



U.T.N.
FRLR

PROYECTO

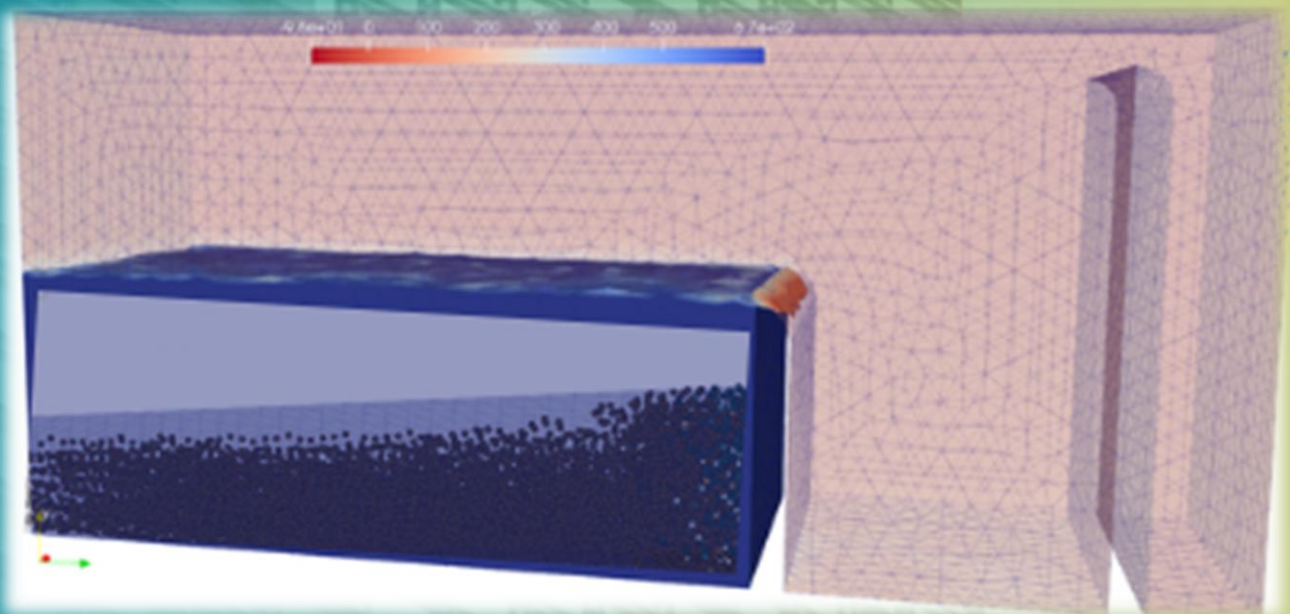
FINAL

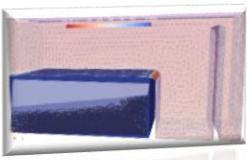
Aplicación de Softwares de Diseño y Cálculo

**Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)
OPENFOAM**

Proyecto: MODELACION EN CAMARA ROMPECARGA

ALUMNA: MONTIVERO BAZAN, MARIA SOLEDAD





TRABAJO FINAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE GRADO DE INGENIERÍA CIVIL

Título:

Aplicación de Softwares de Diseño y Cálculo

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

OPENFOAM

MODELACIÓN EN CÁMARA ROMPECARGA

Alumna: MONTIVERO BAZAN, MARIA SOLEDAD

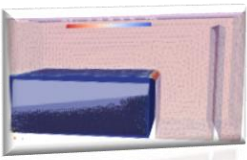
Carrera: INGENIERÍA CIVIL

Docentes Evaluadores:

- **Director de Cátedra - Ing. Barbeito, Javier**
- **Profesor Adjunto – Ing. Andrade, Carlos**
- **Profesor Ad honorem – Ing. Whitaker, Hèctor**
- **Profesor Ad honorem – Ing. Reinoso, Matias**

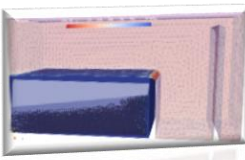
Año: 2024





***Proyecto Final: Aplicación de Software de Cálculo y Diseño en Cámara Rompecarga
CFD - OPEN FOAM***

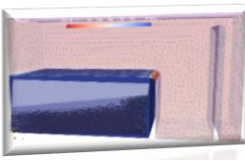




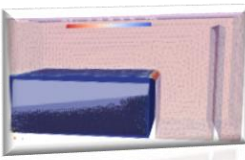
TOMO I

INDICE

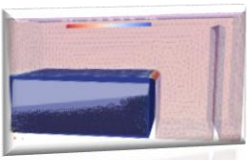
PROLOGO	7
AGRADECIMIENTOS	8
DEDICATORIAS	10
RESUMEN	11
CAPITULO 1.....	13
INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.....	13
Definición del problema:	13
Geolocalización e Historia	15
Clima	16
Temperatura	17
Precipitaciones	17
Localización y fuentes de abastecimiento de Agua de la Ciudad de la Rioja	19
Captación del subálveo	19
Perforaciones de Los Nacimientos.....	20
Medición de nivel freático	21
Drenes de captación.....	21
Galería Filtrante	24
Perforaciones de El Bosquecillo	24
Abastecimientos subterráneos (perforaciones profundas).....	25
Acueducto Sanagasta – sistema de potabilización-.....	26
Planta Potabilizadora “Los Filtros”	27
Cloración y dosis en planta y en perforaciones.....	27
Calidad de Agua Superficial	28
Fuente Subterránea	30
Perforaciones fuera de servicio:	30
Sistemas de Acueductos Integrados	31
Descripción del sistema	31
Localización de la cámara en estudio:.....	33



FUNDAMENTOS Y JUSTIFICACIÓN	39
Objetivos generales:	40
Objetivos específicos.....	40
Actividades a realizar.....	40
CAPITULO 2	42
SELECCIÓN DEL METODO DE TRABAJO	42
Caracterización del fluido	42
¿Qué es el CFD?.....	43
¿cómo funciona el CFD?.....	44
Ecuaciones en las que se basa el CFD.....	44
Ecuación de Navier-Stokes para un fluido Newtoniano	47
Modelos turbulentos Navier-Stokes-Reynolds	50
Estudio y Selección del Software CFD:.....	52
OPENFOAM:	52
AUTODESK CFD.....	53
SIMSCALE.....	54
PALABOS.....	54
Elección del programa CFD.....	55
Detalles del programa elegido	55
Selección del mallador.....	62
Calidad de la malla.....	63
Condición de borde al momento de simular superficies libres bifásicas	64
Especificación de malla y restricciones de validez	64
Métodos de generación de malla	68
Malladores, análisis y selección.....	68
BlockMesh	68
GMSH	72
SNAPPYHEXMESH.....	72
Generación de malla hexagonal rápida	73
Ajuste de características.....	75
Materiales y Equipos.....	75



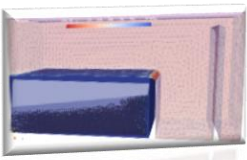
CAPITULO 3	78
COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS	78
Simulaciones para modelar el comportamiento de las partículas dentro de la cámara	78
Resultados	80
CAPITULO 4	87
COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO	87
Simulaciones para calcular el tiempo de desborde.....	88
Resultados	89
Estimación y comparación de los resultados de los tiempos con las diferentes alturas de la pantalla.....	93
Desarenador, cálculo de la velocidad el flujo en la cámara	93
Cálculo de la Longitud en la cámara	94
Conclusiones	97
CAPITULO 5	100
Propuesta 1. Cálculo de la pantalla de hormigón armado	100
Método Mononobe-Okabe.....	100
Opción propuesta 1: Cálculo de pantalla de hormigón	101
Cálculo de losas cruzadas por el método de Kalmanok	105
Losas Rectangulares.....	105
Estructura resultante.....	107
Conclusión el diseño de la pantalla de hormigón armado	108
Propuesta 2: Cálculo de la pantalla de estructura metálica	109
Cálculo de la estructura metálica con el programa CYPE 3D	110
Conclusiones sobre el diseño de la pantalla metálica.....	115
Comparación de ambas propuestas, ventajas y desventajas	116
Recomendaciones	117
CONCLUSIONES	120
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	122



TOMO II

ANEXO I	126
SIMULACION COMPUTACIONAL INTERFOAM	127
MODELACION EN OPENFOAM8 – TERMINAL BLUE CFD	127
ANEXO II	160
SIMULACION DPMFOAM - Goldschmidt	160
MODELACION EN OPENFOAM8 – TERMINAL BLUE CFD	160
ANEXO III	182
ESTRUCTURA METALICA:	182
RESULTADOS DE CALCULO CYPE 3D	182
ANEXO IV	285
COMPUTO Y PRESUPUESTO:	285
ANALISIS DE PRECIOS ESTRUCTURA DE HORMIGON ARMADO:	286
COMPUTO Y PRESUPUESTO ESTRUCTURA HºAº	291
PLAN DE TRABAJO ESTRUCTURA HºAº	292
ANALISIS DE PRECIOS ESTRUCTURA METALICA:	293
COMPUTO Y PRESUPUESTO ESTRUCTURA METALICA	298
PLAN DE TRABAJO ESTRUCTURA METALICA	299
ANEXO V	300
PLANOS:	300
PLANO Nº1 CAMARA ROMPECARGA ESTRUCTURA EXISTENTE	301
PLANO Nº2 RECOMENDACIONES OBRAS COMPLEMENTARIAS	302
PLANO Nº3 RECOMENDACIONES OBRAS COMPLEMENTARIAS HºAº	303
PLANO Nº4 PANTALLA - ESTRUCTURA HORMIGON ARMADO	304
PLANO Nº5 PANTALLA - ESTRUCTURA METALICA	305





PROLOGO

Realizar este proyecto final fue una de las experiencias más arduas y tenaces que tuve que enfrentar. Muchos han sido los obstáculos personales y académicos como el desconocimiento de la modelación hidráulica computacional, aun así, mi objetivo fue mi faro para llegar a la meta más importante, decidiendo asumir el reto y aprender a superar cada caída. Pero así también han sido muchas las oportunidades y ayuda que he recibido de allegados e Ingenieros que con gran predisposición pudieron guiarme. Sé que este trabajo final existe gracias a todo este apoyo, gracias a aquellos que me devolvieron una y otra vez la confianza en mí propias fuerzas y voluntad de superación.

Comparto con ustedes esta alegría de haber llegado a mi meta, un gran paso en mi vida y mi auto realización.

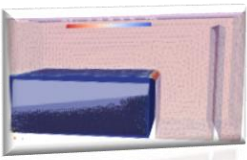
“Perseguir este sueño... fue mi desafío

Llegar..... No solo fue transformación

Sino... El mejor Aprendizaje de mi vida

TODO ESFUERZO TIENE SU RECOMPENSA”





AGRADECIMIENTOS

Adjudicándome el privilegio de haber podido concluir esta etapa, quiero dedicar este Proyecto Final a:

En primer lugar, a DIOS por darme vida y salud, La Virgen Morenita, San Expedito y mis Santitos protectores; que fueron quienes con su intervención divina me protegieron y guiaron en cada petición de exámenes y presentaciones, acompañándome y sintiendo su presencia divina en todo momento.

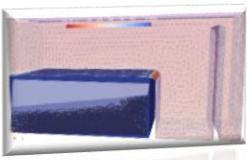
En segundo lugar, a mi familia, el motor de mi vida y mi motivo para superarme día a día, mis amados hijos Luciana y Francisco; y mi compañero de vida Iván quienes soportaron mis falencias en épocas de exámenes, y en un lugar muy especialmente a mi Madre que siempre confió en mis capacidades y me alentó a no bajar los brazos, acompañándome con su amor incondicional y paciencia en noches interminables, en mesas de exámenes, su preocupación y deseo por verme triunfar me dio la fortaleza día a día y año tras año, en este maravilloso camino por la universidad, mamá sos en todo momento mi ejemplo a seguir!!.

A mis hermanos, mis manos derechas Javier, Noelia quienes supieron acompañarme y ayudarme en la crianza de mis pequeños, cuando mis manos y tiempos no alcanzaban, sus manos y voluntad me permitieron seguir enfocándome en mis estudios. A mi hermano mayor Matías que sin palabras, pero con su abrazo y compañía me demuestra su admiración, orgullo y fortaleza para seguir.

Sus presencias fueron el gran motor que me empujaban en aquellos momentos en donde la frustración y el agotamiento me superaban, como así también fueron los primeros en compartir la felicidad de aprobar un examen y avanzar con una menos.

¡Gracias a cada uno de Ustedes por ser los principales promotores de este sueño, todos son muy importante en cada rol, **ESTE TRIUNFO LO LOGRAMOS JUNTOS!!**

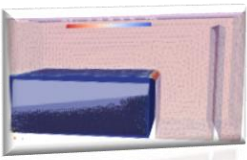




A mis compañeros y verdaderos amigos que me regalo esta universidad, esos que elegí para compartir los momentos buenos y no tan buenos. Esas compañías que siempre estuvieron presentes de manera incondicional para ayudarme, aconsejarme, escuchar los problemas que me aquejaban, o solo compartir una juntada, una comida o algún mate.

No me quiero olvidar de aquellas personas que ya no están en esta vida terrenal pero que creo firmemente que me acompañan desde algún lugar del espacio. A usted Mi mentor Ing. Ávila Héctor quien confió en mí y me guio a comenzar esta carrera, a vos Papá, Papi, que seguramente estarán tan felices como yo de este logro y ver a su María Soledad Recibida.





DEDICATORIAS

Quiero agradecer a los docentes de proyecto final ingenieros, Whitaker Federico por sus palabras de aliento, motivación constante, su consejo del “YO PUEDO” quedo grabada en mí para siempre, a los Ingenieros Barbeito Javier, Andrade Ariel y Reinoso Matías por su dedicación y compromiso.

A mi tutor de Proyecto Final Ing. Dematte Rodolfo por su paciencia, su predisposición para ayudarme, su compromiso, por compartir sus experiencias con CFD – OPEN FOAM buscando que este proyecto sea exitoso y logre poner de manifiesto mi capacidad académica.

Al Decano de nuestra querida casa de altos estudios Ing. Nieto José.

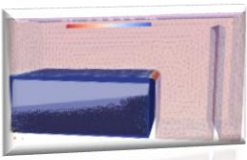
Al director del Departamento de Ingeniería Civil Ing. Juan Brizuela por su predisposición a cada consulta y motivación para mi persona.

A todos los Docentes de las 45 cátedras, que me han formado a lo largo de todos estos años.

Al Personal No Docente a quienes aprecio mucho, y quienes me demostraban su apoyo y alegría con cada avance.

A todos y cada uno de Ustedes... ***¡Muchísimas Gracias!***



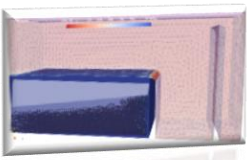


RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en abordar un problema específico en una cámara rompe carga donde se presenta un fluido con arrastre de partículas de áridos que, al ser transportadas aguas abajo, provocan daños en las válvulas reductoras de presión como deterioro, fallas o roturas. Para abordar esta problemática, se emplea el modelado del fluido dinámico computacional (CFD) que involucra las ecuaciones de la mecánica de fluidos y el modelado de la turbulencia.

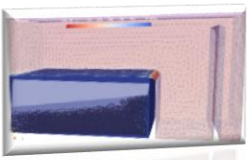
Además, se desarrollan conceptos teóricos relacionados con la validación, verificación y análisis de incertezas en las simulaciones de mecánica de fluidos computacional. El objetivo es garantizar que los resultados obtenidos sean lo más cercanos posible a la realidad, lo que implica un riguroso proceso de comparación con datos experimentales mediante 225 simulaciones aplicando el software para fluidos y 554 modelaciones para partículas sólidas, hasta obtener el resultado más preciso posible a la realidad.

Una vez completado el modelado y la simulación, se procede a analizar y discutir los resultados obtenidos y compararlos con los cálculos analíticos con el fin de extraer conclusiones significativas. Este análisis crítico permite evaluar la eficacia de la solución propuesta, identificar posibles áreas de mejora y validar la validez de las simulaciones en relación con el comportamiento real del sistema estudiado.



***Proyecto Final: Aplicación de Software de Cálculo y Diseño en Cámara Rompecarga
CFD - OPEN FOAM***





CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

Definición del problema:

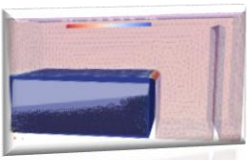
El problema que enfrenta la empresa Aguas Riojanas SAPEM, se sustenta en las pérdidas económicas debido a fallas en la conducción de agua que arrastra arena hacia las válvulas reductoras de presión, aguas abajo de una cámara rompecarga.

Se debe tener en cuenta que existen diversas limitaciones que afectan la implementación de diferentes soluciones, llegando a la conclusión que es necesarias que sea intervenida dicha cámara para dar solución a la problemática, y no generar obras externas adyacentes a la misma.

Otro punto a tener en cuenta, es la restricción de los recursos en cuanto a tiempo y economía, es por ello que se consideró en el proyecto una solución para retener las partículas que son arrastradas junto al agua en el ingreso de la cámara, a través de una pantalla desarenadora, la cual me permitiría evitar que en casos de situaciones extremas por el aumento de caudal producto de una creciente se evite que las partículas mayores a 1mm de diámetro sean expulsadas por los conductos de salida y posteriormente aguas abajo se produzca la obstrucción y/o fallas de las válvulas reductoras de presión, en el acueducto que abastece a la población de la capital Riojana.

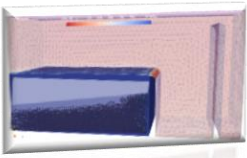
También existe restricción en el tiempo de ejecución de obra y suspensión de actividad, producto de la construcción de esta mejora, debido a que al darle de baja en su funcionamiento solo se podía discontinuar el uso sólo por una semana.

Se suma a ello una restricción geométrica debido a las dimensiones de dicha cámara que imposibilitan la realización de grandes modificaciones internas debido al tamaño reducido de la misma.



Existen otras limitaciones referidas a la antigüedad de la misma, ya que se encuentra en funcionamiento hace aproximadamente 20 años, y se buscaba evitar intervenir la construcción ya existente.

Teniendo en cuenta todo lo antes mencionado y buscando una solución que cumpla con todos estos requerimientos antes mencionados se llegó a la conclusión de la creación de una pantalla de dimensiones 3.20m de longitud; 1.95m de altura. Esta pantalla se diseñará con dos opciones. La primera de hormigón armado siguiendo las características de la obra actual, pero teniendo en cuenta que esta opción generará más tiempo para su construcción, y la segunda opción una pantalla de estructura metálica la cual por cuestiones de realización sería la opción más conveniente.



Geolocalización e Historia

Ubicada en el Noroeste Argentino, La ciudad de La Rioja, capital de la provincia homónima (Figura 1), se encuentra como cabecera del departamento capital, siendo la ciudad más poblada. Localizada en latitud $29^{\circ}24'47''S$ y longitud $66^{\circ}51'21''O$ este, con una altitud promedio de unos 515 m, la ciudad se encuentra al limitando al oeste por el cordón serrano conocido como el Cerro del Velasco, y al este se describe una zona llana que derivará en la salina La Antigua.

A partir de su geografía, y su ubicación, la Rioja se caracteriza por un clima caluroso y árido, con picos de temperaturas que superan $50^{\circ}C$ en verano a unos $5^{\circ}C$ en invierno.

En la ciudad se intersecan la RN 75 en dirección al Oeste, RN 38 en dirección Norte-Sur y en RP5/RN60 al Este en dirección a la provincia de La Rioja.

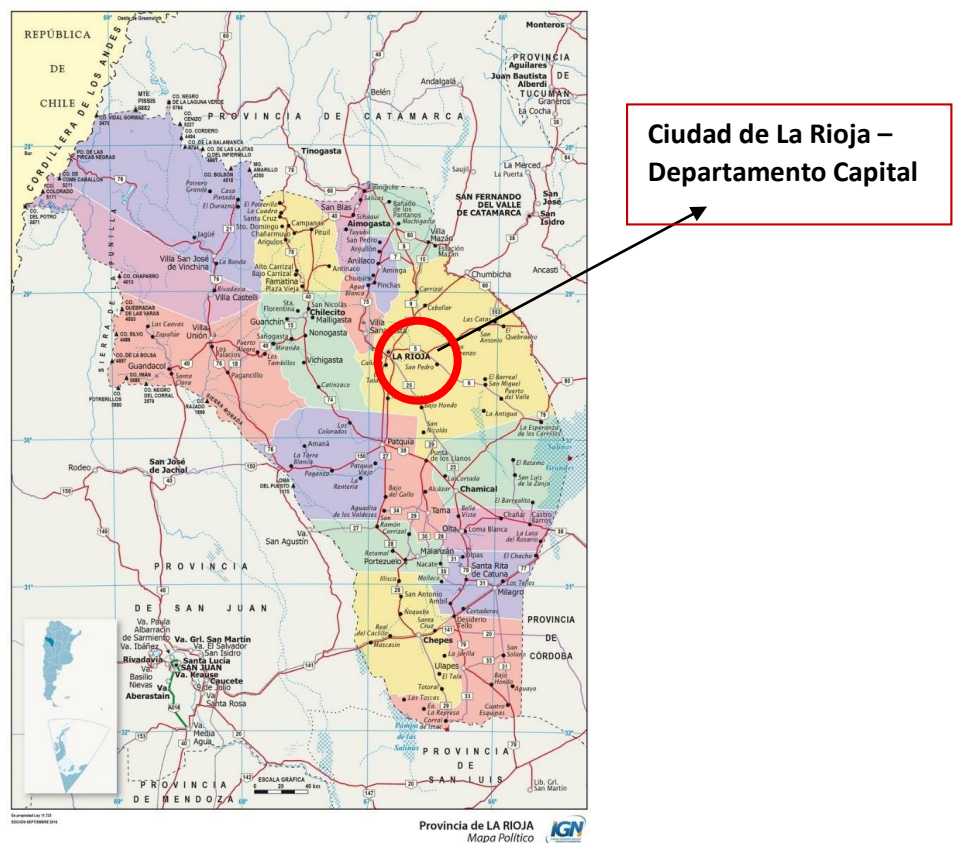
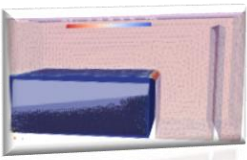


Figura 1 Mapa político de la Provincia de La Rioja



En cuanto al diseño de la ciudad (Figura 2), muestra una tendencia de crecimiento en dirección Este y Sur predominantemente. Además, en el sector Suroeste se generó en los últimos años una creciente urbanización, ejecutándose construcciones al pie del cordón montañoso. La ciudad se encuentra a 467 km de la ciudad de Córdoba al este, siendo Serrezuela la localidad cordobesa más próxima estando a unos 236 km. Al sur limita con San Juan, distando unos 443 km de su capital homónima y con San Luis, a unos 527 km de su capital. La ciudad de Catamarca es la capital más cercana, estando a unos 157 km, compartiendo con esta ciudad ciertas similitudes culturales.

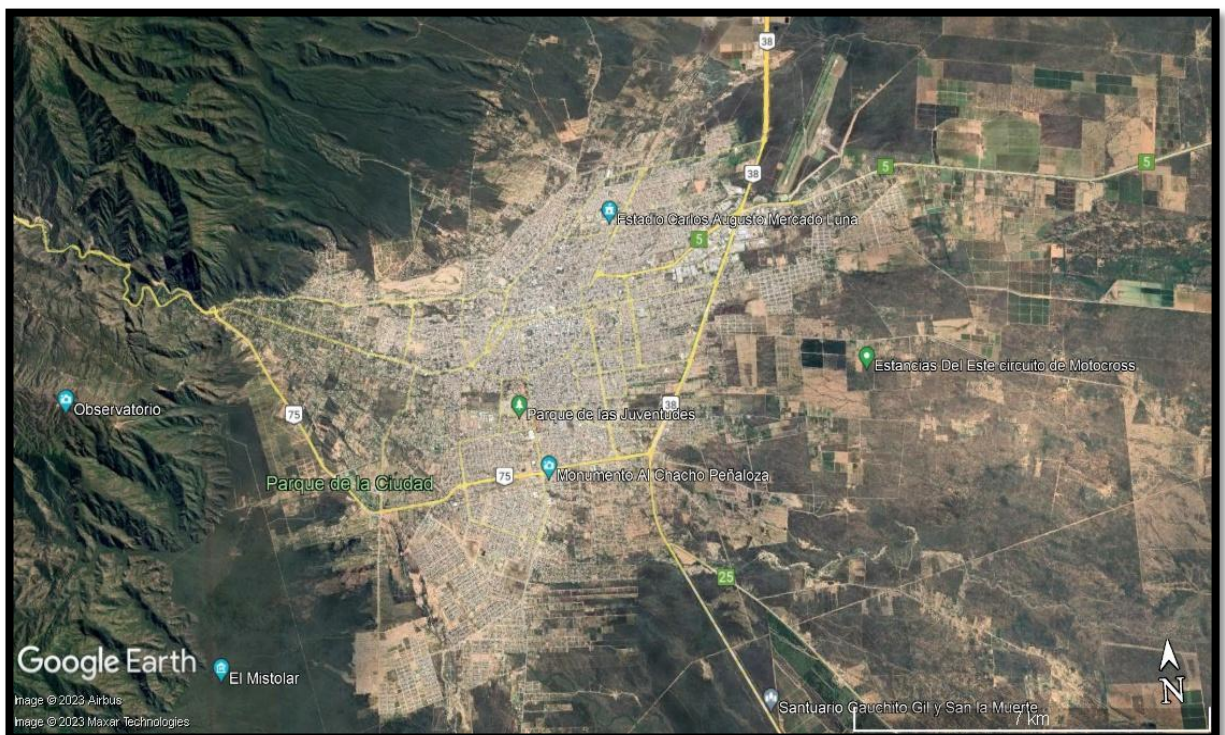
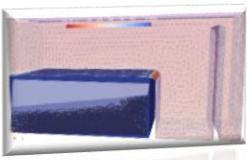


Figura 2 Imagen satelital de la Ciudad de La Rioja

Clima

El clima se caracteriza principalmente por ser semiárido, con algunas influencias de clima continental y montañoso. Entre las variables más importantes destacamos:



Temperatura

La ciudad de La Rioja experimenta temperaturas extremas a lo largo del año. Los veranos suelen ser calurosos y secos, con temperaturas que pueden superar los 35°C durante los meses más cálidos, como diciembre, enero y febrero. Los inviernos son templados y secos, con temperaturas diurnas que rondan los 20°C, pero las noches pueden volverse bastante frías, llegando por debajo de los 5°C. (Figura 3)

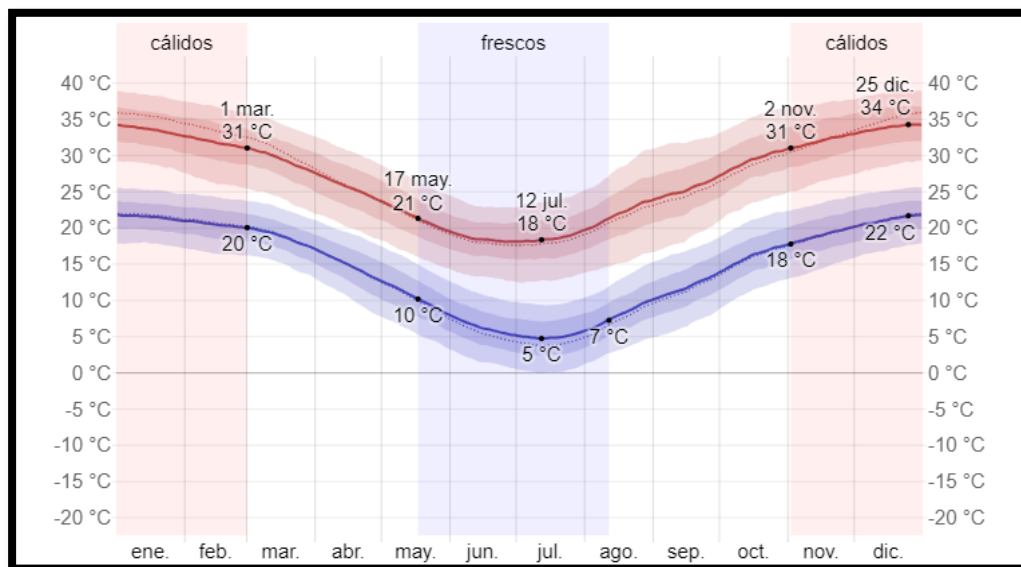
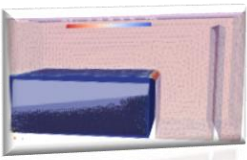


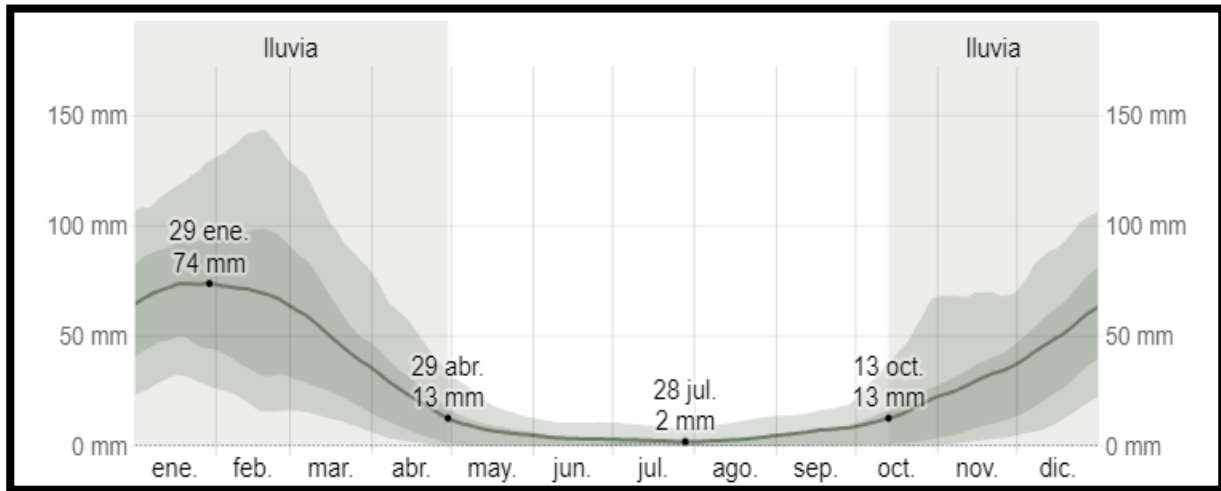
Figura 3 Variaciones de temperatura a lo largo del año

Precipitaciones

La Rioja es una región caracterizada por la escasez de precipitaciones. La ciudad recibe una cantidad relativamente baja de lluvia a lo largo del año, con la mayoría de las precipitaciones concentradas en los meses de verano, especialmente entre diciembre y febrero. Las lluvias suelen ser irregulares y pueden presentarse en forma de tormentas breves pero intensas, con picos de hasta 150 mm pero que totalizan unos 300 mm anuales.



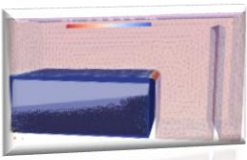
Otros parámetros para destacar, es que la región es mayormente ventosa entre primavera y verano. Además, se dispone de alta cantidad de horas del sol,



siendo un rasgo muy distintivo del clima. En cuanto a humedad, es relativamente baja durante gran parte del año (Figura 4).

Figura 4 Variación de precipitaciones a lo largo del año

En resumen, el clima de la ciudad de La Rioja se define como semiárido, con veranos calurosos y secos, inviernos templados pero frescos por la noche, y una escasez general de lluvia a lo largo del año. Las condiciones climáticas contribuyen a la formación de un paisaje caracterizado por vegetación adaptada a la aridez y a la presencia de un sol abundante en casi todas las estaciones.



Localización y fuentes de abastecimiento de Agua de la Ciudad de la Rioja

Desde el sistema se describen dos tipos de fuentes principales; una es desde el subálveo con captaciones del tipo poco profundas, y otra es desde perforaciones profundas en la cuenca de la ciudad (Figura 5).

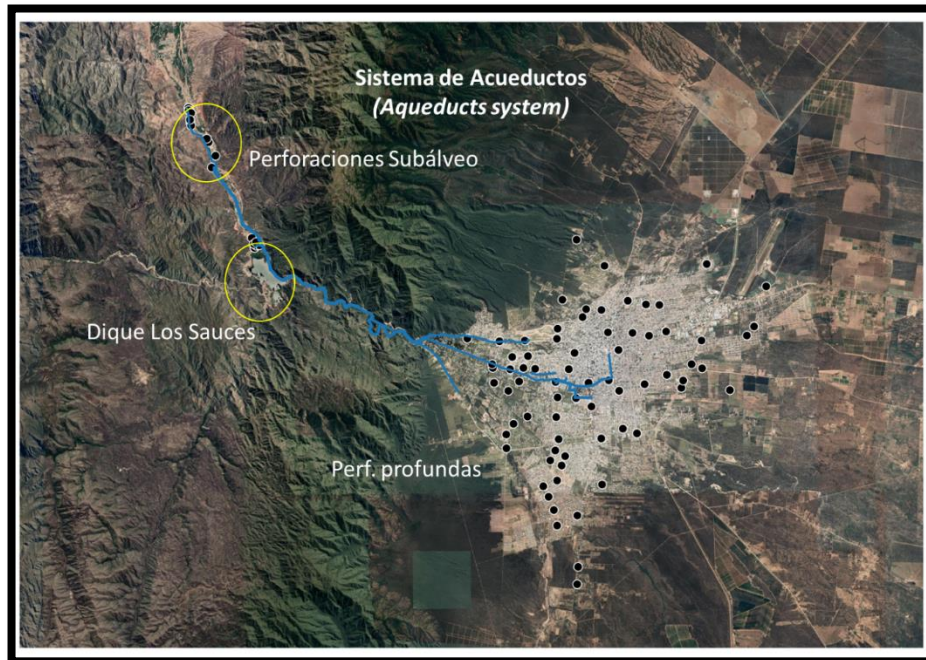
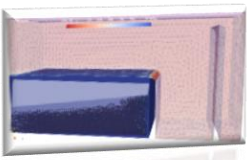


Figura 5 Fuentes de abastecimiento de agua potable

Captación del subálveo

En las captaciones del subálveo se distinguen tres tipos:

- Perforaciones en los Nacimientos.
- Drenas Filtrantes.
- Galería Filtrante.
- Perforaciones en el Bosquecillo.



Perforaciones de Los Nacimientos

En Los Nacimientos contamos con una pila de nueve perforaciones, de las cuales:

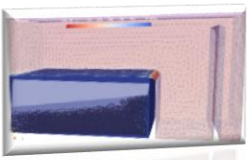
- La Perforación N°1 abastece a la red de Sanagasta, no formando parte del sistema de aprovisionamiento al acueducto principal.
- La Perforación N°3 no tiene bomba y es utilizado como pozo testigo de nivel freático.
- La Perforación N°9 es de aporte en la casilla de cloración.
- Una perforación es de aporte de una propiedad privada, con un caudal de aporte bajo en relación al resto.

De esta manera, se totalizan cinco perforaciones que se encuentran inyectando directamente a red.

En el siguiente cuadro (Tabla 1) se describe, se encuentran la ubicación y los caudales de las perforaciones que componen Los Nacimientos y que integran el abastecimiento al acueducto troncal.

Tabla 1 perforaciones de los nacimientos

SISTEMA	PERFORACIÓN	LONGITUD	LATITUD	CAUDAL
SAI	Nº 2 - LOS NACIMIENTOS.	-67,0123003	-29,3308815	123
SAI	Nº 3 - LOS NACIMIENTOS	-67,0113534	-29,3317945	0
SAI	Nº 4 - LOS NACIMIENTOS	-67,0118053	-29,3340285	140
SAI	Nº 5 - LOS NACIMIENTOS.	-67,0116894	-29,3348961	102
SAI	Nº 6 - LOS NACIMIENTOS.	-67,011412	-29,3359679	170
SAI	Nº 7 - LOS NACIMIENTOS	-67,0022777	-29,3460448	23
SAI	Nº 8 - LOS NACIMIENTOS	-67,0036064	-29,349991	20
SAI	Nº 9 - LOS NACIMIENTOS	-67,0037581	-29,3499529	68



Medición de nivel freático

A partir del pozo número 3 de Los Nacimientos, se pudo tomar nivel testigo para evaluar el ascenso y descenso del nivel freático. (Figura 6).

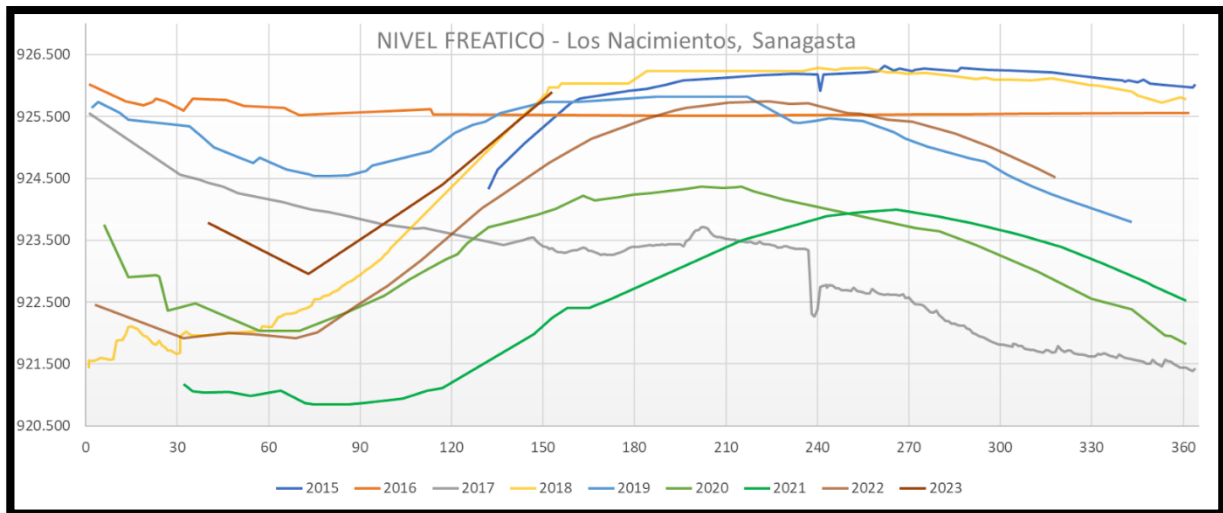


Figura 6 Nivel freático en msnm – Perforación de Los Nacimientos

Drenes de captación

El sistema de drenes se encuentra compuesto por tres caños ranurados de PVC de 250mm. Las mediciones de los mismos se realizan en periodos de una a dos veces al mes. En función de los datos recabados se puede ver la evolución de los aportes a lo largo en casi los últimos diez años. Los caudales se estiman a pesar de no tener una certeza del valor por falta de información (Figura 7)

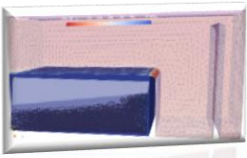
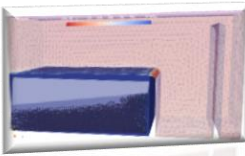


Figura 7 Drenes de captación

Tabla 2 – Medición de tirantes de drenes



Fecha		(Todas)	Datos		
Años	Trimestres	Promedio de Conducto Izquierdo	Promedio de Conducto Central	Promedio de Conducto Derecho	
2014	Trim.1	3	7	3	
	Trim.2	7	11	6	
	Trim.3	16	16	16	
	Trim.4	20	22	23	
2015	Trim.1	15	15	15	
	Trim.2	11	11	11	
	Trim.3	22	22	25	
	Trim.4	25	25	25	
2016	Trim.1	25	25	25	
	Trim.2	21	21	21	
	Trim.3	25	25	25	
	Trim.4	22	21	23	
2017	Trim.1	11	11	11	
	Trim.2	8	9	9	
	Trim.3	5	7	6	
	Trim.4	6	8	6	
2018	Trim.1	4	7	5	
	Trim.2	8	10	11	
	Trim.3	19	20	20	
	Trim.4	21	20	22	
2019	Trim.1	15	15	17	
	Trim.2	13	9	10	
	Trim.3	11	14	16	
	Trim.4	11	11	11	
2020	Trim.1	4	6	6	
	Trim.2	7	9	7	
	Trim.3	9	10	12	
	Trim.4	7	7	8	
2021	Trim.1	1	5	1	
	Trim.2	2	4	1	
	Trim.3	7	9	9	
	Trim.4	7	9	9	
2022	Trim.1	6	8	6	
	Trim.2	8	8	8	
Total general		10	11	10	

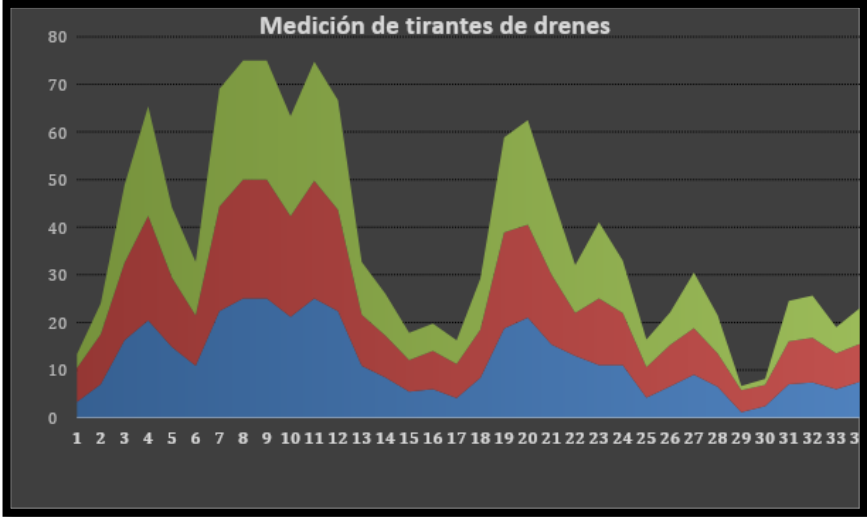
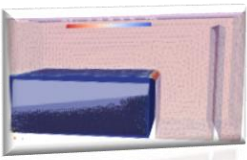


Figura 8 Drenes de captación. Medición de tirantes.



Galería Filtrante

Los valores de caudales del aporte de la galería filtrante son estimados y se creen que oscilan alrededor de unos 90 m³/h, aunque no se tiene certeza de los mismos.

Perforaciones de El Bosquecillo

El acueducto de 800mm en asbesto cemento se alimenta de una pila de siete perforaciones poco profundas que componen El Bosquecillo (Figura 9 y Tabla 3).



Figura 9 Perforaciones en El Bosquecillo dique de los Sauces.

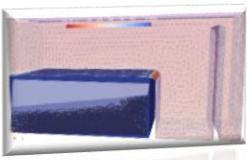


Tabla 3 Ubicación y caudales en El Bosquecillo

SISTEMA	PERFORACIÓN	LONGITUD	LATITUD	CAUDAL
SAI	BOSQUECILLO Nº1	-66,9887863	-29,3734346	161
SAI	BOSQUECILLO Nº2	-66,98806	-29,3754327	183
SAI	BOSQUECILLO Nº3	-66,9872236	-29,3748836	217
SAI	BOSQUECILLO Nº4	-66,987996	-29,3734224	140
SAI	BOSQUECILLO Nº5	-66,9859524	-29,3758693	180
SAI	BOSQUECILLO Nº6	-66,9870783	-29,376013	140
SAI	BOSQUECILLO Nº7	-66,9877626	-29,3767282	140

Abastecimientos subterráneos (perforaciones profundas)

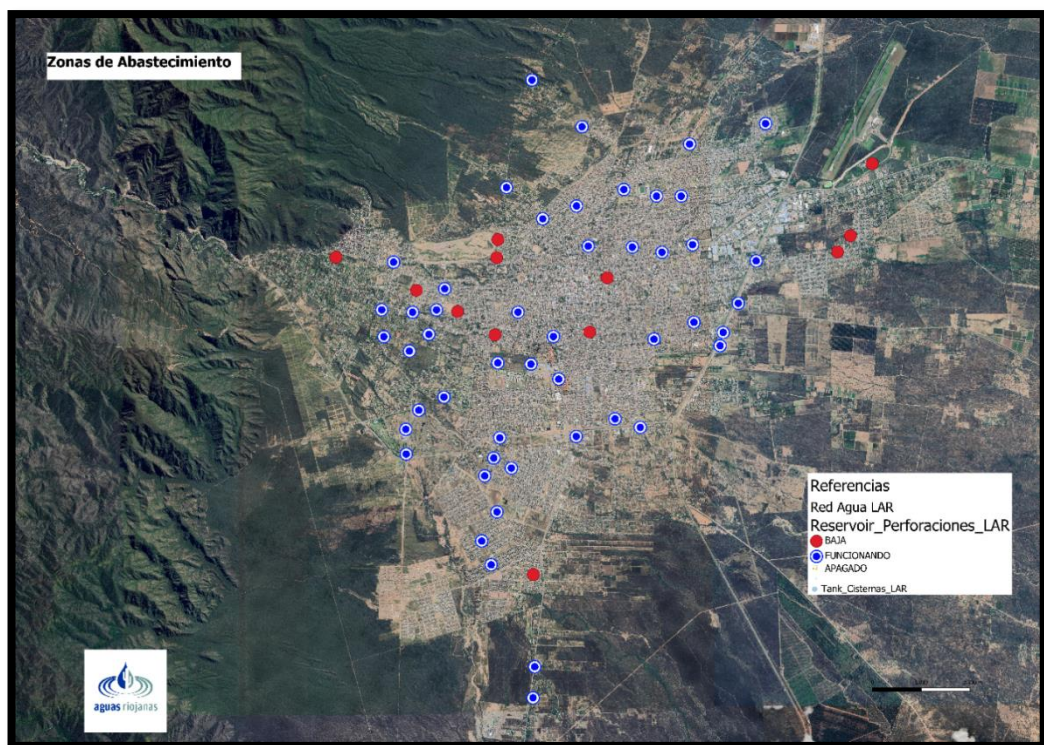
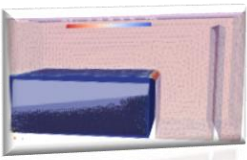


Figura 10 Ubicación de perforaciones profundas en la ciudad

Dentro de la Ciudad de La Rioja se encuentran distribuidas 58 perforaciones, que están aproximadamente en un nivel estático de 200 metros. (Figura 10), las



mismas se encuentra en funcionamiento salvo algunos casos que se explicitarán más adelante.

Acueducto Sanagasta – sistema de potabilización-

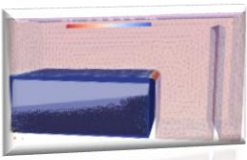
Descripción, capacidad de almacenamiento, Dosis, Control de cloro residual

El acueducto Sanagasta se alimenta de galerías filtrantes y perforaciones localizadas en diferentes sitios sobre el río Sanagasta, que desemboca en el dique Los Sauces. Tanto las galerías filtrantes como las perforaciones captan agua desde el subálveo del río, por lo que el único proceso de tratamiento utilizado es la desinfección con hipoclorito de sodio.

Las instalaciones del sistema de dosificación de hipoclorito de sodio cuentan con dos depósitos de producto (se emplea hipoclorito de sodio al 10%) de polietileno con una capacidad de 10.000 litros cada uno. Una bomba de trasvase para productos químicos de 2HP de potencia (Marca Valentín Balcarce Modelo 40-25-124) utilizada para la descarga de camiones cisterna y el movimiento de productos entre ambos tanques de almacenamiento.

Para la dosificación de hipoclorito de sodio se emplean dos bombas dosificadoras a diafragma (una en stand by) marca Dosivac, modelo DDI 60 con un caudal máximo de 60 l/h. El consumo actual de hipoclorito de sodio en la planta es de aproximadamente 360 litros diarios.

El control de cloro residual se realiza en el final de la red del acueducto ubicado en la planta potabilizadora Los Filtros. Este control, junto con la turbidez se realizan en cada turno de trabajo.



Planta Potabilizadora “Los Filtros”

Descripción, capacidad de filtración, caudales de operación

La planta potabilizadora Los filtros está compuesta por un vertedero rectangular por el que ingresa el agua, una cámara distribuidora que reparte el total del caudal hacia tres floculadores hidráulicos. El agua que sale de dichos floculadores es conducida a través de un canal principal hacia las seis unidades de filtros rápidos de arena.

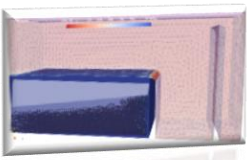
Para la dosificación de coagulante (Se utiliza sulfato de aluminio sólido), la planta cuenta con dos tanques de preparación de hormigón de 4000 litros de capacidad cada uno, agitadores a turbina accionados con motor eléctrico con reductor y dos bombas dosificadoras a diafragma marca Dosivac modelo DDI 300 de 300 litros por hora de caudal máximo. La dosificación de coagulante solo se utiliza cuando la turbidez supera los 10 NTU, situación que se presenta generalmente en la época estival y luego de precipitaciones en la zona de La Quebrada.

Para el retrolavado de los filtros de arena la planta cuenta con una sala de bombas con dos bombas de 125 HP, que se alimentan con agua tratada almacenada en la cisterna número 3. El agua de lavado es conducida hacia el río tajamar (canal de drenaje principal de la ciudad).

El caudal máximo de diseño de la planta es de 1000 m³/h. En la actualidad se tratan entre 400 m³/h y 700 m³/h.

Cloración y dosis en planta y en perforaciones

En la planta potabilizadora, las instalaciones del sistema de dosificación de hipoclorito de sodio cuentan con dos depósitos de producto (se emplea hipoclorito de sodio al 10%) de polietileno con una capacidad de 25000 litros cada uno. Una bomba de trasvase para productos químicos de 5,5 HP de potencia (Marca Valentín Balcarce Modelo 50-40-140) utilizada para la descarga de camiones cisterna, el movimiento de producto entre ambos tanques de



almacenamiento y la carga del tanque móvil utilizado para la distribución del producto químico en las perforaciones de la ciudad.

Para la dosificación de hipoclorito de sodio se emplean dos bombas dosificadoras a diafragma (una en stand by) marca Dosivac, modelo DDI 60 con un caudal máximo de 60 l/h. El consumo actual de hipoclorito de sodio en la planta es de aproximadamente 330 litros diarios.

El control de cloro residual se realiza en las cisternas de almacenamiento y en la cámara de distribución. Este control, junto con el de turbidez, se lleva a cabo en cada turno de trabajo.

Por su parte, cada perforación cuenta con un gabinete en el que se alojan un tanque de polietileno de 750 litros de capacidad y el equipo de dosificación. La inyección de hipoclorito se realiza en la cañería de salida de la perforación, utilizándose una bomba dosificadora a diafragma marca Ares, modelo DX7 de 1,5 litros por hora de caudal máximo o el modelo DX9 de 6 litros por hora de caudal máximo, dependiendo del caudal de producción de cada perforación.

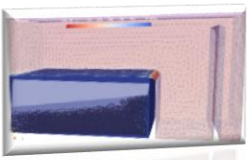
El consumo de hipoclorito en cada perforación ronda los 10 a 18 litros por día cuando el funcionamiento es continuo durante las 24 horas.

Los controles de cloro residual en red no responden a una frecuencia establecida, sino a la detección de fallas en el sistema de dosificación o reclamos de los clientes.

Calidad de Agua Superficial

Los parámetros fisicoquímicos del agua del acueducto Sanagasta cumplen con máximos tolerables indicados en el Anexo I de la Ley N° 6.281 de la provincia de La Rioja. No se han detectado metales pesados ni contaminantes orgánicos.

En el caso de la planta Los Filtros, las muestras son extraídas desde la cisterna 3, la cual cuenta con el aporte mayoritario del agua tratada en la misma planta y se refuerza con agua proveniente de la cisterna 4 o cisterna Cochangasta que



posee aportes de perforaciones de la zona oeste y del acueducto Sanagasta. Por esta razón los parámetros fisicoquímicos cumplen parcialmente con los máximos tolerables indicados en el Anexo I de la Ley N° 6281 de la provincia de La Rioja. Se detectaron concentraciones de sulfatos y sodio que sobrepasaron los límites por mayor aporte de dichas perforaciones. No se han detectado metales pesados ni contaminantes orgánicos.

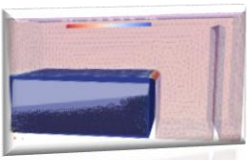
Las frecuencias de muestreos son semestrales para fuentes de agua superficial, e incluyen análisis bacteriológicos.

El agua superficial es tratada en la planta potabilizadora donde se evalúa diariamente los parámetros de turbidez y cloro residual, unas tres veces al día por el personal de guardia.

Además, la evaluación se realiza por cada unidad que compone la planta. En el último mes los valores fueron los siguientes (Tabla 4).

Tabla 4 – Mediciones de turbidez y cloro residual en el último mes

Turbidez	
Ingreso a la planta	1,55 NTU
Salida filtro 1	0,00 NTU
Salida filtro 2	1,02 NTU
Salida filtro 3	1,05 NTU
Salida filtro 4	1,01 NTU
Salida filtro 5	0,66 NTU
Salida filtro 6	1,10 NTU
Salida cámara de distribución	1,17 NTU
Conducto	0,96 NTU
Cloro residual	
Conducto	0,31 mg/l
Cisterna nº4	0,23 mg/l



Cisterna nº2	1,01 mg/l
Cisterna nº3	1,05 mg/l
Camara de distribución nº3	0,90 mg/l

Fuente Subterránea

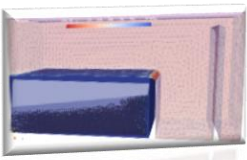
En cuanto a las diferentes perforaciones utilizadas como fuentes de agua de consumo, en su mayoría cumplen con los parámetros físicos químicos indicados en el Anexo I de la Ley N° 6281 de la provincia de La Rioja. Los inconvenientes más comunes son sulfatos, cloruros, sodio, nitratos y en menor medida fluoruros. No se han detectado metales pesados ni contaminantes orgánicos con excepción de tres perforaciones que se dieron de baja en la zona este de la ciudad.

Las frecuencias de muestreos son anuales para fuentes de agua subterráneas, e incluyen análisis bacteriológicos.

Perforaciones fuera de servicio:

Por diferentes parámetros de calidad de agua, diversas perforaciones han sido dadas de baja a lo largo de los años de servicio de la empresa (Aguas Riojanas SAPEM y ex Aguas de La Rioja SA). Entre ellas se destacan:

- Perforaciones con concentraciones mayor a 50 mg/l: se dieron de baja las perforaciones Parque Sarmiento (76,4 mg/l), Hospital (83 mg/l) y Artigas (85 mg/l).
- Perforaciones nuevas que no se pusieron en servicio por contener elevada salinidad (conductividad): Perforaciones Yacampis 2 (>5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y Polideportivo Evita (>4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Perforaciones que presentaron olor no aceptable por parte de los usuarios (olor séptico), localizadas en la zona este de la ciudad. No se encontraron contaminantes de control obligatorio en el Anexo I de la Ley N° 6281 de la provincia de La Rioja. Si se detectó la presencia de hidrocarburos



aromáticos polinucleares (HAP's). Las perforaciones puestas fuera de servicio por este motivo son: Matadero (P4), Virgen del Valle y Ruta 5.

- Perforación San Andrés: extrae agua a 53°C de temperatura que ocasiona daños en el equipo de bombeo y cables de potencia.

Sistemas de Acueductos Integrados

Descripción del sistema

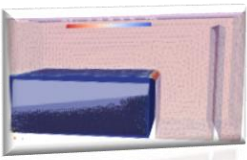
El abastecimiento del acueducto inicia con las perforaciones en Los Nacimientos y sus posteriores aportes de los drenes de captación y la galería filtrante. El acueducto nace en asbesto cemento de diámetro 350mm, aumenta a 800 mm antes de llegar a El Bosquecillo y continúa en acero del mismo diámetro hasta la bifurcación conocida como "El Pantalón".

En este último nudo se divide en dos ramales conocidos como Ramal Oeste (diámetro 800mm) y Ramal Centro (diámetro 400mm). A partir de aquí, el ramal centro continuará su recorrido con el mismo material y diámetro por RN 75, continuando por Avenida San Francisco, hasta llegar a la planta potabilizadora Los Filtros. Cabe aclarar también, que el ramal centro no tiene ninguna reguladora en su trazo, salvo para sus derivaciones.

En tanto, el ramal oeste, continua en acero hasta la cámara conocida como "**rompecarga**", donde su piezométrica llega a cero. Esta cámara tiene un desborde el cual es conducido por canal hacia la planta potabilizadora. A partir de este punto el conducto continuará en PEAD 710mm. A partir de la estación reguladora "La Medialuna" el diámetro disminuye a 560mm, continuando posteriormente por las reguladoras "Ochoa Huasi", "El Derrumbe" y "Pan Casero".

Finalmente, en la cámara partidora el ramal oeste se divide en ramal norte y ramal sur. Continuando el primero en PVC 500, para reducir metros después en 400 mm y, a partir del reactor reducir en 315. El Ramal Sur, en tanto, continúa





en 400 en acero, metros después continúa en PVC del mismo diámetro hasta terminar en 315.

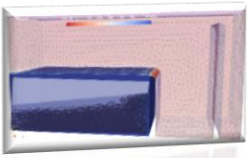
Cabe mencionar que estaba previsto que el Ramal Sur continúe su recorrido expandiéndose por el cordón sur de la circunvalación de la ciudad. Por varios motivos, esto quedó desvinculado funcionando tal como lo conocemos ahora (Tabla 5 y 6)

Tabla 5- Longitudes de los distintos tramos de acueducto

DIÁMETRO	MATERIAL	DESCRIPCION	ORIGEN	LONGITUD
350	AC	TRONCAL	NACIMIENTOS	2600
800	AC	TRONCAL	DRENES	3501
800	ACERO	TRONCAL	BOSQUECILLO	4150
710	PEAD	OESTE	ROMPECARGA	875
560	PEAD	OESTE	MEDIALUNA	3800
500	PVC	NORTE	PARTIDORA	2000
400	PVC	NORTE	COCHAMBAMBA	2650
315	PVC	NORTE B	REACTOR	1900
400	ACERO	SUR	PARTIDORA	100
400	PVC	SUR	CONT. PARTIDORA	1327
355	PVC	SUR	CIRCUNVALACIÓN	1100
315	PVC	SUR	CIRCUNVALACIÓN	1420
400	ACERO	CENTRO	PANTALÓN	11200

Tabla 6 – Longitudes totales de cada acueducto

resultado	acueducto	Localización	LONGITUD (m)
subtotal	troncal	RN 75	10251
	oeste	RN 75	4675
	troncal+oeste	RN 75	14926
	ramal norte	Av. Ramírez de Velazco	6550



	ramal sur	Av. Mártires de la dictadura	3947
	ramal centro	Rn 75 + av. San francisco	11200
	totales		51549

Localización de la cámara en estudio:

La ubicación específica de la obra, desde Google Earth® está situada con las coordenadas $-29^{\circ}23'42''$ $-66^{\circ}57'24''$ (también se puede visualizar en cada imagen). Esta obra se encuentra a 5800m desde las galerías filtrantes (Figura 11 y 12). Además, se puede observar su estado actual y características de las construcción (Figuras 13 a 16).

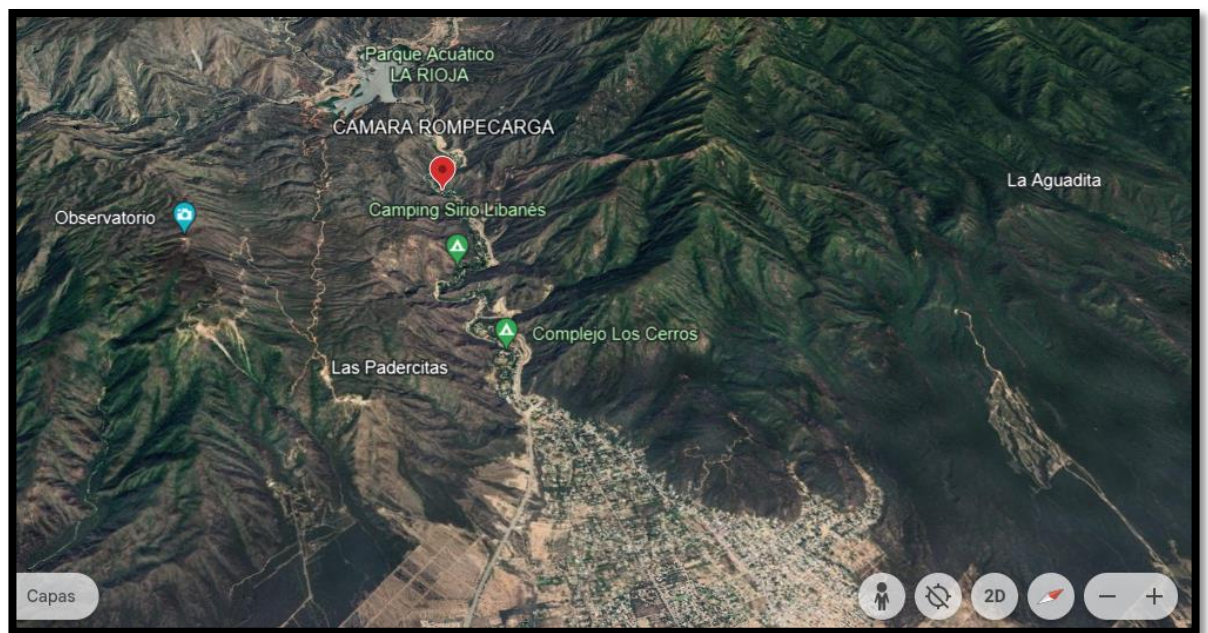


Figura 11 ubicación de la cámara objeto de estudio

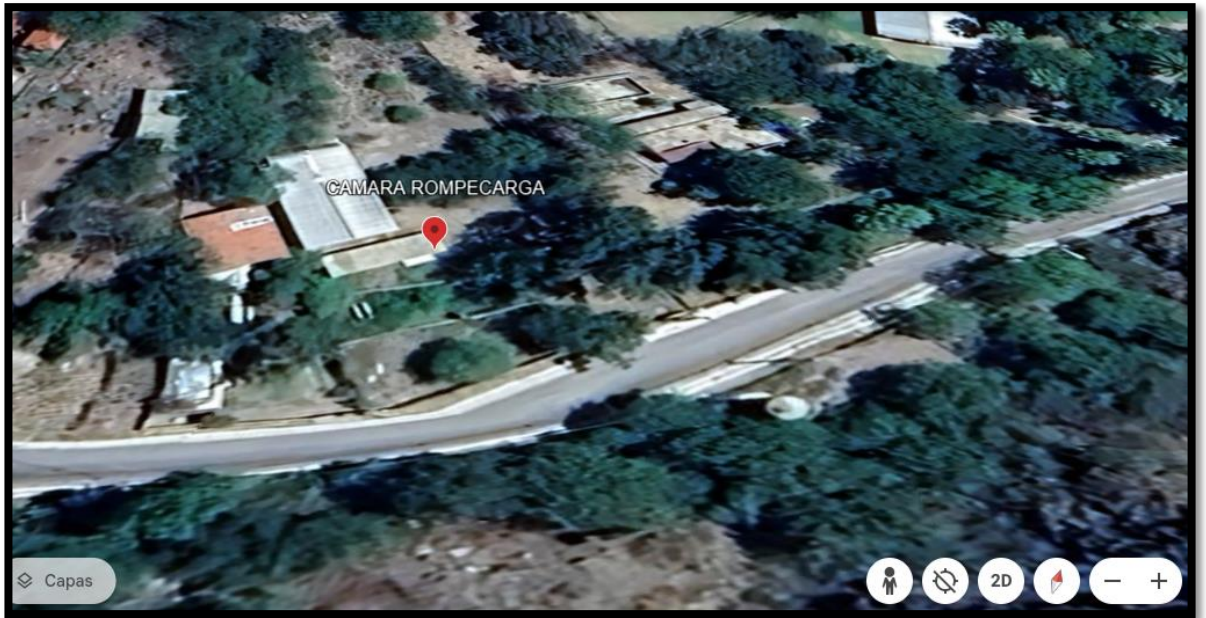
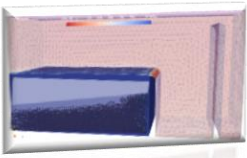


Figura 12 ubicación de la cámara objeto de estudio



Figura 13 imágenes de la cámara objeto de estudio

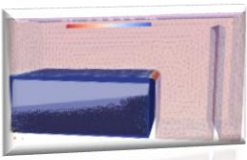


Figura 14 imágenes de la cámara, vista interior, objeto de estudio

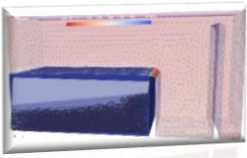
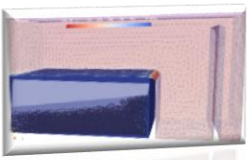


Figura 15 imágenes de la cámara objeto de estudio



Figura 16 imágenes de la cámara objeto de estudio



Esta cámara debido a su ubicación estratégica en la red tiene gran importancia para el sistema de provisión de agua de la ciudad de La Rioja. En el último mantenimiento y desarenado se caracterizaron los sólidos removidos con un ensayo de granulometría presentado por Ing Barbeito.

La muestra del árido recolectado dentro de la cámara, tuvo como origen una crecida brusca de caudal, provocando la falla de las válvulas reductoras de presión y arrastrando material y quedando depositado en la cámara (Tabla 7)

Tabla 7 análisis de granulometría de la muestra recolectada

Tamaño Tamiz (mm)	Material que Pasa	Material Retenido	Material Retenido Acumulado
25,400	99,0%	1,0%	1,0%
15,875	94,0%	5,0%	6,0%
9,525	81,5%	12,5%	18,5%
6,350	70,5%	11,0%	29,5%
3,175	52,1%	18,3%	47,9%
2,000	39,0%	13,1%	61,0%
1,000	22,2%	16,7%	77,8%
0,500	9,9%	12,3%	90,1%
0,297	3,9%	6,0%	96,1%
0,149	0,6%	3,2%	99,4%

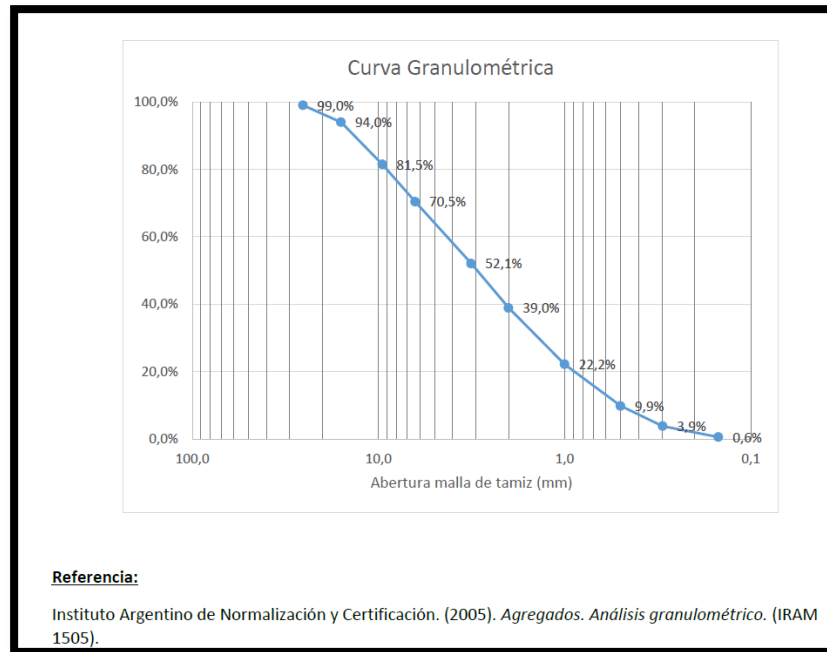
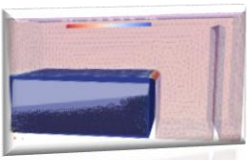
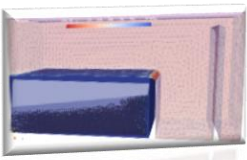


Figura 17 curva granulométrica

En base a lo antes descrito se denota la importancia que tiene la cámara para el sistema hídrico. Los problemas antes mencionados, hacen que la presente propuesta tenga relevancia.



FUNDAMENTOS Y JUSTIFICACIÓN

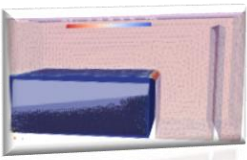
En base a lo antes expuesto se considera que el problema mencionado reviste de importancia a nivel local, con aristas económicas y sociales.

La importancia social, local y económica del problema abordado en este trabajo radica en varios aspectos críticos que impactan directamente tanto a la comunidad como a la infraestructura y economía de la ciudad.

En cuanto al aspecto social, el arrastre de partículas de áridos que daña las válvulas reductoras de presión puede llevar a fallos en el sistema de distribución de agua, provocando cortes en el suministro. Estos cortes afectan la vida diaria de la comunidad y la calidad del agua puede verse afectada ya que las partículas sólidas pueden comprometer la calidad del agua potable.

En cuanto a los aspectos económicos para la empresa proveedora del servicio de agua potable, la constante reparación o reemplazo de válvulas y componentes dañados por el arrastre de partículas supone una carga considerable para los servicios públicos locales y mejorar la robustez del sistema de distribución de agua aumenta la resiliencia de la infraestructura local, asegurando un suministro de agua confiable incluso en situaciones adversas.

La mitigación del problema mediante soluciones basadas en la CFD y la implementación de pantallas retenedoras puede traducirse en una reducción significativa de los costos operativos y de mantenimiento. Las reparaciones menos frecuentes y la prolongación de la vida útil de las válvulas resultan en ahorros económicos importantes. Un sistema de agua fiable y eficiente es fundamental para el desarrollo económico local. La comunidad y las empresas dependen del suministro de agua constante y de calidad.



Objetivos generales:

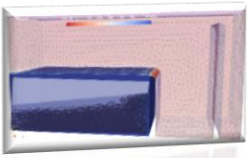
"Evaluar el diseño de una pantalla para retener sólidos en una cámara rompecarga de agua, mediante la comparación entre los resultados obtenidos a través de simulaciones en CFD".

Objetivos específicos

1. Establecer el tiempo de retención de partículas en la cámara
2. Determinar la altura de la pantalla desarenadora de la cámara
3. Describir el comportamiento del fluido dentro de la cámara
4. Calcular la estructura y costos de la mejora propuesta
5. Proponer una solución al problema planteado

Actividades a realizar

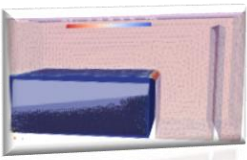
1. I Selección del método de trabajo programa, mallador y equipo informático
2. Modelar el comportamiento de las partículas
3. I Modelar el comportamiento del fluido
II. Se realizará diferentes simulaciones para calcular el tiempo de desborde de las partículas.
III. Estimar y correlacionar los resultados de los tiempos con las diferentes alturas de la pantalla.
3. En base a lo obtenido y estudiado en los puntos 2 y 3 verificará la altura de la pantalla
4. I. Cálculo de la pantalla de hormigón armado
II Cálculo de la pantalla con estructura metálica
III. Cómputo y presupuesto de cada propuesta
5. Conclusión general final y recomendaciones



CAPITULO 2

SELECCIÓN DEL METODO DE TRABAJO





CAPITULO 2

SELECCIÓN DEL METODO DE TRABAJO

Caracterización del fluido

La simulación se centra en el estudio de la evolución de un fluido incompresible e isotérmico en un dominio tridimensional de geometría cubica. Aunque no se detalla exhaustivamente la configuración de la simulación, se realiza un repaso sobre la geometría y las características de funcionamiento del caso.

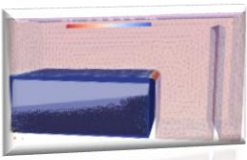
En el caso estudiado, todas las condiciones de contorno son de tipo pared, lo que significa que se impone la condición de no deslizamiento entre el fluido y la pared. La parte inferior de la cámara está preconfigurada para moverse en la dirección del eje z a una velocidad de 0.5845 m/s, y la cara superior estará en contacto con la atmosfera, mientras que el resto de las paredes de la cavidad permanecen fijas.

Inicialmente, el tutorial está configurado con el solver InterFOAM, diseñado para flujo incompresible y estado turbulento. Dado que el flujo en este caso es transitorio, es decir, la solución depende del tiempo, este solver es el más adecuado, ya que introducir el término temporal en las ecuaciones de Navier-Stokes aumentaría el costo computacional de la simulación.

El flujo turbulento es un fenómeno común en la naturaleza, caracterizado por trayectorias circulares erráticas y semejantes a remolinos. Se produce cuando las velocidades del flujo son altas o cuando las fuerzas viscosas son pequeñas en un fluido. La turbulencia puede originarse por la presencia de paredes en contacto con el fluido o por capas que se mueven a diferentes velocidades, ya sea en conductos lisos o rugosos.

La turbulencia atmosférica es un tema de aplicación importante, especialmente en la dispersión de contaminantes. Se clasifica en turbulencia de pared, generada por efectos viscosos debido a las paredes, y turbulencia libre, producida en ausencia de paredes por el movimiento de capas de fluido a diferentes velocidades.





La turbulencia se caracteriza por el movimiento caótico de partículas en trayectorias irregulares, y se desarrolla cuando las fuerzas viscosas son débiles en comparación con las fuerzas inerciales. Se pueden encontrar diferentes teorías que explican su origen, como la formación de vórtices en la capa límite o la influencia del esfuerzo cortante.

El número de Reynolds es un parámetro importante para predecir el régimen de flujo, donde si es mayor a 4000, el flujo será turbulento. En tubos lisos, se presentan subcapas viscosas, de transición y de turbulencia, mientras que en tubos rugosos, el factor de fricción depende de la rugosidad relativa y del número de Reynolds.

En resumen, la turbulencia es un fenómeno complejo y común en diversos contextos, como en el flujo de fluidos y en la atmósfera, con características y desarrollo específicos que pueden influir en el comportamiento de los sistemas donde se manifiesta.

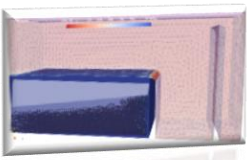
¿Qué es el CFD?

Es una parte de la mecánica de fluidos que utiliza estructuras de datos y cálculos numéricos para analizar y resolver problemas de flujo de fluidos como composiciones químicas, densidad y velocidad.

Esta herramienta garantiza que se utilicen los mejores conceptos de flujo desde las primeras etapas del diseño del producto para permitir que los componentes funcionen de manera eficiente en diversas condiciones.

CFD facilita el análisis de problemas complejos de flujo de fluidos que involucran interacciones líquido-gas, fluido-sólido o fluido-fluido. Utiliza solucionadores avanzados para transformar leyes físicas de ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones algebraicas y resolverlas de manera eficiente.

CFD: Es una parte de la mecánica de fluidos que utiliza estructuras de datos y cálculos numéricos para analizar y resolver problemas de flujo de fluidos como composiciones químicas, densidad y velocidad.



Esta herramienta garantiza que se utilicen los mejores conceptos de flujo desde las primeras etapas del diseño del producto para permitir que los componentes funcionen de manera eficiente en diversas condiciones.

Las características de cada software analizados, fue, teniendo en cuenta sus versiones, costo, los módulos de procesamiento (pre- procesado, procesamiento propiamente dicho y post- procesado), la interfaz gráfica (que mostrará de manera visual los resultados arrojados una vez procesado los datos y obteniendo sus resultados), entre otros parámetros.

La gran mayoría de los programas de modelación de fluidos computacionales (CFD) presentes en el mercado, se encuentran en idioma inglés, especialmente las gratuitas como lo es el utilizado en este trabajo.

¿cómo funciona el CFD?

Utiliza las leyes fundamentales de la mecánica de los fluidos, considerando las leyes conservativas de masa, momento y energía.

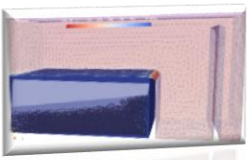
Para nuestro caso un fluido considerado newtoniano, incompresible, no viscoso que responde a las siguientes ecuaciones.

Ecuaciones en las que se basa el CFD

Las ecuaciones que rigen un flujo de fluido incompresible, newtoniano y laminar en un modelo físico de simulación de Dinámica de Fluidos Computacional son las siguientes:

Conservación de Masa: La ecuación de conservación de masa se expresa como:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{acumulación}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})}_{\text{advección}} = 0$$



Donde:

$\partial\rho$ = densidad del fluido.

∂t = tiempo.

$\rho\mathbf{v}$ = vector velocidad del fluido.

∇ =coef. de divergencia.

Al realizar el balance de masa para un volumen de fluido, se obtiene la ecuación de conservación de masa, que es fundamental en la mecánica de fluidos. Esta ecuación surge al considerar que la variación de masa dentro de un volumen o elemento de fluido es igual al flujo de masa que entra y sale a través de los límites del mismo.

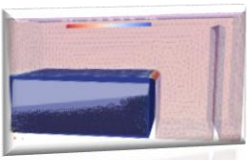
Esta ecuación establece que la tasa de cambio de masa en un volumen de control es igual a la tasa neta de flujo de masa que entra o sale de ese volumen. Es decir, la variación temporal de la densidad en un volumen de fluido es igual a la divergencia del producto de la densidad y la velocidad del fluido.

Al realizar este balance a través de un elemento de fluido, se puede cuantificar cómo la masa se conserva en el sistema, lo que es esencial para comprender y modelar el comportamiento de los fluidos en diferentes situaciones.

Conservación de Momento: La ecuación de conservación de momento lineal se expresa como:

$$\underbrace{\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}}_{\text{acumulación}} + \underbrace{\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}}_{\text{advección}} + \underbrace{+\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}}_{\text{transporte viscoso}} + \underbrace{+\nabla P}_{\text{presión}} - \underbrace{\rho \mathbf{g}}_{\text{gravedad}} = 0$$

El principio de conservación de momento, aplicado a un volumen de control fijo en el espacio, establece que la variación de la cantidad de movimiento por unidad



de volumen de un elemento de fluido es igual a la suma de las fuerzas exteriores que actúan sobre ese volumen del elemento.

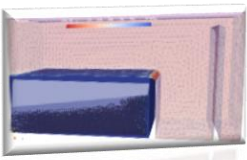
Matemáticamente, este principio se expresa a través de las ecuaciones de conservación de momento lineal en las tres direcciones del espacio. Estas ecuaciones representan la velocidad de incremento de momento en cada dirección por unidad de volumen de una partícula de fluido.

Estas ecuaciones representan la conservación de momento en un sistema de fluidos y son esenciales para comprender cómo las fuerzas externas influyen en el movimiento y la distribución de la cantidad de movimiento en un fluido.

Tanto u , v y w corresponden a las componentes cartesianas de la velocidad, son Dv/DA

Derivada convectiva, Y las fuerzas que actúan sobre las partículas de un fluido se pueden dividir en fuerzas superficiales como presión, viscosidad y fuerzas de masa y gravedad. La presión, la tensión normal está representada por P y la tensión viscosa está representada por τ . El símbolo τ_{ij} se utiliza para representar la dirección de la tensión viscosa, y los subíndices i y j representan el componente de tensión que actúa en la dirección j sobre la superficie perpendicular a la dirección i . Considerando que la fuerza de masa contenida en el término fuente se considera por separado y la suma de las fuerzas correspondientes en el espacio es igual al cambio de momento por unidad de volumen en las tres direcciones, obtendremos las 3 ecuaciones para cada eje.

$$\begin{aligned}\rho \frac{d}{dt}(\mathbf{u}(x, y, z, t)) = \mathbf{s} &\Rightarrow \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) = \mathbf{s} \\ &\Rightarrow \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) = \mathbf{s} \\ &\Rightarrow \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \mathbf{s}\end{aligned}$$



Conservación de Energía: La ecuación de conservación de energía se expresa de acuerdo con la transferencia de energía en el sistema y puede incluir términos de convección, difusión y generación de calor.

Estas ecuaciones constituyen la base principal de todo modelo físico en una simulación de Dinámica de Fluidos Computacional y son fundamentales para describir el comportamiento de un flujo de fluido incompresible, newtoniano y laminar.

La ecuación de conservación de energía, derivada de la primera ley de la termodinámica, establece que el calor suministrado a un sistema es igual al incremento de energía total del sistema más el trabajo mecánico realizado por el mismo. Al realizar un análisis sobre el trabajo producido por las fuerzas de superficie sobre el volumen de un elemento de fluido, la adición de calor, y operando algebraicamente, se llega a la ecuación de conservación de la energía aplicada para un flujo incompresible.

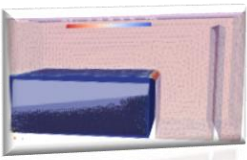
La ecuación de conservación de energía para un flujo incompresible se expresa de la siguiente manera:

$$\underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{acumulación}} + \underbrace{\rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T}_{\text{advección}} - \underbrace{k \nabla^2 T}_{\text{conducción}} - \underbrace{\mu \Phi_v}_{\text{disipación viscosa}} - \underbrace{\dot{G}}_{\text{generación}} = 0$$

Esta ecuación representa la conservación de la energía en un sistema de flujo incompresible, teniendo en cuenta la transferencia de calor, el trabajo mecánico y las fuerzas que actúan sobre el fluido. Es fundamental para comprender cómo la energía se conserva y se distribuye en un sistema de fluidos.

Ecuación de Navier-Stokes para un fluido Newtoniano

Las ecuaciones de Navier-Stokes formulan matemáticamente la conservación del momento y la masa para los fluidos newtonianos. Si aplicamos los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica en un volumen fluido



encontraríamos como resultado las fórmulas de las integrales de las ecuaciones. Para llegar a su formulación diferencial, se manipulan aplicando ciertas consideraciones, principalmente aquella en la que los esfuerzos tangenciales guardan una relación lineal con el gradiente de velocidad (ley de viscosidad de Newton), obteniendo de esta manera la formulación diferencial que generalmente es más útil para la resolución de los problemas que se plantean en la mecánica de fluidos.

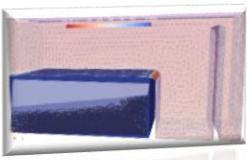
Estas ecuaciones son un conjunto de derivadas parciales no lineales. No se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones. Y, salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas, no es posible hallar una solución analítica, por lo que en muchas ocasiones es preciso recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada. A la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa de la obtención de estas soluciones mediante métodos numéricos se le denomina dinámica de fluidos computacional.

Debido a que generalmente se adopta la descripción euleriana, la derivada ordinaria

$\partial\phi/\partial t$ ya no representa toda la variación por unidad de tiempo de una determinada propiedad del fluido (o magnitud fluida) ϕ siguiendo a la partícula fluida. Esto se debe al movimiento del fluido. Para reflejar esta variación, se usa la derivada sustancial (o derivada siguiendo a la partícula fluida). La derivada sustancial o derivada material se define como el operador:

$$\frac{D}{Dt}(\star) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\partial(\star)}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla(\star)$$

donde v es la velocidad del fluido. El primer término representa la variación de la propiedad en un punto fijo del espacio y, por ello, se le denomina derivada local, mientras que el segundo representa la variación de la propiedad asociada al cambio de posición de la partícula fluida, y se le denomina derivada convectiva. Este es el procedimiento que sigue José Echegaray para demostrar la derivada



material. Véase una demostración de cómo llegar a una derivada material.
Tomando las coordenadas de Euler como:

$$\mathbf{v} = v_x(x, y, z, t)\hat{\mathbf{i}} + v_y(x, y, z, t)\hat{\mathbf{j}} + v_z(x, y, z, t)\hat{\mathbf{k}}$$

Se calculará la aceleración para estas coordenadas:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\hat{\mathbf{i}} + \frac{dv_y}{dt}\hat{\mathbf{j}} + \frac{dv_z}{dt}\hat{\mathbf{k}}$$

Se desarrolla cada derivada total de cada componente. Así, se podrá seguir un desarrollo fácil de recordar:

$$\begin{aligned}\frac{Dv_x}{Dt}i &= \frac{\partial v_x}{\partial t}i + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x}i + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y}i + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}i \\ \frac{Dv_y}{Dt}j &= \frac{\partial v_y}{\partial t}j + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x}j + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y}j + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z}j \\ \frac{Dv_z}{Dt}k &= \frac{\partial v_z}{\partial t}k + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x}k + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y}k + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}k\end{aligned}$$

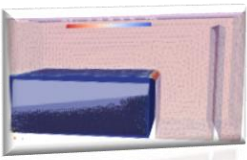
Las derivadas parciales espaciales se pueden escribir como

$$\mathbf{v} \cdot \nabla$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \left[v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right] \mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$$

La mecánica de fluidos se halla gobernada por las ecuaciones de Navier-Stokes (1845), sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido viscoso, obtenidas aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido cuya expresión es:

Principio de Conservación del momento lineal aplicado a un fluido general



$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[2\mu \left(e_{ij} - \frac{\Delta \delta_{ij}}{3} \right) \right]$$

Ley de conservación de la masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

donde:

ρ = es la densidad

u_i con $i = 1, 2, 3$ son las componentes cartesianas de la velocidad

F_i = es el campo de aceleraciones creado por las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo (como la gravedad)

P = es la presión del fluido

μ = es la viscosidad dinámica

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$\Delta = e_{ij}$ es la divergencia del fluido

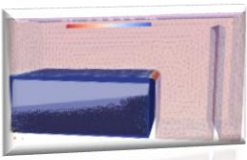
δ_{ij} = es la delta de Kronecker

D/Dt = es la derivada total o derivada material siguiendo el fluido

$$\frac{D}{Dt}(\cdot) = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)(\cdot)$$

Modelos turbulentos Navier-Stokes-Reynolds

Los modelos RANS (Reynolds-averaged-Navier-Stokes) son utilizados en muchos cálculos de flujos turbulentos en ingeniería para obtener información sobre las propiedades medias del flujo en lugar de resolver las fluctuaciones



turbulentas en detalle. Estos modelos resuelven las características del flujo a través de las propiedades medias, utilizando métodos para modelar las tensiones de Reynolds que surgen debido a la turbulencia en las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para poder calcular flujos turbulentos con las ecuaciones RANS, es necesario desarrollar modelos turbulentos que predigan las tensiones de Reynolds y los términos escalares de transporte, lo que permite cerrar el sistema de ecuaciones con incógnitas adicionales. Los modelos RANS de turbulencia se clasifican según el número de ecuaciones de transporte adicionales necesarias para cerrar el sistema. Por ejemplo, modelos como el k- ϵ y el k- ω añaden dos ecuaciones de transporte al sistema general.

La mayoría de los modelos turbulentos RANS se basan en la suposición de una analogía entre las tensiones viscosas y las tensiones de Reynolds. Se sabe que la turbulencia disminuye a menos que haya una cierta tasa de deformación en el flujo, lo que hace que las tensiones turbulentas aumenten con el incremento de la tasa de deformación del flujo medio, ya que esto aumenta el estiramiento de los vórtices. En base a esta relación, las tensiones de Reynolds pueden aproximarse como proporcionales a la tasa de deformación media.

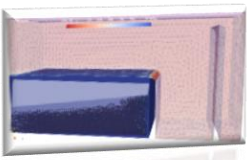
$$\sigma_{xx} = \mu \left[2 \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right] + \bar{\sigma}$$

$$\sigma_{yy} = \mu \left[2 \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right] + \bar{\sigma}$$

$$\sigma_{zz} = \mu \left[2 \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right] + \bar{\sigma}$$

La resolución en forma genérica de este sistema resulta imposible; aunque para condiciones muy particulares y con consideraciones muy específicas se ha resuelto algún caso.

Debido a la mencionada imposibilidad de la resolución analítica se procedió en casos críticos realizar prototipos a escala reducida de posibles soluciones, ello



requería ejecutar un modelo a escala de la solución propuesta para probarla, en caso de requerir cambiar alguno de los parámetros de la solución requería modificar el modelo o incluso rehacerlo. Adicionalmente se agrega el inconveniente del cambio de escalas pues se pueden producir cambios de régimen del fluido resultando este método bastante limitado en su aplicación. Otra metodología empleada fue la realización de un modelo a escala natural para su estudio, pero en este caso resulta muy difícil algunos cambios geométricos del mismo y onerosa su ejecución.

Estudio y Selección del Software CFD:

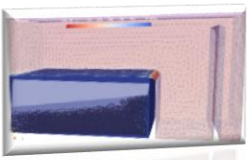
Herramientas o programas para simular la cámara de agua a través de CFD.

A continuación, se detallará las características de cada software analizados, teniendo en cuenta sus versiones, si es gratuito o pago, también se estudió los módulos de pre- procesado y los módulos de post- procesado, como así también su interfaz gráfica que mostrará de manera visual los resultados arrojados una vez procesado los datos y obteniendo sus resultados.

El proceso de elección de los programas de modelación de fluidos computacionales presentes en el mercado cabe destacar que las versiones gratuitas se encuentran en idioma inglés.

OPENFOAM:

Es una herramienta gratuita de código abierto organizado en un conjunto de módulos c++, tiene una amplia gama de características para resolver cualquier cosa, desde flujos de fluidos complejos que involucran reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor, hasta acústica, mecánica de sólidos y electromagnetismo. El mismo posee un trabajo en conjunto con su comunidad como con sus colaboradores trayendo actualizaciones en periodo de cada 6 meses.



En cuanto a requisitos de hardware, se hizo una búsqueda en foros de internet debido a que la propia página donde se puede descargar el programa no especifica requerimientos debido al ser un programa de código libre. Sin embargo, la comunidad recomienda una CPU potente, como así también gran capacidad de memoria ram para poder correr los casos que se requiera con mayor velocidad.

además de ello, a la hora de descargar el programa, la página especifica que se está descargando el módulo de pre procesado o pre compilado, no poseen el paquete de visualización (para ello recomienda usar el programa “native paraview” para una mayor eficiencia, no recomendando usar “parafoam”), como así tampoco solucionadores externos.

AUTODESK CFD

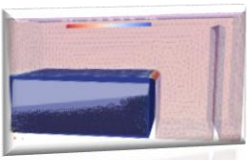
Este programa es una herramienta de pago, la cual permite la realización de simulaciones dinámicas y térmicas de fluidos, permitiendo trabajar con varias opciones de flujos de fluidos, como pueden ser: laminar, turbulento, incompresible, estado constante. También posee opciones de transferencias térmicas: conducción, convección, convección forzada, convección natural. El costo de este programa ronda los \$11.000 dólares en su versión Premium, aun así, el mismo posee una versión de estudiante el cual incluye la versión “ultimate”. A diferencia del OpenFOAM, este indica el hardware sugerido para el correcto funcionamiento del programa, tanto en pc de escritorio como para una notebook, siendo estos:

Pc escritorio:

- gpu: dell t5600 con intel xeon e3-1241 v3 @3.5 ghz (8 núcleos)
- ram: 32 gb
- video: nvidia quadro 4000
- disco duro: 1 tb hdd

notebook:

- dell m4700 con intel i7-4710mq @ 2.5 ghz (4 núcleos)
- ram: 16 gb
- video: nvidia quadro k2000m
- disco duro: 256 gb ssd



SIMSCALE

Es un software de simulación basado en la nube, el cual permite probar, validar, optimizar e iterar sus diseños a través de la simulación en línea. Realiza todos los procesos en un navegador web evitando realizar grandes inversiones en hardware potente que son de alto costo.

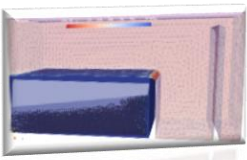
Además, tiene compatibilidad con cad poseyendo una edición similar a la misma que permite equipar a los usuarios con un conjunto de herramientas de simplificación cad reduciendo el tiempo de pasar de simscale al software del mismo.

Dentro de las aplicaciones que tiene, permite simular fluidos para modelado avanzado, interacción de fluido–cuerpo sólido, software cfd para flujo multifásico, transferencia de calor, aerodinámica, tuberías y válvulas, turbo maquinaria, refrigeración electrónica. Cabe aclarar que el software no es de uso gratis, posee para usuarios de su comunidad 10 simulaciones, luego está la versión “básica” la cual permite 100 simulaciones más otras ventajas como proyectos privados, tipos de análisis estructurales lineales, etc., con un costo de \$2000 usd. Luego para una suscripción de profesionales, equipos de ingenieros o empresas, se debe pedir un precio.

PALABOS

Es una herramienta gratuita de código abierto del tipo c++, la cual permite realizar simulaciones de fluidos con relativa facilidad, posee los módulos de pre compilado, pero no posee una interfaz gráfica del usuario, por lo tanto, requiere un cierto nivel de programación para que funcione, como así tampoco el módulo de visualización debiéndose usar programas como paraview. el público para el cual está pensado el programa es para científicos e ingenieros con una sólida formación en cfd y con algún conocimiento en el modelado según en el método de “lattice boltzmann”, el cual es un enfoque moderno del cfd que se utiliza para resolver numéricamente las ecuaciones de navier-stokes para fluidos incompresibles y transitorios.





Elección del programa CFD

Luego de un análisis minucioso se llegó a la conclusión de que el software que muestra esta animación es la aplicación de OpenFOAM que requiere del kit de desarrollo para que sea compatible con Windows como lo es el BlueCFD-core8 el cual puede bajarse de internet sin ningún costo (tabla 8)

Tabla 8 comparación entre los softwares enunciados

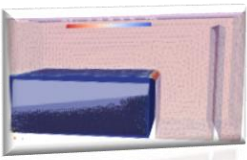
Programas/ Comparación	OpenFOAM	AutoDesk CFD	SimScale	Palabos
Simulación en línea	X	X	☒	X
Requiere Hardware Potente	☒	☒	X	☒
Programa Pago	X	☒	☒	X
Gratis /Versión Estudiante	☒	☒	X	☒
Módulo de Pre-Procesado	☒	☒	☒	☒
Módulo de Post-Procesado	X	☒	☒	X
Interfáz Gráfica	☒	☒	☒	X

Detalles del programa elegido

OPENFOAM

OpenFOAM (Open Source Field Operational and Manipulation – operación y manipulación de campo de código abierta) es un programa de licencia abierta creado en 2004 por Open CFD Ltd, basado en el lenguaje de programación C++ para resolver problemas de mecánica de medios continuos principalmente junto a otras aplicaciones en un sistema unificado.

La utilidad principal de OpenFOAM se basa en la creación de ejecutables o aplicaciones para poder resolver los problemas que cada usuario quiera. En



cualquier versión de este programa el usuario puede modificar el código para ser adaptado a las necesidades requeridas.

Las aplicaciones se pueden dividir en dos grandes grupos

- Solvers: que es el programa para resolver los problemas de mecánica de medios continuos
- Utilidades: que es el programa que permite realizar el pre-proceso y post-proceso de los casos a resolver mediante los solvers.

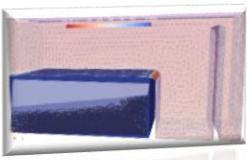
La resolución de un caso mediante Mecánica de Fluidos Computacional requiere de una serie de algoritmos numéricos que permitan abordar el estudio. Todos estos algoritmos componen un código.

OpenFOAM se podría dividir en tres grandes módulos dependiendo de la fase de resolución del problema en que se encuentre como Pre-Procesado, Calculo o Post-procesado.

Se suministra con entornos de procesamiento previo y posterior. La interfaz para el procesamiento previo y posterior son en sí mismas utilidades del programa, lo que garantiza un manejo de datos uniforme en todos los entornos.

- Pre-procesado: Es la primera parte del código, y se caracteriza por la introducción por parte del usuario de los inputs necesarios para la definición del problema a estudiar, además de la definición de ciertos componentes de la simulación como son la geometría o la malla. Estos inputs serán tratados posteriormente por el solvers para la obtención de los resultados.

En este bloque el usuario se encarga de definir el dominio computacional del estudio, de la creación de la malla necesaria para la resolución, de seleccionar las propiedades de los fluidos, de escoger los métodos de



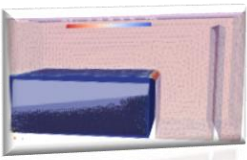
discretización de las ecuaciones que definen los fenómenos físicos y químicos que necesitan ser modelados para la resolución del problema y de definir las condiciones de contorno en las celdas del borde del dominio.

Se debe tener en cuenta, cada uno de las regiones mínimas entre las cuales se encuentra dividido el dominio. El segundo de los conceptos es el de malla, es decir, el conjunto de todas las celdas del dominio. En general, a mayor número de celdas conforman la malla, mayor sería la precisión de la simulación, pues la solución del comportamiento del fluido en el problema se encuentra definida en el interior de cada una de las celdas. Sin embargo, al ampliar el número de celdas en la malla el coste computacional asciende, por lo que hay que encontrar una `malla óptima que mantenga balanceado el coste y la precisión de la resolución del problema.

En esta parte de la estructura, estará incluido todas las herramientas que nos permiten comprobar la calidad de un mallado (check Mesh), y también las propias del proceso de mallado (blockMesh o snappyHexMesh).

Durante esta sección se detallarán los resultados obtenidos durante el post-proceso del caso base con el que se ha trabajado. Para ello se analizará la geometría, el mallado, las propiedades del fluido empleado, las condiciones de contorno y las condiciones iniciales del caso a simular. Este proceso es clave para la obtención de unos buenos resultados, pues si algunas de las características del caso que se va a analizar en esta sección no está correctamente implementada, el resultado final no se adaptara a lo esperado.

- Resolución: actualmente existen varias técnicas de resolución numérica, la principal a la hora de afrontar un problema CFD es el Método de los Volúmenes Finitos. Este método es la base de los solvers de los códigos, los cuales se componen de algoritmos numéricos encargados de integrar.



Todas las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido en los volúmenes finitos (celdas) que definen el dominio del problema. Además, los algoritmos han de discretizar las ecuaciones en un conjunto de ecuaciones algebraicas y también, resolver dichas ecuaciones mediante procesos iterativos.

en esta sección se utilizarán los solvers ya mencionados escogidos según la problemática a resolver.

- Post-procesado: Esta parte del código CFD responde a la necesidad de analizar y visualizar los resultados obtenidos de la simulación. Para ello se utilizan herramientas como pueden ser los gráficos de vectores, los gráficos de contornos, el seguimiento de partículas o la visualización del dominio y la malla.

Además, cabe destacar que, el desarrollo de estas técnicas de visualización y análisis de resultados, ha permitido mejorar la comunicación de idea a personas no especialistas en el sector de la mecánica de fluidos.

El programa incluye una herramienta “view” para poder visualizar los resultados e incluso poder extraer información de estos.

OpenFOAM se suministra con entornos de procesamiento previo y posterior. La interfaz para el procesamiento previo y posterior son en sí mismas utilidades, lo que garantiza un manejo de datos uniforme en todos los entornos. La estructura general de OpenFOAM (Figura.18 y 19)

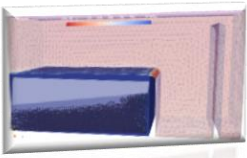


Figura 1.1: Descripción general de la estructura OpenFOAM.

Figura 18 Estructura general de los ficheros

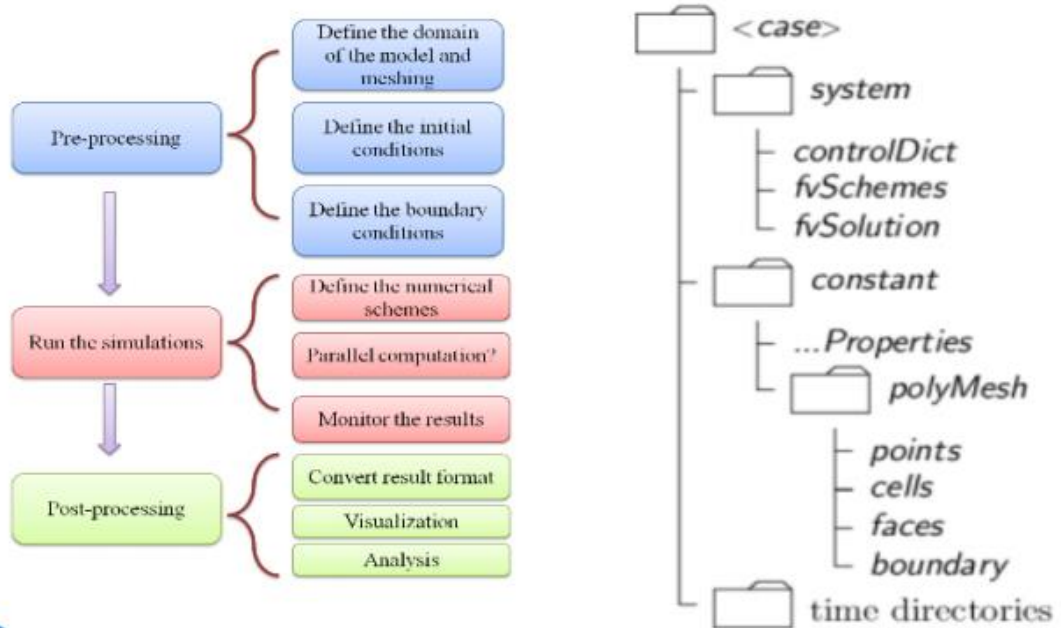


Figura 19 Estructura de los ficheros en OpenFOAM

En la estructura de los ficheros según el caso se distinguen tres carpetas necesarias para poder realizar el cálculo.

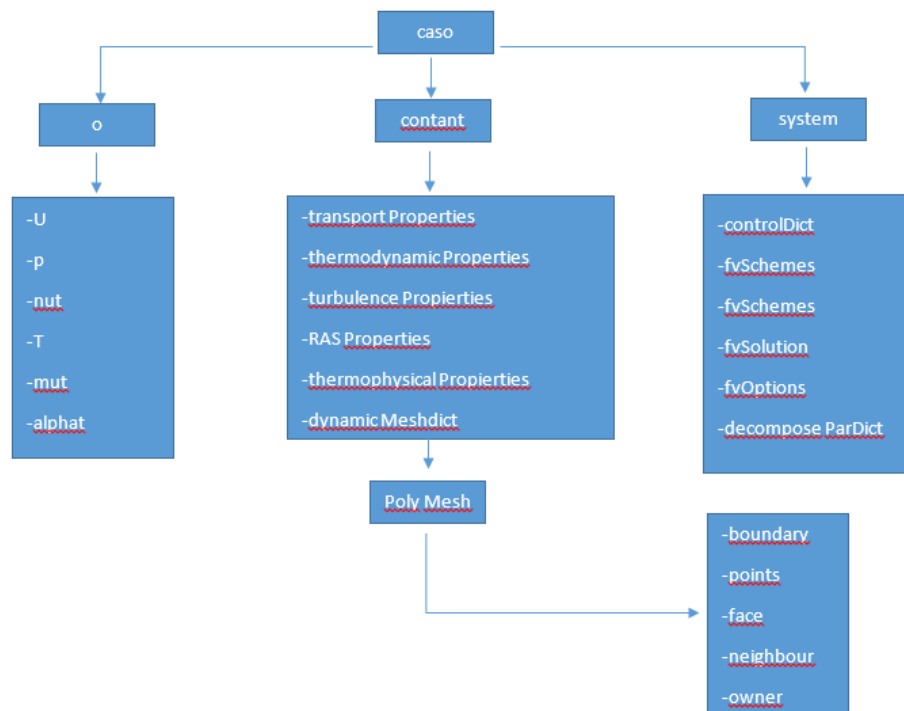
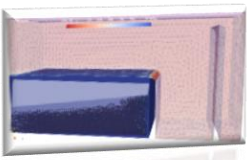
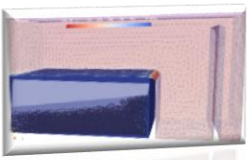


Figura 20 Estructura carpetas OpenFOAM

Descripción de las carpetas (Figura 20)

- 0 = en esta carpeta contiene las condiciones iniciales y de contorno para las variables que el solvers es cuestión necesita, por cada tipo de contorno se aplicará una condición.
- Constant: es un directorio que contiene las características del fluido de trabajo y el tratamiento turbulento que se va a aplicar, y también contiene la información referida a la geometría, la malla, los nombres impuestos de cada parte del contorno y también se encuentra el archivo referente a la configuración de una malla móvil “dynaic MeshDict”
- System: en esta sección se almacena la información con respecto al cálculo, esquemas de discretización(fvSchemes), solvers internos para resolver las variables termodinámicas (fvSolutions), descomposición del dominio de cálculo, utilización de procesadores para el cálculo (decomposeParDict) y los parámetros de tiempo de simulación y cada cuanto es el lapso que se desea ir guardando la información.



A continuación se detalla el esquema de trabajo en OpenFOAM (Figura 21)

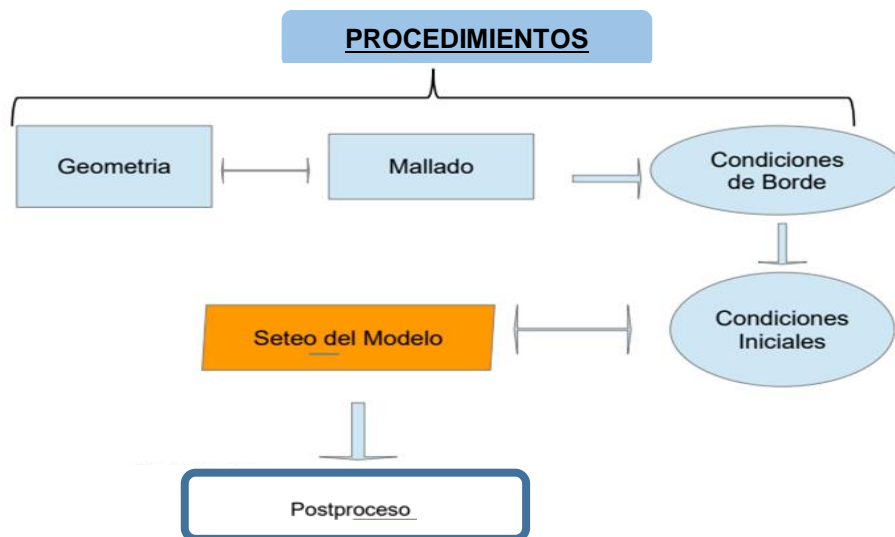
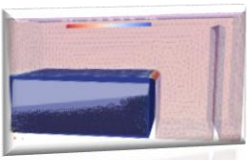


Figura 21 procesos en OpenFOAM

Se deberá tener en cuenta el momento de realizar la modelación el chequeo de los bordes, los cuales deberán cumplir como condición fundamental cerrados, evitar arista brusca, los más simples posibles. Si esto no se diera podría generar unos erros al momento de generar el mallado en el paso posterior, dando como resultado una modelación fallida.

También es indispensable que el formato sea STL, que es compatible con el programa OpenFOAM, al guardar el archivo deberá contar con la extensión "ASCII", y muy importante tener en cuenta las unidades al momento de la geometría (cm a mts)

En la geometría del dominio se deberá Setear con archivos "BlockMesh", Salome entre otros, la diferencia estará en la facilidad y practicidad.



Selección del mallador

Los softwares de CFD, toman el volumen total del caso de análisis y lo dividen en celdas, para aplicarles luego las ecuaciones de RANS. Estas celdas se obtienen a través de una operación que se llama mallado que no es más que la subdivisión del volumen total en volúmenes más pequeños, esta actividad la realizan los softwares de mallarlo denominados malladores.

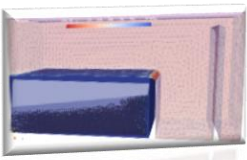
Se debe tener en cuenta que en OpenFOAM, el dominio geométrico o “Geometría del entorno” se divide en volúmenes de control más pequeños, llamados celdas.

Cada una de estas celdas tiene un centro de celda y caras que la rodean. Las caras internas conectan a las celdas en una geometría, mientras que las caras límites también llamadas parches, son parte del límite del dominio computacional.

El vector del área de la cara, denominado por defecto del programa “Sf”, es el vector normal en el centroide de la cara y debe apuntar hacia afuera de la celda. El vector de centro a centro entre celdas adyacentes se denota como d .

La malla es una parte integral de la solución numérica y debe satisfacer ciertos criterios para asegurar una solución válida y, por lo tanto, precisa. Durante cualquier ejecución, OpenFOAM verifica que la malla satisfaga un conjunto bastante estricto de restricciones de validez y dejará de ejecutarse si no se cumplen las restricciones.

Por defecto el programa también define una malla de celdas poliédricas arbitrarias en 3-D, delimitadas por caras poligonales arbitrarias, es decir, las celdas pueden tener un número ilimitado de caras donde, para cada cara, no hay límite en el número de bordes ni ninguna restricción en su alineación. Una malla con esta estructura general se conoce en OpenFOAM como polyMesh. Este tipo de malla ofrece una gran libertad en la generación y manipulación de mallas, en particular cuando la geometría del dominio es compleja o cambia con el tiempo.



Calidad de la malla

El mallado dependerá de la “Buena Geometría” es indispensable que la geometría sea acorde a las especificaciones antes mencionadas ya que al cumplirlas se garantiza que se ha cubierto el 70% del proceso de modelación.

Es condición requerida definir las condiciones de Borde estas se realizarán desde el programa de la siguiente manera:

primero se definen las carpetas con números donde al partir de un tiempo cero “0”, la carpeta llevara ese nombre. Luego se procederá a setear todas las variables:

- ✓ Alpha (alpha. water - que serán las fases)
- ✓ U
- ✓ P_rgh
- ✓ K (referida al cierre)
- ✓ Nut
- ✓ Omega

Los programas utilizados para poder generar el Mallado serán:

Comerciales

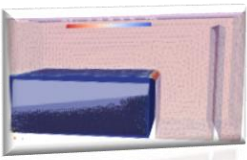
- Gidhome
- Pointwise
- Ansys

Open Source

- blockMesh
- snappyHexMesh
- gMesh



- **BLOCKMESH**
 - Mejor con Blender (mas facil)
- **SNAPPYHEXMESH**
 - Varios Tutoriales en ingles
 - Toma tiempo setear los parámetros
 - Cuando todo falla.... mejor volver atras...



- Salome

Es de suma importancia chequear todas las mallas, y en más minuciosidad cuando estas son de grandes dimensiones, ya que, si la malla falla, el programa podrá seguir funcionando, pero la precisión y convergencia no serán seguros. Al final del proceso el programa indica la falla en la carpeta “constant (polyMesh/sets donde se podrá visualizar un resumen que se podrá abrir con ParaView.

Se recomienda que en cada proyecto las mallas sean lo más ortogonales posibles en los bordes, esto quiere decir que conviene hacer más grande el dominio y dejar condiciones de bordes suaves, evitando gradientes fuertes en estos.

Condición de borde al momento de simular superficies libres bifásicas

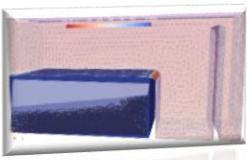
- Agua y aire: se trabajará con dos grandes tipos de condiciones de borde.

❖ DIRICHLET - “FixedValue”
❖ NEUMAN – “FixedGradient”

Especificación de malla y restricciones de validez

Las condiciones que debe cumplir una malla son:

1. Puntos: Un punto es una ubicación en el espacio tridimensional, definida por un vector en unidades de metros (m). Los puntos se compilan en una lista y se hace referencia a cada punto mediante una etiqueta, que representa su posición en la lista, comenzando desde cero. La lista de puntos no puede contener ningún punto que no sea parte de al menos una cara.
2. Caras: Una cara es una lista ordenada de puntos, donde se hace referencia a un punto por su etiqueta. El orden de las etiquetas de puntos



en una cara es tal que cada dos puntos vecinos están conectados por un borde, es decir, sigue los puntos mientras viajas alrededor de la circunferencia de la cara. Las caras se compilan en una lista y se hace referencia a cada cara por su etiqueta, que representa su posición en la lista. La dirección del vector normal de la cara se define por la regla de la mano derecha, es decir, mirando hacia una cara, si la numeración de los puntos sigue un camino en sentido contrario a las agujas del reloj, el vector normal apunta hacia la pantalla, como se muestra en la Figura 22

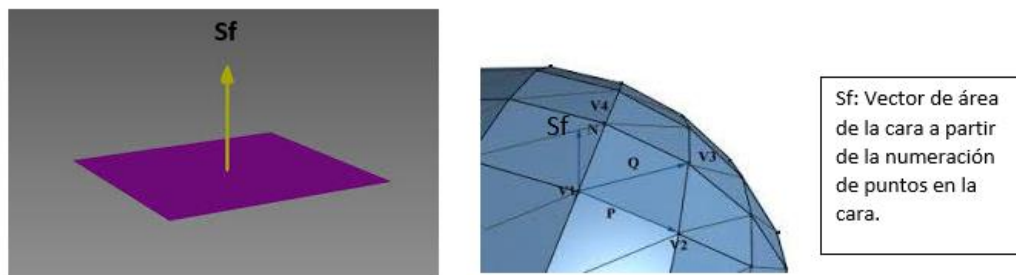
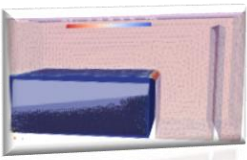


Figura 22 caras del mallado

Existen dos tipos de caras:

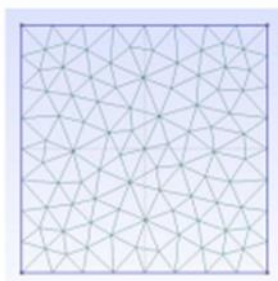
- Caras Internas: que conectan dos celdas (y nunca pueden ser más de dos). Para cada cara interna, el orden de las etiquetas de los puntos es tal que la cara normal apunta a la celda con la etiqueta más grande, por ejemplo, para las celdas 2 y 5, la normal apunta a la 5.
 - Caras Límite: que pertenecen a una celda ya que coinciden con el límite del dominio. Por lo tanto, una cara de límite es abordada por una celda (solo) y un parche de límite. El orden de las etiquetas de los puntos es tal que las caras normales apuntan fuera del dominio computacional. Esto genera que se debe tener en cuenta que las caras se pueden deformar, es decir, los puntos de la cara no necesariamente se encuentran en un plano.
3. Celdas: Una celda es una lista de caras en orden arbitrario. Las celdas deben tener las siguientes propiedades.



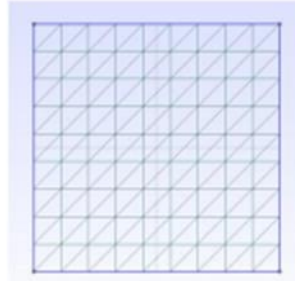
- Las celdas deben ser contiguas y cubrir completamente el dominio computacional y no deben superponerse entre sí.
- Cada celda debe cerrarse geoméricamente, de modo que cuando todos los vectores de área de la cara están orientados para apuntar hacia afuera de la celda, su suma debe ser igual al vector cero para la precisión de la máquina; el polígono DEBE SER CERRADO.
- Cada celda debe cerrarse topológicamente de manera que todos los bordes de una celda sean utilizados por exactamente dos caras de la celda en cuestión.

4. Perímetro: es un límite a una lista de parches, cada uno de los cuales está asociado con una condición de límite. Un parche es una lista de etiquetas de caras que claramente deben contener solo caras límite y no caras internas. Se requiere que el límite esté cerrado, es decir, la suma de todos los vectores de área de la cara del límite equivale a cero para la tolerancia de la máquina.

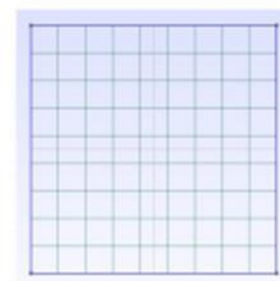
Es fácil generar automáticamente mallas no estructuradas que consisten en triángulos o tetraedros para geometrías complejas. Sin embargo, las mallas estructuradas con elementos cuadriláteros o hexaedros tienen varias ventajas sobre las mallas no estructuradas en OpenFOAM. (Figura 23).



**A- Malla triangular
No estructurada**

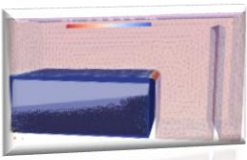


**B- Malla triangular
Estructurada**



**C- Malla cuadrilátera
Estructurada**

Figura 23 caras del mallado



Las mallas estructuradas son más fáciles de implementar en una secuencia natural que las mallas no estructuradas. En general el programa puede resolver mallas estructuradas de manera más eficiente. La desventaja de las mallas estructuradas es que tienen poca adaptabilidad a geometrías complejas

No existe una definición clara de lo que es una "buena" malla, pero la calidad de una cuadrícula generalmente se mide por las métricas principales; no ortogonalidad, sesgo, relación de aspecto y suavidad. Los umbrales de estas métricas que definen una malla de alta calidad varían de un solucionador a otro.

La no ortogonalidad se define como el ángulo entre el vector del área de la cara, S_f , y el vector de centro a centro, d . Este ángulo puede causar errores numéricos cuando se incluyen términos difusivos.

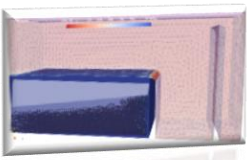
La relación de aspecto es la relación entre el ancho máximo y mínimo de una celda. Las relaciones de aspecto grandes disminuirán la eficiencia y la precisión de los solucionadores lineales en OpenFOAM.

Además, las relaciones de aspecto grandes introducen errores de interpolación al difuminar el gradiente, lo que provoca la difusión numérica. Las relaciones de aspecto grandes deben evitarse especialmente en áreas donde el flujo cambia rápidamente y el gradiente es grande. La relación de aspecto debe ser lo más cercana posible a 1, pero el umbral estándar en OpenFOAM es 1000.

También es importante evitar saltos repentinos en el tamaño de las celdas manteniendo la malla suave.

Los saltos repentinos en el tamaño causarán un error de interpolación, agregando difusión a la solución. Para garantizar que la malla sea suave, la diferencia entre el volumen de celda mínimo y máximo debe ser lo más pequeña posible.

Como último paso en un procedimiento de mallado es un estudio de refinamiento, donde la densidad de la malla aumenta al agregar más celdas. La malla se hace cada vez más fina hasta que se alcanza la independencia de la cuadrícula, lo



que significa que no hay cambios significativos en la solución cuando se refina la cuadrícula. Los procesos de refinamiento también pueden incluir agregar celdas localmente dentro de las capas límite para capturar características de flujo significativas. Sin embargo, es importante no "sobre-mallar", ya que esto puede hacer que el modelo se vuelva ineficiente e irresoluble.

Métodos de generación de malla

Se han investigado tres métodos diferentes de generación de mallas. Los primeros dos métodos, blockMesh y snappyHexMesh, son utilidades de malla proporcionadas con OpenFOAM que pueden convertir mallas de una amplia gama de softwares externos. El enfoque principal de este proyecto ha sido el software externo Gmsh, ya que se encontró que es un método rápido y fácil de usar.

Malladores, análisis y selección.

BlockMesh

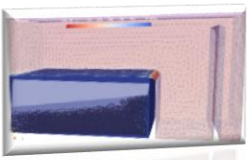
Es la herramienta de generación de mallas más básica en OpenFOAM y se puede utilizar para generar mallas de bloques simples para geometrías de hexaedros. El caso del tutorial de cavidad se utiliza para explicar esta utilidad. El caso de la cavidad es una simulación 2D con flujo incompresible e isotérmico en una cavidad con una pared móvil en la parte superior.

Características clave:

- malla hexagonal estructurada
- construido usando bloques
- admite la clasificación del tamaño de celda
- admite bordes de bloques curvos

Restricciones:

- requiere una conectividad constante de bloque a bloque



- el orden de los puntos es importante

Es muy adecuado para geometrías simples que se pueden describir con unos pocos bloques, pero difícil de aplicar en casos con una gran cantidad de bloques debido a los requisitos de contabilidad, es decir, la necesidad de gestionar la conectividad y el orden de los puntos.

Toda la información sobre la malla se puede encontrar en blockMeshDict, ubicado en la carpeta constant/polymesh. Para empezar, el tamaño de la malla se puede escalar con el comando "convertToMeters". A partir de entonces, dentro de este archivo de diccionario debe definirse:

1. todos los vértices de referencia de la malla;
 2. todos los bloques de construcción de la malla, cada bloque compuesto por:
 - 8 vértices (vértices repetidos, para colapsar bordes);
 - definición de clasificación;
 - recuento de células sobre cada eje principal;
 3. opcionalmente, se pueden asignar definiciones de borde especiales para bordes específicos en bloques, como arcos y splines;
 4. asignar caras de bloques a nombres de parches;
 5. definir funciones especiales asociando y/o fusionando parches.
- BLOCKMESH:

BlockMesh es la herramienta de generación de mallas más básica en OpenFOAM y se puede utilizar para generar mallas de bloques simples para geometrías de hexaedros. El caso del tutorial de cavidad

A partir de 0, los vértices se definen como se ve en la siguiente Figura.24

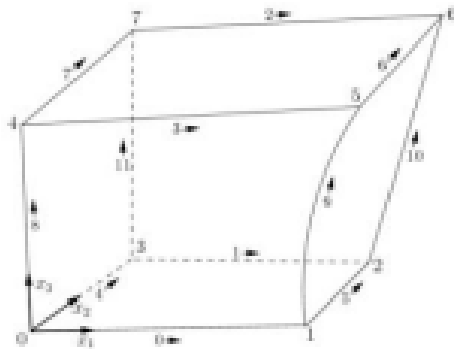
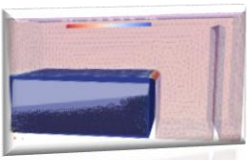


Figura 24 caras del mallado

Definición de vértices y parches en el blockmeshdict

La siguiente entrada define el bloque hexaedro a partir de una lista ordenada de números de vértices y con el número de celdas en cada dirección. Las últimas entradas definen los parches de límite como una lista de caras y les asigna nombres de parche y tipos de parche (propiedades físicas). Las caras se definen como listas de vértices por la regla de la mano derecha, por ejemplo (0 3 2 1) significa la cara inferior en la Figura. El límite "frontAndBack" está vacío, lo cual es necesario para una simulación 2D.

OpenFOAM siempre funciona como una herramienta CFD 3D, pero al hacer que estos parches de límites estén vacíos, se puede "engañar" a OpenFOAM para que funcione en modo 2D. Al ejecutar el comando "blockMesh", toda la información sobre la malla se transfiere a puntos, caras, celdas y archivos de límites en la carpeta constante/polimalla. Simulación 2D de caso de cavidad con malla generada con blockMesh (Figura 25)

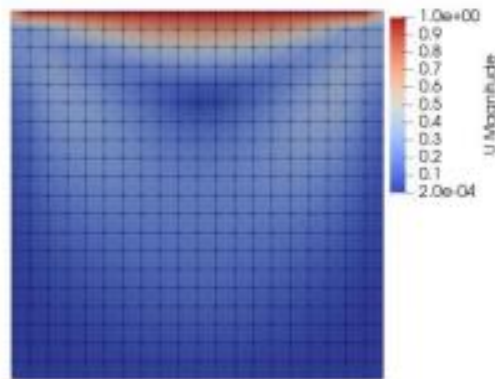
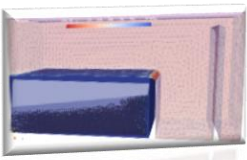


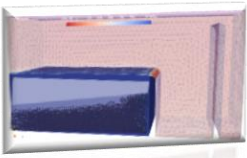
Figura 25 simulación y mallado

Usando blockMesh para exportar blockMeshDict a “.obj” visualmente los archivos blockMeshDict, blockMesh puede interpretar el archivo del diccionario y exportarlo a un archivo .obj , que puede abrirse con cualquier software 3D compatible, como ParaView.

Se deberá seguir los siguientes pasos:

1. Se utilizará el argumento -blockTopology para volcar un archivo blockTopology.obj: `blockMesh -blockTopology`
2. La numeración de vértices en este archivo es consistente con la de los vértices en el archivo blockMeshDict.
3. El archivo blockTopology.obj se puede visualizar en el siguiente software 3D:
 - o Visualice directamente con JavaView;
 - o Visualice directamente en ParaView

Como resumen podemos decir que la utilidad blockMesh se usa principalmente para geometrías simples o como una herramienta para generar una malla inicial en el procedimiento snappyHexMesh.



GMSH

Este software facilita la visualización de la malla a medida que se genera en comparación con otros métodos. Las geometrías se pueden crear utilizando la interfaz gráfica de usuario (GUI) o utilizando el propio lenguaje de secuencias de comandos de Gmsh.

Gmsh es una poderosa herramienta para crear mallas estructuradas en bloques. Puede ser difícil crear una malla estructurada a partir de una sola zona cuando la geometría es compleja. Por lo tanto, el dominio de la geometría se puede dividir en sub volúmenes de hexaedros más pequeños, donde se crean mallas estructuradas, como por ejemplo, las métricas de calidad de malla de un cilindro se pueden aumentar dividiendo la geometría en nuevas subdivisiones, como se muestra a continuación (Figura 26)

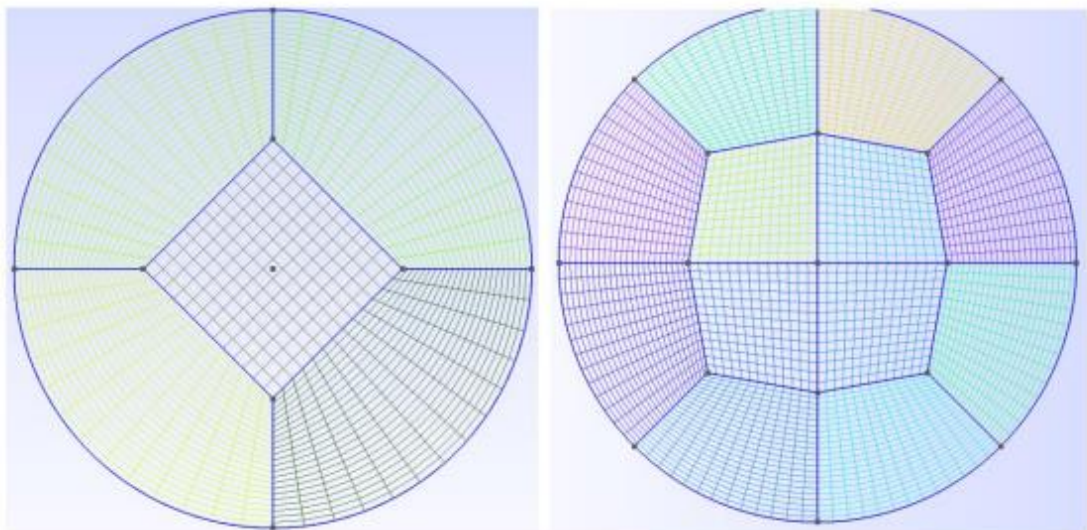
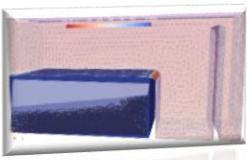


Figura 26 Cilindro con estructura de bloque creado usando Gmsh.

SNAPPYHEXMESH

SnappyHexMesh es una herramienta de OpenFOAM que se utiliza para generar mallas para geometrías 3D más complejas. Existen tutoriales de snappyHexMesh que se encuentra en FOAM



TUTORIALS/mesh/snappyHexMesh que se puede usar como caso base y debe copiarse del directorio del tutorial.

Generación de malla hexagonal rápida

Esta utilidad puede generar cualquier geometría 3D a partir de una superficie triple (superficie construida con superficies angulares triangulares) en un formato de estéreo litografía (STL) de buena calidad. El archivo STL puede generarse en una herramienta externa de diseño asistido por computadora (CAD) y agregarse a la carpeta constant/triSurface. En este ejemplo, se utiliza un archivo STL de una geometría de cilindro simple.

Para generar el mallado inicial en snappyHexDict se crea una malla inicial dividiendo la geometría en una cuadrícula de hexaedros ejecutando el comando blockMesh (definido en blockMeshDict). A partir de entonces, las celdas que se cruzan con el dominio del límite de flujo se "eliminan" ejecutando el comando snappyHexMesh (Figura 27)

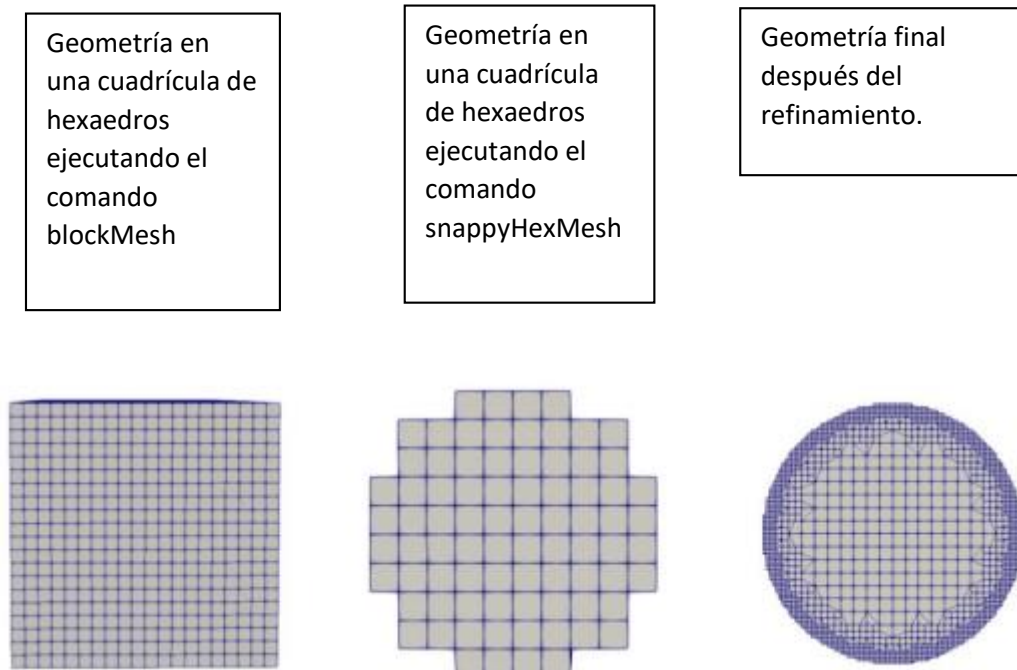
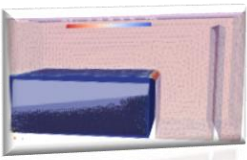


Figura 27 distintos tipos de mallado y refinado.



En el archivo snappyHexMeshDict hay una serie de parámetros de refinamiento por región a las paredes y que se mejoran aumentando el número de iteraciones, además se pueden agregar capas de celdas a parches de límites específicos.

SnappyHexMesh es una utilidad que puede generar geometrías muy complejas automáticamente a partir de geometrías de superficie. Sin embargo, se necesitan algunos ajustes de los parámetros de snapControl y los parámetros de refinamiento.

El diccionario de geometría describe que toda la geometría de entrada requerida por snappyHexMesh deberá ser:

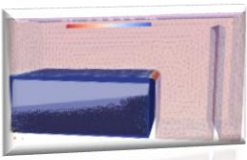
- la superficie para adaptarse a, por ejemplo, superficies trianguladas y formas analíticas
- regiones para refinamiento volumétrico o superficial
- establecer restricciones en caras internas para generar conjuntos de caras o zonas de caras para regiones

La fase de ajuste intenta adaptar la malla almenada para que se ajuste a la geometría de entrada del proyecto a realizar (Canal). Estos controles se encuentran en el subdiccionario snapControl.

El ajustar implica proyectar y transformar la malla, por ejemplo, en superficies y características, en un proceso iterativo. Si las adaptaciones invalidan los criterios de calidad de la malla, el paso se deshace y se vuelve a reproducir utilizando parámetros modificados. La secuencia asegura que la malla resultante alcance una calidad mínima, a expensas de la conformación de la geometría completa.

La buena práctica es comenzar con los valores predeterminados y ajustarlos solo después de inspeccionar la malla.

Los parámetros deben establecerse para encajar en las superficies y entidades por separado.



El algoritmo primero suaviza la malla en los parches y en el volumen. Luego, en la etapa de transformación, desplazar los vértices hacia la superficie. Solo aquellos vértices son atraídos por la superficie que se encuentran en la región definida por la longitud del borde local multiplicada por la entrada de tolerancia del diccionario `snapControls`.

Si se viola la calidad de la malla, los vértices se mueven hacia atrás en una fracción dada del paso (palabra clave `errorReduction` en el diccionario `snappyHexMeshDict.meshQualityControls`). Después de comprobar la calidad de la malla, tiene lugar el siguiente intento de mover el punto hacia la geometría. Este proceso se repite hasta alcanzar el número máximo de iteraciones. Cada paso es reversible.

Después de la alineación exitosa o de quedarse sin iteraciones, la malla se limpia de caras planas no ortogonales innecesarias.

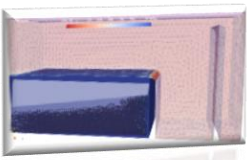
Ajuste de características

La malla se debe ajustar a las entidades después del paso de ajuste de superficie. Mientras que durante el ajuste de la superficie los puntos se desplazan en la dirección normal a la superficie, el desplazamiento hacia el borde es más complicado. Por lo tanto, normalmente se necesitan más iteraciones.

Las características se pueden especificar explícitamente mediante la utilidad `surfaceFeatureExtract` que crea el archivo `eMesh` (ubicado en `constant/triSurface` el directorio) con la especificación de la línea característica. Otra opción es utilizar la definición de características implícita. En tal caso, `snappyHexMesh` no lee el archivo `eMesh` y define los bordes afilados. El algoritmo implícito se comporta correctamente en mallas simples sin esquinas afiladas.

Materiales y Equipos

Equipo informático necesario utilizado para el presente trabajo de modelación:

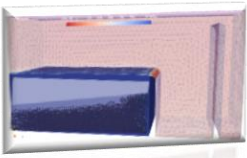


Para poder llevar a cabo el proyecto, se investigó qué necesidades y requerimientos se deben tener en cuenta al momento de seleccionar el equipo informático apto para todo el proceso de modelación.

- PC NOTEBOOCK –
- PROCESADOR: Intel Core i7
- Cantidad de Núcleos 4 o mas
- Modelo del Procesador 8565U
- Memoria: Disco sólido con capacidad de 1TB
- Memoria RAM: 8 GB
- Tipo de disco HDD 1TB
- Sistema Operativo Linux - Windows
- Tamaño de pantalla 15.6 pulgadas
- Resolución de pantalla 1920 X 1080
- Placa de video: AMD Radeon 520
- Conectividad a Wi-Fi
- Puerto HDMI
- Bluetooth
- Batería 3 Celdas



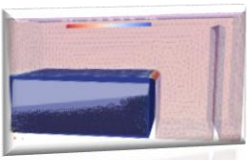
Figura 28 Equipo informático utilizado.



CAPITULO 3

COMPORTAMIENTO DE LAS PARTICULAS





CAPITULO 3

COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS

Simulaciones para modelar el comportamiento de las partículas dentro de la cámara

Para la modelación del comportamiento de las partículas arrastradas por el fluido dentro de la cámara se utilizó el solver DPFOAM, con la modelación de tipo Goldschmidt (anexo 2).

Los datos Iniciales de simulación:

- Porcentaje de partículas interviniente: 20% (dato obtenido del análisis de gravimetría realizado a la muestra de partículas arrastradas. (capitulo 1)
- Tamaño de las partículas: 0.0010m (dato obtenido del análisis de gravimetría realizado a la muestra de partículas arrastradas)
- Velocidad del fluido en dirección del eje (en base al dato obtenido del análisis de caudales que ingresa en cámara)
- $U_x = 0\text{m/s}$
- $U_y = 0\text{ m/s}$
- $U_z = 0.5845\text{m/s}$ (en base al dato obtenido del análisis de caudales que ingresa en cámara)
- Caudal de Ingreso: $1000\text{m}^3/\text{hs} - 1.28\text{m}^3/\text{s}$ (en base al dato obtenido del análisis de caudales que ingresa en cámara)
- Modelo: Lagrangiano
- $P = 0\text{ Pa}$
- Dimensiones del volumen de control
- Volumen de la cámara: (Figura 29)
- Solver utilizado: MPPIFOAM – DPMFOAM

Procedimiento realizado:

Se relevó la cámara objeto de estudio, se diseñaron los planos en AutoCAD ® luego se la modelo en 3D con Salome® (figura 29)



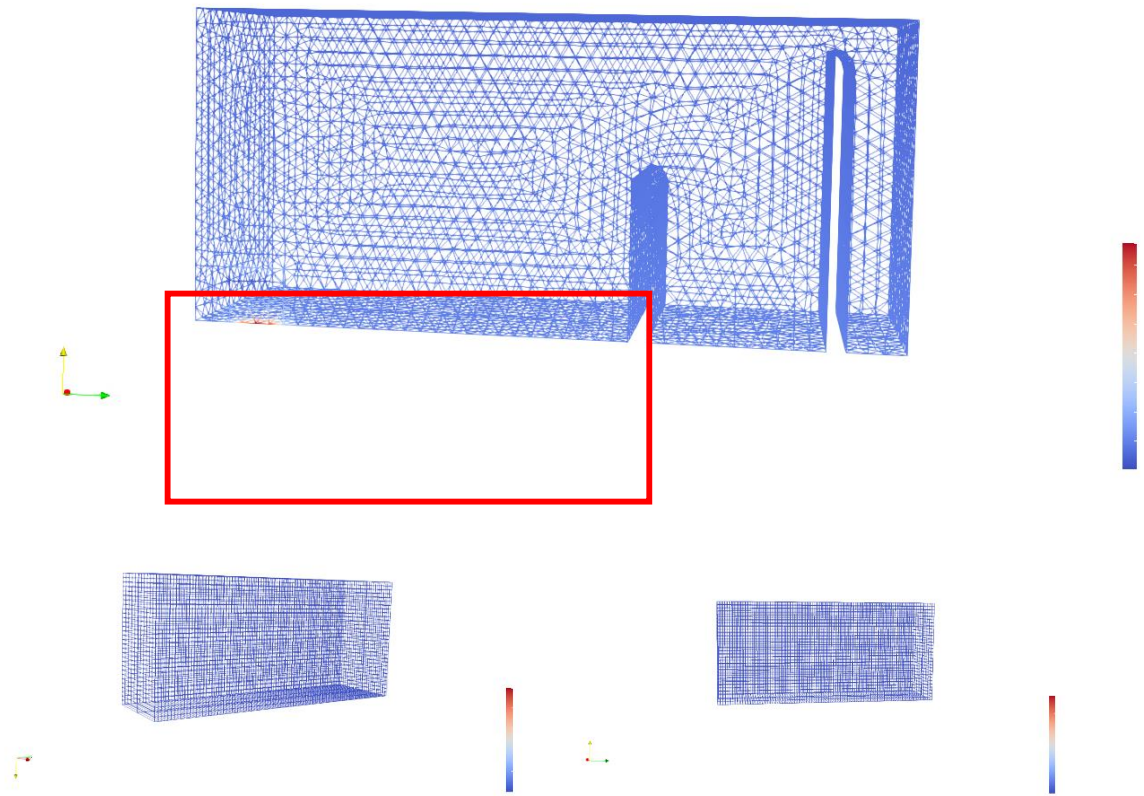
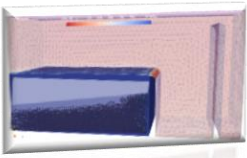


Figura 29 diseño y mallado de la cámara en base a datos tomados in situ y análisis de planos y fotografías

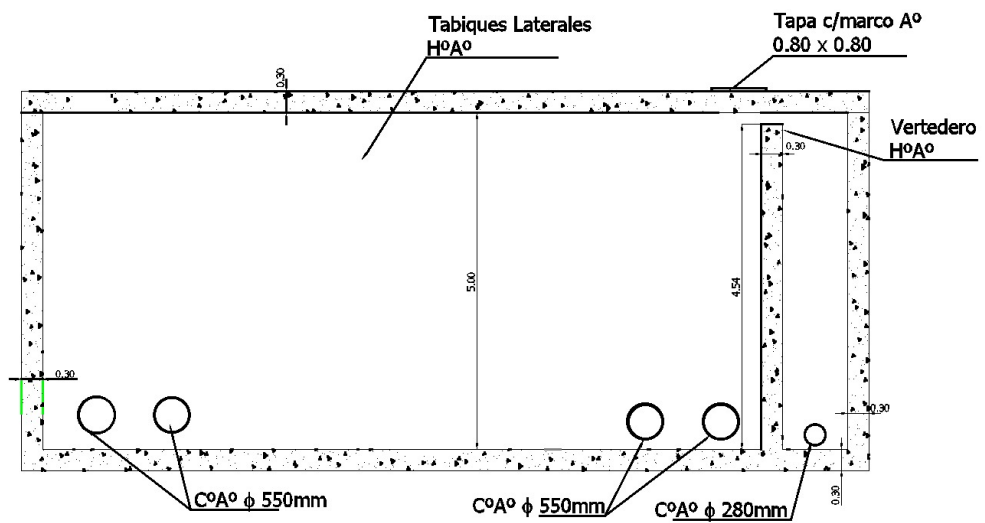
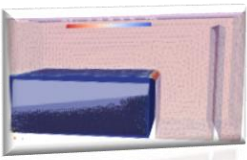


Figura 30 plano en AutoCAD de la cámara



Resultados

De un estudio de 554 simulaciones a diferentes alturas de pantalla se presentan los siguientes resultados.

Con el objeto de calcular el tiempo de desborde de la cámara. Se variaron las alturas de vertederos, las medidas utilizadas fueron a 0.5 m, 0.8 m, 1 m, 1.2 m, 1.5 m, 1.8 m, y 2.2m. Cada dominio fue variando en función de la altura, el área analizada como volumen de control corresponde a lo marcado en rojo de la figura 29. Las medidas de largo y ancho se mantuvieron en 3.20m x 7.00m, lo que variaba es la altura de desborde de los vertederos (figura 31). En las siguientes figuras se observan vistas superiores de las simulaciones (Figura 32),

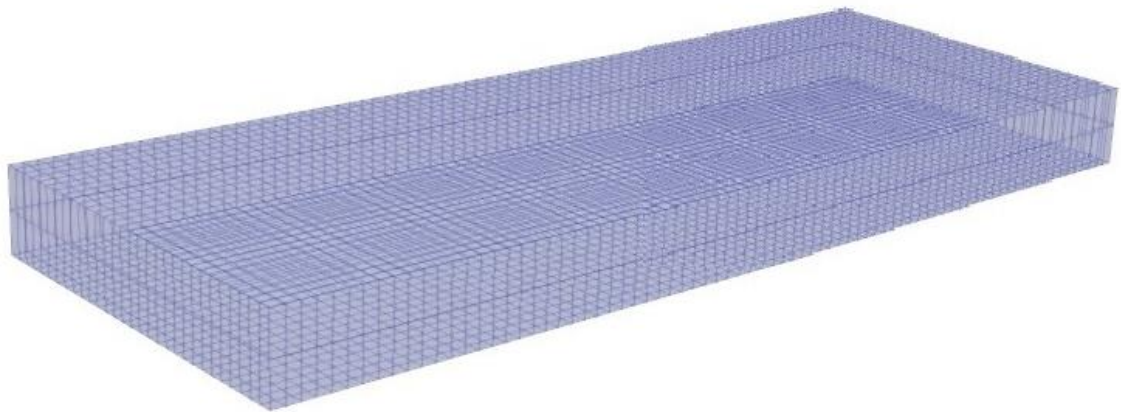


Figura 31 dominio estudiado en la simulación para 0.5m altura de desborde del primer ensayo.

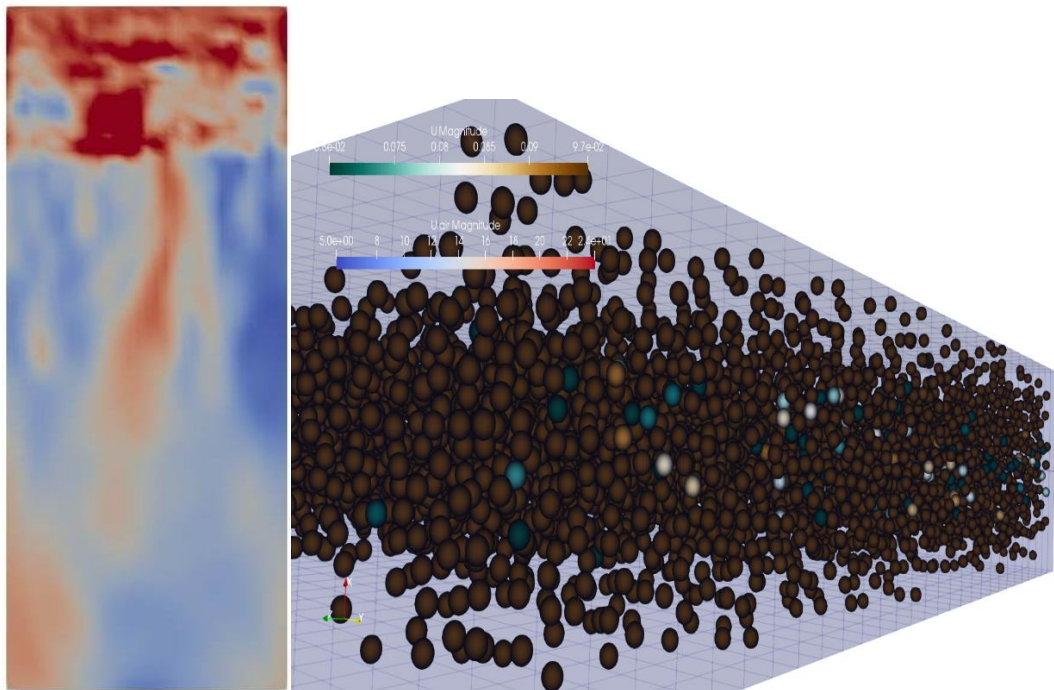
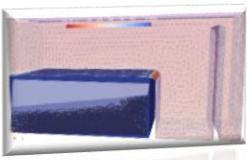


Figura 32 vista vertical del dominio simulado, el color rojo representa las máximas velocidades cuando choca el fluido en la pared del vertedero, en la figura de al lado se representan las partículas que se van depositando en el fondo.

Se puede observar que al comienzo de la simulación uno de los buscó conocer el comportamiento de las partículas dentro de la cámara, es por esta condición que se empezó la simulación con el volumen de control vacío, para poder visualizar el comportamiento desde el comienzo.

El color rojo indica que, al comenzar a ingresar las partículas en la cámara, estas lo hacen con una gran velocidad (coincidente con el comportamiento del fluido) es por esto que se ve de color variando entre rojo claro a oscuro.

Esto describe que se concentran aún más las velocidades al tener contacto con la pantalla al final del volumen de control, ya que encuentran un obstáculo y genera vorticidades.

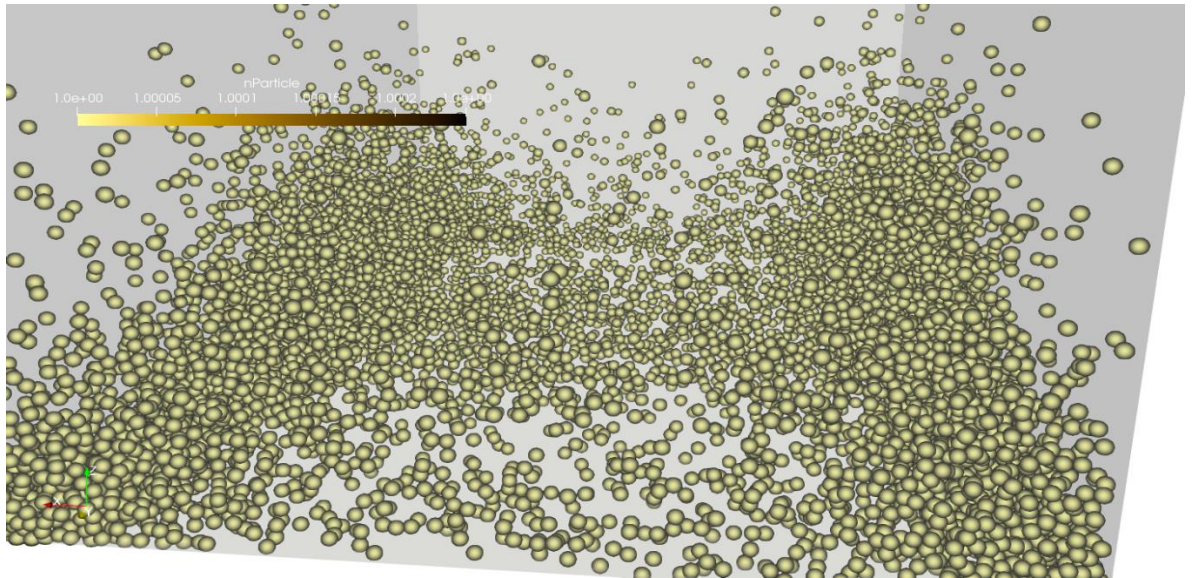
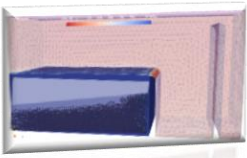
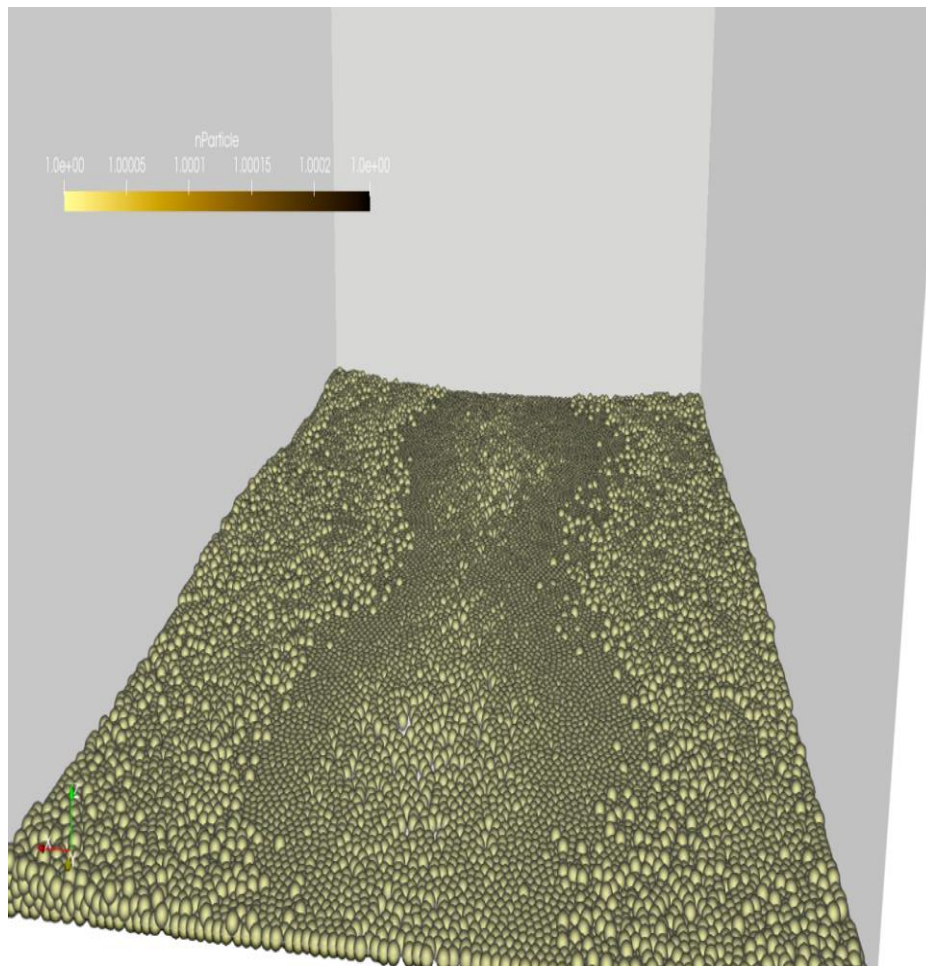


Figura 33 vista de las partículas en la cámara, el tamaño es a gran escala sólo para que puedan ser visualizadas.



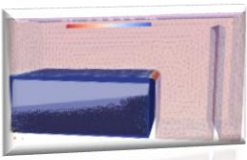


Figura 34 vista lateral con partículas de sólidos magnificada acumulándose en los laterales de las paredes de la cámara

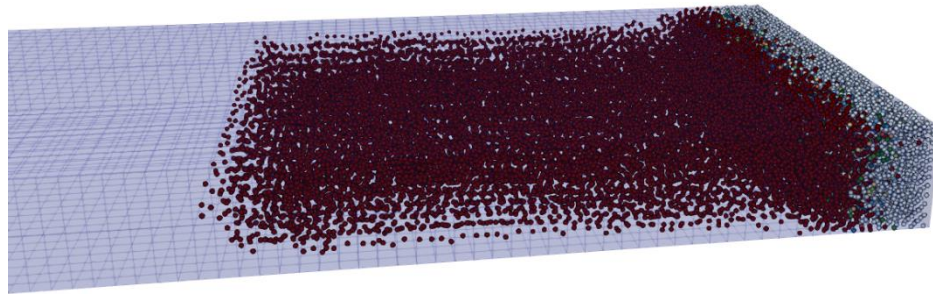


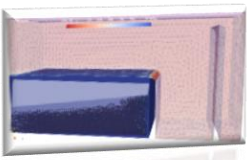
Figura 35 acumulación de partículas en función del tiempo de desborde y altura de la pantalla diseñada en la simulación a 1 m de altura de desborde

A medida que corre la simulación se puede observar como las partículas van siguiendo el curso del fluido llenando la cámara agua debajo de la pantalla, (Figuras 33,34,35 y 36) donde se observa que las altas velocidades en el fluido se da en la corriente central de la cámara, esto nos indica que las partículas de solido se encontraran dispersas y se acumularán en el perímetro de la cámara a ambos lados.

Una vez que por medio de la simulación finaliza el llenado del volumen en la cámara aguas abajo de la pantalla, se modelo para diferentes alturas como 0.50m, 0.80m, 1.00m, 1.20m, 1.50m 1.80m y 2.16m. (Tabla 9)

Tabla 9 resultados de los tiempos de desborde para diferentes alturas

Altura h (m)	Tiempo t (min)
0,5	63
0,8	101
1	130
1,2	154
1,5	190
1,8	211
2,2	269,46
X= 1,95	240



Se observa el tiempo que este llevo en lograr una acumulación de partículas que desborde la pantalla a dichas alturas, este tiempo fue el que se correlaciono para obtener la altura definitiva de la pantalla para un periodo de 240min, corroborando que este tiempo corresponde al total, para el caudal designado durante todo el proyecto. Se definió como resultado una altura de 1.95m.-

Para cada una de las alturas se calcularon los tiempos de desborde y se correlacionaron los datos, en base a lo expuesto anteriormente se calculó el tiempo en que las partículas superan la altura de la pantalla propuesta (Figuras 33, 34 y 35). De los datos obtenidos (Figura 36) Se obtuvo una correlación matemática que responde a la ecuación

$$y = 125.87 x^{0.9654} \quad R^2 = 0.9947$$

Donde:

- x: altura de la pantalla
- y: tiempo de desborde

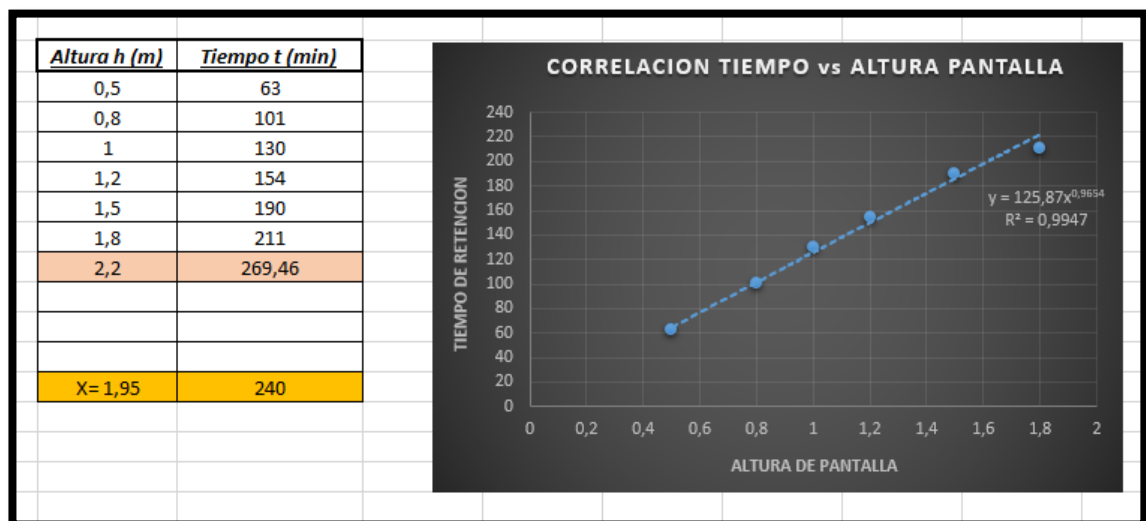
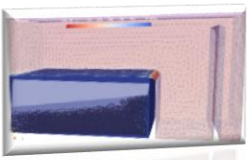
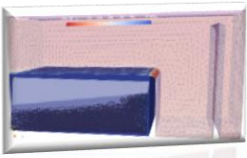


Figura 36 correlación entre tiempo de desborde y altura de la pantalla diseñada



Como fue preestablecido al inicio del presente trabajo, el tiempo de retención necesario es de 240 min. Es el tiempo limitante para evitar que las partículas afecten el sistema de conducción aguas abajo.

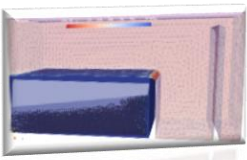
En virtud de los resultados obtenidos de la correlación matemática realizada en base a las distintas simulaciones, se concluye que para un tiempo de 240 minutos se necesita una pantalla de 1.95 m.



CAPITULO 4

COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO





CAPITULO 4

COMPORTAMIENTO DEL FLUIDO

Para la realización de las simulaciones se utilizó el solver de OpenFOAM InterFOAM (anexo 1).

El solver InterFOAM se utiliza específicamente para simular la dinámica de interfaz entre dos fluidos inmiscibles en movimiento (aire y agua). Este solver es ideal para modelar problemas de flujo multifase donde se requiere simular la interacción entre dos fluidos que no se mezclan, como, por ejemplo, el flujo de agua y aceite, burbujas de gas en líquido, o cualquier otro escenario donde exista una clara interfaz entre dos fluidos inmiscibles.

InterFOAM se basa en el método de volúmenes finitos y resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para cada fase (Capítulo 2), considerando la tensión superficial en la interfaz entre los dos fluidos. Este solver es ampliamente utilizado en aplicaciones de ingeniería y ciencias ambientales donde es crucial modelar con precisión la interacción entre fluidos inmiscibles.

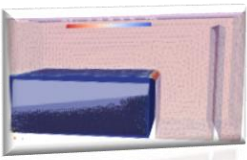
Los datos Iniciales de simulación INTERFOAM:

- Porcentaje de caudal interviniente: 100%
- Dirección de la Gravedad
- $g_x = 0 \text{ m/s}^2$
- $g_y = -9.81 \text{ m/s}^2$
- $g_z = 0 \text{ m/s}^2$
- Conducto equivalente de Ingreso = $0,785 \text{ m}^2$
- Caudal de Ingreso: $1000 \text{ m}^3/\text{hs} - 1.28 \text{ m}^3/\text{s}$

Dirección del flujo

- $g_x = +1$
- $g_y = 0$
- $g_z = 0$

- Condición inicial de la cámara: 0 (vacío)



- $P = 0 \text{ Pa}$

Dimensiones del volumen de control

- Longitud total = 11,20m
- Ancho total = 3,20 m
- Altura total = 5,00 m

En base al cálculo del capítulo anterior la pantalla propuesta tiene 1.95m (Figura 37)

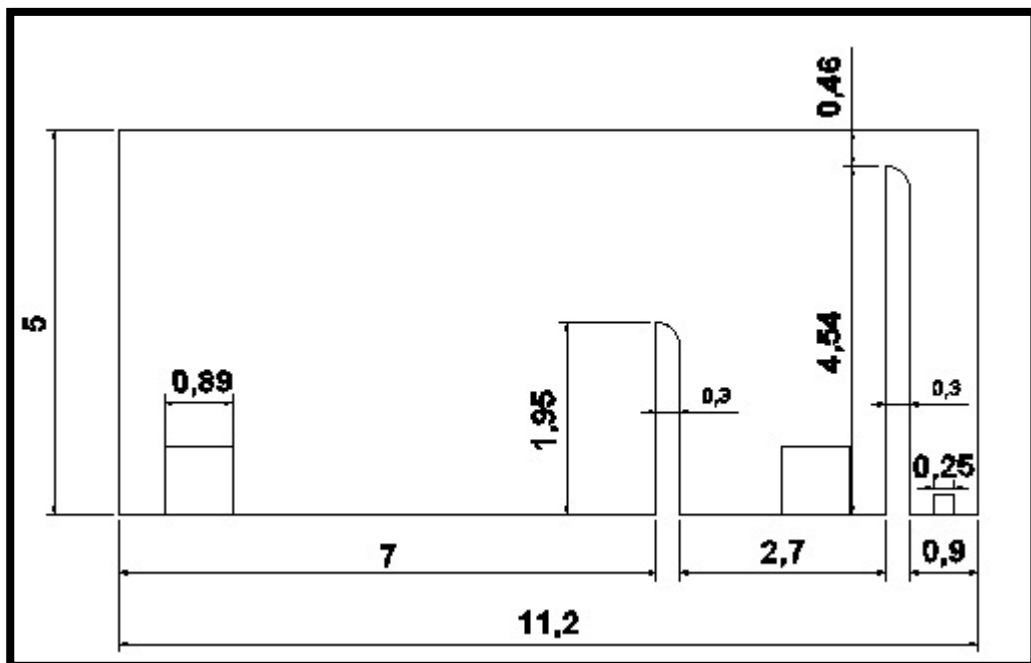
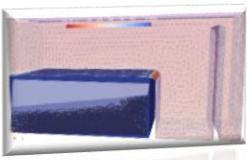


Figura 37 Geometría en formato CAD:

Simulaciones para calcular el tiempo de desborde

El diseño 3D de la cámara se realizó en Salome® se dibujo la misma en base al plano realizado en AutoCAD® (Figura37)

Se realizó el mallado de la cámara en BlockMesh y su refinado en snappyHex Mesh ambos aplicativos de OpenFoam.



El dominio computacional comprende el análisis de 8000 celdas, este tamaño de celda es el limite computacional del equipo informático con el que se ejecutaron las simulaciones (capitulo 2). (Figura 38)

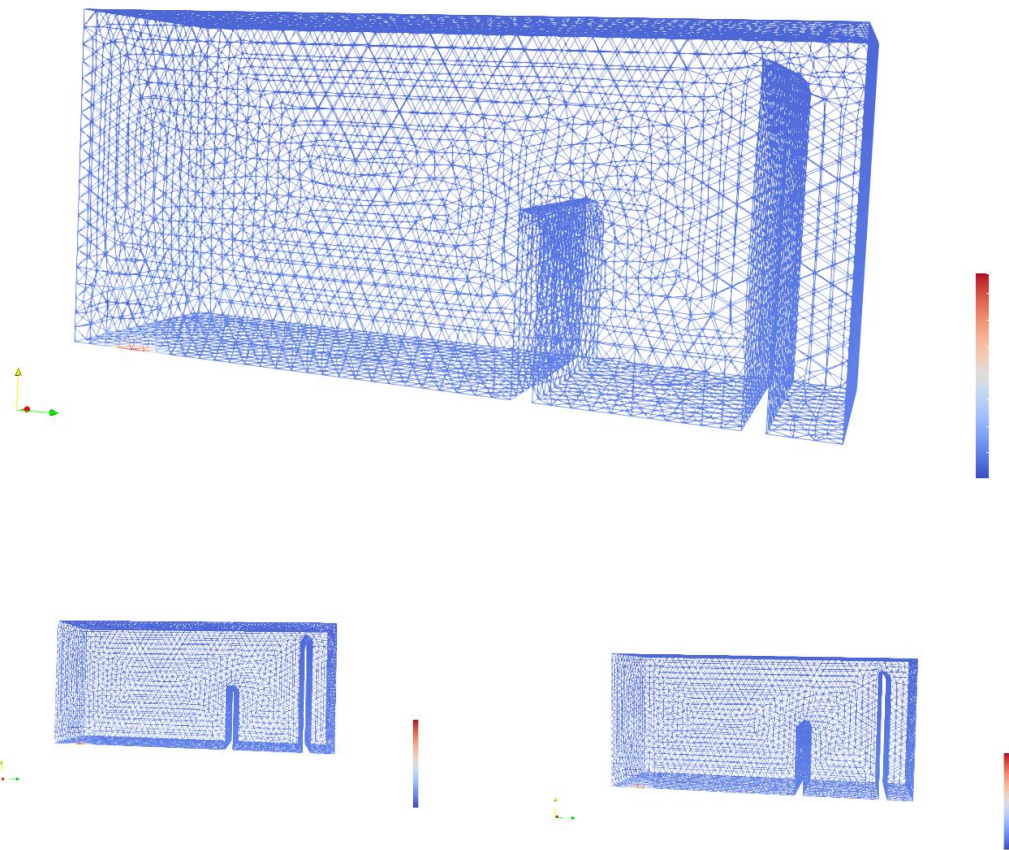


Figura 38 Diseño de la cámara en Salomé® y mallado de la cámara en blockMesh y snappyHexMesh

Resultados

Para el presente ensayo se realizaron 225 simulaciones evaluando el comportamiento del fluido en la cámara hasta llegar a la altura del vertedero propuesto de 1.95 m de altura.

Luego de un análisis exhaustivo del comportamiento del fluido, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas en InterFOAM

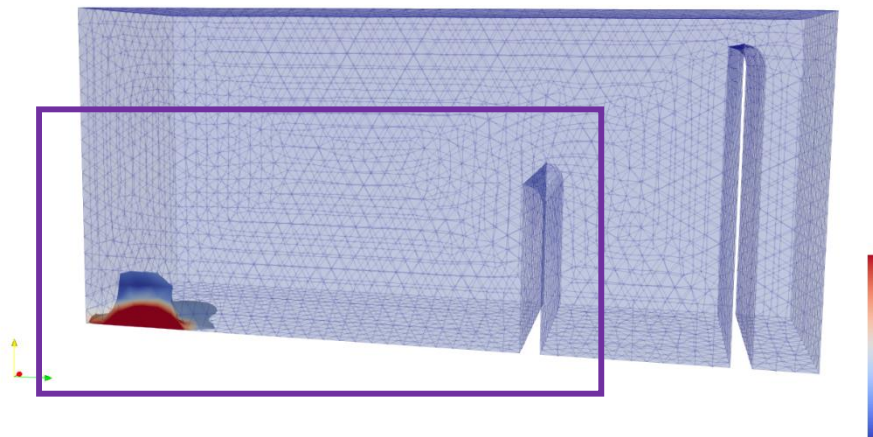
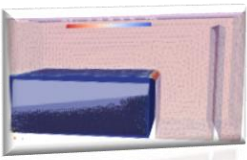
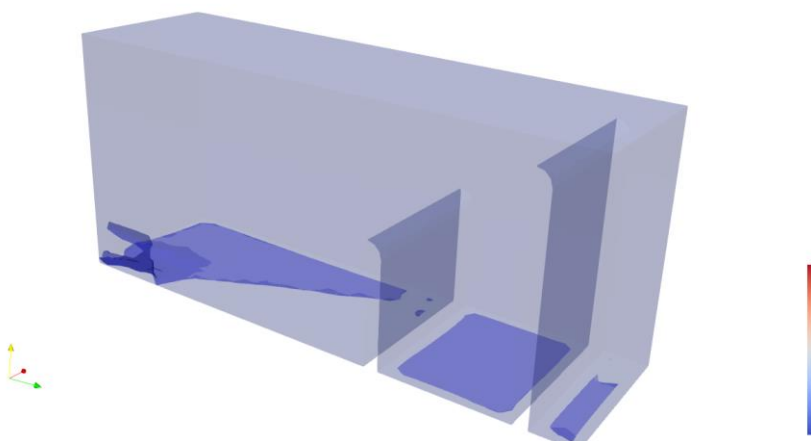


Figura 39 simulación en InterFOAM tiempo 1 min ingreso de agua a la cámara

En la figura 39 se puede observar que al comienzo de la simulación uno de los interrogantes era conocer el comportamiento del fluido dentro de la cámara, es por esta razón que se empezó la simulación con el volumen de control vacío sin partículas para poder visualizar el comportamiento desde el inicio. El recuadro morado de la figura 39 corresponde al volumen de control analizado.

El color rojo al inicio de la simulación indica que, al ingresar el fluido, éste lo hace con una gran velocidad, ya que viene con velocidad desde la cañería y hay un descenso de la misma cuando la cámara comienza a llenarse.



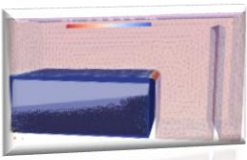


Figura 40 simulación en InterFOAM tiempo 10 min ingreso de agua a la cámara

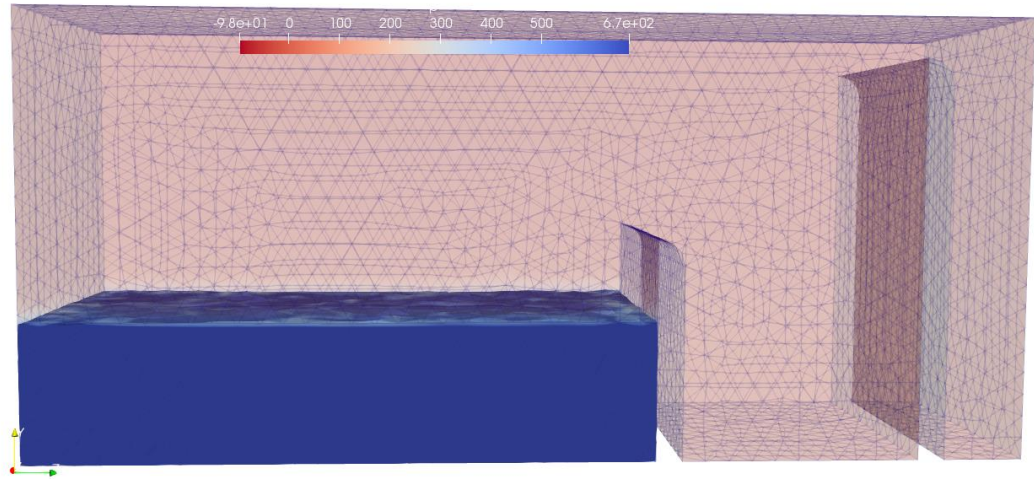
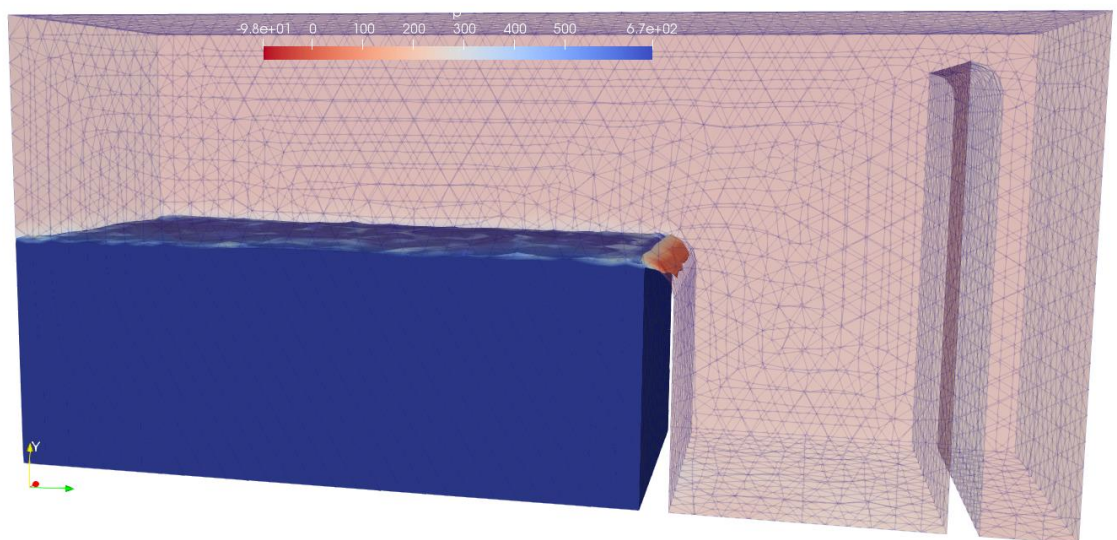


Figura 41 simulación en InterFOAM a 1.5 m de altura de pantalla

A medida que corre la simulación se puede observar como el fluido va llenando la cámara agua antes hasta la altura de la pantalla existente, donde se observa que las altas velocidades en el fluido se dan en la corriente central de la cámara, esto nos indica que las partículas de solido se encontraran dispersas y se van acumulando en el perímetro de la cámara a ambos lados (Figura 41 y 42)



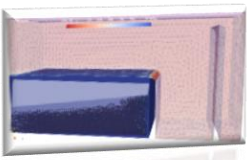


Figura 42 simulación en InterFOAM a 1.95 m de altura de pantalla

Una vez que finaliza el llenado del volumen en la cámara aguas abajo de la pantalla, se observa el tiempo que este llevo en realizarlo, corroborando que este tiempo corresponde al total de desborde. (figura 43)

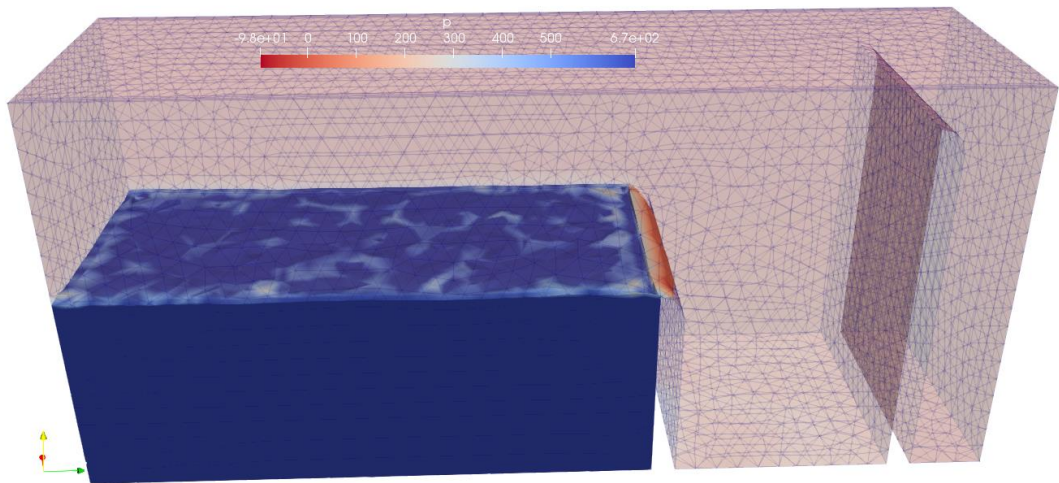
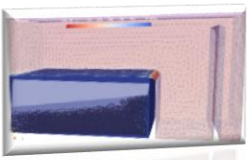


Figura 43 simulación en InterFOAM al rebase, superando los 1.95m



Estimación y comparación de los resultados de los tiempos con las diferentes alturas de la pantalla.

En base a los resultados de las simulaciones se procede al cálculo de la altura de la pantalla retenedora de sólidos por método empírico (Apunte Ingeniería Sanitarias U.T.N FRLR – Ing. Díaz) en base al reglamento de ENHOSA.

Desarenador, cálculo de la velocidad el flujo en la cámara

El cálculo de la altura para la pantalla también se corroboró analíticamente. En base a la Formula de Camp se calculó la velocidad del desarenador

La velocidad en un desarenador se considera lenta, cuando está comprendida entre 0.20 m/s a 0.60 m/s. La elección puede ser arbitraria o puede realizarse utilizando la fórmula de Camp:

$$v = a\sqrt{d} \text{ (cm/s)}$$

Dónde:

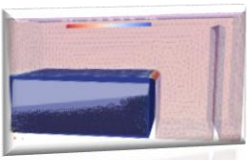
- d = Diámetro (mm).
- a = constante en función del diámetro.

a	d
51	0.1
44	0.1 – 1
36	1

$$V \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}} \right) = a \sqrt{d}$$

$$V \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}} \right) = 36 \sqrt{1 \text{ (mm)}}$$

$$V = 36 \left(\frac{\text{cm}}{\text{seg}} \right) = 0,036 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$



Cálculo de la Longitud en la cámara

Para el cálculo de la longitud de la cámara se utilizó los parámetros propuestos en la siguiente tabla (Tabla 10)

Tabla 10 parámetros de diseño para desarenadores rectangulares de flujo horizontal

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	
		INTERVALO	TÍPICO
Tiempo de retención hidráulico	s	45 - 90	60
Velocidad horizontal	m/s	0,24 - 0,40	0,3
Velocidad de sedimentación para remover:			
- Material tamiz # 50 (0,30 mm)	m/s	2,80 - 3,10	2,9
- Material tamiz # 100 (0,15 mm)	m/s	0,60 - 0,90	0,75
Longitud adicional por aumento en turbulencia a la entrada y la salida	%	25 - 50	30

Datos:

- Velocidad horizontal = 0.30m/s
- Velocidad de Sedimentación = 0.036m/s
- Tiempo de permanencia= 60seg

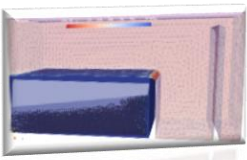
- **Altura:**

$$h = Vel_{sed} \cdot \text{Permanencia}$$

Siendo que la Vel_{sed} es igual a 0,036m/seg.

$$h = 0,036 \frac{m}{seg} \cdot 60seg.$$

$$h = 2,16m.$$



- **Ancho:**

$$b = \frac{Q_{\max}}{(V_h \cdot h)}$$

Siendo que la Vel_h es igual a 0,30m/seg.

$$b = \frac{0,28 \frac{m^3}{seg}}{\left(0,30 \frac{m}{seg} \cdot 2,16m.\right)}$$

$$b = 0.43m \text{ adoptó } 0.50m$$

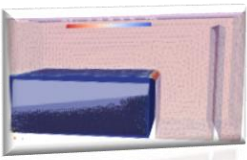
- **Longitud:**

$$L = \frac{Q \left(\frac{m^3}{seg}\right) \cdot \text{Permanencia (seg)}}{\text{Area}(m^2) \cdot Vel_h \left(\frac{m}{seg}\right)}$$

$$L = \frac{0.28 \left(\frac{m^3}{seg}\right) \cdot 60 \text{ (seg)}}{(2,16m \cdot 0,50m) \cdot 0,30 \left(\frac{m}{seg}\right)}$$

Se toma un 50% más para estar del lado de la seguridad

$$L = 51m. = 51000cm.$$



En base a los datos teóricos se encuentran existen limitantes en la modelación ya que la longitud de la cámara existente es menor a 7,50m; se procederá a tomar como datos valores reales de la cámara.

- **Altura:**

$$h = \text{Vel}_{\text{sed}} \cdot \text{Permanencia}$$

Siendo que la Vel_{sed} es igual a 0,036m/seg.

$$h = 0,036 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \cdot 60\text{seg.}$$

$$h = 2,16\text{m. Se adoptara como altura } 2,50\text{m}$$

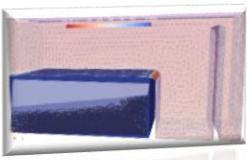
- **Ancho:**

$$b = \frac{Q_{\text{max}}}{(V_h \cdot h)}$$

Siendo que la Vel_h es igual a 0,30m/seg.

$$b = \frac{0,28 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}}{\left(0,30 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \cdot 2,16\text{m.}\right)}$$

$$b = 0,43\text{m} \rightarrow \text{Se adopta } 3,20\text{m ancho de la camara real.}$$



- **Longitud:**

$$L = \frac{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \right) \cdot \text{Permanencia (seg)}}{\text{Area}(\text{m}^2) \cdot \text{Vel}_h \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}} \right)}$$

$$L = \frac{0.28 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \right) \cdot 60 (\text{seg})}{(2,5\text{m} \cdot 3,20\text{m}) \cdot 0,30 \left(\frac{\text{m}}{\text{seg}} \right)}$$

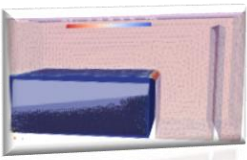
$$L = 7\text{m.} = 700\text{cm}$$

Conclusiones

Mediante las diferentes simulaciones que se realizaron en este proyecto, se analizó el tiempo de desborde de la cámara para así poder llegar a una conclusión en base al modelado CFD, de la altura necesaria y/o eficiente para la problemática planteada anteriormente.

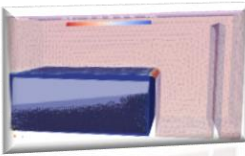
En base a los resultados del presente capítulo y el anterior se llega a la siguiente conclusión:

- 1- se define la creación y diseño estructural de una pantalla de dimensiones 3.20m de longitud y 1.95m de altura.
- 2- Dadas las circunstancias, se plantean dos opciones para la construcción de la pantalla: una de hormigón armado y otra de estructura metálica.



El cálculo realizado analíticamente nos arrojó un resultado de una altura para la pantalla de 2,16m. Este valor nos indica una altura necesaria pero no óptima, es por este motivo, se buscó lograr llegar a una altura con mayor precisión modelando la cámara rompecarga a través del software de diseño y cálculo dinámica de fluido computacional con OpenFOAM, este programa entregó como resultado que la altura de pantalla necesaria, óptima y eficiente para cumplir con el objetivo deseado debía ser de 1,95m.

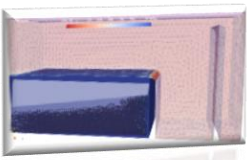
Se llega a la conclusión que cotejando los resultados obtenidos de manera empírica y computacional difieren en menos de un 15%. De igual manera se desarrollará el proyecto tomando como altura final y definitiva de la pantalla 1,95m para todos los cálculos implicados.



CAPITULO 5

PROPUESTAS DE SOLUCION





CAPITULO 5

Propuesta 1. Cálculo de la pantalla de hormigón armado

Para el cálculo se consideró las cargas actuantes sobre la losa, estas cargas serán producto de la combinación de esfuerzos hidrostáticos de la presión que ejerce el agua sobre la pantalla, más el esfuerzo que genera la acumulación de sólidos.

Para lograr calcular los esfuerzos a los que estará sometida la pantalla, se trabajó en conjunto con el Ing. Parco Parisi Enzo quien superviso el cálculo de este.

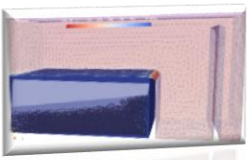
Se trabajó con el reglamento CIRSOC 103 parte I Reglamento Argentino para construcciones sismo resistentes – Construcciones en General y VI “Puentes de Hormigón Armado” para considerar las acciones sísmicas sobre la masa de hormigón.

Método Mononobe-Okabe

El método Mononobe-Okabe es una técnica utilizada en ingeniería sísmica para analizar la presión del suelo sobre estructuras de contención, como muros de contención o muros de gravedad, durante un evento sísmico. Este método se utiliza para calcular la fuerza sísmica horizontal que actúa sobre la estructura debido al empuje del suelo.

El método Mononobe-Okabe considera la interacción suelo-estructura y tiene en cuenta tanto el peso del suelo como la aceleración sísmica. Se basa en la teoría de presión del suelo activa y pasiva, y proporciona una estimación de la presión del suelo durante un terremoto.

A continuación, se describe de manera general el procedimiento del método Mononobe-Okabe para el cálculo de presiones laterales del suelo:



Consideraciones Iniciales:

- Se parte del supuesto de que el suelo actúa como un fluido viscoso durante un terremoto.
- Se considera que la presión del suelo varía con la profundidad y la aceleración sísmica.

Determinación de la Presión Activa y Pasiva del Suelo:

- Se calcula la presión activa del suelo, que tiende a empujar la estructura.
- Se calcula la presión pasiva del suelo, que tiende a resistir el movimiento de la estructura.

Cálculo de la Presión Sísmica Efectiva:

- Se determina la presión sísmica efectiva, que es la diferencia entre la presión activa y la presión pasiva del suelo.
- Factor de Amplificación Sísmica:
- Se aplica un factor de amplificación sísmica para considerar el efecto dinámico del terremoto en la presión del suelo.

Determinación de la Presión Sísmica Resultante:

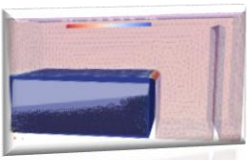
- Se obtiene la presión sísmica resultante que actúa sobre la estructura de contención.

Es importante tener en cuenta que el método Mononobe-Okabe es una aproximación simplificada y que existen variaciones y mejoras en este método a lo largo del tiempo. Además, es fundamental realizar un análisis detallado de las condiciones específicas del suelo y de la estructura para obtener resultados precisos y seguros.

Opción propuesta 1: Cálculo de pantalla de hormigón

Esfuerzos actuantes, datos:

- Zona Sísmica de la Provincia de la Rioja: 2 → **C** = Coeficiente sísmico = $2 C_0$



$$C_o = 0,005$$

$$C = 2 \cdot 0,05 = 0,1$$

- $\gamma_s = 1900 \text{ Kg /m}^3$
- $H = 1.95\text{m}$
- $\theta = 30^\circ$
- Coef. Fricción suelo = $(2/3) \cdot \theta = 0,66 \cdot 30^\circ = 19,8^\circ$
- H° : H-25

La bibliografía utilizada para el cálculo de la pantalla de H° A° fue "SUELOS, FUNDACIONES Y MUROS (Pag 485 a 487) , BRAJA DAS (Cap 12), y para el cálculo de las Presiones con aplicación sísmica seguimos los pasos de la norma NAA 80, "Norma Antisísmica Argentina del año 1980"(Pag 15 y 16) . También se tuvo en cuenta las fuerzas actuantes en condiciones estáticas del muro como el empuje del suelo, peso propio, etc.

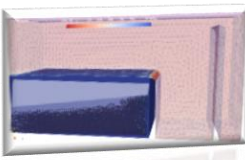
Según la NNA 80:

El Empuje Activo Total del Suelo durante el Sismo es igual:

$$E_{as} = E_a + \Delta E_{as} = (1 - C_v) \cdot \left[q \cdot H \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\alpha - \beta)} + \gamma_s \cdot \frac{H^2}{2} \right] \cdot K_{as}$$

En donde:

- **E_{as}**: empuje activo total del suelo durante el sismo (t/m)
- **E_a**: empuje activo estático resultante del diagrama de presiones que ejerce el suelo sobre el muro. Se obtiene como caso particular de E_{as} sustituyendo en la formula **$C=C_v=0$** .
- **ΔE_{as}** : incremento del empuje activo originado por la acción sísmica. Se obtiene como diferencia entre E_{as} y E_a .
- **γ_s** : peso específico del suelo (t/m³)
- **H**: altura del relleno medida desde la superficie de fundación del muro (m)
- **q**: intensidad de la sobrecarga uniformemente distribuida sobre la superficie del suelo (t/m²)



(Ec. Mononobe-Okabe)

$$K_{as} = \frac{\cos^2(\varnothing - \alpha - \theta)}{\cos(\theta) \cdot \cos^2(\alpha) \cdot \cos(\delta + \alpha + \theta)} \cdot \frac{1}{\left\{ 1 + \left[\frac{\sin(\varnothing + \delta) \cdot \sin(\varnothing - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \alpha + \theta) \cdot \cos(\alpha + \beta)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2}$$

En donde:

- **C_v**: coeficiente sísmico vertical
- **C_v=0,5C**
- **C**: coeficiente sísmico definido por la siguiente expresión: C=2C_o, donde C_o es el coeficiente sísmico zonal determinado según 3.2.1.1.b. en Pag 5 de la NAA 80
- **∅**: ángulo de fricción interna del suelo
- **B**: ángulo que forma la superficie del relleno con la horizontal
- **α**: ángulo que forma el paramento posterior del muro con la vertical
- **δ**: ángulo de fricción entre el paramento posterior del muro y el relleno

$$\theta = \arctg \frac{C}{1 - C_v}$$

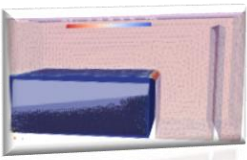
- Si (∅-θ-β) es negativo se adopta (∅-θ-β)=0

El incremento ΔE_{as} se considerará aplicado a una altura igual a 2/3 H, medida desde la base del muro.

En zona 2 el coeficiente sísmico de zona es: C_o=0,050

Para el caso particular en que:

- La superficie del relleno contenido sea horizontal (B=0)
- El paramento posterior del muro sea vertical (α=0)



- El ángulo de fricción entre el paramento del muro y el relleno sea nulo ($\delta=0$)

El incremento del empuje activo ΔE_{as} podrá calcularse mediante la siguiente formula:

$$\Delta E_{as} = 0,375 \cdot \gamma_s \cdot H^2 \cdot C \cdot \left[1 + \frac{2q}{\gamma_s \cdot H} \right]$$

Para el cálculo del empuje activo del suelo:

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot H^2 \cdot \text{tg} \left[45^\circ - \frac{\phi}{2} \right]$$

El empuje total será: Igual al Empuje Activo Estático más Incremento del Empuje Activo Sísmico

$$E_{as} = E_a + \Delta E_{as}$$

Esfuerzo sobre la estructura de $H^\circ A^\circ$ de sostenimiento:

$$\sigma H = K_{ae} \times \sigma v \quad \mu 0,375 \cdot \gamma_s \cdot H^2 \cdot C \cdot \left[1 + \frac{2q}{\gamma_s \cdot H} \right]$$

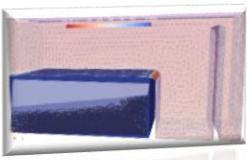
$$\sigma H = K_{ae} (\sigma v + \mu)$$

$$\sigma H = K_{ae} (\gamma_s \cdot H + \gamma_w \cdot H)$$

$$\sigma H = K_{ae} \left(1,9 \frac{Tn}{m^3} \times 1,95m + 1 \frac{Tn}{m^3} \times 1,95m \right)$$

$$\sigma H = K_{ae} (\gamma_{SS} \cdot H)$$

$$\sigma H = 0,587 \left(2 \frac{Tn}{m^3} \times 1,95m \right) = 2,289 \frac{Tn}{m^3}$$



Cálculo de losas cruzadas por el método de Kalmanok

El objeto de estudio de este método son las placas delgadas o losas planas. Como fue detallado en el problema planteado, se toma en consideración la exactitud del método de cálculo empleado o la diferencia existente entre distintos métodos de cálculo y la manera de aminorar esta diferencia. Para el planteamiento del problema del análisis a flexión de losas planas se partirá de dos tipos de teorías: 1. Método de los Elementos Finitos, y 2. Método de cálculo de placas de A.S Kalmanok. Con estos dos métodos se procederá a calcular las sollicitaciones de las losas planas, como son la flecha w , y los momentos flectores actuantes.

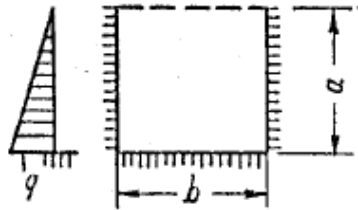
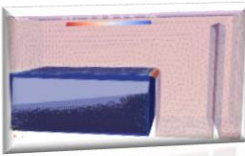
El cálculo de la pantalla teniendo en cuenta los esfuerzos actuantes sobre ella, se elegirá de acuerdo a las cargas y tipo de apoyos la tabla a utilizar en dicho método.

Losas Rectangulares

Para estimar los momentos flectores en losas de varios tramos se pueden emplear expresiones sencillas y tablas que resuelven el caso de losas de un tramo con diferentes condiciones de borde.

A continuación, se muestran algunas tablas para el caso de carga uniformemente repartida y carga triangular tomadas del "Manual para Cálculo de Placas". A. S. Kalmanok.

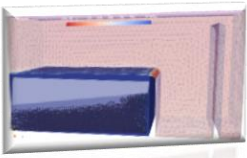
w_{cp}, w_{max}	— flecha en el centro de la placa y flecha máxima;
$M_{c_{cp}}, M_{b_{cp}}, M_{a_{max}}, M_{b_{max}}$	— momentos flectores en el centro de la placa y máximos en el tramo, según las direcciones paralelas a los lados a y b (para $\mu = 0$);
$M_a^0, M_b^0, M_{a_{max}}^0, M_{b_{max}}^0$	— momentos flectores de apoyo en el centro de los lados empotrados y máximos en los lados empotrados;
M_0	— momentos flectores en las esquinas de la placa, que actúan en direcciones con un ángulo de inclinación de 45° con respecto a los ejes coordenados;
$w_0, M_{a_0}, M_{b_0}, M_{b_0}^0$	— flechas y momentos flectores en el medio del tramo y en los lados libres de vínculos de apoyo de la placa;
$R_{a_3}, R_{a_c}, R_{b_3}, R_{b_c}$	— valores totales de las reacciones de apoyo sobre los lados a y b de la placa empotrada y libremente apoyada;



*Tabla 36. — Placa rectangular, em-
potrada en tres lados y con el cuar-
to lado libre de vínculos, solicita-
da por una carga hidrostática.*

$\frac{a}{b}$	w_{cp}	M_a^o	M_b^o	$M_{a\ cp}$	$M_{b\ cp}$	w_o	M_{bo}^o	M_{bo}
0,30	0,00006	-0,0120	-0,0048	0,0002	0,0006	0,00016	-0,0089	0,0028
0,35	0,00011	-0,0148	-0,0066	0,0009	0,0012	0,00024	-0,0112	0,0035
0,40	0,00016	-0,0172	-0,0084	0,0016	0,0018	0,00031	-0,0131	0,0044
0,45	0,00021	-0,0193	-0,0104	0,0024	0,0026	0,00038	-0,0149	0,0054
0,50	0,00027	-0,0212	-0,0124	0,0032	0,0034	0,00044	-0,0164	0,0064
0,55	0,00032	-0,0229	-0,0145	0,0041	0,0042	0,00048	-0,0165	0,0072
0,60	0,00037	-0,0246	-0,0166	0,0050	0,0050	0,00051	-0,0165	0,0079
0,65	0,00042	-0,0262	-0,0186	0,0057	0,0058	0,00053	-0,0164	0,0085
0,70	0,00048	-0,0277	-0,0205	0,0062	0,0067	0,00055	-0,0162	0,0090
0,75	0,00053	-0,0291	-0,0222	0,0065	0,0076	0,00057	-0,0159	0,0094
0,80	0,00059	-0,0304	-0,0238	0,0067	0,0085	0,00058	-0,0153	0,0096
0,85	0,00064	-0,0317	-0,0254	0,0069	0,0094	0,00057	-0,0144	0,0097
0,90	0,00070	-0,0329	-0,0269	0,0071	0,0102	0,00056	-0,0136	0,0096
0,95	0,00075	-0,0340	-0,0283	0,0071	0,0110	0,00055	-0,0128	0,0095
1,00	0,00081	-0,0349	-0,0297	0,0070	0,0118	0,00053	-0,0120	0,0091
1,10	0,00091	-0,0358	-0,0319	0,0068	0,0126	0,00050	-0,0103	0,0083
1,20	0,00100	-0,0375	-0,0338	0,0064	0,0134	0,00046	-0,0088	0,0076
1,30	0,00108	-0,0391	-0,0354	0,0057	0,0142	0,00042	-0,0078	0,0069
1,40	0,00114	-0,0405	-0,0367	0,0049	0,0150	0,00038	-0,0071	0,0063
1,50	0,00119	-0,0418	-0,0378	0,0041	0,0158	0,00035	-0,0064	0,0057
1,75	0,00123	-0,0455	-0,0399	0,0027	0,0179	0,00030	-0,0057	0,0051
2,00	0,00126	-0,0478	-0,0413	0,0016	0,0203	0,00026	-0,0051	0,0046

para las flechas pb^4/D ; para los momentos y las reacciones concen-
tradas de apoyo, pb^2 .



a/b	Coeficientes Kalmanok		P (Kg/m²)	b (m)	Momento en Tramo (Kgm)				Flecha (m)	
					Ma°	Mb°	Macp	Mbcp	Wcp	Wo
0,6 0	Ma°	-0,0246	2289,30	3,20	- 576,68	- 389,14	117,2 1	117,2 1	0,06 5	0,09 0
	Mb°	-0,0166								
	Macp	0,0050								
	Mbcp	0,0050								
	Mb0	0,0079								
	Wo	0,00051								
	Wcp	0,00037								
	D	1364023,87								

h rec	5	h util (m)	0,15	H total (m)	0,20		
FLEXION			ARMADURA				
kr a	kr b	Kr = M/(d² * b * fc)	kz tabla	ρ tabla	As = ρ*b*d (cm²)	As adoptado	Adopto
0,010	0,007		0,956	0,005	7,5	7,8	10 mm c/10cm
			0,951	0,005	7,2	7,8	10 mm c/10cm

Estructura resultante

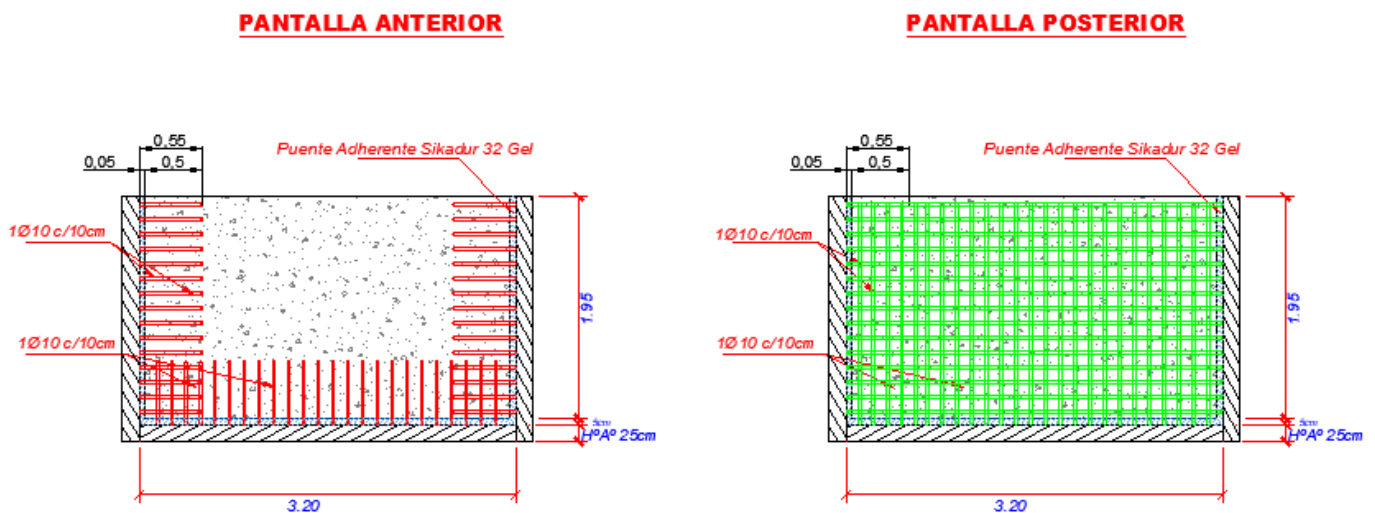
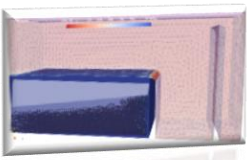


Figura 44 diseño de la pantalla de estructura de hormigón armado



Conclusión el diseño de la pantalla de hormigón armado

La Solución con una Pantalla de Hormigón Armado (figura 44)

Dimensiones:

- ✓ Largo = 3.20m
- ✓ Altura = 1.95m
- ✓ Espesor = 0.20m

Estructura H⁰A⁰: estará compuesta por:

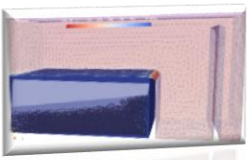
- ✓ Hormigón con una resistencia $F_c = 25\text{Mpa}$
- ✓ Hierro torsionado 10mm en ambas caras

Realización de anclajes:

- ✓ Sikadur 32 gel - Puente adherente entre Hormigón Fresco y viejo, para ello se deberá realizar en un lapso de 3hs máximo.
- ✓ Sikadur 31 - Adhesivo Estructural
- ✓ Anclaje químico - Ampolla RMII Fischer- 12mm x 12cm, estos serán colocados en cada varilla de hierro de la estructura.

Impermeabilización, pintura y acabado:

- Para lograr extender la vida útil de la estructura se deberá realizar una buena impermeabilización para evitar la oxidación de la armadura al estar en contacto permanente con el agua. Para ello se deberá pintar con al menos 3 manos de Pintura Epoxi 4040 sin solvente Apta para superficies que contengan agua potable.

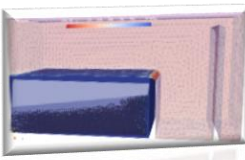


Propuesta 2: Cálculo de la pantalla de estructura metálica

La modelación y cálculo se llevó a cabo con el programa de diseño y calculo "CYPE 3D"

CYPE 3D es un software especializado en el análisis estructural y diseño de edificaciones tridimensionales, incluyendo estructuras metálicas como la pantalla en estudio. Al utilizar CYPE 3D para estructuras metálicas, se pueden llevar a cabo diversas tareas específicas relacionadas con este tipo de material, como las siguientes:

- **Modelado de Estructuras Metálicas:** Permite modelar de forma detallada y precisa estructuras metálicas tridimensionales, incluyendo vigas, columnas, cerchas, entre otros elementos metálicos. En nuestro caso de estudio se diseñó la estructura metálica como una reja con las dimensiones de 3,20m de ancho y 1,95m de altura.
- **Análisis Estructural Avanzado:** Realiza análisis estáticos y dinámicos de estructuras metálicas, considerando cargas gravitatorias, presiones hidráulicas, sísmicas, entre otras. Esto ayuda a evaluar la resistencia y estabilidad de la estructura ante diferentes condiciones de carga, en nuestro caso se tomó una carga triangular sobre cada elemento que compone la reja
- **Diseño de Elementos Metálicos:** Facilito el diseño y dimensionamiento de elementos metálicos que componen la pantalla, como perfiles, uniones, vinculaciones, placas base, entre otros, de acuerdo con la normativa de Aceros laminados y armados: ANSI/AISC 360-10 (LRFD)
- **Comprobación de Normativas:** Verifica el cumplimiento de normativas y reglamentos de construcción específicos para estructuras metálicas, asegurando que la estructura cumpla con los requisitos de resistencia y seguridad.
- **Optimización del Diseño:** Permite optimizar el diseño de estructuras metálicas, considerando la eficiencia estructural, el uso adecuado de materiales y la reducción de costos.



En resumen, CYPE 3D es una herramienta completa y especializada que brinda a los ingenieros y diseñadores la capacidad de modelar, analizar y diseñar estructuras metálicas de manera eficiente y precisa, garantizando la seguridad, estabilidad y cumplimiento de normativas en proyectos de construcción que involucren este tipo de material.

Cálculo de la estructura metálica con el programa CYPE 3D

Normas consideradas

Aceros laminados y armados: ANSI/AISC 360-10 (LRFD)

Estados límite

E.L.U. de rotura. Acero laminado	AISC 360-10 (LRFD) ASCE 7
Desplazamientos	Acciones características

Situaciones de proyecto

Para las distintas situaciones de proyecto, las combinaciones de acciones se definirán de acuerdo con los siguientes criterios:

- Donde:

G_k Acción permanente

P_k Acción de pretensado

Q_k Acción variable

γ_G Coeficiente parcial de seguridad de las acciones permanentes

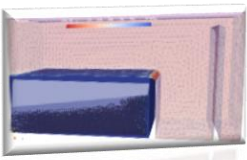
γ_P Coeficiente parcial de seguridad de la acción de pretensado

$\gamma_{Q,1}$

Coeficiente parcial de seguridad de la acción variable principal

$\gamma_{Q,i}$ Coeficiente parcial de seguridad de las acciones variables de acompañamiento

Para cada situación de proyecto y estado límite los coeficientes a utilizar serán:



E.L.U. de rotura. Acero laminado: ANSI/AISC 360-10 (LRFD)

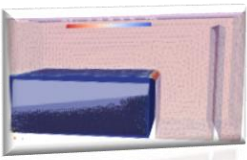
2.3.2 - [1] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.400	1.400

2.3.2 - [2 Lr] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200

2.3.2 - [2 S] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200

2.3.2 - [3 Lr, L] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200

2.3.2 - [3 S, L] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200



2.3.2 - [3 Lr, W] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200

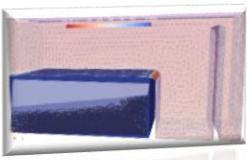
2.3.2 - [3 S, W] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200

2.3.2 - [4 Lr] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200

2.3.2 - [4 S] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200

2.3.2 - [6] (ASCE/SEI 7-10)		
	Coeficientes parciales de seguridad (ϕ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	0.900	0.900

Desplazamientos



	Acciones variables sin sismo	
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.000	1.000

Estructura resultante

La estructura resultante surge del análisis extenso que hace el programa CYPE (anexo 3). A continuación, se muestra grafica resultante y características que debe tener la pantalla propuesta. (figura 45 y 46)

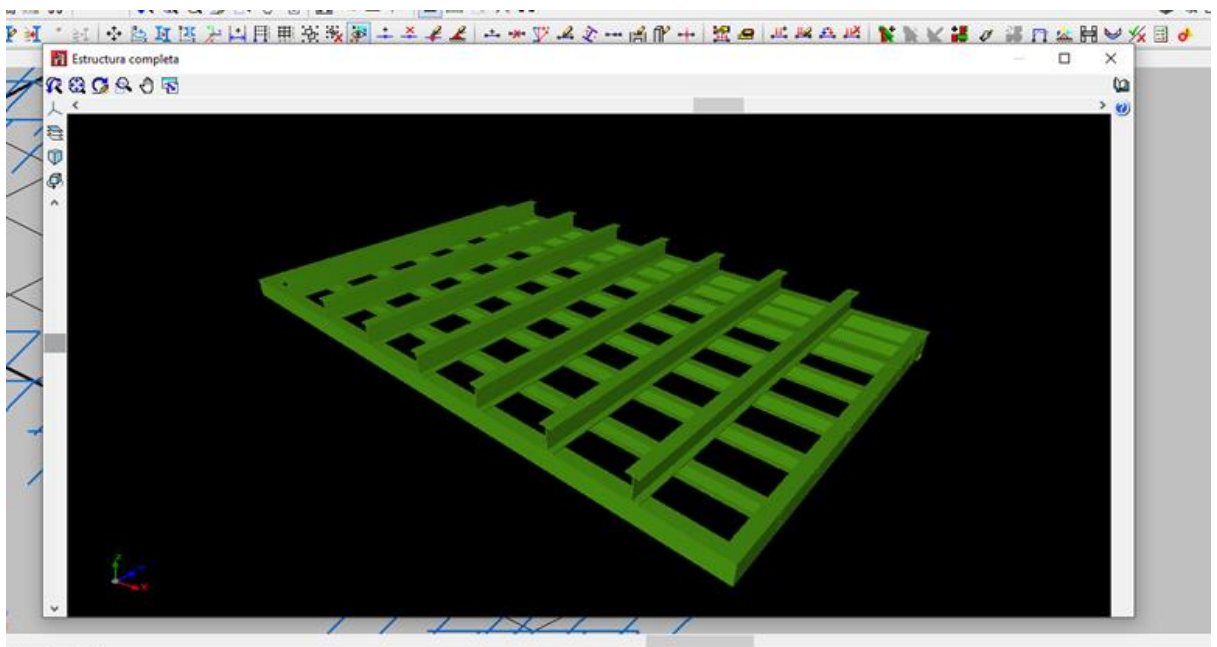


Figura 45 diseño de la pantalla de estructura metálica con el programa CYPE
3D

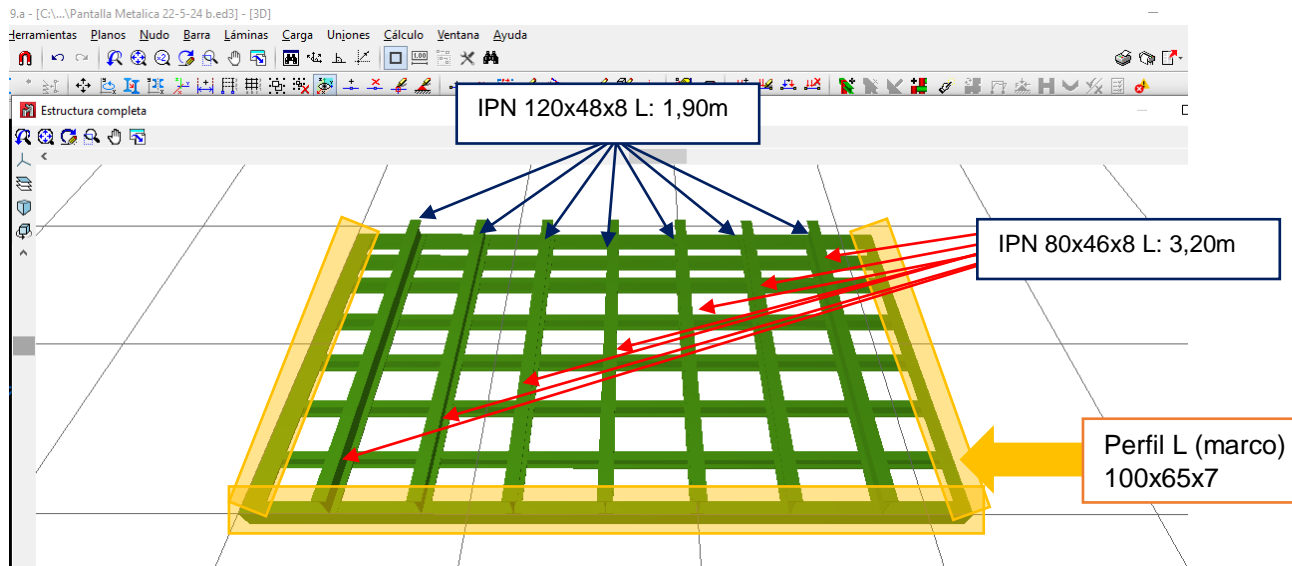
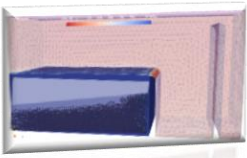
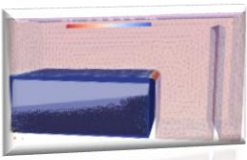


Figura 46 diseño de la pantalla de estructura metálica con el programa CYPE 3D



Conclusiones sobre el diseño de la pantalla metálica

La solución propuesta consiste en una pantalla de estructura metálica que se diseñará de la siguiente manera

Dimensiones:

- ✓ Largo = 3.20m
- ✓ Altura = 1.90m

Estructura metálica: estará compuesta por:

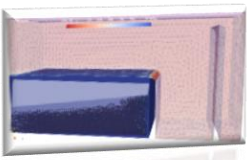
- ✓ Perfiles Horizontales IPN (80x46x8) mm x 3,20m de longitud
- ✓ Perfil Verticales IPN (120x48x8) mm x 1,95m de largo
- ✓ Perímetro sección "U" con Perfil L 100x65x7, el mismo estará empotrado con bulones a las paredes y base de la cámara
- ✓ Chapa $\frac{3}{8}$ " 9,5mm (6,25m²) soldada a la estructura de perfilaría.
- ✓ Las soldaduras se realizarán con Electrodo Inoxidable 308I 3,2mm

Colocación de la estructura metálica

Realización de anclajes:

Anclaje químico de Alta Capacidad de carga - Base Epoxi - Sika AnchorFix 3001

- ✓ Para lograr la estanqueidad de la cámara aguas arriba-estructura-aguas abajo se colocarán Juntas Sika Swell A2010 Hidroexpansible 1,5mm x 3mm en todo el perímetro, entre el perfil del marco y la estructura de hormigón de la losa y paredes.
- ✓ Anclaje Mecánico a través de pernos para sujetar la estructura de perfiles en L 100x65x7mm a las paredes y base de la cámara. Estos serán de tipo Fischer Broca para H^o FWA 16x140mm los cuales estarán colocados cada 40cm en toda la perfilaría del marco.



Impermeabilización, pintura y acabado:

Para lograr extender la vida útil de la estructura se deberá realizar una buena impermeabilización para evitar la oxidación de los perfiles metálicos. Para ello se deberá pintar con al menos 5 manos de Pintura Epoxi 4040 sin solvente Apta para superficies que contengan agua potable.

COMPARACIÓN DE AMBAS PROPUESTAS, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

A continuación, se presentan algunas consideraciones sobre ambas opciones:

Opción 1 Pantalla de Hormigón Armado:

Ventajas:

- Mayor durabilidad a largo plazo.
- Resistencia a la corrosión y al contacto con cloruros.
- Adecuada para entornos agresivos.
- El costo en comparación con la estructura metálica no tiene gran impacto.

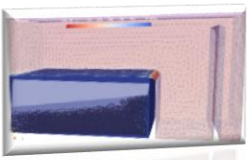
Desventajas:

- Mayor tiempo de construcción.
- Requiere más mano de obra especializada.
- Se deberá modificar la losa de cierre de la cámara, para poder colar el hormigón

Opción 2 Pantalla de Estructura Metálica:

Ventajas:

- Construcción más rápida, lo que reduce el tiempo de desabastecimiento de la cámara rompecarga.
- El costo en comparación con la estructura de hormigón, no tiene gran impacto.



- Flexibilidad en el diseño y fácil de modificar.
- Se puede construir sin tener que modificar físicamente la cámara

Desventajas:

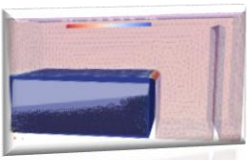
- Menor durabilidad en comparación con el hormigón armado.
- Puede requerir mantenimiento periódico para prevenir la corrosión.

Considerando la necesidad de reducir costos y tiempos de desabastecimiento a corto plazo, la opción de una pantalla de estructura metálica parece ser la más conveniente en este caso. La rapidez de construcción y los menores costos asociados pueden contribuir significativamente a la solución de la problemática actual. Además, la flexibilidad en el diseño y la facilidad de modificación pueden adaptarse a futuras necesidades.

Recomendaciones

Dentro de lo que contempla el proyecto se deberá tener en cuenta las siguientes recomendaciones que ayudaran a un eficiente trabajo de la cámara, generando un control más preciso y alargar la vida útil de la cámara

- Se deberá colocar una abertura de tapa con marco de acero, de dimensiones de 0.80 x 0.80 m, esta permitirá la circulación de aire dentro de la cámara durante el proceso de construcción de la pantalla, como así también como boca de inspección a futuro.
- Se colocará un caño de limpieza y evacuación de partículas de sólidos, el mismo tendrá un diámetro de 200mm y estará ubicado adyacente a la pantalla a construir. Este caño tendrá una longitud de 1.60m la cual llegará a cubrir hasta la mitad de la luz de ancho de la cámara.
- Se colocará una válvula de limpieza mariposa tipo "WAFER" de $\varnothing 200\text{mm}$ a la salida de la cañería de evacuación antes mencionada, esta válvula servirá para la rápida deyección de las partículas de arenas retenidas aguas abajo de la pantalla, hacia el exterior de la cámara; se tendrá en

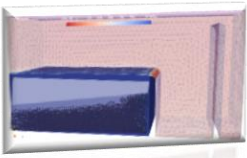


cuenta que esta válvula se colocará con el eje horizontal (colocación de forma particular) para que la pantalla abra en este sentido.

- Cañería de Ø200mm de diámetro en la inmediata salida de la válvula, para lograr la conducción de las partículas desembocando a flujo libre al cauce del Rio Los Sauces.
- Detector de nivel vibratorio con cable de suspensión para sólidos granulados “VEGAVIB 62”; este dispositivo tiene un diseño optimizado de la varilla sin cantos ni orificios evita que los productos se adhieran o atasquen y facilita su limpieza. Se deberá colocar sobre el filo superior de la pantalla terminada. Con este dispositivo se podrá realizar una inspección más precisa de la altura de solidos retenidos acumulados, para luego poner en funcionamiento la cañería y válvula de evacuación de estos.

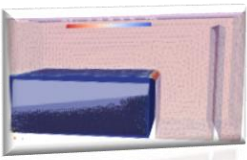
Ventajas

- Costes de mantenimiento mínimos
- Ahorro de tiempo y costes gracias a una configuración sencilla sin producto
- Datos técnicos
- Rango de medición - Distancia 80 m
- Temperatura de proceso -40 ... 150 °C
- Detección de sólidos en el agua



CONCLUSIONES





CONCLUSIONES

El presente trabajo buscó evaluar el diseño de una pantalla para retener sólidos en una cámara rompecarga de agua, mediante la comparación entre los resultados obtenidos a través de simulaciones en CFD, se logró el cometido, se propone una pantalla de 1.95 m de altura que a un tiempo de 240 min da el tiempo suficiente para retener sólidos y evitar que afecte el sistema hídrico aguas abajo. Dicho cálculo también se verificó analíticamente,

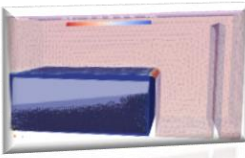
En virtud de lo propuesto se pudo establecer el tiempo de retención de partículas en la cámara, esto será de gran ayuda al momento de prevenir daños, Al determinar la altura de la pantalla desarenadora de la cámara posibilitará realizar las obras correspondientes para la mejora de este punto estratégico del sistema de provisión de agua potable de la ciudad de la Rioja.

Al describir el comportamiento del fluido dentro de la cámara, permitió también aclarar cómo llega el agua hasta la misma y esto sirve para futuros estudios de diseño de una nueva cámara cuando en un futuro haya que reemplazarla.

En base a los resultados obtenidos se propusieron dos soluciones ingenierilmente viables, se analizaron las ventajas y desventajas de cada una de las propuestas.

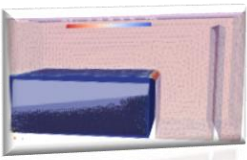
El cálculo de la estructura permitirá ejecutar la obra con la total confianza de que ambas propuestas son viables, sólo queda la decisión política y económica de realizar las mejoras.

En cuanto a los costos de las propuestas se presentan al final en los anexos. En función de lo antes expuesto se propone una solución al problema planteado inicialmente.



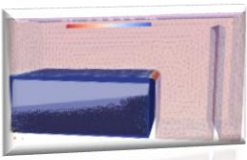
BIBLIOGRAFIA **CONSULTADA**





BIBLIOGRAFIA CONSULTADA:

- + Manual Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica, Autor: Braja Das (Año 2001 – 2da Edición)
- + Manual Mecánica de Suelos, Fundaciones y Muros, Autor: Peter Berry y David Reid (Año 1993 – 1ra Edición)
- + Normativas ENOHSA “Ente Nacional de Obras Hídricas de Saneamiento”
- + Norma NAA 80, “Norma Antisísmica Argentina del año 1980” (1ra Edición).
- + Manual para Cálculo de Placas”. a. s. KALMANOK. (Año 1990 – 1ra Edición)
- + CIRSOC 301 EL (Año 2005)
- + CIRSOC 308 EL (Año 2005)
- + Tablas para Aplicación Reglamento CIRSOC 301/2005 y CIRSOC 302/2005 – Perfiles Laminados y Tubos Estructurales (Año 2005)
- + Manual de Estructuras Metálicas – Proyectos por Estados Limites (Año 2005 - 7ª edición). Autor: Troglia Gabriel
- + Normativa de Aceros Laminados y Armados: ANSI/AISC 360-10 (LRFD) (Año 2005)
- + Software de Calculo y Diseño CYPE 3D – Estructura Metálica (Versión 2019)
- + Aceros Laminados y Armados: ANSI/AISC 360-10 (LRFD) (Año 2005)
- + Plataforma Salome https://www.salome-platform.org/?page_id=2430
- + Open Foam Guide: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11/tutorials>
- + Tutoriales Guías YouTube ANSYS : <https://www.youtube.com/@cfd>
- + Ingeniería en Mecánica de Fluidos grupo NSIV:
 - <https://nsiv.io/>
 - <https://cfd21.com/forum/index.php?board=6.0>
- + Guías de Tutoriales a aplicar:
<https://develop.openfoam.com/development/openfoam-plus/-/commit/ab84869c047fbadf673fdd0ceeae437a436ae696>
- + Simulación Lagrangian CFD Support:
<https://www.cfdsupport.com/openfoam-training-by-cfd-support/node440.html>
- + Simulación de Partículas Woldynamics:
<http://www.woldynamics.com/tutorials.html?id=118>
- + Open Understanding DPMFOAM/MPPICFOAM 2015:
https://bugs.openfoam.org/file_download.php?file_id=1030&type=bug



***Proyecto Final: Aplicación de Software de Cálculo y Diseño en Cámara Rompecarga
CFD - OPEN FOAM***

- ✚ Informe de Distribución de Abastecimiento de Aguas en el Departamento capital, Provincia La Rioja otorgado por Ing. Barbeito titular de la cátedra y director del proyecto
- ✚ Informe de resultado de Análisis Granulometría realizado en el GAIA -otorgado por Ing. Barbeito
- ✚ Planos de la Cámara (en Planta) - AutoCAD - otorgado por Ing. Barbeito

