        }

        "aire-outlet"
        {
            type        calculated;
            value        uniform 83060;
        }

        "aire-x"
        {
            type        symmetry;
        }

        "aire-revest"
        {
            type        calculated;
            value        uniform 83060;
        }

        ".*"
        {
            type        calculated;
            value        uniform 83060;
        }
    }
}

```

Código 14: Condición inicial del aire: p_rgh

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/aire";
    object       p_rgh;
}
// ***** //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0];

```

```

internalField    uniform 83060;

boundaryField
{
    "aire-inlet"
    {
        type            fixedFluxPressure;
        value            uniform 83060;
    }

    "aire-outlet"
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 83060;
    }

    "aire-revest"
    {
        type            fixedFluxPressure;
        value            uniform 83060;
    }

    "aire-x"
    {
        type            symmetry;
    }

    "aire-y"
    {
        type            fixedFluxPressure;
        value            uniform 0;
    }

    ".*"
    {
        type            fixedFluxPressure;
        value            uniform 83060;
    }
}

```

Código 15: Condición inicial del aire: T

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format        ascii;
    class        volScalarField;
    location      "0/aire";
    object        T;
}
dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
internalField    uniform 308.75;

boundaryField
{
    "aire-inlet"
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 308.75;
    }
    "aire-y"

```

```

{
    type            fixedValue;
    value           uniform 308.75;
}
"aire-outlet"
{
    type            inletOutlet;
    inletValue      uniform 308.75;
    value           uniform 308.75;
}
"aire-x"
{
    type            symmetry;
}
"aire-revest"
{
    type            compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
    Tnbr            T;
    kappaMethod     fluidThermo;
    value           uniform 308.75;
}
"*. *"
{
    type            zeroGradient;
}
}

```

Código 16: Condición inicial del aire: U

```

FoamFile
{
    version         2.0;
    format          ascii;
    class           volVectorField;
    location        "0/aire";
    object          U;
}
// *****

dimensions        [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField      uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    "aire-inlet"
    {
        type        fixedValue;
        value        uniform (-4.7 0 0);
    }

    "aire-y"
    {
        type        fixedValue;
        value        uniform (-4.7 0 0);
    }

    "aire-outlet"
    {
        type        zeroGradient;
    }
}

```

```

    "aire-x"
    {
        type            symmetry;
    }

    "aire-revest"
    {
        type            noSlip;
    }

    ".*"
    {
        type            noSlip;
    }
}

```

Código 17: Condición inicial del aislante: p

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/revest";
    object       p;
}
// *****

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 83060;

boundaryField
{
    ".*"
    {
        type      calculated;
        value      uniform 83060;
    }
}

```

Código 18: Condición inicial del aislante: T

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/revest";
    object       T;
}
// *****

dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
internalField   uniform 300.15;

boundaryField
{
    "revest-tub"
}

```

```

    {
        type            compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        Tnbr            T;
        kappaMethod      solidThermo;
        value            uniform 300.15;
    }

    "aire-revest"
    {
        type            compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        Tnbr            T;
        kappaMethod      solidThermo;
        value            uniform 300.15;
    }

    "revest:1"
    {
        type            zeroGradient;
    }

    ".*"
    {
        type            zeroGradient;
    }
}

```

Código 19: Condición inicial de la tubería: p

```

FoamFile
{
    version            2.0;
    format              ascii;
    class               volScalarField;
    location            "0/tub";
    object              p;
}
// *****

dimensions            [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField          uniform 83060;

boundaryField
{
    ".*"
    {
        type            calculated;
        value            uniform 83060;
    }
}

```

Código 20: Condición inicial de la tubería: T

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0/tub";
    object       T;
}
dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
internalField   uniform 300.15;

boundaryField
{
    "agua-tub_1"
    {
        type          compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        Tnbr          T;
        kappaMethod    solidThermo;
        value          uniform 300.15;
    }

    "revest-tub"
    {
        type          compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
        Tnbr          T;
        kappaMethod    solidThermo;
        value          uniform 300.15;
    }

    "tub:1"
    {
        type          zeroGradient;
    }
    ".*"
    {
        type          zeroGradient;
    }
}
```

7.2.2 Archivos de control

Código 21: Archivo controlDict

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       controlDict;
}
// *****

application     chtMultiRegionSimpleFoam;
startFrom       latestTime;
startTime       0;
stopAt          endTime;
endTime         10000;
deltaT          1;
writeControl     runtime;
writeInterval    100;
purgeWrite      2;
writeFormat      ascii;
runtimeModifiable true;

functions //Monitor de temperatura
{
    volAverage_aire
    {
        type          volFieldValue;
        libs           ("libfieldFunctionObjects.so");
        region         aire; //
        operation       volAverage;
        fields          (T);
        writeFields     false;
        log             true;
    }
}
```

Código 22: archivo decomposeParDict

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}
// *****

numberOfSubdomains 4;

method           simple;

coeffs
{
    n             (2 2 1);
}
```

Código 23: archivo fvSchemes

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default      Euler;
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
    grad(p)      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear orthogonal;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      orthogonal;
}
```

Código 24: archivo fvSolution

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// *****

solvers
{
    p
    {
        solver          PCG;
        preconditioner   DIC;
        tolerance        1e-06;
    }
}
```

```

        relTol      0.05;
    }

    pFinal
    {
        $p;
        relTol      0;
    }

    U
    {
        solver      smoothSolver;
        smoother     symGaussSeidel;
        tolerance    1e-05;
        relTol      0;
    }
}

SIMPLE
{
    nCorrectors      2;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
    pRefCell          0;
    pRefValue         0;

    residualControl
    {
        "p_rgh"      1e-3;
        "U.*"         1e-3;
        "h.*"         1e-6;
        "T.*"         1e-6;
        "(k|epsilon).*" 1e-3;
    }
}

```

Código 25: archivo regionProperties

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       regionProperties;
}
// *****

fluids
(
    agua
    aire
);

solids
(
    tub
    revest
);

```

7.2.3 Constantes

Código 26: archivo contant: g

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        uniformDimensionedVectorField;
    location     "constant";
    object       g;
}
// *****

dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];
value           (0 -9.81 0);
```

Código 27: archivo constant agua: thermophysicalProperties

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant/agua";
    object       thermophysicalProperties;
}
// *****

thermoType
{
    type         heRhoThermo;
    mixture       pureMixture;
    transport     const;
    thermo        hConst;
    equationOfState rhoConst;
    specie        specie;
    energy        sensibleEnthalpy;
}

mixture
{
    specie
    {
        molWeight      28.97;
    }
    thermodynamics
    {
        Cp              4185;
        Hf              0;
    }
    transport
    {
        mu              0.000927;
        Pr              6.39;
    }
    equationOfState
    {
        rho             995.53;
    }
}
```

```
}
```

Código 28: archivo constant agua: turbulenceProperties

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant/agua";
    object       turbulenceProperties;
}
// * * * * *

simulationType  RAS;

RAS
{
    RASModel      kEpsilon;
    turbulence     on;
    printCoeffs    on;

    Cmu           0.09;
    C1             1.44;
    C2             1.92;
    sigmaK         1.0;
    sigmaEps       1.3;
}
```

Código 29: archivo constant aire: thermophysicalProperties

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant/aire";
    object       thermophysicalProperties;
}
// * * * * *

thermoType
{
    type          heRhoThermo;
    mixture       pureMixture;
    transport      const;
    thermo         hConst;
    equationOfState rhoConst;
    specie         specie;
    energy         sensibleEnthalpy;
}

mixture
{
    specie
    {
        molWeight      28.97;
    }
    thermodynamics
    {

```

```

        Cp            1007;
        Hf            0;
    }
    transport
    {
        mu            1.905e-05;
        Pr            0.729;
    }
    equationOfState
    {
        rho            0.95;
    }
}

```

Código 30: archivo constant aire turbulenceProperties

```

FoamFile
{
    version    2.0;
    format     ascii;
    class      dictionary;
    location   "constant/aire";
    object     turbulenceProperties;
}
simulationType RAS;

RAS
{
    RASModel    kEpsilon;
    turbulence   on;
    printCoeffs  on;

    Cmu         0.09;
    C1           1.44;
    C2           1.92;
    sigmaK       1.0;
    sigmaEps     1.3;
}

```

Código 31: archivo constant aislante: thermophysicalProperties

```

FoamFile
{
    version    2.0;
    format     ascii;
    class      dictionary;
    location   "constant/revest";
    object     thermophysicalProperties;
}
// * * * * *

thermoType
{
    type        heSolidThermo;
    mixture     pureMixture;
    transport    constIso;
    thermo       hConst;
}

```

```

    equationOfState rhoConst;
    specie           specie;
    energy           sensibleEnthalpy;
}

mixture
{
    specie
    {
        molWeight      20;
    }
    transport
    {
        kappa          0.034;
    }
    thermodynamics
    {
        Cp              840;
        Hf              0;
    }
    equationOfState
    {
        rho             150;
    }
}

```

Código 32: archivo constant tubería: thermophysicalProperties

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant/tub";
    object       thermophysicalProperties;
}
// *****

thermoType
{
    type          heSolidThermo;
    mixture       pureMixture;
    transport     constIso;
    thermo        hConst;
    equationOfState rhoConst;
    specie        specie;
    energy        sensibleEnthalpy;
}

mixture
{
    specie
    {
        molWeight      55.85;
    }
    transport
    {
        kappa          52;
    }
    thermodynamics
    {

```

```

        Cp          470;
        Hf          0;
    }
    equationOfState
    {
        rho          7850;
    }
}

```

7.2.4 Control de residuos

El archivo utilizado para monitorear la convergencia de residuos fue el siguiente

Código 33: Archivo de control de residuos

```

import sys
import time
import re
import subprocess

# Condiciones de convergencia
limite_U = 0.0015 # Límite para Ux, Uy, Uz
limite_h = 1.0e-6 # Límite energía

log_file = "log.cht"

# Expresiones regulares para leer el texto
time_pattern = re.compile(r"^Time = (.*)")
res_pattern = re.compile(r"Solving for (.?), Initial residual = ([0-9eE\.\-]+)")
exec_pattern = re.compile(r"^ExecutionTime")

print("[GUARDIÁN] Iniciando monitoreo en vivo de log.cht...")
print(f"[GUARDIÁN] Metas -> Velocidad < {limite_U} | Energía < {limite_h}")

# Se guarda el residuo más alto de la iteración actual
max_U = 0.0
max_h = 0.0

try:
    with open(log_file, "r") as f:
        # Buscar al final del archivo para leer solo lo nuevo
        f.seek(0, 2)

        while True:
            line = f.readline()
            if not line:
                time.sleep(0.5)
                continue

            # resetear los máximos
            if time_pattern.search(line):
                max_U = 0.0
                max_h = 0.0

            # Buscar los residuos iniciales
            res_match = res_pattern.search(line)
            if res_match:
                variable = res_match.group(1)
                valor = float(res_match.group(2))

                # Evalua qué variable es y guarda la más alta
                if variable in ["Ux", "Uy", "Uz"]:

```

```

        if valor > max_U: max_U = valor
    elif variable == "h":
        if valor > max_h: max_h = valor

    # Cuando termina la iteración se revisa la convergencia
    if exec_pattern.search(line):
        if max_U > 0 and max_h > 0: # Nos aseguramos de haber leído datos
            if max_U < limite_U and max_h < limite_h:
                print(f"\n[ÉXITO] ¡Convergencia Absoluta Alcanzada!")
                print(f"        -> Peor Velocidad = {max_U}")
                print(f"        -> Peor Energía   = {max_h}")
                print("[GUARDIÁN] Enviando orden de apagado seguro a OpenFOAM...")

                # El script edita el controlDict automáticamente
                subprocess.run(["sed", "-i", "s/stopAt.*/stopAt    writeNow;/g",
                                "system/controlDict"])

                sys.exit(0)

except FileNotFoundError:
    print("[ERROR] No se encontró log.cht. lanzar simulación primero.")
except KeyboardInterrupt:
    print("\n[GUARDIÁN] Monitoreo cancelado")

```

7.3 Resultados caso estacionario

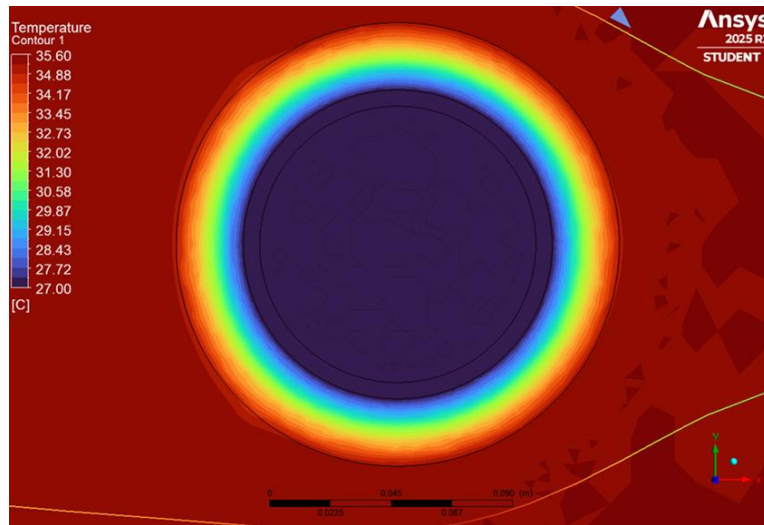


Figura 93: Contorno de temperatura tubería 4" con 1" aislante ANSYS

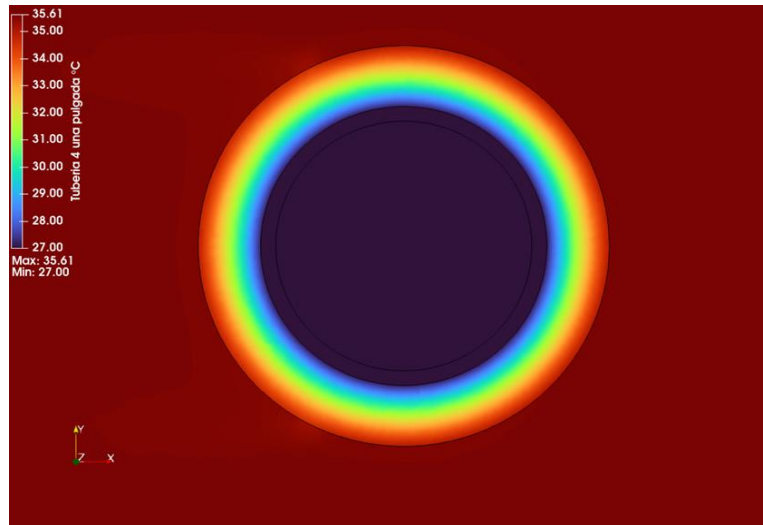


Figura 94: Contorno de temperatura tubería 4" con 1" aislante OpenFOAM

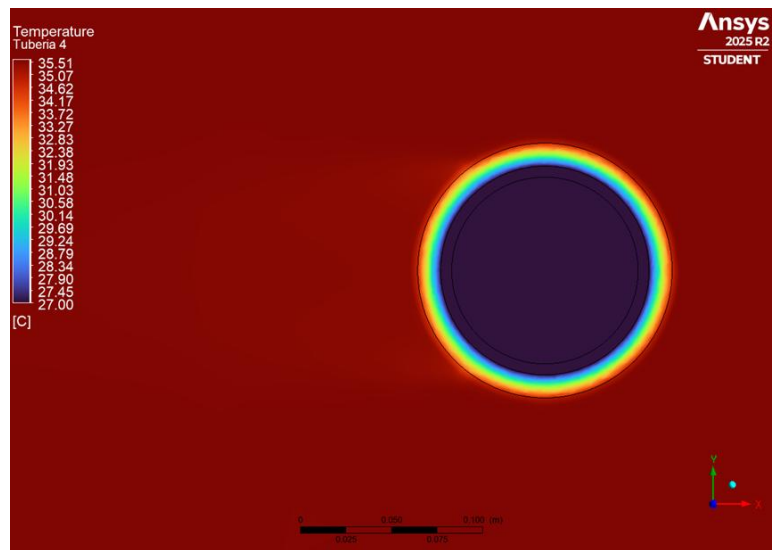


Figura 95: Contorno de temperatura tubería 4" con 1/2" aislante ANSYS

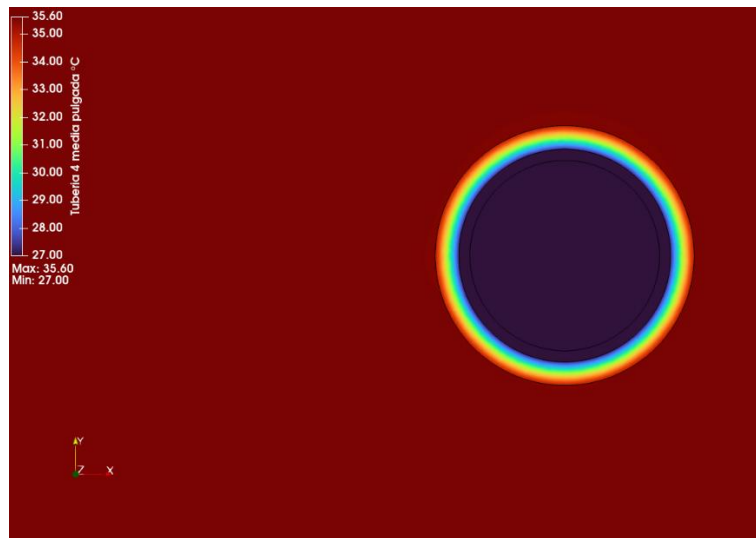


Figura 96: Contorno de temperatura tubería 4" con 1/2" aislante OpenFOAM

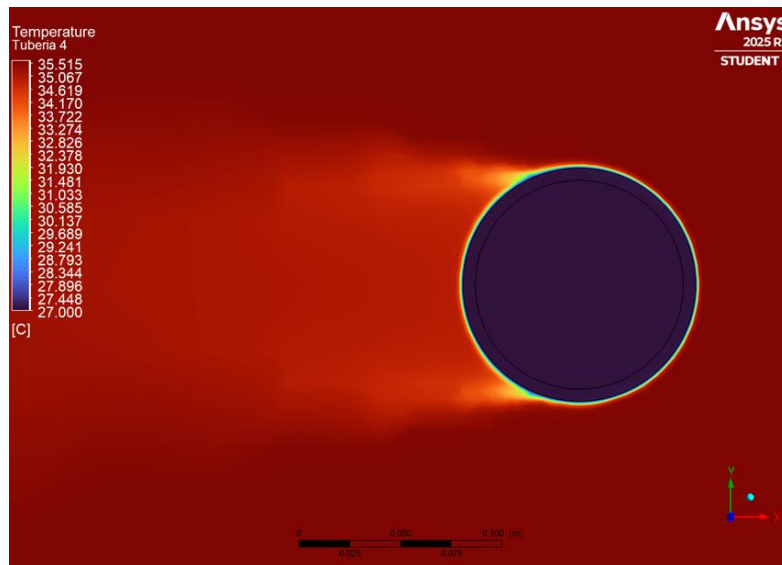


Figura 97: Contorno de temperatura tubería 4" sin aislante ANSYS

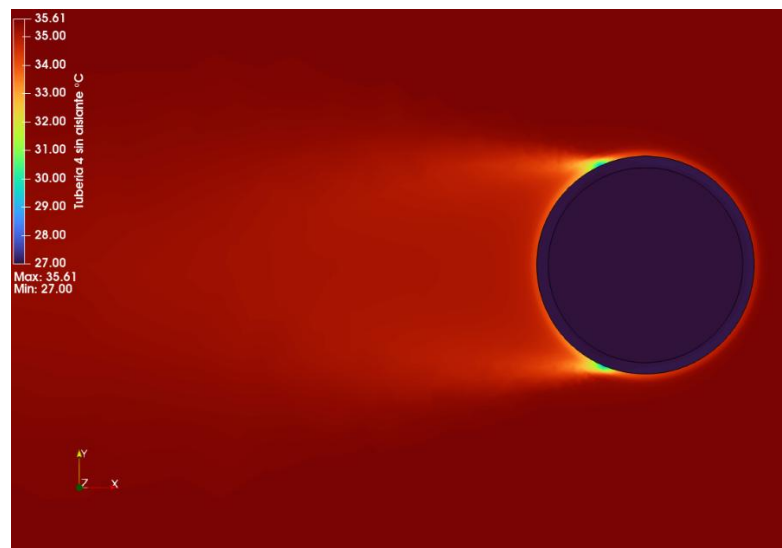


Figura 98: Contorno de temperatura tubería 4" sin aislante OpenFOAM

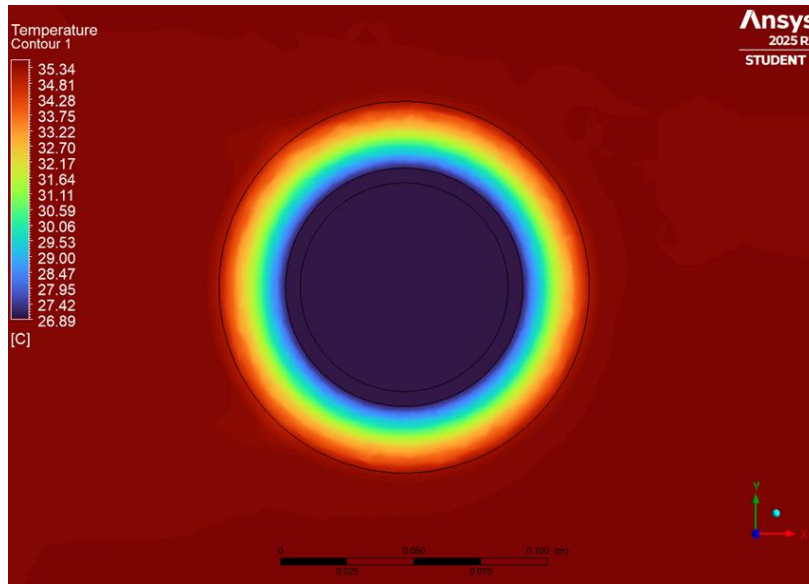


Figura 99: Contorno de temperatura tubería 3" con 1" aislante ANSYS

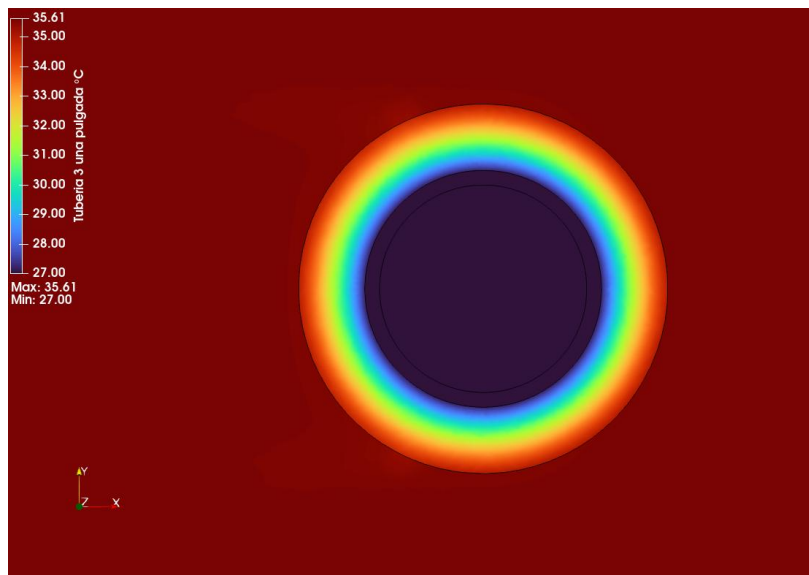


Figura 100: Contorno de temperatura tubería 3" con 1" aislante OpenFOAM

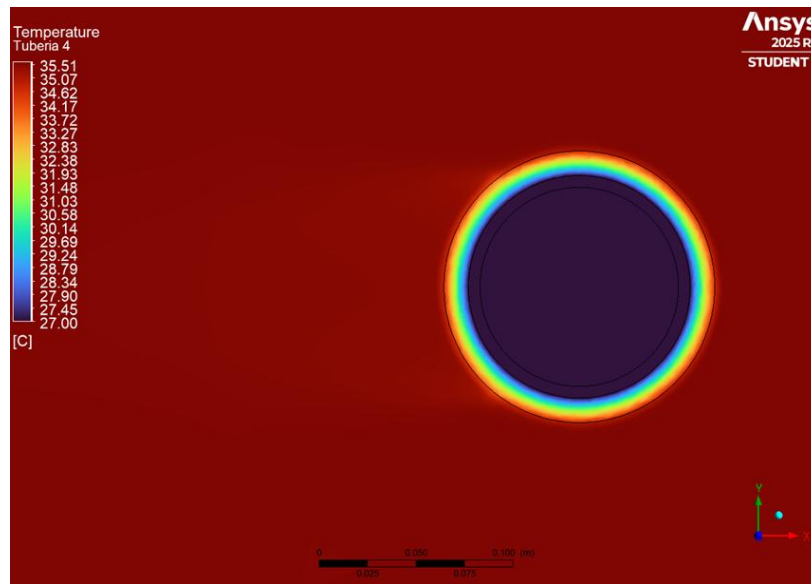


Figura 101: Contorno de temperatura tubería 3" con 1/2" aislante ANSYS

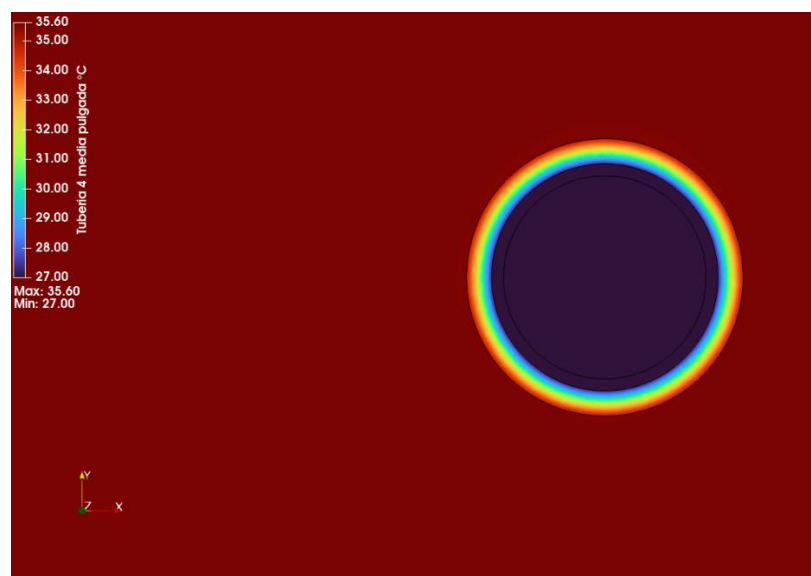


Figura 102: Contorno de temperatura tubería 3" con 1/2" aislante OpenFOAM

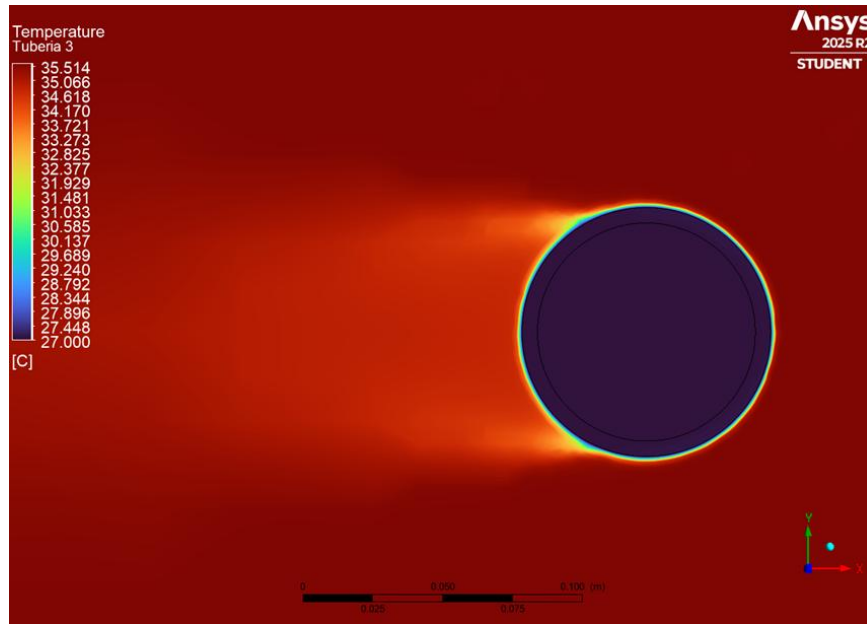


Figura 103: Contorno de temperatura tubería 3" sin aislante ANSYS

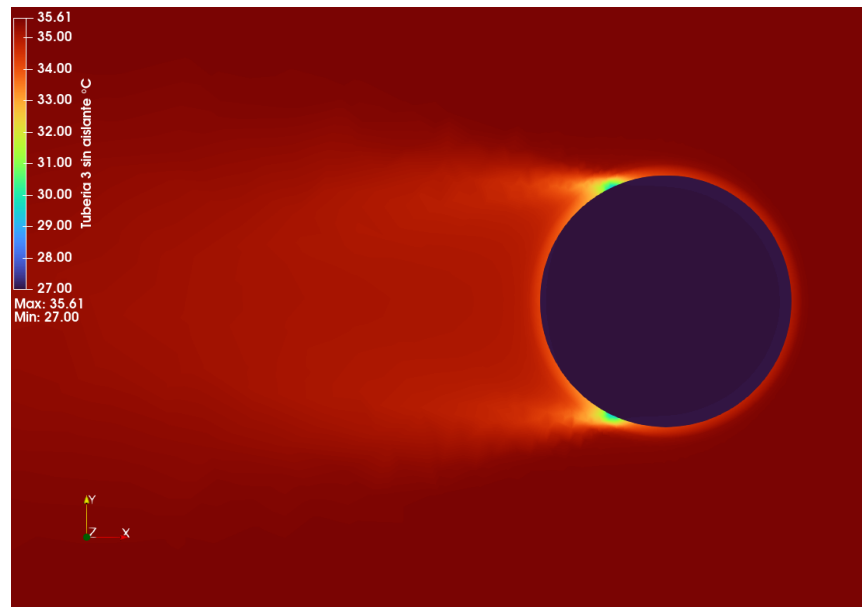


Figura 104: Contorno de temperatura tubería 3" sin aislante OpenFOAM

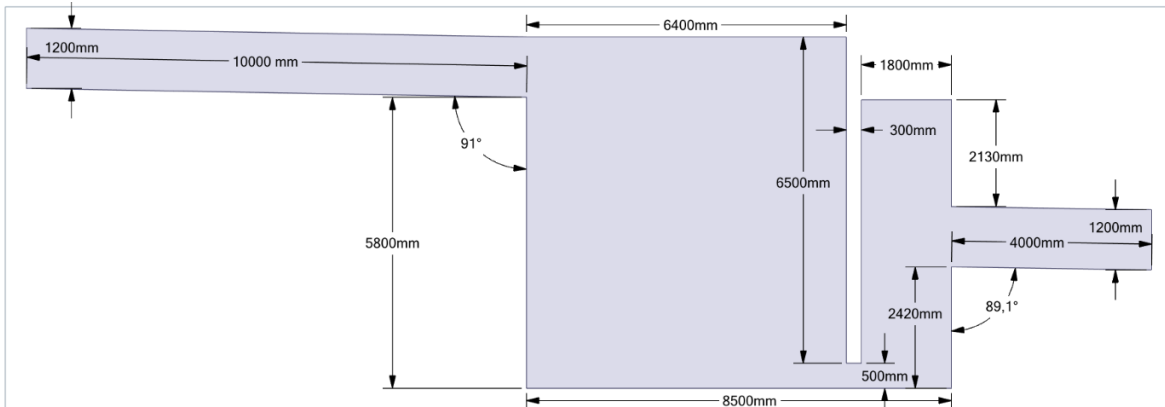
7.4 Configuraciones ANSYS Fluent caso transitorio 2D

Al igual que en el caso anterior se presentan las configuraciones utilizadas para asegurar la replicabilidad del estudio

7.4.1 Geometría

La geometría utilizada en el caso 2D de cajón de traspaso se muestra a continuación.

Figura 105: Geometría caso transitorio 2D



7.4.2 Mallado

Para la geometría anterior se genera un mallado como se explica en el informe obteniendo la siguiente malla con sus respectivas zonas de inflación.

Figura 106: Mallado cajón de traspaso



Figura 107: Inflation layer cajón sección 1

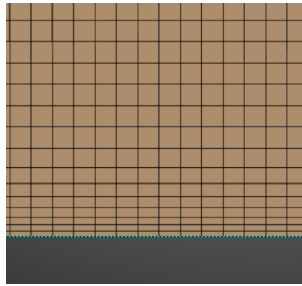


Figura 108: Inflation layer cajón sección 2

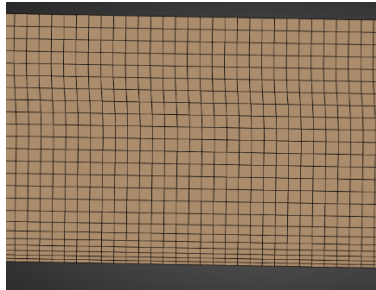
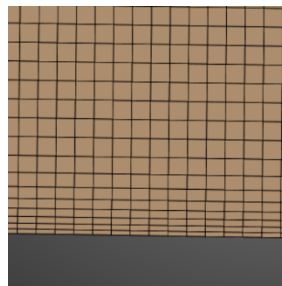


Figura 109: Inflation layer cajón sección 3



7.4.3 Configuración caso aire relave (Set Up)

La configuración utilizada para el caso con relave no newtoniano se muestra a continuación.

Figura 110: Configuración caso transitorio 2D parte 1

General ?

Mesh

Scale... Check Report Quality

Display... Units...

Solver

Type

- ☒ Pressure-Based
- ☐ Density-Based

Velocity Formulation

- ☒ Absolute
- ☐ Relative

Time

- ☐ Steady
- ☒ Transient

2D Space

- ☒ Planar
- ☐ Axisymmetric
- ☐ Axisymmetric Swirl

☒ Gravity

Gravitational Acceleration

X [m/s²] 0

Y [m/s²] -9.81

Z [m/s²] 0

Figura 111: Configuración caso transitorio 2D parte 2

Multiphase Model

Models Phases Phase Interaction Population Balance Model

Model

- ☐ Off
- Homogeneous Models:**
 - ☒ Volume of Fluid
 - ☐ Mixture
 - ☐ Wet Steam
- Inhomogeneous Models:**
 - ☐ Eulerian

VOF Sub-Models

- ☐ Open Channel Flow
- ☐ Open Channel Wave BC

Body Force Formulation

- ☒ Implicit Body Force

Hybrid Models

- ☐ Coupled Level Set + VOF

Number of Eulerian Phases

2

Volume Fraction Parameters

Formulation

- ☒ Explicit
- ☐ Implicit

Volume Fraction Cutoff

1e-06

Courant Number

0.25

Default

Options

Interface Modeling

Type

- ☒ Sharp
- ☐ Sharp/Dispersed
- ☐ Dispersed

- ☐ Interfacial Anti-Diffusion

Expert Options...

Apply Close Help

Figura 112: Configuración caso transitorio 2D parte 3

The screenshot shows a 'Phase Setup' dialog box. On the left, under the 'Phases' tab, there is a list with two items: 'aire - Primary Phase' and 'relave - Secondary Phase'. The 'aire - Primary Phase' is selected. On the right, under the 'Phase Setup' tab, there is a table with two columns: 'Name' and 'ID'. The table contains one row with 'aire' in the 'Name' column and '2' in the 'ID' column. Below the table, there is a 'Phase Material' dropdown menu showing 'aire' and an 'Edit...' button. At the bottom of the dialog, there are buttons for 'Add Phase', 'Delete Phase', 'Apply', 'Close', and 'Help'.

Name	ID
aire	2

Figura 113: Configuración caso transitorio 2D parte 4

The screenshot shows a 'Multiphase Model' dialog box. At the top, there is a tab bar with four tabs: 'Models', 'Phases', 'Phase Interaction', and 'Population Balance Model'. The 'Phases' tab is selected. On the left, under the 'Phases' tab, there is a list with two items: 'aire - Primary Phase' and 'relave - Secondary Phase'. The 'relave - Secondary Phase' is selected. On the right, under the 'Phase Setup' tab, there is a table with two columns: 'Name' and 'ID'. The table contains one row with 'relave' in the 'Name' column and '3' in the 'ID' column. Below the table, there is a 'Phase Material' dropdown menu showing 'relave' and an 'Edit...' button. At the bottom of the dialog, there are buttons for 'Add Phase' and 'Delete Phase'.

Name	ID
relave	3

Figura 114: Configuración caso transitorio 2D parte 5

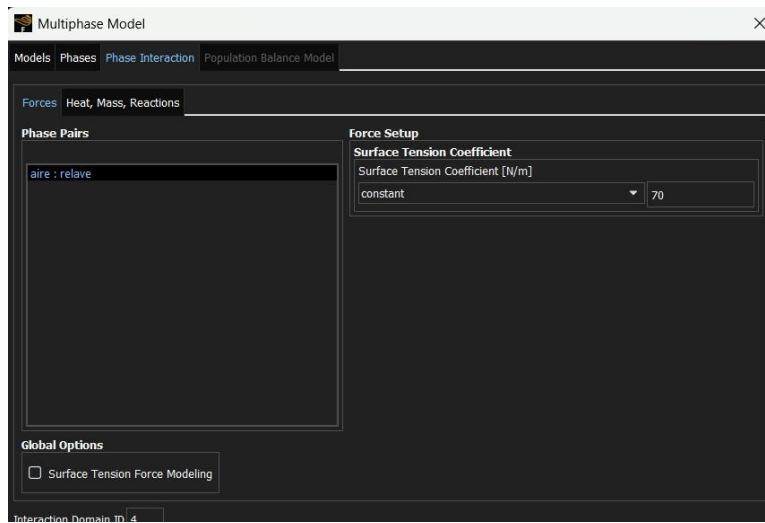


Figura 115: Configuración caso transitorio 2D parte 6

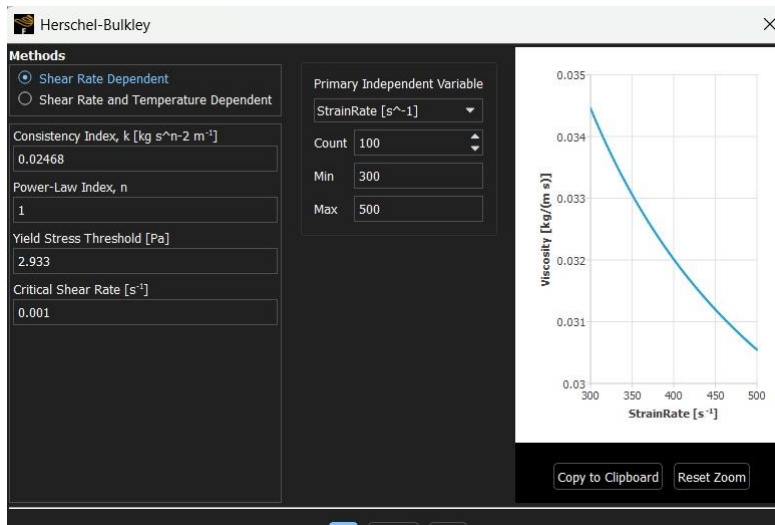


Figura 116: Configuración caso transitorio 2D parte 7

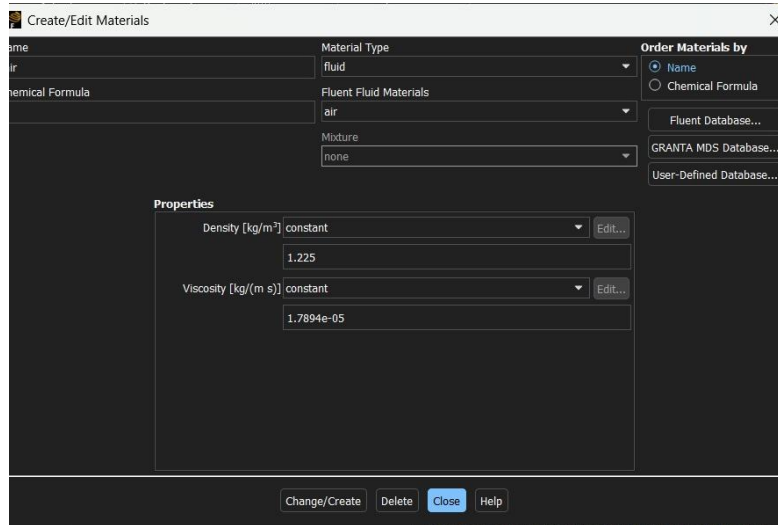


Figura 117: Configuración caso transitorio 2D parte 8

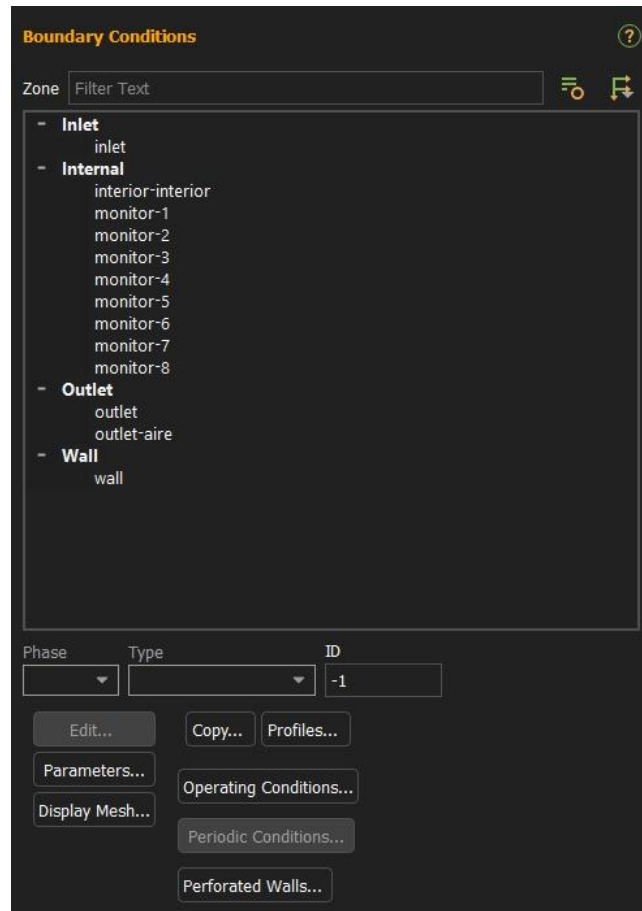
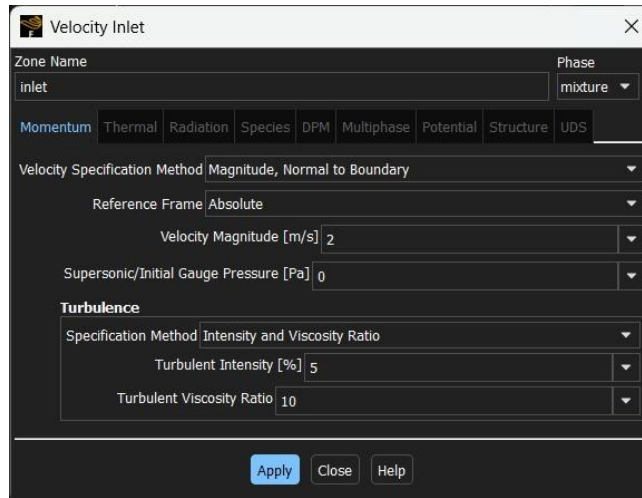


Figura 118: Configuración caso transitorio 2D parte 9



Velocity Inlet

Zone Name: inlet Phase: mixture

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude [m/s]: 2

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Turbulence

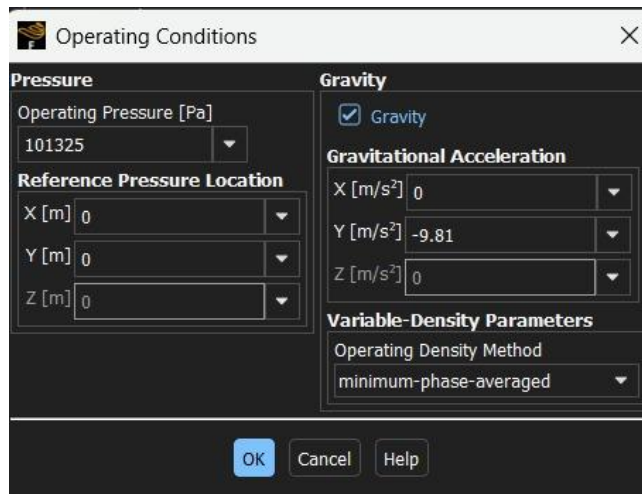
Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%]: 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

Figura 119: Configuración caso transitorio 2D parte 10



Operating Conditions

Pressure

Operating Pressure [Pa]: 101325

Reference Pressure Location

X [m]: 0

Y [m]: 0

Z [m]: 0

Gravity

☒ Gravity

Gravitational Acceleration

X [m/s²]: 0

Y [m/s²]: -9.81

Z [m/s²]: 0

Variable-Density Parameters

Operating Density Method: minimum-phase-averaged

OK Cancel Help

Figura 120: Configuración caso transitorio 2D parte 11

The 'Wall' dialog box is shown with the following settings:

- Zone Name:** wall
- Phase:** mixture
- Adjacent Cell Zone:** interior
- Momentum:** Thermal, Radiation, Species, DPM, Multiphase, UDS, Potential, Structure, Ablation
- Wall Motion:** Stationary Wall (selected), Moving Wall
- Motion:** Relative to Adjacent Cell Zone (checked)
- Shear Condition:** No Slip (selected), Specified Shear, Specularity Coefficient, Marangoni Stress
- Wall Roughness:**
 - Roughness Models:** Standard (selected), High Roughness (Icing)
 - Sand-Grain Roughness:**
 - Roughness Height [m]: 0
 - Roughness Constant: 0.5

Buttons at the bottom: Apply, Close, Help.

Figura 121: Configuración caso transitorio 2D parte 12

The 'Pressure Outlet' dialog box is shown with the following settings:

- Zone Name:** outlet
- Phase:** mixture
- Momentum:** Thermal, Radiation, Species, DPM, Multiphase, Potential, Structure, UDS
- Pressure Specification Method:** Gauge Pressure
- Gauge Pressure [Pa]:** 0
- Pressure Profile Multiplier:** 1
- Backflow Direction Specification Method:** From Neighboring Cell
- Backflow Pressure Specification:** Total Pressure
- Turbulence:**
 - Specification Method:** Intensity and Viscosity Ratio
 - Backflow Turbulent Intensity [%]:** 5
 - Backflow Turbulent Viscosity Ratio:** 10

Buttons at the bottom: Apply, Close, Help.

Figura 122: Configuración caso transitorio 2D parte 13

Pressure Outlet

Zone Name: outlet-aire Phase: mixture

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Pressure Specification Method: Gauge Pressure

Gauge Pressure [Pa]: 0

Pressure Profile Multiplier: 1

Backflow Direction Specification Method: From Neighboring Cell

Backflow Pressure Specification: Total Pressure

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%]: 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

Figura 123: Configuración caso transitorio 2D parte 14

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Advancement

Type: Adaptive Method: Multiphase-Specific

Duration Specification Method: Total Time

Parameters

Total Time [s]: 15 Global Courant Number: 2

Number of Fixed Time Steps: 1 Initial Time Step Size [s]: 0.001

Max Iterations/Time Step: 20 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1 Time Step Size Update Interval: 1

Settings...

Options

☐ Extrapolate Variables

☐ Report Simulation Status

Solution Processing

Statistics

☐ Data Sampling for Time Statistics

Data File Quantities...

Solution Advancement

Manage Remote Resources...

7.4.4 Configuración caso aire agua (Set Up)

Para el caso con aire se modifica únicamente la sección de materiales quedando como se muestra a continuación.

7.5 Configuraciones *OpenFOAM* caso transitorio 2D relave aire

Las configuraciones utilizadas en *OpenFOAM* se dividen en sus 3 carpetas principales quedando como sigue.

7.5.1 Carpeta system

Código 34: Archivo *controlDict* caso relave aire

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       controlDict;
}
// *****

application      interFoam;
startFrom        startTime;
startTime        0;
stopAt           endTime;
endTime          15;
deltaT           0.001;
writeControl      adjustableRunTime;
writeInterval     0.015;
purgeWrite        0;
writeFormat       ascii;
writePrecision    6;
writeCompression off;
timeFormat        general;
timePrecision     6;
runTimeModifiable yes;
adjustTimeStep    on;
maxCo             2;
maxAlphaCo        2;
maxDeltaT         0.1;
// *****

decomposeParDict:
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}
// *****

numberOfSubdomains 4;

method            scotch;

// *****
```

Código 35: Archivo decomposeParDict caso relave aire

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}
// * * * * *

numberOfSubdomains 4;

method            scotch;

// * * * * *
```

Código 36: Archivo fvSchemes caso relave aire

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// * * * * *

ddtSchemes
{
    // Corresponde a "First Order Implicit" en Fluent
    default      Euler;
}
gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
    grad(U)      cellMDLimited Gauss linear 1;
    grad(k)      cellMDLimited Gauss linear 1;
    grad(epsilon) cellMDLimited Gauss linear 1;
}
divSchemes
{
    default      none;
    div(rhoPhi,U) Gauss upwind;
    div(phi,alpha) Gauss upwind;
    div(phirb,alpha) Gauss interfaceCompression;
    div(rhoPhi,k) Gauss upwind;
    div(rhoPhi,epsilon) Gauss upwind;

    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}
interpolationSchemes
{

```

```

        default      linear;
    }
    snGradSchemes
    {
        default      corrected;
    }
    // ***** //

```

Código 37: Archivo fvSolution caso relave aire

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// ***** //

solvers
{
    "pcorr.*"
    {
        solver      GAMG;
        tolerance    1e-2;
        relTol       0;
        smoother     GaussSeidel;
    }
    "p_rgh.*"
    {
        solver      GAMG;
        tolerance    1e-07;
        relTol       0.01;
        smoother     GaussSeidel;
    }
    "(U|k|epsilon).*"
    {
        solver      smoothSolver;
        smoother     symGaussSeidel;
        tolerance    1e-08;
        relTol       0.1;
    }
    "alpha.water.*"
    {
        solver      smoothSolver;
        smoother     symGaussSeidel;
        tolerance    1e-08;
        relTol       0;
        nAlphaCorr    3;
        nAlphaSubCycles 2;
        cAlpha        0.25;
        MULESCorr      yes;
        nLimiterIter   3;
    }
}

PIMPLE
{
    momentumPredictor yes;
    nOuterCorrectors 3;
    nCorrectors      4;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}

```

```

}
relaxationFactors
{
    fields
    {
        p_rgh          0.3;
    }
    equations
    {
        U              0.7;
        "(k|epsilon).*" 0.8;
    }
}
// ***** //

```

7.5.2 Carpeta Constant

Código 38: Archivo g caso relave aire

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        uniformDimensionedVectorField;
    object       g;
}
// ***** //

dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];
value           (0 -9.81 0);

// ***** //

```

Código 39: Archivo transportProperties caso relave aire

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       transportProperties;
}
// ***** //

phases          (water air);

water
{
    transportModel HerschelBulkley;
    rho           1594.35; // [cite: 93]

    HerschelBulkleyCoeffs
    {
        k          1.54796e-05; // Índice de consistencia [cite: 103]
        nu0        1.54796e-05; // Nombre alternativo para consistencia
        n          1;           // Índice de ley de potencia [cite: 107]
        tau0       0.0018396;   // Esfuerzo de fluencia (2.933 / 1594.35) [cite: 112]
        nuMin      1e-06;
    }
}

```

```

        nuMax      1.8396;
    }
}

air
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              1.48e-05;
    rho            1.225;
}

sigma            0;

// ***** //

```

Código 40: Archivo turbulenceProperties caso relave aire

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       turbulenceProperties;
}
// ***** //

simulationType  RAS;

density         variable;

RAS
{
    RASModel     realizableKE;

    turbulence    on;

    printCoeffs  on;
}

// ***** //

```

7.5.3 Carpeta 0 (Condiciones iniciales)

Código 41: Condición inicial relave aire: alpha.water

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       alpha.water;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

```

```

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform 1; // Entra 100% relave
    }

    outlet-aire
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue     uniform 0;
        value          uniform 0; // Salida de aire
    }

    outlet
    {
        type          zeroGradient; // El fluido sale libremente
    }

    // Usamos una expresión regular para agrupar todas tus paredes
    "(wall|wall_.*)"
    {
        type          zeroGradient;
    }

    frontAndBackPlanes
    {
        type          empty;
    }
}

// ***** //

```

Código 42: Condición inicial relave aire: epsilon

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       epsilon;
}
// ***** //

dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];

internalField    uniform 0.13;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          fixedValue;
        value          uniform 0.13;
    }

    outlet-aire

```

```

{
    type            inletOutlet;
    inletValue      uniform 0.13;
    value           uniform 0.13;
}

outlet
{
    type            inletOutlet;
    inletValue      uniform 0.13;
    value           uniform 0.13;
}

"(wall|wall_.*)"
{
    type            epsilonWallFunction; // Equivalente a Standard Wall Functions en
Fluent
    value           uniform 0.13;
}

frontAndBackPlanes
{
    type            empty;
}
}

// ***** //

```

Código 43: Condición inicial relave aire: k

```

FoamFile
{
    version        2.0;
    format          ascii;
    class           volScalarField;
    object          k;
}
// ***** //

dimensions        [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField     uniform 0.015;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type        fixedValue;
        value        uniform 0.015;
    }

    outlet-aire
    {
        type        inletOutlet;
        inletValue   uniform 0.015;
        value        uniform 0.015;
    }

    outlet
    {
        type        inletOutlet;
    }
}

```

```

        inletValue      uniform 0.015;
        value            uniform 0.015;
    }

    "(wall|wall_*)"
    {
        type              kqRWallFunction; // Función de pared estándar para k
        value              uniform 0.015;
    }

    frontAndBackPlanes
    {
        type              empty;
    }
}

// ***** //

```

Código 44: Condición inicial relave aire: nut

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       nut;
}
// ***** //

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }

    outlet-aire
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }

    outlet
    {
        type      calculated;
        value      uniform 0;
    }

    "(wall|wall_*)"
    {
        type      nutkWallFunction; // Función de pared para viscosidad turbulenta
        value      uniform 0;
    }
}

```

```

    frontAndBackPlanes
    {
        type            empty;
    }
}

// ***** //

```

Código 45: Condición inicial relave aire: p_rgh

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p_rgh;
}
// ***** //

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type            fixedFluxPressure;
        value            uniform 0;
    }

    outlet-aire
    {
        type            totalPressure;
        p0              uniform 0;
        value            uniform 0;
    }

    outlet
    {
        type            totalPressure;
        p0              uniform 0;
        value            uniform 0;
    }

    "(wall|wall_*)"
    {
        type            fixedFluxPressure;
        value            uniform 0;
    }

    frontAndBackPlanes
    {
        type            empty;
    }
}

// ***** //

```

Código 46: Condición inicial relave aire: U

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform (2 0 0); // Entrada de relave a 2 m/s en el eje X
    }

    outlet-aire
    {
        type      pressureInletOutletVelocity; // Permite que el aire entre o salga
según la presión
        value      uniform (0 0 0);
    }

    outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }

    "(wall|wall_.*)"
    {
        type      noSlip; // Condición de no deslizamiento de Fluent
    }

    frontAndBackPlanes
    {
        type      empty;
    }
}

// *****
```

7.6 Configuraciones *OpenFOAM* caso transitorio 2D agua aire

En el caso con agua y aire únicamente se modificó el archivo `transportProperties` quedando de la siguiente manera.

Código 47: Archivo caso agua aire: `TransportProperties`

```
FoamFile
```

```

{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       transportProperties;
}
// * * * * *

phases          (water air);

water
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              1e-06; // Viscosidad cinemática del agua a aprox 20°C
    rho            1000;   // Densidad estándar del agua
}

air
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              1.48e-05;
    rho            1.225;
}

sigma          0;

// * * * * *

```

7.7 Configuraciones ANSYS Fluent caso transitorio 3D

7.7.1 Geometría

El proceso de geometría en SpaceClaim se muestra a continuación, donde se presentan las caras izquierda y frontal como referencia a las demás.

Figura 124: Geometría caso transitorio 3D parte 1

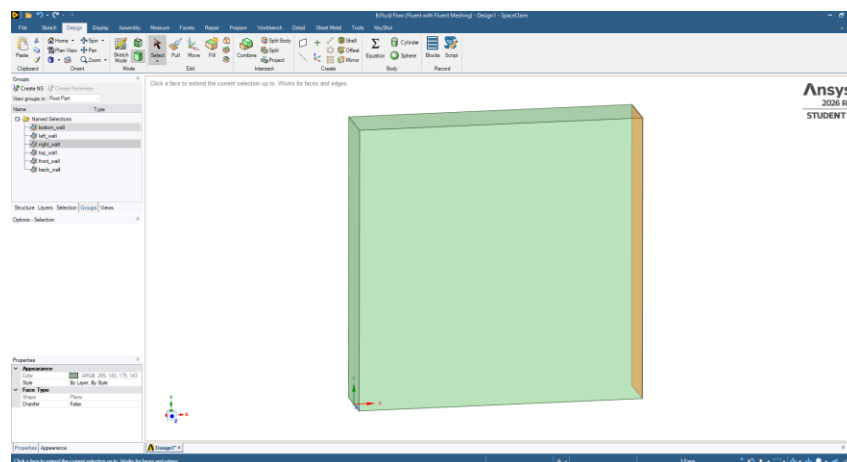
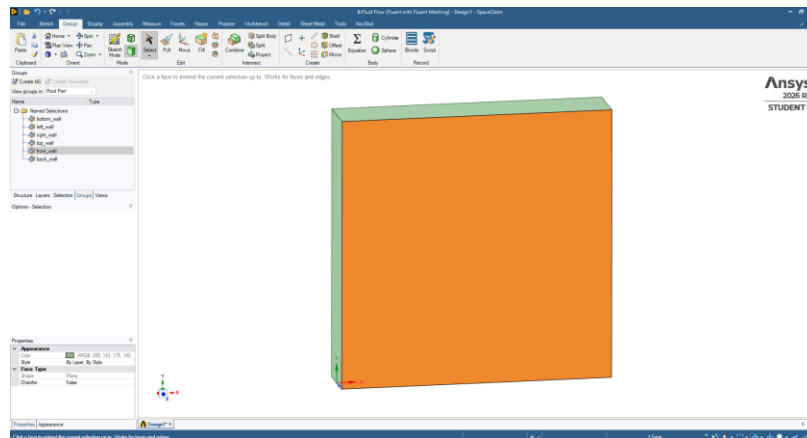


Figura 125: Geometría caso transitorio 3D parte 2



7.7.2 Mallado

El mallado se realizó con las siguientes configuraciones.

Figura 126: Mallado caso transitorio 3D parte 1

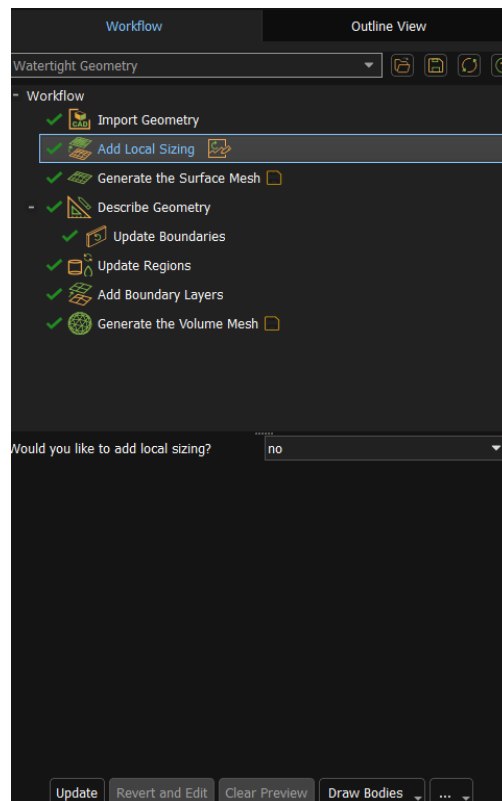


Figura 127: Mallado caso transitorio 3D parte 2

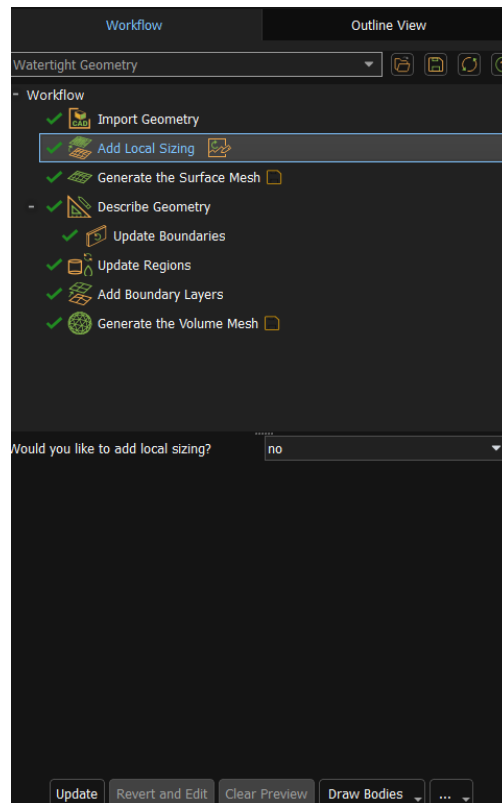


Figura 128: Mallado caso transitorio 3D parte 3

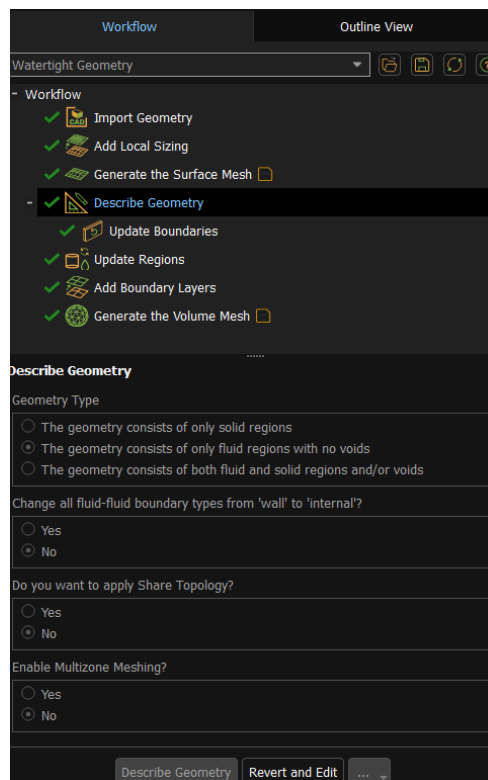


Figura 129: Mallado caso transitorio 3D parte 4

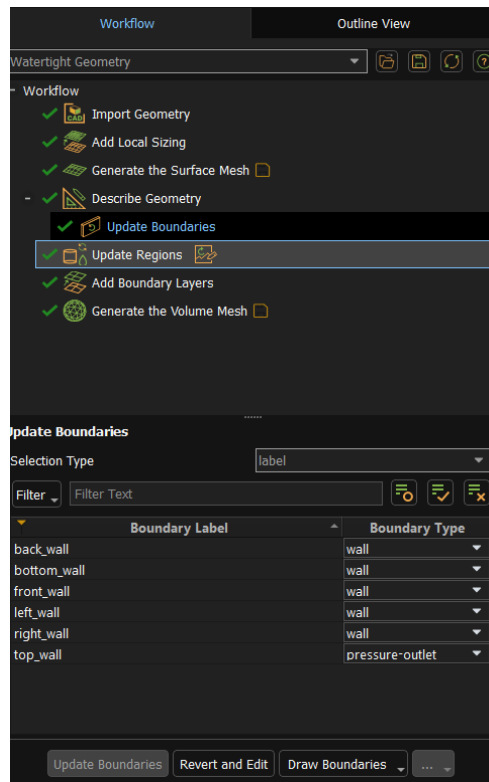


Figura 130: Mallado caso transitorio 3D parte 5

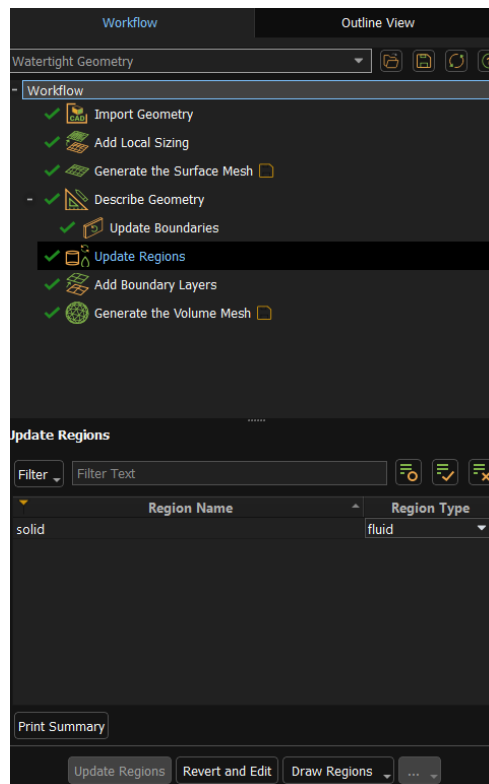


Figura 131: Mallado caso transitorio 3D parte 6

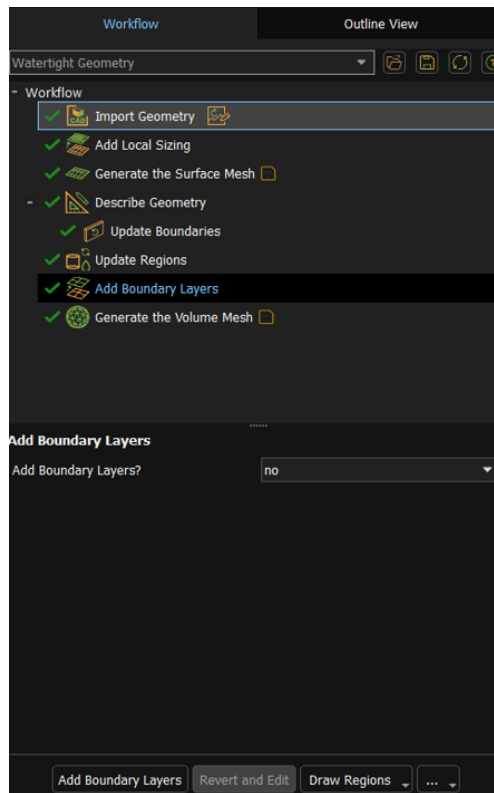
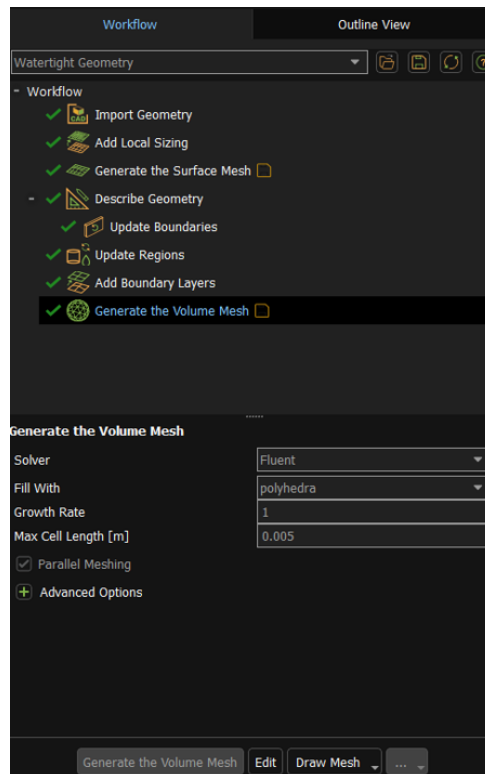


Figura 132: Mallado caso transitorio 3D parte 7



7.7.3 Configuración inicial (Set Up)

La primera configuración de *ANSYS fluent* se realizó con la siguiente configuración

Figura 133: Configuración caso transitorio 3D parte 1

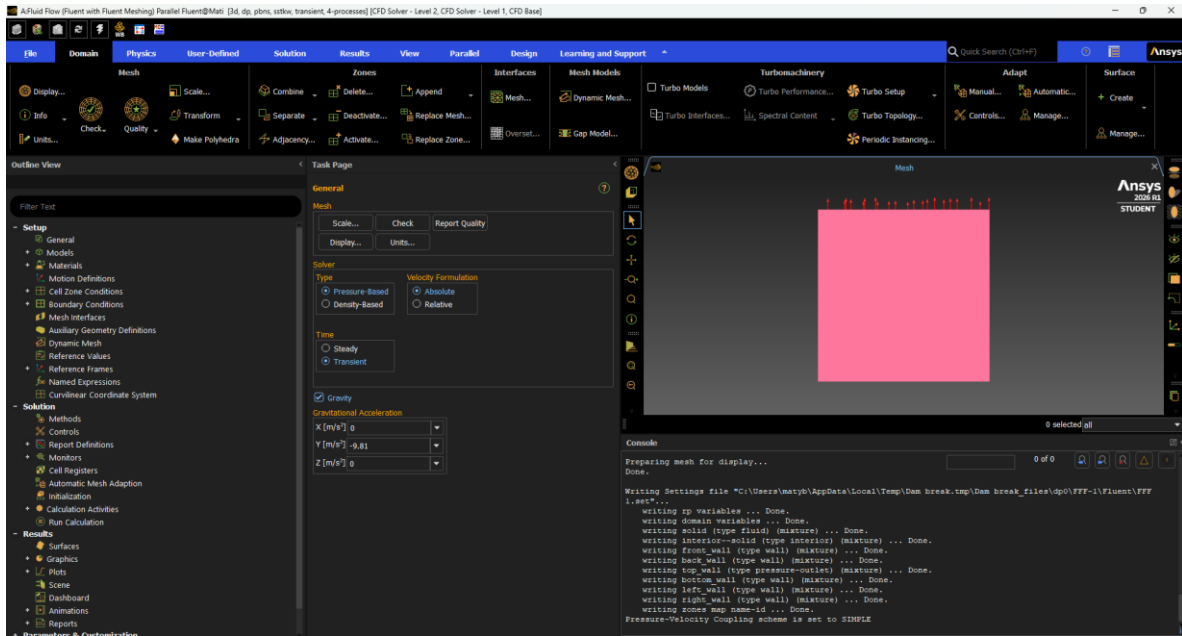


Figura 134: Configuración caso transitorio 3D parte 2

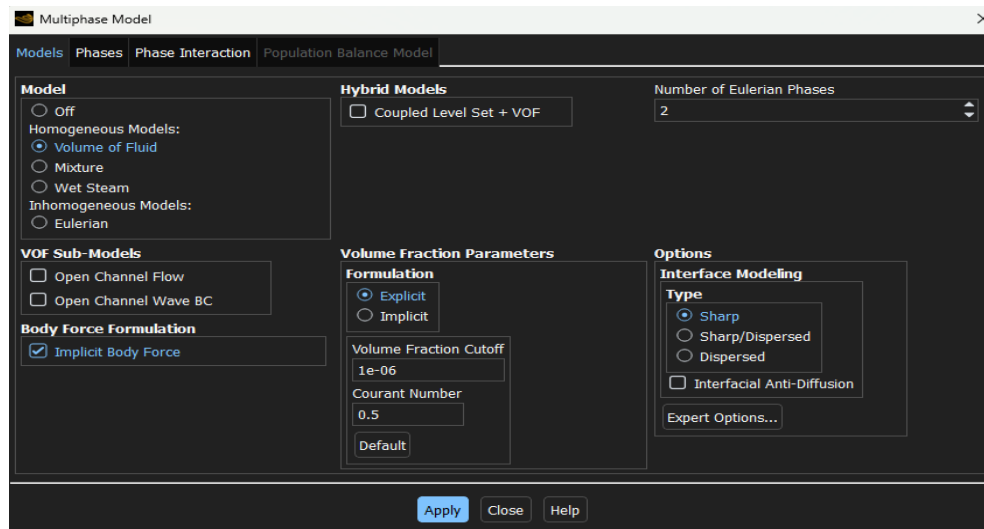


Figura 135: Configuración caso transitorio 3D parte 3

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field is 'air'. The 'Material Type' is 'fluid'. The 'Chemical Formula' is 'air'. The 'Mixture' is 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows 'Density [kg/m³]' as 'constant' with a value of '1.225' and 'Viscosity [kg/(m s)]' as 'constant' with a value of '1.7894e-05'. The 'Change/Create' button is highlighted.

Field	Value
Name	air
Material Type	fluid
Chemical Formula	air
Mixture	none
Density [kg/m³]	constant (1.225)
Viscosity [kg/(m s)]	constant (1.7894e-05)

Figura 136: Configuración caso transitorio 3D parte 4

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field is 'water-liquid'. The 'Material Type' is 'fluid'. The 'Chemical Formula' is 'h2o<I>'. The 'Mixture' is 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows 'Density [kg/m³]' as 'constant' with a value of '998.2' and 'Viscosity [kg/(m s)]' as 'constant' with a value of '0.001003'. The 'Change/Create' button is highlighted.

Field	Value
Name	water-liquid
Material Type	fluid
Chemical Formula	h2o<I>
Mixture	none
Density [kg/m³]	constant (998.2)
Viscosity [kg/(m s)]	constant (0.001003)

Figura 137: Configuración caso transitorio 3D parte 5

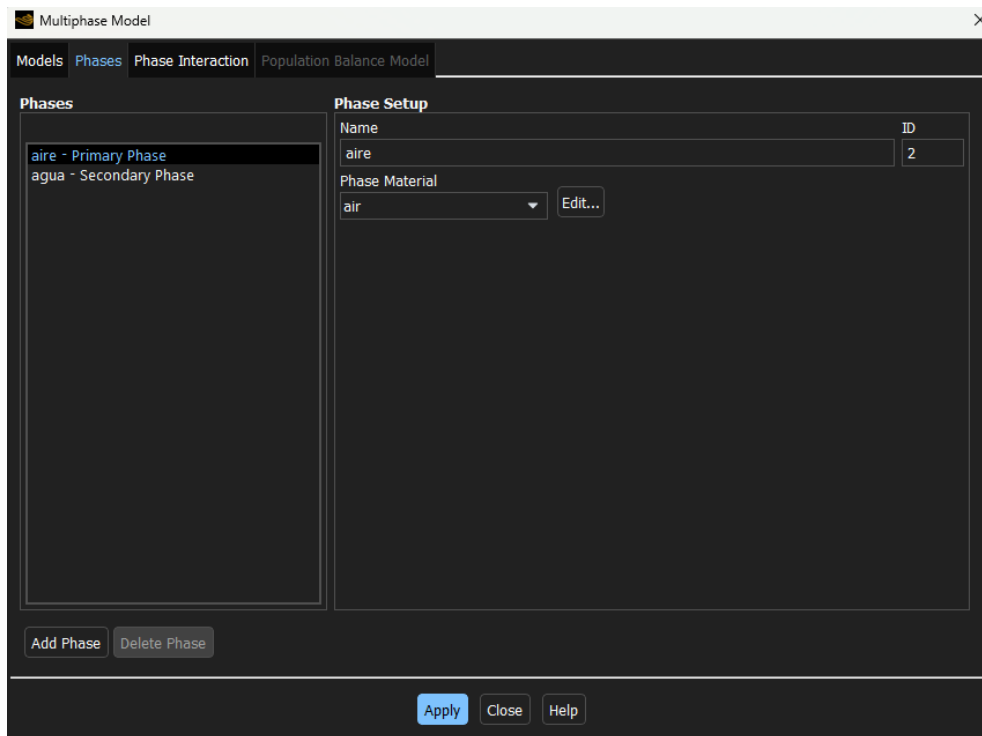


Figura 138: Configuración caso transitorio 3D parte 6

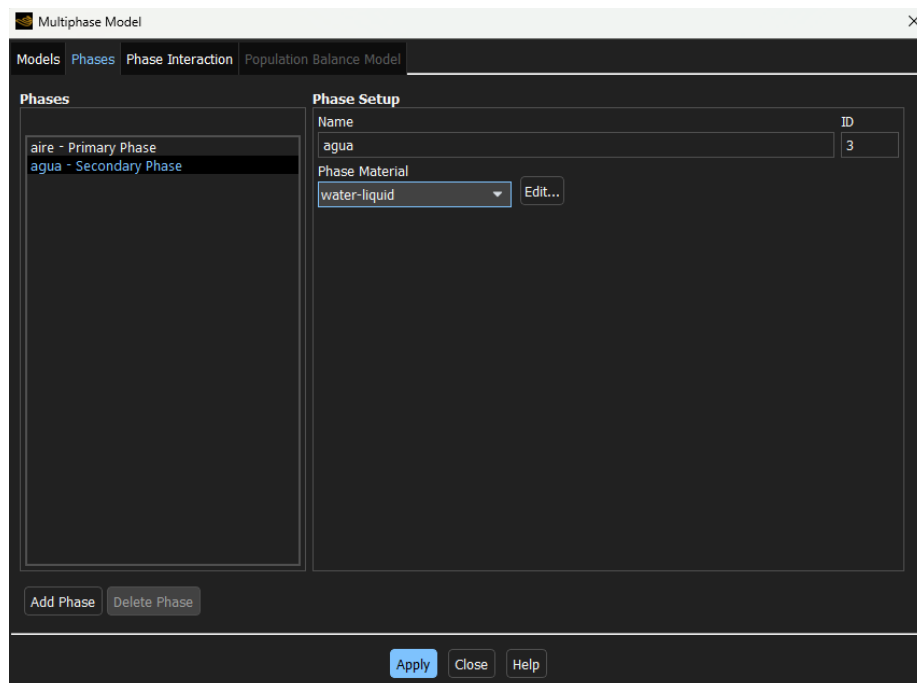


Figura 139: Configuración caso transitorio 3D parte 7

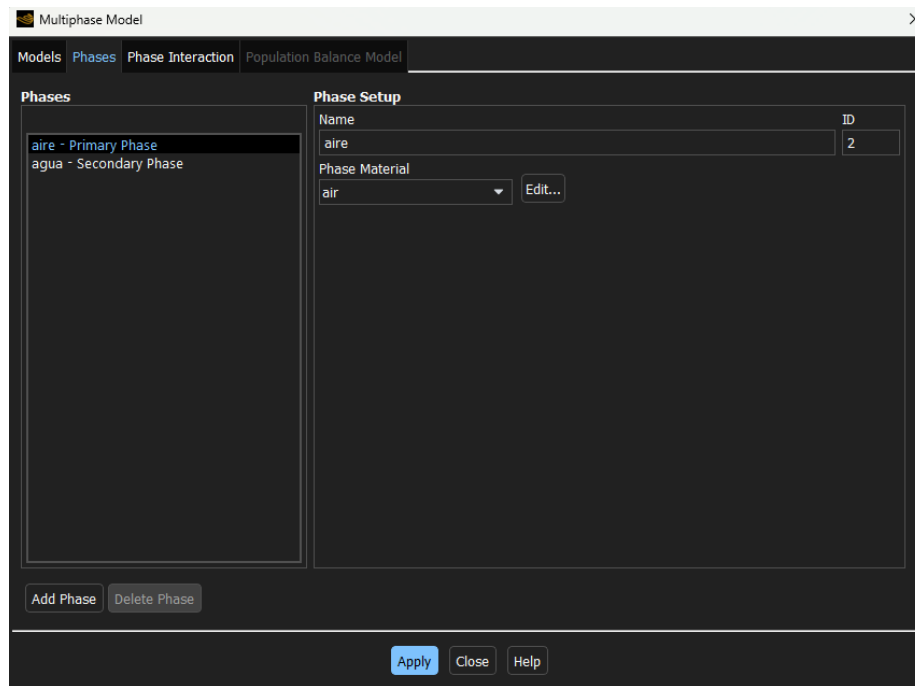


Figura 140: Configuración caso transitorio 3D parte 8

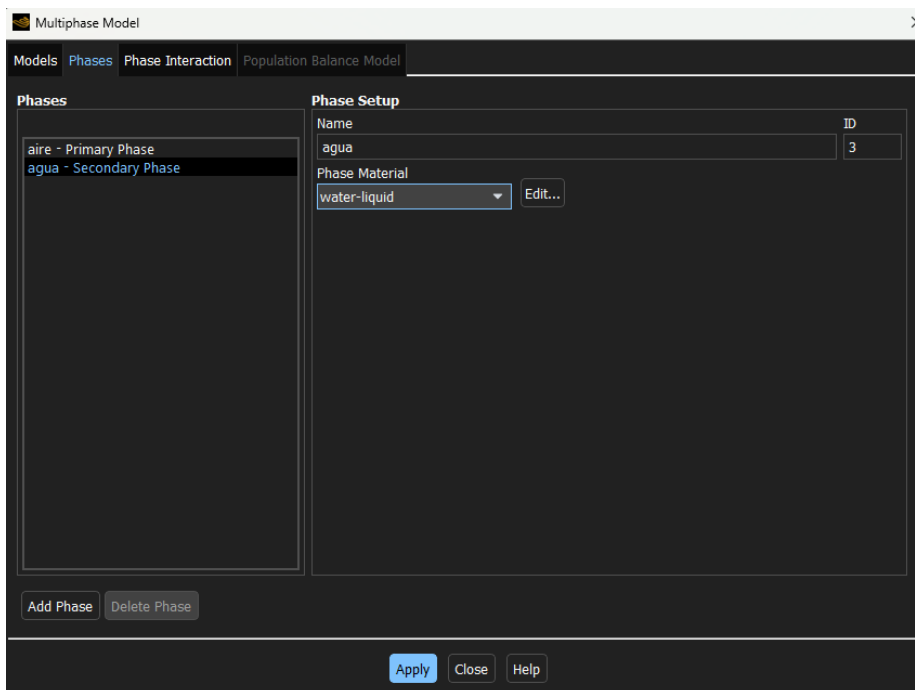


Figura 141: Configuración caso transitorio 3D parte 9

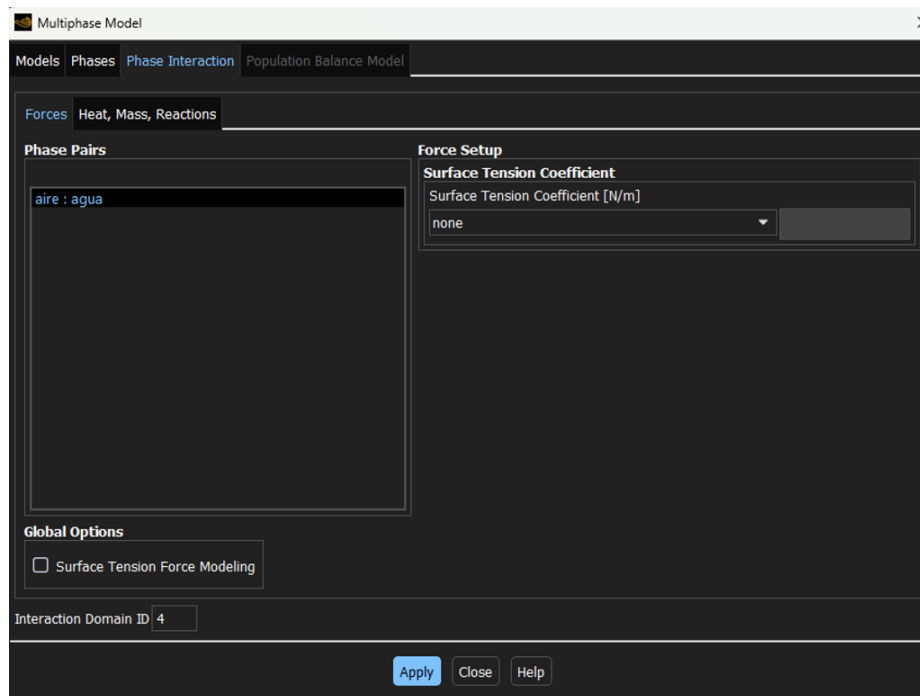


Figura 142: Configuración caso transitorio 3D parte 10

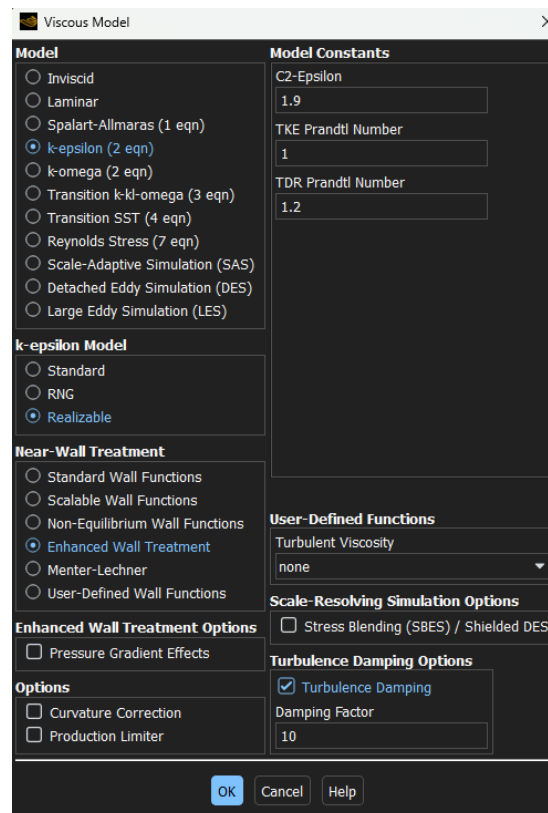


Figura 143: Configuración caso transitorio 3D parte 11

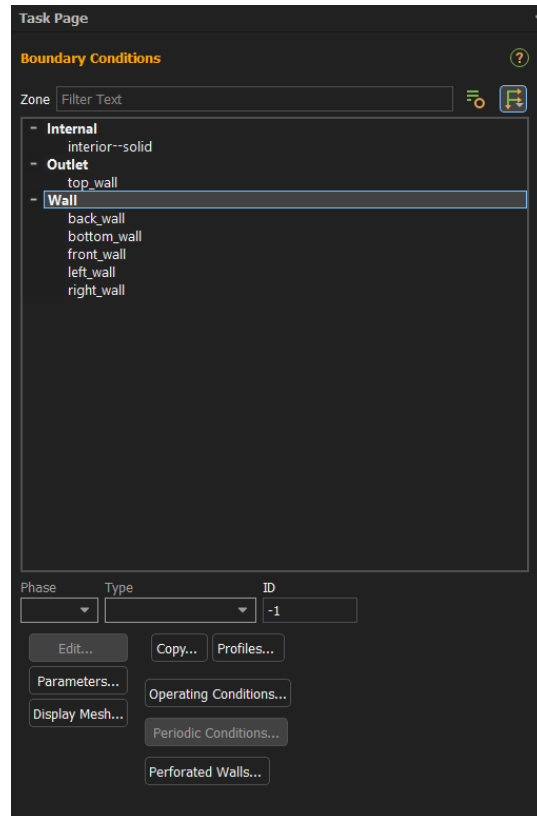


Figura 144: Configuración caso transitorio 3D parte 12

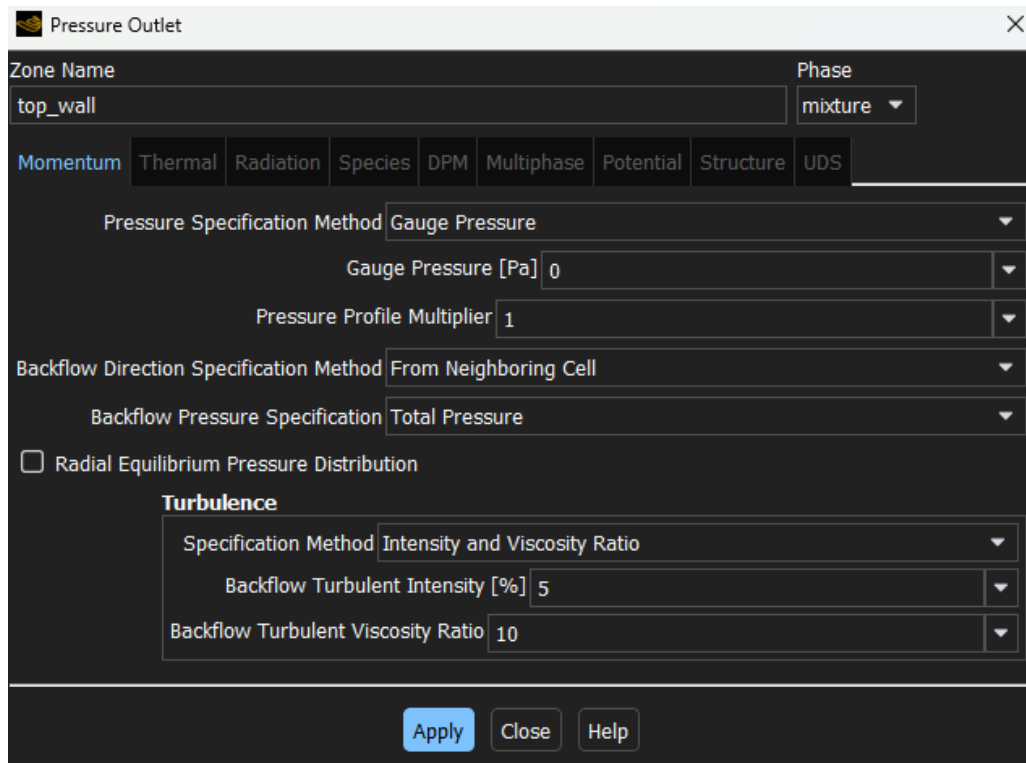


Figura 145: Configuración caso transitorio 3D parte 13

Wall

Zone Name: back_wall Phase: mixture ▼

Adjacent Cell Zone: solid

Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	UDS	Potential	Structure	Ablation
----------	---------	-----------	---------	-----	------------	-----	-----------	-----------	----------

Wall Motion

☒ Stationary Wall
☐ Moving Wall

Motion

☒ Relative to Adjacent Cell Zone

Shear Condition

☒ No Slip
☐ Specified Shear
☐ Specularity Coefficient
☐ Marangoni Stress

Wall Roughness

Roughness Models

☒ Standard
☐ High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness

Roughness Height [m]: 0 ▼
Roughness Constant: 0.5 ▼

[X]

Apply Close Help

Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme

SIMPLE

Spatial Discretization

Gradient

Least Squares Cell Based

Pressure

PRESTO!

Momentum

Second Order Upwind

Volume Fraction

Compressive

Turbulent Kinetic Energy

First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate

First Order Upwind

Pseudo Time Method

Off

Transient Formulation

Second Order Implicit

☐ Non-Iterative Time Advancement

Options...

☐ Frozen Flux Formulation

☒ Warped-Face Gradient Correction

☐ High Order Term Relaxation

Default

Solution Controls

Under-Relaxation Factors

Pressure

0.3

Density

1

Body Forces

1

Momentum

0.7

Turbulent Kinetic Energy

0.8

Specific Dissipation Rate

0.8

Turbulent Viscosity

1

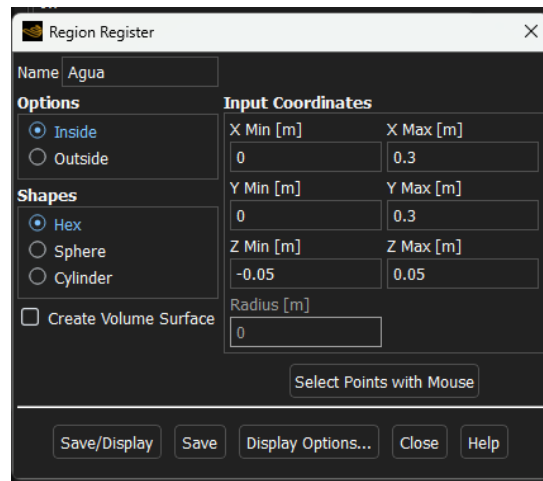
Default

Equations...

Limits...

Advanced...

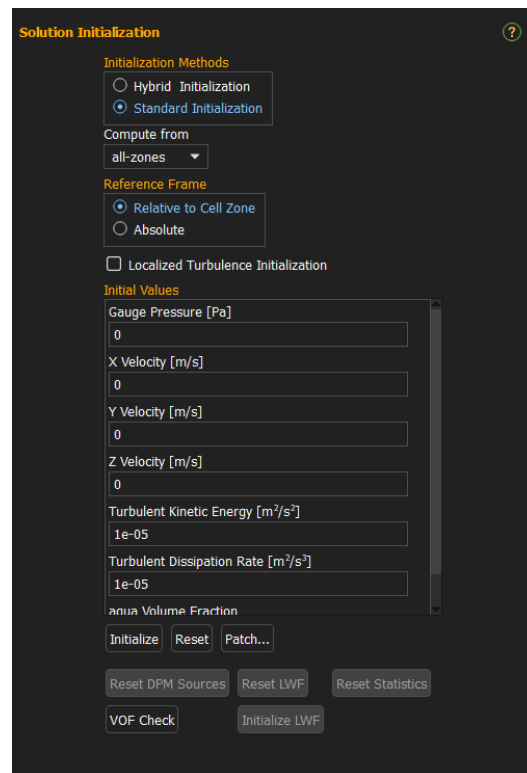
Figura 146: Configuración caso transitorio 3D parte 14



The Region Register dialog box is used to define a region for simulation. It includes the following fields and options:

- Name:** Agua
- Options:**
 - ☒ Inside
 - ☐ Outside
- Shapes:**
 - ☒ Hex
 - ☐ Sphere
 - ☐ Cylinder
- Create Volume Surface:** ☐
- Input Coordinates:**
 - X Min [m]: 0, X Max [m]: 0.3
 - Y Min [m]: 0, Y Max [m]: 0.3
 - Z Min [m]: -0.05, Z Max [m]: 0.05
 - Radius [m]: 0
- Buttons:** Save/Display, Save, Display Options..., Close, Help

Figura 147: Configuración caso transitorio 3D parte 13



The Solution Initialization panel is used to set up the initial conditions for the simulation. It includes the following fields and options:

- Initialization Methods:**
 - ☐ Hybrid Initialization
 - ☒ Standard Initialization
- Compute from:** all-zones
- Reference Frame:**
 - ☒ Relative to Cell Zone
 - ☐ Absolute
- Localized Turbulence Initialization:** ☐
- Initial Values:**
 - Gauge Pressure [Pa]: 0
 - X Velocity [m/s]: 0
 - Y Velocity [m/s]: 0
 - Z Velocity [m/s]: 0
 - Turbulent Kinetic Energy [m²/s²]: 1e-05
 - Turbulent Dissipation Rate [m²/s³]: 1e-05
 - Water Volume Fraction: 0
- Buttons:** Initialize, Reset, Patch..., Reset DPM Sources, Reset LWF, Reset Statistics, VOF Check, Initialize LWF

Figura 148: Configuración caso transitorio 3D parte 14

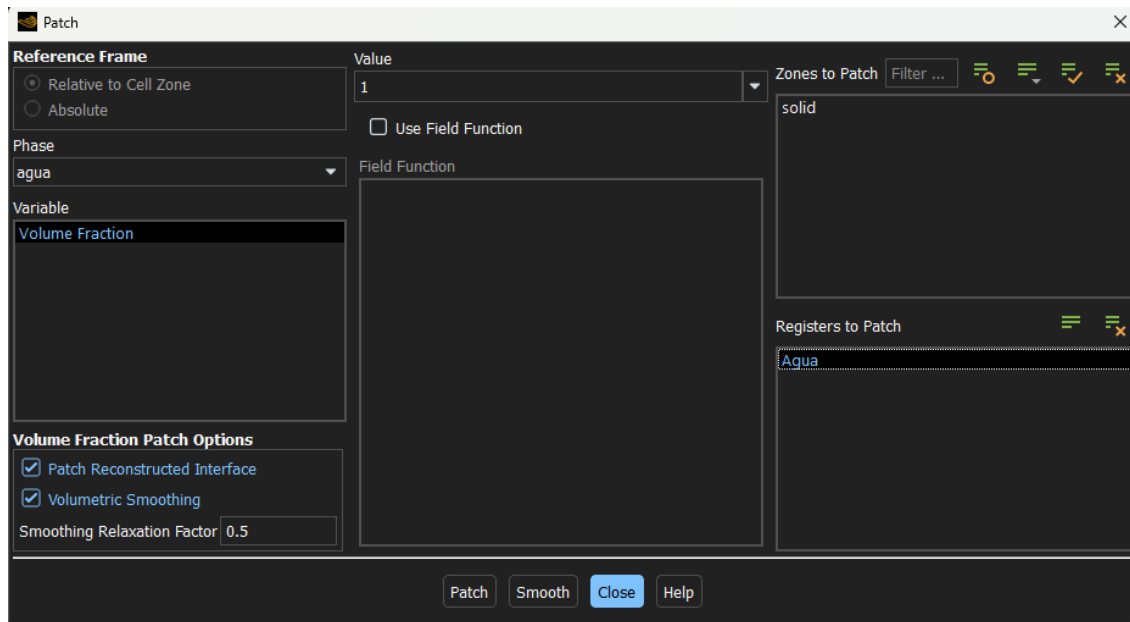


Figura 149: Configuración caso transitorio 3D parte 15

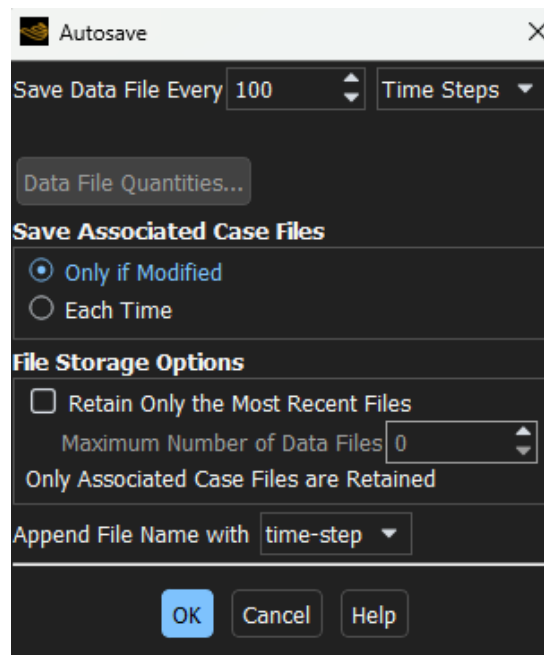
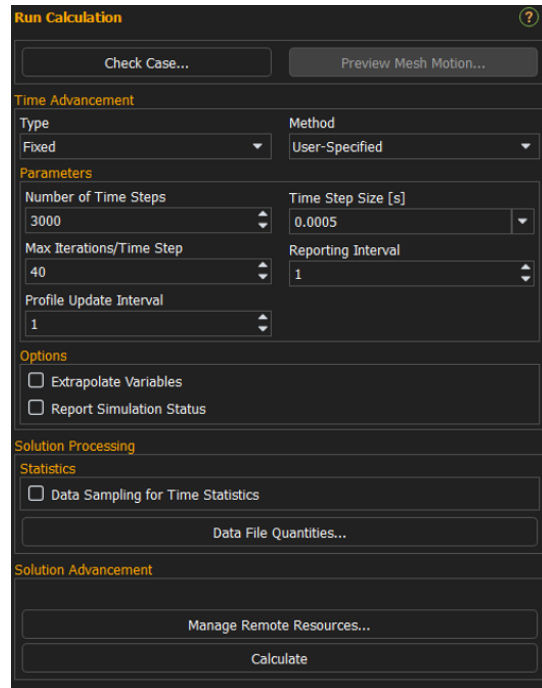


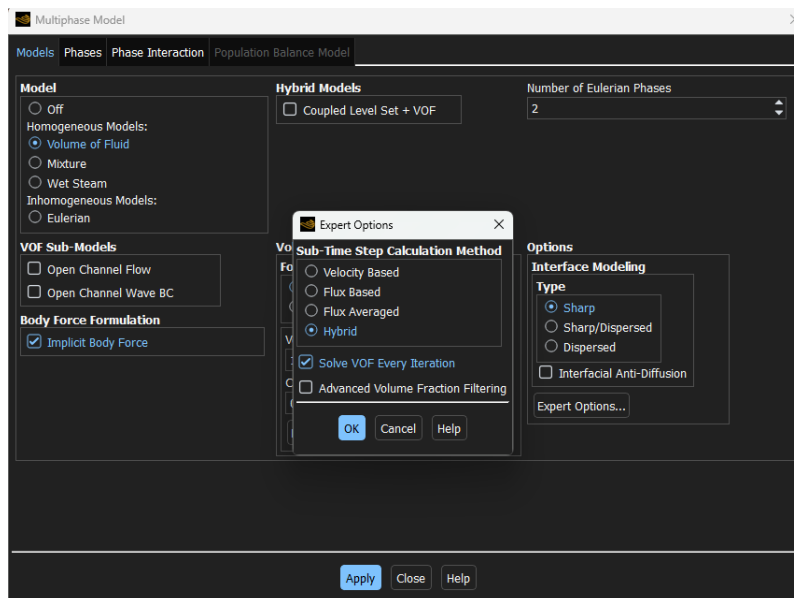
Figura 150: Configuración caso transitorio 3D parte 16



7.7.4 Segunda configuración

Para la segunda iteración únicamente se modificó la opción implicit body force, tal como sigue.

Figura 151: Cambios en configuración segunda iteración caso transitorio 3D



7.8 Archivos complementarios.

A continuación, se presentan los programas de Python utilizados para procesamiento de datos.

Código 48: Python utilizado para transitoria 3D

```
import pandas as pd
import numpy as np
import os

# 1. seleccion de caso

# Numero de caso en OpenFOAM
prefijo_of = "DamBreakv1"

# 2.NRMSE

def calcular_nrmse(val_ansys, val_of):
    error_cuadratico = (val_of - val_ansys) ** 2
    rmse = np.sqrt(np.mean(error_cuadratico))
    rango = np.max(val_ansys) - np.min(val_ansys)

    if rango == 0:
        return 0.0, rmse, rango
    else:
        return (rmse / rango) * 100, rmse, rango

# 3. Procesado

resultados_presion = []
resultados_fraccion = []
resultados_velocidad = []

print(f"Iniciando cálculo de {prefijo_of}...")
print("-" * 50)

for i in range(1, 16):
    num_ansys = f"{i:02d}"
    calculo_of = (2 * i) - 1
    num_of = f"{calculo_of:02d}"

    archivo_ansys = f"DatosConIBF{num_ansys}_limpio.csv"
    archivo_of = f"{prefijo_of}_{num_of}.csv"

    # Leer archivos y limpiar espacios
    df_ansys = pd.read_csv(archivo_ansys, skipinitialspace=True)
    df_of = pd.read_csv(archivo_of, skipinitialspace=True)
    df_ansys.columns = df_ansys.columns.str.strip()
    df_of.columns = df_of.columns.str.strip()

    # Calculo presion
    nrmse_p, rmse_p, rango_p = calcular_nrmse(df_ansys['Pressure [ Pa ]'].values,
    df_of['p'].values)
    resultados_presion.append({"Paso": num_ansys, "NRMSE Presion (%)": round(nrmse_p, 4)})

    # Calculo vof
    nrmse_a, rmse_a, rango_a = calcular_nrmse(df_ansys['Agua.Volume Fraction'].values,
    df_of['alpha.water'].values)
    resultados_fraccion.append({"Paso": num_ansys, "NRMSE Agua (%)": round(nrmse_a, 4)})

    # Calculo velocidad
    vel_ansys = df_ansys['Velocity [ m s^-1 ]'].values

    # Calcular velocidad de OpenFOAM
```

```

u0 = df_of['U:0'].values
u1 = df_of['U:1'].values
u2 = df_of['U:2'].values
vel_of = np.sqrt(u0**2 + u1**2 + u2**2)

nrmse_v, rmse_v, rango_v = calcular_nrmse(vel_ansys, vel_of)
resultados_velocidad.append({"Paso": num_ansys, "NRMSE Velocidad (%)": round(nrmse_v,
4)})

# 4. Exportar resultados

pd.DataFrame(resultados_presion).to_csv("1_Tabla_Presion.csv", index=False)
pd.DataFrame(resultados_fraccion).to_csv("2_Tabla_Agua.csv", index=False)
pd.DataFrame(resultados_velocidad).to_csv("3_Tabla_Velocidad.csv", index=False)

print("-" * 50)
print("Se han creado las tablas")

```

7.9 Configuraciones *OpenFOAM* caso transitorio 3D

Los archivos utilizados durante cada iteración en *OpenFOAM* se muestran a continuación.

7.9.1 Primera iteración

7.9.1.1 *Carpeta system*

Código 49: Archivo system: controlDict

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       controlDict;
}
// * * * * *

application     interFoam;
startFrom       startTime;
startTime       0;
stopAt          endTime;
endTime         1.5;
deltaT          0.0005;
writeControl     timeStep;
writeInterval    100;
purgeWrite      0;
writeFormat      ascii;
writePrecision   6;
writeCompression off;
timeFormat       general;
timePrecision    6;
runTimeModifiable true;
adjustTimeStep   no;
maxCo            1.0;
maxAlphaCo       1.0;
maxDeltaT        1;

// *****

    • DecomposeParDict:
FoamFile

```

```

{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}
// * * * * *

numberOfSubdomains 4;

method            scotch;

// * * * * *

```

Código 50: Archivo system: decomposeParDict

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}
// * * * * *

numberOfSubdomains 4;

method            scotch;

// * * * * *

```

Código 51: Archivo system: fvSchemes

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// * * * * *

ddtSchemes
{
    default      CrankNicolson 0.9;
}

gradSchemes
{
    default      leastSquares;
    grad(p_rgh)  Gauss linear; // <- Asegura que la presión use este esquema estable
}

divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)  Gauss linearUpwind grad(U);

    // Esquema "Compressive" para la Fracción Volumétrica
}

```

```

div(phi,alpha)          Gauss vanLeer;
div(phi,alpha.water)    Gauss vanLeer;
div(phirb,alpha)        Gauss interfaceCompression;
div(phirb,alpha.water)  Gauss interfaceCompression;

// First Order Upwind para la Turbulencia (Acoplados a la densidad: rhoPhi)
div(rhoPhi,k)           Gauss upwind;
div(rhoPhi,epsilon)     Gauss upwind;

// Por si alguna utilidad de post-proceso lo pide sin rho
div(phi,k)              Gauss upwind;
div(phi,epsilon)        Gauss upwind;

// Predeterminados para el resto
div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default              Gauss linear orthogonal;
}

interpolationSchemes
{
    default              linear;
}

snGradSchemes
{
    default              orthogonal;
}

// ***** //

```

Código 52: Archivo system: fvSolution

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// ***** //

solvers
{
    "alpha.water.*"
    {
        nAlphaCorr      2;
        nAlphaSubCycles 1;
        cAlpha           0.5;

        MULESCorr        yes;
        nLimiterIter      3;

        solver           smoothSolver;
        smoother          symGaussSeidel;
        tolerance         1e-8;
        relTol            0;
    }
}

```

```

    }

    "pcorr.*"
    {
        solver          PCG;
        preconditioner   DIC;
        tolerance        1e-5;
        relTol           0;
    }

    p_rgh
    {
        solver          PCG;
        preconditioner   DIC;
        tolerance        1e-07;
        relTol           0.05;
    }

    p_rghFinal
    {
        $p_rgh;
        relTol           0;
    }

    "(U|k|epsilon).*"
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother         symGaussSeidel;
        tolerance        1e-06;
        relTol           0;
        minIter          1;
    }
}

PIMPLE
{
    momentumPredictor    no;
    nOuterCorrectors      40;
    nCorrectors           3;
    nNonOrthogonalCorrectors 1;
    cAlpha                0.5;

    pRefCell              (0.4 0.4 0);
    pRefValue             0;

    correctPhi            yes;

    // Aquí le decimos a OpenFOAM que se detenga antes de llegar a 40 si ya resolvió la
    física
    residualControl
    {
        U
        {
            tolerance     1e-4;
            relTol         0;
        }
        p_rgh
        {
            tolerance     1e-4;
            relTol         0;
        }
    }
    k

```

```

        {
            tolerance 1e-4;
            relTol    0;
        }
        epsilon
        {
            tolerance 1e-4;
            relTol    0;
        }
    }
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
        p_rgh          0.3;
        p_rghFinal     1.0;
    }
    equations
    {
        U              0.7;
        UFinal         1.0;
        k              0.8;
        kFinal         1.0;
        epsilon        0.8;
        epsilonFinal   1.0;
    }
}

// ***** //

```

Código 53: Archivo system: setFieldsDict

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       setFieldsDict;
}
// ***** //

defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.water 0 // Todo el dominio se inicializa como aire (0)
);

regions
(
    boxToCell
    {
        box (0 0 -0.05) (0.3 0.3 0.05); // Las coordenadas exactas del agua
        (
            volScalarFieldValue alpha.water 1 // Se asigna el agua dentro de la caja
        );
    }
);

```

```
// ***** //
```

7.9.1.2 Carpeta Constant

Código 54: Archivo constant: g

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        uniformDimensionedVectorField;
    object       g;
}
// ***** //

dimensions      [0 1 -2 0 0 0 0];
value           (0 -9.81 0);

// ***** //
```

Código 55: Archivo constant: transportProperties

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       transportProperties;
}
// ***** //

phases           (water air);

phases (water air);

water
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              [0 2 -1 0 0 0 0] 1.0048e-06; // Viscosidad cinemática = mu / rho =
0.001003 / 998.2
    rho            [1 -3 0 0 0 0 0] 998.2;      // Densidad que configurada en Fluent
}

air
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              [0 2 -1 0 0 0 0] 1.4607e-05; // Viscosidad cinemática = mu / rho =
1.7894e-05 / 1.225
    rho            [1 -3 0 0 0 0 0] 1.225;      // Densidad que configurada en Fluent
}

sigma            [1 0 -2 0 0 0 0] 0; // Tensión superficial desactivada, como en Fluent

// ***** //
```

Código 56: Archivo constant: turbulenceProperties

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       turbulenceProperties;
}
// * * * * *

simulationType    RAS;

density           variable;

RAS
{
    RASModel      realizableKE; // Equivalente al k-epsilon Realizable
    turbulence     on;
    printCoeffs    on;
}

// * * * * *
```

7.9.1.3 Carpeta 0 (Condiciones iniciales)

Código 57: Archivo 0: alpha.water

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    arch         "LSB;label=32;scalar=64";
    class        volScalarField;
    location      "0";
    object       alpha.water;
}
// * * * * *

dimensions        [0 0 0 0 0 0 0];

internalField     nonuniform List<scalar>
355060
boundaryField
{
    front_wall
    {
        type      zeroGradient;
    }
    back_wall
    {
        type      zeroGradient;
    }
    top_wall
    {
        type      inletOutlet;
        inletValue uniform 0;
        value      uniform 0;
    }
    bottom_wall
}
```

```

    {
        type            zeroGradient;
    }
    left_wall
    {
        type            zeroGradient;
    }
    right_wall
    {
        type            zeroGradient;
    }
}

// ***** //

```

Código 58: Archivo 0: epsilon

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       epsilon;
}
// ***** //

dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];

internalField    uniform 0.1;

boundaryField
{
    top_wall
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue       uniform 1e-05;
        value             uniform 1e-05;
    }

    "(bottom_wall|left_wall|right_wall|front_wall|back_wall)"
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value            uniform 1e-05;
    }
}

// ***** //

```

Código 59: Archivo 0: k

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       k;
}
// ***** //

```

```

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0.1;

boundaryField
{
    top_wall
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue       uniform 1e-05;
        value             uniform 1e-05;
    }

    "(bottom_wall|left_wall|right_wall|front_wall|back_wall)"
    {
        type            kqRWallFunction;
        value            uniform 1e-05;
    }
}

// ***** //

```

Código 60: Archivo 0: nut

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       nut;
}
// ***** //

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    top_wall
    {
        type            calculated;
        value            uniform 0;
    }

    "(bottom_wall|left_wall|right_wall|front_wall|back_wall)"
    {
        type            nutkWallFunction;
        value            uniform 0;
    }
}

// ***** //

```

Código 61: Archivo 0: p_rgh

```

FoamFile
{
    version      2.0;

```

```

    format      ascii;
    class       volScalarField;
    object      p_rgh;
}
// * * * * *

dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];

internalField    uniform 0;

boundaryField
{
    top_wall
    {
        type      totalPressure;
        p0         uniform 0;
        value      uniform 0;
    }

    "(bottom_wall|left_wall|right_wall|front_wall|back_wall)"
    {
        type      fixedFluxPressure;
        value      uniform 0;
    }
}

// * * * * *

```

Código 62: Archivo 0: U

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// * * * * *

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField    uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    top_wall
    {
        type      pressureInletOutletVelocity;
        value      uniform (0 0 0);
    }

    "(bottom_wall|left_wall|right_wall|front_wall|back_wall)"
    {
        type      noSlip;
    }
}

// * * * * *

```

7.9.2 Segunda iteración

Para la segunda iteración se modificó únicamente fvSchemes quedando de la siguiente manera.

Código 63: Archivo fvSchemes segunda iteración

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default      CrankNicolson 0.9;
}

gradSchemes
{
    default      leastSquares;
    grad(p_rgh)  Gauss linear; //
}

divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)  Gauss limitedLinearV 1.0;

    // imitar "Compressive" para la Fracción Volumétrica
    div(phi,alpha)      Gauss vanLeer;
    div(phi,alpha.water) Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha)     Gauss interfaceCompression;
    div(phirb,alpha.water) Gauss interfaceCompression;

    // primer orden para la Turbulencia (Acoplados a la densidad: rhoPhi)
    div(rhoPhi,k)        Gauss upwind;
    div(rhoPhi,epsilon)  Gauss upwind;

    // Por si el programa lo pide
    div(phi,k)            Gauss upwind;
    div(phi,epsilon)     Gauss upwind;

    // Predeterminados para el resto
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear orthogonal;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{

```

```

        default      orthogonal;
    }

    // *****

```

7.9.3 Tercera iteración

Nuevamente se modifica fvSchemes quedando de la siguiente manera

Código 64: Archivo fvSchemes tercera iteración

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default      CrankNicolson 0.9;
}

gradSchemes
{
    // Limita todos los escalares y tensores por defecto
    default      cellLimited Gauss linear 1;

    grad(p_rgh)  cellLimited Gauss linear 1;

    grad(U)      cellLimited Gauss linear 1;
}
divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)  Gauss limitedLinearV 1.0;

    // Esquema "Compressive" para la Fracción Volumétrica
    div(phi,alpha)  Gauss vanLeer;
    div(phi,alpha.water)  Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha)  Gauss interfaceCompression;
    div(phirb,alpha.water)  Gauss interfaceCompression;

    // First Order Upwind para la Turbulencia (Acoplados a la densidad: rhoPhi)
    div(rhoPhi,k)    Gauss upwind;
    div(rhoPhi,epsilon)  Gauss upwind;

    // Por si alguna utilidad de post-proceso lo pide sin rho
    div(phi,k)        Gauss upwind;
    div(phi,epsilon)  Gauss upwind;

    // Predeterminados para el resto
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{

```

```

        default      Gauss linear orthogonal;
    }

    interpolationSchemes
    {
        default      linear;
    }

    snGradSchemes
    {
        default      orthogonal;
    }
    // ***** //

```

7.9.4 Cuarta iteración

En este caso se modificaron los archivos “controlDict” y “fvSchemes” quedando de la siguiente manera

Código 65: Archivo: controlDict (cuarta iteración)

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       controlDict;
}
// ***** //

application      interIsoFoam; //
startFrom        startTime;
startTime        0;
stopAt           endTime;

endTime          1.5;
deltaT           0.0005;
writeControl      timeStep;
writeInterval     100;
purgeWrite        0;

writeFormat       ascii;
writePrecision    6;
writeCompression  off;
timeFormat        general;
timePrecision     6;
runTimeModifiable true;

adjustTimeStep    no;
maxCo             1.0;
maxAlphaCo        1.0;
maxDeltaT         1;

// ***** //

```

Código 66: Archivo: fvSchemes (cuarta iteración)

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// *****

ddtSchemes
{
    default      Euler;
}

gradSchemes
{
    default      cellLimited Gauss linear 1;

    grad(p_rgh)  cellLimited Gauss linear 1;

    grad(U)      cellLimited Gauss linear 1;
}

divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)  Gauss limitedLinearV 1.0;

    // usamos "Compressive" para la Fracción Volumétrica
    div(phi,alpha)  Gauss vanLeer;
    div(phi,alpha.water)  Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha)  Gauss interfaceCompression;
    div(phirb,alpha.water)  Gauss interfaceCompression;

    div(rhoPhi,k)    Gauss upwind;
    div(rhoPhi,epsilon)  Gauss upwind;

    // Por si alguna utilidad lo pide
    div(phi,k)        Gauss upwind;
    div(phi,epsilon)   Gauss upwind;

    // Predeterminados para el resto
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear orthogonal;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}
```

```
snGradSchemes
{
    default      orthogonal;
}

// ***** //
```

7.10 Resultados *OpenFOAM* caso transitorio 3D (Fracción volumétrica)

7.10.1 Primera y segunda iteración

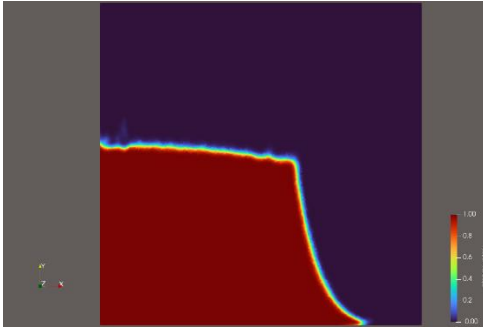


Figura 152 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.1

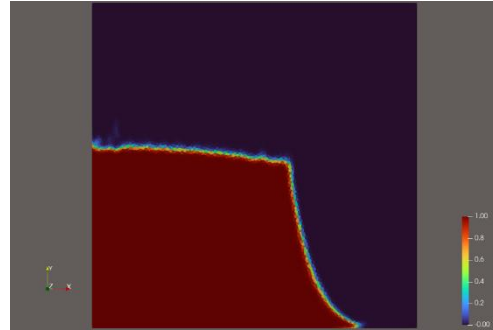


Figura 153 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.1

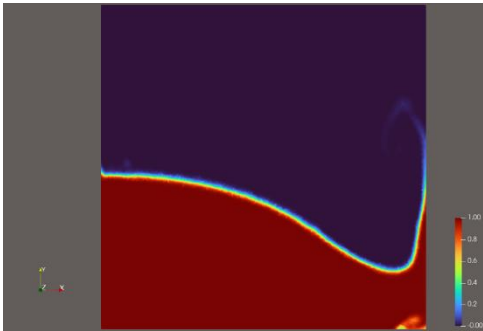


Figura 154 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.2

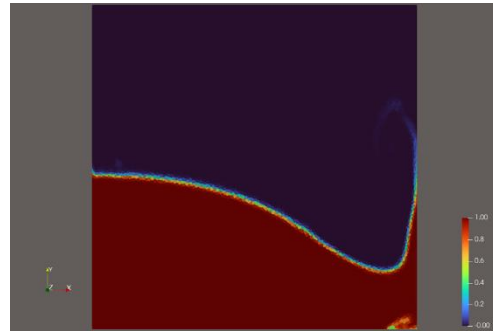


Figura 155 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.2

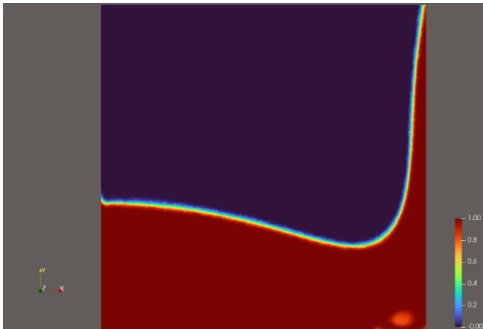


Figura 156 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.3

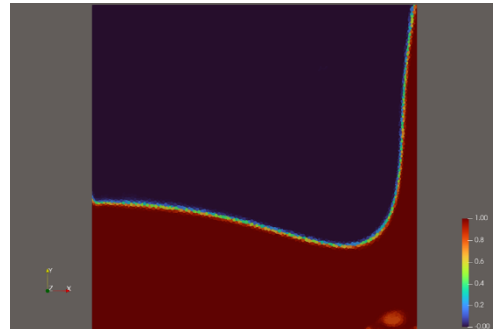


Figura 157 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.3

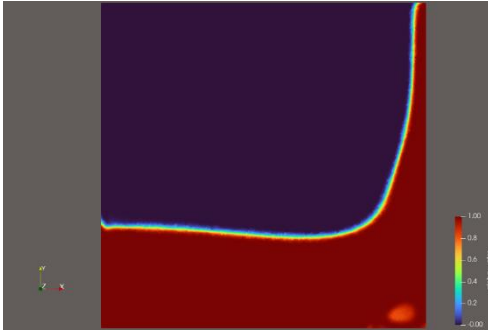


Figura 158 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.4

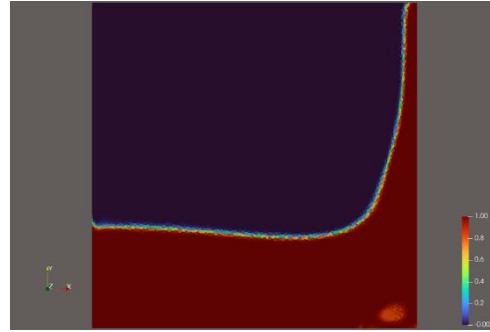


Figura 159 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.4

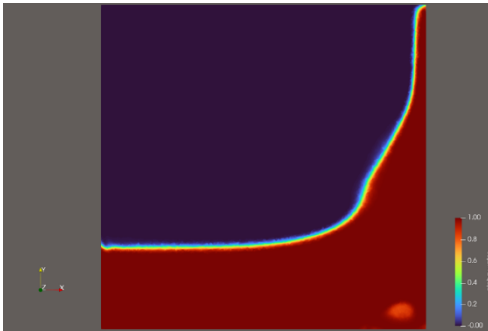


Figura 160 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.5

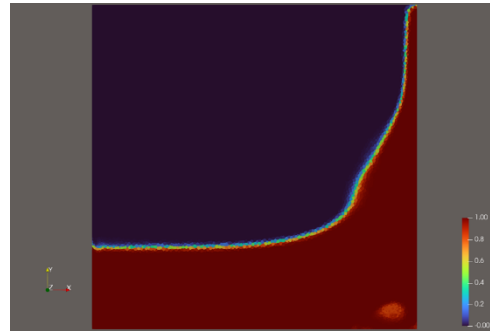


Figura 161 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.5

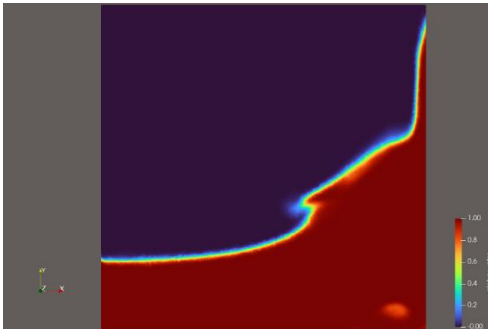


Figura 162 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.6

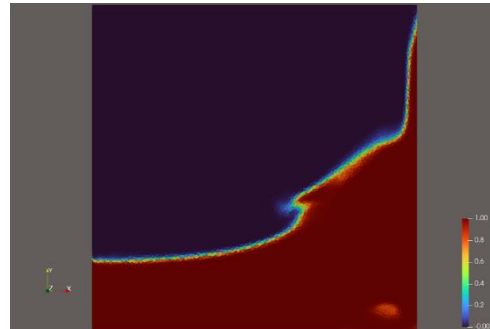


Figura 163 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.6

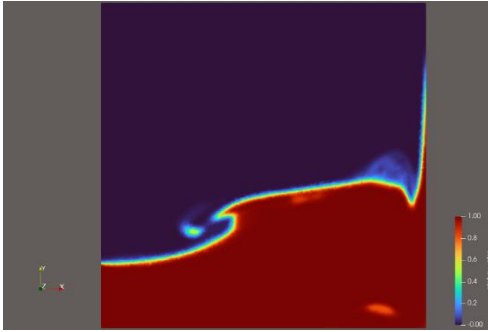


Figura 164 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.7

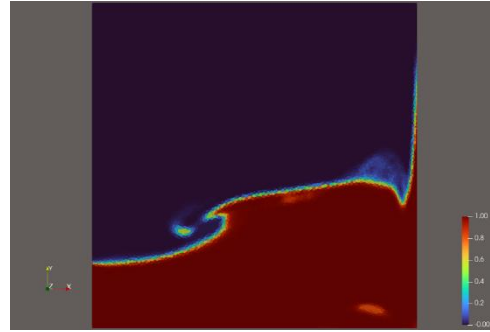


Figura 165 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.7

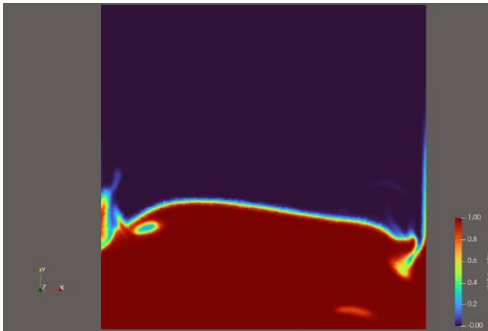


Figura 166 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.8

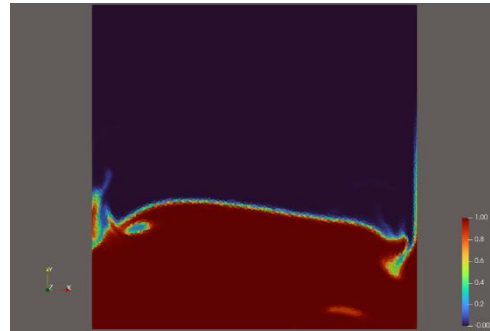


Figura 167 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.8

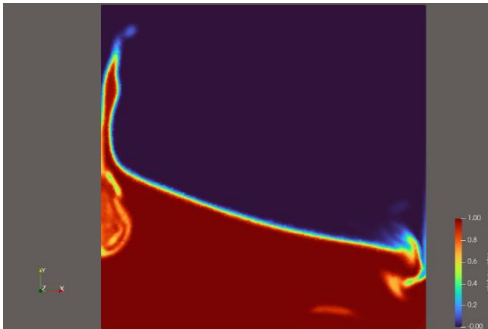


Figura 168 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 0.9

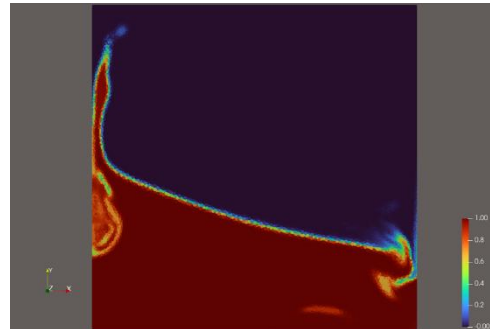


Figura 169 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 0.9

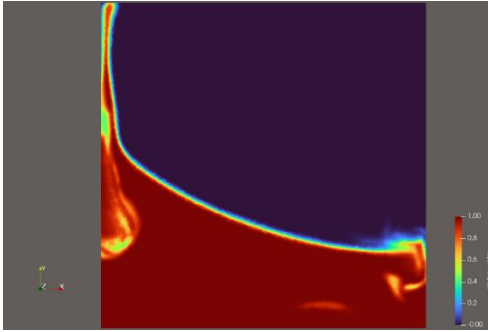


Figura 170 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.0

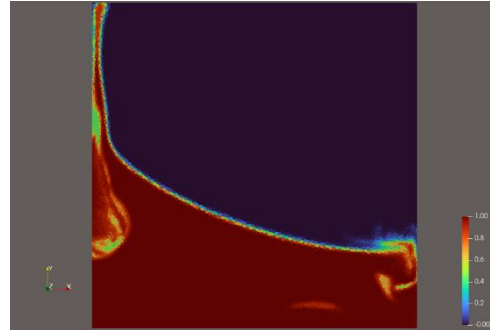


Figura 171 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.0

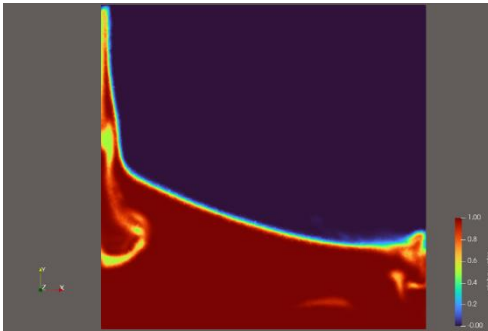


Figura 172 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.1

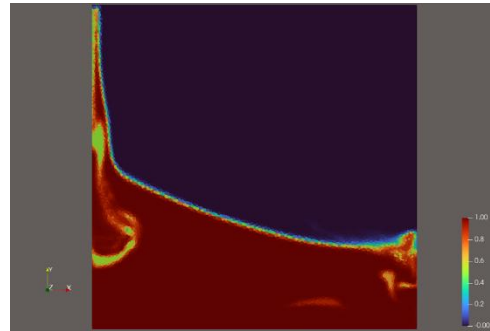


Figura 173 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.1

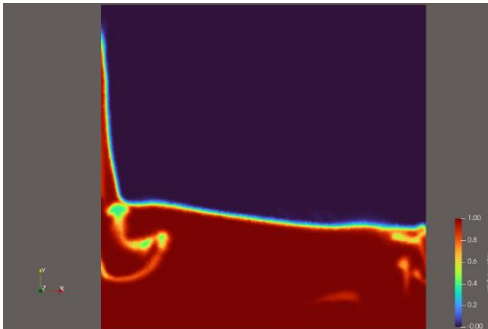


Figura 174 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.2

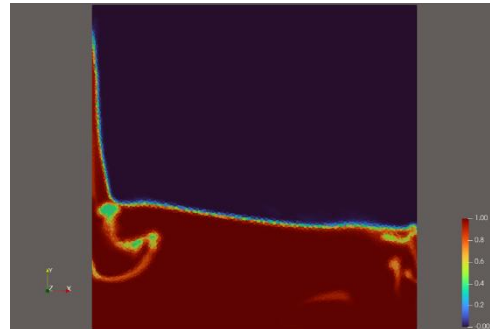


Figura 175 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.2

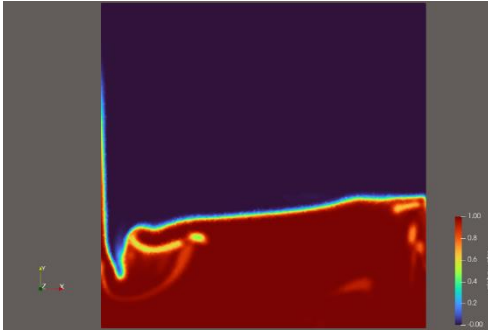


Figura 176 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.3

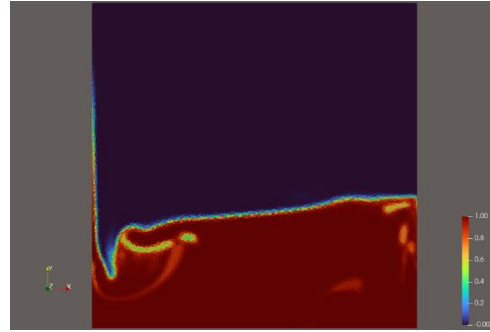


Figura 177 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.3

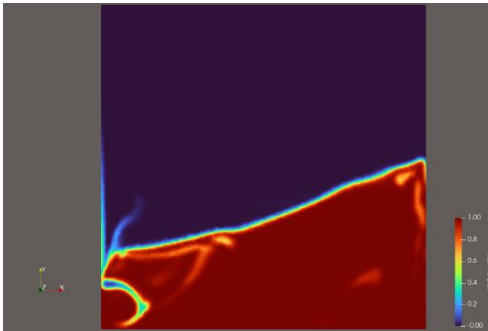


Figura 178 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.4

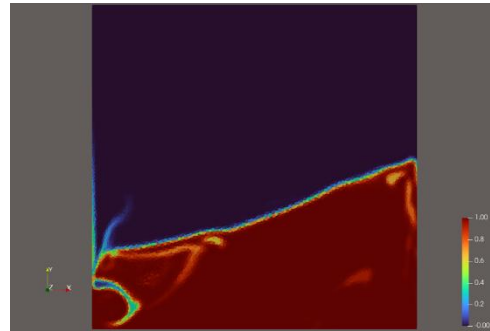


Figura 179 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.4

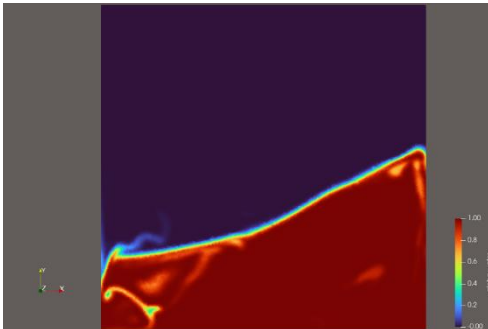


Figura 180 : Fracción volumétrica primera iteración OpenFOAM segundo 1.5

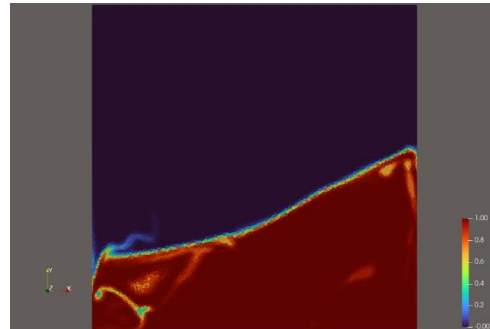


Figura 181 : Fracción volumétrica segunda iteración OpenFOAM segundo 1.5

7.10.2 Tercera y cuarta iteración

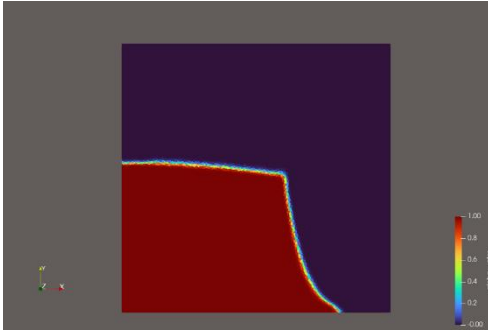


Figura 182 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.1

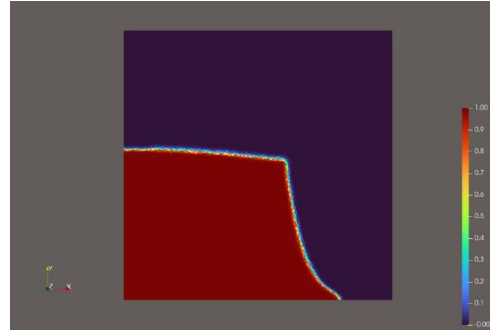


Figura 183 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.1

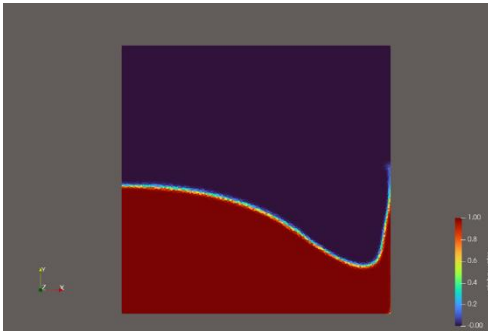


Figura 184 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.2

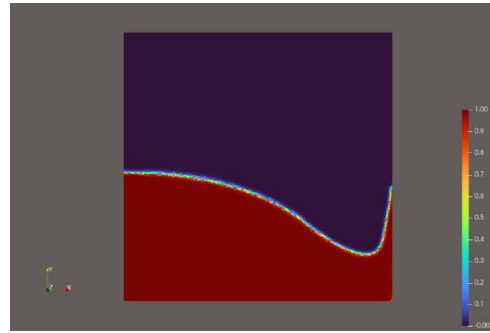


Figura 185 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.2

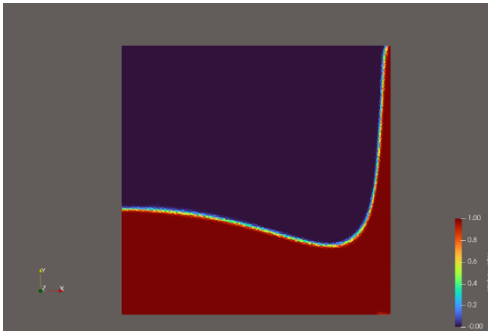


Figura 186 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.3

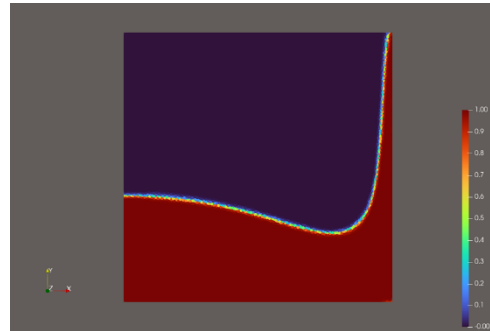


Figura 187 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.3

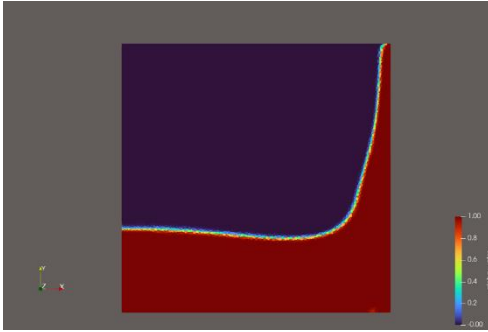


Figura 188 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.4

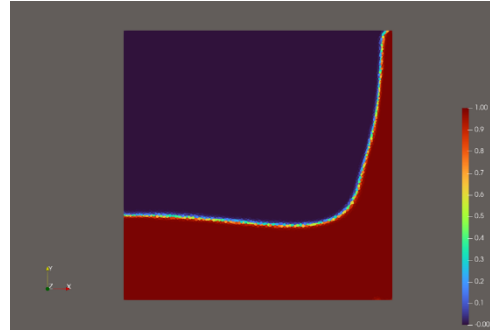


Figura 189 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.4

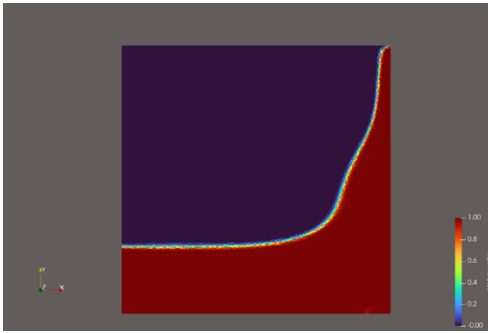


Figura 190 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.5

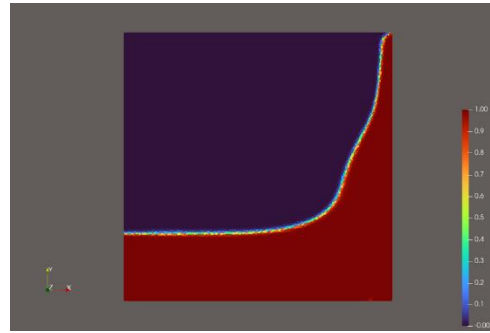


Figura 191 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.5

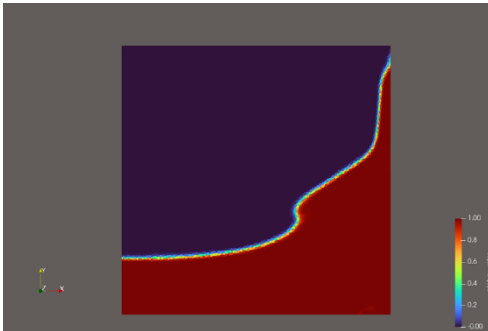


Figura 192 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.6

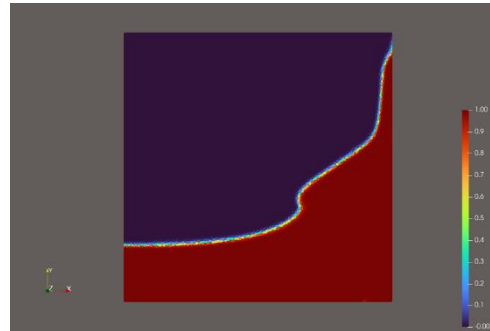


Figura 193 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.6

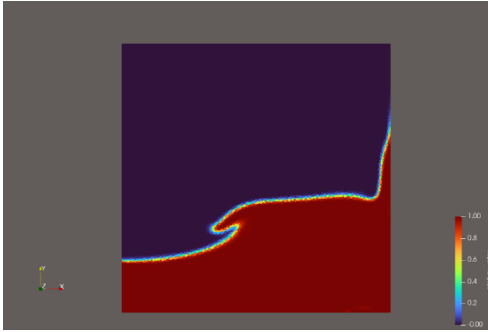


Figura 194 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.7

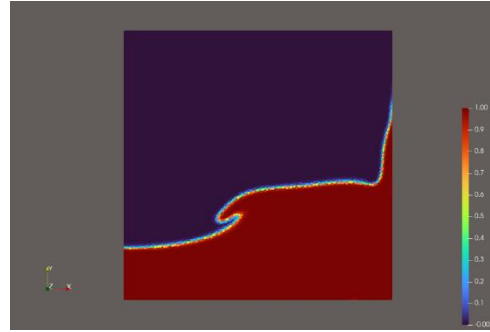


Figura 195 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.7

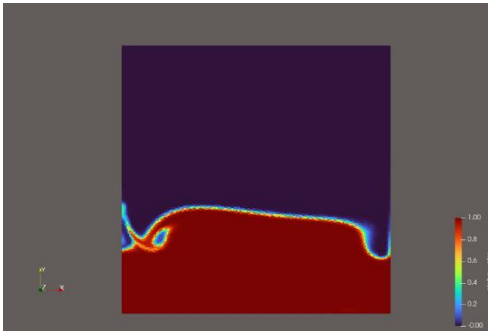


Figura 196 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.8

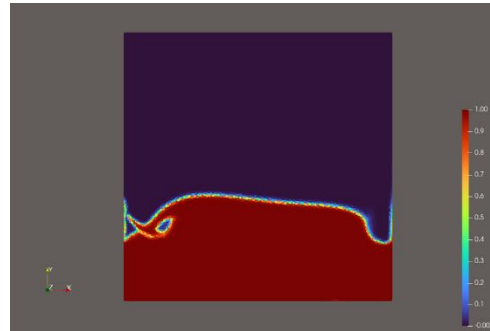


Figura 197 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.8

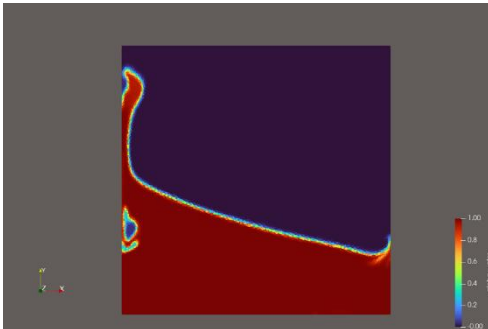


Figura 198 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 0.9

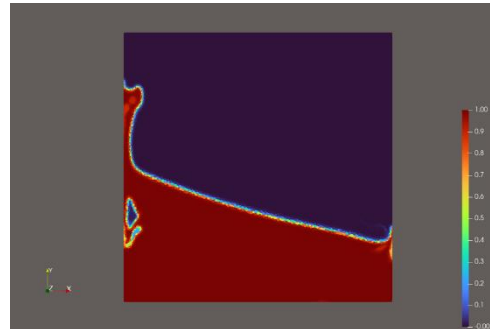


Figura 199 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.9

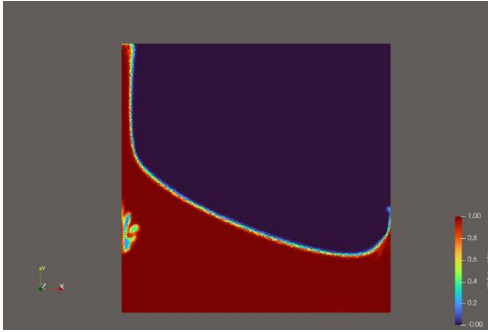


Figura 200 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 1.0

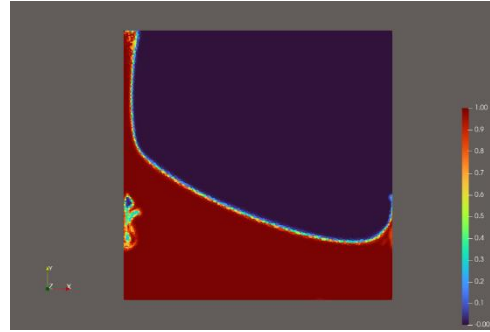


Figura 201 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.0

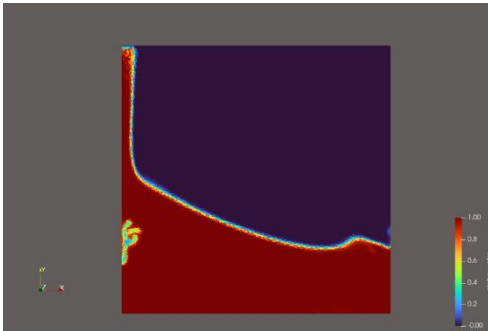


Figura 202 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 1.1

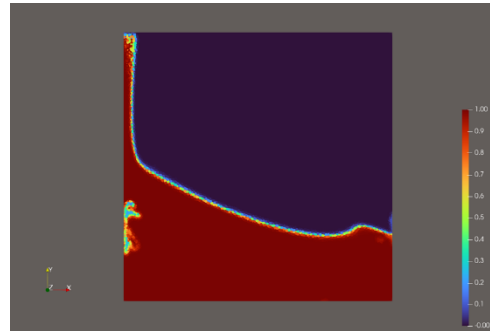


Figura 203 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.1

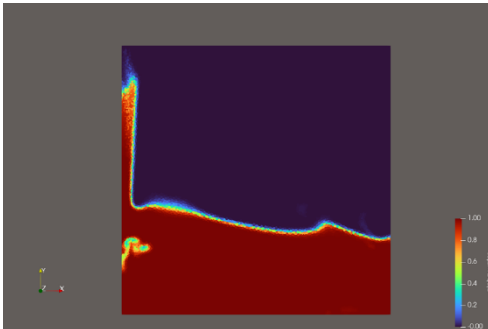


Figura 204 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 1.2

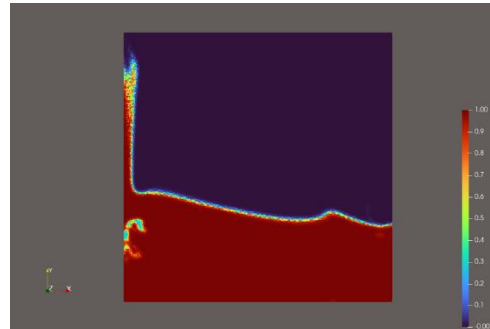


Figura 205 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.2

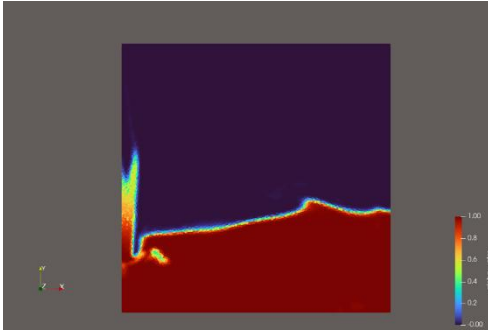


Figura 206 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 1.3

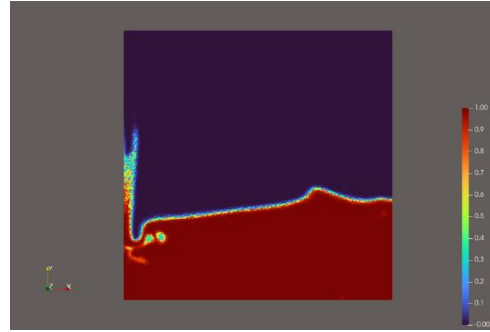


Figura 207 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.3

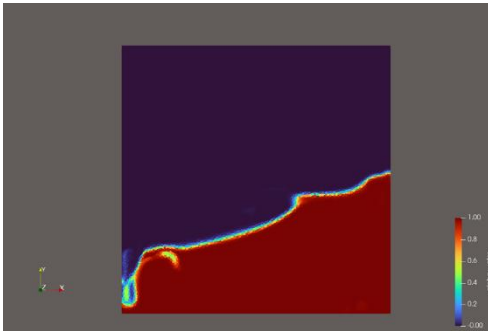


Figura 208 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 1.4

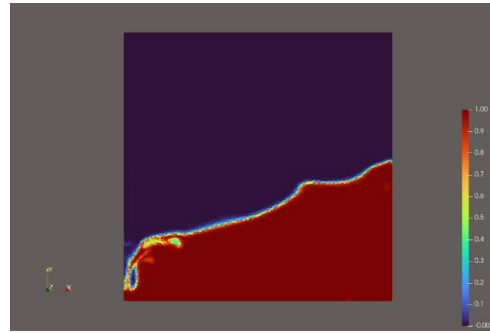


Figura 209 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.4

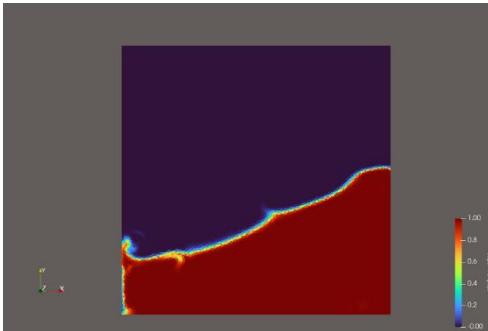


Figura 210 : Fracción volumétrica tercera iteración OpenFOAM segundo 1.5

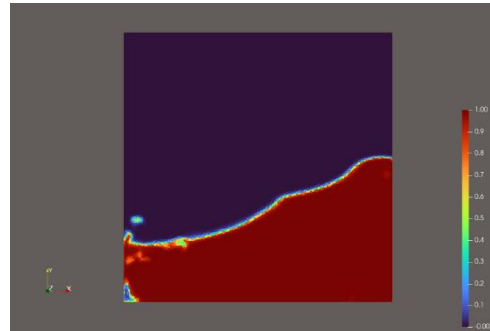


Figura 211 : Fracción volumétrica cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.5

7.11 Resultados ANSYS caso transitorio 3D (Fracción volumétrica)

7.11.1 Primera y segunda iteración

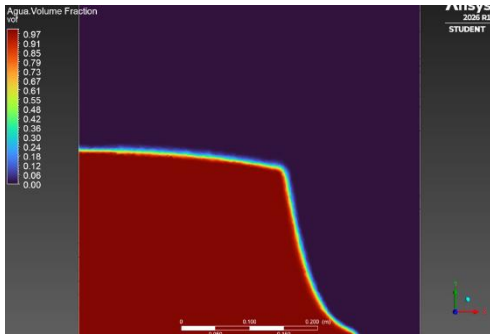


Figura 212 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.1

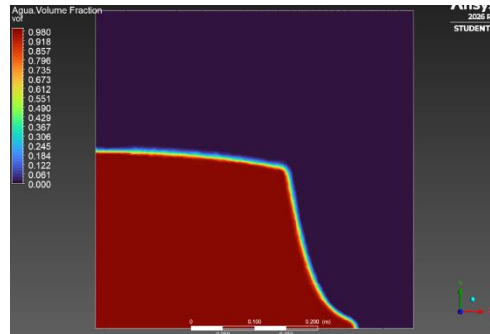


Figura 213 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.1

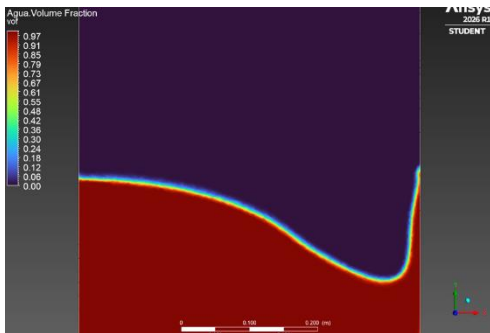


Figura 214 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.2

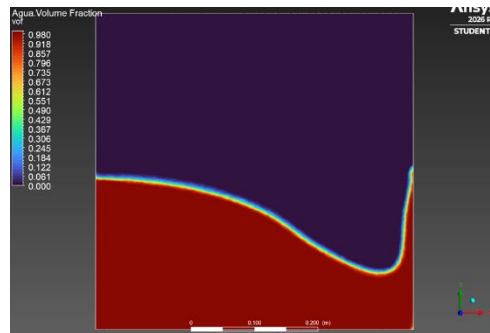


Figura 215 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.2

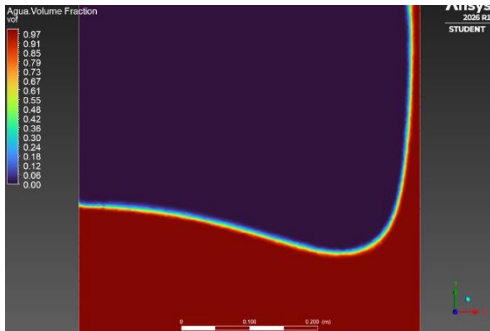


Figura 216 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.3

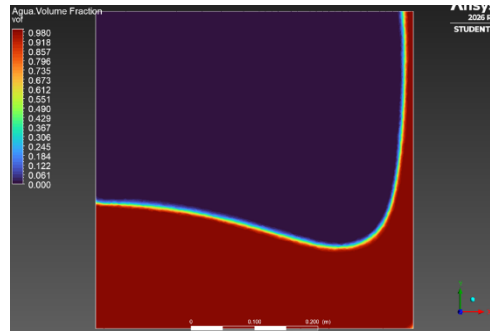


Figura 217 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.3

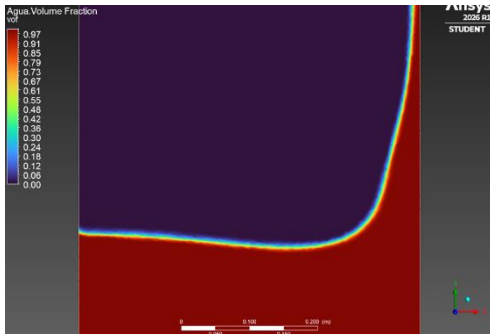


Figura 218 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.4

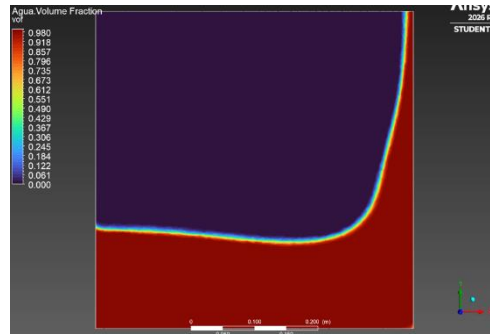


Figura 219 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.4

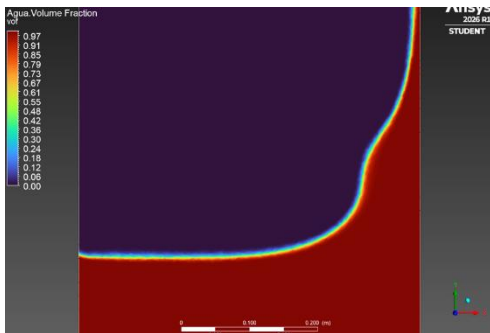


Figura 220 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.5

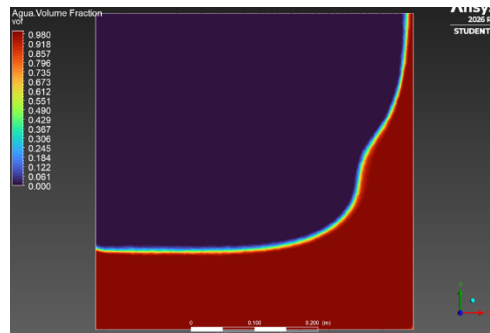


Figura 221 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.5

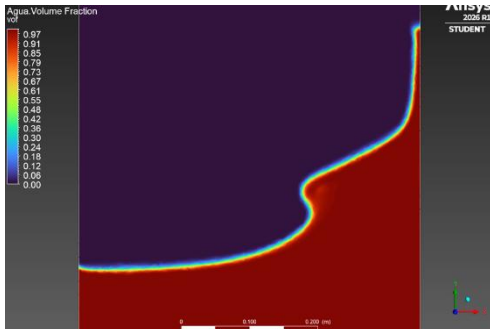


Figura 222 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.6

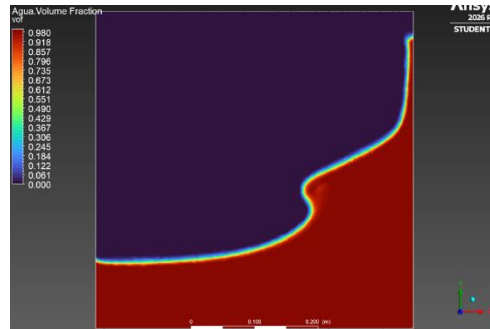


Figura 223 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.6

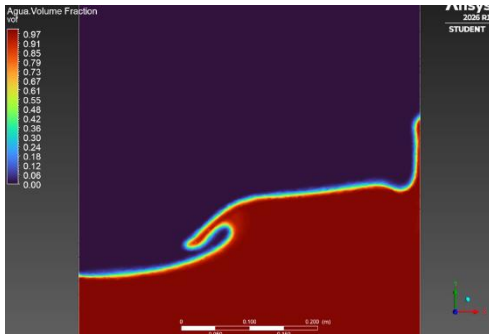


Figura 224 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.7

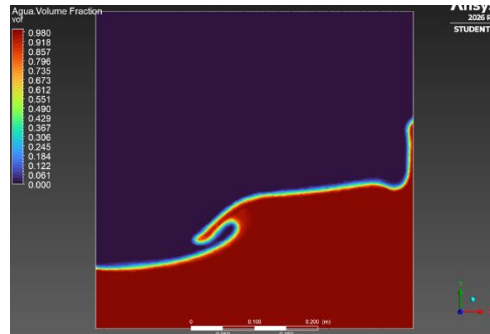


Figura 225 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.7

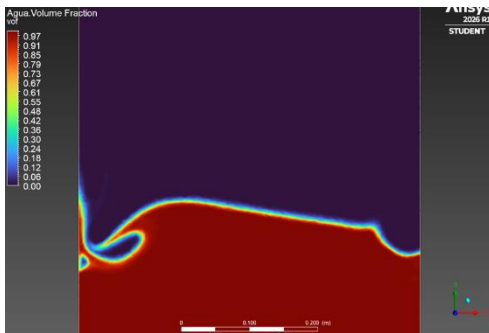


Figura 226 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.8

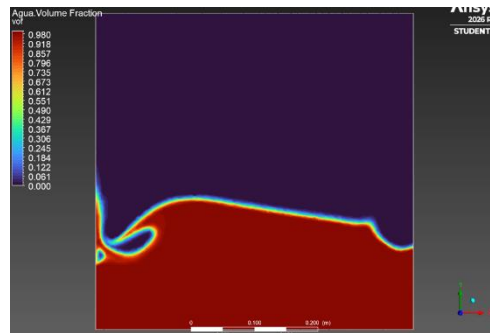


Figura 227 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.8

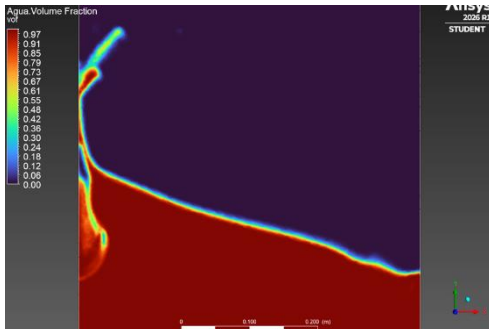


Figura 228 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 0.9

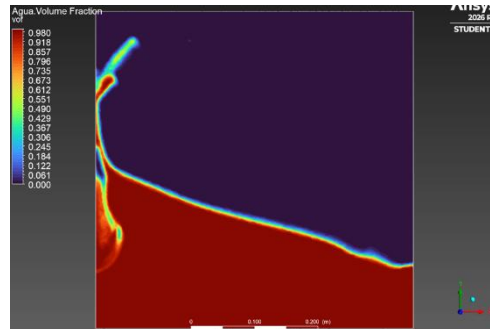


Figura 229 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 0.9

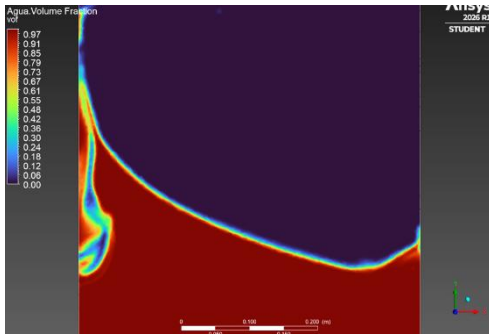


Figura 230 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 1.0

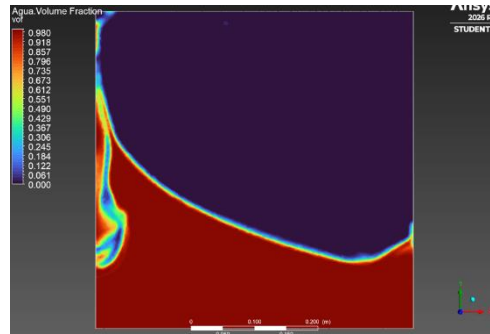


Figura 231 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 1.0

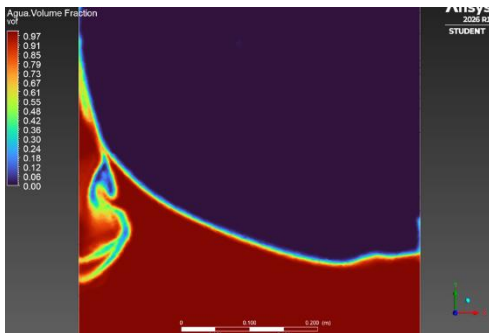


Figura 232 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 1.1

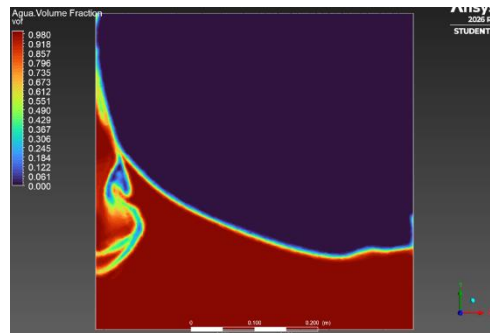


Figura 233 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 1.1

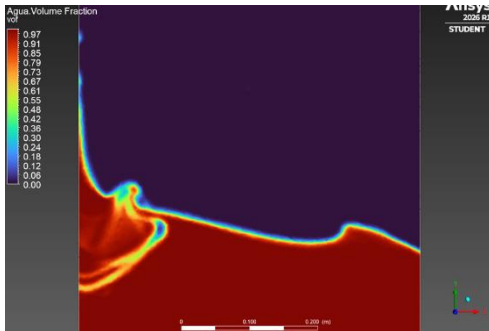


Figura 234 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 1.2

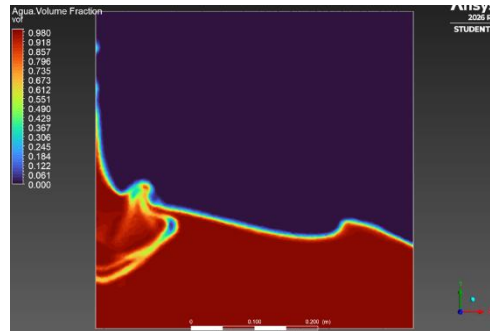


Figura 235 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 1.2

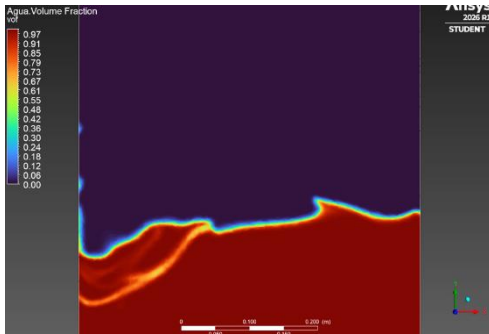


Figura 236 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 1.3

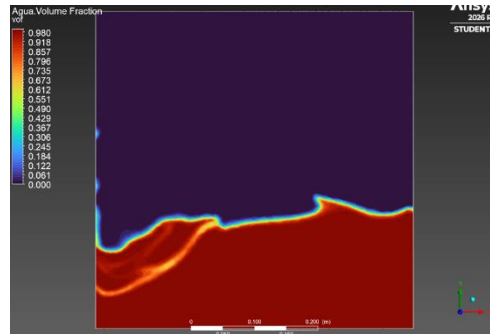


Figura 237 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 1.3

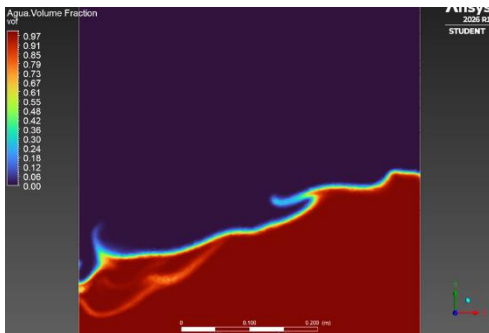


Figura 238 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 1.4

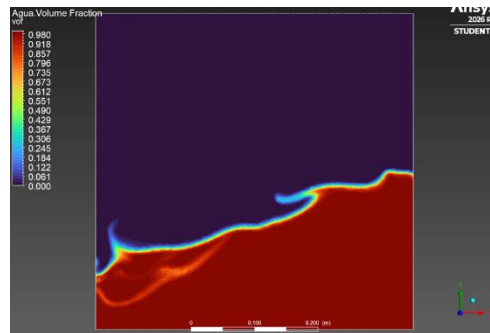


Figura 239 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 1.4

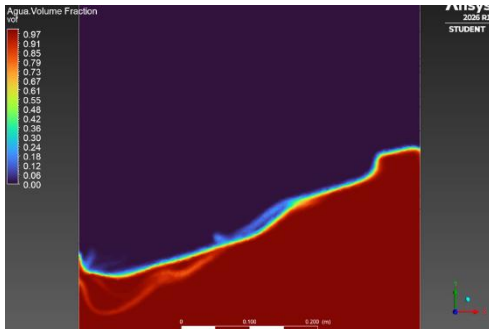


Figura 240 : Fracción volumétrica primera iteración ANSYS segundo 1.5

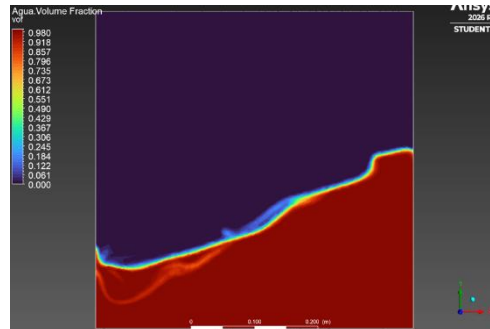


Figura 241 : Fracción volumétrica segunda iteración ANSYS segundo 1.5

7.12 Resultados *OpenFOAM* caso transitorio 3D (Velocidad

7.12.1 Primera y segunda iteración

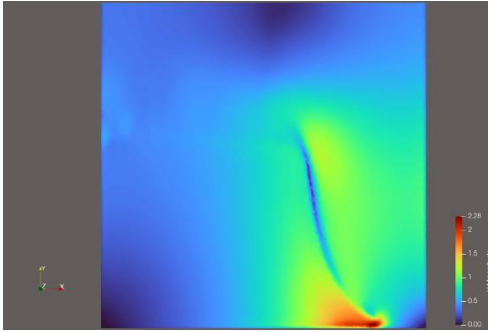


Figura 242 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.1

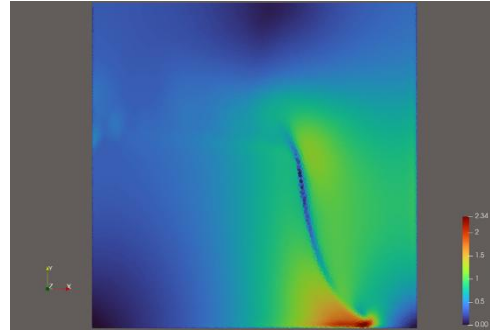


Figura 243 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.1

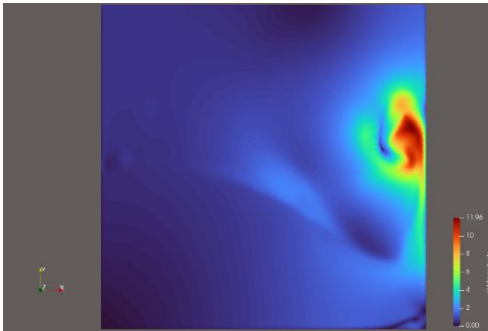


Figura 244 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.2

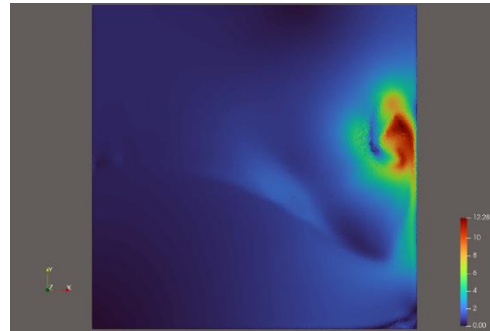


Figura 245 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.2

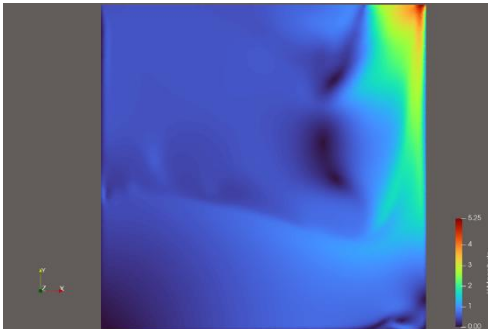


Figura 246 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.3

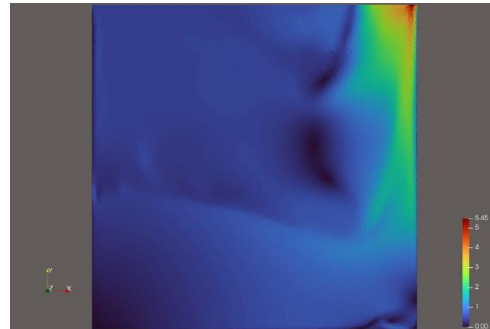


Figura 247 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.3

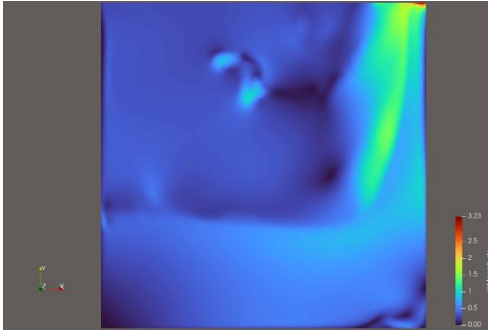


Figura 248 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.4

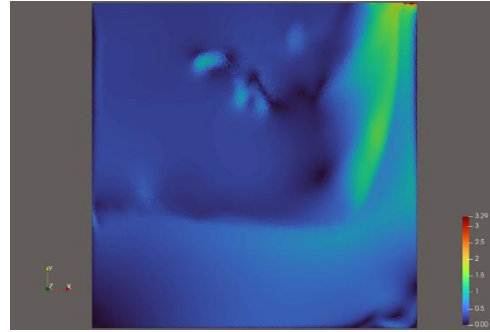


Figura 249 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.4

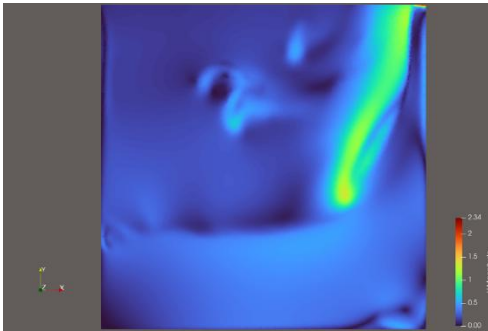


Figura 250 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.5

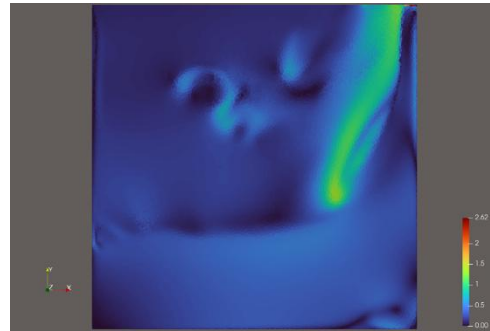


Figura 251 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.5

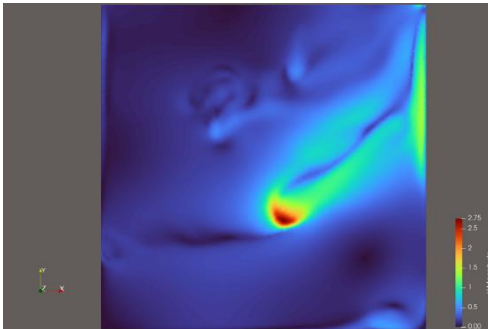


Figura 252 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.6

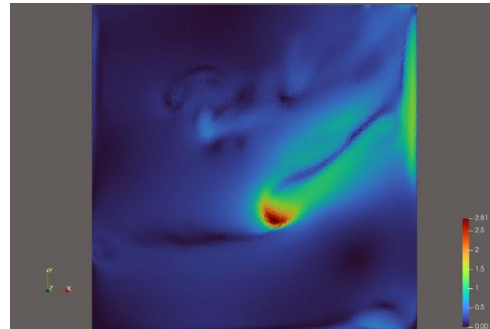


Figura 253 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.6

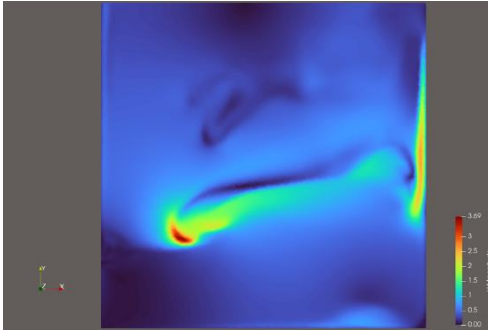


Figura 254 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.7

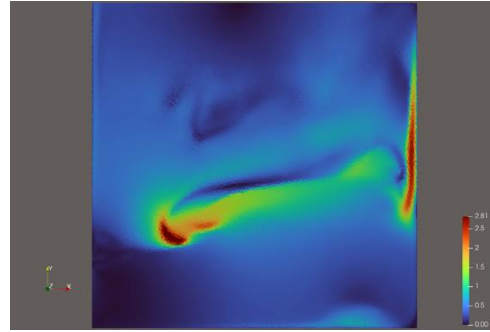


Figura 255 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.7

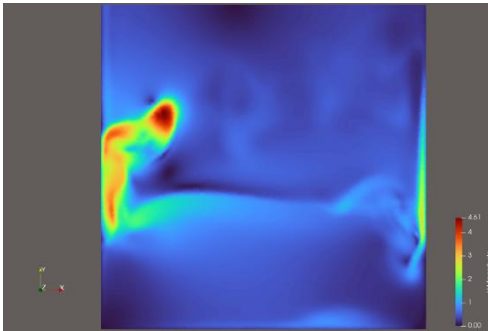


Figura 256 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.8

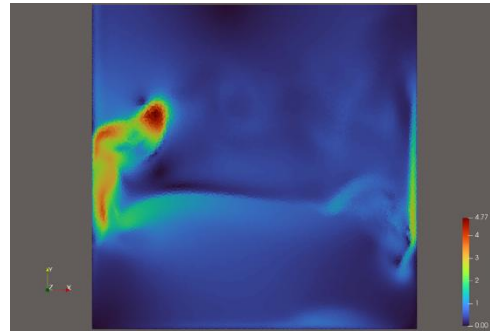


Figura 257 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.8

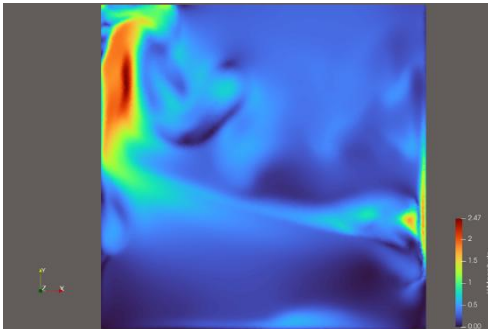


Figura 258 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 0.9

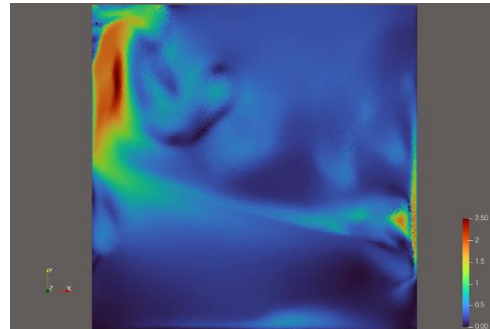


Figura 259 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 0.9

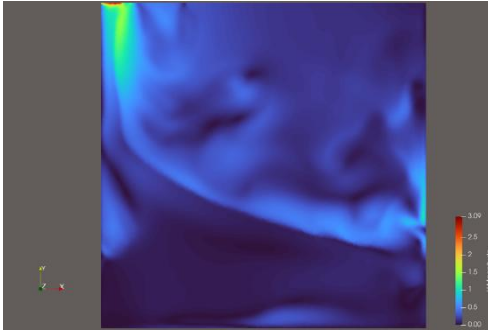


Figura 260 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.0

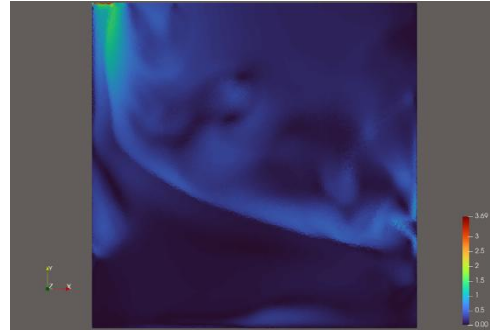


Figura 261 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.0

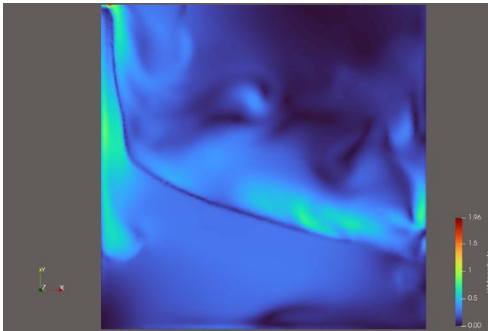


Figura 262 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.1



Figura 263 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.1

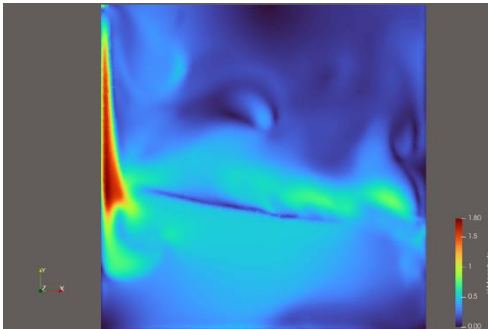


Figura 264 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.2

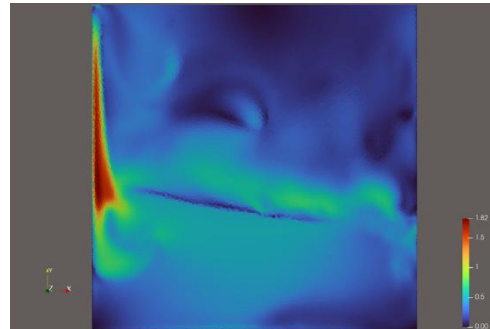


Figura 265 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.2

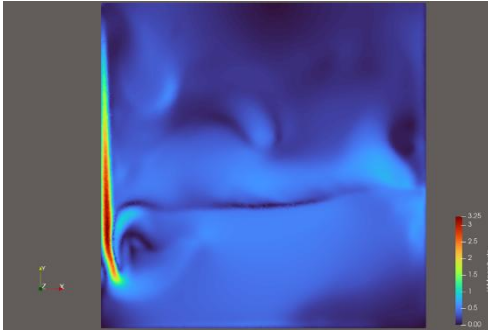


Figura 266 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.3

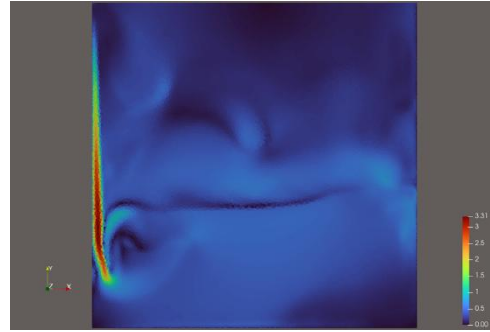


Figura 267 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.3

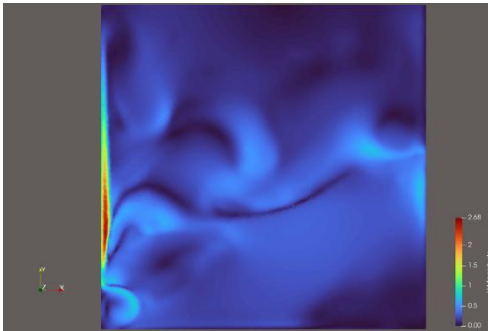


Figura 268 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.4

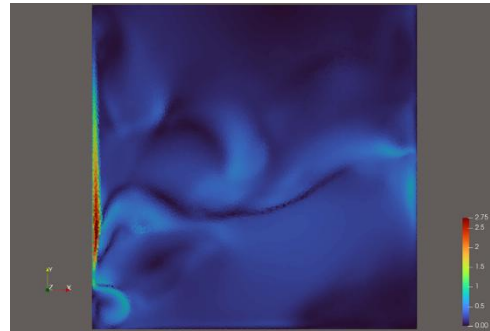


Figura 269 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.4

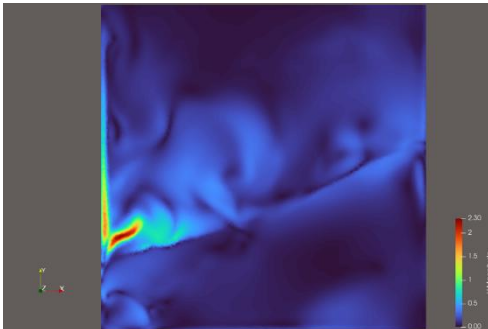


Figura 270 : Perfil de velocidad primera iteración OpenFOAM segundo 1.5

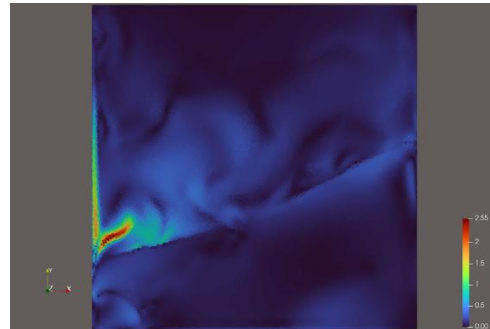


Figura 271 : Perfil de velocidad segunda iteración OpenFOAM segundo 1.5

7.12.2 Tercera y cuarta iteración

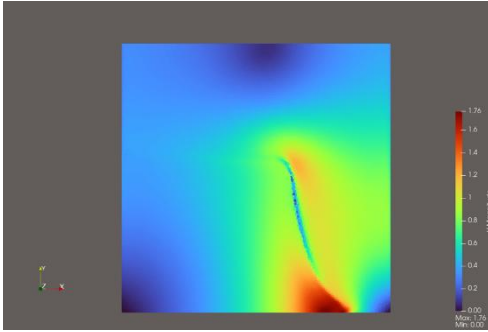


Figura 272 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.1

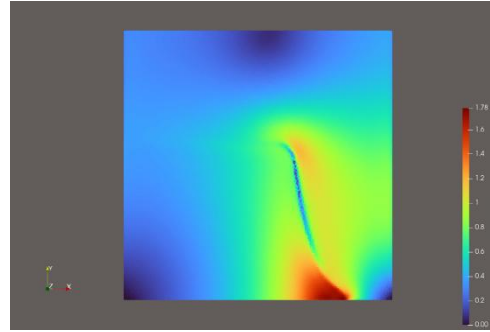


Figura 273 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.1

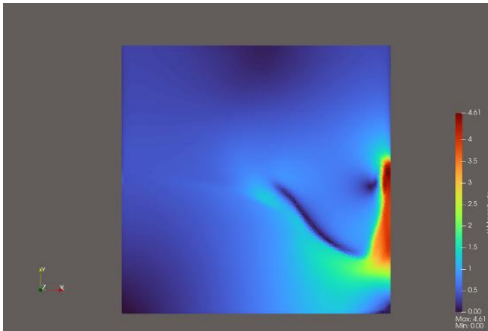


Figura 274 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.2

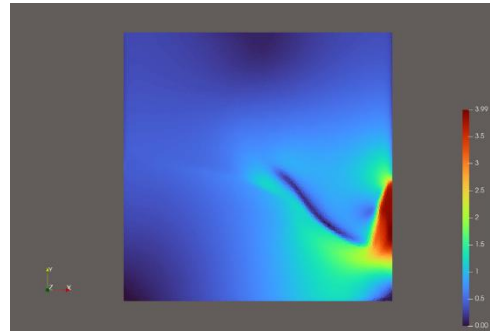


Figura 275 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.2

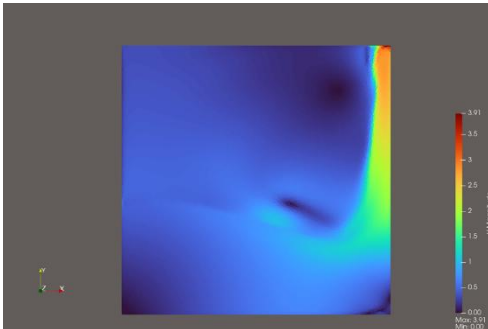


Figura 276 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.3

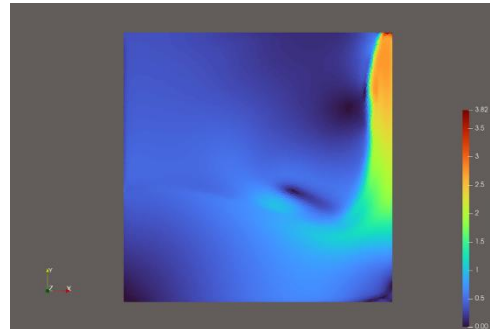


Figura 277 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.3

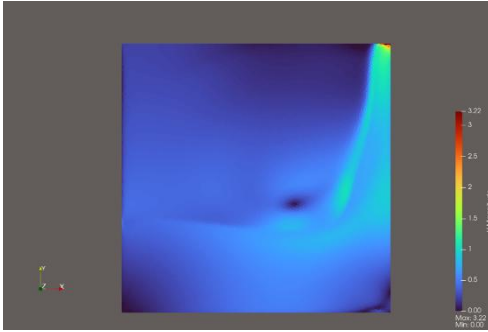


Figura 278 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.4

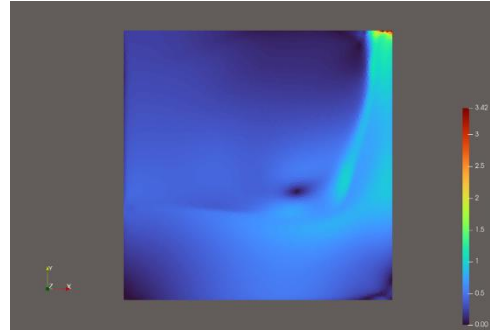


Figura 279 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.4

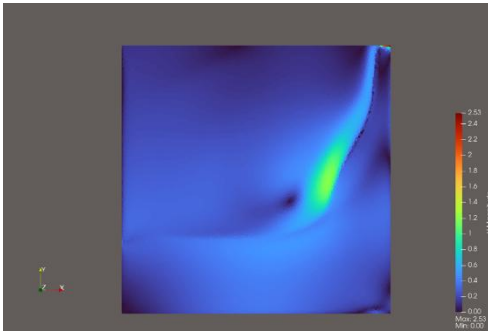


Figura 280 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.5

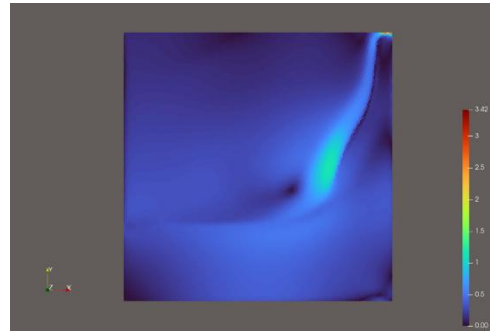


Figura 281 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.5

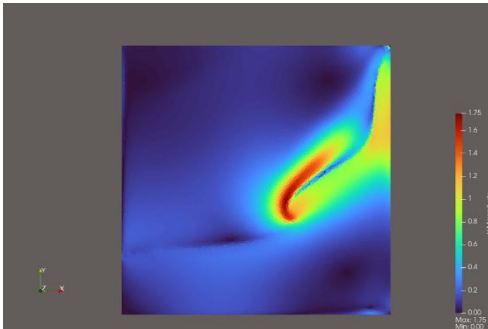


Figura 282 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.6

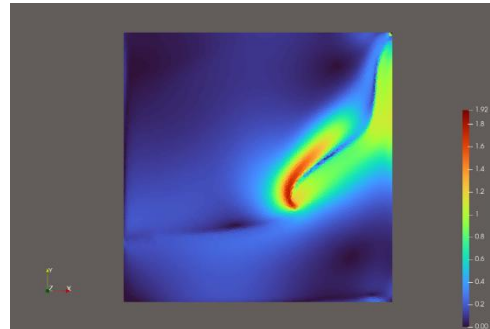


Figura 283 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.6

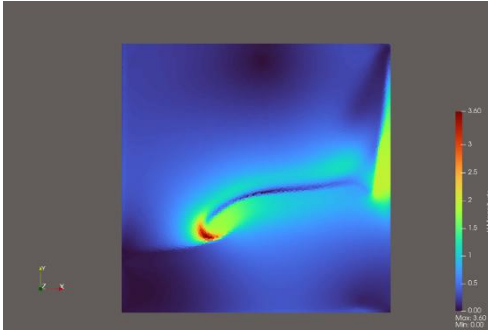


Figura 284 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.7

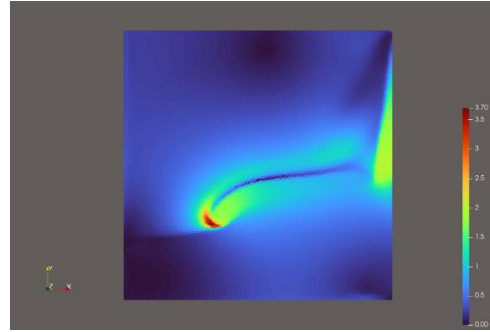


Figura 285 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.7

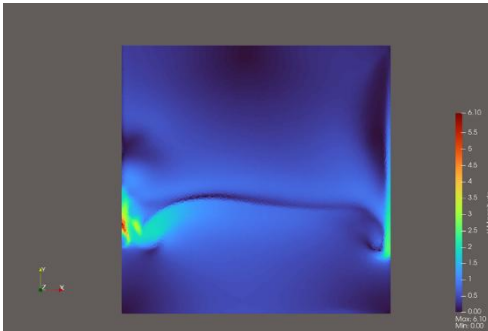


Figura 286 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.8

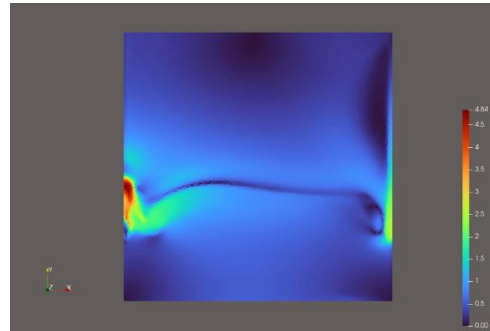


Figura 287 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.8

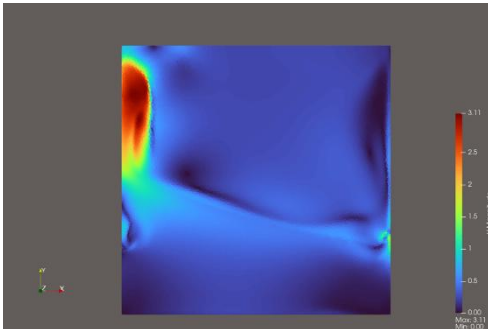


Figura 288 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 0.9

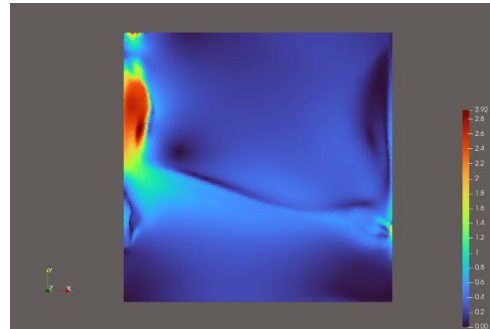


Figura 289 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.9

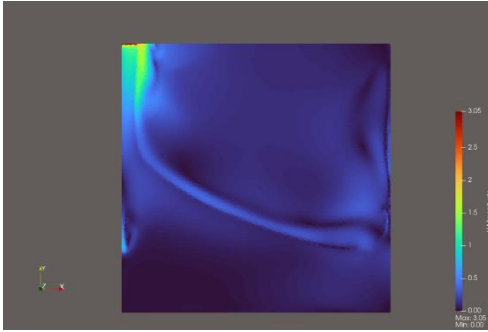


Figura 290 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.0

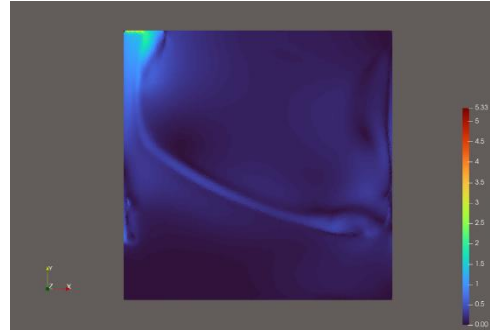


Figura 291 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.0

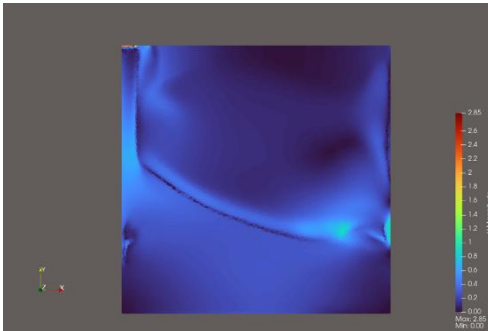


Figura 292 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.1

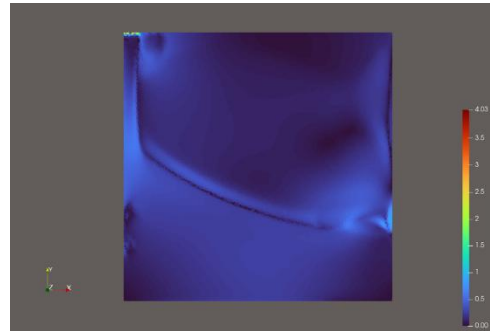


Figura 293 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.1

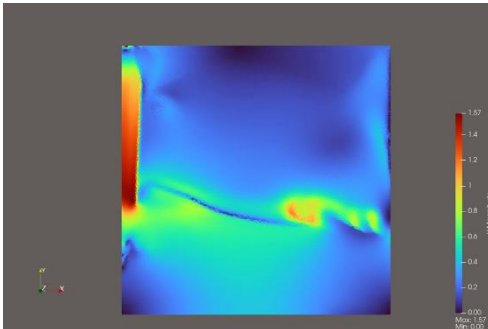


Figura 294 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.2

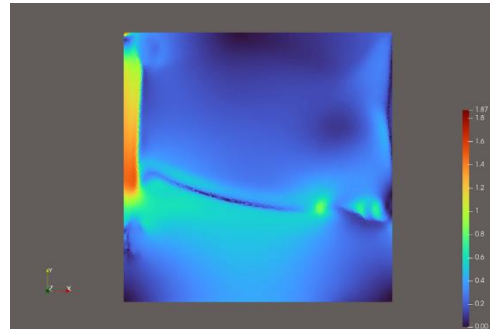


Figura 295 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.2

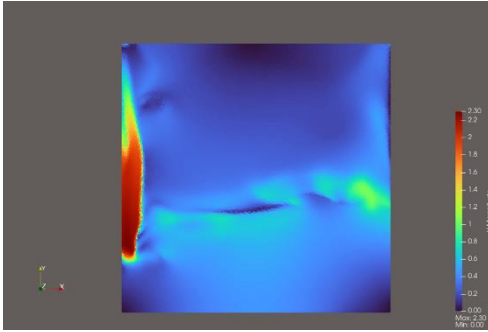


Figura 296 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.3

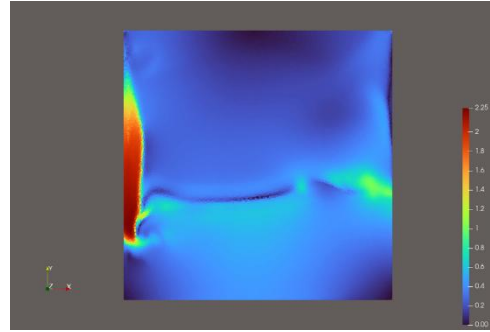


Figura 297 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.3

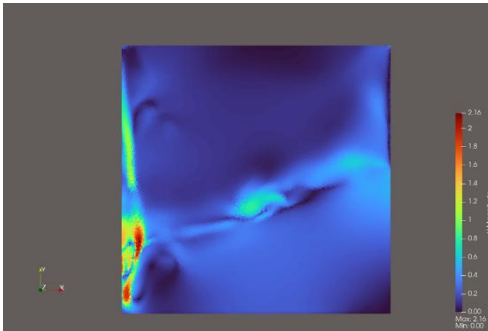


Figura 298 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.4

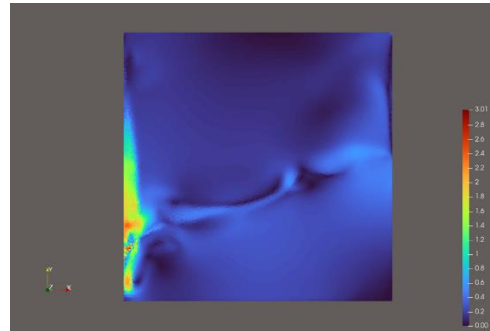


Figura 299 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.4

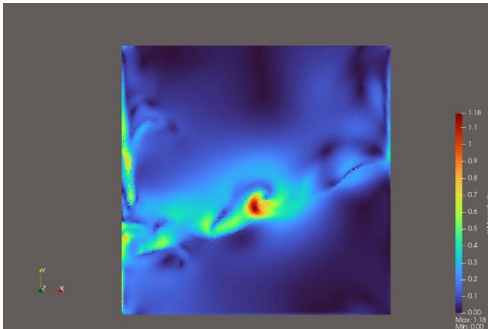


Figura 300 : Perfil de velocidad tercera iteración OpenFOAM segundo 1.5

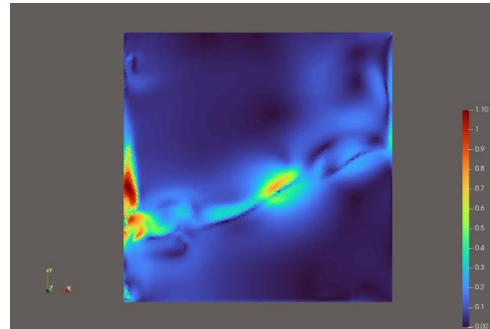


Figura 301 : Perfil de velocidad cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.5

7.13 Resultados ANSYS caso transitorio 3D (Velocidad)

7.13.1 Primera y segunda iteración

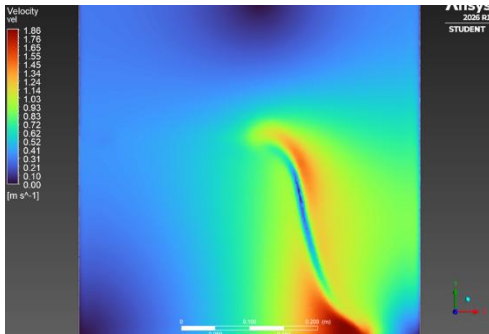


Figura 302 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.1

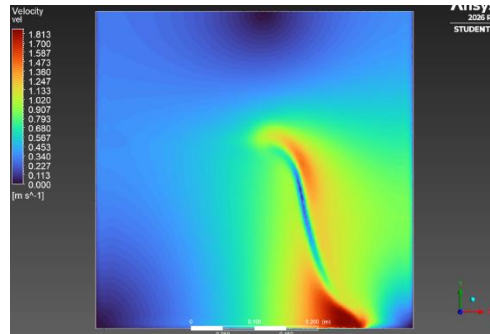


Figura 303 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.1

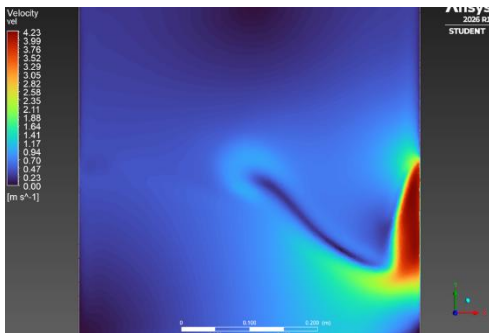


Figura 304 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.2

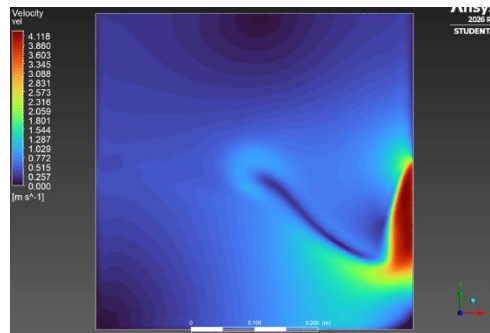


Figura 305 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.2

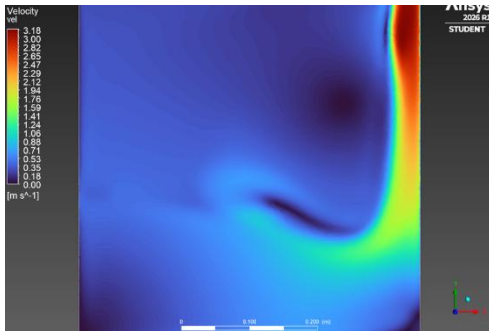


Figura 306 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.3

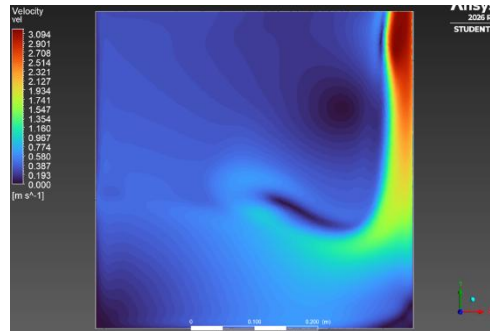


Figura 307 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.3

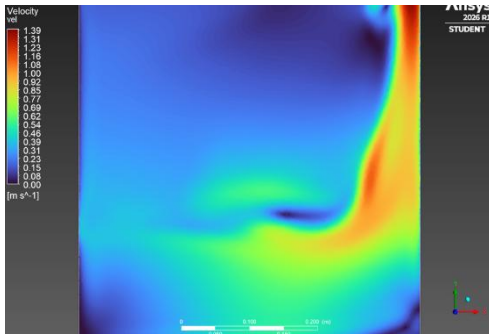


Figura 308 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.4

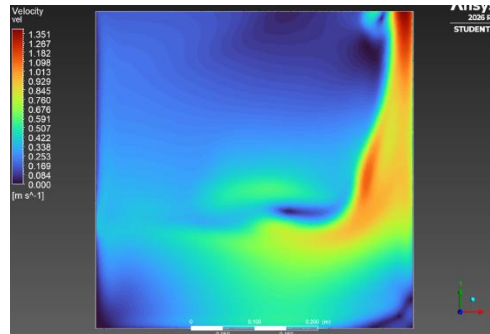


Figura 309 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.4

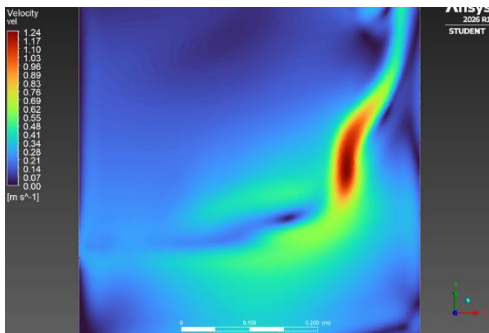


Figura 310 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.5

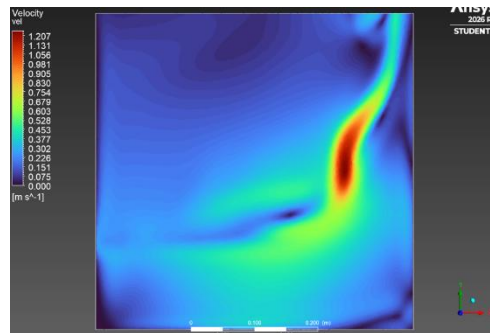


Figura 311 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.5

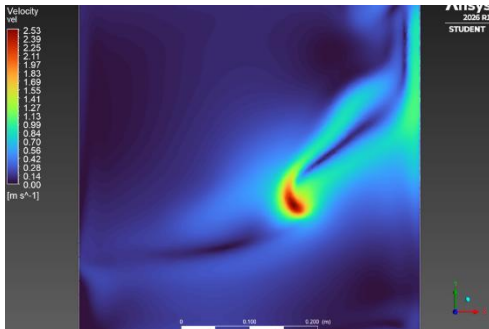


Figura 312 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.6

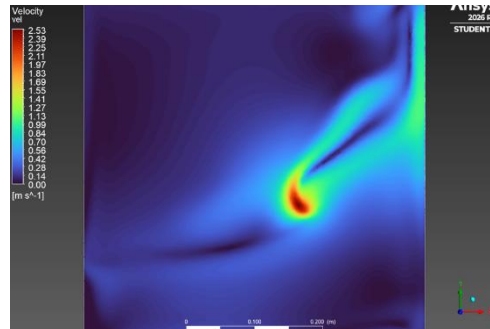


Figura 313 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.6

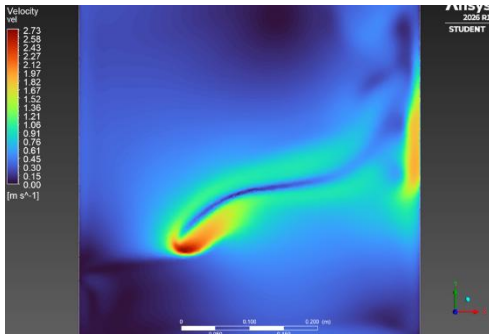


Figura 314 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.7

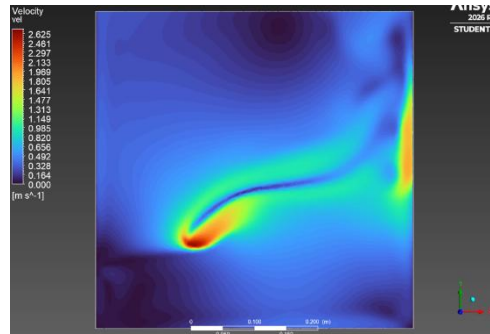


Figura 315 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.7

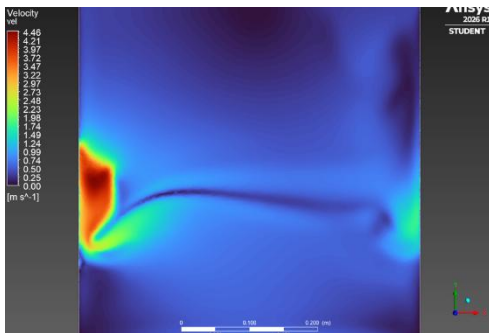


Figura 316 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.8

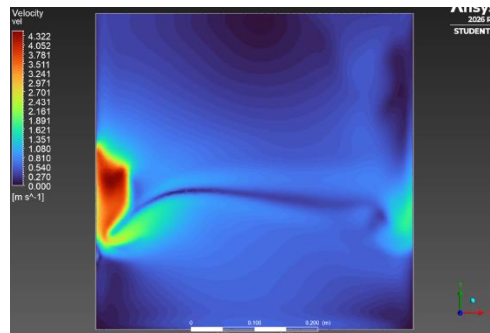


Figura 317 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.8

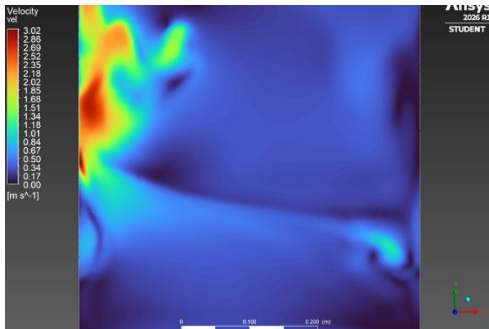


Figura 318 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 0.9

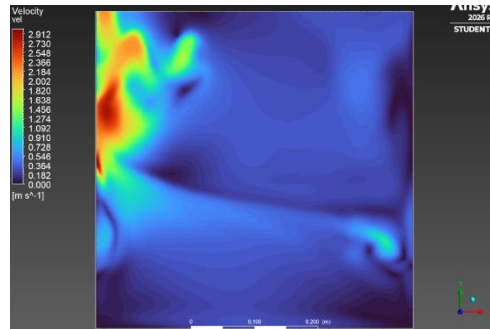


Figura 319 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 0.9

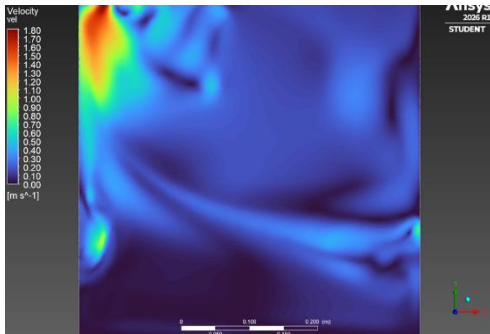


Figura 320 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.0

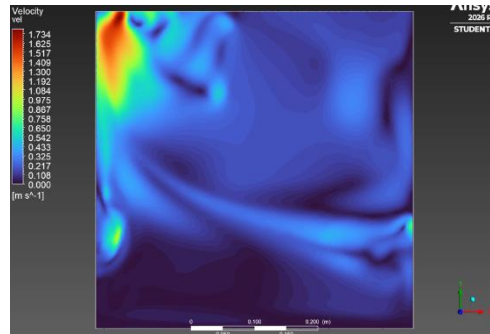


Figura 321 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.0

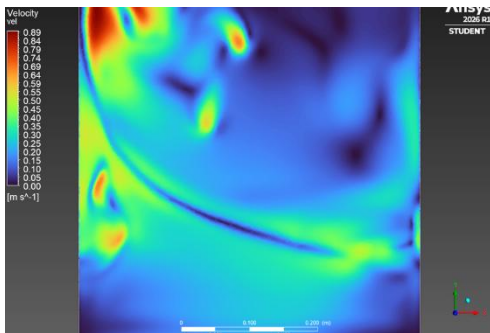


Figura 322 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.1

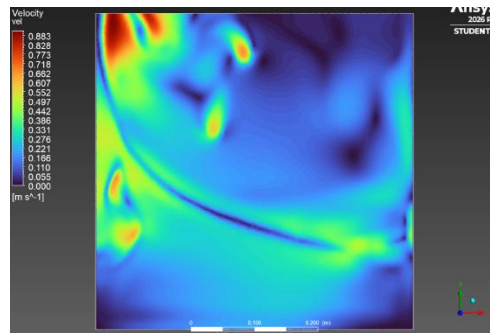


Figura 323 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.1

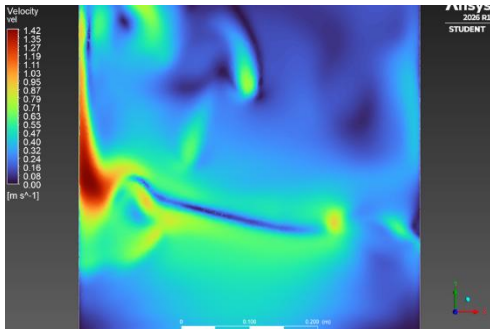


Figura 324 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.2

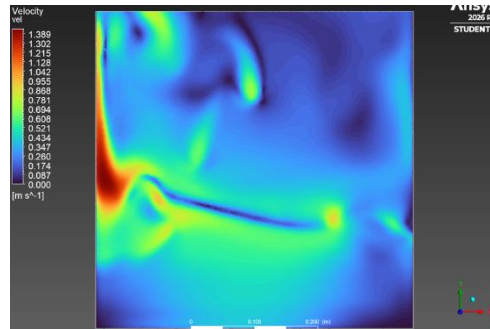


Figura 325 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.2

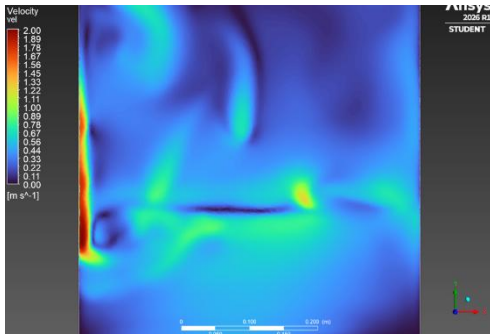


Figura 326 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.3

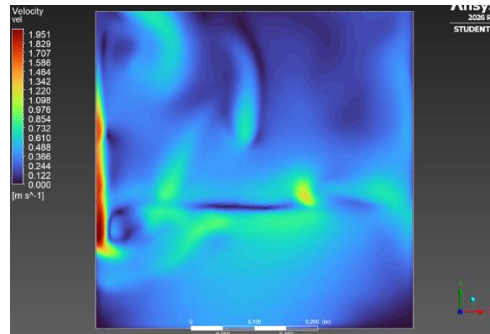


Figura 327 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.3

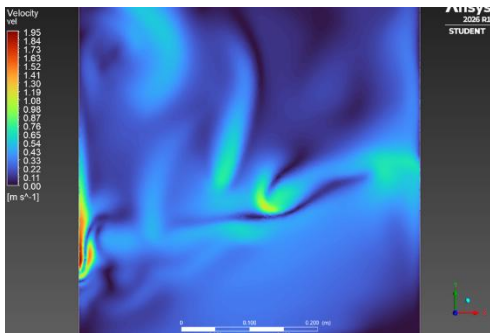


Figura 328 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.4

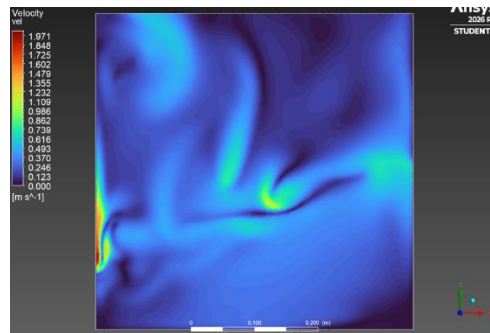


Figura 329 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.4

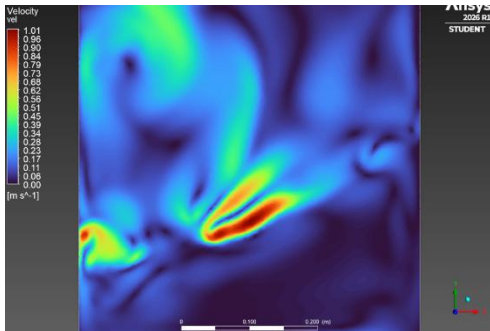


Figura 330 : Perfil de velocidad primera iteración ANSYS segundo 1.5

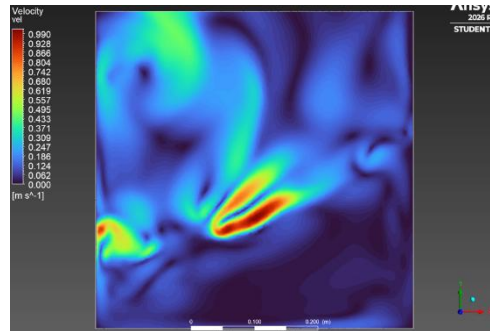


Figura 331 : Perfil de velocidad segunda iteración ANSYS segundo 1.5

7.14 Resultados *OpenFOAM* caso transitorio 3D (Presiones)

7.14.1 Primera y segunda iteración

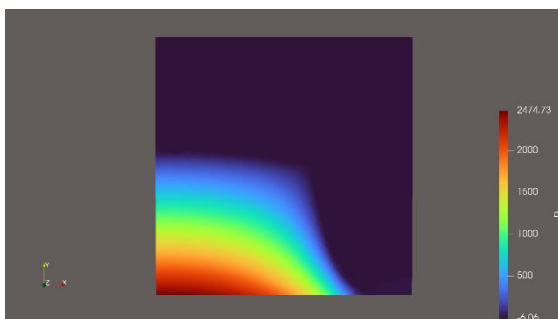


Figura 332 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.1

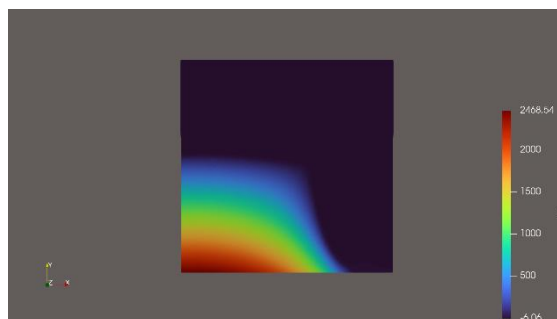


Figura 333 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.1

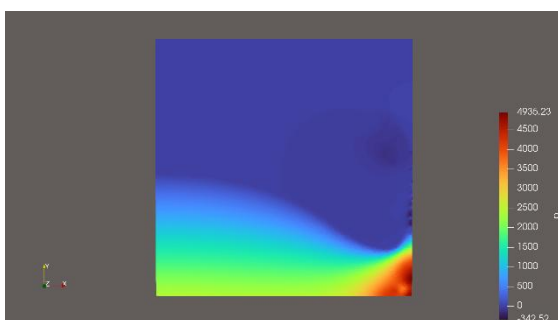


Figura 334 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.2

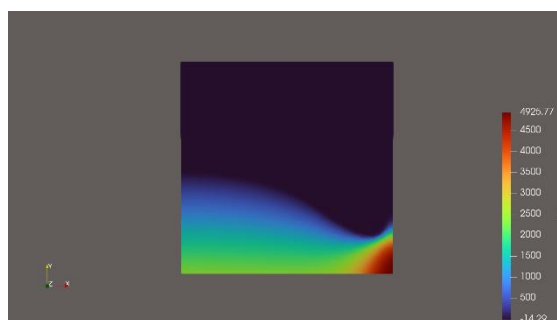


Figura 335 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.2

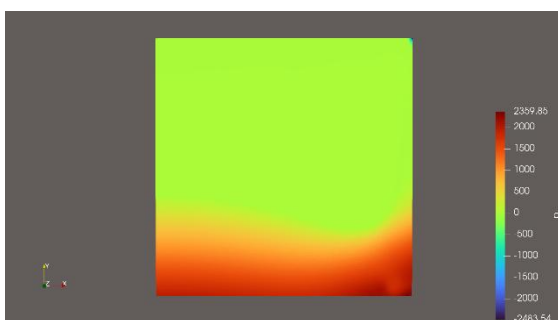


Figura 336 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.3

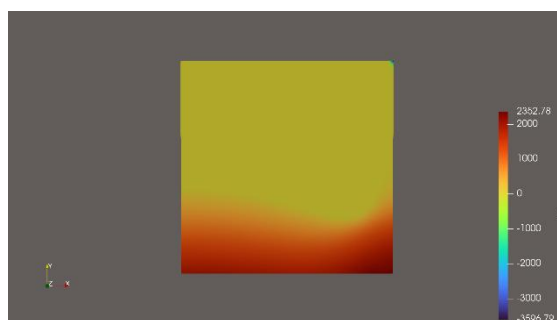


Figura 337 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.3

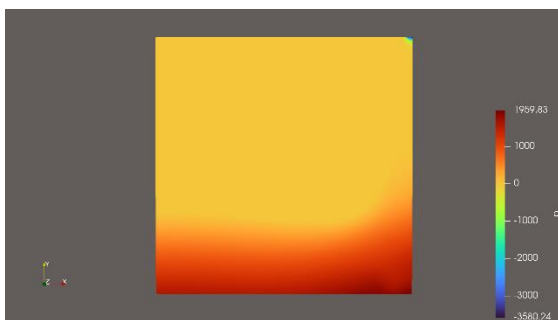


Figura 338 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.4

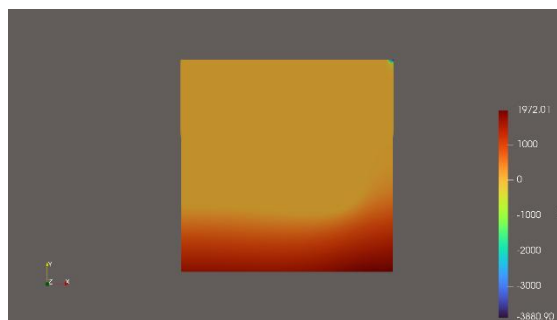


Figura 339 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.4

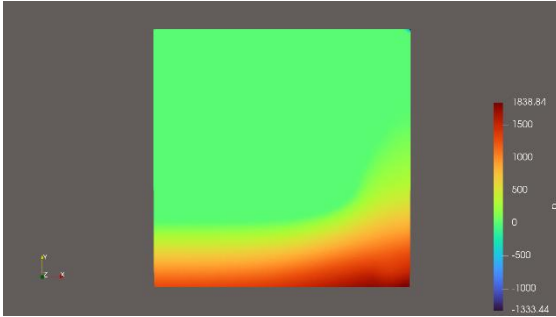


Figura 340 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.5

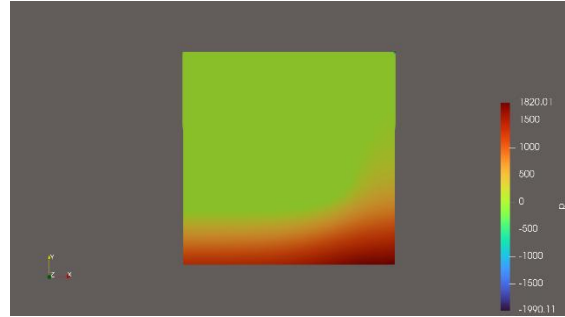


Figura 341 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.5

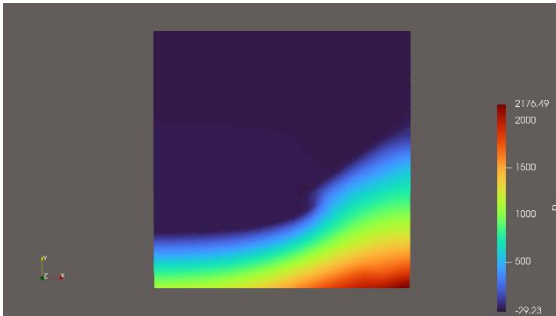


Figura 342 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.6

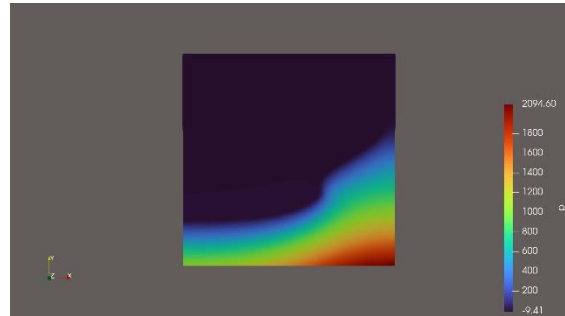


Figura 343 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.6

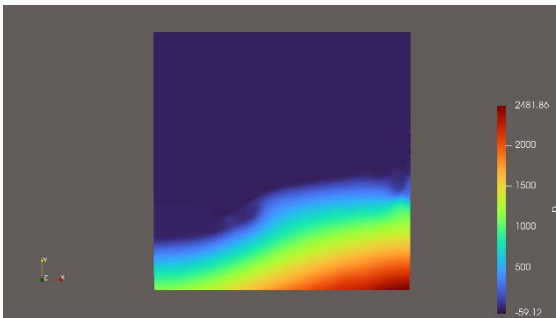


Figura 344 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.7

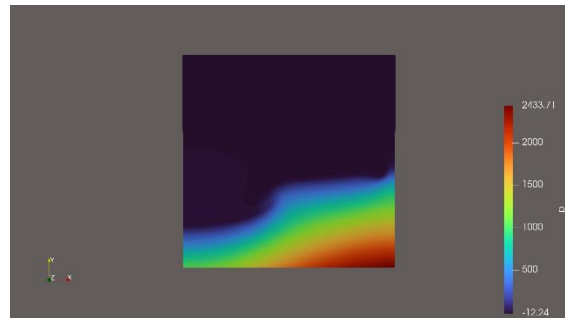


Figura 345 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.7

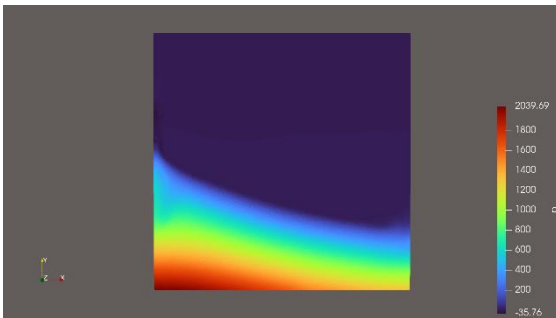


Figura 346 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.8

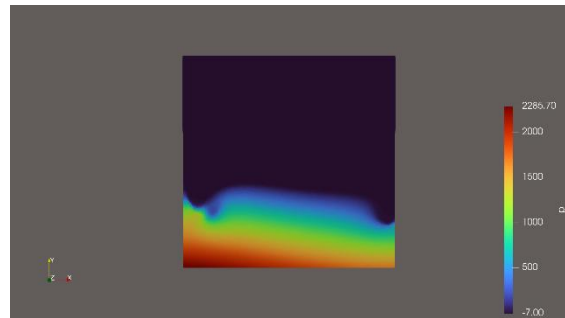


Figura 347 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.8

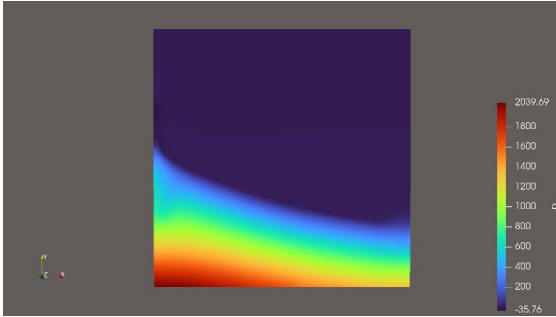


Figura 348 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 0.9

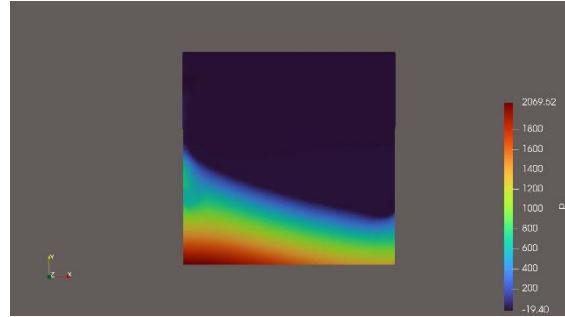


Figura 349 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 0.9

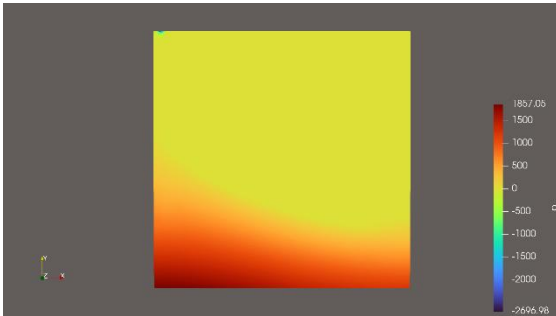


Figura 350 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 1.0

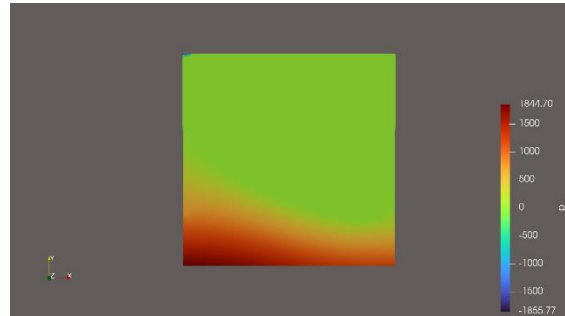


Figura 351 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 1.0

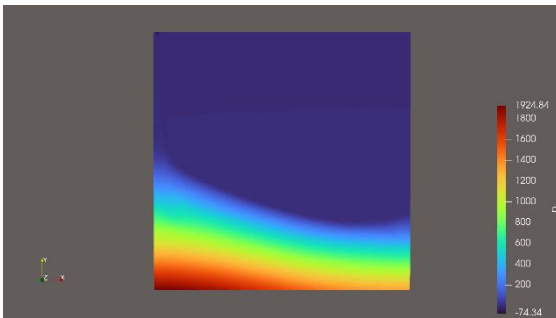


Figura 352 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 1.1

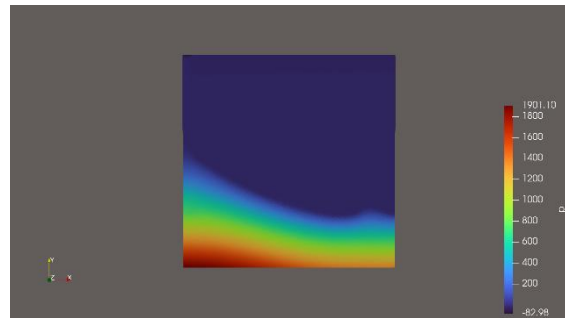


Figura 353 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 1.1

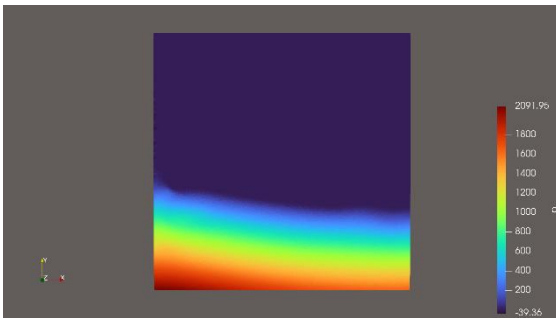


Figura 354 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 1.2

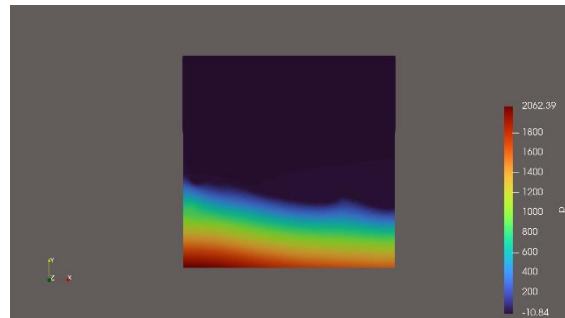


Figura 355 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 1.2

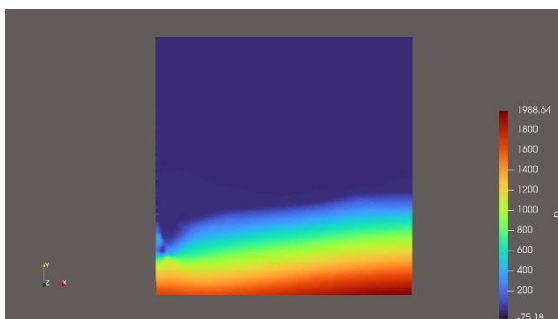


Figura 356 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 1.3

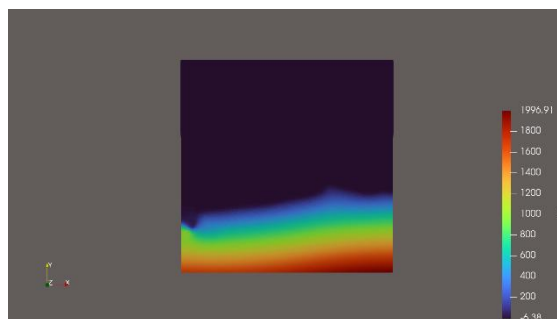


Figura 357 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 1.3

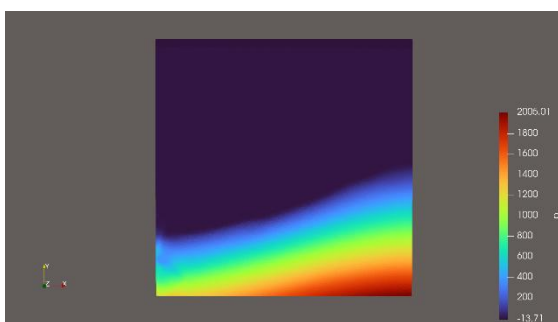


Figura 358 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 1.4

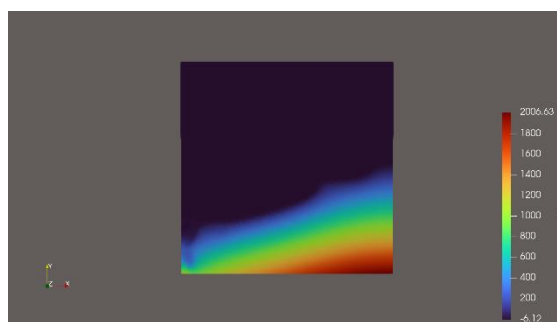


Figura 359 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 1.4

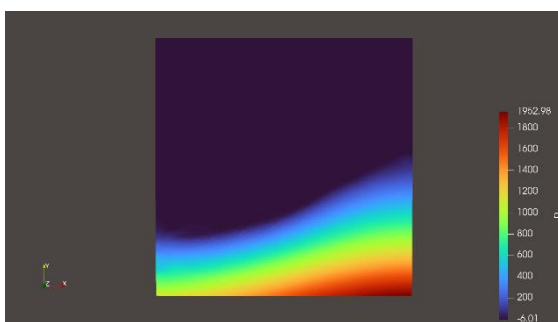


Figura 360 : Contorno de presiones primera iteración OpenFOAM segundo 1.5

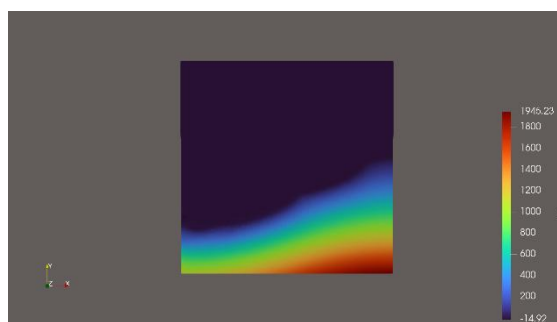


Figura 361 : Contorno de presiones segunda iteración OpenFOAM segundo 1.5

7.14.2 Tercera y cuarta iteración

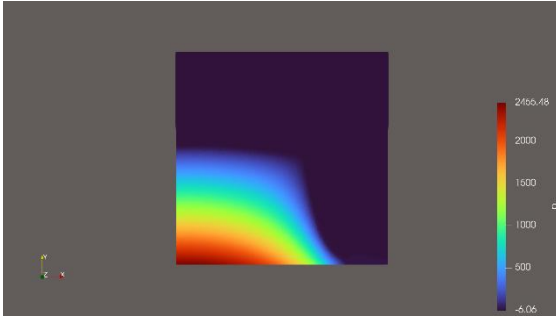


Figura 362 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.1

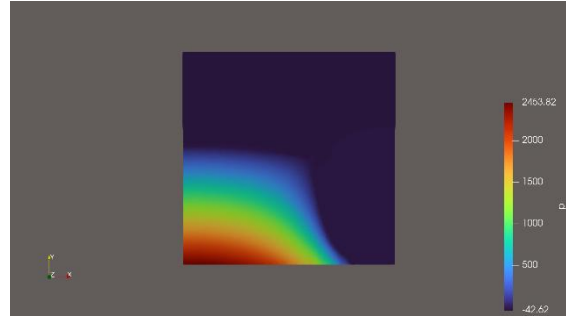


Figura 363 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.1

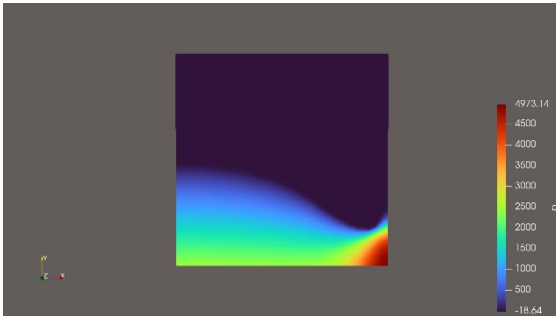


Figura 364 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.2

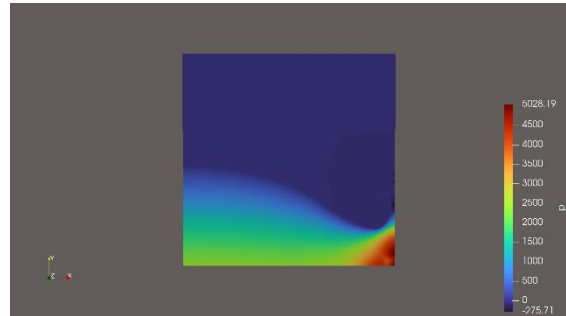


Figura 365 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.2

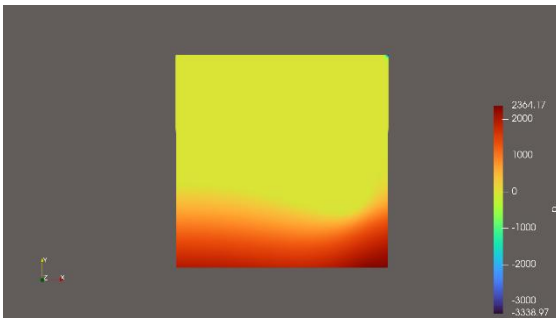


Figura 366 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.3

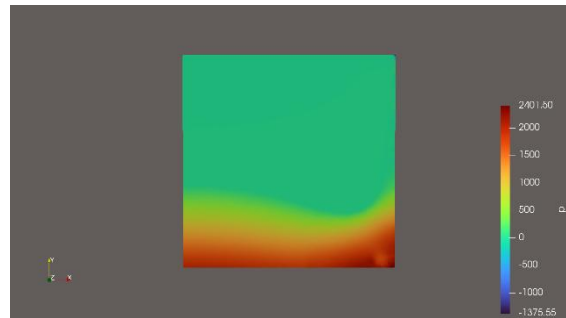


Figura 367 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.3

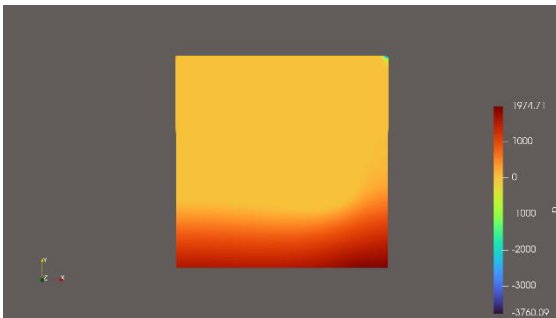


Figura 368 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.4

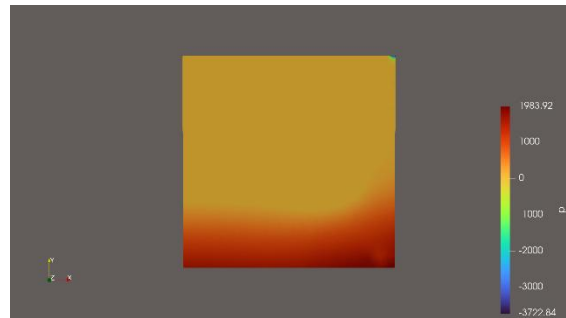


Figura 369 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.4

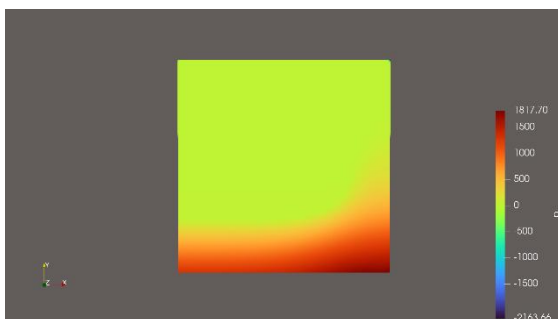


Figura 370 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.5

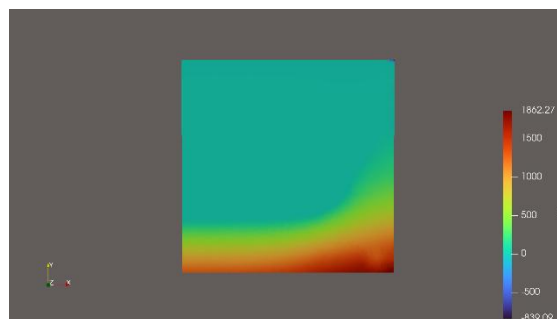


Figura 371 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.5

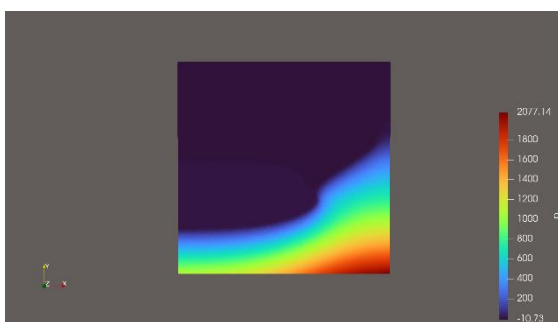


Figura 372 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.6

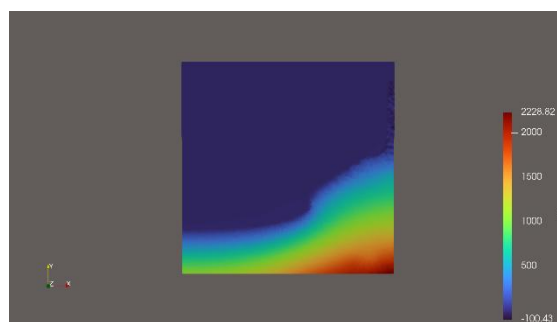


Figura 373 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.6

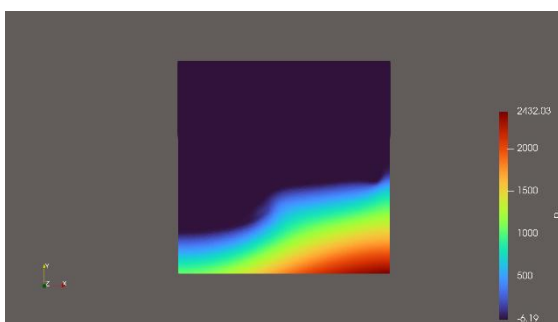


Figura 374 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.7

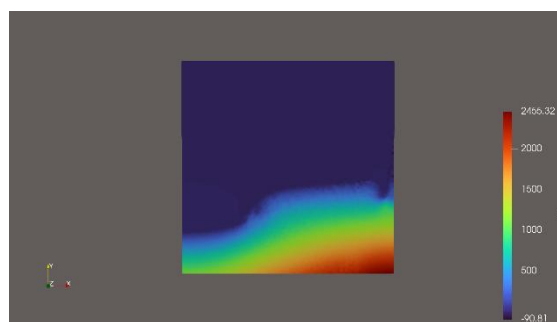


Figura 375 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.7

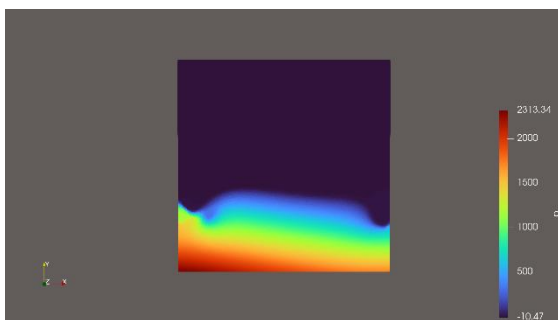


Figura 376 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.8

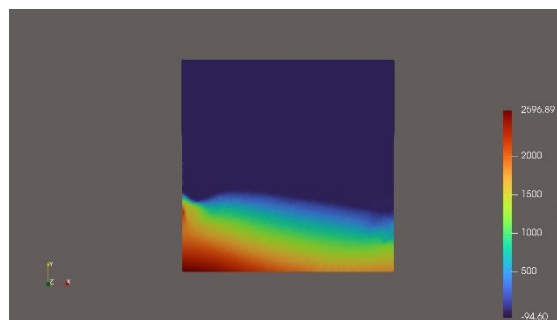


Figura 377 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.8

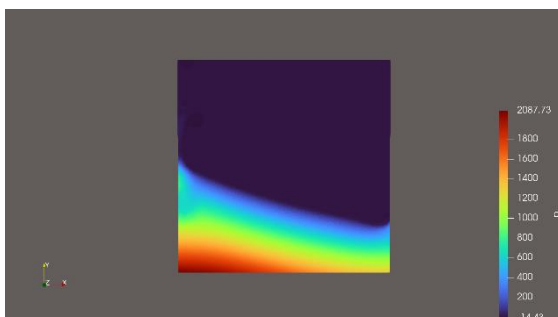


Figura 378 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 0.9

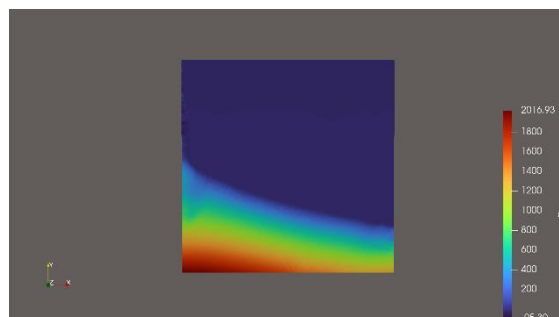


Figura 379 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 0.9

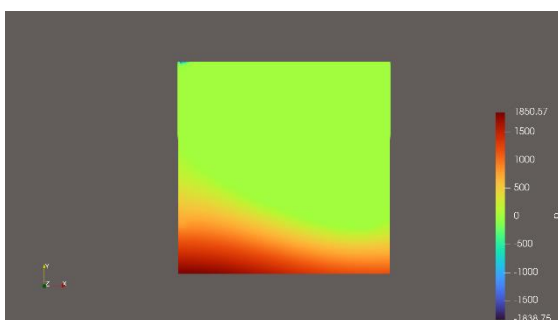


Figura 380 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 1.0

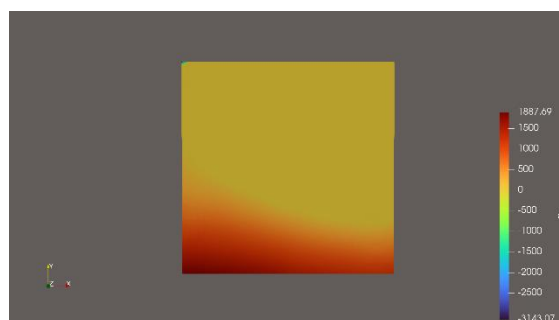


Figura 381 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.0

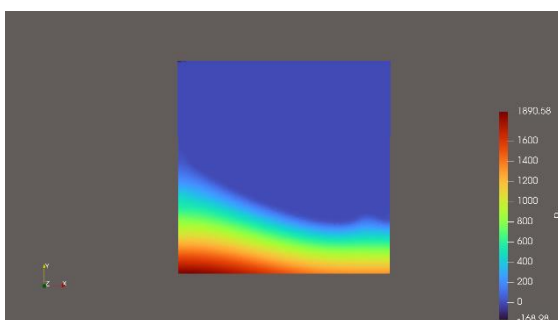


Figura 382 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 1.1

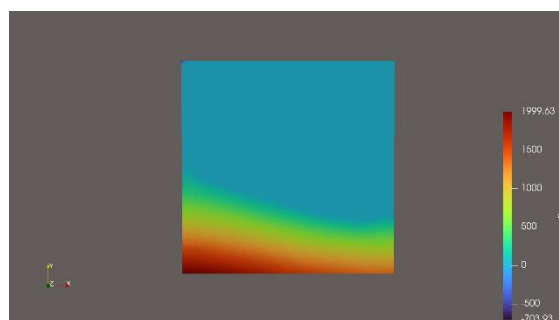


Figura 383 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.1

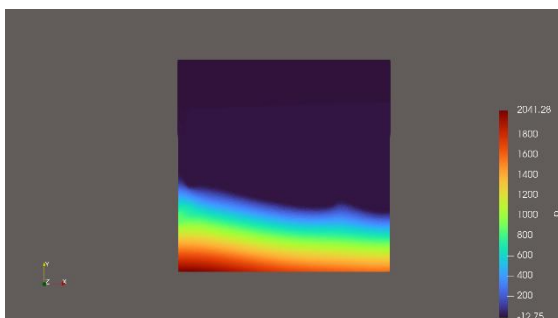


Figura 384 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 1.2

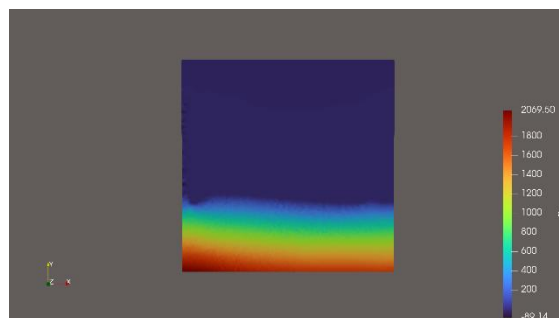


Figura 385 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.2

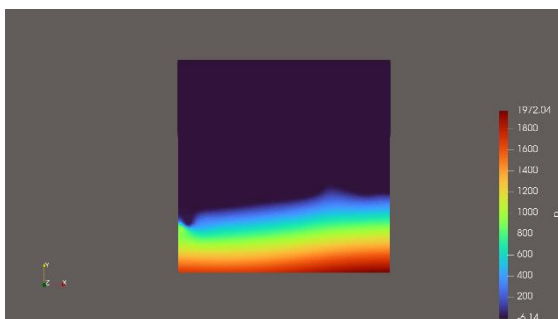


Figura 386 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 1.3

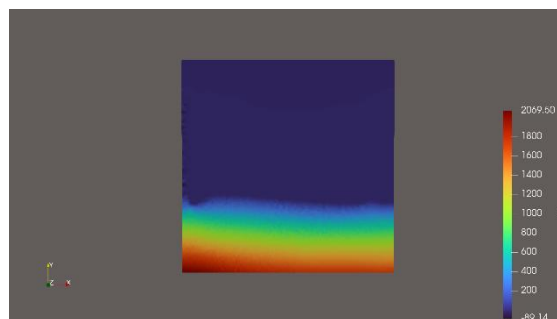


Figura 387 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.3

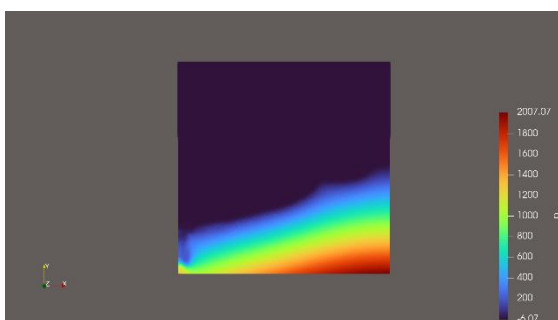


Figura 388 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 1.4

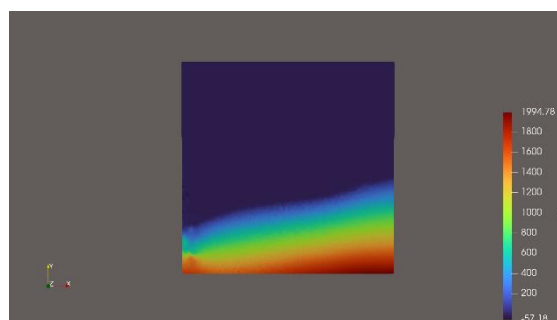


Figura 389 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.4

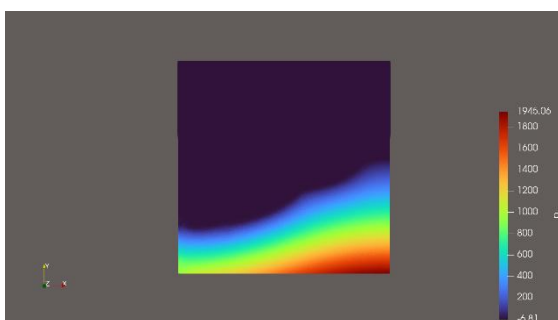


Figura 390 : Contorno de presiones tercera iteración OpenFOAM segundo 1.5

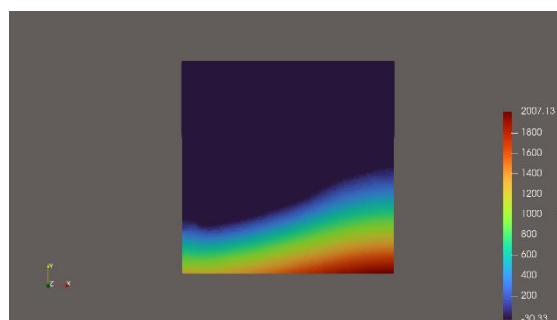


Figura 391 : Contorno de presiones cuarta iteración OpenFOAM segundo 1.5

7.15 Resultados ANSYS caso transitorio 3D (Presión)

7.15.1 Primera y segunda iteración

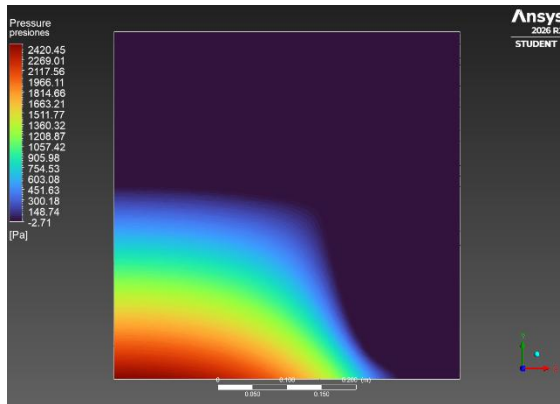


Figura 392 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.1

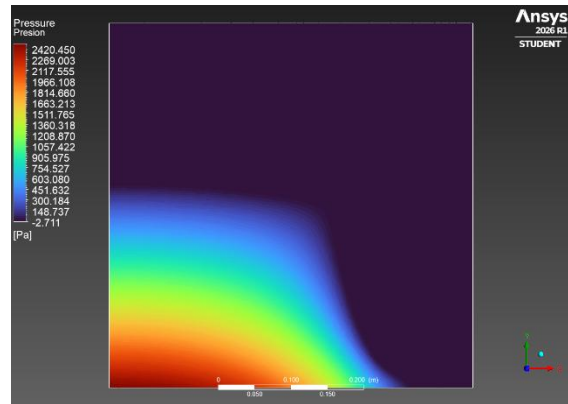


Figura 393 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.1

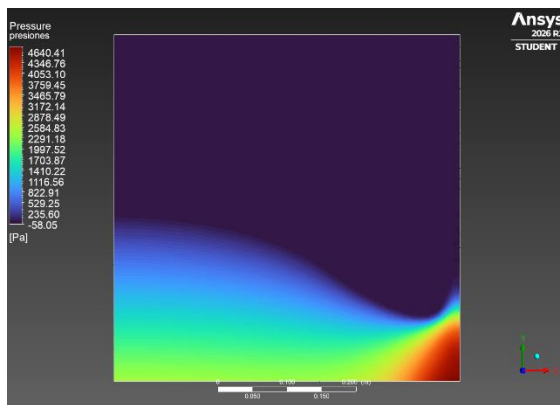


Figura 394 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.2

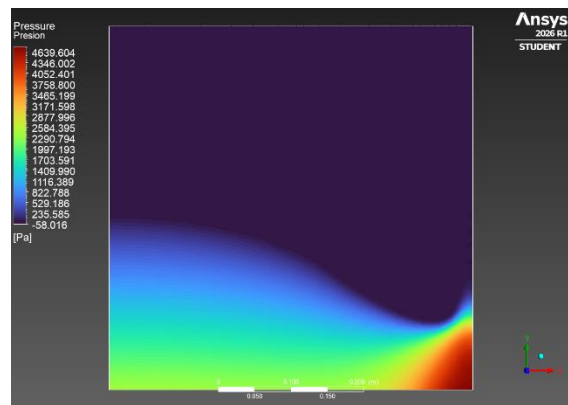


Figura 395 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.2

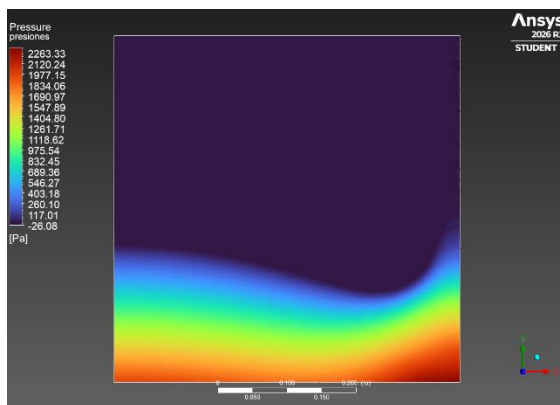


Figura 396 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.3

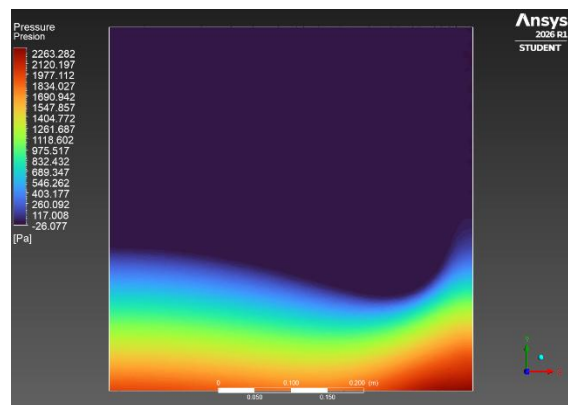


Figura 397 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.3

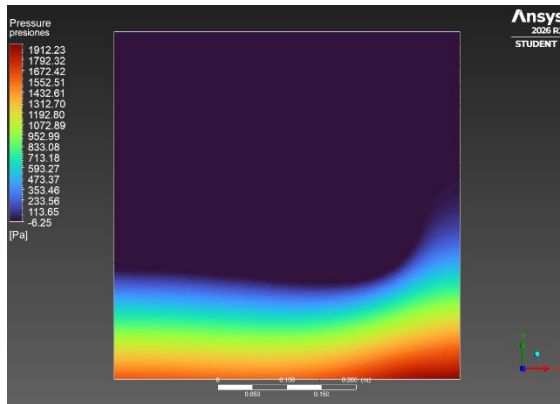


Figura 398 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.4

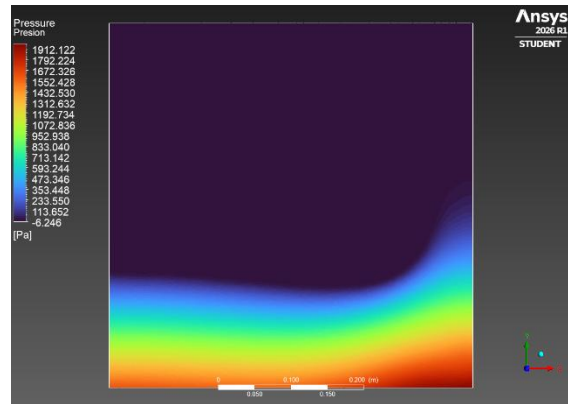


Figura 399 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.4

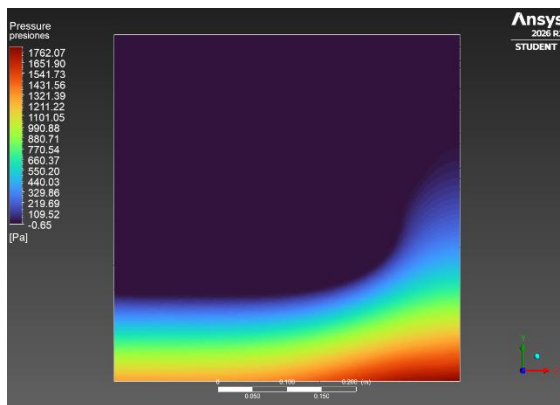


Figura 400 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.5

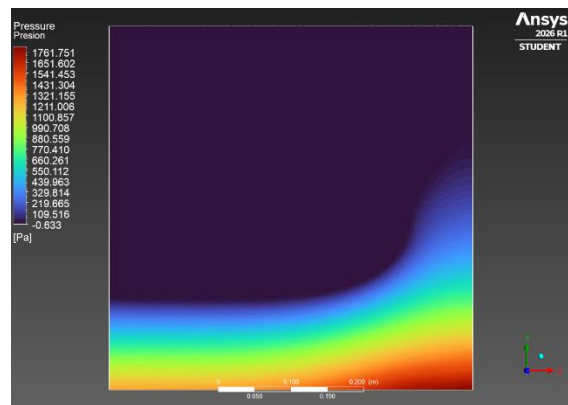


Figura 401 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.5

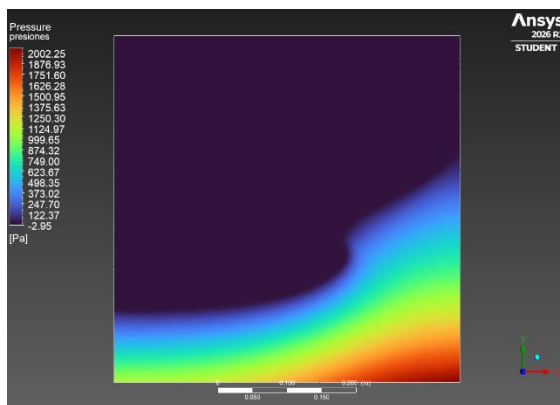


Figura 402 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.6

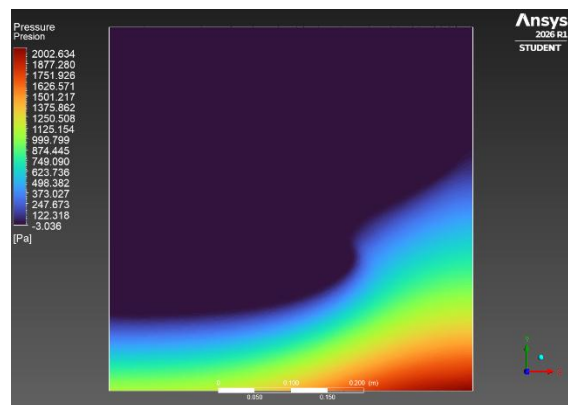


Figura 403 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.6

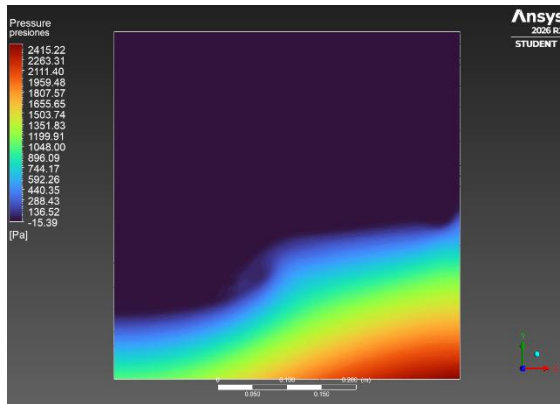


Figura 404 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.7

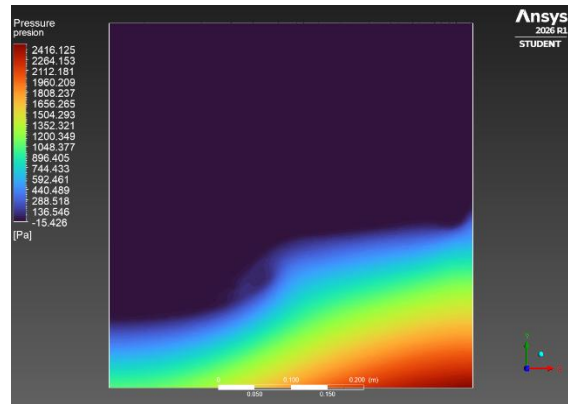


Figura 405 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.7

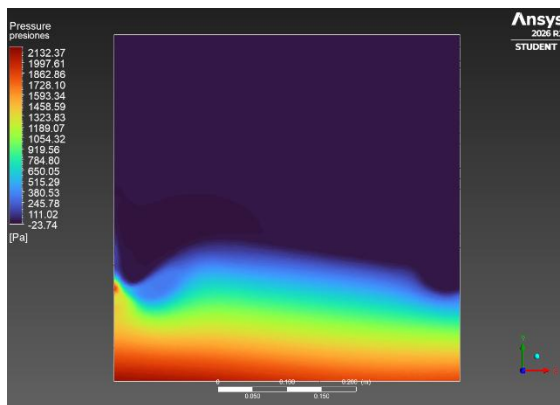


Figura 406 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.8

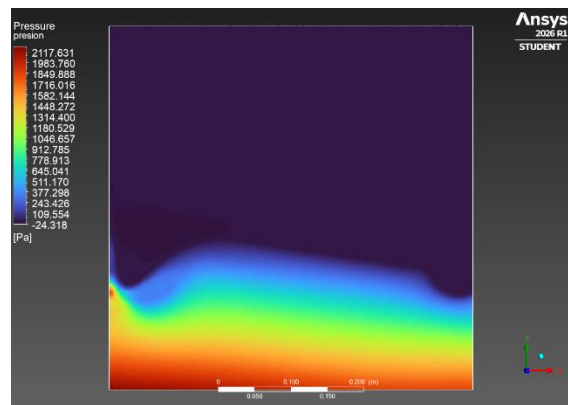


Figura 407 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.8

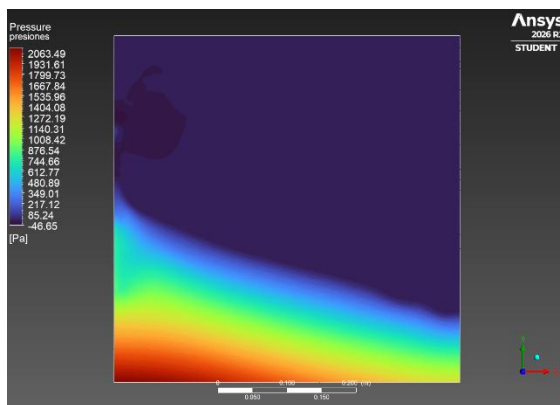


Figura 408 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 0.9

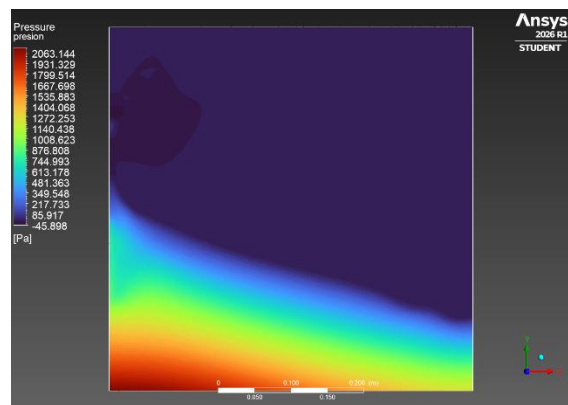


Figura 409 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 0.9

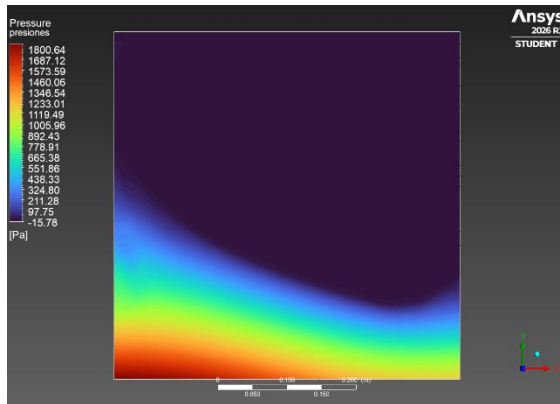


Figura 410 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.0

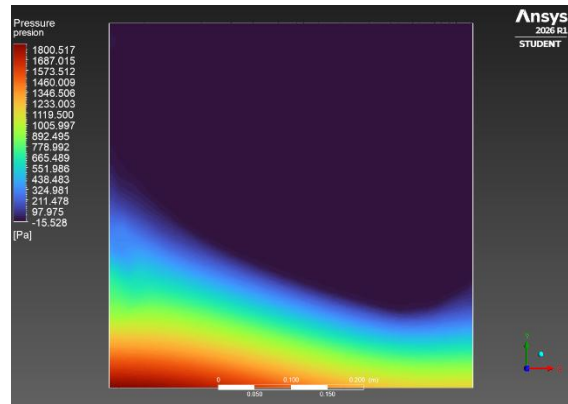


Figura 411 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.0

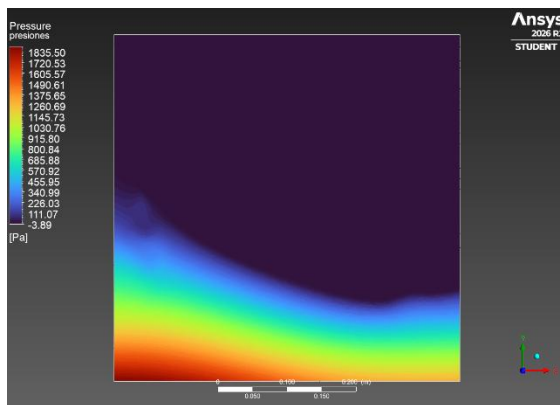


Figura 412 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.1

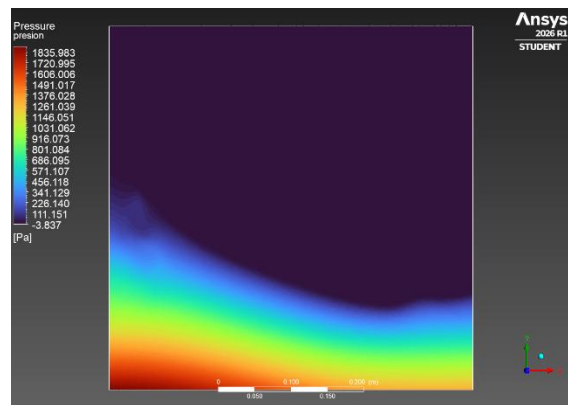


Figura 413 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.1

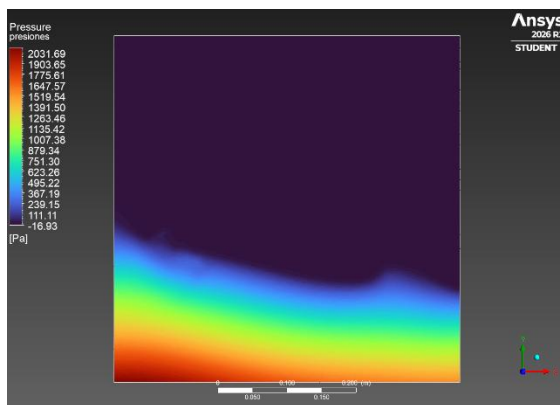


Figura 414 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.2

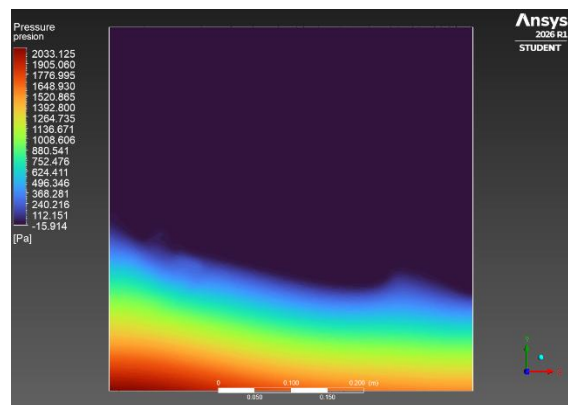


Figura 415 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.2

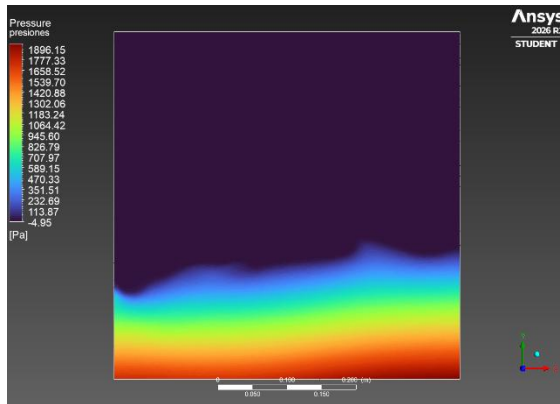


Figura 416 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.3

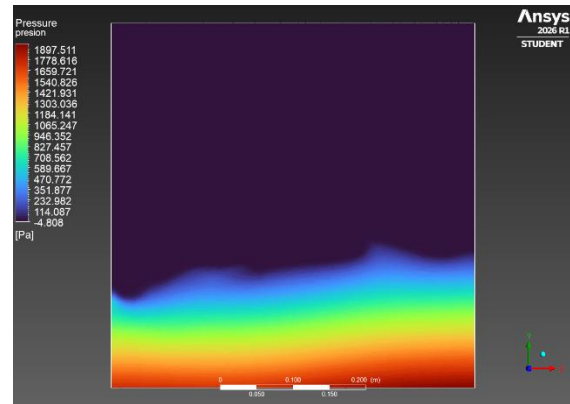


Figura 417 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.3

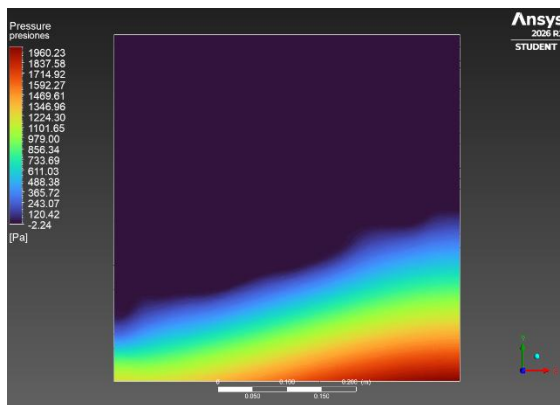


Figura 418 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.4

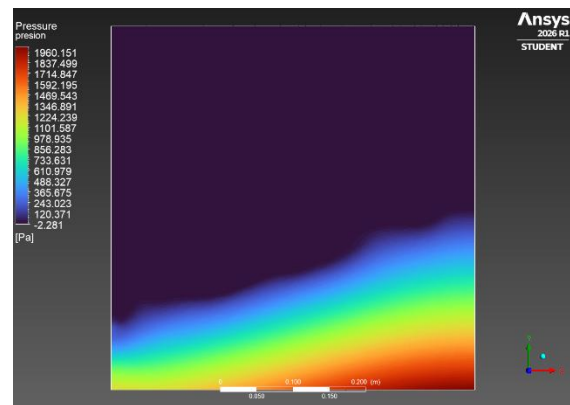


Figura 419 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.4

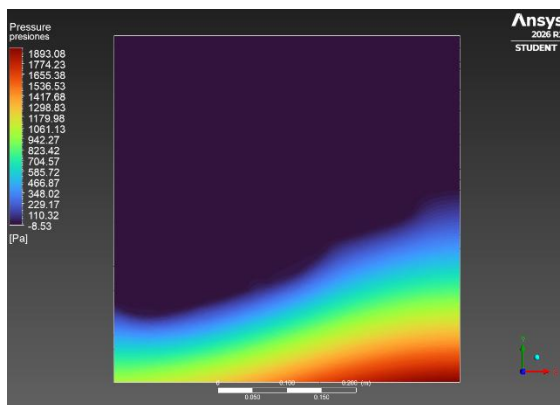


Figura 420 : Contorno de presiones primera iteración ANSYS segundo 1.5

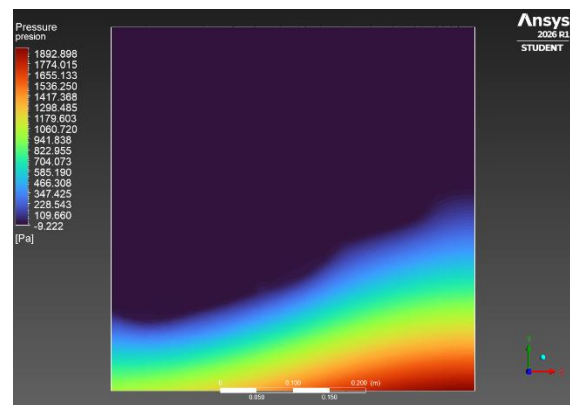


Figura 421 : Contorno de presiones segunda iteración ANSYS segundo 1.5