

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO EN LA GENERACIÓN  
DE ESFUERZOS DE ROTURA MEDIANTE CFD-FSI EN EL CUARTO  
FLOCULADOR DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA  
POTABLE LA PASTORA-2025**

**PRESENTADO POR:**

Br. FRED VALENTINO FERNANDEZ HUISÑAY

Br. JULINHO APAZA PAREDES

**PARA OPTAR AL TITULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**ASESOR:**

Ing. CARLOS HUGO LOAIZA SCHIAFFINO

**CUSCO-PERÚ**

**2025**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor CARLOS HUGO LOAIZA SCHIAFFINO  
..... quien aplica el software de detección de similitud al  
trabajo de investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DEL  
FLUIDO EN LA GENERACIÓN DE ESFUERZOS DE ROTURA  
MEDIANTE CFD-FSI EN EL CUARTO FLOCULADOR DE LA  
PIANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE LA PASTORA - 2025

Presentado por: FRED VALENTINO FERNANDEZ HUISÑAY, DNI N° 72506809;

presentado por: JULIHO APAZA PAREDES, DNI N°: 73805483.

Para optar el título Profesional/Grado Académico de .....  
INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el  
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**  
**Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 06 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 16 de ENERO de 2026.

  
Firma

Post firma: CARLOS HUGO LOAIZA SCHIAFFINO

Nro. de DNI: 73870541

ORCID del Asesor: 0000-0003-4405-4185

#### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:546756625

# FRED VALENTINO -JULINHO FERNANDEZ - APAZA

## Tesis\_PTAP\_LaPastora (ofi).pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:546756625

Fecha de entrega

16 ene 2026, 11:04 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

16 ene 2026, 11:18 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis\_PTAP\_LaPastora (ofi).pdf

Tamaño del archivo

29.3 MB

428 páginas

57.191 palabras

285.169 caracteres

# 6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




## Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

## Exclusiones



- N.º de fuentes excluidas

## Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**  
231 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**  
19 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



## DEDICATORIAS

### **Fred:**

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, por el apoyo ya sea económico o emocional, sin su apoyo no hubiera sido posible realizar los estudios a dedicación exclusiva.

Asimismo, a la persona que tuvo mayor injerencia en el desarrollo académico, mi docente asesor Ingeniero Carlos Loaiza, que mas que un apoyo académico fue como un segundo padre para mí, dándome todo el apoyo moral, académico e inclusive personal, sin su apoyo, no se hubiera concluido este trabajo que tantas veces estuve a punto de abandonar por las dificultades.

Este trabajo representa el esfuerzo de casi 2 años de estudios, noches sin dormir, preocupaciones, pero sobre todo una satisfacción de llegar a los resultados esperados, siempre supe que el camino no sería fácil, pero también sabía que algún día se conseguiría

### **Julinho:**

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa de mi vida, y por acompañarme en cada dificultad y cada logro.

A mi padre Teófilo, quien anhelaba verme convertido en ingeniero y fue una fuente constante de motivación. Aunque hoy ya no esté físicamente presente, su ejemplo, sus enseñanzas y su sueño viven en mí y se reflejan en este logro, que también le pertenece.

A mi madre Raymunda, que continúa a mi lado, por su amor incondicional, su apoyo incansable y su fortaleza. Gracias por creer en mí, por sostenerme en los momentos difíciles y por ser un pilar fundamental en este camino.

Este trabajo es fruto de la fe, el amor y el sacrificio de mis padres, quienes marcaron profundamente mi vida.

## Resumen

En la planta de tratamiento de agua potable La Pastora, ubicada en Puerto Maldonado, se produjo la rotura del cuarto floculador durante la etapa de floculación, comprometiendo la continuidad operativa del sistema. La falla se concentró en los elementos de sujeción de las placas, lo que sugiere la acción de esfuerzos mecánicos inducidos por el flujo hidráulico.

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la dinámica del flujo y su influencia en la generación de esfuerzos de rotura mediante simulaciones de dinámica computacional de fluidos (CFD) acopladas a un análisis de interacción fluido–estructura (FSI). El dominio incluyó el canal de entrada, el canal de mezcla rápida y los floculadores, considerando un caudal operativo de 280 L/s en régimen turbulento. El modelo hidráulico fue validado con mediciones de velocidad en campo.

Los campos de presión y velocidad obtenidos se aplicaron al modelo estructural para evaluar tensiones y factores de seguridad. Los resultados identificaron concentraciones críticas de esfuerzos en los pernos de sujeción, superando los límites admisibles del material y coincidiendo con la zona de falla observada, explicando el mecanismo de rotura y aportando criterios para el diseño y evaluación estructural de floculadores.

**Palabras clave:** Dinámica de fluidos, Esfuerzos de rotura, Dinámica computacional de fluidos, Interacción fluido-estructura.

### **Abstract**

At the La Pastora drinking water treatment plant, located in Puerto Maldonado, the failure of the fourth flocculator occurred during the flocculation stage, compromising the operational continuity of the system. The failure was concentrated in the plate fastening elements, suggesting the action of mechanically induced stresses generated by the hydraulic flow.

This research aimed to evaluate flow dynamics and their influence on the generation of failure stresses through computational fluid dynamics (CFD) simulations coupled with a fluid–structure interaction (FSI) analysis. The domain included the inlet channel, the rapid mixing channel, and the flocculators, considering an operating flow rate of 280 L/s under turbulent conditions. The hydraulic model was validated using in situ velocity measurements.

The resulting pressure and velocity fields were applied to the structural model to evaluate stresses and safety factors. The results identified critical stress concentrations in the fastening bolts, exceeding the allowable material limits and coinciding with the observed failure zone, thus explaining the failure mechanism and providing criteria for the design and structural assessment of flocculators.

**Keywords:** Fluid dynamics, Failure stresses, Computational fluid dynamics, Fluid-structure interaction.

## **Información general**

Las plantas de tratamiento de agua potable cumplen un rol fundamental en la protección de la salud pública, al garantizar el abastecimiento de agua en condiciones adecuadas para el consumo humano. Dentro de estas instalaciones, la etapa de floculación es esencial, ya que permite la aglomeración de partículas finas presentes en el agua mediante un control adecuado del movimiento del flujo, facilitando su posterior remoción en los procesos de sedimentación y filtración. El correcto funcionamiento hidráulico y estructural de los floculadores resulta, por tanto, determinante para la eficiencia y continuidad del tratamiento.

En los floculadores, el movimiento del agua genera fuerzas hidráulicas que actúan de manera permanente sobre los elementos estructurales internos, tales como placas, ejes y sistemas de sujeción. Cuando estas fuerzas no son adecuadamente distribuidas o superan la capacidad resistente de los materiales, pueden producirse fallas estructurales que comprometen el desempeño de la unidad. En este contexto, la interacción entre el flujo de agua y la estructura del floculador adquiere especial relevancia, ya que condiciona la magnitud y localización de los esfuerzos mecánicos que se desarrollan durante la operación.

De forma tradicional, la evaluación de floculadores se ha realizado mediante criterios empíricos y parámetros globales de diseño, los cuales no permiten identificar con precisión zonas específicas donde se concentran esfuerzos elevados ni explicar detalladamente los mecanismos que conducen a una falla estructural. Esta limitación reduce la comprensión del comportamiento real de la unidad y dificulta la adopción de medidas técnicas orientadas a mejorar su confiabilidad y seguridad operativa.

En este marco, el uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), combinadas con análisis de Interacción Fluido–Estructura (FSI), permite estudiar de manera integrada el comportamiento del flujo de agua y los esfuerzos que este induce sobre los elementos estructurales

del floculador. Este enfoque posibilita una evaluación más detallada del funcionamiento hidráulico-estructural, así como la identificación de zonas críticas sometidas a mayores solicitaciones.

La presente investigación se desarrolla a partir del análisis del cuarto floculador de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, ubicada en el departamento de Madre de Dios, donde se registró una falla estructural durante su operación. Mediante un enfoque cuantitativo y explicativo, se evalúa cómo la dinámica del fluido incide en la generación de esfuerzos de rotura en dicha unidad, utilizando un modelo CFD–FSI. Los resultados obtenidos constituyen un soporte técnico para la empresa prestadora del servicio y contribuyen a una mejor comprensión del funcionamiento hidráulico-estructural del floculador, en beneficio de la continuidad del servicio de agua potable para la ciudad de Puerto Maldonado.



## Índice

1. Capítulo I: Planteamiento del problema .....	25
1.1. Situación problemática.....	25
1.2. Formulación del problema .....	26
1.2.1. Problema general.....	27
1.2.2. Problemas específicos .....	27
1.3. Justificación de la investigación .....	27
1.3.1. Justificación práctica .....	27
1.3.2. Justificación social .....	28
1.3.3. Justificación por viabilidad .....	28
1.3.4. Justificación por conveniencia .....	28
1.4. Objetivos de la investigación .....	29
1.4.1. Objetivo general .....	29
1.4.2. Objetivos específicos.....	29
1.5. Delimitación de la investigación.....	29
1.5.1. Delimitación espacial .....	29
1.5.2. Delimitación temporal.....	29
1.5.3. Delimitación teórica .....	30
2. Capítulo II: Marco teórico conceptual .....	30
2.1. Bases teóricas.....	31

2.1.1. Fluido .....	31
2.1.2. Planta de tratamiento de agua potable.....	31
2.1.3. Plantas de filtración rápida.....	32
2.1.4. Flóculos .....	34
2.1.5. Floculación.....	34
2.1.6. Floculador.....	34
2.1.7. Pantallas (baffles o placas).....	38
2.1.8. Dinámica de fluidos (FD).....	39
2.1.9. Ecuación de continuidad (1era ley de conservación).....	41
2.1.10. Ecuación de momento (2da ley de conservación).....	41
2.1.11. Ecuación de energía (3ra ley de conservación).....	44
2.1.12. Forma integral de las leyes de conservación.....	44
2.1.13. Forma diferencial de las leyes de conservación .....	45
2.1.14. Enfoque euleriano .....	46
2.1.15. Enfoque lagrangiano .....	47
2.1.16. Análisis estacionario .....	50
2.1.17. Análisis transitorio .....	50
2.1.18. Dinámica computacional de fluidos (CFD) .....	51
2.1.19. Modelamiento hidráulico tridimensional .....	52
2.1.1. FLOW – 3D.....	55

2.1.2. Parámetros del CFD en FLOW-3D .....	77
2.2. Marco conceptual.....	78
2.2.1. Esfuerzo.....	78
2.2.2. Rotura.....	78
2.2.3. Placas de floculación.....	79
2.3. Antecedentes de la investigación .....	79
2.3.1. Antecedentes locales .....	79
2.3.2. Antecedentes nacionales .....	96
2.3.3. Antecedentes internacionales .....	110
3. Capítulo III: Hipótesis y variables .....	119
3.1. Hipótesis general.....	119
3.2. Hipótesis específicas.....	119
3.3. Identificación de variables e indicadores.....	119
3.3.1. Variables.....	119
3.4. Operacionalización de variables .....	122
4. Capítulo IV: Ubicación y metodología .....	123
4.1. Ámbito de estudio: Localización política y geográfica .....	123
4.1.1. Localización política .....	123
4.1.2. Localización geográfica .....	125
4.2. Tipo, nivel y diseño de investigación .....	126

4.2.1. Tipo de investigación .....	126
4.2.2. Nivel de investigación .....	128
4.2.3. Diseño de la investigación.....	129
4.3. Unidad de análisis .....	130
4.4. Población de estudio .....	131
4.5. Tamaño de muestra .....	131
4.6. Técnicas de selección de muestra .....	132
4.7. Técnicas de recolección de información .....	133
4.7.1. Medición directa in situ.....	133
4.7.2. Análisis computacional: Interacción fluido-estructura (FSI).....	134
4.7.3. Datos de propiedades físico-mecánicas.....	134
4.8. Técnicas de análisis e interpretación de la información .....	135
4.8.1. Análisis numérico mediante simulación FSI.....	136
4.8.2. Validación experimental .....	136
4.8.3. Interpretación estructural.....	137
4.9. Técnicas para la contratación de las hipótesis planteadas .....	137
4.9.1. Criterio de contrastación de hipótesis .....	137
4.9.2. Técnica de comparación.....	138
4.9.3. Fundamentación técnica .....	138
5. Resultados y discusión.....	139

5.1.	Procesamiento, análisis, interpretación y discusión de resultados.....	139
5.1.1.	Resultados de trabajo de campo .....	139
5.1.2.	Construcción del modelo numérico FSI en Flow 3D.....	145
5.1.3.	Resultados de la simulación hidráulica .....	199
5.1.4.	Resultados de interacción fluido-estructura (FSI).....	222
5.2.	Pruebas de hipótesis.....	226
5.2.1.	Formulación recapitulada de hipótesis.....	226
5.2.2.	Configuración estructural y esquema de carga .....	227
5.2.3.	Análisis estructural del sistema de anclaje de la placa de floculación .....	229
5.2.4.	Veredicto de hipótesis .....	236
6.	Conclusiones.....	236
7.	Recomendaciones .....	237
8.	Bibliografía .....	238
	Anexos .....	241
8.1.	Matriz de consistencia.....	241
8.2.	Generación de la geometría en Ansys Design Modeler (Versión Estudiante).....	243
8.3.	Geometría en formato STL ASCII.....	353
8.4.	Medios de verificación.....	354
8.5.	Archivos de la simulación.....	391
8.6.	Memoria de cálculo estructural.....	427



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Rotura del cuarto floculador.....	26
<b>Figura 2</b> Las etapas de la elaboración de un marco teórico .....	30
<b>Figura 3</b> Planta de tecnología apropiada de 120 L/s.....	32
<b>Figura 4</b> PTAP La Pastora (Mezcla rápida y floculadores).....	33
<b>Figura 5</b> Floculadores hidráulicos de flujo .....	35
<b>Figura 6</b> Floculadores de la PTAP La Pastora.....	36
<b>Figura 7</b> Floculadores en modelo numérico (vista isométrica).....	37
<b>Figura 8</b> Vista área de floculadores .....	38
<b>Figura 9</b> Baffles de floculación.....	39
<b>Figura 10</b> Ecuación integral de conservación de masa .....	41
<b>Figura 11</b> Enfoque integral .....	45
<b>Figura 12</b> Enfoque diferencial .....	46
<b>Figura 13</b> Enfoque euleriano.....	47
<b>Figura 14</b> Enfoque lagrangiano.....	48
<b>Figura 15</b> Análisis estacionario.....	50
<b>Figura 16</b> Esfuerzos cortantes en la bocatoma María Auxiliadora. ....	55
<b>Figura 17</b> Eficiencia de la PTAP Santa Ana - Cusco .....	82
<b>Figura 18</b> Sistema de muros trombe .....	85
<b>Figura 19</b> Metodología del antecedente local 02 .....	86
<b>Figura 20</b> Antecedente local: Comparativa de Predicten Mean Vote (PMV) 01 .....	89
<b>Figura 21</b> Antecedente local: Comparativa de Temperatura 01 .....	89
<b>Figura 22</b> Antecedente local: Comparativa de Predicten Mean Vote (PMV) 02 .....	91

	12
<b>Figura 23</b> Antecedente local: Comparativa de Temperatura 02 .....	92
<b>Figura 24</b> Comparativa final de Predicten Mean Vote (PMV).....	93
<b>Figura 25</b> Comparativa final Temperaturas (%).....	94
<b>Figura 26</b> Antecedente nacional: Metodología.....	98
<b>Figura 27</b> Distribución del espacio de trabajo del CFD-Post .....	99
<b>Figura 28</b> Antecedente nacional: Velocidades máximas en caudal promedio (m/s) .....	101
<b>Figura 29</b> Antecedente nacional: Velocidades máximas en caudal máximo (m/s) .....	102
<b>Figura 30</b> Antecedente nacional: Metodología.....	105
<b>Figura 31</b> Resultados de velocidad promedio.....	107
<b>Figura 32</b> Vista isométrica del agua en todo el dominio .....	108
<b>Figura 33</b> Antecedente nacional 02: Metodología.....	113
<b>Figura 34</b> Antecedente nacional: Resultados simulados vs experimentales.....	114
<b>Figura 35</b> Presión sobre el vertedero unitario.....	115
<b>Figura 36</b> Gráfica de zona de estudio .....	120
<b>Figura 37</b> Ubicación geográfica de Madre de Dios .....	123
<b>Figura 38</b> Distrito de Tambopata .....	124
<b>Figura 39</b> Ubicación geográfica.....	126
<b>Figura 40</b> Mapa Mental de Investigación Cuantitativa.....	127
<b>Figura 41</b> Proceso de una Investigación Cuantitativa.....	128
<b>Figura 42</b> Alcance explicativo (Ruta que explica destino).....	129
<b>Figura 43</b> Clasificación de la investigación.....	130
<b>Figura 44</b> Población y muestra de estudio.....	132
<b>Figura 45</b> Baffles de floculación .....	135
<b>Figura 46</b> Uso del correntómetro para mediciones directas .....	139

<b>Figura 47</b> Discretización transversal del dominio de mediciones (modelo numérico).....	140
<b>Figura 48</b> Discretización transversal del dominio de mediciones (campo) .....	141
<b>Figura 49</b> Discretización longitudinal del dominio de mediciones (numérico).....	142
<b>Figura 50</b> Discretización longitudinal del dominio de mediciones .....	143
<b>Figura 51</b> Grafica de velocidades medidas in-situ.....	144
<b>Figura 52</b> Plano CAD de la geometría (Canal de entrada y mezcla rápida). (Perfil) .....	146
<b>Figura 53</b> Plano CAD de la geometría (Floculadores). (Vista en perfil).....	147
<b>Figura 54</b> Plano CAD de la geometría (canal de entrada y mezcla rápida). (Vista en planta).....	148
<b>Figura 55</b> Plano CAD de la geometría (canal de entrada y mezcla rápida). (Vista en planta).....	149
<b>Figura 56</b> Estructura de trabajo en Ansys Design Modeler .....	150
<b>Figura 57</b> Modelamiento del canal de regulación, mezcla rápida y floculadores.....	151
<b>Figura 58</b> Configuración del tiempo de simulación, el tipo de flujo y unidades .....	152
<b>Figura 59</b> Configuración de la gravedad.....	152
<b>Figura 60</b> Configuración del modelo numérico a emplear .....	153
<b>Figura 61</b> Configuración de la temperatura del modelo numérico .....	153
<b>Figura 62</b> Configuración de propiedades mecánicas .....	154
<b>Figura 63</b> Mallado FSI.....	156
<b>Figura 64</b> Malla 1: Cámara de impulsión .....	158
<b>Figura 65</b> Información de la malla 1 .....	159
<b>Figura 66</b> Malla 2: Canal de mezcla rápida (zona más detallada) .....	160
<b>Figura 67</b> Información de la malla 2.....	161
<b>Figura 68</b> Malla 3: Zona estable canal de mezcla rápida.....	162
<b>Figura 69</b> Información de la malla 3.....	163
<b>Figura 70</b> Malla 4: Entrada a los floculadores .....	164

<b>Figura 71</b> Información de la malla 4.....	165
<b>Figura 72</b> Malla 5: Primera cámara de floculación.....	166
<b>Figura 73</b> Información de la malla 5.....	167
<b>Figura 74</b> Malla 6: Transición a la 2da etapa de floculación.....	168
<b>Figura 75</b> Información de la malla 6.....	169
<b>Figura 76</b> Malla 07: Segunda cámara de floculación .....	170
<b>Figura 77</b> Información de la malla 07.....	171
<b>Figura 78</b> Malla 8: Transición a la 3ra etapa de floculación .....	172
<b>Figura 79</b> Información de la malla 08.....	173
<b>Figura 80</b> Malla 09: Tercera cámara de floculación .....	174
<b>Figura 81</b> Información de la malla 09.....	175
<b>Figura 82</b> Malla 10: Transición a la 4ta etapa de floculación.....	176
<b>Figura 83</b> Información de la malla 10.....	177
<b>Figura 84</b> Malla 11: Cuarta cámara de floculación.....	178
<b>Figura 85</b> Información de la malla 11.....	179
<b>Figura 86</b> Malla 12: Transición a la 5ta etapa de floculación.....	180
<b>Figura 87</b> Información de la malla 12.....	181
<b>Figura 88</b> Malla 13: Quinta cámara de floculación .....	182
<b>Figura 89</b> Información de la malla 13.....	183
<b>Figura 90</b> Malla 14: Ingreso al canal de distribución .....	184
<b>Figura 91</b> Información de la malla 14.....	185
<b>Figura 92</b> Malla 15: Canal de distribución .....	186
<b>Figura 93</b> Información de la malla 15.....	187
<b>Figura 94</b> Mallado de la geometría .....	188

<b>Figura 95</b> Información de todas las mallas .....	189
<b>Figura 96</b> Condición de borde de entrada de caudal.....	190
<b>Figura 97</b> Configuración de la región de fluido 1 .....	191
<b>Figura 98</b> Región de fluido 01 .....	192
<b>Figura 99</b> Configuración de la región de fluido 02.....	193
<b>Figura 100</b> Región de fluido 02 .....	194
<b>Figura 101</b> Configuración de la región de fluido 03.....	195
<b>Figura 102</b> Región de fluido 03 .....	196
<b>Figura 103</b> Tiempo total de simulación .....	197
<b>Figura 104</b> Versión de Flow 3d .....	198
<b>Figura 105</b> Versión de Flow Sight.....	200
<b>Figura 106</b> Paso de tiempo VS Tiempo .....	202
<b>Figura 107</b> Conteo de iteaciones de presion VS Tiempo.....	203
<b>Figura 108</b> Error acumulativo multibloque en (%) VS Tiempo .....	204
<b>Figura 109</b> Error acumulativo de volumen (%) VS Tiempo .....	205
<b>Figura 110</b> Volumen del fluido Vs Tiempo.....	206
<b>Figura 111</b> Estabilizacion del volumen .....	207
<b>Figura 112</b> Area del fluido VS Tiempo .....	208
<b>Figura 113</b> Energia cinetica media del fluido VS Tiempo .....	209
<b>Figura 114</b> Energia cinetica turbulente media VS Tiempo.....	210
<b>Figura 115</b> Conteo de Iteraciones FSI VS Tiempo.....	211
<b>Figura 116</b> Residuo maximo del acoplamiento FSI VS Tiempo .....	212
<b>Figura 117</b> Expansión fraccional de volumen de la geometría VS Tiempo .....	213
<b>Figura 118</b> Esfuerzo medio de von Mises en la geometria VS Tiempo .....	214



<b>Figura 119</b> Esfuerzo medio isótopo de la geomatría VS Tiempo .....	215
<b>Figura 120</b> Energía elástica total FSI VS Tiempo .....	216
<b>Figura 121</b> Desplazamiento máximo de la geometría VS Tiempo .....	217
<b>Figura 122</b> Resultados de isosuperficies de velocidad en primera etapa de floculación .....	218
<b>Figura 123</b> Isosuperficies de velocidad de todo el dominio .....	219
<b>Figura 124</b> Vorticidad en las placas de floculación .....	220
<b>Figura 125</b> Vórtices en todo el dominio (1ra parte).....	221
<b>Figura 126</b> Vórtices en todo el dominio (2da parte).....	222
<b>Figura 127</b> Post procesado en ParaView .....	223
<b>Figura 128</b> Cubo de deformaciones .....	224
<b>Figura 129</b> Esfuerzos inducidos por el flujo (Esfuerzos de Von – Mises) .....	225
<b>Figura 130</b> Esfuerzos XX .....	226
<b>Figura 131</b> Esfuerzos de Von - Misess .....	230
<b>Figura 132</b> Esfuerzos inducidos XX.....	230
<b>Figura 133</b> Tensor de Cauchy .....	232
<b>Figura 134</b> Mecanismo de falla del sistema.....	234
<b>Figura 135</b> Sistema de transmisión de fuerzas.....	234
<b>Figura 136</b> Anexos: Elaboración de la geometría 01 .....	243
<b>Figura 137</b> Anexos: Elaboración de la Geometría 02.....	244
<b>Figura 138</b> Anexos: Elaboración de la geometría 03.....	245
<b>Figura 139</b> Anexos: Elaboración de la geometría 04.....	246
<b>Figura 140</b> Anexos: Elaboración de la geometría 05.....	247
<b>Figura 141</b> Anexos: Elaboración de la geometría 06.....	248
<b>Figura 142</b> Anexos: Elaboración de la geometría 07.....	249

<b>Figura 143</b> Anexos: Elaboración de la geometría 08.....	250
<b>Figura 144</b> Anexos: Elaboración de la geometría 9.....	251
<b>Figura 145</b> Anexos: Elaboración de la geometría 10.....	252
<b>Figura 146</b> Anexos: Elaboración de la geometría 11.....	253
<b>Figura 147</b> Anexos: Elaboración de la geometría 12.....	254
<b>Figura 148</b> Anexos: Elaboración de la geometría 13.....	255
<b>Figura 149</b> Anexos: Elaboración de la geometría 14.....	256
<b>Figura 150</b> Anexos: Elaboración de la geometría 15.....	257
<b>Figura 151</b> Anexos: Elaboración de la geometría 16.....	258
<b>Figura 152</b> Anexos: Elaboración de la geometría 17.....	259
<b>Figura 153</b> Anexos: Elaboración de la geometría 18.....	260
<b>Figura 154</b> Anexos: Elaboración de la geometría 19.....	261
<b>Figura 155</b> Anexos: Elaboración de la geometría 20.....	262
<b>Figura 156</b> Anexos: Elaboración de la geometría 21.....	263
<b>Figura 157</b> Anexos: Elaboración de la geometría 22.....	264
<b>Figura 158</b> Anexos: Elaboración de la geometría 23.....	265
<b>Figura 159</b> Anexos: Elaboración de la geometría 24.....	266
<b>Figura 160</b> Anexos: Elaboración de la geometría 25.....	267
<b>Figura 161</b> Anexos: Elaboración de la geometría 26.....	268
<b>Figura 162</b> Anexos: Elaboración de la geometría 27.....	269
<b>Figura 163</b> Anexos: Elaboración de la geometría 28.....	270
<b>Figura 164</b> Anexos: Elaboración de la geometría 29.....	271
<b>Figura 165</b> Anexos: Elaboración de la geometría 30.....	272
<b>Figura 166</b> Anexos: Elaboración de la geometría 31.....	273

<b>Figura 167</b> Anexos: Elaboración de la geometría 32.....	274
<b>Figura 168</b> Anexos: Elaboración de la geometría 33.....	275
<b>Figura 169</b> Anexos: Elaboración de la geometría 34.....	276
<b>Figura 170</b> Anexos: Elaboración de la geometría 35.....	277
<b>Figura 171</b> Anexos: Elaboración de la geometría 36.....	278
<b>Figura 172</b> Anexos: Elaboración de la geometría 37.....	279
<b>Figura 173</b> Anexos: Elaboración de la geometría 38.....	280
<b>Figura 174</b> Anexos: Elaboración de la geometría 39.....	281
<b>Figura 175</b> Anexos: Elaboración de la geometría 40.....	282
<b>Figura 176</b> Anexos: Elaboración de la geometría 41.....	283
<b>Figura 177</b> Anexos: Elaboración de la geometría 42.....	284
<b>Figura 178</b> Anexos: Elaboración de la geometría 43.....	285
<b>Figura 179</b> Anexos: Elaboración de la geometría 44.....	286
<b>Figura 180</b> Anexos: Elaboración de la geometría 45.....	287
<b>Figura 181</b> Anexos: Elaboración de la geometría 46.....	288
<b>Figura 182</b> Anexos: Elaboración de la geometría 47.....	289
<b>Figura 183</b> Anexos: Elaboración de la geometría 48.....	290
<b>Figura 184</b> Anexos: Elaboración de la geometría 49.....	291
<b>Figura 185</b> Anexos: Elaboración de la geometría 50.....	292
<b>Figura 186</b> Anexos: Elaboración de la geometría 51.....	293
<b>Figura 187</b> Anexos: Elaboración de la geometría 52.....	294
<b>Figura 188</b> Anexos: Elaboración de la geometría 53.....	295
<b>Figura 189</b> Anexos: Elaboración de la geometría 54.....	296
<b>Figura 190</b> Anexos: Elaboración de la geometría 55.....	297

<b>Figura 191</b> Anexos: Elaboración de la geometría 56.....	298
<b>Figura 192</b> Anexos: Elaboración de la geometría 57.....	299
<b>Figura 193</b> Anexos: Elaboración de la geometría 58.....	300
<b>Figura 194</b> Anexos: Elaboración de la geometría 59.....	301
<b>Figura 195</b> Anexos: Elaboración de la geometría 60.....	302
<b>Figura 196</b> Anexos: Elaboración de la geometría 61.....	303
<b>Figura 197</b> Anexos: Elaboración de la geometría 62.....	304
<b>Figura 198</b> Anexos: Elaboración de la geometría 63.....	305
<b>Figura 199</b> Anexos: Elaboración de la geometría 64.....	306
<b>Figura 200</b> Anexos: Elaboración de la geometría 65.....	307
<b>Figura 201</b> Anexos: Elaboración de la geometría 66.....	308
<b>Figura 202</b> Anexos: Elaboración de la geometría 67.....	309
<b>Figura 203</b> Anexos: Elaboración de la geometría 68.....	310
<b>Figura 204</b> Anexos: Elaboración de la geometría 69.....	311
<b>Figura 205</b> Anexos: Elaboración de la geometría 70.....	312
<b>Figura 206</b> Anexos: Elaboración de la geometría 71.....	313
<b>Figura 207</b> Anexos: Elaboración de la geometría 72.....	314
<b>Figura 208</b> Anexos: Elaboración de la geometría 73.....	315
<b>Figura 209</b> Anexos: Elaboración de la geometría 74.....	316
<b>Figura 210</b> Anexos: Elaboración de la geometría 75.....	317
<b>Figura 211</b> Anexos: Elaboración de la geometría 76.....	318
<b>Figura 212</b> Anexos: Elaboración de la geometría 77.....	319
<b>Figura 213</b> Anexos: Elaboración de la geometría 78.....	320
<b>Figura 214</b> Anexos: Elaboración de la geometría 79.....	321

<b>Figura 215</b> Anexos: Elaboración de la geometría 80.....	322
<b>Figura 216</b> Anexos: Elaboración de la geometría 81.....	323
<b>Figura 217</b> Anexos: Elaboración de la geometría 82.....	324
<b>Figura 218</b> Anexos: Elaboración de la geometría 83.....	325
<b>Figura 219</b> Anexos: Elaboración de la geometría 84.....	326
<b>Figura 220</b> Anexos: Elaboración de la geometría 85.....	327
<b>Figura 221</b> Anexos: Elaboración de la geometría 86.....	328
<b>Figura 222</b> Anexos: Elaboración de la geometría 87.....	329
<b>Figura 223</b> Anexos: Elaboración de la geometría 88.....	330
<b>Figura 224</b> Anexos: Elaboración de la geometría 89.....	331
<b>Figura 225</b> Anexos: Elaboración de la geometría 90.....	332
<b>Figura 226</b> Anexos: Elaboración de la geometría 91.....	333
<b>Figura 227</b> Anexos: Elaboración de la geometría 92.....	334
<b>Figura 228</b> Anexos: Elaboración de la geometría 93.....	335
<b>Figura 229</b> Anexos: Elaboración de la geometría 94.....	336
<b>Figura 230</b> Anexos: Elaboración de la geometría 95.....	337
<b>Figura 231</b> Anexos: Elaboración de la geometría 96.....	338
<b>Figura 232</b> Anexos: Elaboración de la geometría 97.....	339
<b>Figura 233</b> Anexos: Elaboración de la geometría 98.....	340
<b>Figura 234</b> Anexos: Elaboración de la geometría 99.....	341
<b>Figura 235</b> Anexos: Elaboración de la geometría 100.....	342
<b>Figura 236</b> Anexos: Elaboración de la geometría 101.....	343
<b>Figura 237</b> Anexos: Elaboración de la geometría 102.....	344
<b>Figura 238</b> Anexos: Elaboración de la geometría 103.....	345



<b>Figura 239</b> Anexos: Elaboración de la geometría 104.....	346
<b>Figura 240</b> Anexos: Elaboración de la geometría 105.....	347
<b>Figura 241</b> Anexos: Elaboración de la geometría 106.....	348
<b>Figura 242</b> Anexos: Elaboración de la geometría 107.....	349
<b>Figura 243</b> Anexos: Elaboración de la geometría 108.....	350
<b>Figura 244</b> Anexos: Elaboración de la geometría 109.....	351
<b>Figura 245</b> Anexos: Elaboración de la geometría 110.....	352
<b>Figura 246</b> Archivo STL en formato ASCII.....	353
<b>Figura 247</b> Visita técnica: Figura 01.....	354
<b>Figura 248</b> Visita técnica: Figura 03.....	355
<b>Figura 249</b> Visita técnica: Figura 04.....	356
<b>Figura 250</b> Visita técnica: Figura 05.....	357
<b>Figura 251</b> Visita técnica: Figura 06.....	358
<b>Figura 252</b> Visita técnica: Figura 07.....	359
<b>Figura 253</b> Visita técnica: Figura 08.....	360
<b>Figura 254</b> Visita técnica: Figura 09.....	361
<b>Figura 255</b> Visita técnica: Figura 10.....	362
<b>Figura 256</b> Visita técnica: Figura 11.....	363
<b>Figura 257</b> Visita técnica: Figura 12.....	364
<b>Figura 258</b> Visita técnica: Figura 13.....	365
<b>Figura 259</b> Visita técnica: Figura 14.....	366
<b>Figura 260</b> Visita técnica: Figura 15.....	367
<b>Figura 261</b> Visita técnica: Figura 16.....	368
<b>Figura 262</b> Visita técnica: Figura 17.....	369

<b>Figura 263</b> Visita técnica: Figura 18.....	370
<b>Figura 264</b> Visita técnica: Figura 19.....	371
<b>Figura 265</b> Visita técnica: Figura 20.....	372
<b>Figura 266</b> Visita técnica: Figura 21.....	373
<b>Figura 267</b> Visita técnica: Figura 22.....	374
<b>Figura 268</b> Visita técnica: Figura 23.....	375
<b>Figura 269</b> Visita técnica: Figura 24.....	376
<b>Figura 270</b> Visita técnica: Figura 25.....	377
<b>Figura 271</b> Visita técnica: Figura 26.....	378
<b>Figura 272</b> Visita técnica: Figura 27.....	379
<b>Figura 273</b> Visita técnica: Figura 28.....	380
<b>Figura 274</b> Visita técnica: Figura 29.....	381
<b>Figura 275</b> Visita técnica: Figura 30.....	382
<b>Figura 276</b> Visita técnica: Figura 31.....	383
<b>Figura 277</b> Visita técnica: Figura 32.....	384
<b>Figura 278</b> Visita técnica: Figura 33.....	385
<b>Figura 279</b> Visita técnica: Figura 34.....	386
<b>Figura 280</b> Visita técnica: Figura 35.....	387
<b>Figura 281</b> Visita técnica: Figura 36.....	388
<b>Figura 282</b> Visita técnica: Figura 37.....	389
<b>Figura 283</b> Visita técnica: Figura 38.....	390
<b>Figura 284</b> Visita a EMAPAT .....	391
<b>Figura 285</b> Memoria de cálculo estructural .....	427

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Enfoque euleriano VS Enfoque lagrangiano.....	48
<b>Tabla 2</b> Análisis estacionario VS Análisis transitorio .....	51
<b>Tabla 3</b> Fortalezas y debilidades de la modelación física y numérica .....	53
<b>Tabla 4</b> Antecedente local 01 .....	79
<b>Tabla 5</b> Antecedente local 02.....	84
<b>Tabla 6</b> Resultado parcial 01 del antecedente local 02 .....	87
<b>Tabla 7</b> Resultado parcial 02 del antecedente local 02 .....	88
<b>Tabla 8</b> Resultado parcial 03 del antecedente local 02 .....	90
<b>Tabla 9</b> Resultados finales del antecedente local 02.....	92
<b>Tabla 10</b> Tesis nacional 01.....	97
<b>Tabla 11</b> Velocidades máximas de flujo en la zona de superficie de análisis .....	100
<b>Tabla 12</b> Tesis nacional 02.....	103
<b>Tabla 13</b> Ecuaciones de similitud de Froude .....	106
<b>Tabla 14</b> Tesis internacional 01 .....	110
<b>Tabla 15</b> Datos experimentales versus simulados.....	113
<b>Tabla 16</b> Operacionalización de variables .....	122
<b>Tabla 17</b> Coordenadas de la PTAP La Pastora (Latitud y longitud).....	125
<b>Tabla 18</b> Coordenadas de la PTAP La Pastora (UTM) Zona 19S .....	125
<b>Tabla 19</b> Resultados de medición in-situ (correntómetro).....	144
<b>Tabla 20</b> Resultados numéricos de los esfuerzos máximos .....	224
<b>Tabla 21</b> Hipótesis alternativas (para análisis) .....	227
<b>Tabla 22</b> Propiedades geométricas para el análisis de hipótesis.....	227
<b>Tabla 23</b> Propiedades del material de la geometría .....	228

<b>Tabla 24</b> Condiciones de contorno de los baffles .....	228
<b>Tabla 25</b> Esfuerzos de diseño.....	232
<b>Tabla 26</b> Fuerzas resultantes por el fluido .....	233
<b>Tabla 27</b> Fuerzas actuantes sobre los pernos .....	233
<b>Tabla 28</b> Fuerzas por cada perno .....	235
<b>Tabla 29</b> Verificación según criterio de interacción .....	235
<b>Tabla 30</b> Veredicto de hipótesis.....	236
<b>Tabla 31</b> Matriz de consistencia.....	241
<b>Tabla 32</b> Archivo .prepin de la simulación numérica .....	391

## **Capítulo I: Planteamiento del problema**

### **1.1. Situación problemática**

En la ciudad de Puerto Maldonado, capital de la provincia de Tambopata, de la región Madre de Dios, se cuenta con la Planta de Tratamiento de Agua Potable denominada La Pastora, que sirve para dar tratamiento al agua proveniente del río Madre de Dios para atender las necesidades de este servicio a una población actual de 78 996 habitantes.

La Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora está conformado por los procesos correlativos de: Captación, bombeo, regulación, mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y distribución.

El estudio se centró en tres unidades de tratamiento: regulación, mezcla rápida y floculación. Dentro del análisis físico de estas unidades se ha observado que el sistema de floculación está conformado por placas de concreto armado dispuestas en forma de serpentín, con 39,5 m de longitud y una superficie total de 65,95 m<sup>2</sup>. En este conjunto, la cuarta placa registró una rotura en el carril de sujeción (véase Figura 1), presumiblemente originada por las cargas hidrodinámicas del flujo. Esta falla comprometió el desempeño global del proceso y justificó la necesidad de evaluar, de manera integrada, el comportamiento del flujo y las características estructurales del floculador y sus componentes.

**Figura 1**  
*Rotura del cuarto floculador*



*Nota:* Imagen tomada en visita técnica en febrero del 2025 donde se observa la rotura de un floculador

## **1.2. Formulación del problema**

(Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p. 38) afirman que “El planteamiento del problema es el centro, el corazón de la investigación: dicta o define los métodos y la ruta a seguir”.

A través del planteamiento del problema, se podrá afinar, precisar y estructurar la idea de investigación, lo cual involucra mayor formalización y delimitación en el caso de investigaciones cuantitativas como la presente.

### ***1.2.1. Problema general***

- ¿Cuál es la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos de rotura en el cuarto floculador<sup>1</sup>?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

- ¿Cuál es la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos normales de rotura en el cuarto floculador?

- ¿Cuál es la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos cortantes de rotura en el cuarto floculador?

## **1.3. Justificación de la investigación**

### ***1.3.1. Justificación práctica***

La presente investigación tiene una justificación práctica, ya que contribuye a la comprensión de las causas que originaron la rotura del cuarto floculador de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, mediante la evaluación de los esfuerzos generados por la dinámica del fluido sobre sus elementos estructurales. El análisis hidráulico-estructural desarrollado permite identificar zonas críticas de esfuerzo y constituye una base técnica para la toma de decisiones orientadas a mejorar el funcionamiento del proceso de tratamiento del agua potable, contribuyendo al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible N.º 6: Agua limpia y saneamiento, propuesto por los objetivos de desarrollo sostenible “ODS” planteados por la (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2022)

---

<sup>1</sup> Todas las preguntas se delimitan temporalmente al año 2025 y espacialmente a la planta de tratamiento de agua potable La Pastora. Recomendación de (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p. 43): “Establecer los límites temporales y espaciales ... a veces por redacción o longitud no se incluyen todos los aspectos, sino que se comentan mediante una explicación adicional”

### ***1.3.2. Justificación social***

La investigación tiene una justificación social debido a que el adecuado funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua potable es fundamental para garantizar la calidad del recurso hídrico destinado al consumo humano. Al analizar el comportamiento hidráulico-estructural del floculador y explicar el mecanismo de falla observado, el estudio aporta información técnica que favorece la continuidad y seguridad del proceso de producción de agua potable, contribuyendo a mejorar las condiciones de salubridad exigidas por la normativa vigente (Ministerio de Vivienda, 2009b) y alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible N.º 3: Salud y bienestar (ONU, 2022) , en beneficio de la población de Puerto Maldonado.

### ***1.3.3. Justificación por viabilidad***

La viabilidad de la presente investigación se sustenta en la disponibilidad de información técnica, recursos materiales y herramientas necesarias para su desarrollo. Se contó con acceso a las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora y a su expediente técnico, lo que permitió realizar una evaluación detallada de las condiciones operativas del floculador.

Asimismo, se dispuso de equipos de medición para la obtención de datos hidráulicos en campo, así como de software especializado en dinámica computacional de fluidos (CFD) y análisis estructural por elementos finitos, los cuales permitieron simular el comportamiento hidráulico y estructural del floculador. Estos recursos garantizaron el desarrollo del estudio con el nivel de precisión y confiabilidad requerido.

### ***1.3.4. Justificación por conveniencia***

La presente investigación resulta conveniente para el equipo técnico y profesional responsable de la operación y mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, ya que proporciona un análisis técnico que explica las causas de la rotura del floculador y aporta información útil para futuras evaluaciones estructurales. De esta manera, el estudio contribuye a fortalecer la gestión



de la infraestructura de saneamiento, en beneficio del servicio de agua potable brindado a la ciudad de Puerto Maldonado.

#### **1.4. Objetivos de la investigación**

##### ***1.4.1. Objetivo general***

- Evaluar la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos de rotura en el cuarto floculador.

##### ***1.4.2. Objetivos específicos***

- Evaluar los esfuerzos normales inducidos por la dinámica del fluido en los elementos estructurales del cuarto floculador.

- Evaluar los esfuerzos cortantes inducidos por la dinámica del fluido en los elementos estructurales del cuarto floculador.

#### **1.5. Delimitación de la investigación**

La presente investigación se delimitará<sup>2</sup> según los siguientes criterios

##### ***1.5.1. Delimitación espacial***

La investigación se delimita al canal de aproximación, canal de mezcla rápida y floculadores de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, infraestructura administrada por la Empresa Municipal de Agua Potable de Tambopata, ubicada en la ciudad de Puerto Maldonado, provincia de Tambopata, región de Madre de Dios.

##### ***1.5.2. Delimitación temporal***

La investigación se desarrolla durante el año 2025; sin embargo, para el análisis hidráulico y estructural se emplea información técnica correspondiente al expediente técnico de la Planta de

---

<sup>2</sup> En el ámbito de la investigación científica, las limitaciones se refieren a factores externos que pueden restringir el desarrollo del estudio, mientras que las delimitaciones corresponden a las decisiones metodológicas adoptadas por el investigador para definir el alcance de la investigación, tales como el espacio geográfico, el periodo de análisis y la unidad de estudio.

Tratamiento de Agua Potable La Pastora elaborado en el año 2011, así como datos operativos recopilados hasta el año 2025. Por ello, el periodo de referencia de la información utilizada abarca desde el año 2011 hasta el año 2025.

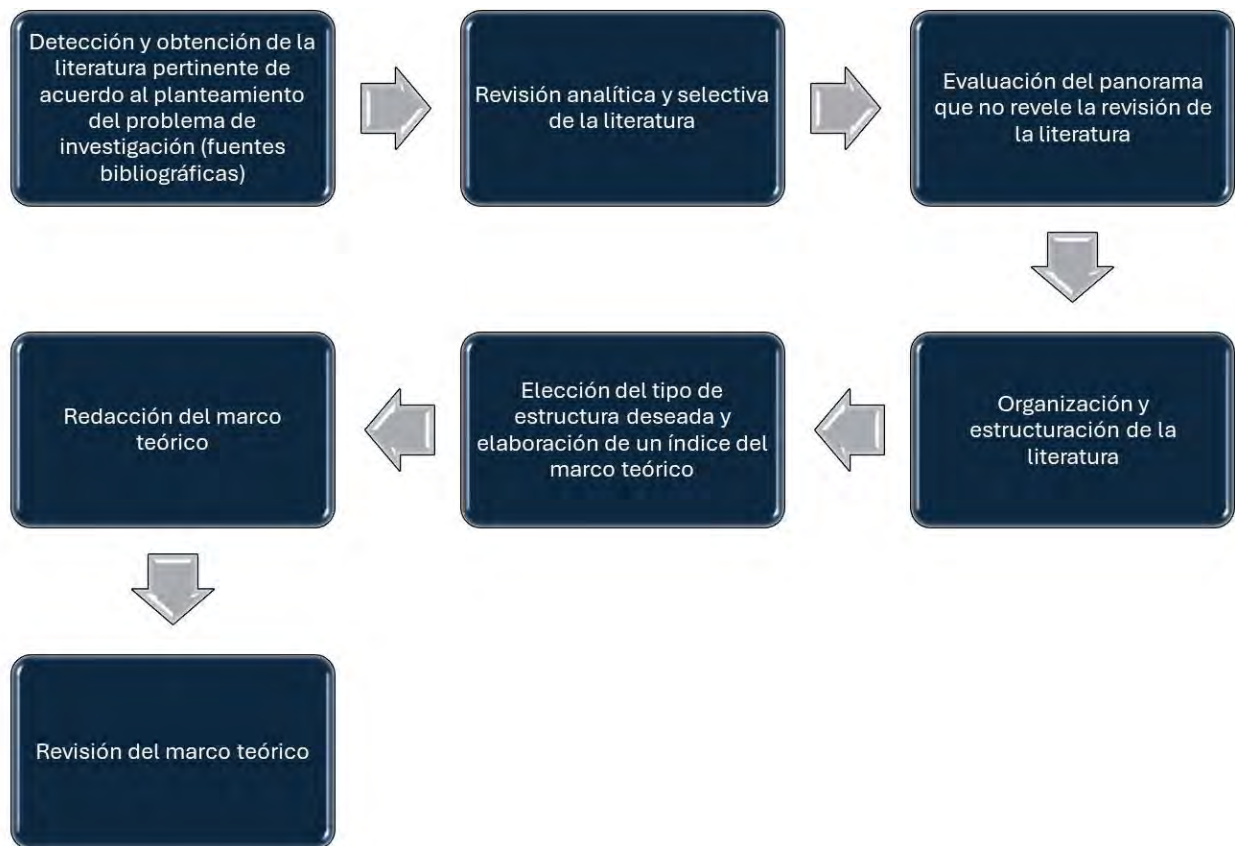
### 1.5.3. Delimitación teórica

La investigación se delimita al estudio de los principios de la dinámica de fluidos y la dinámica computacional de fluidos (CFD), el análisis estructural mediante elementos finitos (FEA), la mecánica estructural aplicada y los fundamentos del funcionamiento hidráulico de las plantas de tratamiento de agua potable, en lo referente a la etapa de floculación y a la interacción fluido-estructura.

## Capítulo II: Marco teórico conceptual

**Figura 2**

*Las etapas de la elaboración de un marco teórico*



*Nota:* Adaptado de (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018) como una guía visual para la elaboración de un marco teórico de una investigación.

## 2.1. Bases teóricas

Afirma (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018) lo siguiente: “El marco teórico no es un tratado de todo aquello que tenga relación con el tema global o general de la investigación, sino que debe limitar a los antecedentes del planteamiento concreto del estudio”<sup>3</sup>

### 2.1.1. *Fluido*

Afirma (Domingo, 2011) lo siguiente:

“Se puede entender un fluido como la composición de moléculas con la característica de mantener cierta distancia promedio con espacios vacíos entre ellas, las cuales están continuamente en movimiento y colisionando entre sí, su complejidad es relevante por lo cual para entenderla se adoptan simplificaciones en teoría cinética y mecánica estadística.”

En la mayoría de los estudios hidráulicos de ingeniería, el análisis se centra en el comportamiento macroscópico promedio del flujo, representado mediante campos de velocidad, presión y esfuerzos, sin necesidad de describir el comportamiento individual de las partículas.

### 2.1.2. *Planta de tratamiento de agua potable*

Según el (CEPIS, 2004): “Una planta de tratamiento emplea procesos específicos para eliminar los contaminantes microbiológicos y reducir los físicos y químicos del agua cruda, ajustándolos a los límites normativos.”

---

<sup>3</sup> Un buen marco teórico no es aquel que lleve muchas cuartillas estándares de citas y citas (Creswell. 2013<sup>a</sup> y 2009) recomienda para tesis de pregrado entre 8 a 15 cuartillas, un buen marco teórico debe tener referencias directamente vinculadas con el planteamiento del problema este nos ayudara a refinar nuestro planteamiento del problema y sugerir hipótesis, asimismo como a justificar la importancia de nuestra investigación

**Figura 3***Planta de tecnología apropiada de 120 L/s*

*Nota: Adaptado de Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I (p. 120), por (CEPIS, 2004)*

### **2.1.3. Plantas de filtración rápida**

Según el (CEPIS, 2004):

“Estas plantas reciben su nombre porque los filtros que las componen operan a altos caudales, entre 80 y 300 L/s, dependiendo de las características del agua, del medio filtrante y de los recursos disponibles para su operación y mantenimiento. Debido a estas altas velocidades, los filtros se obstruyen en un promedio de 40 a 50 horas. En ese caso, se realiza un retro lavado o lavado ascensional durante 5 a 15 minutos (según el tipo de sistema de lavado) para desobstruir el medio filtrante, restaurar su porosidad y reanudar la operación. Según la calidad del agua a tratar, existen dos tipos de plantas: plantas de filtración rápida completa y plantas de filtración directa”.

En el caso de estudio presente se cuenta con una planta de filtración rápida que procesa 0.28 m<sup>3</sup>/s captados del río Madre de Dios, el tratamiento es continuo y satisface las necesidades de la ciudad de Puerto Maldonado

**Figura 4**

*PTAP La Pastora (Mezcla rápida y floculadores)*



*Nota:* En la figura se puede apreciar el canal de mezcla rápida y los floculadores pertenecientes a la planta de agua potable La Pastora, imagen registrada en la visita técnica realizada el 7 de febrero de 2025

#### **2.1.4. Flóculos**

El (Ministerio de Vivienda, 2009a) lo define como “partículas desestabilizadas y aglomeradas por acción del coagulante”.

#### **2.1.5. Floculación**

Según el (Ministerio de Vivienda, 2009a) es la “formación de partículas aglutinadas o flóculos. Proceso inmediato a la coagulación”. Asimismo, el (CEPIS, 2004b) afirma que: “El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.”

#### **2.1.6. Floculador**

Según el (Ministerio de Vivienda, 2009a) es la “Estructura diseñada para crear condiciones adecuadas para aglomerar las partículas desestabilizadas en la coagulación y obtener flóculos grandes y pesados que decanten con rapidez y que sean resistentes a los esfuerzos cortantes que se generan en el lecho filtrante”. En nuestro caso de investigación se tiene floculadores hidráulicos de pantallas verticales, referente a ello, el (CEPIS, 2004a) afirma lo siguiente: “Los floculadores hidráulicos utilizan la energía hidráulica disponible a través de una pérdida de carga general o específica... Los floculadores hidráulicos más utilizados son los de pantallas, de flujo horizontal o de flujo vertical”



**Figura 5**  
*Floculadores hidráulicos de flujo*



*Nota: Tomado de Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I (p. 135), por (CEPIS, 2004)*

En el caso de estudio presente se cuenta con un sistema de 5 cámaras de floculación, con 7 placas de distribución sinusoidal cada uno como se aprecia en las siguientes figuras

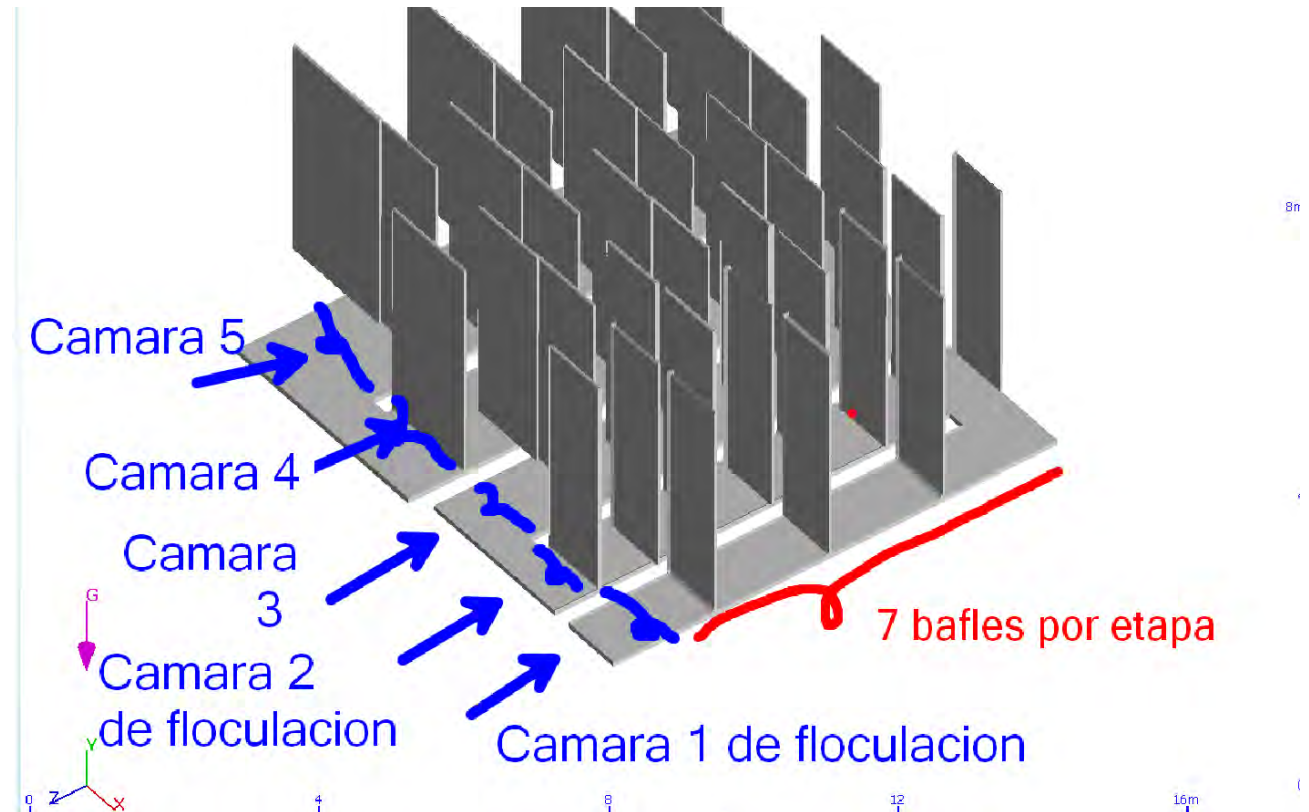
**Figura 6**  
*Floculadores de la PTAP La Pastora*



*Nota:* En la siguiente figura se ve la estabilización del fluido con velocidades bajas requeridas para una correcta floculación, así como la parte superficial de los baffles de floculación

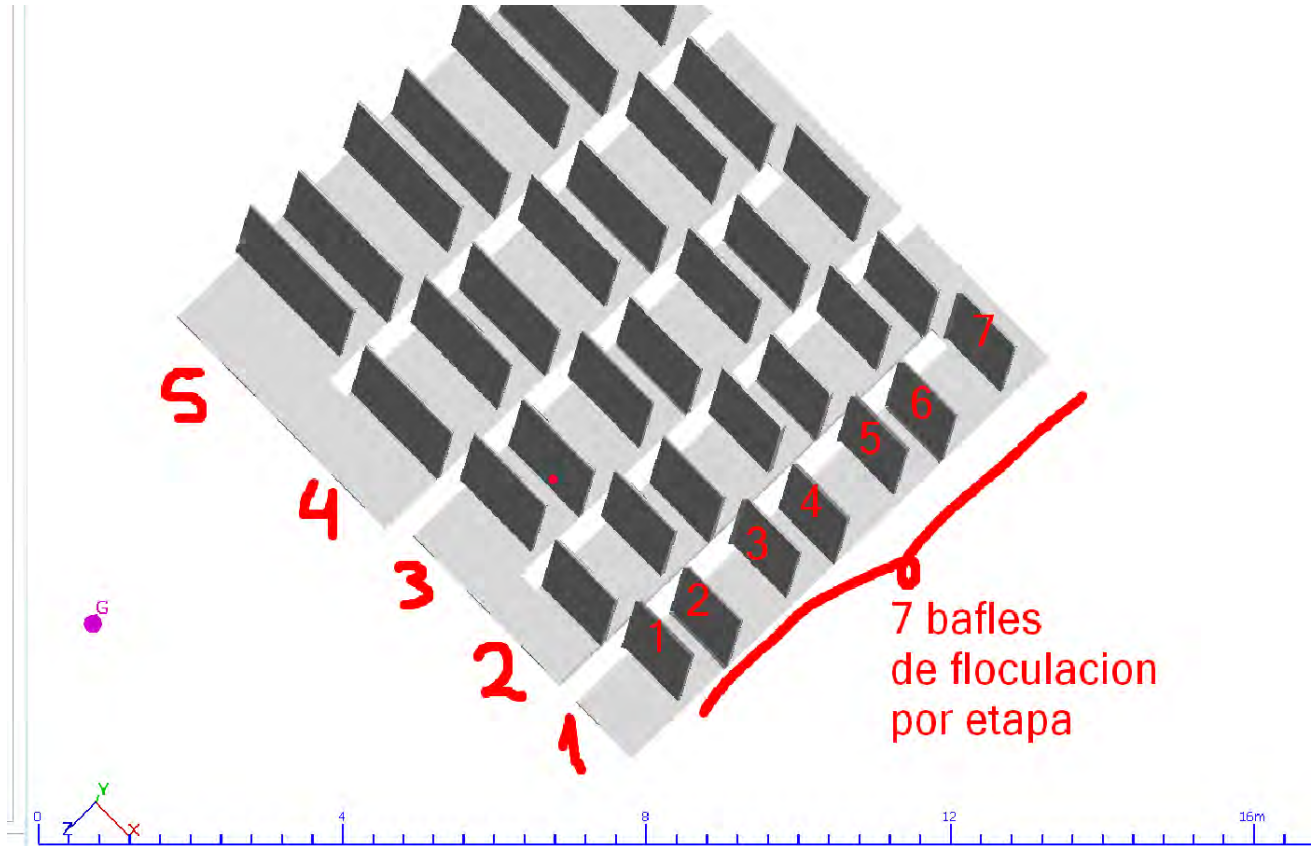


**Figura 7**  
*Floculadores en modelo numérico (vista isométrica)*



*Nota:* En la siguiente figura se ve la distribución geométrica de los 35 baffles de floculación que conducen al fluido de forma alternante y controlado para asegurar un buen proceso de floculación

**Figura 8**  
*Vista área de flocladores*



*Nota:* Véase en la siguiente figura que a medida que se va desde la cámara 1 hasta la 5 se hace mas grande el ancho de las cámaras de floculación, esto se hace para reducir la velocidad del fluido y asegurar un buen proceso de floculación

### **2.1.7. Pantallas (baffles o placas)**

Afirma el (Ministerio de Vivienda, 2009a) son “paredes o muros que se instalan en un tanque de floculación o sedimentación para dirigir el sentido del flujo, evitar la formación de cortocircuitos hidráulicos y espacios muertos”.

En el caso de estudio se cuenta con bafles de longitud variable para cada cámara de floculación hechos de concreto, como se ve en la figura siguiente

**Figura 9**  
*Baffles de floculación*



*Nota:* Véase en la siguiente figura los baffles superficiales de la primera y segunda cámara de floculación de la PTAP La Pastora

#### **2.1.8. Dinámica de fluidos (FD)**

Afirma (Blazek, 2001) lo siguiente:

“De hecho, se trata de la investigación del movimiento interactivo de un gran número de partículas individuales. En nuestro caso, se trata de moléculas y átomos. Eso significa que suponemos que la densidad del fluido es lo suficientemente alta como para poder aproximarla con un continuo. Implica que incluso un elemento del fluido infinitamente pequeño (en el sentido del cálculo diferencial) todavía contiene un número suficiente de partículas, para las cuales podemos especificar la velocidad media y la energía cinética media. De esta forma conseguimos definir velocidad, presión, temperatura, densidad y otras cantidades importantes en cada punto del fluido.

La derivación de las ecuaciones principales de la dinámica de fluidos se basa en el hecho de que el comportamiento dinámico de un fluido está determinado por las siguientes leyes de conservación, a saber:

- La conservación de la masa
- La conservación del impulso
- La conservación de la energía

La conservación de una determinada cantidad de flujo significa que su variación total dentro de un volumen arbitrario se puede expresar como el efecto neto de la cantidad que se transporta a través del límite, cualquier fuerza y fuente interna y las fuerzas externas que actúan sobre el volumen. La cantidad que cruza el límite se llama flujo. El flujo puede ser en general descompuesto en dos diferentes partes: una debida al transporte convectivo y otra debido al movimiento molecular presente en el fluido en reposo. Esta segunda contribución es de naturaleza difusiva: es proporcional al gradiente de la cantidad considerada y, por tanto, desaparecerá en una distribución homogénea.

La discusión de las leyes de conservación nos lleva naturalmente a la idea de dividir el campo de flujo en varios volúmenes y concentrarnos en la modelización del comportamiento del fluido en una de esas regiones finitas. Para ello definimos el llamado volumen de control finito e intentamos desarrollar una descripción matemática de sus propiedades física”.

La dinámica de fluidos se puede entender como la compilación de los conocimiento necesarios para hacer un intento de numeralizar la complejidad intrínseca a los fluidos, que mediante muchas simplificaciones y consideraciones iniciales se logra dar con sus ecuaciones gobernantes que empieza con el estudio de Navier y finaliza con el aporte de Stokes, dando las ecuaciones de Navier-Stokes que

son tal vez las ecuaciones más importantes de todas, porque su comprensión y soñada solución analítica permitiría comprender y ya no estimar si no calcular numéricamente cualquier efecto relacionado con los fluidos

### ***2.1.9. Ecuación de continuidad (1era ley de conservación)***

Según (Blazek, 2001):

“Si restringimos nuestra atención a fluidos monofásicos, la ley de conservación de la masa expresa el hecho de que la masa no puede ser creada en tal sistema de fluidos, ni puede desaparecer de él. Tampoco hay contribución de flujo difusivo a la ecuación de continuidad, ya que, para un fluido en reposo, cualquier variación de masa implicaría un desplazamiento de las partículas del fluido.”

Lo que indica Blazek es que en un fluido monofásico, es decir solo gas o solo líquido, es decir se carece de interfaces complicadas entre fases (fracciones de volumen), nos indica en palabras simples la frase conocida de “la masa no se crea ni se destruye”, que significa que para un estudio ya sea por volúmenes finitos o métodos similares uno debe de garantizar que la masa que entra es la misma que la que sale para cada paso de tiempo, o numéricamente se pueda decir que su error sea tolerable, avalando así que la masa se siempre conservativa.

#### **Figura 10**

*Ecuación integral de conservación de masa*

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0.$$

### ***2.1.10. Ecuación de momento (2da ley de conservación)***

Según (Blazek, 2001):

“Podemos comenzar la derivación de la ecuación de momento recordando la forma particular de la segunda ley de Newton, la cual establece que la variación del momento es causada por la fuerza neta que actúa sobre un elemento de masa. Para el momento de una porción infinitesimalmente pequeña del volumen de control  $\Omega$  tenemos:

$$\rho \vec{v} d\Omega$$

La variación en el tiempo del momento dentro del volumen de control es igual a:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{v} d\Omega$$

Por lo tanto, la cantidad conservada aquí es el producto de la densidad por la velocidad, es decir:

$$\rho \vec{v} = [\rho u, \rho v, \rho w]^T$$

El tensor de flujo convectivo, que describe la transferencia de momento a través de la frontera del volumen de control, consiste en el sistema de coordenadas cartesianas con los siguientes tres componentes:

- componente en  $x$ :  $\rho u \vec{v}$
- componente en  $y$ :  $\rho v \vec{v}$
- componente en  $z$ :  $\rho w \vec{v}$

La contribución del tensor de flujo convectivo a la conservación del momento está entonces dada por:

$$- \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS$$

El flujo difusivo es cero, ya que no hay difusión de momento posible para un fluido en reposo. Así que la pregunta que queda ahora es: ¿cuáles son las fuerzas a las que está expuesto el elemento de fluido?

Podemos identificar dos tipos de fuerzas que actúan sobre el volumen de control:

- Fuerzas de volumen externas o de cuerpo (body forces), que actúan directamente sobre la masa del volumen. Estas son, por ejemplo, fuerzas gravitatorias, de flotación, de Coriolis o centrífugas. En algunos casos, también pueden estar presentes fuerzas electromagnéticas.

- Fuerzas de superficie, que actúan directamente sobre la superficie del volumen de control. Estas resultan solo de dos fuentes:

- (a) la distribución de presiones, impuesta por el fluido exterior que rodea al volumen,
- (b) los esfuerzos cortantes y normales, que resultan de la fricción entre el fluido y la superficie del volumen.

De lo anterior, podemos ver que la fuerza de cuerpo por unidad de volumen, denotada como  $\rho \vec{f}_e$  corresponde a las fuentes de volumen. Así, la contribución de la fuerza de cuerpo (externa) a la conservación del momento es:

$$\oint_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega$$

Las fuentes de superficie consisten entonces en dos partes: un componente de presión isotrópico y un tensor de esfuerzos viscosos  $\vec{\tau}$ , es decir:

$$\vec{Q}_s = -p\vec{I} + \vec{\tau}$$

Con  $\vec{I}$  siendo el tensor unitario. El efecto de las fuentes de superficie en el volumen de control.

Por lo tanto, si ahora sumamos todas las contribuciones anteriores de acuerdo con la ley general de conservación, obtenemos finalmente la expresión:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} \, d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) \, dS \\
= \int_{\Omega} \rho \vec{f}_e \, d\Omega - \int_{\partial\Omega} p \vec{n} \, dS + \int_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) \, dS
\end{aligned}$$

para la conservación del momento dentro de un volumen de control arbitrario  $\Omega$  que está fijo en el espacio.”

En términos simples se puede decir que esta ley proviene de la segunda ley de Newton  $\vec{F} = m\vec{a}$  esta ley se trata de como las fuerzas afectan el cambio en la cantidad de movimiento ( $\rho v$ ) del fluido, esta ecuación relaciona la inercia del fluido, las fuerzas internas y externas.

#### ***2.1.11. Ecuación de energía (3ra ley de conservación)***

Esta ecuación se basa en la primera ley de la termodinámica, que anuncia que la energía no se crea ni se destruye, cuando hablamos del agua como fluido de estudio no se considera esta ecuación porque la densidad es constante, debido a la incompresibilidad del agua

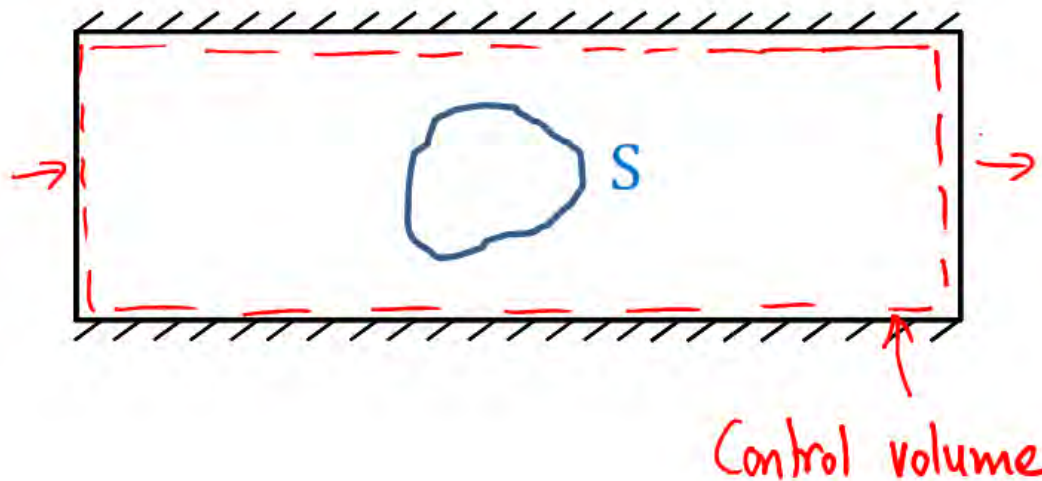
#### ***2.1.12. Forma integral de las leyes de conservación***

Aplicamos las leyes a un volumen de control que puede ser fijo o móvil y describe el comportamiento global del sistema, sobre el cual se aplican las leyes de conservación



**Figura 11**  
*Enfoque integral*

- Apply laws to finite volume in flow domain

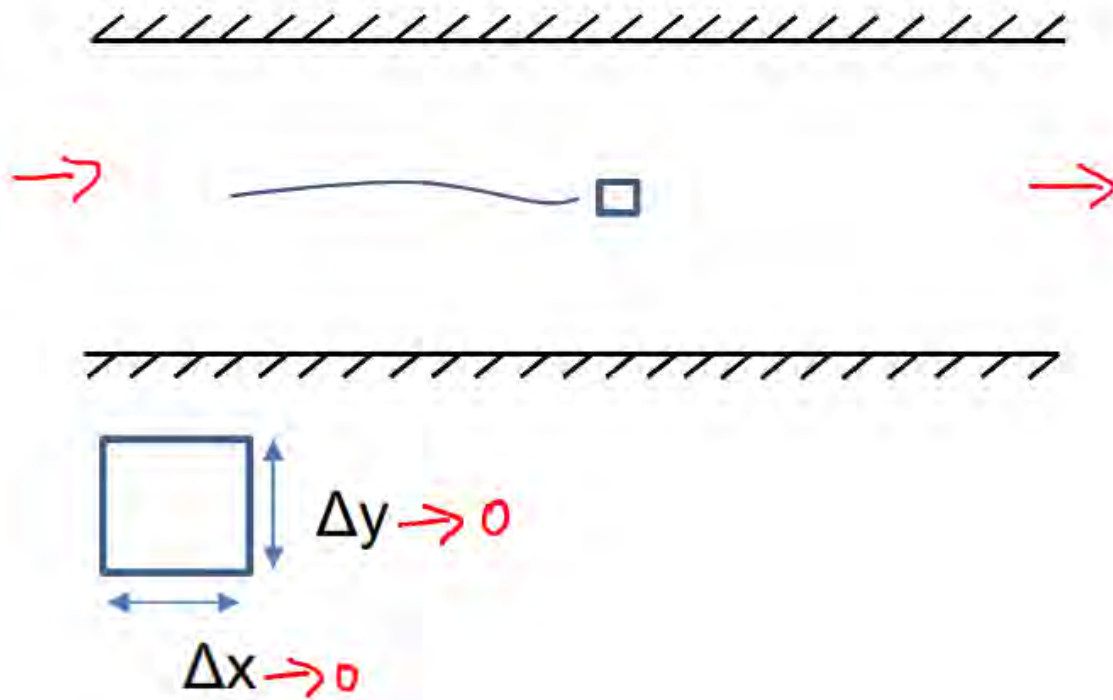


*Nota:* En la figura se puede observar un campo de estudio 2D delimitado por el marco de color negro, donde se tiene un volumen de control S (entiéndase como un volumen finito donde se buscará garantizar las leyes de gobierno).

### **2.1.13. Forma diferencial de las leyes de conservación**

Aplicamos las leyes a una partícula de fluido infinitesimal, sobre puntos del dominio del fluido, es decir, se hace seguimiento de cada partícula y se evalúa sobre esta las leyes de conservación

**Figura 12**  
*Enfoque diferencial*



*Nota:* En la figura se puede observar un campo de estudio 2D delimitado por el marco de color negro, donde se tiene una partícula 2D diferencial, es decir que sus componentes  $\Delta x$  y  $\Delta y$  tienen longitudes que tienden a 0, es sobre esta partícula que se busca garantizar las leyes de conservación

#### **2.1.14. Enfoque euleriano**

Estudiamos los espacios (coordenadas) donde el fluido fluye, no seguimos a las partículas, el sistema se mantiene fijo en el espacio, no se mueve con el fluido, observamos el comportamiento en puntos específicos, se puede usar volúmenes de control para una sección de tubería o de canal, y ahí estudiamos en esa sección fija, como varían las velocidades y presiones

#### **Ejemplo de marco Euleriano:**

Imagina un río que fluye a través de un punto en la orilla. En el enfoque Euleriano, te concentrarías en estudiar cómo varían las propiedades del flujo (como la velocidad, la temperatura o

la concentración de algún contaminante) en un punto específico a medida que el fluido pasa por allí. No te interesa seguir las partículas del agua, sino cómo el flujo en ese punto cambia con el tiempo.

### Figura 13

*Enfoque euleriano*



*Nota:* En la figura se puede observar un hombre estudiando un punto específico del río, es decir como si pusiera un sensor, una cámara, pero sobre un punto o volumen específico, donde estudiara como varia las propiedades del flujo en ese punto a lo largo del tiempo.

#### 2.1.15. Enfoque lagrangiano

Se centra en el seguimiento de las partículas del fluido a medida que se desarrollan en el tiempo, describimos como las propiedades del fluido cambian a medida que las partículas del fluido se desplazan en el espacio

#### **Ejemplo de marco Lagrangiano:**

Imagina que estás observando una gota de aceite en el océano. En el enfoque lagrangiano, seguirías la trayectoria de esa gota a medida que se desplaza a través del agua, observando cómo cambian su posición y velocidad con el tiempo. Te interesa cómo se comporta esa gota específica y

cómo sus propiedades cambian a medida que avanza por el océano mas no el comportamiento de sus partículas vecinas.

**Figura 14**  
*Enfoque lagrangiano*



*Nota:* En la figura se puede observar un hombre estudiando el comportamiento a través del tiempo de una partícula de aceite contaminante dentro del río, es como si se hiciera seguimiento continuo y estudio de sus propiedades de esta partícula, pero solo de esta sin importar las demás.

**Tabla 1**  
*Enfoque euleriano VS Enfoque lagrangiano*

Característica	Euleriano	Lagrangiano
<b>Punto de vista</b>	Fijo en el espacio, en un volumen de control	Fijo en la partícula, se sigue la trayectoria
<b>Análisis de</b>	Propiedades del fluido en puntos específicos	Propiedades del fluido a lo largo de una trayectoria de partículas
<b>Uso principal</b>	Análisis de flujos en regiones y volúmenes	Análisis de flujos a nivel de partículas individuales

	Ecuaciones de	
<b>Ecuaciones típicas</b>	conservación de masa, momento y energía en forma diferencial e integral	Seguimiento de trayectorias de partículas y ecuaciones de movimiento
<b>Ventajas</b>	Sencillo para problemas con geometría compleja y volúmenes de control	Útil para estudios de dinámica de partículas y simulaciones detalladas
<b>Desventajas</b>	Difícil de modelar el comportamiento de partículas individuales	Más complejo cuando se trata de flujos grandes o continuos

*Nota:* En la tabla se puede observar las principales diferencias entre el enfoque euleriano y lagrangiano

Se usa más el enfoque euleriano en la práctica porque el flujo tiene partículas infinitas y no sería práctico hacer un estudio lagrangiano, mientras en el enfoque euleriano se puede emplear un volumen de control fijo donde podemos medir las propiedades del flujo tanto numéricamente como en el modelo físico, porque los sensores de medición se realizan en zonas fijas, lo cual facilita la validación de un modelo numérico, también es importante recalcar que el enfoque euleriano simplifica las ecuaciones de conservación, porque se trata del cambio de propiedades en puntos específicos, lo que permite un tratamiento más directo y simplificado en términos de derivadas parciales con respecto al tiempo y el espacio. En nuestro caso de estudio Flow 3D emplea el enfoque euleriano mediante controles de volumen usando la forma integral por ser más económico computacionalmente, y fácil de procesar para el computador.

### 2.1.16. Análisis estacionario

En este análisis las propiedades del flujo no cambian en el tiempo, en un punto específico del espacio, es decir, aunque el flujo este moviéndose, las condiciones del flujo (como velocidad, presión, densidad, temperatura, etc) en cualquier punto dado permanecerán constantes a lo largo del tiempo.

**Figura 15**

*Análisis estacionario*

## Régimen Estacionario vs Transitorio



**Navier-Stokes Equations**  
3 - dimensional - unsteady

Glenn Research Center

Coordinates: (x,y,z)	Time: t	Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ	Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et		Prandtl Number: Pr

**Continuity:**  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$

**X - Momentum:**  $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_\tau} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$

**Y - Momentum:**  $\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_\tau} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$

**Z - Momentum:**  $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_\tau} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$

**Energy:**  $\frac{\partial(E_t)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_t)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_t)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_t)}{\partial z} = -\frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} - \frac{1}{Re_\tau Pr_\tau} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_\tau} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$

**Estacionario**  
(No se considera el tiempo)

**Transitorio**  
(Depende del tiempo)

*Nota:* En la tabla se puede observar las ecuaciones gobernantes de los fluidos conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, para un análisis estacionario se simplifican las componentes que dependen del tiempo, porque se hace el estudio en un estado estable

#### **Ejemplo:**

Flujo en una tubería con velocidad constante

### 2.1.17. Análisis transitorio

Un análisis transitorio es aquel en el que las propiedades del fluido cambian con el tiempo. Esto significa que las condiciones del flujo en un punto determinado del tiempo varían con el tiempo

#### **Ejemplo:**

Flujo turbulento que no se estabiliza en el tiempo

**Tabla 2**  
*Análisis estacionario VS Análisis transitorio*

Característica	Flujo Estacionario	Flujo Transitorio (No Estacionario)
Dependencia temporal	Las propiedades no cambian con el tiempo en cada punto.	Las propiedades cambian con el tiempo en cada punto.
Derivada temporal	$\partial/\partial t = 0$ (cero en todo momento).	$\partial/\partial t \neq 0$ (varía con el tiempo).
Complejidad de las ecuaciones	Ecuaciones más simples (sin términos de tiempo).	Ecuaciones más complejas, con términos de tiempo.
Ejemplo típico	Flujo en una tubería constante, flujo alrededor de un edificio en régimen estacionario.	Flujo durante un arranque de bomba, flujo turbulento en desarrollo.

*Nota:* En la tabla se puede observar las diferencias principales entre un análisis estacionario y un análisis transitorio. Flow 3D solo realiza simulaciones con análisis transitorio y debido a la turbulencia es mucho mejor realizar este tipo de análisis

### **2.1.18. Dinámica computacional de fluidos (CFD)**

Según (Blazek, 2001):

“Las siglas CFD son el acrónimo de Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics). La física de los fluidos puede ser expresada en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias o integro-diferenciales difíciles de resolver analíticamente excepto en casos muy concretos de poco interés práctico. Para obtener la solución aproximada numéricamente es necesario discretizar las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas que serán resueltas mediante los algoritmos apropiados ejecutados por lo general en ordenadores. Entre las grandes ventajas que ofrece la CFD se encuentra el bajo coste que presentan la simulación de prototipos en comparación con ensayos de modelos a escala real o reducida. Además, existe la libertad

para imponer condiciones de contorno y obtenemos la información de todas las variables en gran cantidad de puntos del espacio, algo imposible en experimentos. Hay que tener en cuenta que muchas veces es complicado fijar los parámetros adimensionales en los experimentos para que coincida con los del caso que se quiere analizar, especialmente cuando hay que imponer varios de ellos como por ejemplo el número de Reynolds y número de Froude. Por otro lado, el CFD también presenta limitaciones. Uno de los inconvenientes más importantes es lo costoso que resulta resolver todas las escalas de las ecuaciones de Navier-Stokes cuando el fluido se encuentra en régimen turbulento, lo que obliga a reducir el tamaño de la simulación usando modelos en las ecuaciones que pueden dar lugar a soluciones no solo cuantitativamente incorrectas sino también cualitativamente”.

#### ***2.1.19. Modelamiento hidráulico tridimensional***

Afirma (Mendoza, 2023) lo siguiente:

“En la actualidad el modelamiento numérico de estructuras hidráulicas, tales como obras de regulación, trasvases, obras de regadío, obras de saneamiento y drenaje urbano, entre otras, permite verificar y optimizar sus respectivos diseños; convirtiéndose en la herramienta predilecta para simular el comportamiento de los fluidos en las estructuras, gracias a la reducción de tiempo, costos y estudios con mayor generalidad que permiten obtener información tanto cualitativa como cuantitativa de diferentes variables como velocidades, presiones, turbulencia, vorticidad, esfuerzos de corte, etc. en cualquier parte del dominio resultando una gran ventaja en comparación a los modelos físicos, en los cuales es difícil de obtener.

A continuación, se presenta una comparación entre los dos tipos de simulaciones.”



**Tabla 3***Fortalezas y debilidades de la modelación física y numérica*

	<b>Modelación Física</b>	<b>Modelación Numérica</b>	
Fortalezas	Es tradicional y confiable.	Son baratos y rápidos.	
	Los fenómenos son reproducidos de manera natural en su mayoría.	Existe validación para diversos tipos de simulaciones.	
Fortalezas	Se pueden implementar cambios pequeños. Facilidad de ensayar diversos escenarios relacionados al caudal.	Fácil de implementar diferentes escenarios.	
		Los modelos pueden almacenarse para volver a estudiarlos en el futuro.	
Fortalezas		No se ven afectados en igual medida que los modelos físicos por los efectos de escala.	
Debilidades	Costosos y lentos.	Presentan limitaciones computacionales. La discretización afecta los resultados. Fenómenos de mallado, estos pueden afectar los resultados.	
	Se muestran rígidos frente a cambios de escenarios.	Obtener buenos resultados depende de la experiencia del modelador.	
Debilidades	Presenta limitaciones para extraer información. Son afectados por los efectos de escala. Efectos del modelo.		
	Son efímeros.		

*Nota:* Adaptado de (Mendoza, 2023) donde se puede ver ventajas de realizar modelos numéricos con relación a los modelos físicos clásicos

#### **2.1.19.1. Etapas de modelación numérica:**

Afirma (Mendoza, 2023) que las etapas son las siguiente:

“Preprocesamiento, está conformado por:

- Identificación del dominio.

- Creación o importación de la geometría.
- Elaboración del mallado.
- Configuración del tipo de análisis
- Configuración del dominio.
- Configuración de las condiciones de frontera e iniciales.
- Configuración del solver, el cual comprende los controles y criterios de convergencia.

Solver, esta etapa está conformada por:

- Configuración del solver Manager.
- Verificación del cumplimiento de los controles y criterios de convergencia.
- Verificación del cumplimiento de las ecuaciones de conservación.

Postprocesamiento, esta etapa está conformada por:

- Obtención de resultados cualitativos.
- Obtención de resultados cuantitativos.”

#### **2.1.19.2. Relevancia de las simulaciones**

Afirma (Mendoza, 2023) lo siguiente:

“Como se mencionó anteriormente, las simulaciones nos permiten verificar y optimizar el diseño de las estructuras hidráulicas, con lo cual se evitarían posibles problemas ocasionados por fenómenos como erosión, socavación, cavitación, etc. en estructuras una vez construidas.

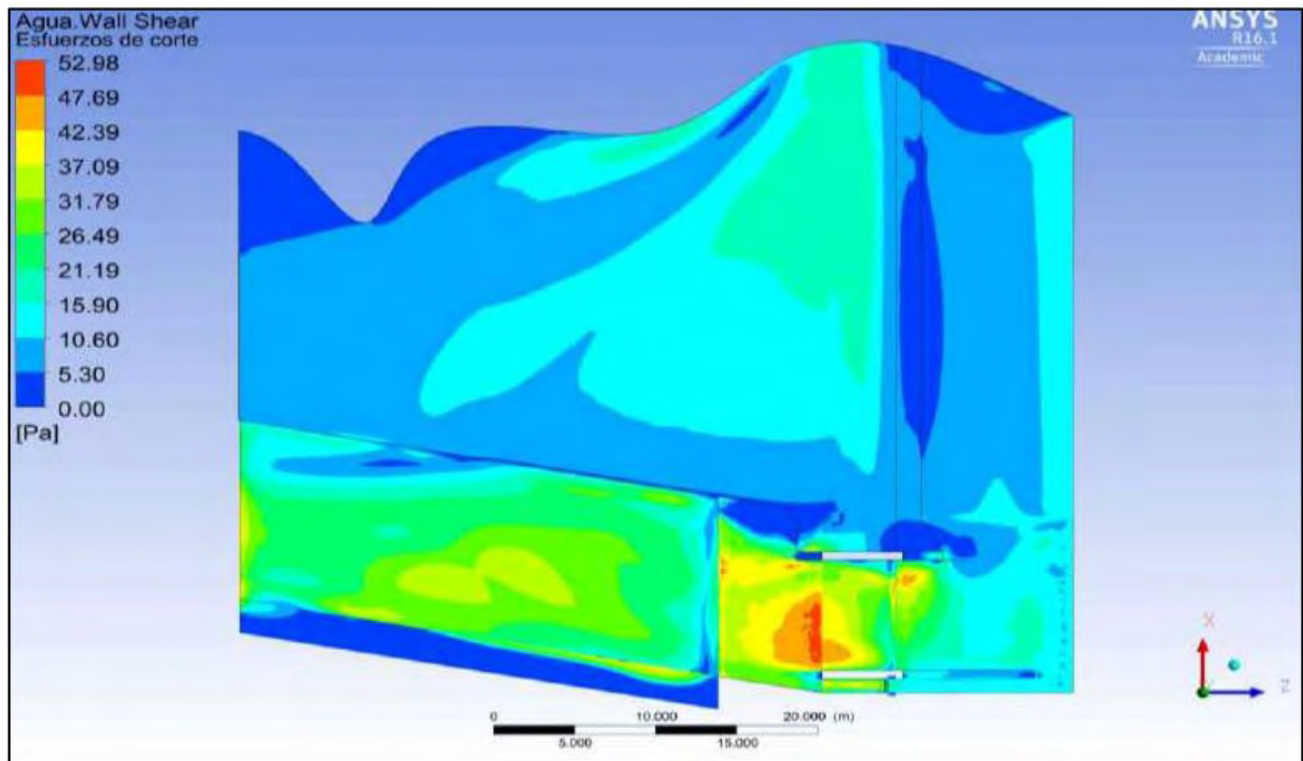
Por ejemplo, en el trabajo de investigación realizado por (Arteaga-Acuña, 2017) logra simular los efectos de desgaste erosivo presentes en la bocatoma de la central hidroeléctrica María auxiliadora de Quiroz (Ayabaca - Piura), en este trabajo concluye

que tanto las velocidades como los esfuerzos cortantes altos influyeron la erosión de dicha estructura.

Ahora bien, preguntémonos si estos problemas se hubieran presentado en el caso hipotético de haberse realizado una simulación previa a la construcción de dicha estructura hidráulica”.

**Figura 16**

*Esfuerzos cortantes en la bocatoma María Auxiliadora.*



*Nota:* Adaptado de (Arteaga-Acuña, 2017) donde se ve las isosuperficies de los esfuerzos de corte en la etapa de posprocesamiento de la simulación numérica que realizó a la bocatoma de María Auxiliadora.

### 2.1.1. FLOW – 3D

FLOW-3D es un software de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) ampliamente utilizada en investigación y aplicaciones de ingeniería. Su capacidad para **modelar flujos con superficie libre, geometrías complejas y fenómenos transitorios** la convierte en una herramienta idónea para el análisis de sistemas hidráulicos, incluidos aquellos desarrollados por civilizaciones antiguas. Mediante FLOW-3D es

posible recrear y evaluar el comportamiento hidráulico de infraestructuras históricas, permitiendo una comprensión más profunda de las soluciones constructivas y de gestión del agua implementadas en el pasado (Chen et al., 2014).

### 2.1.1.1. Principios y fundamentos de la simulación en FLOW-3D

Para comprender de manera precisa el comportamiento hidráulico de las estructuras del sistema hidráulico incaico de Tipón, la simulación computacional en Flow – 3D se fundamenta en los principios de la mecánica de fluidos formulados mediante el Teorema del Transporte de Reynolds. Este teorema establece una equivalencia matemática entre la razón de cambio de una propiedad extensiva en un sistema material y el cambio de dicha propiedad dentro de un volumen de control fijo en el espacio. Dado que el seguimiento de una masa fluida específica es impráctico debido a su deformabilidad y movilidad, resulta mucho más eficiente realizar el análisis sobre volúmenes de control fijos, dentro de los cuales se evalúan las leyes de conservación (Flow Science, 2023).

$$\frac{dB_{sist.}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (1)$$

Donde:

$B_{sist.}$  = Propiedad total del sistema ( masa, momento, energía)

$b$  = Propiedad específica o intensiva (propiedad por unidad de masa)

$\rho$  = Densidad del fluido ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$\vec{V}$  = Vector velocidad del fluido ( $m \cdot s^{-1}$ )

$\vec{n}$  = Vector normal unitario que apunta hacia afuera de la sc (adimensional)

$VC$  = Volumen de control (la región espacial que contiene el fluido).

$SC$  = Superficie de control (frontera que limita al volumen de control).

$dV$  = Elemento diferencial de volumen.

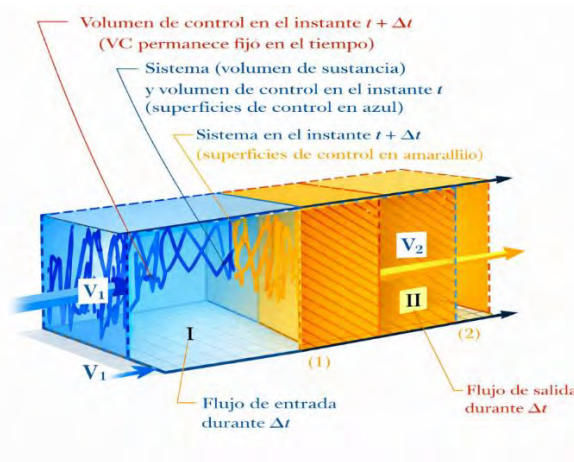
$dA$  = Elemento diferencial de área en la superficie de control.

Fenómeno físico	Qué se conserva	Valor de (b)	Unidades de (b)
Continuidad	Masa	1	adimensional
Cantidad de movimiento	Momento lineal	$\vec{V}$	m/s
Energía	Energía mecánica específica	e	J/kg

Término	Significado físico	Unidades SI
$B_{sist}$	Cantidad total de la propiedad en el sistema material	depende del fenómeno
$\frac{dB_{sist}}{dt}$	Variación temporal de la propiedad del sistema	kg/s, N o W
$\rho$	Densidad del fluido	kg/m <sup>3</sup>
$b$	Propiedad específica (por unidad de masa)	ver tabla 1
$dV$	Volumen diferencial	m <sup>3</sup>
$\int_{VC} \rho b dV$	Cantidad de la propiedad dentro del volumen de control	kg, kg·m/s, J
$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b dV$	Acumulación temporal dentro del VC	kg/s, N, W
$\vec{V}$	Velocidad del flujo	m/s
$\vec{n}$	Vector normal saliente	adimensional
$\vec{V} \cdot \vec{n}$	Componente normal de la velocidad	m/s
$dA$	Área diferencial	m <sup>2</sup>
$\int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA$	Flujo neto de la propiedad a través de la superficie	kg/s, N, W

Conservación	Unidades del término completo
Masa	kg/s
Cantidad de movimiento	N (kg·m/s <sup>2</sup> )
Energía	W (J/s)

**Figura 1**  
*Teorema de Transporte de Reynolds Volúmenes de control*



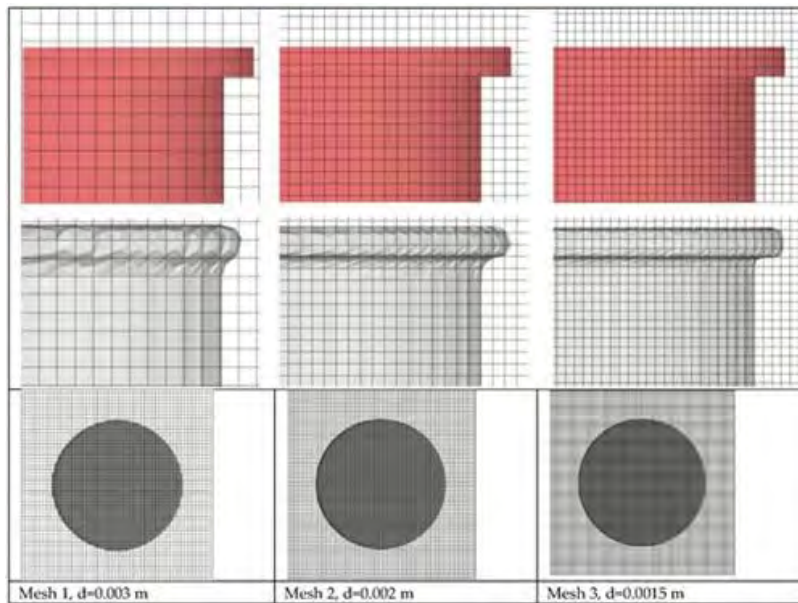
Nota: Extraído de Hidraulica General de Sotelo Avila.

En este contexto, FLOW-3D utiliza el método de volúmenes finitos, una técnica de discretización espacial donde el dominio computacional (la geometría del canal, acueducto o estructura hidráulica) se subdivide en múltiples celdas o volúmenes de control pequeños. En cada uno de estos volúmenes se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento (Navier-Stokes) y, de ser necesario, la energía todas ellas derivadas del Teorema General del Transporte de Reynolds. (Flow Science, 2023).

#### 2.1.1.2. Método FAVOR en FLOW-3D

El software FLOW-3D emplea el método FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) para la representación de geometrías complejas dentro de una malla cartesiana, mediante el cálculo de fracciones de área y volumen ocupadas por los sólidos en cada celda de control. Este enfoque permite una aproximación precisa de obstáculos y estructuras hidráulicas sin necesidad de mallas no estructuradas, mejorando la estabilidad numérica y la eficiencia computacional. La exactitud geométrica del método FAVOR depende directamente de la resolución del mallado. (Flow Science, Inc., 2023).

**Figura 2**  
*FAVOR*



Nota: Cuanto más fino es el mallado es mejor la resolución Extraído de Flow Science, Inc., 2023.

### 2.1.1.3. Método volumen del fluido (VOF) en FLOW 3D

Una de las características distintivas de FLOW-3D es su capacidad para modelar flujos con superficie libre mediante la implementación del método del Volumen de Fluido (VOF, por sus siglas en inglés Volume of Fluid). Este método permite rastrear con alta precisión la interfaz entre el agua y el aire, asignando a cada celda del dominio computacional un valor de fracción de volumen comprendido entre 0 y 1. Dicho valor representa la proporción del volumen de la celda ocupada por el fluido, lo que permite definir de forma clara y precisa la ubicación de la superficie libre sin necesidad de deformar la malla. De esta manera, el método VOF posibilita la simulación robusta y estable en el tiempo de fenómenos complejos como saltos hidráulicos, caídas de agua, desbordes e interacción fluido-estructura, manteniendo una alta fidelidad en la representación del comportamiento físico del flujo.(Flow Science, 2023).

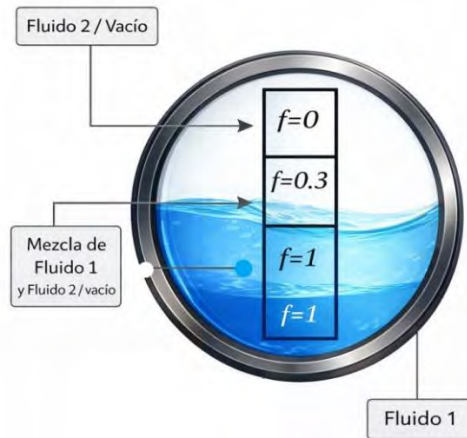
El método VOF se basa en el concepto de fracción de volumen, generalmente representada por la variable  $F$ :

$F = 1 \rightarrow$  la celda está completamente llena de fluido (agua).

$F = 0 \rightarrow$  la celda está llena de aire.

$0 < F < 1 \rightarrow$  la celda contiene la interfaz agua-aire.

**Figura 3**  
*VOF*



Nota: extraído de Flow Science

#### 2.1.1.4. Ecuación de continuidad o conservación de masa

Este principio establece que la masa no se puede crear ni destruir. La masa en un sistema cerrado permanece constante, mientras que en un volumen de control existe libertad, pues la masa puede ingresar y salir del volumen de control; sin embargo, el cambio neto de la masa es igual a cero.

Para encontrar la ecuación de continuidad vamos a partir del teorema de Reynolds:

$$\frac{dB_{sist.}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (23)$$

Para este caso:

$$B_{sist.} = m$$

$b = 1$  (porque masa por unidad de masa es  $= 1$ )

Sustituyendo en (23):

$$\frac{dM_{sist.}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (24)$$

Por la conservación de la masa del sistema:

$$\frac{dM_{sist.}}{dt} = 0 \quad (25)$$



Se obtiene la ecuación integral de continuidad:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (26)$$

**Teorema de la divergencia de Gauss:** El flujo neto de un campo vectorial que atraviesa una superficie cerrada es igual a la integral del volumen de la divergencia de ese campo dentro del volumen encerrado por dicha superficie.

$$\int_{SC} \vec{F} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \nabla \cdot \vec{F} dV \quad (27)$$

Dado que  $\vec{F} = \rho \vec{V}$ , entonces la ecuación (27) queda así:

$$\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV \quad (28)$$

Ahora remplazamos en la ecuación (26)

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{VC} \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV \quad (29)$$

Agrupando términos dentro de la integral:

$$\int_{VC} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right) dV = 0 \quad (30)$$

Dado que el volumen de control es arbitrario y la integral se anula para cualquier volumen, el **integrando debe ser nulo en cada punto del dominio:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (31)$$

Donde  $\nabla$  (nabla) es un operador vectorial que permite escribir derivadas espaciales de forma compacta:

• Gradiente  $\varphi$ :

$$\nabla \varphi = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (32)$$

• Divergencia  $\vec{V} = (u, v, w)$ :

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (33)$$

En el caso de la ecuación de continuidad se usa la divergencia del campo de flujo másico  $\rho V$ , es decir  $\nabla \cdot (\rho \vec{V})$ .

Entonces la expresión general de la ecuación de conservación de masa quedaría así: (Flow Science, 2023)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (34)$$

En este caso al ser un fluido incompresible la densidad es constante por ende se anula y la ecuación queda simplificada:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (35)$$

Esto significa que la suma de las variaciones espaciales de las componentes de la velocidad es nula. En otras palabras, la masa que entra a un volumen de control es igual a la que sale, sin que el volumen de fluido se expanda o contraiga.

Esta expresión indica que la suma de las variaciones espaciales de la velocidad debe ser cero. En la práctica, al usar CFD, no se trabaja con derivadas exactas, sino con aproximaciones en celdas o volúmenes finitos.

En síntesis, la ecuación nos indica que el volumen del fluido no se expande ni se contrae; la masa que entra a un volumen de control es igual a la que sale

Forma integral

$$\begin{aligned} \int_{V_c} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dV &= 0 \\ \Rightarrow \int_{V_c} (\nabla \cdot \vec{V}) dV &= 0 \end{aligned} \quad (36)$$

Aplicando la ecuación (27) que es el teorema de divergencia de gauss se obtiene la siguiente ecuación

$$\int_{S_c} \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (37)$$

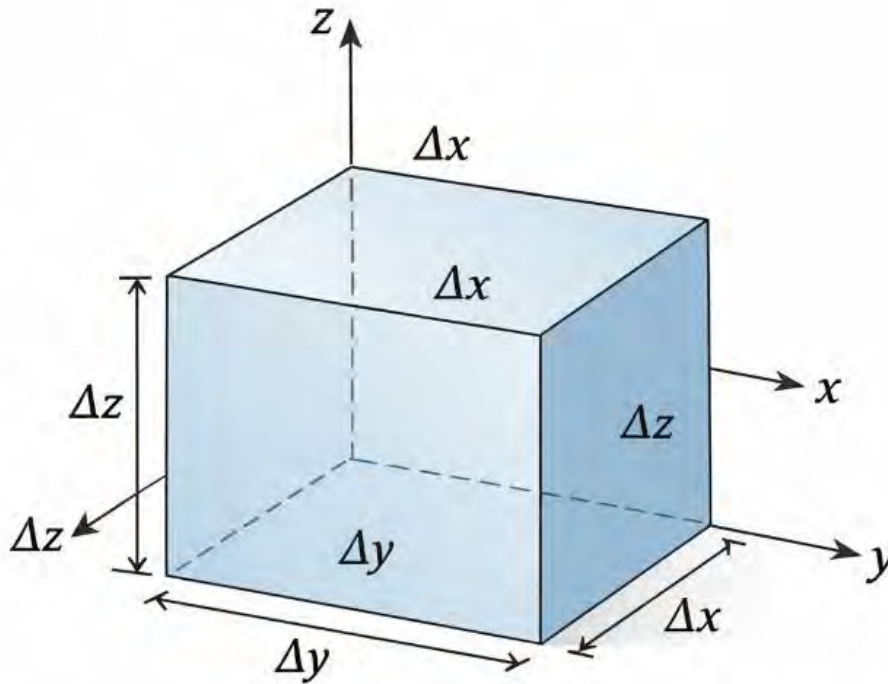
Esta ecuación se entiende que el flujo neto que entra y sale del volumen de control es nulo.

Discretización en un volumen finito cúbico

Imaginemos un cubo con dimensiones  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ . La integral se convierte en sumas de flujos en las caras del cubo:

#### Figura 4

*Cubo para poder entender la discretización*



Nota: Extraído de Hidraulica General de Sotelo Avila

$$[u \cdot \Delta y \Delta z]_x^{x+\Delta x} + [v \cdot \Delta x \Delta z]_y^{y+\Delta y} + [w \cdot \Delta x \Delta y]_z^{z+\Delta z} = 0 \quad (38)$$

Expandiendo los términos tenemos

$$(u_{x+\Delta x} - u_x) \Delta y \Delta z + (v_{y+\Delta y} - v_y) \Delta x \Delta z + (w_{z+\Delta z} - w_z) \Delta x \Delta y = 0 \quad (39)$$

Cada término representa el flujo que entra y sale por las caras opuestas del volumen. Al dividir entre el volumen  $\Delta v = \Delta x \Delta y \Delta z$ :

$$\frac{(u_{x+\Delta x} - u_x)}{\Delta x} + \frac{(v_{y+\Delta y} - v_y)}{\Delta y} + \frac{(w_{z+\Delta z} - w_z)}{\Delta z} = 0 \quad (40)$$

Como el tamaño de estas celdas son pequeñas cada cociente incremental se convierte en una derivada parcial, por definición matemática lo llevamos al límite y nos da la ecuación diferencial de continuidad para flujo incompresible.

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \Rightarrow \nabla \cdot \vec{V} &= 0\end{aligned}\tag{41}$$

La discretización de la ecuación de continuidad garantiza que, en cada volumen finito de la malla, el balance de flujo volumétrico sea nulo, asegurando así la conservación de masa para un fluido incompresible.

#### 2.1.1.5. Ecuación de conservación de momento

La cantidad de movimiento en un sistema es el producto entre su masa y la velocidad. Este principio es una reafirmación de la Segunda Ley de Newton, la cual afirma que la aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el sistema e inversamente proporcional a su masa. Por lo tanto, la cantidad de movimiento en un sistema se conserva: (Flow Science, 2023).

Para poder encontrar la ecuación de conservación de momento partimos de la ecuación de transporte de Reynolds.

$$\frac{dB_{sist.}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA\tag{23}$$

Para hallar la ecuación de momentum

$B = \vec{P}$ , Propiedad extensiva

$$\vec{P} = m\vec{V}$$

$b = \frac{B}{m}$ , Propiedad intensiva

$$B_{sist.} = \int_{sist} \rho b dV$$

$$\frac{d}{dt} \left( \int_{sist} \rho \vec{V} dV \right) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA\tag{42}$$

El primer término significa el cambio temporal del momentum dentro del volumen de control

EL segundo termino significa el momentum que entra o sale del volumen por movimiento del fluido.

Segunda Ley de Newton (forma integral)

$$\frac{d}{dt} \int_{sist} \rho \vec{V} dV = \sum \vec{F} \quad (43)$$

Según la mecánica de fluidos las fuerzas se dividen en fuerzas de volumen y fuerzas de superficie las cuales son:

Las fuerzas de volumen actúan sobre toda la masa del fluido.

$$\vec{F}_{vol} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV \quad (44)$$

Las fuerzas de superficie actúan a través de las fronteras del fluido (esfuerzos).

$$\vec{F}_{sup} = \int_{SA} \sigma \cdot \vec{n} dA \quad (45)$$

Entonces la ecuación (43) quedaría así :

$$\frac{d}{dt} \int_{sist} \rho \vec{V} dV = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SA} \sigma \cdot \vec{n} dA \quad (46)$$

Donde:

$\rho dV = dm$ , Relacion entre el volumen diferencial con la masa diferencial

$\vec{g}$  = aceleración de la gravedad

$\sigma$  = tensor de tensiones

Igualemos la ecuación (42) con la (46)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SA} \sigma \cdot \vec{n} dA \quad (47)$$

Aplicando el teorema de Gauss, se convierte la integral de superficie en integral de volumen:

El lado izquierdo mide cuánto del campo “sale o entra” del volumen.

El lado derecho mide cuánto se genera o se acumula dentro del volumen.

$$\int_{SC} \vec{F} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \nabla \cdot \vec{F} dV \quad (48)$$

En mecánica de fluidos, las fuerzas superficiales no se describen con un vector cualquiera, sino con el tensor de tensiones  $\sigma$

$$\int_{SC} \sigma \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \nabla \cdot \sigma dV \quad (49)$$

teorema de Gauss de forma tensorial  $\vec{F} = T = \rho \vec{V} \vec{V}$ :

$$\begin{aligned} \int_{SC} T \cdot \vec{n} dA &= \int_{VC} \nabla \cdot T dV \\ \Rightarrow \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA &= \int_{VC} \nabla \cdot \rho \vec{V} \vec{V} dV \end{aligned} \quad (50)$$

Ahora la ecuación (47) lo llevamos todos sus termino a términos de volumen de control

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{VC} \nabla \cdot \rho \vec{V} \vec{V} dV = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{VC} \nabla \cdot \sigma dV \quad (57)$$

Agrupamos todos los términos dentro de una sola integral:

$$\int_{VC} \left[ \frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \nabla \cdot \sigma \right] dV = 0 \quad (58)$$

Como el volumen es arbitrario y la integral es cero entonces

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \nabla \cdot \sigma = 0 \quad (59)$$

se obtiene la forma local (diferencial) de la ecuación de momentum:

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \sigma \quad (60)$$

Efectuamos la igualdad que hay entre el flujo de momentum y la aceleración convectiva

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (61)$$

Remplazamos la ecuación (61) en la ecuación (60) nos quedaría la **ecuación de momentum**

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \sigma \quad (62)$$

Donde:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = \text{Aceleración local del momentum} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$\nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \text{Aceleración convectiva} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$\rho\vec{g} = \text{Fuerzas de cuerpo (gravedad)}, (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$\nabla \cdot \sigma = \text{Fuerzas superficiales internas (tensiones)} (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$$

discretización de las ecuaciones de momentum

#### Descomposición del vector velocidad

$$\vec{V} = (u, v, \omega) \quad (63)$$

Donde:

$$u, = \text{Velocidad en } x \text{ (} m \cdot s^{-1} \text{)}$$

$$v = \text{Velocidad en } y \text{ (} m \cdot s^{-1} \text{)}$$

$$\omega = \text{Velocidad en } z \text{ (} m \cdot s^{-1} \text{)}$$

#### Expansión del término transitorio

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = \left( \frac{\partial(\rho u)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho v)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} \right) \quad (64)$$

#### Expansión del término convectivo

$$(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \begin{pmatrix} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \\ u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (65)$$

#### Expansión del gradiente de presión

$$\nabla p = \left( \frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (66)$$

#### Expansión continua del tensor de tensores

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} + \sigma_{xy} + \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} + \sigma_{yy} + \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} + \sigma_{zy} + \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (67)$$

La divergencia quedaría:

$$\nabla \cdot \sigma = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (68)$$

Dirección X

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) = +\rho g_x + \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) \quad (69)$$

Dirección Y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) = +\rho g_y + \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right) \quad (70)$$

Dirección Z

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) = +\rho g_z + \left( \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \quad (71)$$

### 2.1.1.6. Ecuación de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier–Stokes se obtienen a partir de la ecuación general de conservación de cantidad de movimiento al introducir un modelo constitutivo para las tensiones viscosas, asumiendo un fluido newtoniano e incompresible, lo que permite expresar las fuerzas internas en función del campo de velocidades. Para poder desarrollar la ecuación de Navier-Stokes partimos de la ecuación de momentum

Primero descomponemos el tensor de tensiones

$$\sigma = -pI + \tau \quad (72)$$

Donde:

$p = \text{Presion (Pa)}$

$I = \text{Tensor identidad}$



$\tau = \text{Tensor viscoso}$

sustituimos el tensor de tensores en la ecuación (60)

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \nabla \cdot (-pI + \tau) \quad (73)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g}$$

Expansión del término convectivo

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \vec{V}(\nabla \cdot \rho \vec{V}) \quad (74)$$

Como en este caso el fluido es incompresible entonces:

$$\rho = cte$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Entonces  $\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$ , la ecuación (63) quedaría así:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (75)$$

Remplazamos la ecuación (64) en la ecuación (62) nos quedaría

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} \quad (76)$$

Para un **fluido newtoniano** el tensor viscoso tiene el siguiente valor:

$$\tau = \mu [\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T] \quad (77)$$

Así mismo aplicando divergencia (fluido incompresible)

$$\nabla \cdot \tau = \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (78)$$

Donde  $\nabla^2$  es el laplaciano vectorial,

Entonces remplazamos la ecuación (78) en la ecuación (76) obtenemos la ecuación de **NAVIER-STOKES**

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (79)$$

Donde:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = \text{Aceleración local} (N \cdot m^{-3})$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \text{Aceleración convectiva} (N \cdot m^{-3})$$

$$-\nabla p = \text{Fuerza de presión} (N \cdot m^{-3})$$

$$\mu \nabla^2 \vec{V} = \text{Fuerzas viscosas} (N \cdot m^{-3})$$

$$\rho \vec{g} = \text{Fuerzas de cuerpo} (N \cdot m^{-3})$$

discretización de la ecuación de Navier-Stokes

#### Descomposición del vector velocidad

$$\vec{V} = (u, v, \omega) \quad (80)$$

Donde:

$$u, = \text{Velocidad en } x (m \cdot s^{-1})$$

$$v = \text{Velocidad en } y (m \cdot s^{-1})$$

$$\omega = \text{Velocidad en } z (m \cdot s^{-1})$$

#### Expansión del término transitorio

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = \left( \frac{\partial(\rho u)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho v)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} \right) \quad (81)$$

#### Expansión del término convectivo

$$(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \begin{pmatrix} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \\ u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (82)$$

#### Expansión del gradiente de presión

$$\nabla p = \left( \frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (83)$$

#### Expansión del laplaciano de velocidad

$$\nabla^2 \vec{V} = (\nabla^2 u, \nabla^2 v, \nabla^2 \omega) \quad (84)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 u &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \Rightarrow \nabla^2 v &= \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \nabla^2 \omega &= \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \end{aligned}$$

**Ecuaciones de NAVIER–STOKES por dimensión (forma continua)**

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (85)$$

Dirección X

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (86)$$

Dirección Y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (87)$$

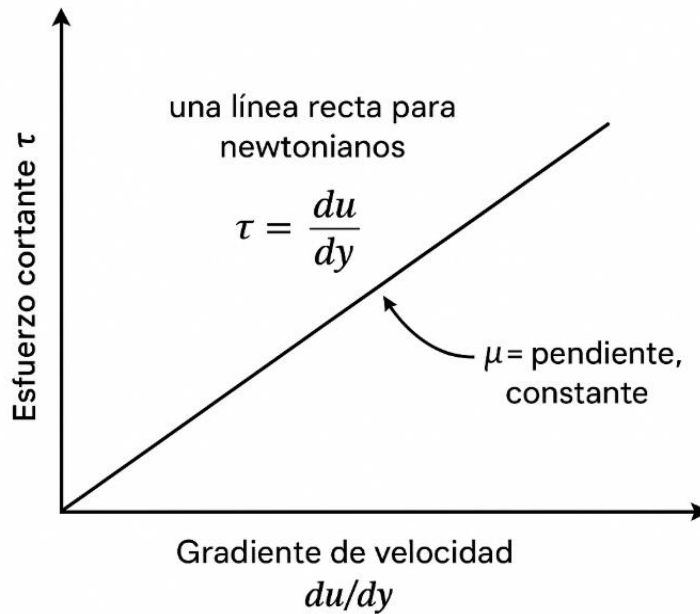
Dirección Z

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (88)$$

Formulación particular de la conservación de momento para fluidos newtonianos, integrando aceleraciones, presiones y esfuerzos viscosos. En la simulación de Tipón, reproducen transiciones de régimen, disipación de energía y patrones de recirculación en estructuras hidráulicas.

**Figura 5**

*Relación esfuerzo cortante y gradiente de velocidad, Conservación de momento*



Nota: Extraído de Chow 2010.

Explica la conservación del momento en fluidos newtonianos

Para comprender mejor estas ecuaciones discretizaremos las ecuaciones para CFD con volúmenes finitos considerando una malla cartesiana uniforme, para ello definimos los siguientes términos

$i, j, k = \text{Nodo}$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z = \text{Espaciamientos}$

$\text{paso } n = \text{Tiempo}$

$u_{i,j,k}^n, v_{i,j,k}^n, \omega_{i,j,k}^n = \text{velocidades en el centro de la celda.}$

$p_{i,j,k}^n = \text{presión en el centro}$

$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \text{viscosidad cinemática}$

**Ecuaciones de NAVIER-STOKES por dimensión (forma continua)**

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (89)$$

Ordenamos la ecuación para discretizar

$$\frac{\partial(\vec{V})}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{V} + \vec{g} \quad (70)$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \rho g_x \quad (71)$$

**Discretización del tiempo (Forward Euler) en el punto(i,j,k):**

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{i,j,k}^n \approx \frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (72)$$

**Discretización termino convectivo**

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i,j,k}^n \approx \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (73)$$

Multiplicamos por la velocidad y repetimos en x, y ,z

Derivada en x

$$u \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i,j,k}^n \Rightarrow u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (74)$$

Derivada en y

$$v \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{i,j,k}^n \Rightarrow v_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta y} \quad (75)$$

Derivada en z

$$\omega \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{i,j,k}^n \Rightarrow \omega_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta z} \quad (76)$$

**Termino convectivo completo**

$$(\vec{V} \cdot \nabla)u \approx \left( u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta y} + \omega_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta z} \right) \quad (77)$$

**Discretización del gradiente de presión**

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{i,j,k}^n \approx \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (78)$$

Entonces

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \Rightarrow -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (79)$$

### Discretización termino viscoso (Laplaciano)

En x

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} \quad (80)$$

En y

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \approx \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} \quad (81)$$

En z

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \approx \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \quad (82)$$

### Termino Laplaciano completo

$$\nabla^2 u_{i,j,k}^n \approx \left( \frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \quad (83)$$

Con todos estos términos discretizados remplazamos en cada componente de la ecuación general

Componente en X

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \left( u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j+1,k}^n - u_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + \omega_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k+1}^n - u_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \right) = \\ & -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v \left( \frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \end{aligned} \quad (84)$$

Componente en Y

$$\begin{aligned} & \frac{v_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \left( u_{i,j,k}^n \frac{v_{i+1,j,k}^n - v_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j+1,k}^n - v_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + \omega_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j,k+1}^n - v_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \right) = \\ & -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j+1,k}^n - p_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + v \left( \frac{v_{i+1,j,k}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{v_{i,j+1,k}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{v_{i,j,k+1}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \end{aligned} \quad (85)$$

Componente en Z

$$\begin{aligned}
& \frac{\omega_{i,j,k}^{n+1} - \omega_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \left( u_{i,j,k}^n \frac{\omega_{i+1,j,k}^n - \omega_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{\omega_{i,j+1,k}^n - \omega_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + \omega_{i,j,k}^n \frac{\omega_{i,j,k+1}^n - \omega_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \right) = \\
& - \frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j,k+1}^n - p_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \\
& + v \left( \frac{\omega_{i+1,j,k}^n - 2\omega_{i,j,k}^n + \omega_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{\omega_{i,j+1,k}^n - 2\omega_{i,j,k}^n + \omega_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{\omega_{i,j,k+1}^n - 2\omega_{i,j,k}^n + \omega_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right)
\end{aligned}$$

### 2.1.1.7. Ecuación de conservación de energía

El principio de conservación de la energía establece que la variación o razón de cambio de la energía interna dentro de un volumen de control es igual a la diferencia entre las razones de transferencia de calor y trabajo hacia dicho volumen. En los flujos de fluidos, este principio se formula considerando la energía total del sistema, compuesta por la energía interna, cinética y potencial del fluido. (Flow Science, 2023)

En el contexto de flujos incompresibles donde no se considera la transferencia de calor, puede asumirse un flujo isotérmico (a temperatura constante), lo cual implica que no se requiere resolver la ecuación de conservación de la energía. Sin embargo, cuando se requiere evaluar la transferencia de calor o procesos termodinámicos, esta ecuación toma la siguiente forma general: (Flow Science, 2023)

$$\frac{\partial(ep)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \rho \vec{v} \left( e + \frac{P}{\rho} \right) \right] = \nabla \cdot (k \nabla T + \vec{\tau} \cdot \vec{v}) \quad (87)$$

Donde:

$ep$  = Energía total por unidad de masa

$\vec{v}$  = vector velocidad

$P$  = Presión

$\rho$  = Densidad

$T$  = Temperatura

$k$  = Conductividad térmica

$\vec{\tau}$  = Tensor de esfuerzos viscosos

### 2.1.1.8. Modelos de turbulencia:

Los modelos de turbulencia son fundamentales para resolver las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía en flujos turbulentos, donde la naturaleza caótica y multifacética del movimiento del fluido dificulta la resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes. En particular, los modelos de turbulencia permiten aproximar el efecto de los remolinos y fluctuaciones pequeñas sobre el flujo promedio, facilitando la simulación numérica y el análisis computacional con un costo computacional razonable. (Flow Science, 2023)

Uno de los modelos más utilizados es el RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que consiste en promediar las variables de flujo en el tiempo, separándolas en una componente media y una fluctuante. Esto transforma las ecuaciones de Navier-Stokes originales en un conjunto de ecuaciones promedio, en las cuales se introduce el término de tensiones de Reynolds, que representan el efecto de la turbulencia en el flujo promedio. Este método es ampliamente empleado debido a su balance entre precisión y eficiencia computacional, siendo ideal para simular flujos turbulentos de gran escala en ingeniería hidráulica y ambiental (Flow Science, 2023).

Dentro de los modelos basados en RANS, destaca el modelo  $k-\omega$  (k-omega), desarrollado por Wilcox, que modela la turbulencia a través de dos variables transportadas: la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la tasa de disipación específica ( $\omega$ ). Este modelo es particularmente efectivo en regiones cercanas a las paredes sólidas, zonas con recirculación, curvaturas intensas y flujos internos con separación de flujo y chorros, donde los modelos convencionales pueden perder precisión. Además, el modelo  $k-\omega$  se adapta bien a flujos con números de Reynolds bajos, lo que lo hace una herramienta robusta para simular sistemas hidráulicos complejos como los canales y acueductos del complejo arqueológico de Tipón (Flow Science, 2023).

#### 2.1.1.8.1 Ecuaciones $K-\omega$

Ecuación de la energía cinética turbulenta ( $k$ ):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta \times \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (88)$$

Ecuación de la tasa de disipación específica ( $\omega$ ):



$$\frac{\partial(pw)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u_j)}{\partial x_j} = \alpha \frac{w}{k} P_k - \beta \rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_w \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x_j} \right] \quad (89)$$

En el modelo de turbulencia  $k-\omega$  utilizado en la simulación CFD, la ecuación de transporte de  $k$  cuantifica la generación y difusión de energía cinética turbulenta producida por gradientes de velocidad, mientras que la ecuación de  $\omega$  determina la tasa a la que dicha turbulencia se disipa en el flujo. Su resolución conjunta en FLOW-3D permitió caracterizar con precisión la intensidad y el decaimiento de la turbulencia en el sistema hidráulico de Tipón, reproduciendo fenómenos como remolinos, zonas de recirculación y disipación de energía en estructuras de caída y cambios de sección.

### 2.1.2. *Parámetros del CFD en FLOW-3D*

En el contexto de la dinámica de fluidos computacional (CFD), los parámetros de configuración determinan el comportamiento físico y numérico del modelo. En **FLOW-3D**, estos parámetros se clasifican en físicos, geométricos y numéricos, y deben definirse con precisión para garantizar la validez de los resultados (Flow Science, 2023).

#### 2.1.2.1. **Parámetros físicos del fluido**

**Densidad ( $\rho$ ):** masa por unidad de volumen del fluido, influye en el cálculo de la inercia y presión.

**Viscosidad dinámica ( $\mu$ ):** resistencia interna del fluido al movimiento.

**Compresibilidad:** define si el fluido se modela como compresible o incompresible.

**Tensión superficial ( $\sigma$ ):** relevante en flujos con interfaz aire-agua o microescala.

**Propiedades térmicas:** conductividad térmica y calor específico, cuando se simula transferencia de calor (Flow Science, 2023).

#### 2.1.2.2. **Parámetros de geometría y dominio:**

**Dimensiones del dominio de simulación:** espacio físico en el que se resuelven las ecuaciones.

**Resolución de la malla:** tamaño y refinamiento de celdas cartesianas, influye directamente en la precisión y el tiempo de cálculo.

**Representación de obstáculos (FAVOR™):** definición de la fracción de volumen/área ocupada por sólidos en cada celda (Flow Science, 2023).

### 2.1.2.3. Parámetros de condiciones de contorno:

**Entrada:** caudal, velocidad, presión o perfil de velocidad.

**Salida:** presión constante, flujo libre o condiciones de amortiguamiento.

**Paredes:** rugosidad, fricción y tipo de condición (deslizante o no deslizante).

**Condiciones periódicas:** para simular secciones repetitivas (Flow Science, 2023).

### 2.1.2.4. Parámetros numéricos:

**Tamaño de paso de tiempo ( $\Delta t$  /  $\Delta t$ ):** determinado por el número de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) para garantizar estabilidad.

**Esquemas de discretización:** centrados, upwind, o híbridos, según estabilidad y precisión deseada.

**Criterios de convergencia:** tolerancia del error residual para considerar la solución estable.

**Modelos adicionales:** transporte de partículas, sedimentación, cavitación, disipación de energía, entre otros (Flow Science, 2023).

La correcta selección de estos parámetros es esencial para representar fielmente el fenómeno físico y obtener resultados que sean comparables con mediciones experimentales o datos teóricos

## 2.2. Marco conceptual

### 2.2.1. Esfuerzo

Según afirma (Ferdinand Beer et al., 2018) se puede conceptualizar a los esfuerzos como: “La fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada”

### 2.2.2. Rotura

Según la (Real Academia Española, 2014, definición 1) se define como: Acción y efecto de romper o romperse.

De forma específica se puede entender estructuralmente como: pérdida de continuidad, integridad o capacidad resistente de un material o elemento cuando los esfuerzos aplicados superan su resistencia mecánica, dando lugar a la fractura, separación o falla del mismo.

### 2.2.3. Placas de floculación

Según el (Ministerio de Vivienda, 2009a) son “paredes o muros que se instalan en un tanque de floculación o sedimentación para dirigir el sentido del flujo, evitar la formación de cortocircuitos hidráulicos y espacios muertos”.

## 2.3. Antecedentes de la investigación

Son aquellos trabajos que, nos permitirán poder analizar como otros investigadores emplearon y desarrollaron nuevas metodologías que usaremos de referencia para el desarrollo de nuestra investigación como punto de partida

### 2.3.1. Antecedentes locales

Son aquellos estudios que se realizaron en la misma localidad de la presente investigación

#### 2.3.1.1. “Evaluación de la eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco aplicando la norma OS.020 y el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico ras 2000”.

La información del trabajo en mención es la siguiente:

**Tabla 4**  
*Antecedente local 01*

Titulo	“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE SANTA ANA - CUSCO APLICANDO LA NORMA OS.020 Y EL REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS 2000”.
Universidad	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
Facultad	Ingeniería y Arquitectura
Escuela profesional	Ingeniería civil
Autores	LLAMOCCA TUPAYACHI, MARLIE PALIZA CHINO, DIANA SOLEDAD
AÑO	2020
CIUDAD	CUSCO

*Nota:* En esta tabla se ve el resumen de la información del antecedente local 1 elaborado en la Universidad Andina del Cusco

### **2.3.1.1.1      *Objetivos***

Según (Llamocca & Paliza, 2020) :

“Objetivo general.

Evaluar la eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco aplicando la norma OS.020 y el reglamento técnico del sector de agua potable y Saneamiento Básico RAS 2000.

Objetivos específicos.

Objetivo específico Número 1:

Evaluar la eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco aplicando la norma OS.020.

Objetivo específico Número 2:

Evaluar la eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco aplicando el reglamento técnico del Sector de agua potable y Saneamiento Básico RAS 2000.

Objetivo Específico Número 3:

Evaluar mediante ensayos de calidad las condiciones del material filtrante de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco aplicando la normativa del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del medio Ambiente (CEPIS).

Objetivo Específico Número 4:

Determinar el cumplimiento de la calidad del efluente de los filtros de la Planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco con los parámetros físicos, químicos, microbiológicos y parasitológicos de calidad de agua especificados en el reglamento de calidad de agua de DIGESA.

Objetivo Específico Número 5:

Determinar el periodo óptimo de lavado en los filtros de la Planta de tratamiento de agua potable Santa Ana – Cusco”.

#### **2.3.1.1.2 Metodología**

Según (Llamocca & Paliza, 2020)

“El método de investigación es hipotético - deductivo, porque se encarga de formular alternativas de respuesta a problemas de investigación en base a mediciones demostrando si las respuestas a los problemas planteados son las correctas.

El método hipotético deductivo es el procedimiento o camino que sigue el investigador para hacer de su actividad una práctica científica. Este método obliga al científico a combinar la reflexión o momento racionales (la formación de hipótesis y la deducción) con la observación de la realidad o momento empírico el cual sigue un conjunto de pasos organizados y sistematizados para validar la hipótesis de investigación.

Fases del método hipotético - deductivo: Planteamiento del problema, creación de hipótesis, deducciones de consecuencias de la hipótesis, contrastación: refutada o aceptada.

#### **2.3.1.1.3 Resultados**

Según (Llamocca & Paliza, 2020) :

“La evaluación realizada a la PTAP Santa Ana – Cusco, aplicando las normas OS.020 y RAS 2000 presenta los siguientes resultados:

**Figura 17**  
*Eficiencia de la PTAP Santa Ana - Cusco*

PARÁMETROS	% de eficiencia según normas	
	OS.020	RAS 2000
Turbiedad	42.14%	42.14%
Calidad de material filtrante	0.00 %	75.00 %
Calidad de agua	97.2 %	61.11 %
Tiempo de lavado	100.00%	100.00%
<b>TOTAL =</b>	<b>59.84 %</b>	<b>69.56 %</b>

*Nota:* Tomado de (Llamocca & Paliza, 2020) donde se puede ver el resumen de la eficiencia de la PTAP Santa Ana - Cusco

-La evaluación realizada a la PTAP Santa Ana aplicando la norma OS.020, dio como resultado una eficiencia de 59.84%

-La evaluación realizada a la PTAP Santa Ana aplicando la norma técnica colombiana RAS 2000, dio como resultado una eficiencia de 69.56%”.

#### **2.3.1.1.4 Conclusiones**

Según (Llamocca & Paliza, 2020):

“Conclusión N°01

Se logró demostrar la hipótesis general “La eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana – Cusco aplicando la norma OS.020 es menor que el Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000”.

La eficiencia obtenida del proceso de filtración aplicando la norma OS.020 fue de 59.87%, y la eficiencia obtenida por la norma técnica colombiana RAS 2000 fue de 69.56%. La eficiencia obtenida por la norma OS.020 es menor que la obtenida por la norma colombiana RAS 2000.

Conclusión n°02

Se logró demostrar la sub - hipótesis N°01 “La eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de Agua Potable Santa Ana – Cusco aplicando a la norma OS.020 se encuentra

en un rango de 40 – 60%”, La eficiencia obtenida de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma OS.020 es del 59.87%, valor que se encuentra dentro del rango 40 – 60%. Lo cual indica que la eficiencia de acuerdo con la norma peruana OS.020 es regular.

#### Conclusión n°03

Se logró demostrar la sub - hipótesis N°02: “La eficiencia del proceso de filtración de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco aplicando el reglamento técnico del Sector de agua potable y Saneamiento Básico RAS 2000, se encuentra en un rango del 60 - 80%”, la eficiencia obtenida aplicando la norma colombiana RAS 2000 es de 69.56%, valor que se encuentra dentro del rango 60 – 80%, lo cual indica una eficiencia buena.

#### Conclusión n°04

No se logró demostrar la sub - hipótesis N°03: “El material filtrante de la planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco, cumple con los ensayos de calidad de acuerdo con la normativa del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del medio Ambiente (CEPIS).”, el material filtrante no cumple con los parámetros establecidos por CEPIS debido a que:

- Tiene un coeficiente de uniformidad mayor al establecido por CEPIS.
- Presenta material fino que pasa la malla 200.
- La arena de la PTAP Santa Ana tiene un tamaño efectivo mayor al establecido por CEPIS.

#### Conclusión n°05

Se logró demostrar la sub - hipótesis “Los parámetros físicos, químicos, microbiológicos y parasitológicos de calidad de agua se encuentran dentro de los rangos especificados en el reglamento de calidad de agua de DIGESA.” Los parámetros físicos químicos, microbiológicos y bacteriológicos se encuentran dentro de los parámetros establecidos por DIGESA.

#### Conclusión n°06

No se logró demostrar la sub - hipótesis “El periodo óptimo de lavado en los filtros de la Planta de tratamiento de agua potable Santa Ana - Cusco es de 4 - 8 min.” Ya que el periodo de lavado de los filtros en la PTAP Santa Ana – Cusco es de 19 min.

### **2.3.1.2. “Muros trombe con inserción de medios porosos y su influencia en el confort térmico en viviendas multifamiliares en la ciudad del Cusco-2019”**

La información del trabajo en mención es la siguiente:

**Tabla 5**

*Antecedente local 02*

Titulo	MUROS TROMBE CON INSERCIÓN DE MEDIOS POROSOS Y SU INFLUENCIA EN EL CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS MULTIFAMILIARES EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2019
Universidad	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
Facultad	Arquitectura e Ingeniería Civil
Escuela profesional	Ingeniería civil
Autores	Facelli Sanchez Patrick Mercado Hancoco, Lisset
Año	2022
Ciudad	CUSCO

*Nota:* En esta tabla se ve el resumen de la información del antecedente local 2 elaborado en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

#### **2.3.1.2.1 Objetivos**

Señala (Facelli Sanchez & Mercado Hancoco, 2022, p12) que su objetivo principal fue: “Determinar la influencia de los muros trombe con inserción de los medios porosos en el confort térmico en vivienda multifamiliares en la ciudad del Cusco en el año 2019” y también indica que sus objetivos específicos fueron:

“OE1: Cuantificar la diferencia en el nivel de confort térmico entre el sistema sin muro trombe, con muro trombe convencional y con muro trombe con inserción de medios porosos en viviendas multifamiliares en la ciudad de cusco – 2024.

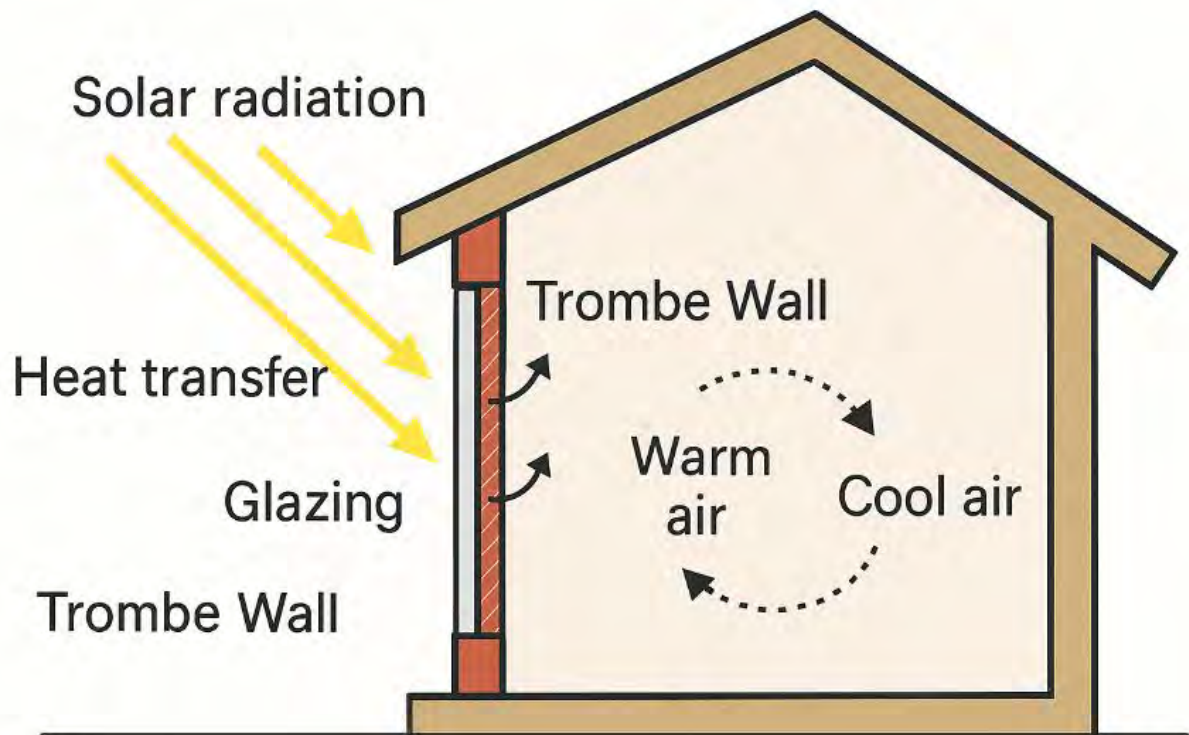


OE2: Cuantificar la influencia del material de cambio de fase insertado en el muro trombe en el confort térmico en viviendas multifamiliares en la ciudad del cusco-2024.

OE3: Cuantificar la influencia de los pellets de vidrio insertados en el muro trombe en el confort térmico en viviendas multifamiliares en la ciudad del cusco-2024.

OE4: Cuantificar la influencia de los pellets de plástico insertados en el muro trombe en el confort térmico en viviendas multifamiliares en la ciudad del cusco-2024.”

**Figura 18**  
*Sistema de muros trombe*

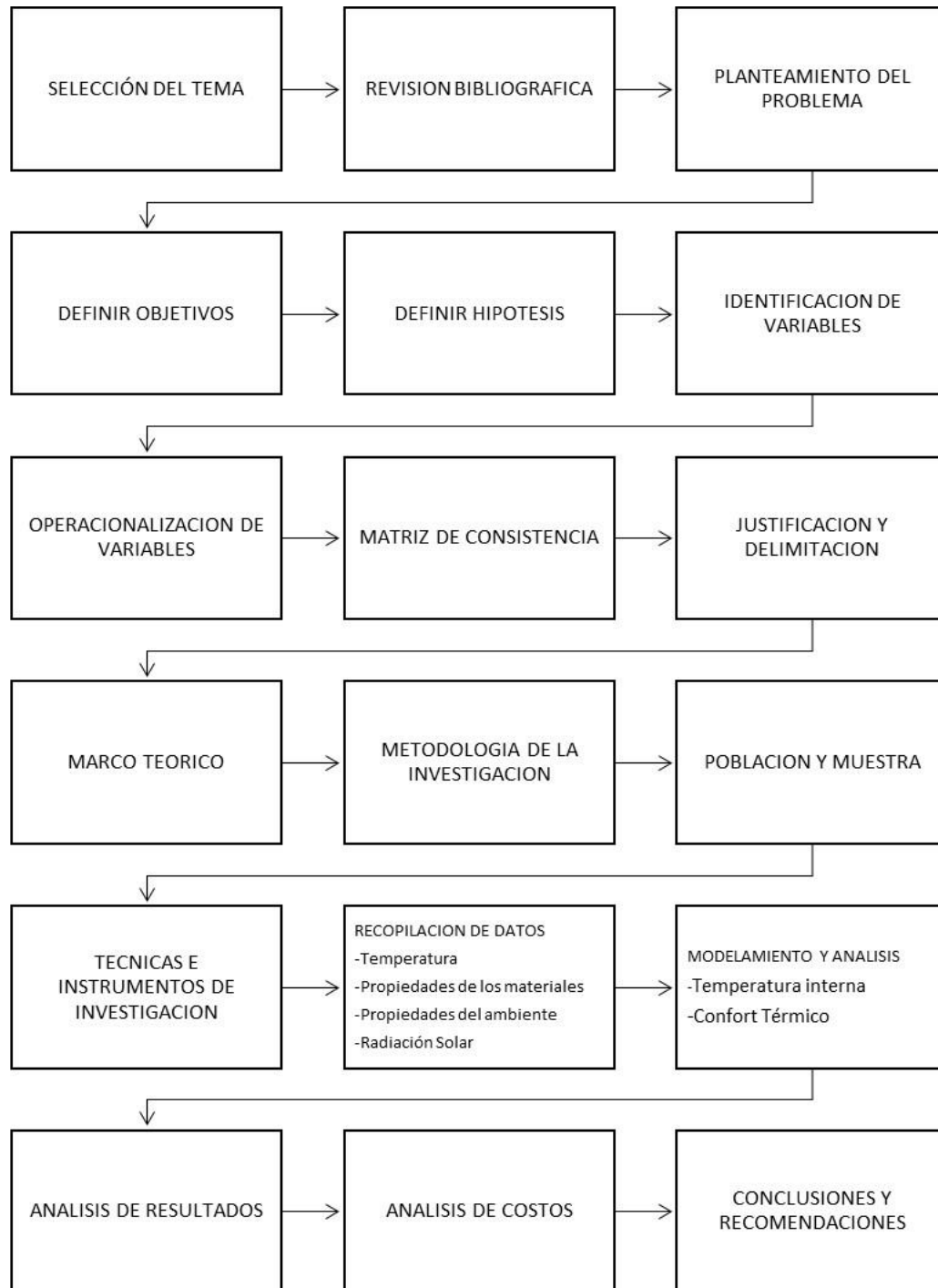


*Nota:* En la siguiente figura se ve el esquema de un sistema de muros trombe clásico que sirve para poder aislar térmicamente a una edificación

#### **2.3.1.2.2 Metodología**

Los autores (Facelli Sanchez & Mercado Hanco, 2022) indican que su metodología a seguir fue la siguiente:

**Figura 19**  
*Metodología del antecedente local 02*



*Nota:* Adaptado de (Facelli Sanchez & Mercado Hanco, 2022) donde se ve esquemáticamente la metodología empleada en su investigación.

### 2.3.1.2.3 Resultados

Afirman los autores (Facelli Sanchez & Mercado Hanco, 2022) que sus resultados fueron los siguientes:

“El cuadro resumen obtenido de los análisis realizados en todos los escenarios del departamento tipo de 55 m<sup>2</sup> se presenta a continuación:”

**Tabla 6**  
*Resultado parcial 01 del antecedente local 02*

DEPARTAMENTO DE 55 m <sup>2</sup>							
ESCENARIO	INDICADOR	MES					
		ENERO	ABRIL	JUNIO	JULIO	AGOSTO	OCTUBRE
Sin muro trombe	PREDICTEN MEAN VOTE (PMV)	-1.679	-1.817	-2.321	-2.373	-2.154	-1.653
	TEMPERATURA (°C)	13.875	13.314	11.240	10.986	12.000	14.100
Con muro trombe	PREDICTEN MEAN VOTE (PMV)	-0.967	0.754	1.219	1.103	0.794	-1.020
	TEMPERATURA (°C)	16.973	24.688	27.179	26.659	25.217	16.659
Con medio poroso vidrio	PREDICTEN MEAN VOTE (PMV)	-0.965	0.945	1.309	1.190	0.939	-0.996
	TEMPERATURA (°C)	16.985	25.654	27.761	27.281	26.063	16.793
Con medio poroso plástico	PREDICTEN MEAN VOTE (PMV)	-0.962	1.044	1.518	1.405	1.056	-0.993
	TEMPERATURA (°C)	17.001	26.045	28.624	28.101	26.570	16.799

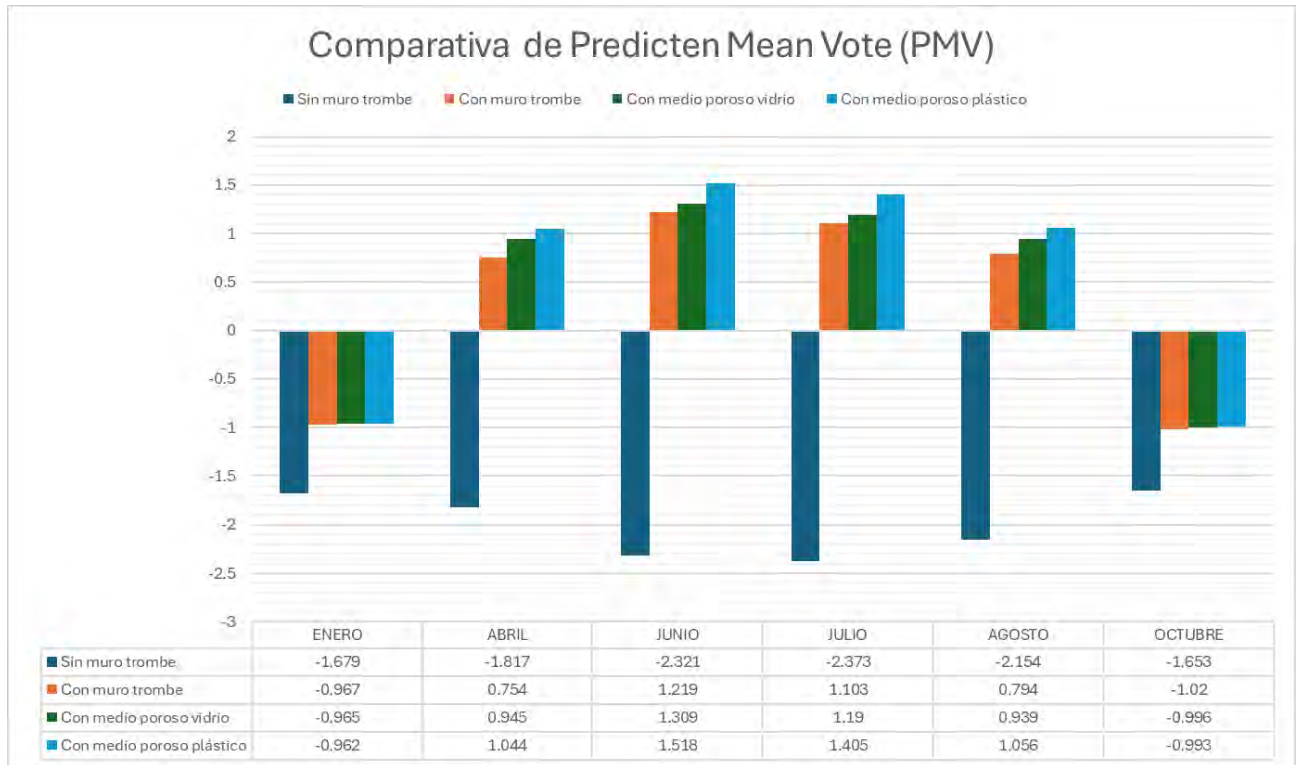
*Nota:* Adaptado de (Facelli Sanchez & Mercado Hanco, 2022) donde se ve los resultados parciales para una edificación de 55 m<sup>2</sup>

“El cuadro resumen obtenido de los análisis realizados en todos los escenarios del departamento tipo de 75 m<sup>2</sup> se presenta a continuación:”

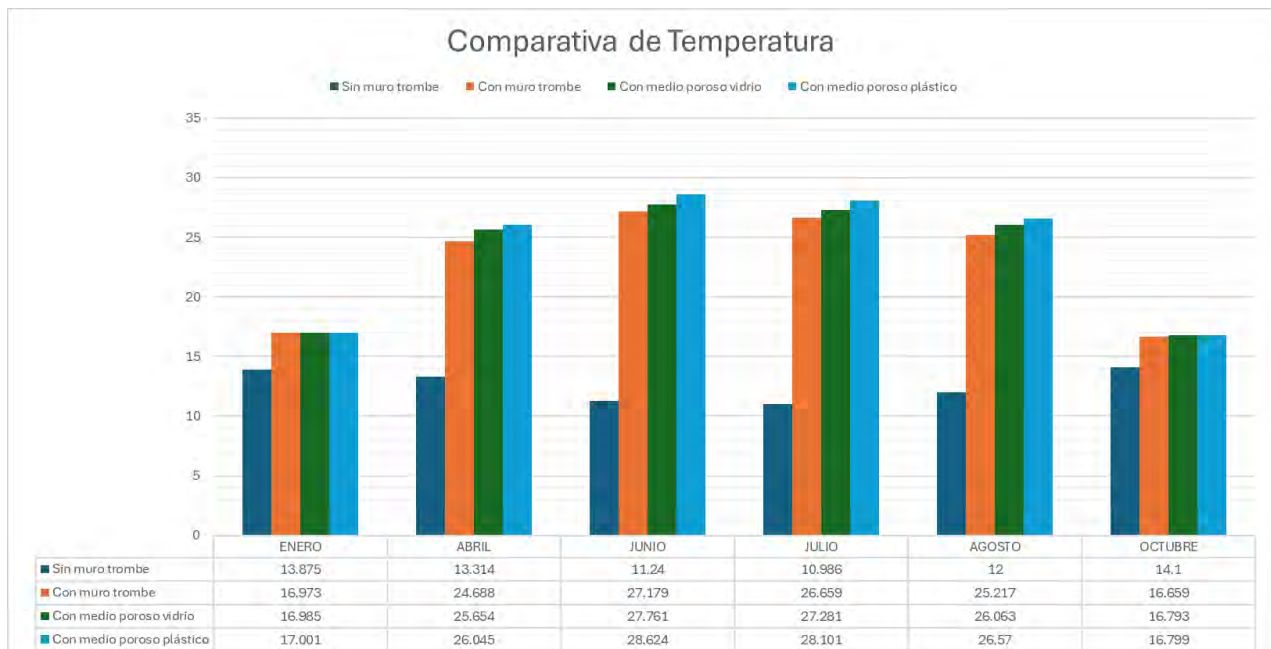
**Tabla 7**  
Resultado parcial 02 del antecedente local 02

DEPARTAMENTO DE 75 M <sup>2</sup>								
ESCENARIO	INDICADOR		MES					
			ENERO	ABRIL	JUNIO	JULIO	AGOSTO	OCTUBRE
Sin muro trombe	PREDICTEN							
	MEAN	VOTE	-1.587	-1.714	-2.179	-2.229	-2.026	-1.564
Con muro trombe	(PMV)							
	TEMPERATURA	(°C)	14.244	13.731	11.837	11.602	12.528	14.441
Con medio poroso vidrio	PREDICTEN							
	MEAN	VOTE	-1.090	0.376	0.448	0.366	0.563	-1.000
Con medio poroso plástico	(PMV)							
	TEMPERATURA	(°C)	16.464	23.170	23.914	23.558	24.179	16.809
	PREDICTEN							
	MEAN	VOTE	-0.945	0.718	1.085	0.985	0.744	-0.968
	(PMV)							
	TEMPERATURA	(°C)	17.081	24.584	26.601	26.181	25.021	16.965
	PREDICTEN							
	MEAN	VOTE	-0.942	0.737	1.111	1.015	0.758	-0.974
	(PMV)							
	TEMPERATURA	(°C)	17.097	24.690	26.740	26.349	25.088	16.938

*Nota:* Adaptado de (Facelli Sanchez & Mercado Hanco, 2022) donde se ve los resultados parciales para una edificación de 75 m<sup>2</sup>

**Figura 20***Antecedente local: Comparativa de Predicten Mean Vote (PMV) 01*

*Nota:* En esta figura se ve gráfica y numéricamente los resultados comparativos de Predicted Mean Vote para los diferentes estudios realizados.

**Figura 21***Antecedente local: Comparativa de Temperatura 01*

*Nota:* En esta figura se ve gráfica y numéricamente los resultados comparativos de temperatura para los diferentes estudios realizados.

“El cuadro resumen obtenido de los análisis realizados en todos los escenarios del departamento tipo de 95 m<sup>2</sup> se presenta a continuación:”

**Tabla 8**

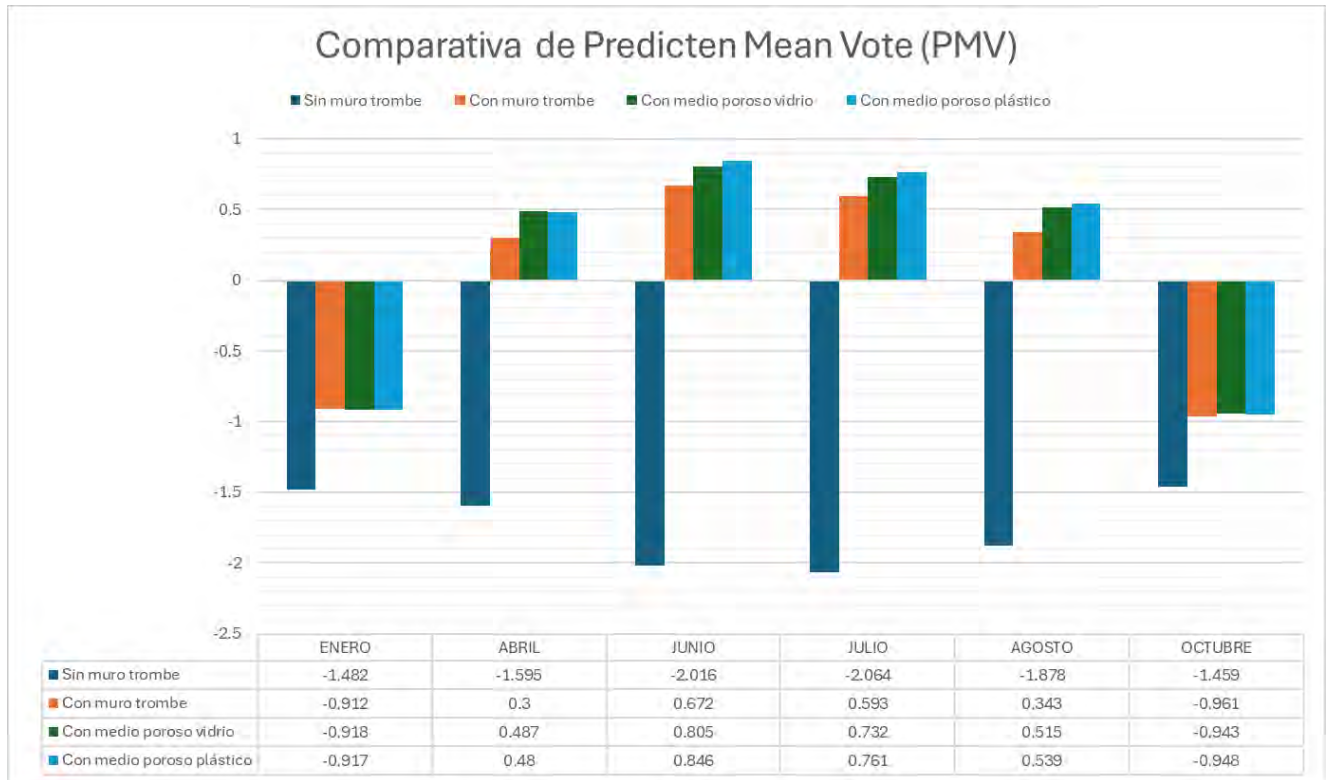
*Resultado parcial 03 del antecedente local 02*

DEPARTAMENTO DE 95 M <sup>2</sup>							
ESCENARIO	INDICADOR	MES					
		ENERO	ABRIL	JUNIO	JULIO	AGOSTO	OCTUBRE
Sin muro trombe	PREDICTEN						
	MEAN VOTE (PMV)	-1.482	-1.595	-2.016	-2.064	-1.878	-1.459
Con muro trombe	TEMPERATURA (°C)	14.674	14.209	12.504	12.277	13.129	14.837
	PREDICTEN						
Con muro trombe	MEAN VOTE (PMV)	-0.912	0.300	0.672	0.593	0.343	-0.961
	TEMPERATURA (°C)	17.176	22.666	24.115	24.339	23.163	16.937
Con medio poroso vidrio	PREDICTEN						
	MEAN VOTE (PMV)	-0.918	0.487	0.805	0.732	0.515	-0.943
Con medio poroso plástico	TEMPERATURA (°C)	17.167	23.520	25.290	24.928	23.972	17.035
	PREDICTEN						
Con medio poroso plástico	MEAN VOTE (PMV)	-0.917	0.480	0.846	0.761	0.539	-0.948
	TEMPERATURA (°C)	17.177	23.501	25.458	25.112	24.058	17.011

*Nota:* Adaptado de (Facelli Sanchez & Mercado Hanco, 2022) donde se ve los resultados parciales para una edificación de 95 m<sup>2</sup>

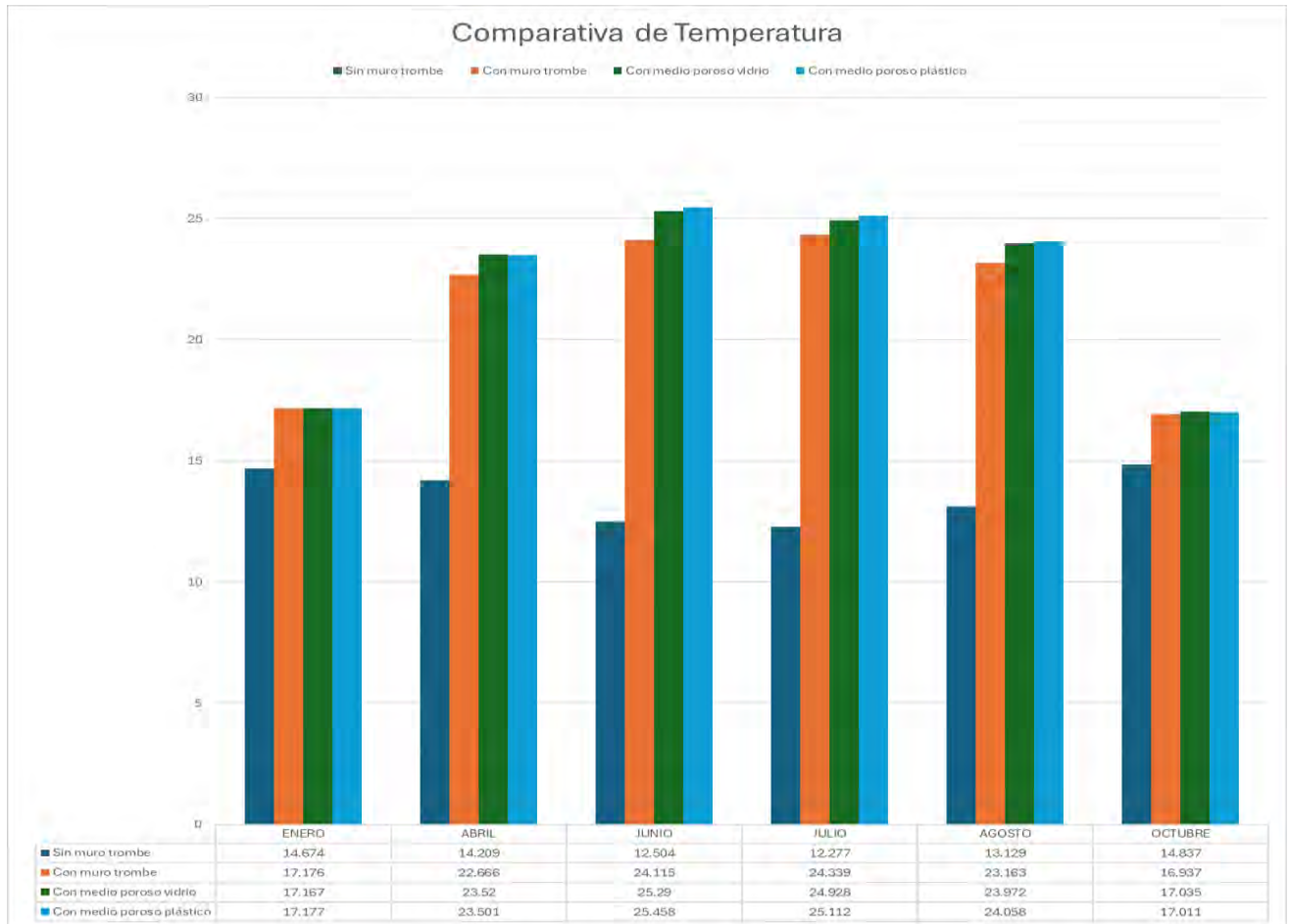
**Figura 22**

*Antecedente local: Comparativa de Predicten Mean Vote (PMV) 02*



*Nota:* En esta figura se ve gráfica y numéricamente los resultados comparativos de Predicted Mean Vote para los diferentes estudios realizados.

**Figura 23**  
*Antecedente local: Comparativa de Temperatura 02*



*Nota:* En esta figura se ve gráfica y numéricamente los resultados comparativos de temperatura para los diferentes estudios realizados.

**Tabla 9**  
*Resultados finales del antecedente local 02*

VALORES PROMEDIO DE TEMPERATURA			
Escenario	55 m2	75 m2	95 m2
Sin Muro Trombe	13.174	13.601	14.089
	0.0%	0.0%	0.0%
Con Muro Trombe	21.168	20.082	20.213
	60.7%	47.6%	43.5%
Con Medio Poroso Vidrio	21.617	21.141	20.613
	64.1%	55.4	46.3%

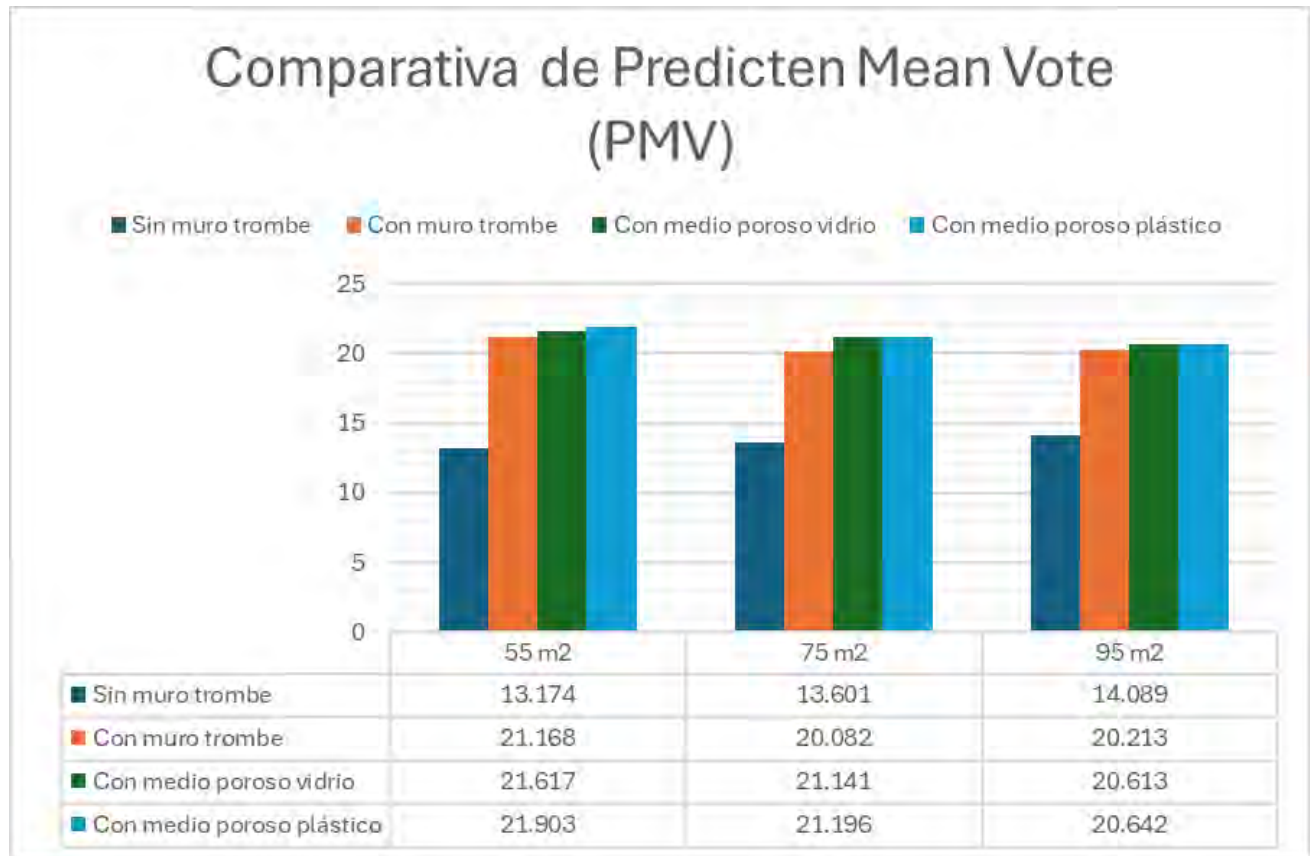


Con Medio Poroso Plástico	21.903	21.196	20.642
	66.3%	55.8%	46.5%

*Nota:* Tabla adaptada de los resultados obtenidos donde se ve la comparativa para los estudios de temperatura.

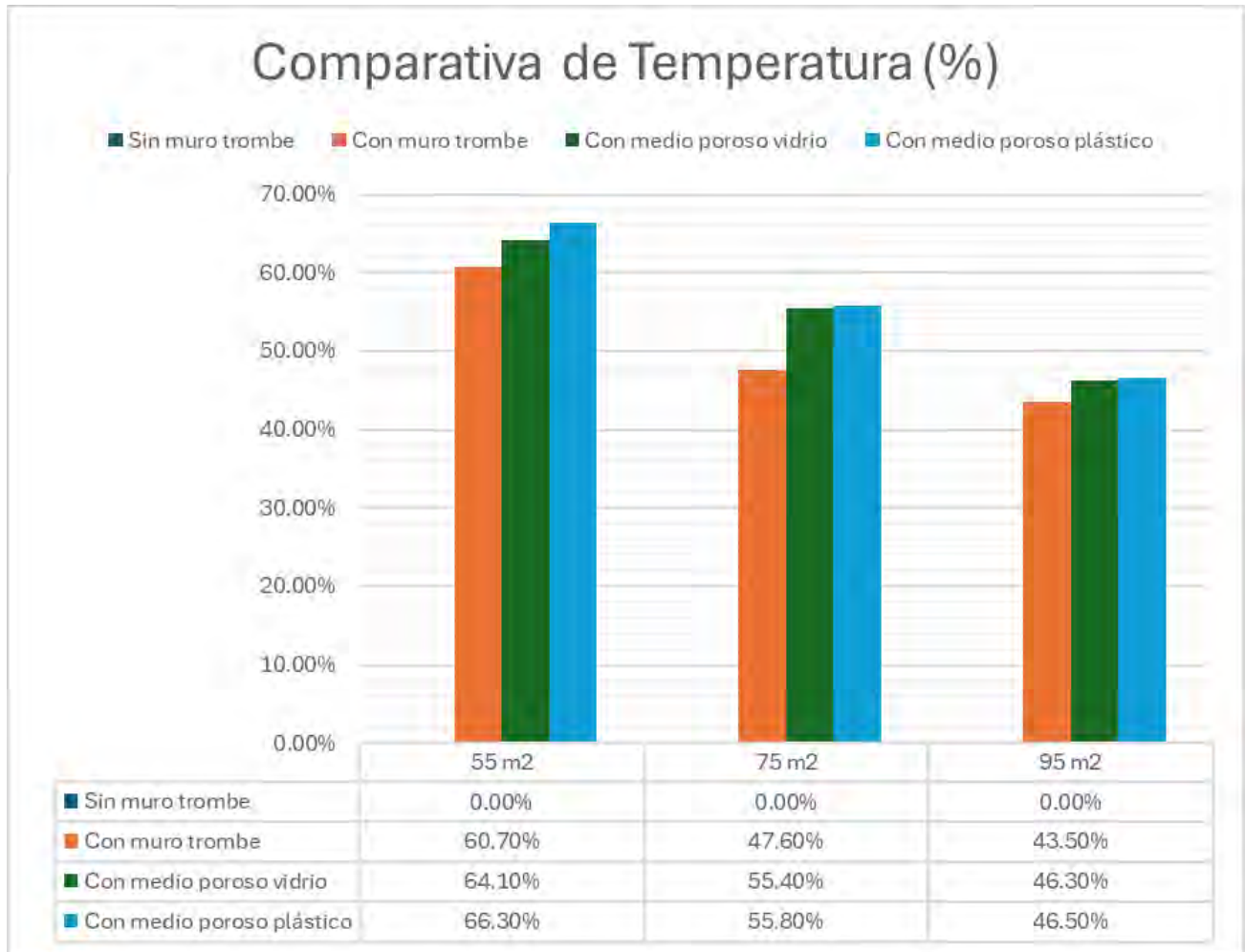
**Figura 24**

*Comparativa final de Predicten Mean Vote (PMV)*



*Nota:* Grafica adaptada de los resultados obtenidos donde se ve la comparativa para los estudios de Predicted Mean Vote.

**Figura 25**  
*Comparativa final Temperaturas (%)*



*Nota:* Grafica adaptada de los resultados obtenidos donde se ve la comparativa para los estudios de Temperatura.

#### **2.3.1.2.4 Conclusiones**

Según (Facelli Sanchez & Mercado Hanco, 2022) sus conclusiones fueron las siguientes:

“- El uso del muro Trombe con inserción de medios porosos influye positivamente en el mejoramiento del confort térmico y en el aumento de la temperatura interna en viviendas multifamiliares en la ciudad del Cusco-2024.

-El nivel de confort térmico en los escenarios sin muro Trombe es bajo, ya que estos presentan valores promedio anuales de Predicted Mean Vote de -1.858, -1.752 y -1.630

en los diferentes departamentos analizados, los cuales representan una sensación térmica de Bastante Frio según la escala numérica de sensación térmica usada por Fanger. El nivel de confort térmico en los escenarios con muro Trombe convencional es regular, ya que estos presentan valores promedio anuales de Predicted Mean Vote de -0.049, -0.314 y -0.259 en los diferentes departamentos analizados, los cuales representan una sensación térmica de Neutro. El nivel de confort térmico en los escenarios con muro Trombe con inserción de medios porosos es ligeramente mejor que el anterior, ya que estos presentan valores promedio anuales de Predicted Mean Vote de 0.032, -0.064, -0.173, 0.104, -0.055 y -0.167 en los diferentes departamentos analizados, los cuales representan una sensación térmica de Neutro.

- Debido a problemas técnicos en los escenarios con el material de cambio de fase (PCM), el programa no pudo concluir la simulación de forma regular. Por esta razón no se ha podido obtener resultados ni realizar el análisis de dichos escenarios.

- Los pellets de plástico insertados en el muro Trombe tienen un mejor comportamiento comparado con los pellets de vidrio en el incremento de la temperatura y del confort térmico en viviendas multifamiliares en la ciudad del Cusco-2024. En los escenarios de Muro Trombe con inserción de pellets de plástico se tiene un incremento en la temperatura promedio anual de +66.3 %, +55.8 % y + 46.5 %, en los departamentos de 55 m<sup>2</sup>, 75 m<sup>2</sup> y 95 m<sup>2</sup> respectivamente. En los escenarios de Muro Trombe con inserción de pellets de vidrio se tiene un incremento en la temperatura promedio anual de 64.1 %, 55.4 % y + 46.3 %, en los departamentos de 55 m<sup>2</sup>, 75 m<sup>2</sup> y 95 m<sup>2</sup> respectivamente. En los escenarios de Muro Trombe convencional se tiene un incremento en la temperatura promedio anual de + 60.7 %, + 47.6 % y + 43.5 %, en los departamentos de 55 m<sup>2</sup>, 75 m<sup>2</sup> y 95 m<sup>2</sup> respectivamente.

-El costo total del sistema con Muro Trombe Convencional es de S/ 11,139.75 (once mil ciento treinta y nueve con 75/100 soles), del sistema con Muro Trombe con inserción de Pellets de Vidrio es de S/ 19,011.55 (diecinueve mil once con 55/100 soles) y del sistema con Muro Trombe con inserción de Pellets de Plástico es de S/ 23,715.77 (veintitrés mil setecientos quince con 77/100 soles). Considerando un gasto anual en calefacción de S/ 1,189,44 (mil ciento ochenta y nueve con 44/100 soles), se recupera la inversión del Muro Trombe Convencional en aproximadamente 9.5 años, se recupera la inversión del Muro Trombe con inserción de Pellets de Vidrio en alrededor de 16 años y se recupera la inversión del Muro Trombe con inserción de Pellets de Plástico en casi 20 años.

- El mejor sistema, considerando solo el factor de confort térmico, es el de Muro Trombe con inserción de Pellets de Plástico, ya que es el que ha mostrado un mejor comportamiento tal como se observa en los resultados obtenidos. Sin embargo, considerando el análisis de costos realizado, se concluye que el mejor sistema es el de Muro Trombe Convencional, porque tiene la mejor relación costo beneficio y se recupera la inversión en un menor tiempo.”

### **2.3.2. Antecedentes nacionales**

Son aquellos estudios que se realizaron en la misma nación de la presente investigación

#### **2.3.2.1. “Análisis hidráulico de la bocatoma María Auxiliadora del río Quiroz con modelo numérico tridimensional”**

La información del trabajo en mención es la siguiente:

**Tabla 10**  
*Tesis nacional 01*

Titulo	ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA BOCATOMA MARÍA AUXILIADORA DEL RÍO QUIROZ CON MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL
Universidad	UNIVERSIDAD DE PIURA
Facultad	Ingeniería
Escuela profesional	Ingeniería civil
Autor	ARTEAGA ACUÑA, FRANCISCO
AÑO	2017
CIUDAD	PIURA

*Nota:* En esta tabla se ve el resumen de la información del antecedente nacional 1 elaborado en la Universidad de Piura

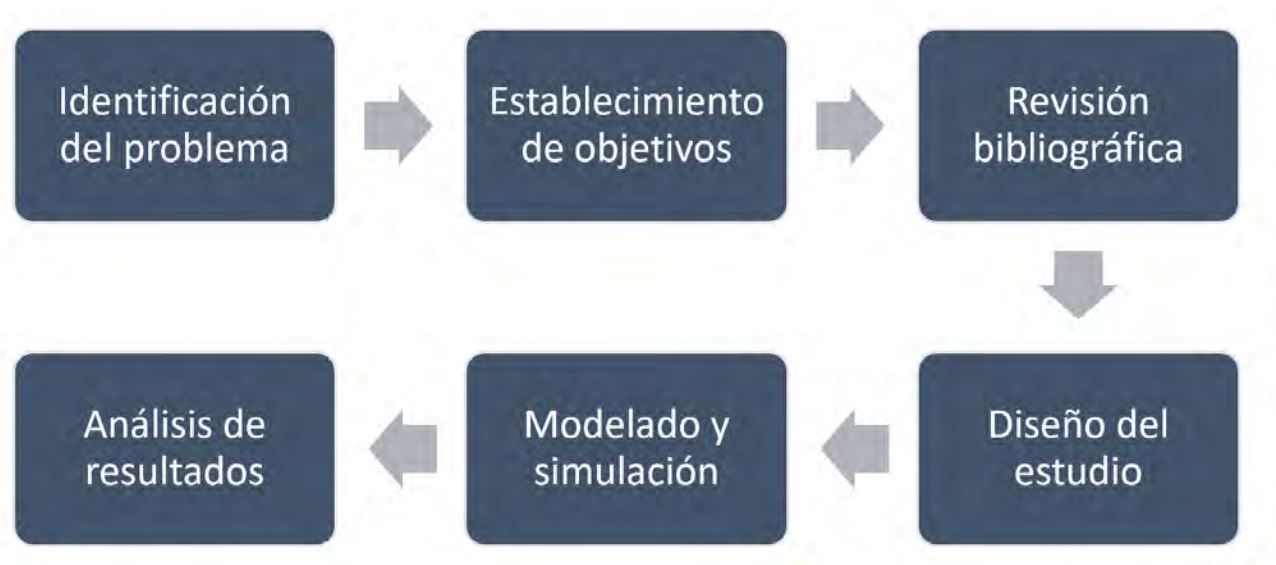
#### **2.3.2.1.1      *Objetivos***

Según (Arteaga, 2017):

“El proyecto presenta como principal objetivo, el aprovechamiento de la caída de agua del río Quiroz para la generación de energía a través de una central hidroeléctrica con capacidad de producción de hasta 3.6 MW de potencia. De los cuales solamente se ha aprovechado el 45% de esta capacidad, debido a que la central solamente cuenta con 2 turbinas Francis de eje horizontal de 0.8 MW de potencia efectiva”.

#### **2.3.2.1.2      *Metodología***

Según (Arteaga, 2017) esta fue su metodología a seguir: “-Identificación del problema - Establecimiento de objetivos -Revisión bibliográfica-Diseño del estudio-Modelado y simulación-Análisis de resultados”

**Figura 26***Antecedente nacional: Metodología*

*Nota:* Adaptado de (Arteaga, 2017) donde se ve esquemáticamente la metodología empleada en su investigación.

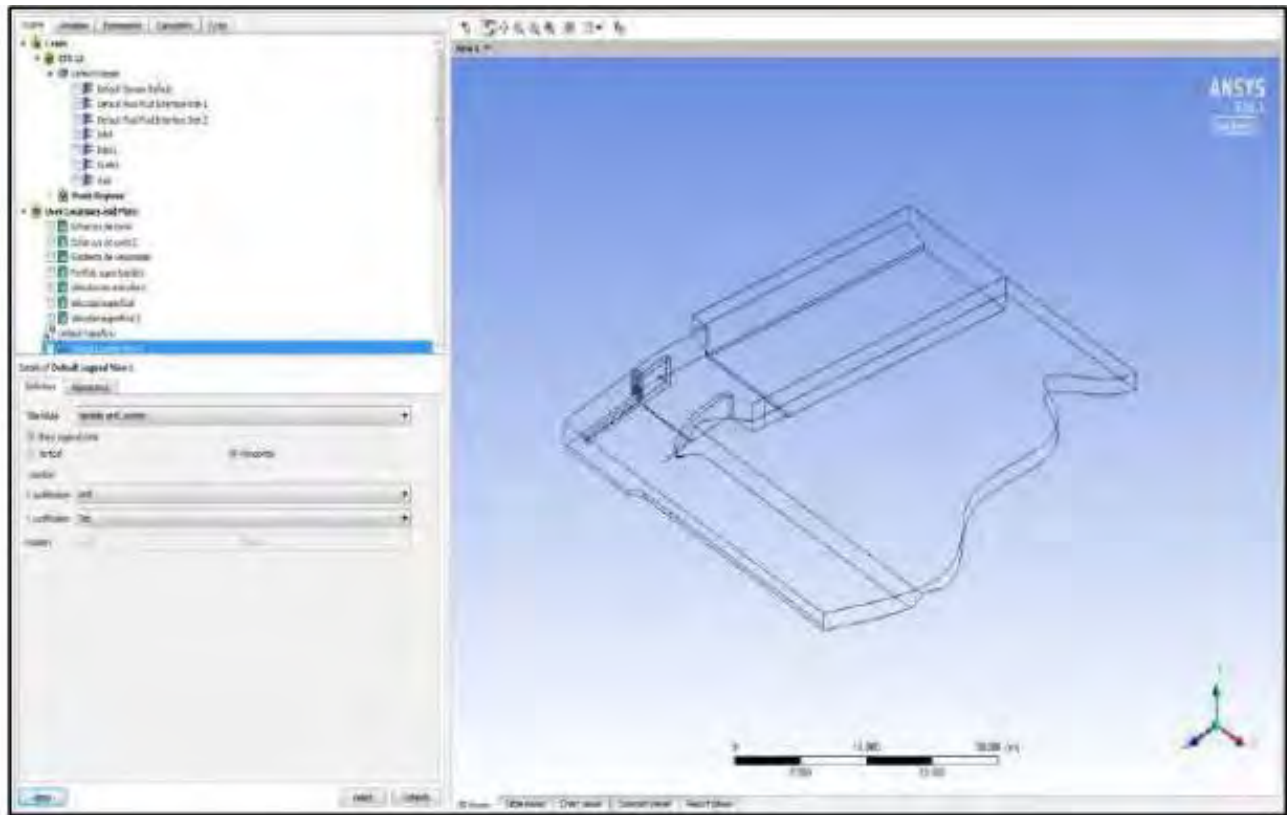
### **2.3.2.1.3 Resultados**

Según (Arteaga, 2017):

“El análisis e interpretación de los resultados forman parte del quinto y último paso de la simulación, el cual es conocido como posprocesamiento. El programa ANSYS-CFX presenta un subprograma llamado CFD-Post el cual permite una adecuada visualización de estas variables analizadas gracias a las múltiples herramientas que presenta.

Al igual que los anteriores subprogramas, el espacio de trabajo está dividido en ventanas de trabajo, en este caso se cuenta con la zona del gráfico (view) y el esquema (outline); en éste es donde se encuentran todas las herramientas creadas por el usuario para la correcta visualización de los datos y de las variables estudiadas, además de los detalles para la configuración de dichas herramientas. Estas características nombradas pueden observarse en la siguiente figura

**Figura 27**  
*Distribución del espacio de trabajo del CFD-Post*



*Nota:* En esta imagen tomada de (Arteaga, 2017) se puede visualizar el espacio de trabajo empleado en la simulación hidráulica

Las variables de interés estudiadas en la presente tesis son aquellas relacionadas con la erosión de la estructura, entre ellas se tiene: los esfuerzos de corte, las velocidades superficiales y, para una mejor visualización, la trayectoria de las líneas de corriente a través del aliviadero.

Velocidades de flujo:

Las variables referidas a la velocidad del flujo serán expuestas visualmente para cada tipo de condición de caudal y altura de agua

De forma correlativa se tiene:

**Tabla 11***Velocidades máximas de flujo en la zona de superficie de análisis*

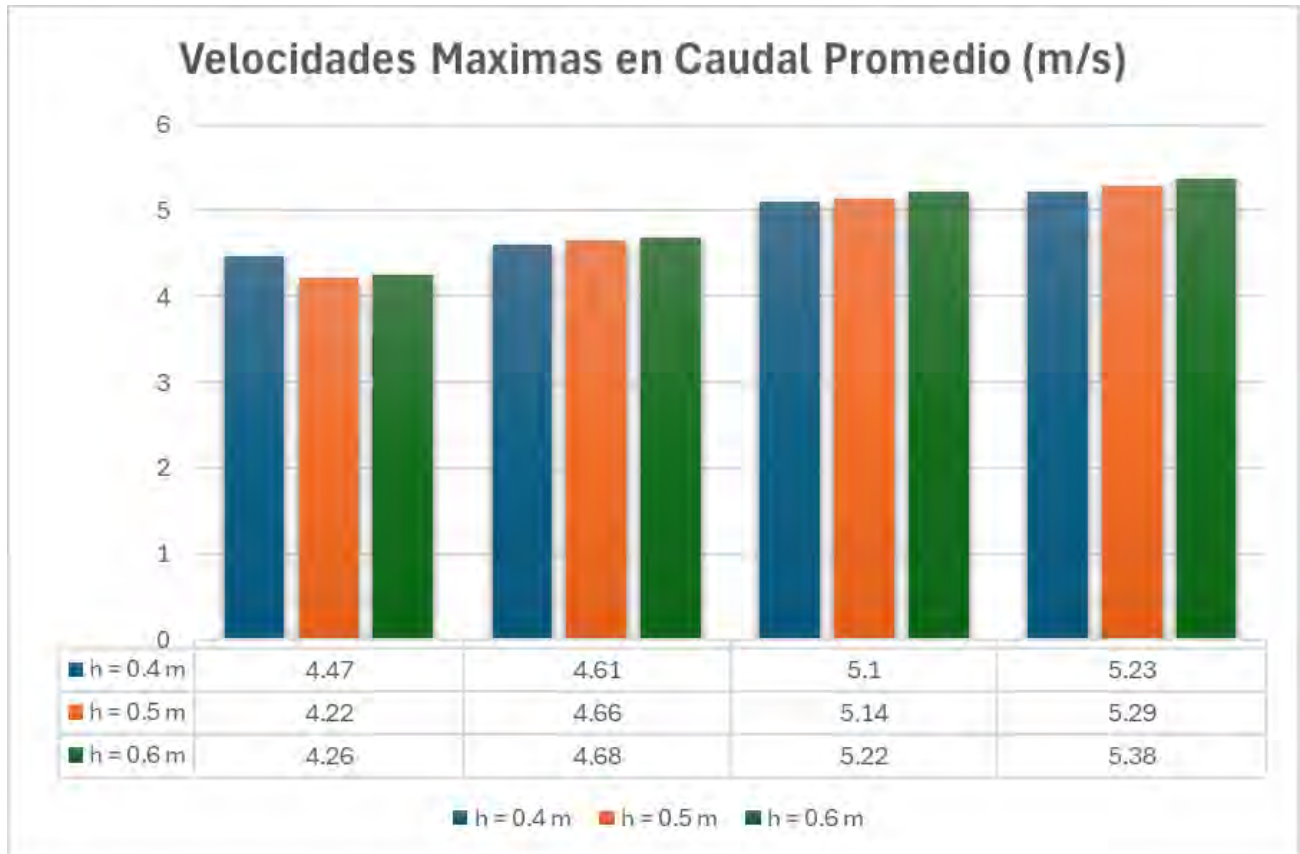
Condición	Sección	Tirante	Velocidad máxima (m/s)	
			En Qprom	En Qmáx
Compuertas abiertas	Z = 0 m	h = 0.4 m	4.47	11.36
		h = 0.5 m	4.22	9.05
		h = 0.6 m	4.26	7.38
Compuertas abiertas	Z = 2m	h = 0.4 m	4.61	11.68
		h = 0.5 m	4.66	9.25
		h = 0.6 m	4.68	7.46
Compuertas abiertas	Z = 4m	h = 0.4 m	5.1	14.88
		h = 0.5 m	5.14	12.47
		h = 0.6 m	5.22	9.29
Compuertas abiertas	Z = 6 m	h = 0.4 m	5.23	15.04
		h = 0.5 m	5.29	11.88
		h = 0.6 m	5.38	10.04
Compuertas cerradas	-	-	4.95	6.65

*Nota:* En esta tabla adaptada de (Arteaga, 2017) se puede visualizar las velocidades máximas de flujo en la zona de superficie de análisis



**Figura 28**

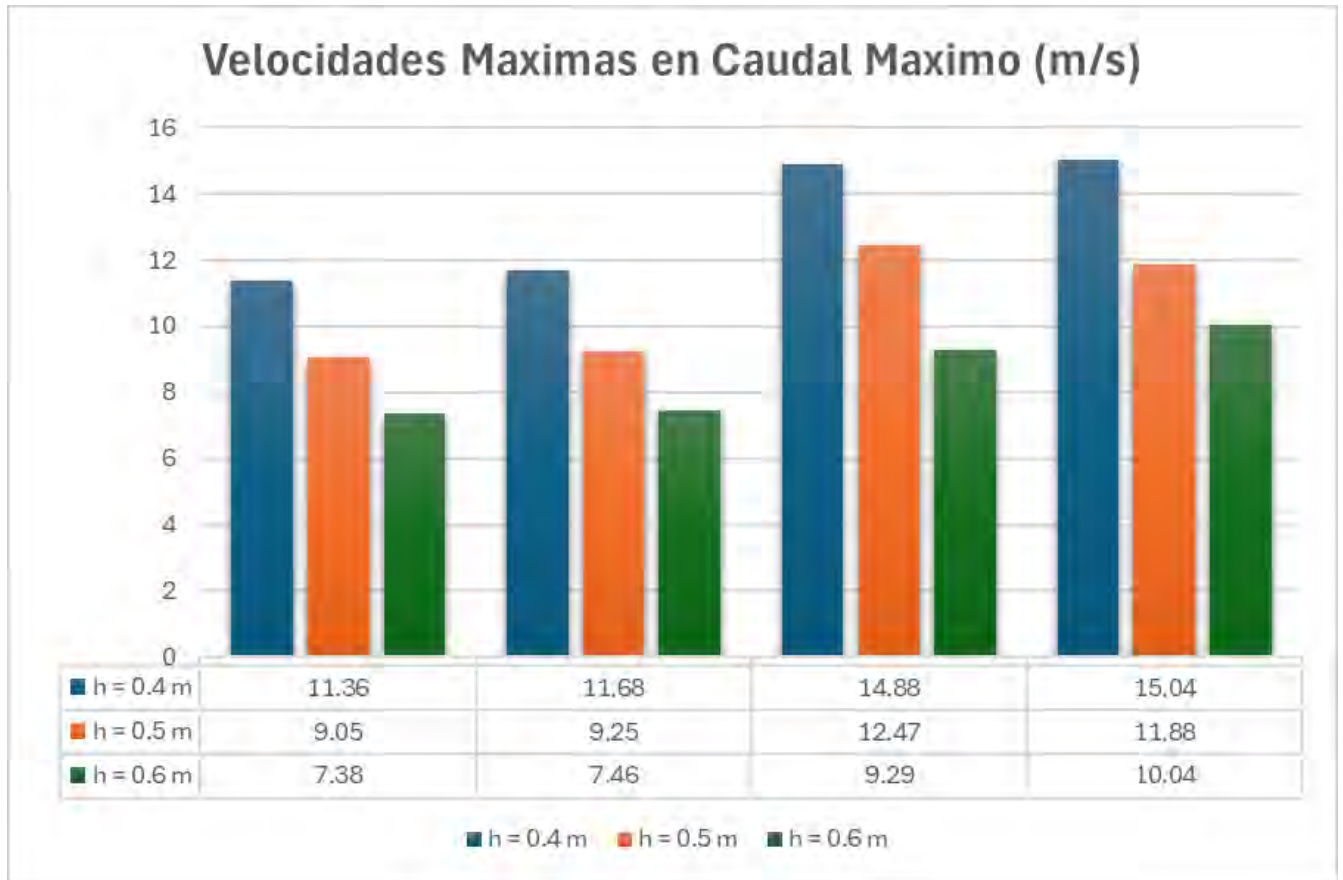
*Antecedente nacional: Velocidades máximas en caudal promedio (m/s)*



*Nota:* En esta figura adaptada de (Arteaga, 2017) se puede visualizar las velocidades máximas de caudal promedio.

**Figura 29**

*Antecedente nacional: Velocidades máximas en caudal máximo (m/s)*



*Nota:* En esta figura adaptada de (Arteaga, 2017) se puede visualizar las velocidades máximas de caudal máximo.

#### **2.3.2.1.4 Conclusiones**

Según (Arteaga, 2017):

“-La posibilidad de ocurrencia de erosión en la losa aguas abajo del aliviadero móvil de la bocatoma de la C.H. María Auxiliadora de Quiroz es de un valor máximo de 25.2% cuando se presenten caudales de máxima avenida, según el enfoque de cálculo de erosión por potencia de flujo utilizado.

-Los valores de posibilidad de ocurrencia de erosión aumentan a 45.83% al considerar un mecanismo más conservador que involucra el uso de factores de amplificación a los

resultados de potencia de flujo obtenidos. Estos factores se aplican para incluir el efecto producido por el arrastre de sedimentos.

-Para caudales menores, la losa aguas abajo del aliviadero móvil no presenta problemas de ocurrencia de erosión. No obstante, éstos pueden generar un proceso de desprendimiento continuo del concreto presente en la losa, debido a la presencia de grietas formadas anteriormente por caudales altos.

-La losa aguas abajo del aliviadero móvil no presenta problemas de erosión por rozamiento o esfuerzos de corte debido a la alta resistencia frente al cortante que tienen los concretos de alta resistencia.

-Los resultados obtenidos de la modelación numérica muestran que la losa aguas abajo del aliviadero móvil es la zona más propensa a ser afectada por la interacción entre el flujo y la estructura, lo cual se puede verificar en la realidad al observar la severa erosión formada en esa zona”.

**2.3.2.2. Simulación del flujo del salto de esquí y de la poza de disipación debido a un mal funcionamiento en la disipación de energía ocasionado por un obstáculo frontal al reservorio Poechos utilizando el programa Ansys CFX**

La información del trabajo en mención es la siguiente:

**Tabla 12**  
*Tesis nacional 02*

Titulo	Simulación del flujo del salto de esquí y de la poza de disipación debido a un mal funcionamiento en la disipación de energía ocasionado por un obstáculo frontal al Reservorio Poechos utilizando el programa Ansys CFX
Universidad	UNIVERSIDAD DE PIURA
Facultad	Ingeniería
Escuela profesional	Ingeniería civil
Autor	MENDOZA CRUZADO, BRAYAND DANIEL

AÑO	2022
CIUDAD	PIURA

*Nota:* En esta tabla se ve el resumen de la información del antecedente nacional 2 elaborado en la Universidad de Piura

#### **2.3.2.2.1      *Objetivos***

Según (Mendoza, 2022):

“El objetivo principal es reproducir los fenómenos que ocurren en la poza de disipación y obtener información relevante sobre la erosión en las proximidades de los cimientos de la presa”.

#### **2.3.2.2.2      *Metodología***

El autor no indica su metodología a emplear, pero se puede inferir que fue la siguiente:

- Identificación del problema
- Establecimiento de objetivos
- Revisión bibliográfica
- Diseño del estudio
- Modelado y simulación
- Análisis de resultados

**Figura 30***Antecedente nacional: Metodología*

*Nota:* Adaptado de (Mendoza, 2022): donde se ve esquemáticamente la metodología empleada en su investigación.

#### **2.3.2.2.3      Resultados**

Según (Mendoza, 2022):

“Los resultados se obtienen en el post procesamiento a través de herramientas como contornos, vectores, volúmenes, isosuperficies, líneas de corriente, animaciones, gráficos,

etc. que muestren los valores de determinadas variables de interés como velocidades, esfuerzos de corte, vorticidad, turbulencia, etc. Para ello es importante conocer las siguientes definiciones que forman parte de la configuración en la obtención de los resultados.

-Location, ubicación donde se analizan las variables de interés.

-Range local, muestra los resultados en el dominio seleccionado.

-Contornos/número de puntos, a un mayor número se tendrá una mejor resolución de los resultados.

-Boundary data (conservativo e híbrido), para efectos de cálculo se debe seleccionar la opción conservadora, pues esta opción calcula el flujo másico correctamente en las paredes y se tendrían resultados por ejemplo de velocidades en estas zonas; por otro lado, la opción híbrida no considera un flujo masico en las paredes, ello conlleva a obtener resultados de velocidades en las paredes igual a cero, lo cual es incorrecto ya que las velocidades en la capa límite son cercanas a cero.

-Water velocity, representa la velocidad del fluido en una determinada sección.

Como ya se ha indicado el modelo ha poseído una escala 1/100, es por ello por lo que los resultados obtenidos deben ser transformados a escala real mediante las ecuaciones de similitud de Froude

**Tabla 13**  
*Ecuaciones de similitud de Froude*

Magnitud Física	Similitud de Froud
Longitudes	$L_r = L_p/L_m$
Superficies	$A_r = L_r^2$
Velocidades	$V_r = L_r^{\frac{1}{2}}$
Tiempo	$t_r = L_r^{\frac{1}{2}}$

Caudales	$Q_r = L_r^{\frac{5}{2}}$
Aceleración	$a_r = 1$
Presión	$\left(\frac{p}{\gamma}\right)_r = L_r$

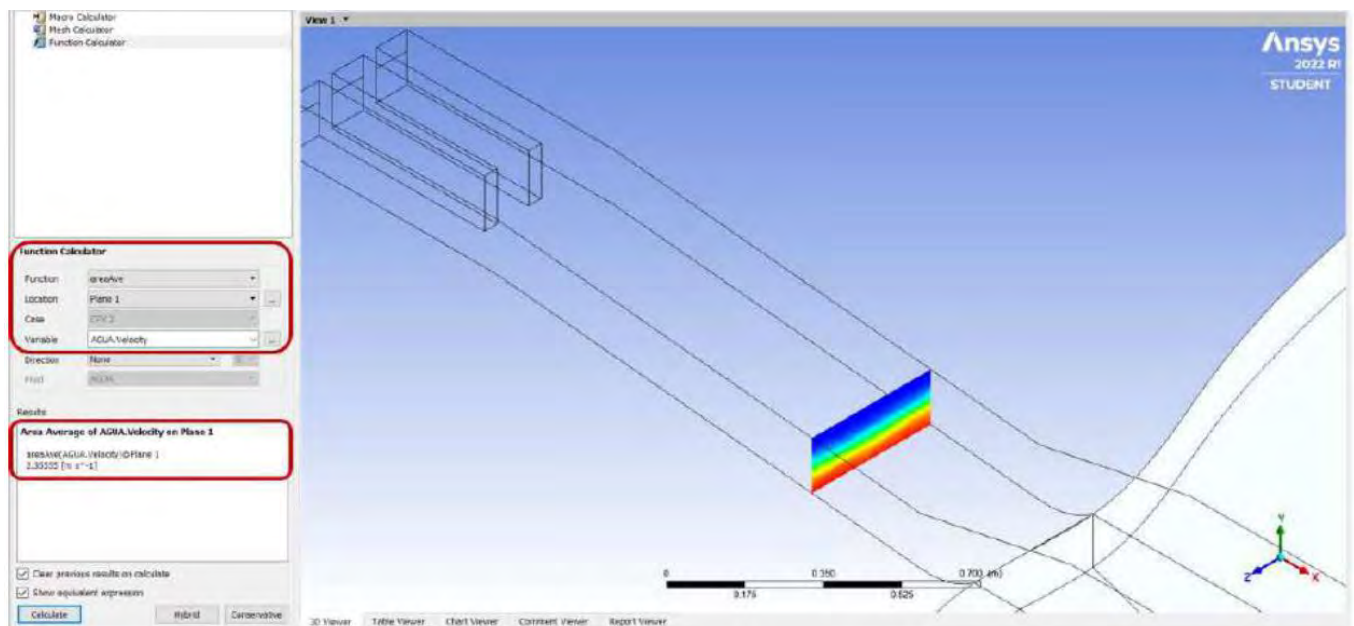
*Nota:* Tabla adaptado de (Mendoza, 2022) donde se ve las relaciones de similitud de Froude

Para la validación del modelo se ha comparado los resultados obtenidos en la simulación de la velocidad promedio en un plano ubicado a 100 m del aliviadero de compuertas con los obtenidos a partir de la ecuación

$$V = (2g * (H - \frac{a}{2}))^{0.5}$$

Al aplicar las ecuaciones de similitud de Froude, se tiene que la velocidad promedio en el modelo es de 23.56 m/s

**Figura 31**  
*Resultados de velocidad promedio*



*Nota:* Tomado de (Mendoza, 2022): donde se ve gráficamente los resultados de velocidad de la sección en estudio

Para conocer el valor de la velocidad a partir de la ecuación, es necesario conocer el tirante del agua en el plano. Haciendo uso de la variable "agua. volume fraction" se tiene que la parte

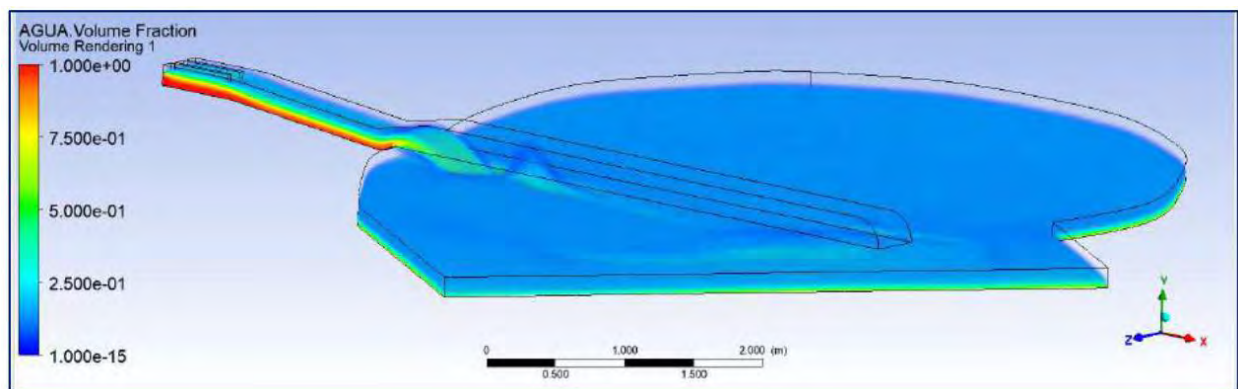
superior del tirante se encuentra en la cota -4.14 m, mientras que la parte inferior se ubica en -10m (cotas relativas del dibujo), por lo tanto, el tirante es 5.86 m; además se sabe que la cota del reservorio es de 105 m s. n. m., mientras que la cota inferior del plano es 68 m s. n. m.

La velocidad obtenida por la ecuación en un punto medio del tirante es de 25.85 m/s. Al comparar las velocidades obtenidas por el modelo y la ecuación se tiene valores muy cercanos, pues varían 8.86 %, por lo tanto, se puede concluir que el modelo proporciona resultados fidedignos.

En las figuras se puede apreciar que la fracción volumétrica del agua en un plano ubicado en el centro del aliviadero de compuertas y que se extiende hasta la salida, observándose que el agua queda contenida siempre en el modelo y en consecuencia todo el fluido que ha ingresado se evacuará por la condición de borde salida, de igual manera se aprecia en las figuras las cuales representan la fracción de volumen del agua en todo el dominio; esto puede corroborarse con los imbalances obtenidos en las figuras

### Figura 32

*Vista isométrica del agua en todo el dominio*



*Nota:* Tomado de (Mendoza, 2022): donde se ve gráficamente el fluido en todo el dominio computacional

En las figuras se aprecian líneas de corriente y vectores de velocidad que describen la trayectoria del fluido, estas muestran el recirculamiento del fluido uno a la derecha y otro a la



izquierda, luego de que el flujo impacte en el cerro que se encuentra al frente del esquí. El recirculamiento ubicado a la derecha se aproxima a los cimientos de la presa para luego seguir su trayectoria hacia la salida.

A partir de los contornos de velocidad obtenidos en la salida, se puede observar una mayor evacuación de flujo por la parte derecha y no por su cauce natural (tramo izquierdo), ello genera aguas abajo inundaciones y erosión de tierras de cultivo hasta que finalmente se une al cauce principal del Río Chira.

En las figuras se puede observar vectores y contornos de los esfuerzos de corte que se producen en la región de interés, de ambas figuras se aprecia que los esfuerzos de mayor magnitud se alojan en la parte izquierda de dicha región alcanzando valores de hasta  $92.24 \text{ N/m}^2$ ; además en la figura se ha obtenido un valor de  $30.24 \text{ N/m}^2$  como esfuerzo de corte promedio en dicha región”.

#### **2.3.2.2.4 Conclusiones**

Según (Mendoza, 2022):

“De acuerdo con la comparación entre los resultados de velocidades desarrolladas en un plano ubicado a 100 m del aliviadero de compuertas entre modelo y la ecuación 6.1, existe una variación de 8.86% entre los resultados, por lo tanto, el modelo se da por válido pues proporciona resultados cercanos a los que se obtienen a partir de fórmulas.

Las velocidades obtenidas a través de vectores de velocidad en la región de interés alcanzan los 6 m/s, por lo tanto, se concluye la existencia de erosión en dicha región, ya que al estar constituida por materiales como grava arenosa, arena limosa y limos, los cuales no soportan velocidades mayores a 0.5 m/s; por otra parte, la velocidad promedio en esta región es de 1.6 m/s, siendo de igual manera superior a la velocidad resistente de los suelos que conforman dicha región.

De acuerdo con los vectores e isosuperficies de velocidad, se tiene que la velocidad máxima se desarrolla en la parte superficial del flujo e impacta sobre la región de interés, producto del recirculamiento, estas al ser velocidades grandes causan erosión.

Los contornos de esfuerzos de corte en la región de interés alcanzan un valor máximo de 92.15 N/m<sup>2</sup>.

La modelación numérica es muy importante, debido a que nos muestra cómo será el y un valor promedio de 30.24 N/ m<sup>2</sup> comportamiento del fluido y en ese caso divagar si el diseño es adecuado o es necesario realizar algunas modificaciones.

Los parámetros de calidad y el adecuado refinamiento del mallado son muy importantes, pues determinan la convergencia de las ecuaciones de conservación y calidad de resolución de los resultados.

Se ha logrado reproducir el comportamiento del fluido, las líneas de corriente y los vectores muestran el recirculamiento del flujo luego de que este impactase en el cerro y su posterior redirección hacia los cimientos de la Presa del Reservorio Poechos”.

### **2.3.3. Antecedentes internacionales**

#### **2.3.3.1. Análisis de la modelación numérica 3d en el diseño de deflexiones en canales supercríticos. aplicación al modelo físico del rápido de descarga de la central hidroeléctrica Chucás de Costa Rica.**

##### **Tabla**

14

Tesis internacional 01

Titulo	ANALISIS DE LA MODELACION NUMERICA 3D EN EL DISEÑO DE DEFLEXIONES EN CANALES SUPERCRITICOS. APLICACIÓN AL MODELO FISICO DEL RAPIDO DE DESCARGA DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA CHUCAS DE COSTA RICA
Universidad	UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad	CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

Escuela profesional	Ingeniería civil
Autor	MARTINEZ HAASE, MAXIMILIANO ANTONIO
AÑO	2016
PAIS	CHILE

*Nota:* En esta tabla se ve el resumen de la información del antecedente internacional 1 elaborado en la Universidad de Chile

#### **2.3.3.1.1      *Objetivo***

Según (Martinez, 2016):

“Realizar un análisis del comportamiento de la modelación 3D en cuanto a criterios de diseño para contracciones en canales supercríticos, tales como los sugeridos por el Bureau of Reclamation y USACE, entre otros, mediante la modelación numérica del rápido de descarga del vertedero de la Central Hidroeléctrica Chucás de Costa Rica, utilizando el software ANSYS CFX y comparando con un modelo físico de la obra”.

#### **2.3.3.1.2      *Metodología***

Según (Martinez, 2016):

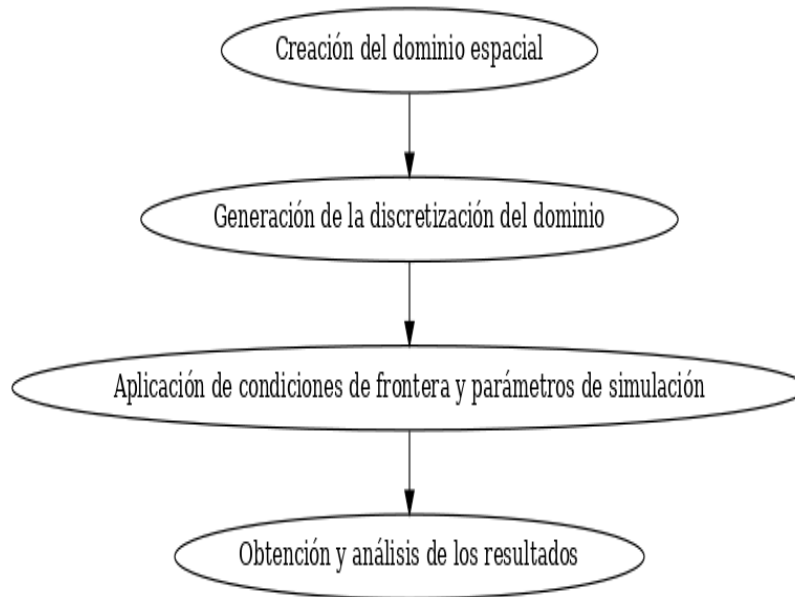
“A grandes rasgos el procedimiento de modelación se resume en cuatro etapas: crear el dominio espacial, generar la discretización del dominio, aplicar las condiciones de borde y parámetros de simulación y, finalmente, obtener los resultados. No obstante, para lograr las modelaciones deseadas resulta primordial lograr un buen manejo del software ANSYS CFX. Para esto se realizó, en primera instancia, la modelación de obras de flujo en superficie libre con geometrías simples como canales y gradas. Estas modelaciones serán comparadas con resultados empíricos de la literatura.

Alcanzado cierto manejo en el uso del software se procedió a realizar la simulación numérica del modelo físico del rápido de descarga de la Central Chucás. En esta etapa es necesario tener la certeza de que las condiciones de simulación y parámetros son los

adecuados para lograr reproducir el fenómeno en estudio en la modelación 3D, y, por lo tanto, se realiza la simulación de un perfil unitario tipo Ogee según las especificaciones del USACE comparando los resultados obtenidos con los resultados experimentales de la misma institución.

Lograda la modelación numérica del perfil Ogee, se procede a replicar el procedimiento de la simulación para el dominio espacial del modelo físico a escala, realizando un análisis comparativo de los resultados obtenidos y los medidos en el modelo físico. Posteriormente, se realiza la simulación análoga para el caso de la obra a escala real, comparando los resultados obtenidos.

Para analizar los criterios de diseño existentes es necesario contar con un set de resultados para varias geometrías y condiciones de flujo. Estos, además, necesitan un respaldo experimental, y por lo tanto se utilizan datos de análisis experimentales para contracciones en canales supercríticos, los cuales serán replicados en el software ANSYS CFX. Los resultados obtenidos en las simulaciones serán analizados y comparados con los datos experimentales existentes, así como los distintos criterios o métodos existentes”.

**Figura 33***Antecedente nacional 02: Metodología*

*Nota:* Adaptado de (Martinez, 2016): donde se ve esquemáticamente la metodología empleada en su investigación.

### 2.3.3.1.3 Resultados

Según (Martinez, 2016) los resultados de sus datos experimentales versus simulados:

**Tabla 15***Datos experimentales versus simulados*

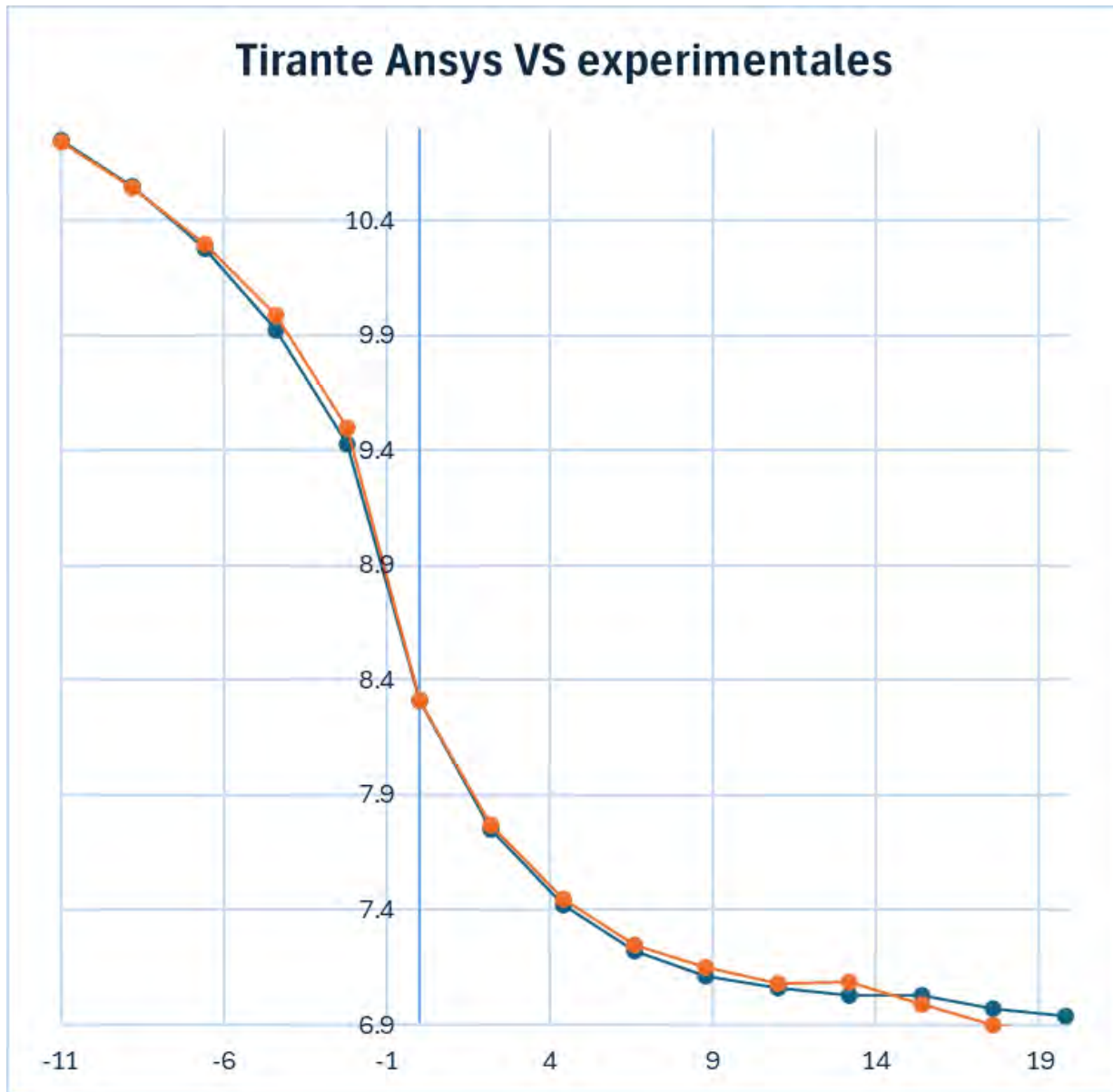
X [m]	H <sub>ANSYS</sub> [m]	H <sub>USAGE</sub> [m]	Dif [%]	Dif [m]
-11.0	10.75	10.74	0.11	-0.01
-8.8	10.55	10.54	0.08	-0.01
-6.6	10.28	10.30	0.14	0.01
-4.4	9.92	9.99	0.71	0.07
-2.2	9.43	9.50	0.77	0.07
0.0	8.31	8.31	0.06	-0.01
2.2	7.75	7.77	0.22	0.02
4.4	7.42	7.45	0.46	0.03
6.6	7.22	7.25	0.42	0.03
8.8	7.11	7.15	0.58	0.04
11.0	7.06	7.08	0.33	0.02
13.2	7.03	7.09	0.75	0.05
15.4	7.03	6.99	0.46	-0.03
17.6	6.97	6.90	0.96	-0.07

19.8	6.94	6.86	1.28	-0.09
------	------	------	------	-------

*Nota:* Tabla adaptado de (Martinez, 2016) donde se ve la comparativa de los datos experimentales con los resultados simulados

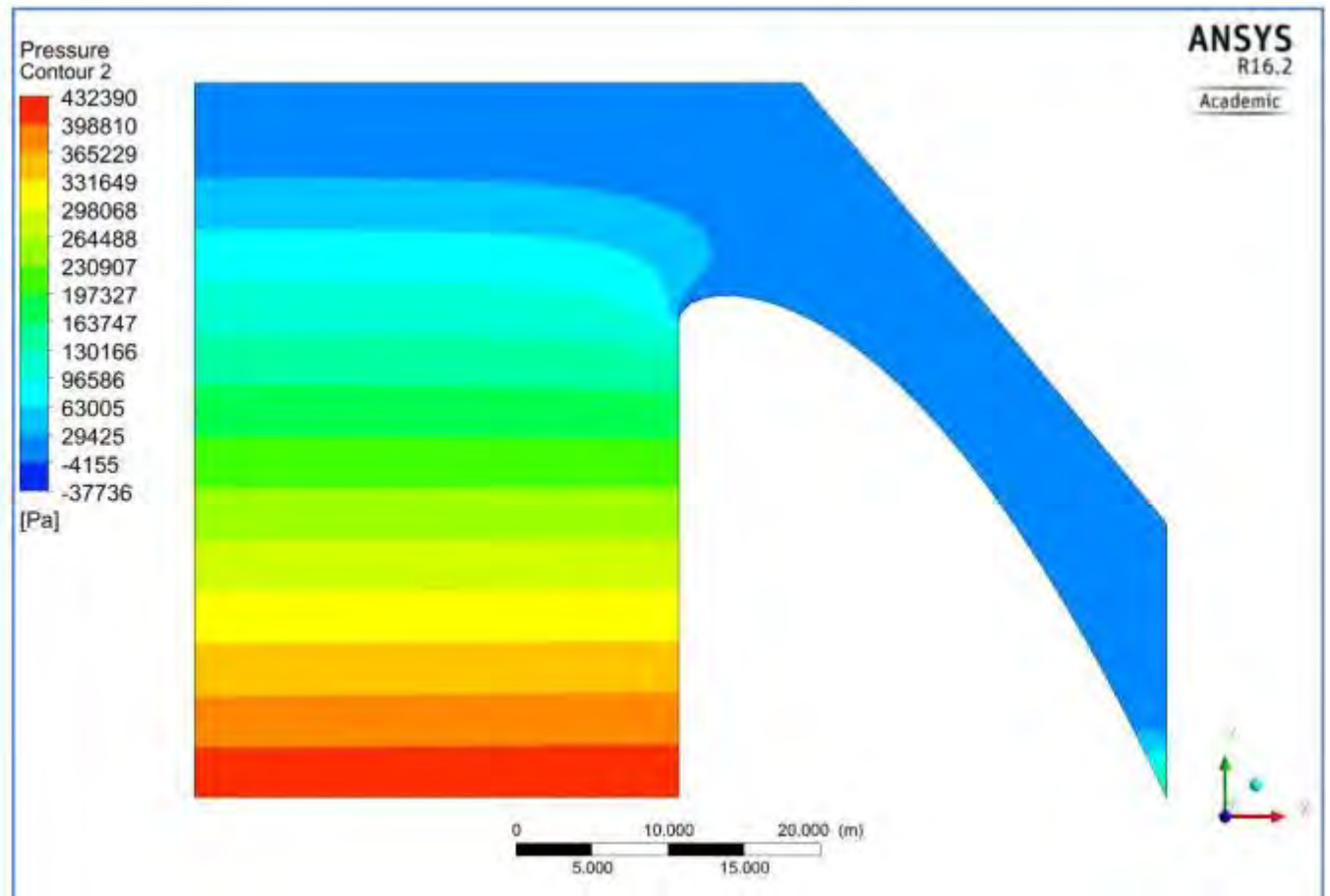
### Figura 34

*Antecedente nacional: Resultados simulados vs experimentales*



*Nota:* Figura adaptado de (Martinez, 2016) donde se ve la comparativa grafica de los datos experimentales con los resultados simulados

**Figura 35**  
*Presión sobre el vertedero unitario*



*Nota:* Figura tomada de (Martinez, 2016) donde se ve una isosuperficie de presiones mediante una sección de corte

#### 2.3.3.1.4 Conclusiones

Según: (Martinez, 2016):

“Dentro de los objetivos de la presente memoria, se pueden distinguir los siguientes:

- Aprender el uso de software ANSYS CFX a un nivel que permita realizar los siguientes objetivos.
- Realizar la modelación 3D del modelo físico del rápido de descarga de la Central Chucás.
- Realizar la modelación a escala real del rápido de descarga de la Central Chucás.

- Realizar la modelación numérica para distintas geometrías y condiciones de flujo en contracciones de canales supercríticos.

De acuerdo con lo realizado en la sección de simulaciones previas presentada en el capítulo 3, se puede concluir que fue fundamental la realización de simulaciones de baja complejidad para aprender a utilizar el software e interactuar con éste. Dentro de las cosas aprendidas las más destacables tienen que ver con la configuración de las condiciones de borde y como éstas afectan los resultados de la simulación, así como también las diferencias entre los modelos de turbulencia y los modelos multifase.

También se tiene la importancia que tiene la malla sobre las simulaciones y lo necesario de realizar un análisis de sensibilidad, para definir la malla óptima en cuanto a tiempos de simulación y precisión de los resultados.

Así como las simulaciones previas entregaron buenas directrices sobre la simulación con ANSYS CFX, la modelación del perfil Ogee de ancho unitario, del capítulo 4 y 6, entregó excelente información para la modelación del rápido de descarga, dado que las simulaciones realizadas son bastante similares a la simulación del vertedero de la Central Chucás de Costa Rica, que es uno de los objetivos de este trabajo de título. Por lo tanto, los excelentes resultados que se obtuvieron para la simulación del perfil Ogee indican que las condiciones de modelación utilizadas son las adecuadas para realizar la modelación del rápido de descarga, recordando que la máxima diferencia con respecto a los datos experimentales del USACE fue de 9 cm en una altura de escurrimiento de 7m. Además, es posible decir que realizar una simulación para condiciones de geometría y de flujo que han sido estudiadas a cabalidad, como es el caso de determinar la altura de escurrimiento de un perfil Ogee estándar, no es necesario dado que el tiempo requerido para asegurar buenos resultados (creación del dominio, análisis de



sensibilidad, tiempo de simulación, etc.) es muy superior a utilizar los datos tabulados por el USACE.

Para la simulación del rápido de descarga de la Central Chucás, del capítulo 4 y 6, se pueden concluir varias cosas. La primera, para la simulación de un fenómeno a escala real y otro a escala de prototipo el software entrega resultados casi idénticos, lo que avala la utilización de modelos físicos a escala si se considera que la simulación numérica logra reproducir los fenómenos estudiados. Sin embargo, los resultados obtenidos de la simulación numérica del modelo físico resultan dispares, dado que no hay un buen ajuste en comparación con los datos medidos experimentalmente para las alturas de escurrimiento, con errores promedio de 21,6 % para el caudal de diseño.

Resultados que contrastan con el excelente ajuste que se tiene para las mayores presiones medidas de forma experimental, no así con las presiones sobre el umbral las cuales no se ajustan en magnitud, pero siguen una tendencia similar, por ejemplo, las presiones negativas se presentan tanto para los datos medidos como para los simulados. Además, cabe recordar que se tiene cierta incongruencia en los datos medidos sobre el modelo físico en la zona del umbral, específicamente en los puntos  $X=3,1$  y  $7,5$  m donde se tienen valores muy similares para todos los caudales medidos en el eje central del primer vano, lo que no se repite en los demás ejes de medición y lo cual indica cierto error en la toma de datos o en la implementación de los piezómetros en esos puntos.

Las diferencias en las alturas son demasiado grandes, incluso superan la revancha que tendrían los muros si se utiliza la expresión del USBR de su texto Small Dams (1987), que para los datos obtenidos de la simulación entrega una revancha en torno a los 2 m, y, por lo tanto, si se diseñara en función de los resultados de la simulación y el comportamiento real fuera el dado por el modelo físico, la obra se vería totalmente

sobrepasada y su diseño sería deficiente. El caso contrario está dado por la fidelidad de los datos experimentales, donde si estos resultan ser erróneos el diseño en base a ellos produciría una obra sobredimensionada, aumentando los costos del proyecto. Dado que existe información bibliográfica que avala tanto a la simulación numérica como a los modelos físicos, para decidir con que datos diseñar, se necesitaría realizar mayores estudios como, por ejemplo, verificar los datos medidos en el modelo físico.

Para el caso de las contracciones en canales supercríticos, se separó el análisis para canales horizontales y canales con pendiente, dado que los métodos o criterios de diseño existentes se pueden agrupar según estos casos. Dentro del análisis de los métodos para canales horizontales se obtuvo como resultado que estos subestiman la altura media de escurrimiento al final de la transición, hasta en un 54% (con el método de Hsu, 2004), con respecto a la altura medida en las experiencias de Hager et al. (1987). En cambio, los valores obtenidos para la simulación presentan un error máximo de un 5,3 %, entregando una aproximación mucho mejor que los métodos analizados.

Cabe destacar que para números de Froude menores a 6, los métodos entregan valores aproximados cercanos a los experimentales, lo cual se debe a que para números de Froude mayores el flujo se ve fuertemente gobernado por aceleraciones verticales, haciendo no efectivas las aproximaciones hechas por los métodos estudiados. Por lo tanto, la simulación numérica entrega resultados más cercanos a los experimentales al considerar conservación de momentos en las tres direcciones.

Luego, resulta conveniente utilizar la modelación numérica para efectos de diseño de contracciones en canales supercríticos con números de Froude mayores a 6.

### Capítulo III: Hipótesis y variables

Afirma (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.121) lo siguiente: “Las hipótesis son el centro, la médula o el eje del método deductivo, toman la estafeta de parte del planteamiento en la ruta cuantitativa”, dentro de la presente investigación, se tendrán hipótesis del tipo causales, debido a que el alcance de la investigación será explicativo, aparte es importante mencionar que las hipótesis emanan del marco teórico y del planteamiento del problema

#### 3.1. Hipótesis general

La dinámica del fluido influye significativamente en la generación de los esfuerzos de rotura en el cuarto floculador.<sup>4</sup>

#### 3.2. Hipótesis específicas

La dinámica del fluido influye significativamente en la generación de esfuerzos normales de rotura en el cuarto floculador.

La dinámica del fluido influye significativamente en la generación de esfuerzos cortantes de rotura en el cuarto floculador.

#### 3.3. Identificación de variables e indicadores

##### 3.3.1. Variables

Afirma (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.125) lo siguiente: “Una variable es una propiedad o concepto que puede variar y cuya fluctuación es susceptible a medirse u observarse”

##### 3.3.1.1. Variable Independiente (X)

Dinámica del fluido: Comportamiento hidráulico del flujo de agua en el cuarto floculador, caracterizado por campos de velocidad, presión y régimen de turbulencia.

---

<sup>4</sup> Todas las hipótesis se delimitan temporalmente al año 2025 y espacialmente a la planta de tratamiento de agua potable La Pastora. Recomendación de (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018): “Establecer los límites temporales y espaciales ... a veces por redacción o longitud no se incluyen todos los aspectos, sino que se comentan mediante una explicación adicional”

### 3.3.1.2. Variables dependientes (Y)

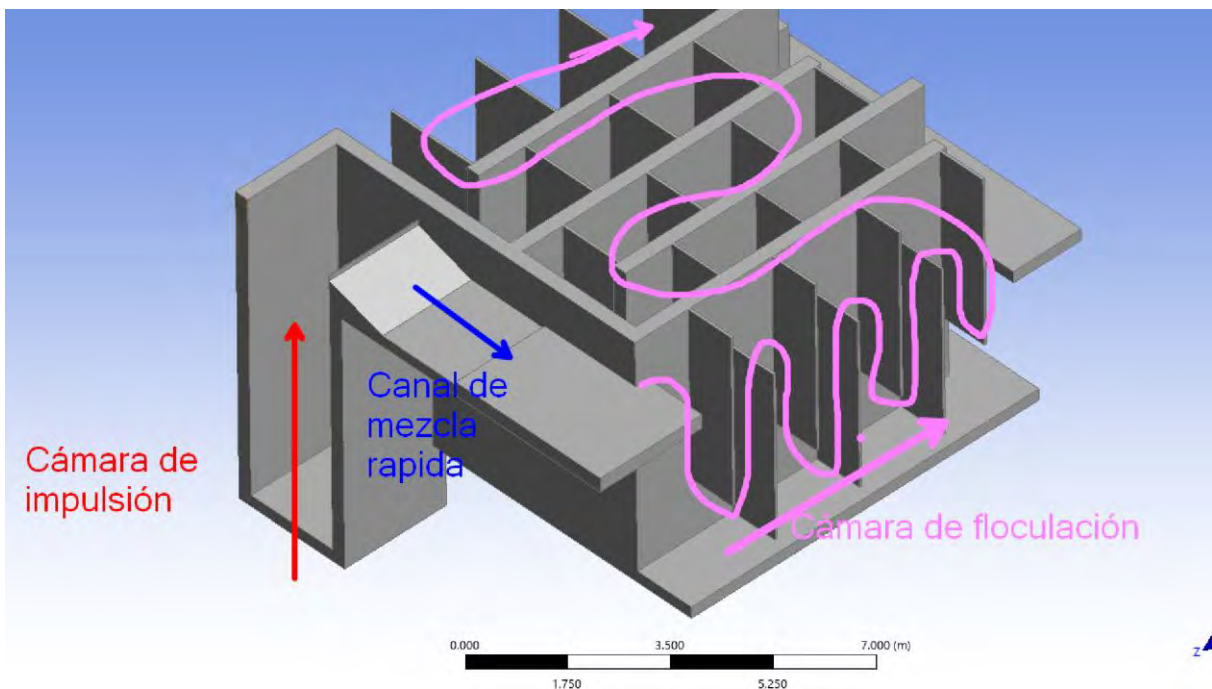
Esfuerzos de rotura en el cuarto floculador: Esfuerzos mecánicos inducidos por la dinámica del fluido sobre los elementos estructurales del floculador, expresados como esfuerzos normales y esfuerzos cortantes.

### 3.3.1.3. Objeto de estudio

La dinámica del fluido y la geometría del canal de regulación, del sistema de mezcla rápida y de los floculadores de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, ubicada en Puerto Maldonado, provincia de Tambopata, región Madre de Dios.

**Figura 36**

*Gráfica de zona de estudio*



*Nota:* Figura donde se ve la geometría completa es decir el dominio computacional con las diferentes zonas del dominio computacional

### 3.3.1.4. Ámbito Geográfico

Región: Madre de Dios

Provincia: Tambopata

Distrito: Tambopata

**3.3.1.5. Periodo**

Año 2025

### 3.4. Operacionalización de variables

**Tabla 16**

*Operacionalización de variables*

<b>Título de Investigación:</b> EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO EN LA GENERACIÓN DE ESFUERZOS DE ROTURA MEDIANTE CFD-FSI EN EL CUARTO FLOCULADOR DE LA PTAP LA PASTORA – 2025						
<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Ítem</b>	<b>Normativas - Literatura</b>
X1: Dinámica del fluido	La dinámica del fluido corresponde al comportamiento hidráulico del agua en el cuarto floculador, descrito fundamentalmente por los campos de velocidad y presión, los cuales representan el movimiento del fluido y las fuerzas internas asociadas en el dominio de estudio.	La dinámica del fluido se evaluó mediante simulaciones CFD transitorias en FLOW-3D, considerando el dominio hidráulico completo del sistema de tratamiento; el análisis se realizó sobre un estado estadísticamente estable del flujo, identificado cuando los valores medios de velocidad y presión se mantienen constantes en el tiempo.	Velocidad	metro	m	Mecánica de Fluidos (Navier–Stokes); criterios hidráulicos de diseño de PTAP – RNE OS.020
				segundo	s	
				newton	N	
Y1: Esfuerzos de rotura en el cuarto floculador	Los esfuerzos de rotura inducidos corresponden a las solicitaciones mecánicas generadas en los elementos estructurales del cuarto floculador como consecuencia de la interacción fluido–estructura, expresadas mediante esfuerzos normales y esfuerzos cortantes.	Los esfuerzos de rotura inducidos se determinaron mediante simulaciones acopladas CFD-FSI en FLOW-3D, a partir del cálculo de los esfuerzos normales y cortantes generados por la acción hidrodinámica del fluido sobre las placas del cuarto floculador, evaluados en el estado estadísticamente estable del sistema.	Presión	metro cuadrado	m <sup>2</sup>	Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma E.060 Concreto Armado DS N°010 – 2009 - VIVIENDA - Norma E.090> Estructuras metálicas
			Esfuerzo normal inducido	newton	N	
				metro cuadrado	m <sup>2</sup>	
			Esfuerzo cortante inducido	newton	N	
				metro cuadrado	m <sup>2</sup>	

## Capítulo IV: Ubicación y metodología

### 4.1. Ámbito de estudio: Localización política y geográfica

Se refiere a la localización donde se hará el estudio, se puede determinarla mediante su localización política o su localización geográfica

#### 4.1.1. Localización política

Departamento: Madre de Dios

**Figura 37**

*Ubicación geográfica de Madre de Dios*



*Nota:* Figura tomada de (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018) donde se ve la ubicación del departamento Madre de Dios

Provincia: Tambopata

Distrito: Tambopata

**Figura 38**

*Distrito de Tambopata*



*Nota:* Figura donde se ve la ubicación de la provincia y distrito de Tambopata



#### 4.1.2. Localización geográfica

El ámbito de estudio se encuentra ubicado en el sureste del Perú, en el cuadrante 19L, más específicamente cuenta con el centroide geométrico W69°12'36" – S12°35'21.21" de latitud y longitud, exactamente en la siguiente coordenada se encuentra la planta de tratamiento como figura en la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento.

**Tabla 17**

*Coordenadas de la PTAP La Pastora (Latitud y longitud)*

Latitud	Longitud
-12.58789166	-69.21286198

*Nota:* En la siguiente tabla adaptada de (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, s/f) se puede visualizar el centroide de la planta de tratamiento de agua potable La Pastora.

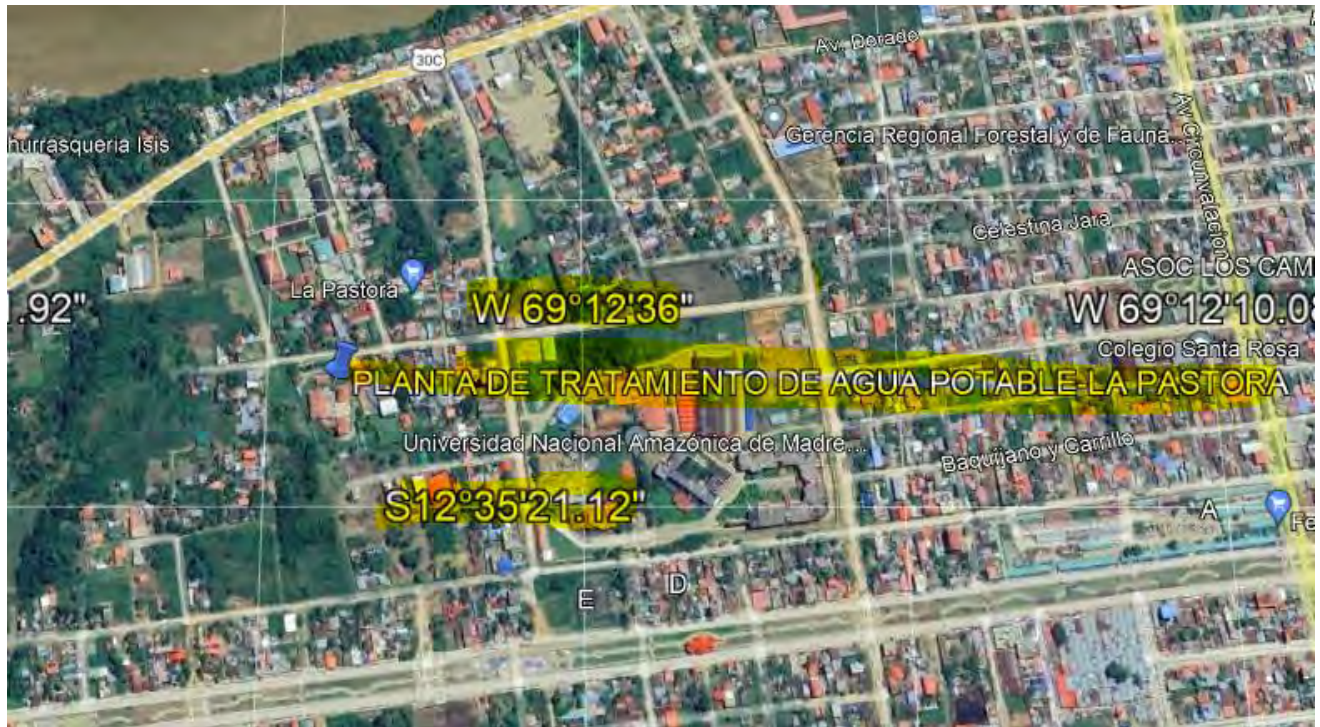
**Tabla 18**

*Coordenadas de la PTAP La Pastora (UTM) Zona 19S*

Este (X)	Norte (Y)
476879.42	8608427.71

*Nota:* En la siguiente tabla se puede visualizar las coordenadas en formato UTM del centroide de la planta de tratamiento de agua potable La Pastora.

**Figura 39**  
Ubicación geográfica



*Nota:* En la siguiente figura se puede visualizar mediante una vista satelital la zona donde se encuentra la planta de tratamiento de agua potable La Pastora.

#### **4.2. Tipo, nivel y diseño de investigación**

Afirma Sampieri y Mendoza (2018) lo siguiente: “Visualizar que alcance tendrá nuestra investigación es importante para establecer sus límites conceptuales y metodológicos, así como direccionarnos en la ruta cuantitativa” (p.104)

##### **4.2.1. Tipo de investigación**

Afirman Sampieri y Mendoza (2018) que: “El significado original del término cuantitativo (del latín “*quantitas*”) se vincula a conteos numéricos y métodos matemáticos” (p.35).

**Figura 40**  
*Mapa Mental de Investigación Cuantitativa*



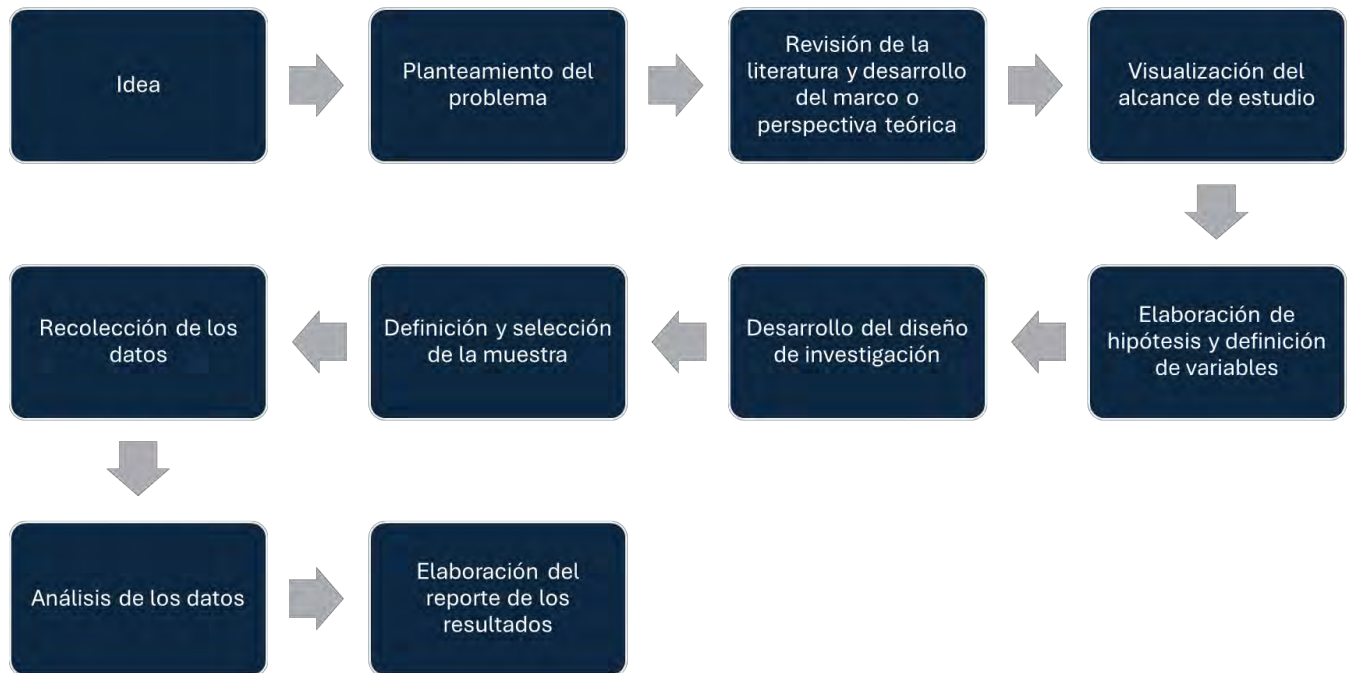
*Nota:* En la siguiente figura se puede visualizar un mapa mental de resumen de lo necesario y consideraciones para una investigación de tipo cuantitativa.

La presente investigación es de tipo cuantitativa, debido a que se orienta al análisis numérico de variables medibles y a la evaluación de relaciones causales entre la dinámica del fluido y los esfuerzos de rotura inducidos en el cuarto floculador. Para ello, se emplean métodos matemáticos y modelos computacionales basados en dinámica de fluidos computacional (CFD) e interacción fluido-estructura (FSI), que permiten obtener resultados objetivos y reproducibles. Este enfoque resulta

adecuado, ya que posibilita estimar la magnitud de los fenómenos estudiados y contrastar las hipótesis planteadas bajo condiciones controladas de simulación. Asimismo, la investigación se desarrolla bajo un diseño no experimental, dado que las variables no son manipuladas directamente, sino analizadas a partir de la modelación numérica del sistema.

**Figura 41**

*Proceso de una Investigación Cuantitativa*



*Nota:* En el siguiente esquema se puede visualizar las etapas para la elaboración de una investigación cuantitativa.

#### **4.2.2. Nivel de investigación**

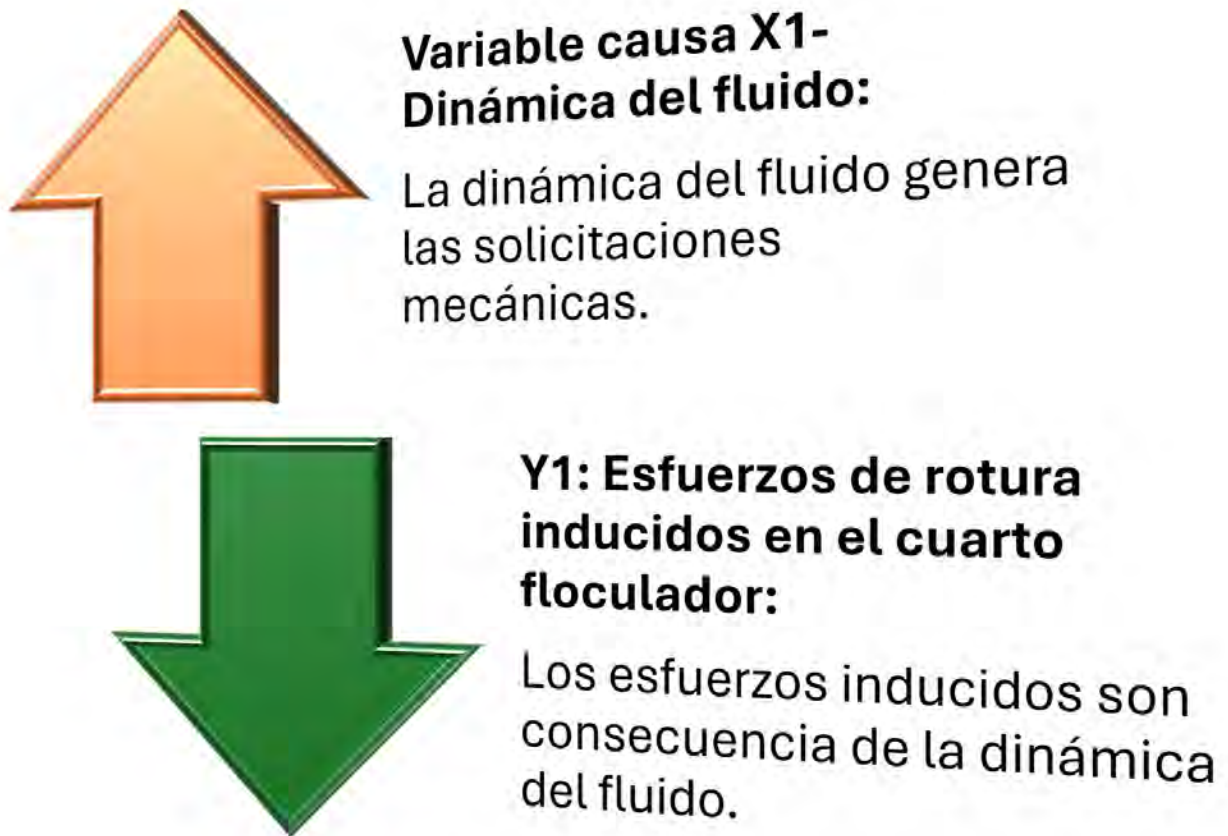
Indica Sampieri y Mendoza (2018) lo siguiente: “Los estudios explicativos pretenden encontrar las razones que provocan ciertos fenómenos o establecer relaciones de causalidad entre variables” (p.116).

En ese sentido, la presente investigación presenta un nivel explicativo, ya que analiza la relación causal entre la dinámica del fluido y la generación de esfuerzos de rotura inducidos en el cuarto floculador de la PTAP La Pastora. El estudio busca explicar cómo las condiciones hidráulicas

del sistema influyen en la magnitud y distribución de los esfuerzos normales y cortantes que actúan sobre los elementos estructurales, permitiendo identificar condiciones mecánicas críticas asociadas a la acción hidrodinámica del fluido.

**Figura 42**

*Alcance explicativo (Ruta que explica destino)*



*Nota:* En el siguiente esquema se puede visualizar el alcance de la investigación y su relación con las variables.

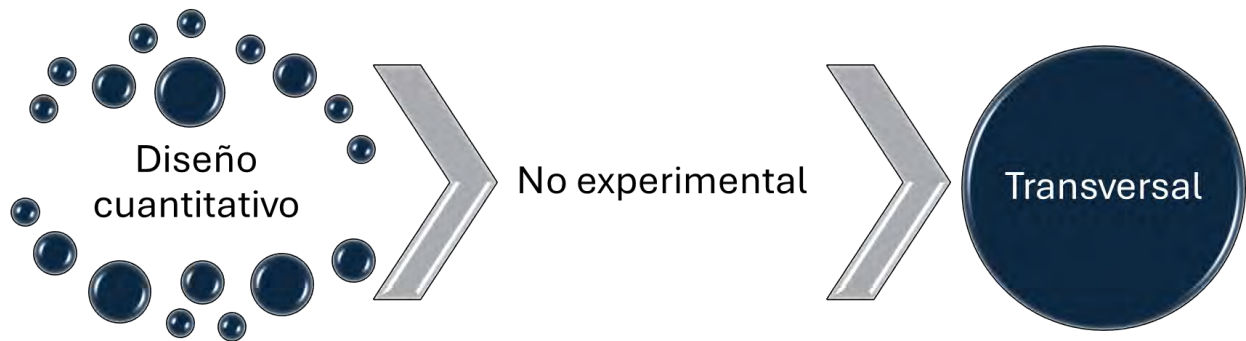
#### **4.2.3. Diseño de la investigación**

El diseño según (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018, p.150) es el “Plan o estrategia que se desarrolla para obtener la información (datos) requerida en una investigación con el fin último de responder satisfactoriamente el planteamiento del problema”



En ese sentido, la presente investigación presenta un diseño no experimental, ya que las variables no son manipuladas deliberadamente, sino analizadas a partir de simulaciones numéricas. Asimismo, es de tipo transversal, debido a que las mediciones se realizan bajo un conjunto específico de condiciones operativas del sistema, evaluadas en un único momento de análisis correspondiente al estado estadísticamente estable del flujo.

**Figura 43**  
*Clasificación de la investigación*



*Nota:* En el siguiente esquema se puede visualizar gráficamente la clasificación de la investigación que es cuantitativa no experimental transversal.

#### **4.3. Unidad de análisis**

La unidad de análisis de la presente investigación corresponde al sistema hidráulico–estructural conformado por el canal de regulación, el sistema de mezcla rápida y los floculadores de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, analizado bajo el enfoque de interacción fluido–estructura. Dicho sistema se encuentra ubicado en la ciudad de Puerto Maldonado, provincia de Tambopata, región Madre de Dios.

#### **4.4. Población de estudio**

La población de estudio corresponde a las unidades de floculación del sistema de tratamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, ubicada en la ciudad de Puerto Maldonado, provincia de Tambopata, región Madre de Dios.

La muestra de estudio está constituida por el cuarto floculador de la PTAP La Pastora, el cual se selecciona de manera intencional, debido a que en dicho elemento se concentran las condiciones hidráulicas y estructurales de mayor interés para el análisis de los esfuerzos de rotura inducidos mediante la interacción fluido–estructura.

#### **4.5. Tamaño de muestra**

La presente investigación considera una población finita, correspondiente a las unidades de floculación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora.

La muestra de estudio está constituida por el cuarto floculador, sobre el cual se realizaron múltiples mediciones in situ de velocidad del flujo, mediante el uso de un correntómetro, con fines de validación del modelo numérico CFD.

Las mediciones se efectuaron a lo largo de una sección transversal de 1.80 m, discretizada cada 0.20 m, y en dos niveles de profundidad (9 cm y 18 cm), obteniéndose un conjunto representativo de valores de velocidad utilizados como referencia experimental para la comparación con los resultados del modelo computacional.

Dichas mediciones no constituyen un muestreo estadístico probabilístico, sino un procedimiento de validación experimental puntual del modelo numérico, orientado a contrastar el orden de magnitud y el comportamiento del campo de velocidades simulado.

**Figura 44**  
*Población y muestra de estudio*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver toda la población y la zona de estudio (Muestra) resaltada de color azul

#### **4.6. Técnicas de selección de muestra**

La presente investigación no se basa en una población estadística convencional, sino en el análisis de una estructura hidráulica específica, correspondiente al cuarto baffle de floculación del floculador N.º 4 del sistema de tratamiento de agua potable de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora.



En este contexto, la técnica de selección de muestra corresponde a un muestreo intencional por estudio de caso, orientado a zonas estructuralmente críticas, definido a partir de observaciones in situ y de criterios técnicos derivados del análisis numérico.

La identificación de dichas zonas se realizó mediante un modelo acoplado de interacción fluido–estructura (CFD–FSI), el cual permitió localizar áreas con alta concentración de esfuerzos inducidos por la dinámica del fluido. En función de estos resultados, se seleccionaron puntos representativos para la validación del modelo CFD mediante mediciones de velocidad en campo y para el análisis numérico de los esfuerzos normales y cortantes inducidos.

Esta estrategia permite que la muestra sea representativa del comportamiento hidráulico-estructural del sistema, aun cuando el estudio se centre en una única unidad estructural.

#### **4.7. Técnicas de recolección de información**

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon técnicas de recolección de información que combinan medición directa in situ y revisión de documentación técnica, con el objetivo de caracterizar las condiciones hidráulicas y geométricas necesarias para la modelación numérica del sistema y la validación del modelo CFD–FSI aplicado al cuarto baffle de floculación del sistema de tratamiento de agua potable La Pastora, ubicado en la provincia de Tambopata, región Madre de Dios.

Las actividades de campo se realizaron el 7 de febrero de 2025, con la infraestructura en funcionamiento, lo que permitió obtener datos bajo condiciones reales de operación del sistema.

##### **4.7.1. Medición directa in situ**

Se emplearon instrumentos básicos para el levantamiento de información geométrica y hidráulica del sistema:

**Cinta métrica:** utilizada para registrar dimensiones geométricas relevantes de la placa de floculación, tales como longitud, altura, espesor, separación con tabiques contiguos y ubicación de la zona fracturada, asimismo para la discretización y seccionamiento de las zonas a ensayar.

**Correntómetro:** utilizado para medir la velocidad del flujo en el canal de mezcla rápida, a lo largo de una sección transversal de 1.80 m, discretizada cada 0.20 m, y en dos niveles de profundidad, con fines de validación del modelo CFD.

Adicionalmente, se tomaron registros fotográficos y notas técnicas de campo, los cuales permitieron documentar el estado de conservación y las características visibles de la placa de floculación.

#### **4.7.2. *Análisis computacional: Interacción fluido-estructura (FSI)***

La información recopilada en campo fue utilizada como insumo para el desarrollo del modelo numérico CFD–FSI en el software FLOW-3D (versión académica).

El análisis computacional integró:

- La simulación del campo de velocidades y presiones del flujo,
- La respuesta estructural de la placa de floculación ante las cargas hidráulicas inducidas.

Como resultado, se obtuvieron distribuciones de presión y de esfuerzos normales y cortantes inducidos, así como la identificación de zonas estructuralmente críticas, utilizadas para la evaluación de los esfuerzos de rotura en el cuarto bafle de floculación.

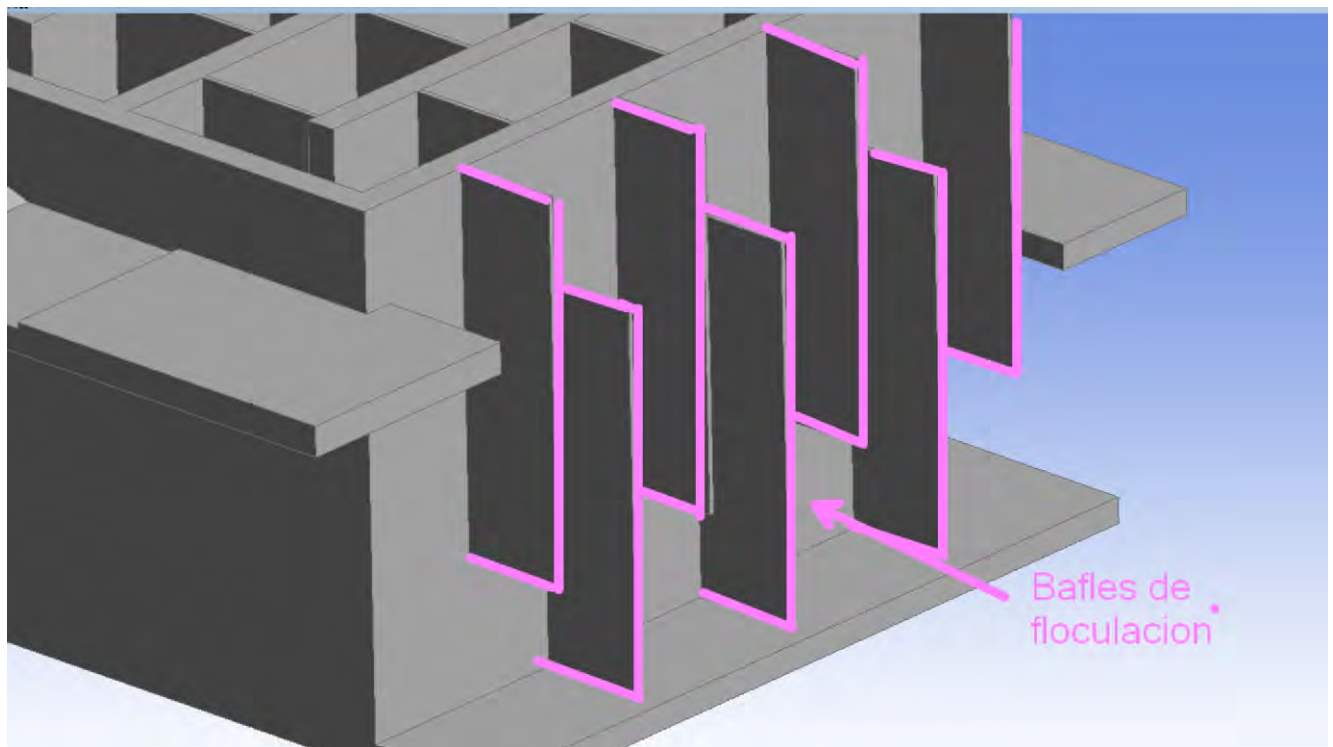
#### **4.7.3. *Datos de propiedades físico-mecánicas***

Las propiedades físico-mecánicas del material de la placa de floculación, tales como resistencia característica, módulo de elasticidad y densidad, fueron obtenidas a partir del expediente técnico

original del sistema La Pastora, en el cual se especifica el uso de concreto convencional como material estructural.

Dichos parámetros fueron empleados como datos de entrada del modelo estructural, de acuerdo con los criterios establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones (Normas E.060 y E.090). No se realizaron ensayos mecánicos destructivos ni extracción de muestras, debido al carácter evaluativo y no experimental del estudio.

**Figura 45**  
*Baffles de floculación*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver de forma resaltada con color magenta los baffles de floculación dentro de la geometría integral

#### **4.8. Técnicas de análisis e interpretación de la información**

El análisis de la información recolectada en la presente investigación se desarrolló mediante el procesamiento de datos experimentales y numéricos, siguiendo un enfoque cuantitativo orientado a la evaluación de las solicitaciones mecánicas inducidas en la cuarta placa de floculación bajo condiciones reales de operación hidráulica. Las técnicas aplicadas permitieron caracterizar el comportamiento del

flujo, validar el modelo numérico y estimar los esfuerzos estructurales inducidos asociados a la zona fracturada de la estructura.

#### ***4.8.1. Análisis numérico mediante simulación FSI***

Se implementó un modelo tridimensional en el software FLOW-3D, capaz de acoplar la dinámica del fluido con la respuesta estructural de la placa mediante un esquema de interacción fluido–estructura (CFD–FSI). El análisis consideró el dominio hidráulico correspondiente al canal de mezcla rápida y la placa de floculación, resolviendo el problema de forma transitoria, y efectuando el análisis sobre un estado estadísticamente estable del flujo.

Para la representación de los efectos turbulentos se empleó un modelo de cierre  $k-\omega$ , adecuado para flujos confinados entre superficies sólidas. El modelo fue configurado con condiciones de frontera correspondientes al caudal operativo del sistema La Pastora. La geometría fue discretizada mediante una malla cartesiana para el dominio fluido y una malla hexaédrica para la placa estructural, permitiendo una adecuada resolución de los campos de velocidad, presión y esfuerzos inducidos.

#### ***4.8.2. Validación experimental***

Los resultados del campo de velocidades obtenidos mediante simulación CFD fueron validados experimentalmente utilizando datos recolectados in situ mediante un correntómetro, con mediciones realizadas cada 0.20 m a lo largo de una sección transversal de 1.80 m del canal de mezcla rápida.

La validación se realizó mediante la comparación directa entre los valores de velocidad simulados y medidos, empleando el cálculo del error porcentual relativo. Los resultados evidenciaron un margen de error inferior al 5 %, lo que permitió confirmar la capacidad del modelo hidráulico para representar adecuadamente el comportamiento real del sistema y sustentar el análisis estructural posterior mediante FSI.

#### **4.8.3. Interpretación estructural**

Los resultados obtenidos del análisis CFD–FSI fueron interpretados desde el enfoque de la mecánica estructural, evaluando la distribución y magnitud de los esfuerzos normales y cortantes inducidos por la acción del flujo sobre la placa de floculación.

La simulación permitió identificar zonas de concentración máxima de esfuerzos, cuyos valores pico alcanzaron magnitudes del orden de  $3.07 \times 10^5$  Pa, coincidiendo espacialmente con la ubicación física de la fractura observada en la estructura. Este comportamiento respalda la hipótesis de que la fractura se encuentra asociada a condiciones mecánicas críticas inducidas por la dinámica del fluido.

Si bien no se desarrolla un modelo explícito de propagación de fisuras, los resultados obtenidos permiten caracterizar la fractura como un daño localizado producto de la interacción hidráulica–estructural bajo condiciones operativas constantes. La comparación cuantitativa entre los esfuerzos inducidos y los valores de referencia del material, obtenidos del expediente técnico, se presenta en el capítulo de resultados y discusión.

#### **4.9. Técnicas para la contratación de las hipótesis planteadas**

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, deductivo y explicativo, orientado a la contrastación de hipótesis formuladas a partir del análisis de la dinámica del fluido y su interacción con los elementos estructurales del sistema de tratamiento de agua potable La Pastora, con énfasis en el cuarto bafle de floculación donde se identificó daño estructural.

La contrastación de las hipótesis planteadas en el Capítulo III se realizó mediante técnicas de análisis numérico y comparación física de magnitudes, empleando los resultados obtenidos a partir de la simulación acoplada CFD–FSI desarrollada en el software FLOW-3D.

##### **4.9.1. Criterio de contrastación de hipótesis**

Se considera que la hipótesis general y las hipótesis específicas quedan respaldadas cuando el análisis CFD–FSI evidencia que la dinámica del fluido genera esfuerzos normales y cortantes de

magnitud relevante, cuya distribución espacial coincide con la zona físicamente dañada del cuarto bafle de floculación.

Asimismo, la hipótesis se refuerza cuando los valores de esfuerzo inducido obtenidos se sitúan en rangos comparables o cercanos a los valores de referencia del material estructural, establecidos en el expediente técnico y en el Reglamento Nacional de Edificaciones (Normas E.060 y E.090), sin que ello implique una verificación última de resistencia ni un análisis explícito de falla estructural.

#### **4.9.2. Técnica de comparación**

La contrastación de las hipótesis se desarrolló mediante la comparación directa entre los valores máximos de esfuerzo normal y esfuerzo cortante inducidos, obtenidos de la simulación CFD–FSI, y los valores referenciales de resistencia del material, expresados en unidades consistentes del Sistema Internacional (Pa).

El análisis se expresó en términos de:

- Magnitud del esfuerzo inducido,
- Distribución espacial de las solicitaciones,
- Nivel de solicitación relativa respecto a valores de referencia del material.

Cuando los resultados muestran esfuerzos inducidos significativos y concentrados en la zona de daño observada, se considera que la dinámica del fluido desempeña un rol determinante en la generación de las solicitaciones mecánicas, respaldando las hipótesis formuladas.

#### **4.9.3. Fundamentación técnica**

El método de contrastación adoptado es consistente con estudios estructurales de carácter numérico, en los que no se dispone de ensayos destructivos ni de replicación experimental a escala real. En este contexto, la validez de las hipótesis se sustenta en criterios físicos, mecánicos y comparativos, sin recurrir a pruebas estadísticas inferenciales.

La confiabilidad del análisis numérico fue asegurada mediante la validación experimental del campo de velocidades, realizada a partir de mediciones in situ con correntómetro, lo que garantiza que los esfuerzos estructurales obtenidos mediante FSI se fundamentan en condiciones hidráulicas representativas del sistema real.

## Resultados y discusión

### 5.1. Procesamiento, análisis, interpretación y discusión de resultados

#### 5.1.1. Resultados de trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó el 7 de febrero de 2025, con la asesoría del Ing. Carlos Loaiza Shiaffino, empleando un correntómetro y cinta métrica, con el objetivo de obtener datos experimentales de velocidad del flujo para la validación del modelo numérico CFD.

#### Figura 46

*Uso del correntómetro para mediciones directas*

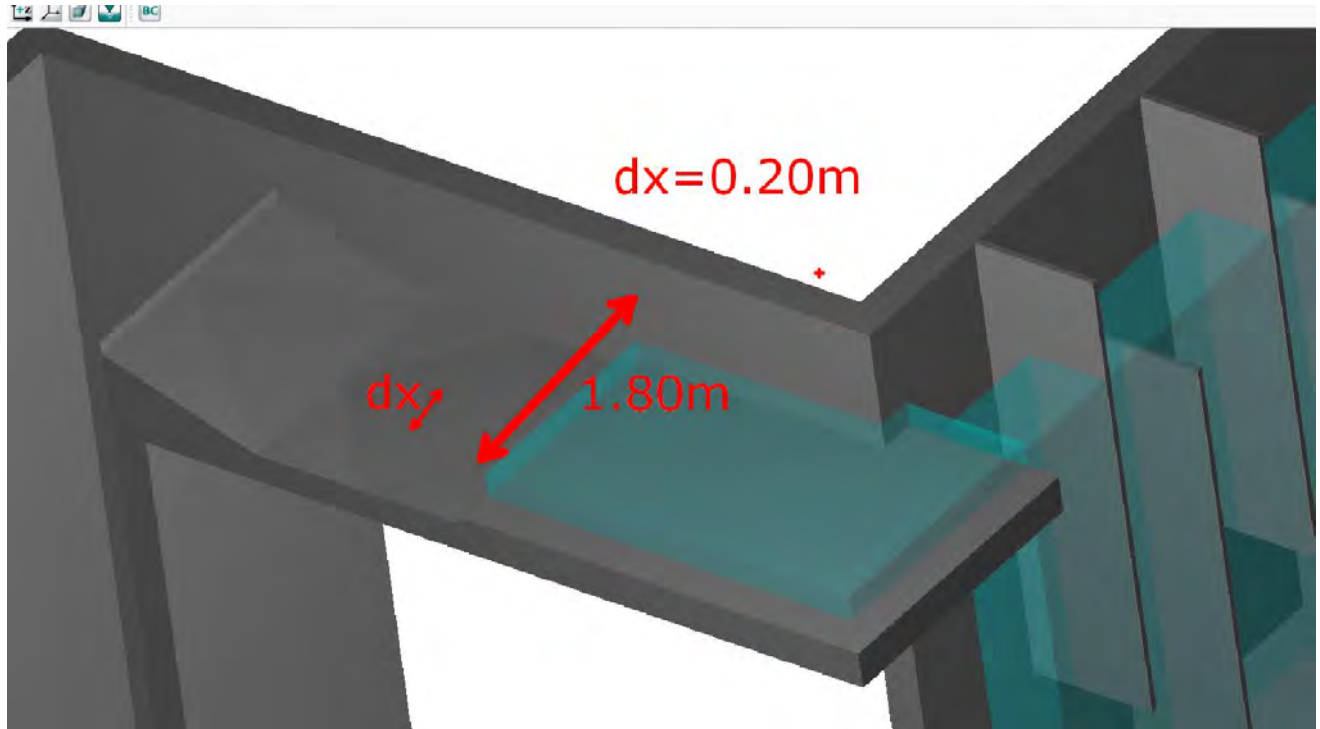


*Nota:* En la figura se muestra el uso del correntómetro durante las mediciones in situ de velocidad en la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora.

Con el fin de asegurar una adecuada representatividad espacial de las mediciones, se realizó una discretización transversal del dominio de medición en nueve secciones, a lo largo de un ancho total de 1.80 m, con un espaciamiento uniforme de 0.20 m entre puntos, utilizando cinta métrica, una tabla de apoyo y marcas visibles (tiza).

**Figura 47**

*Discretización transversal del dominio de mediciones (modelo numérico)*



*Nota:* En la figura se muestra la discretización transversal del dominio para realizar las mediciones in-situ, visto desde el modelo numérico.



**Figura 48**

*Discretización transversal del dominio de mediciones (campo)*

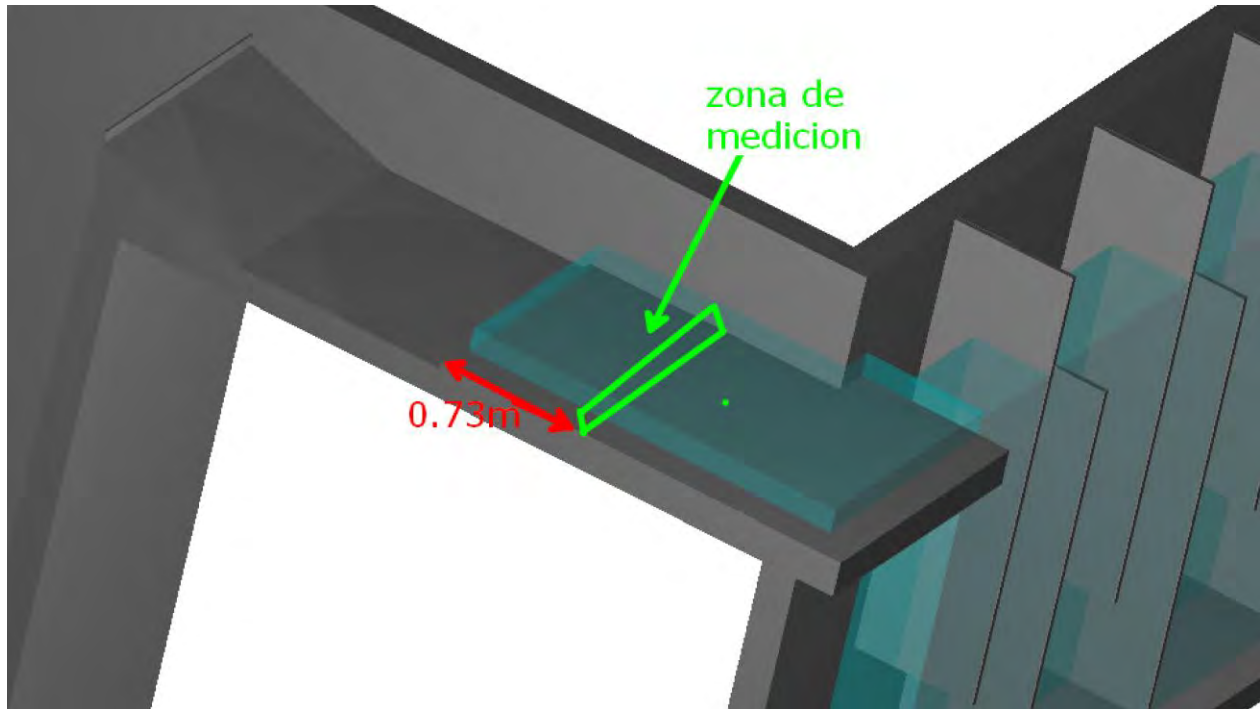


*Nota:* En la figura se puede ver cómo se realizó la discretización transversal del dominio para realizar las mediciones *in-situ*, visto desde el sistema real.

Las mediciones se realizaron a una distancia de 0.73 m aguas abajo del resalto hidráulico, correspondiente a la zona de mezcla rápida. Esta ubicación fue seleccionada con el propósito de evaluar el flujo en una región hidráulicamente desarrollada, donde los efectos locales inmediatos del resalto no dominan el comportamiento medio del campo de velocidades.

**Figura 49**

*Discretización longitudinal del dominio de mediciones (numérico)*



*Nota:* En la figura muestra la discretización transversal del dominio para realizar las mediciones *in-situ*, visto desde el modelo numérico.

**Figura 50**

*Discretización longitudinal del dominio de mediciones*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver cómo se realizó la discretización longitudinal del dominio para realizar las mediciones *in-situ*, visto desde el modelo real.



Como resultado de la campaña de medición, se obtuvieron los valores de velocidad mostrados en la Tabla 19, correspondientes a dos niveles de profundidad: 9 cm y 18 cm, expresados en cm/s.

**Tabla 19**  
*Resultados de medición in-situ (correntómetro)*

Longitud transversal de 1.80 m discretizada cada 0.20 m										
Longitud transversal (m)	1.8	1.6	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
Profundidad = 9cm	46	63	56	55	47	42	45	46	42	44
Profundidad =18 cm	52	60	54	56	48	46	40	44	52	40

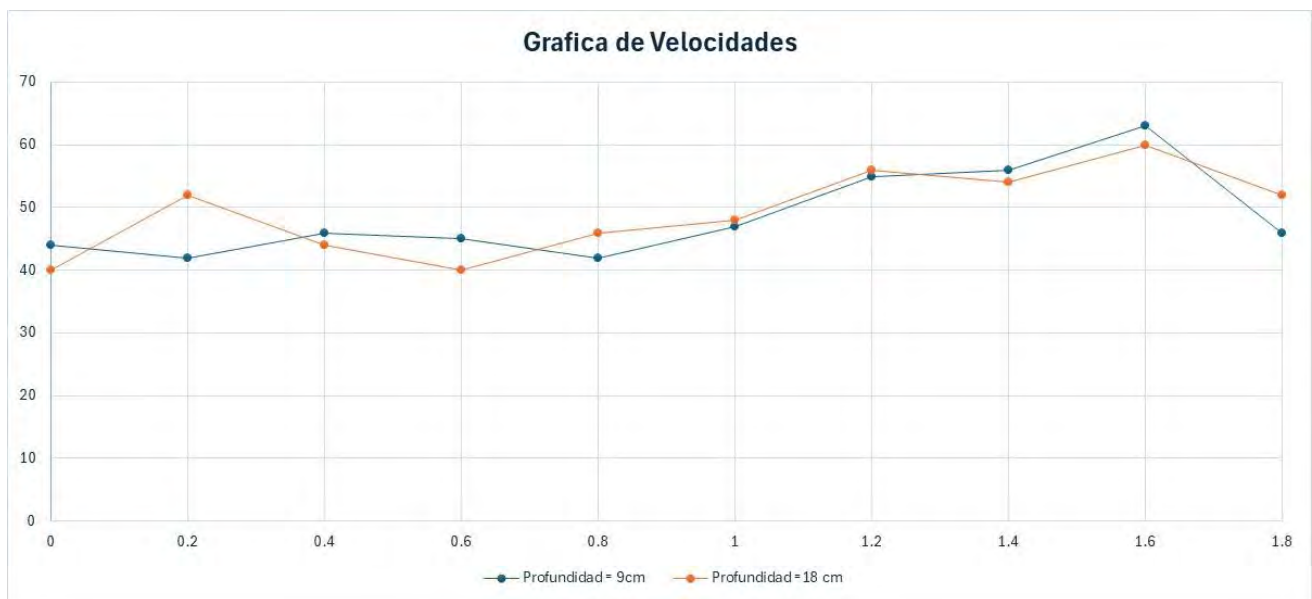
Mediciones en cm/s (Para asegurar precisión numérica en la medición) a 0.73m de la zona de resalto hidráulico

*Nota:* Las mediciones se realizaron a 0.73 m de la zona de resalto hidráulico (Longitud transversal de 1.80 m discretizada cada 0.20 m), bajo la supervisión del Ing. Carlos Loaiza Shiaffino.

A partir de los datos obtenidos, se determinó una velocidad promedio de:

- 0.48 m/s a una profundidad de 9 cm, y
- 0.49 m/s a una profundidad de 18 cm.

**Figura 51**  
*Grafica de velocidades medidas in-situ*



*Nota:* En la figura se muestra las velocidades medidas *in-situ* para diferentes profundidades.

Durante la inspección operativa se constató que el sistema funciona habitualmente con un caudal aproximado de 240 L/s, valor inferior al caudal de diseño (280 L/s), con la finalidad de preservar condiciones de operación más estables. No obstante, el modelo numérico CFD fue desarrollado utilizando el caudal de diseño de 280 L/s, por corresponder al escenario más crítico y potencialmente alcanzable durante la operación del sistema, garantizando así un análisis conservador de las sollicitaciones hidráulicas y estructurales.

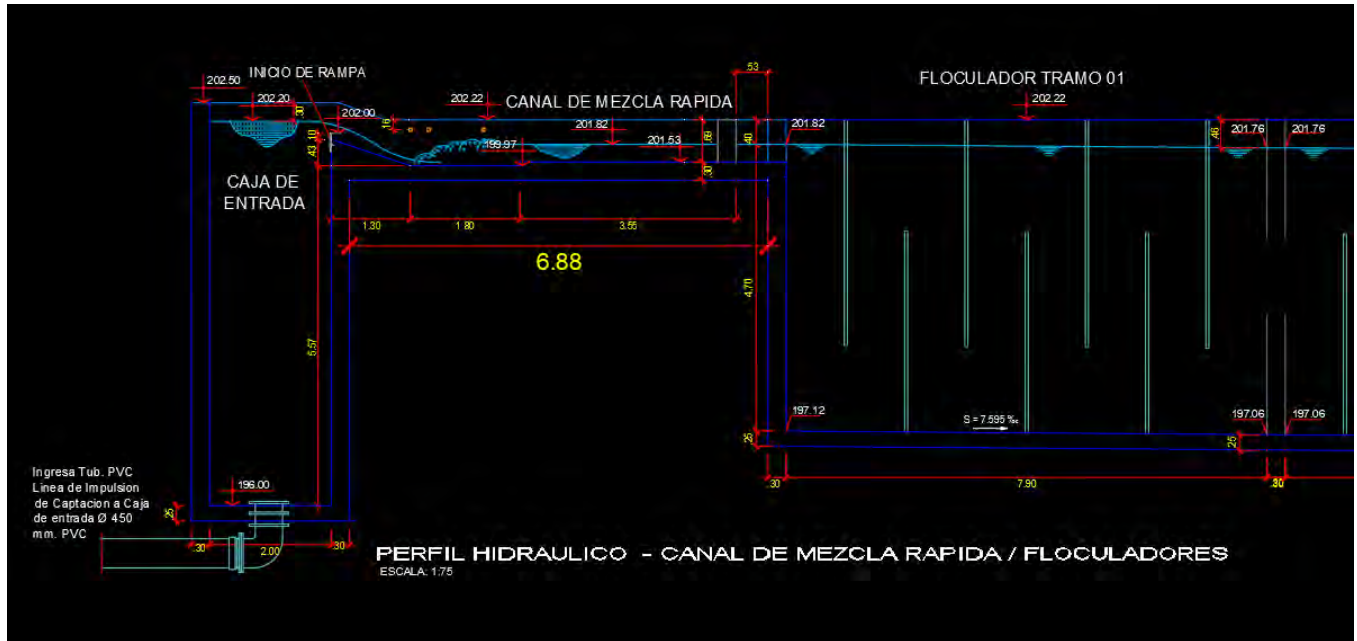
### ***5.1.2. Construcción del modelo numérico FSI en Flow 3D***

#### **5.1.2.1. Generación de la geometría**

La generación de la geometría del sistema se realizó empleando el software ANSYS Design Modeler (licencia académica), tomando como referencia los planos CAD contenidos en el expediente técnico de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora. La geometría desarrollada comprende la caja de entrada, el canal de mezcla rápida y los floculadores, respetando las dimensiones y configuraciones reales de la infraestructura existente.

**Figura 52**

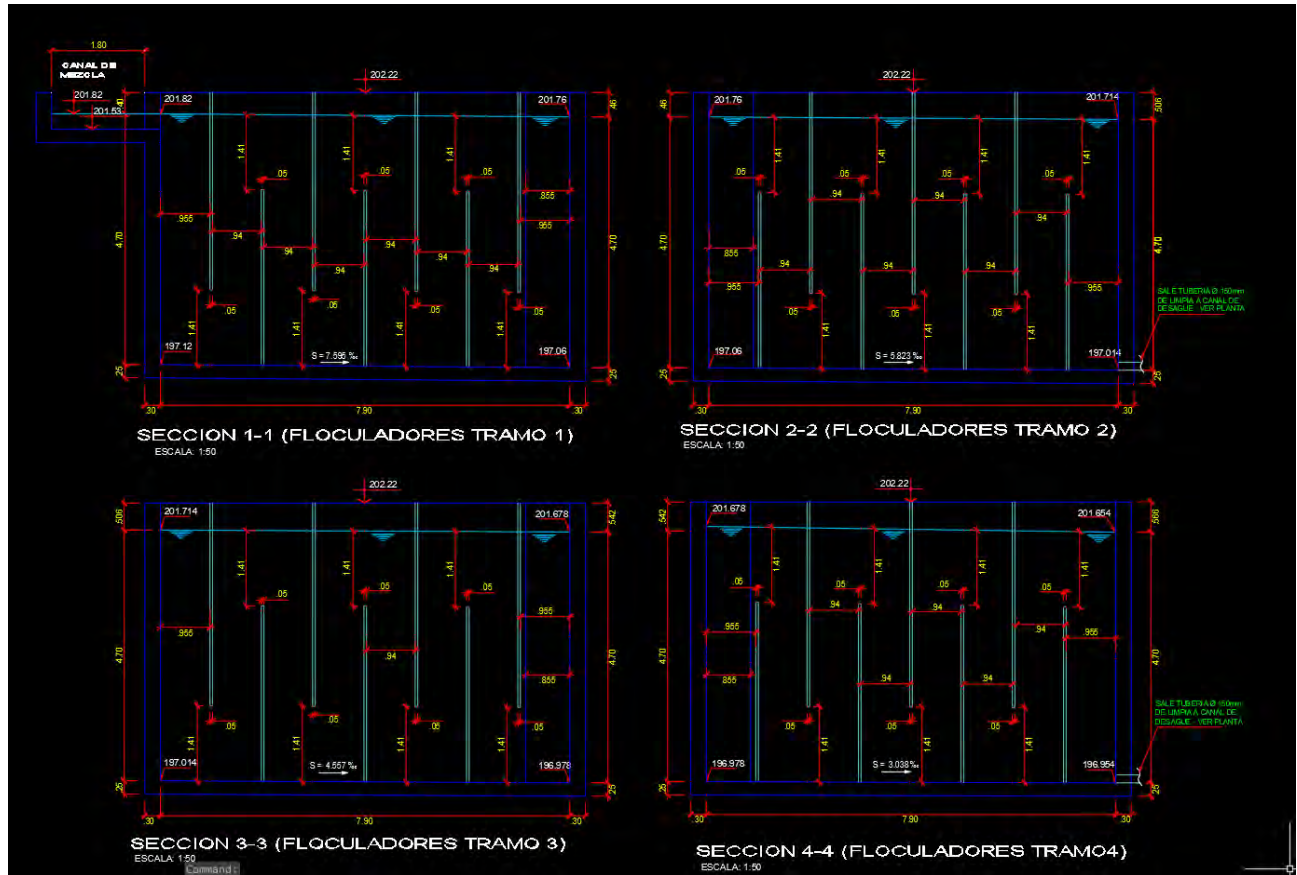
*Plano CAD de la geometría (Canal de entrada y mezcla rápida). (Perfil)*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la vista en perfil de la caja de entrada, mezcla rápida y floculadores.

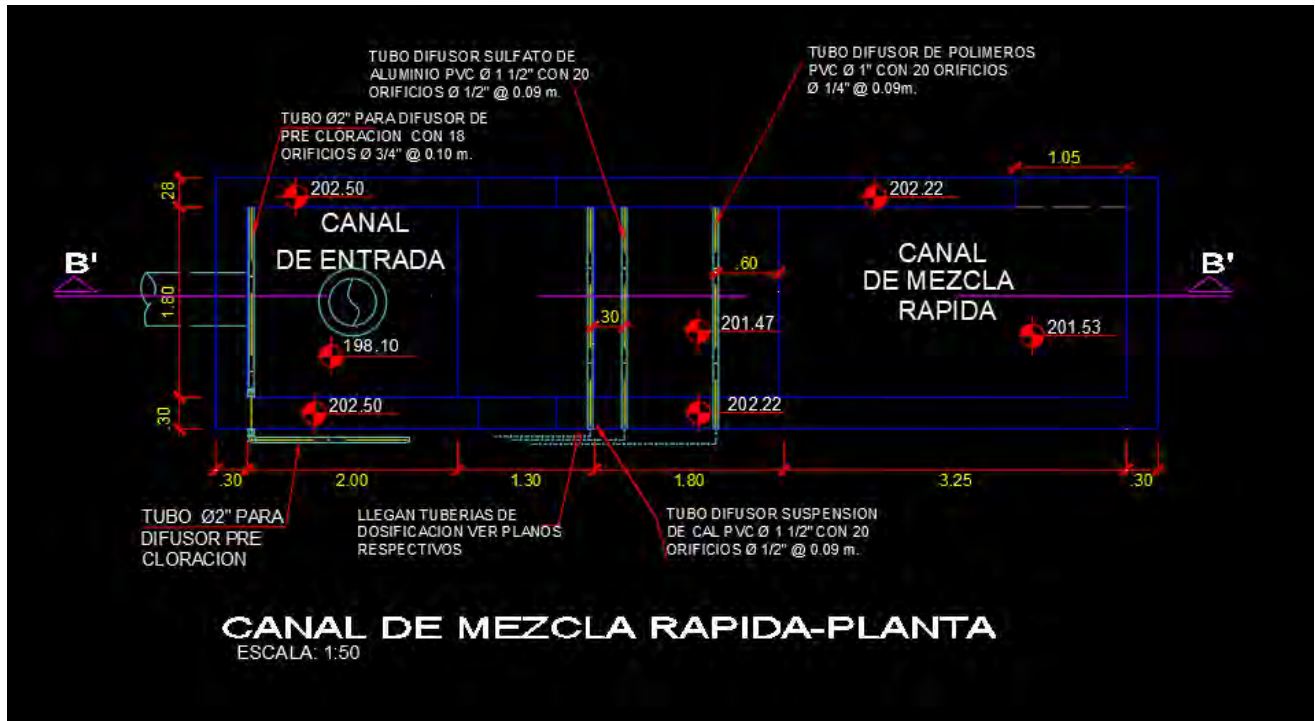
**Figura 53**

*Plano CAD de la geometría (Floculadores). (Vista en perfil)*



**Figura 54**

*Plano CAD de la geometría (canal de entrada y mezcla rápida). (Vista en planta)*

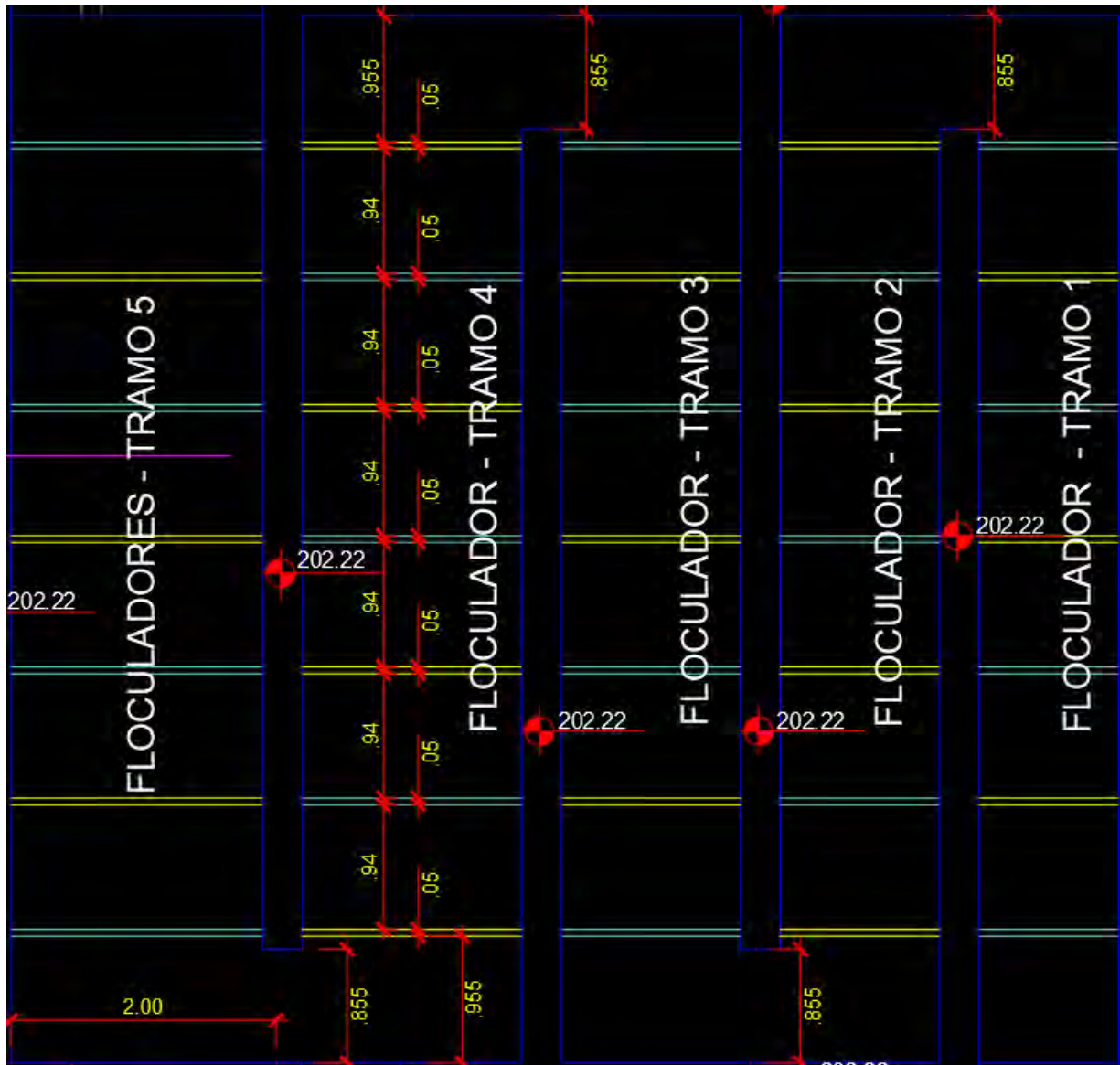


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la vista en planta del canal de entrada y mezcla rápida



**Figura 55**

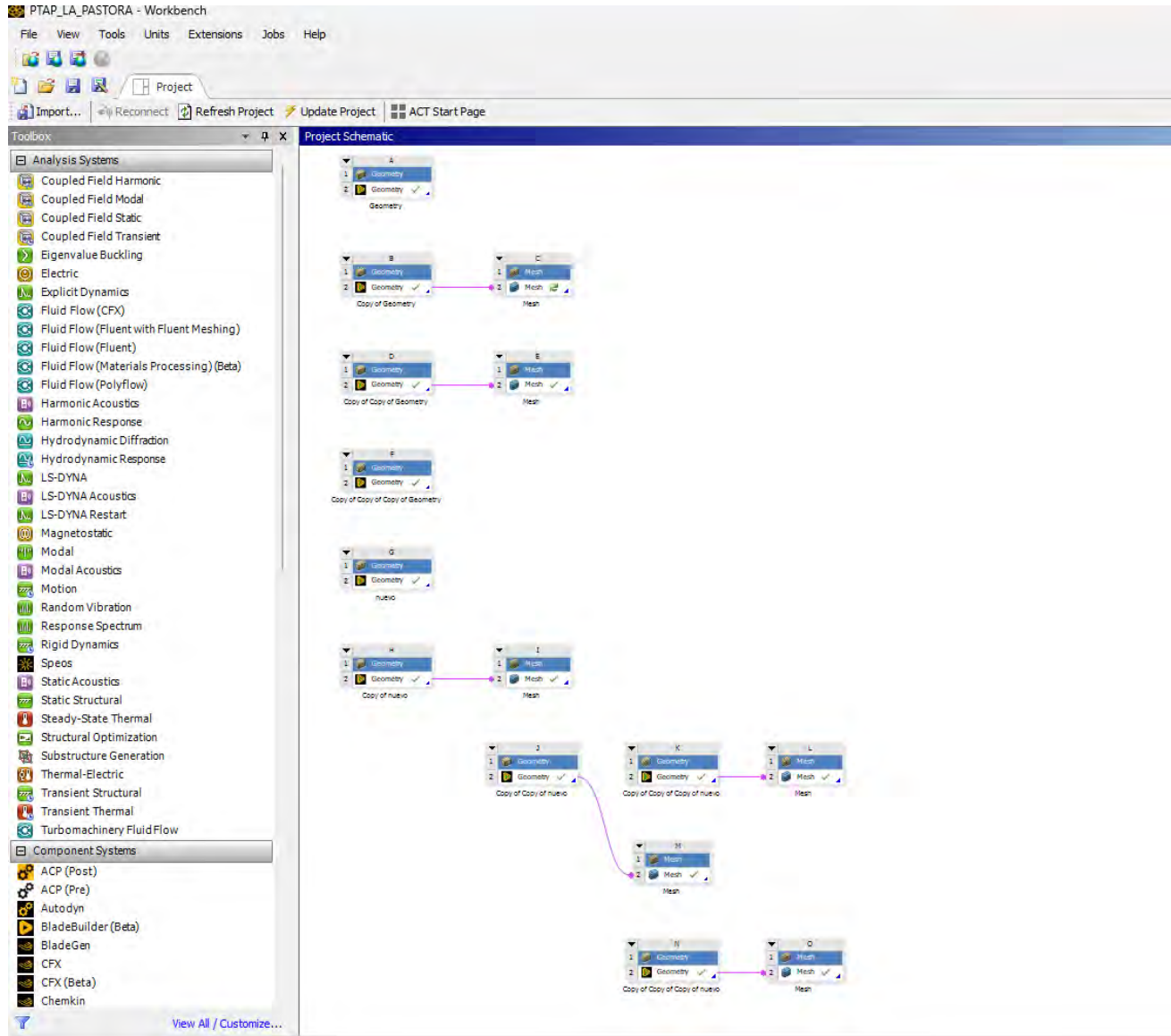
*Plano CAD de la geometría (canal de entrada y mezcla rápida). (Vista en planta)*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la vista en planta de los floculadores.

Durante el proceso de modelamiento se siguió un flujo de trabajo secuencial, consistente en la construcción progresiva de la geometría, verificación dimensional y ajuste geométrico, hasta obtener un modelo tridimensional compatible con los requerimientos del análisis CFD–FSI.

**Figura 56**  
*Estructura de trabajo en Ansys Design Modeler*



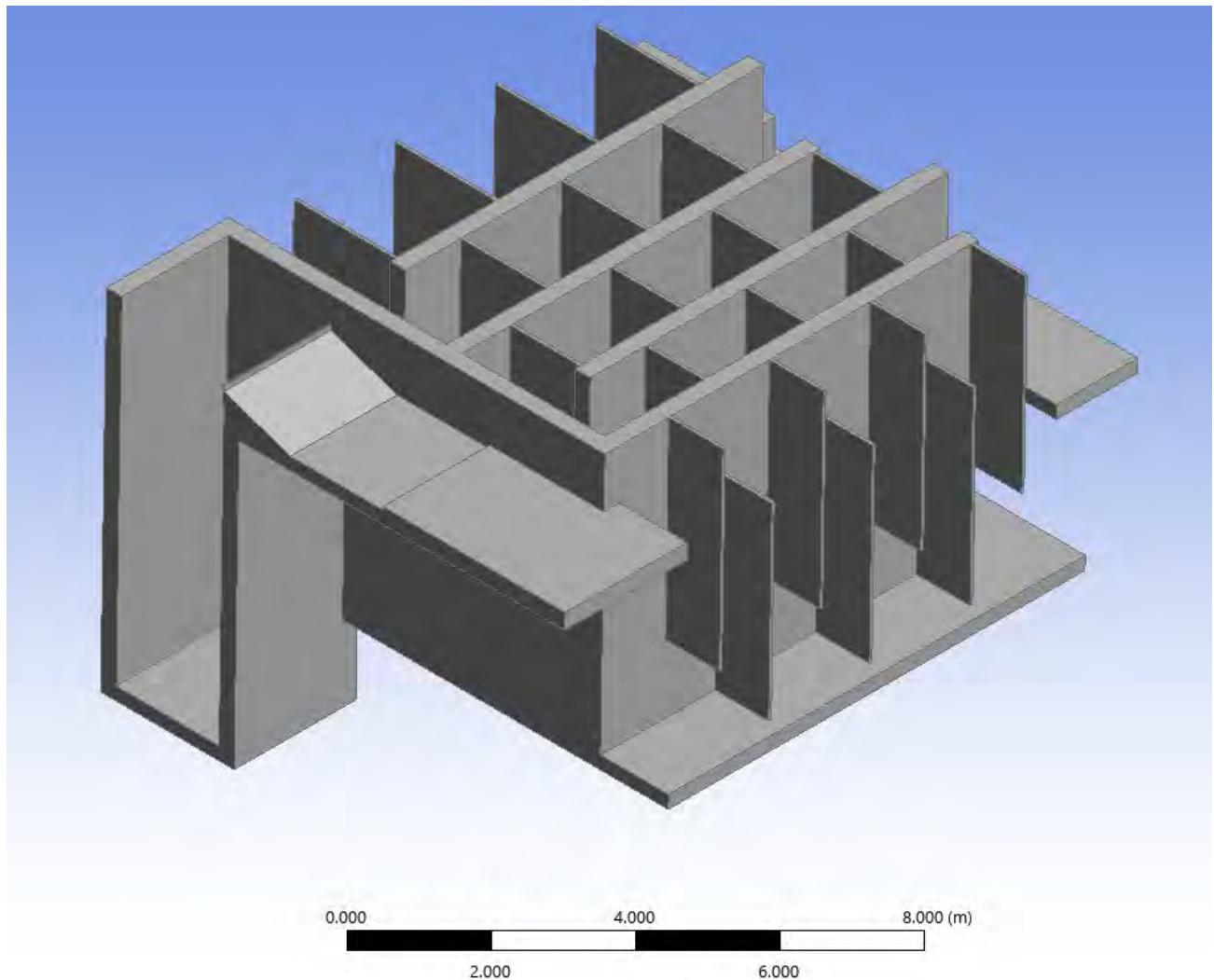
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente el flujo de trabajo en el software Ansys Design Modeler, que es por etapas y con prueba y error hasta llegar a la geometría final.

La elección de ANSYS DesignModeler se fundamenta en su capacidad de modelamiento geométrico preciso, así como en su compatibilidad con formatos de exportación estándar, particularmente el formato STL, utilizado para la posterior importación de la geometría en el software FLOW-3D.

Finalmente, se obtuvo el modelo tridimensional completo del sistema hidráulico–estructural, incluyendo el canal de regulación, la mezcla rápida y los floculadores, el cual constituye la base geométrica para la simulación numérica desarrollada en el presente estudio.

**Figura 57**

*Modelamiento del canal de regulación, mezcla rápida y floculadores*



*Nota:* En la figura se muestra la vista isométrica de la modelación geométrica 3D, donde se ve el canal de regulación, mezcla rápida, y floculadores, el detalle de modelamiento se puede ver en los anexos.

#### **5.1.2.2. Configuración de la simulación**

La simulación numérica se desarrolló en el software FLOW-3D, considerando un flujo incompresible, bajo el Sistema Internacional de Unidades (SI). El tiempo total de simulación fue de

170 s, valor suficiente para alcanzar un estado estadísticamente estable del flujo, sobre el cual se realizó el análisis hidráulico y estructural.

**Figura 58**

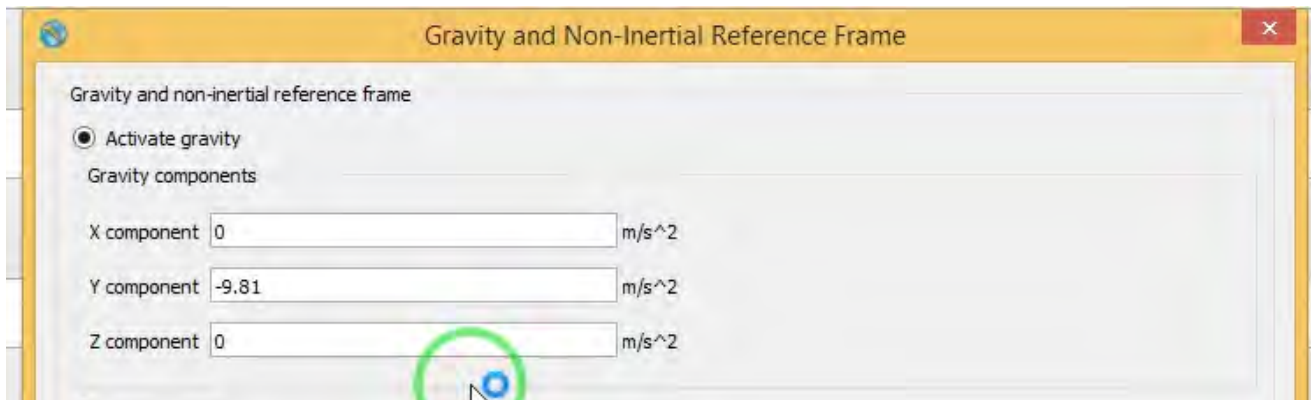
*Configuración del tiempo de simulación, el tipo de flujo y unidades*



*Nota:* Se adoptó un esquema de simulación transitorio, coherente con el método de resolución del software, analizándose posteriormente los resultados en el estado estadísticamente estable.

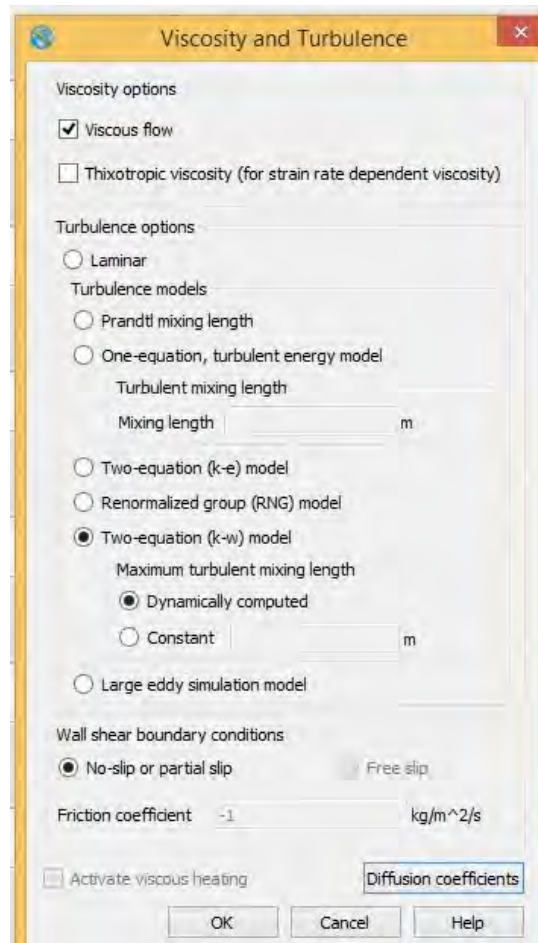
**Figura 59**

*Configuración de la gravedad*



*Nota:* La aceleración de la gravedad se definió con un valor de  $-9.81 \text{ m/s}^2$ , aplicada en la dirección vertical del dominio, de acuerdo con el sistema de referencia adoptado en el modelo.

**Figura 60**  
Configuración del modelo numérico a emplear



*Nota:* Para la representación de los efectos turbulentos se empleó un modelo de cierre RANS  $k-\omega$ , el cual resulta adecuado para flujos internos confinados y con interacción significativa con superficies sólidas, como es el caso del canal de mezcla rápida y los floculadores.

**Figura 61**  
Configuración de la temperatura del modelo numérico



*Nota:* Se consideró una temperatura constante de 26 °C, representativa de las condiciones promedio de la zona de estudio. El término de expansión térmica volumétrica se desactivó (valor de 0), dado que el análisis realizado no corresponde a un problema termo-mecánico, por lo que los efectos térmicos no influyen de manera significativa en los resultados hidráulicos ni estructurales.



**Figura 62**  
*Configuración de propiedades mecánicas*

FSI Deformable Component

☒ FSI Deformable Component

Solid Density ☐ Tabular 2400 kg/m<sup>3</sup>

Thermal Expansion Coefficient 1e-05 1/K

Bulk Modulus ☐ Tabular Pa

Shear Modulus ☐ Tabular 9.28e+09 Pa

Elastic (Young's) Modulus ☐ Tabular 2.134e+10 Pa

Poisson Ratio ☐ Tabular 0.15

Yield Stress ☐ Tabular -1 Pa

Fluid/Solid Coupling Partial

FSI Coupling to :

FE Mesh File File Options

FE mesh type Hexahedron

FE mesh file usage Generate FE mesh

*Nota:* Para el análisis de interacción fluido–estructura se definieron las propiedades mecánicas del concreto  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ , tomando como referencia el expediente técnico del sistema y la normativa vigente.

#### **Justificación de los valores asumidos:**

**Densidad del concreto:** Según el ACI-318 el concreto tiene densidades típicas en el rango de 2300 a 2500 2400 kg/m<sup>3</sup>. El valor 2400 kg/m<sup>3</sup> es representativo y ampliamente aceptado para concreto convencional usado en obras civiles e hidráulicas.

**Coefficiente de expansión térmica:** Valor adoptado:  $\alpha=1 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ . El coeficiente de expansión térmica del concreto normal se encuentra usualmente entre  $8 \times 10^{-6}$  y  $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . El valor adoptado representa un valor promedio, cuya influencia en el presente estudio es secundaria, dado que el análisis no es termo–mecánico dominante.

#### **Módulo de corte del concreto (sustento según RNE E.060 – acápite 8.5.4)**

De acuerdo con la Norma Técnica Peruana RNE E.060 – Concreto Armado, en el acápite 8.5.4, se establece que el módulo de rigidez al esfuerzo cortante del concreto puede suponerse igual a:

$$G = \frac{E_c}{2.30}$$

Donde  $E_c$  es el módulo de elasticidad del concreto.

### **Módulo de elasticidad (Young)**

Valor adoptado:  $E=2.134 \times 10^{10}$  Pa

De acuerdo con la NTP E.60 (Anexo II 8-3), el módulo de elasticidad del concreto normal puede estimarse mediante la expresión:

$$E_c = 15000 * \sqrt{f'c} \text{ (} f'c \text{ en kg/cm}^2 \text{)}$$

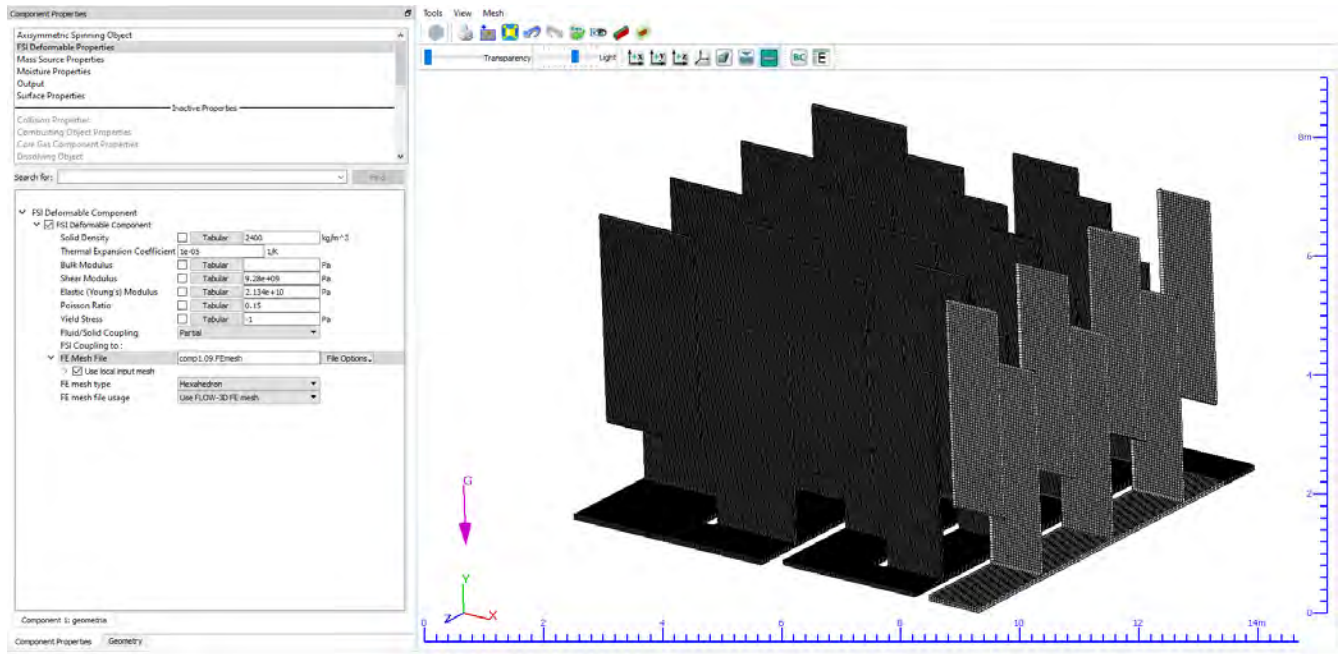
### **Coefficiente de Poisson**

Valor adoptado:

$$\nu=0.15$$

El coeficiente de Poisson del concreto en el rango elástico suele variar entre 0.15 y 0.20. Se adopta el valor que indica la norma E60 (8.5.4) de forma implícita al definir el módulo de Elasticidad y el módulo de corte:  $G = \frac{E_c}{2.3}$  y como se tiene el  $E_c$  y se sabe también por teoría que:  $G = \frac{E_c}{2*(1+\nu)}$  se determina el coeficiente empleado

**Figura 63**  
*Mallado FSI*



*Nota:* El mallado del sólido estructural se definió 2 veces más fino que el mallado del dominio fluido, con el objetivo de capturar adecuadamente los gradientes de esfuerzo en la placa de floculación. Este refinamiento no incrementa de forma significativa el costo computacional, dado que el análisis estructural presenta una menor carga numérica en comparación con el dominio CFD.

El dominio computacional fue discretizado mediante un mallado estructurado por bloques, adaptado a la geometría y a las características hidráulicas del sistema, con el objetivo de optimizar la resolución numérica en las zonas de mayor gradiente de velocidad y presión, sin incrementar innecesariamente el costo computacional.

El mallado se definió de forma progresiva desde la cámara de impulsión, pasando por el canal de mezcla rápida, las etapas de floculación y el canal de distribución, empleando refinamiento local en las zonas de mayor interés hidráulico y estructural.

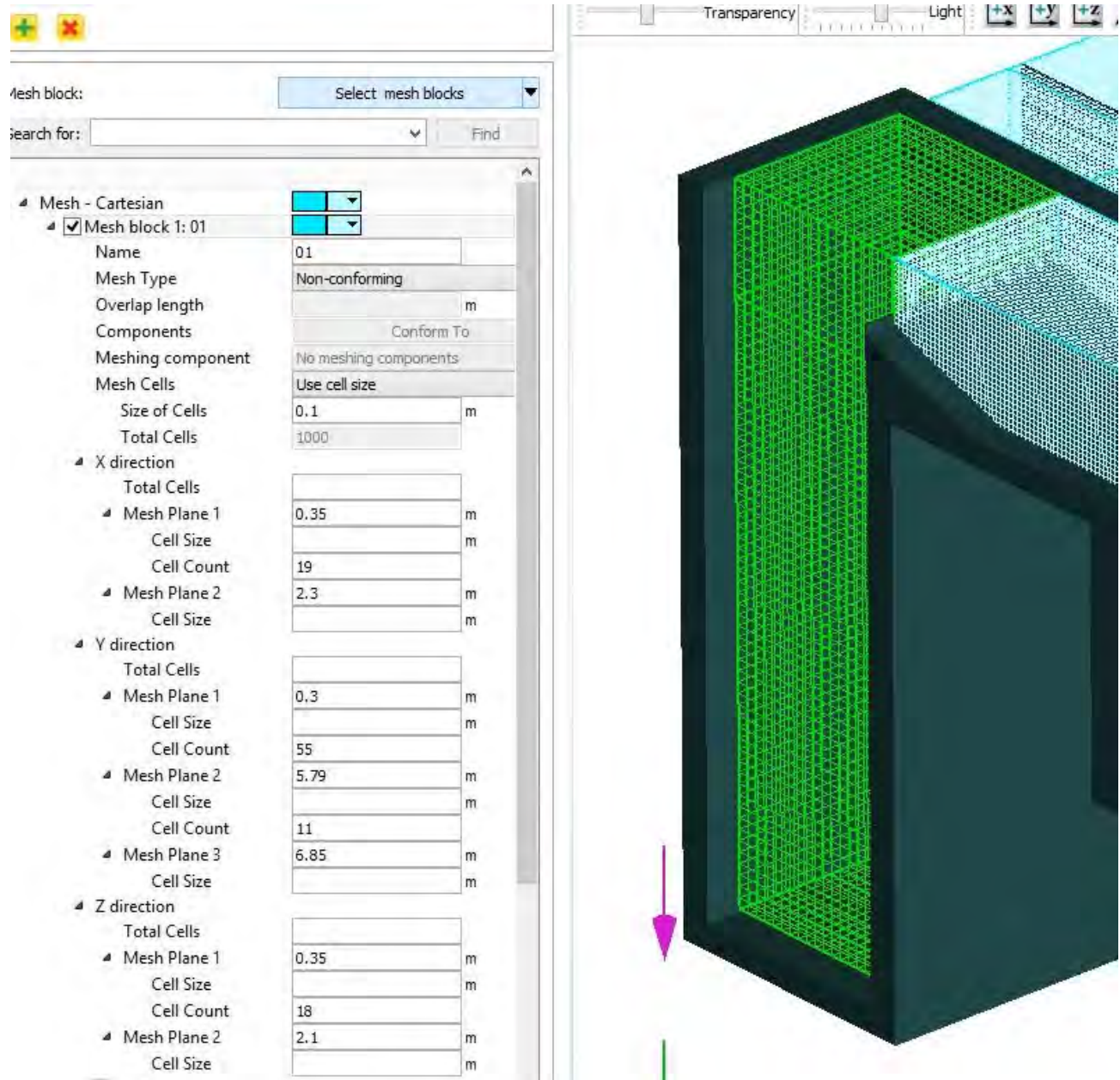
### **Criterio de refinamiento del mallado**

En la zona de mezcla rápida, se empleó un mallado más fino, con un tamaño de celda del orden de 2 cm, debido a la presencia de elevados gradientes de velocidad y a la generación de estructuras turbulentas asociadas al proceso de mezcla.



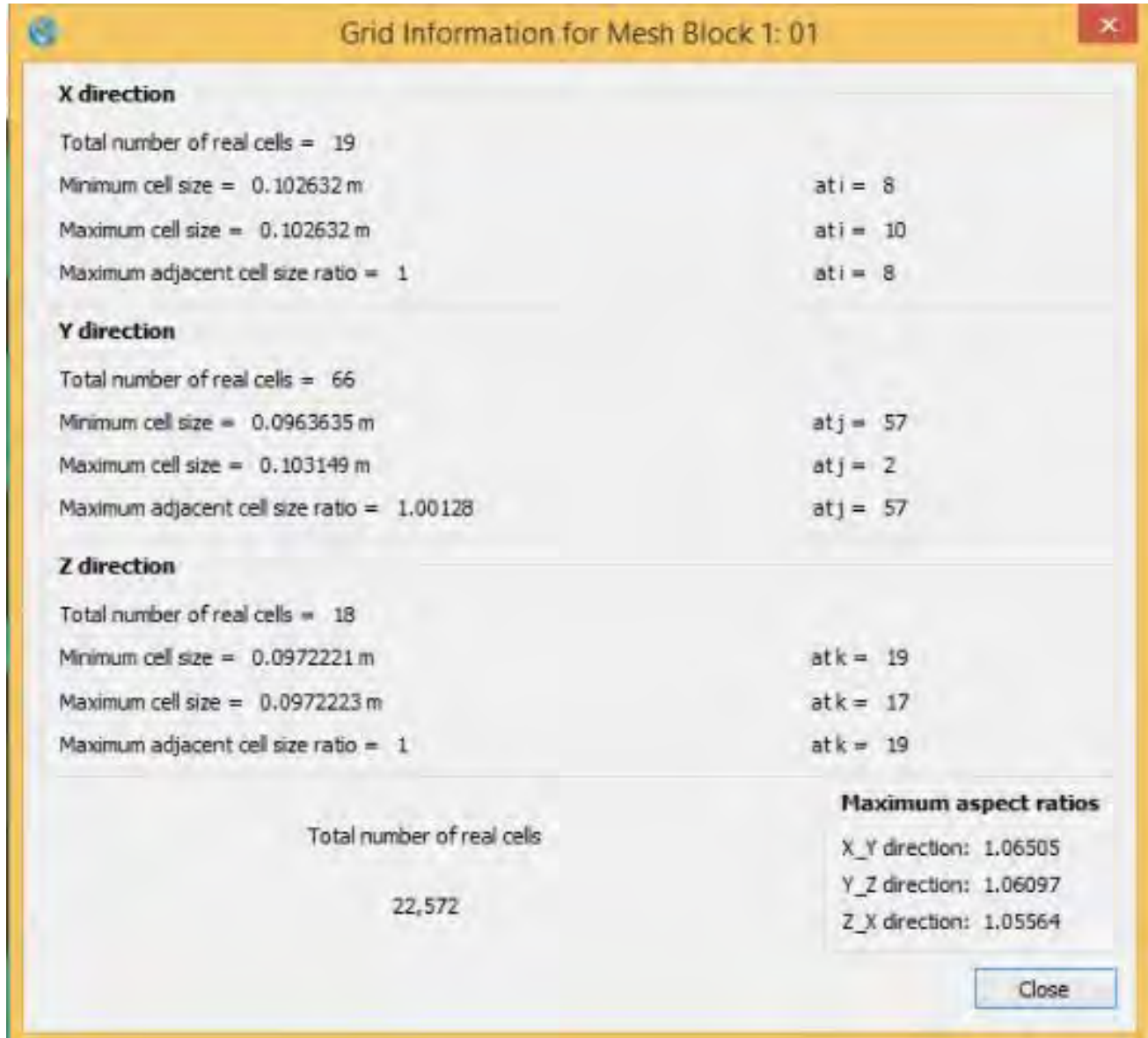
En las zonas de flujo más estable, como las cámaras de floculación, se utilizó un mallado progresivamente más grueso, manteniendo una adecuada resolución del campo de velocidades, pero reduciendo el número total de celdas del dominio.

En el análisis de interacción fluido–estructura, el mallado del sólido estructural fue definido con una resolución superior a la del dominio fluido, permitiendo una correcta captura de los gradientes de esfuerzo sin afectar significativamente el tiempo de cómputo, dado que el costo computacional del análisis estructural es menor en comparación con el CFD.

**Figura 64***Malla 1: Cámara de impulsión*

*Nota:* La malla del dominio fluido se definió por bloques, iniciando en la cámara de impulsión, garantizando una adecuada resolución del campo de velocidades y presiones en las zonas de interés hidráulico.

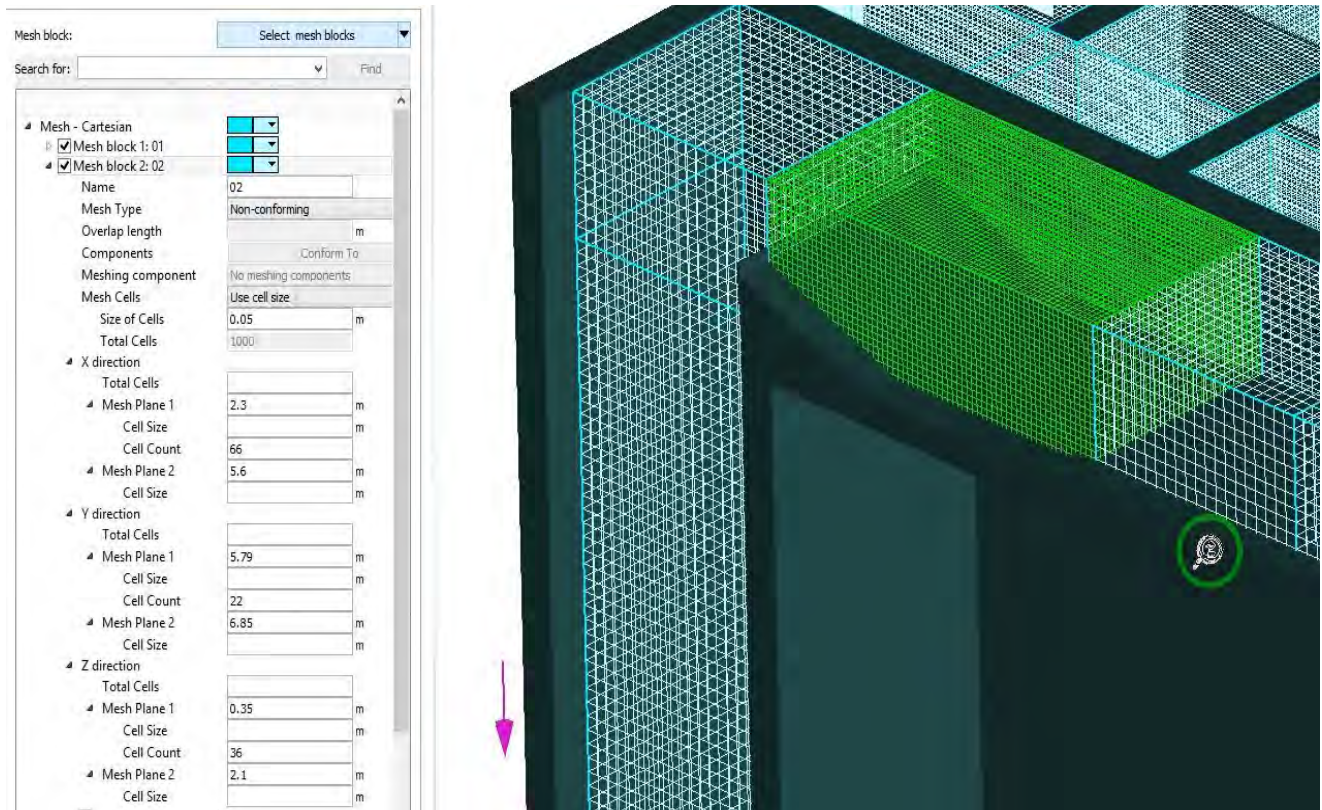
**Figura 65**  
*Información de la malla 1*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del primer bloque que corresponde a la cámara de impulsión.

**Figura 66**

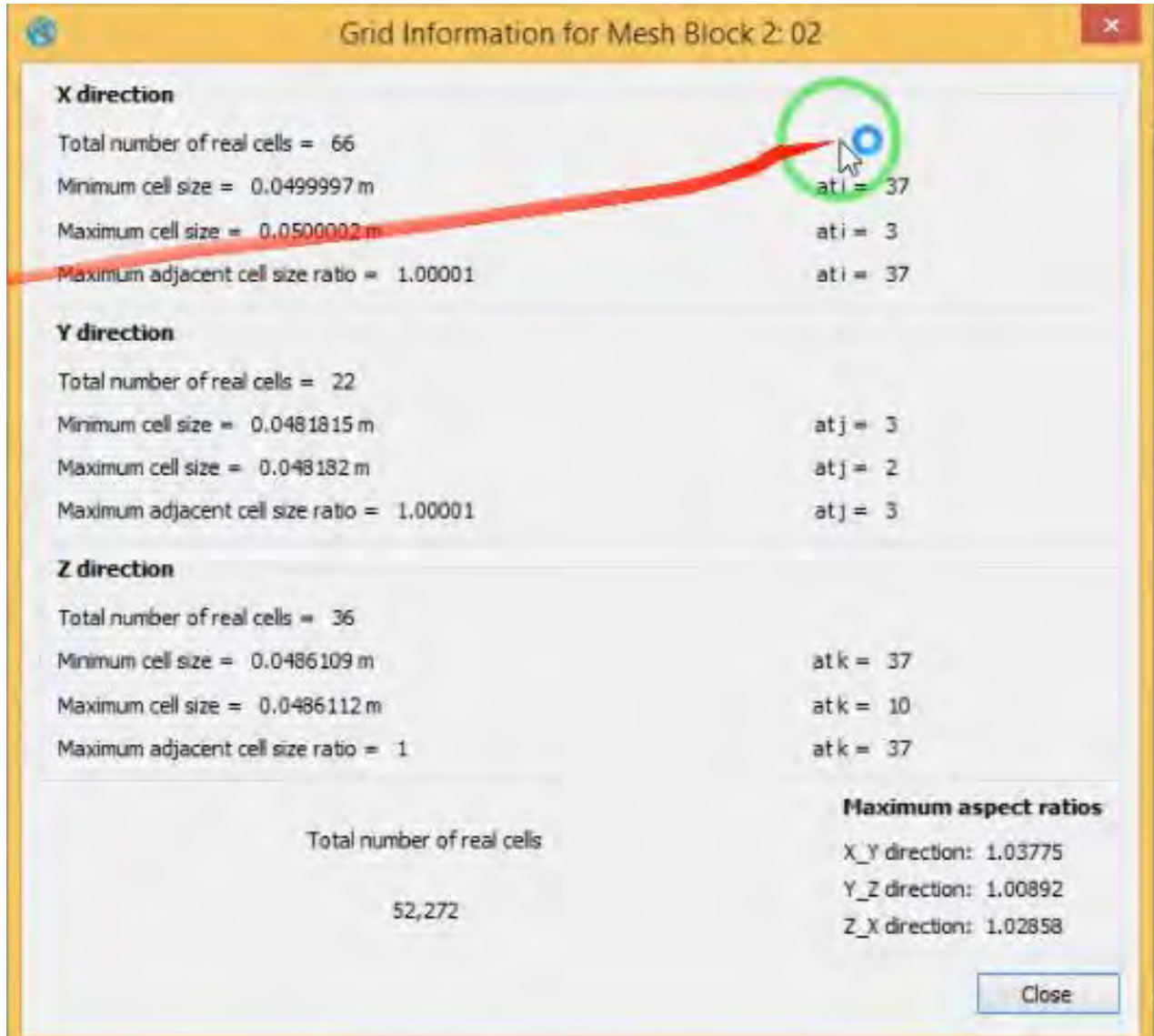
*Malla 2: Canal de mezcla rápida (zona más detallada)*



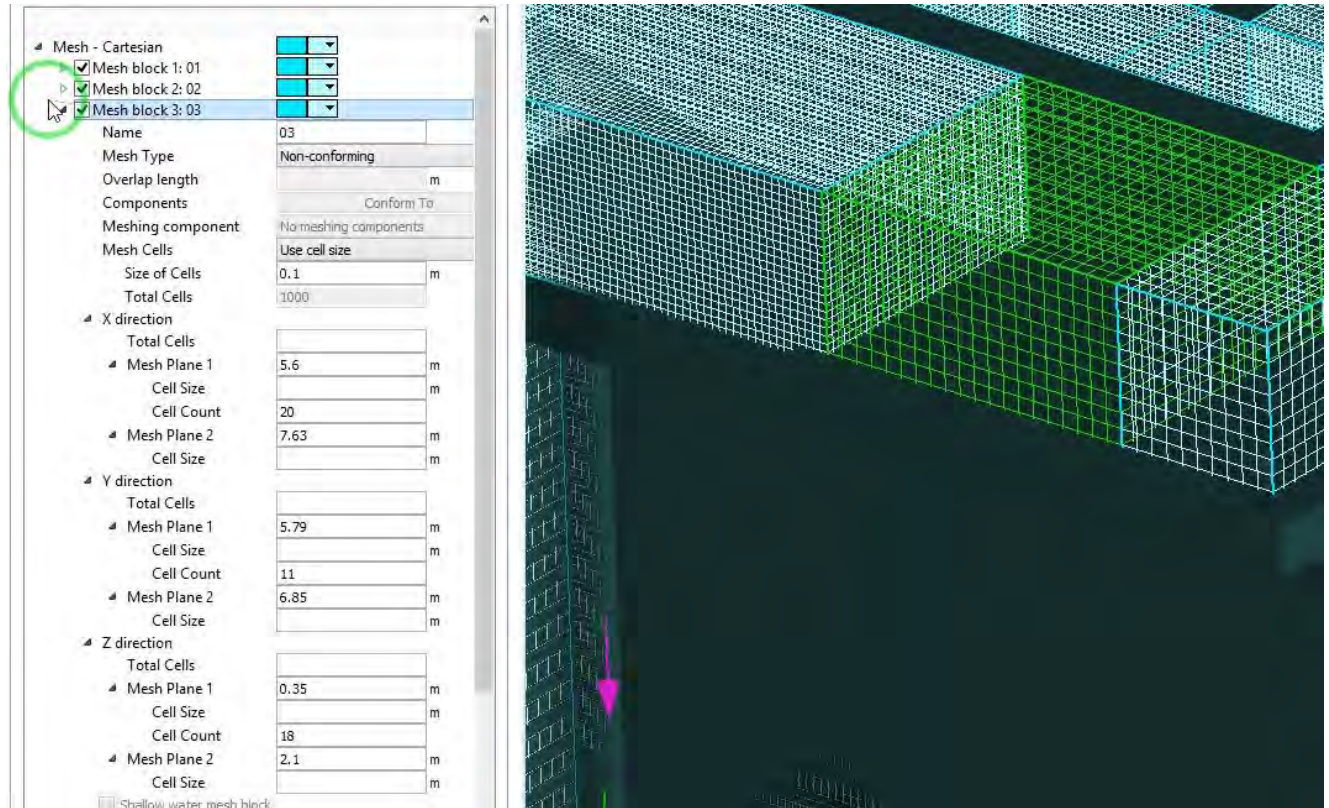
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del primer bloque que corresponde al canal de mezcla rápida, el cual es más detallado, con una malla de 2cm, para ver mejor el efecto de mezcla rápida.



**Figura 67**  
*Información de la malla 2*

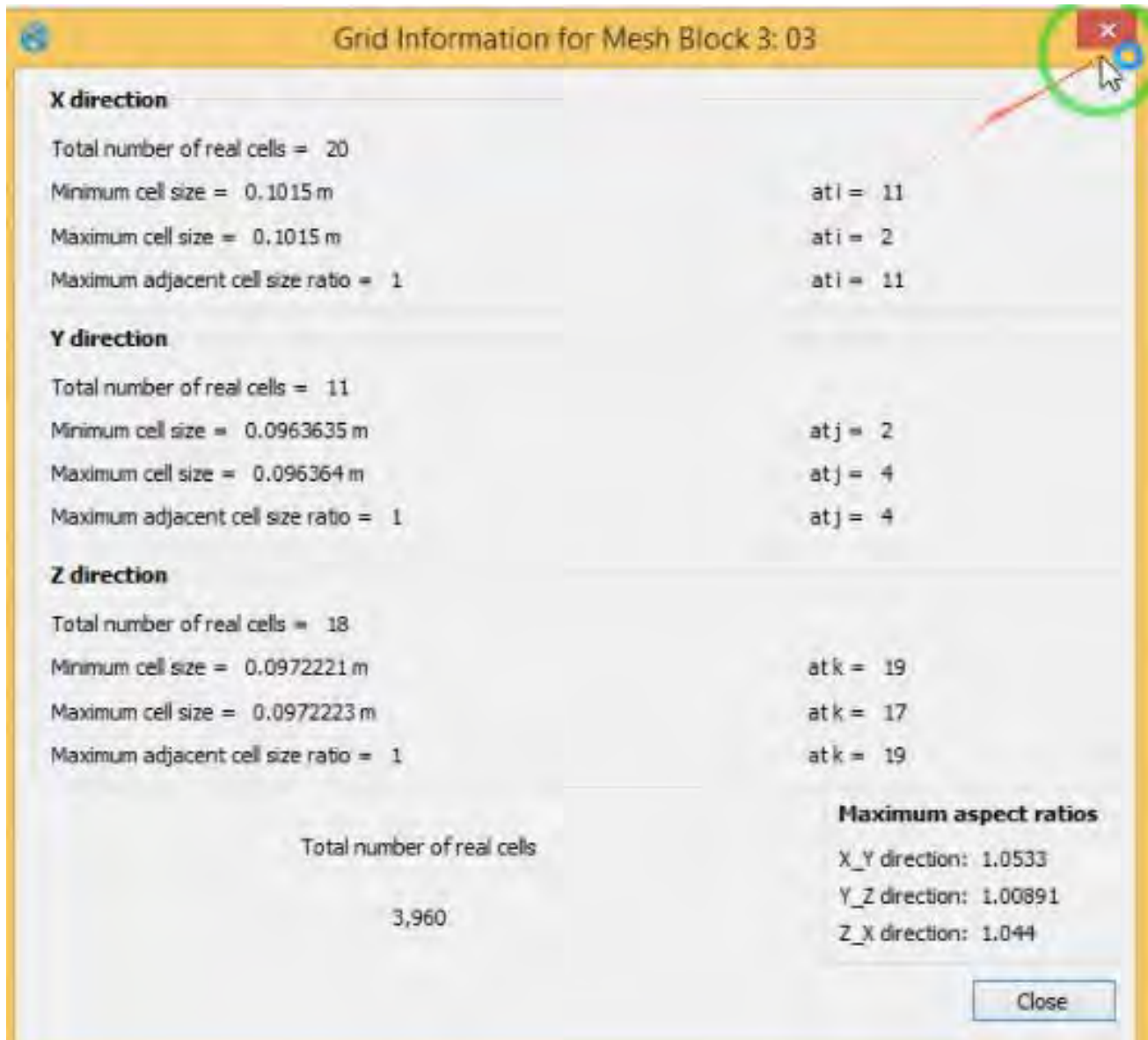


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del segundo bloque que corresponde al canal de mezcla rápida.

**Figura 68***Malla 3: Zona estable canal de mezcla rápida*

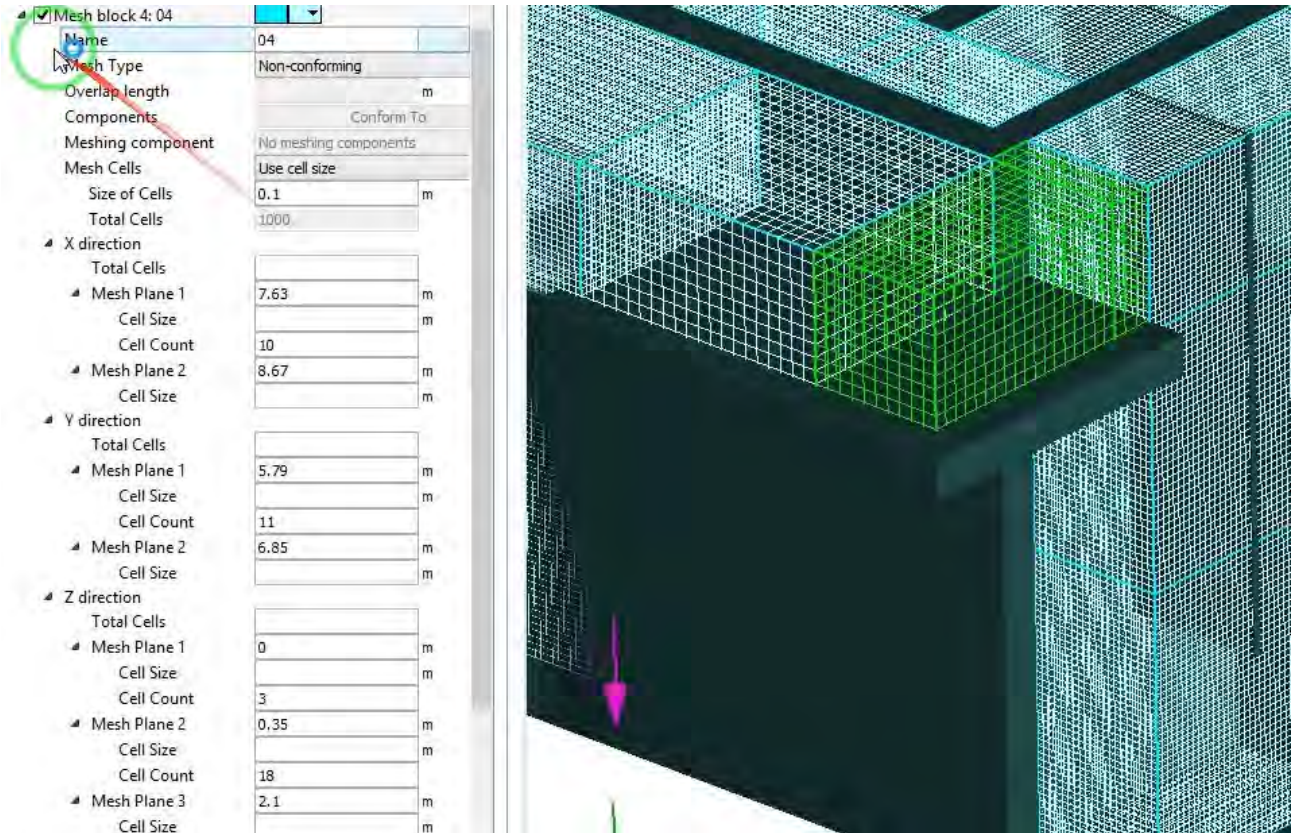
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del tercer bloque que corresponde a la zona estable del canal de mezcla rápida.

**Figura 69**  
*Información de la malla 3*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del tercer bloque que corresponde a la zona estable del canal de mezcla rápida.

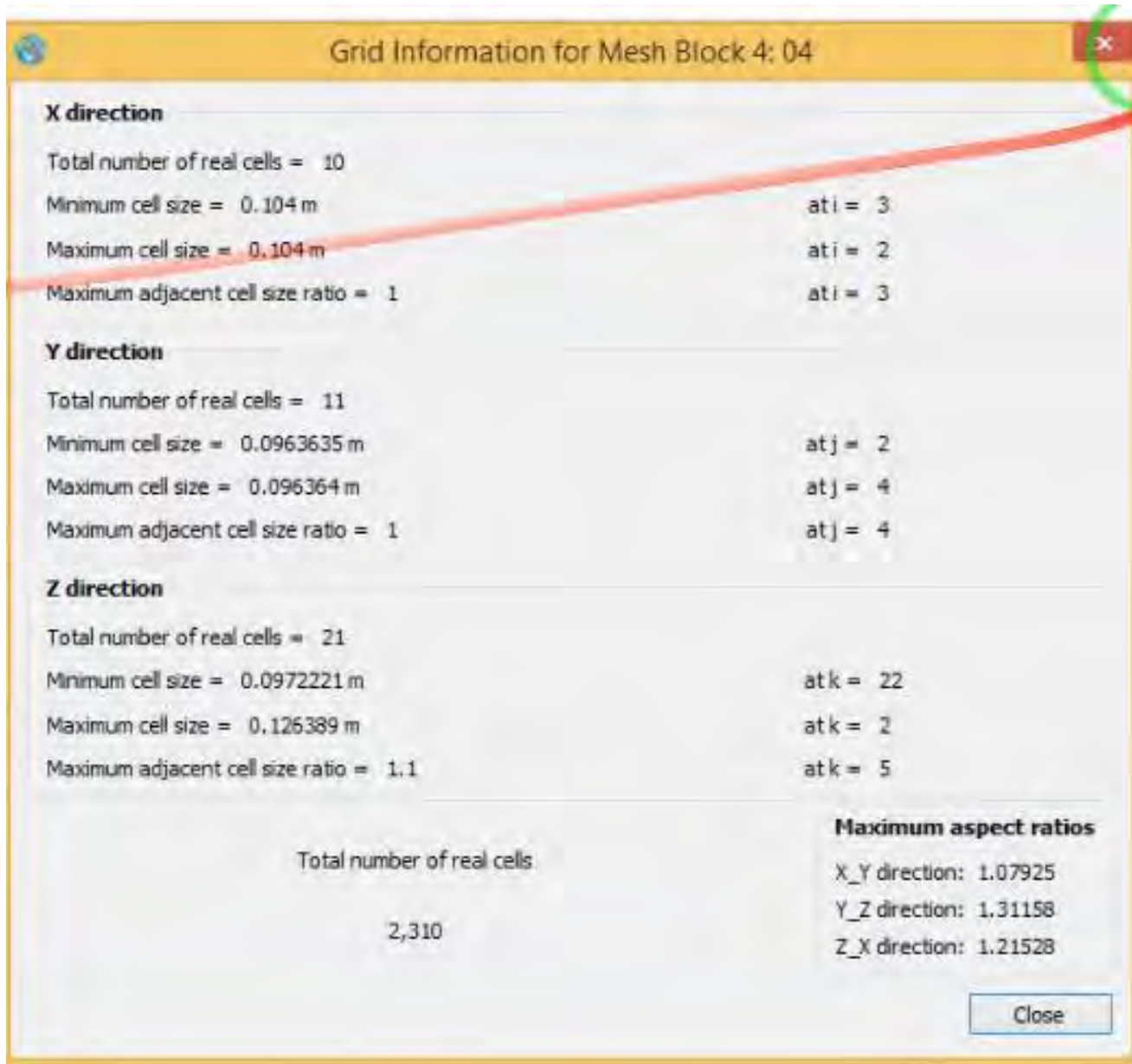


**Figura 70***Malla 4: Entrada a los floculadores*

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del cuarto bloque que corresponde a la entrada a los floculadores.

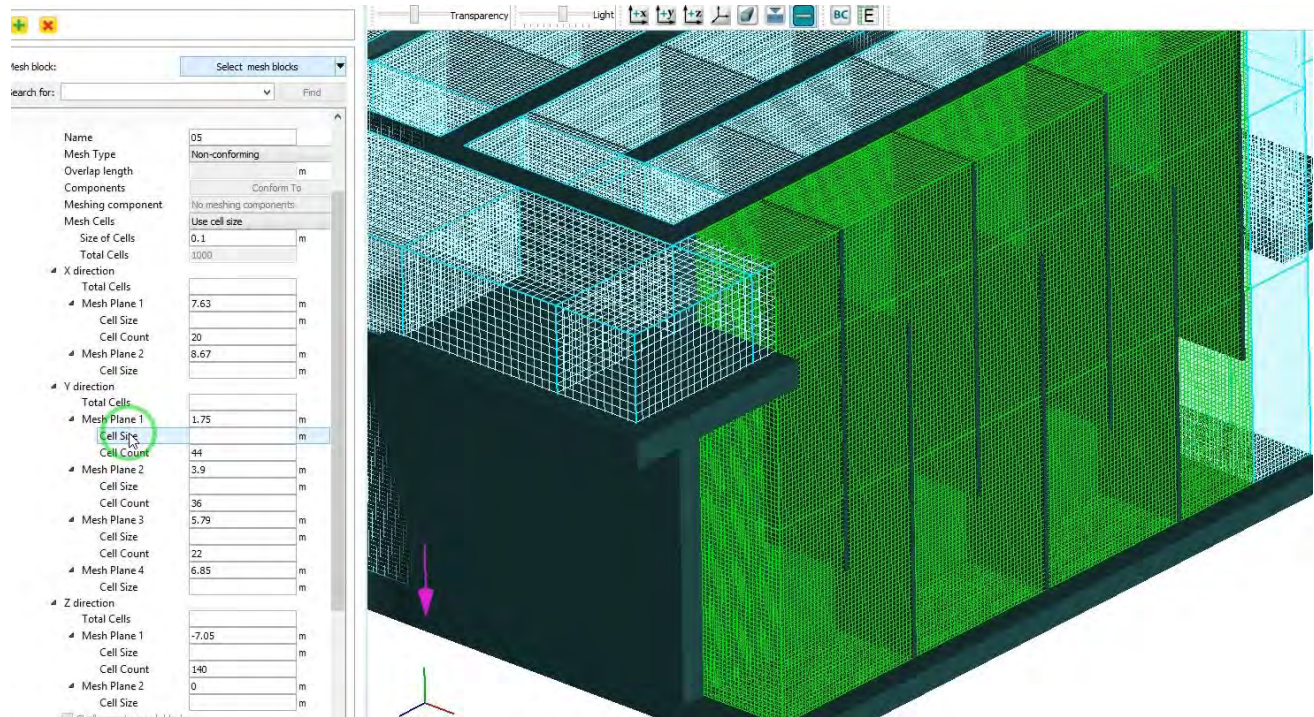


**Figura 71**  
*Información de la malla 4*



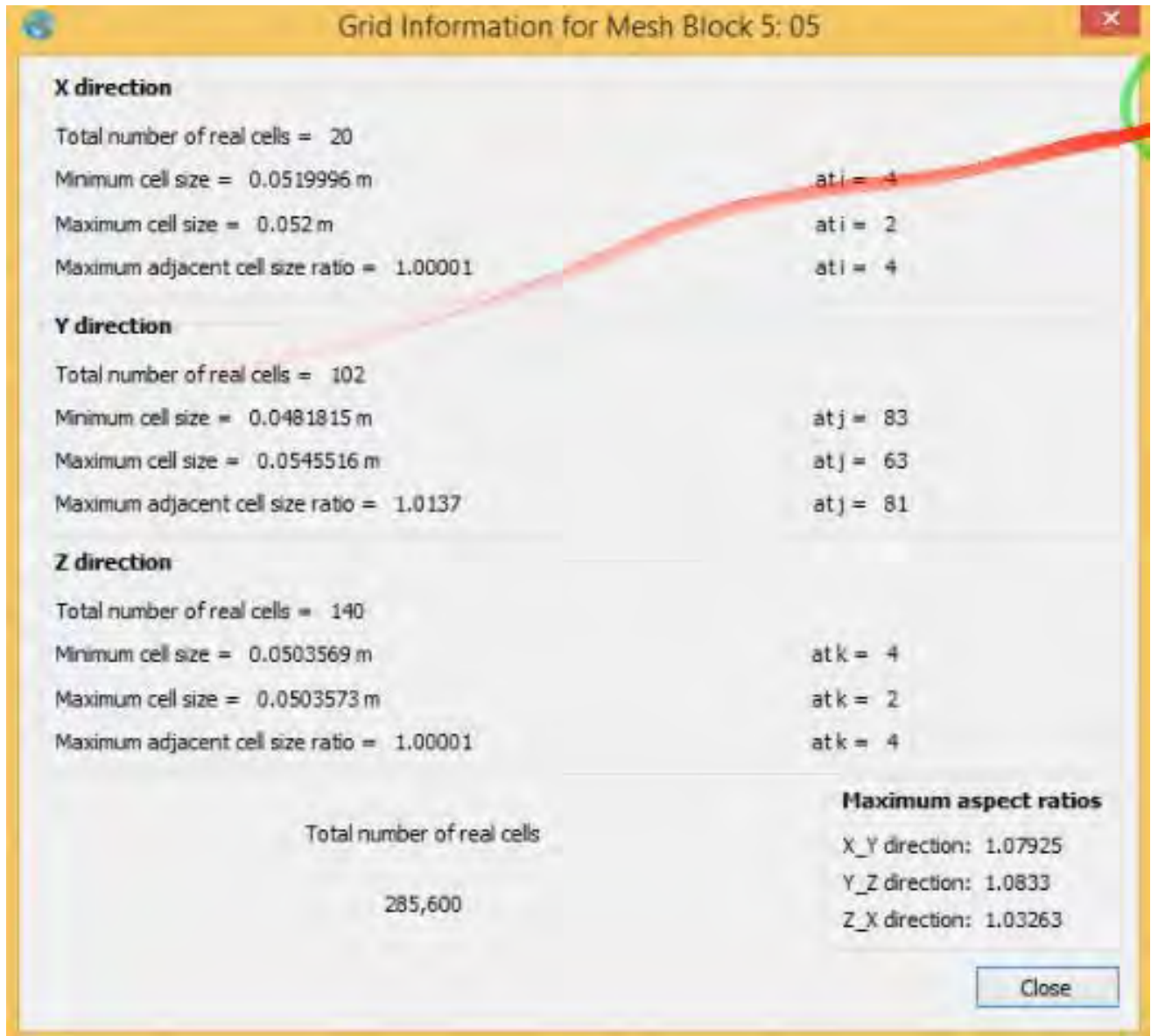
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del cuarto bloque que corresponde a la entrada a los floculadores.

**Figura 72**  
*Malla 5: Primera cámara de floculación*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del quinto bloque que corresponde a la primera cámara de floculación.

**Figura 73**  
*Información de la malla 5*

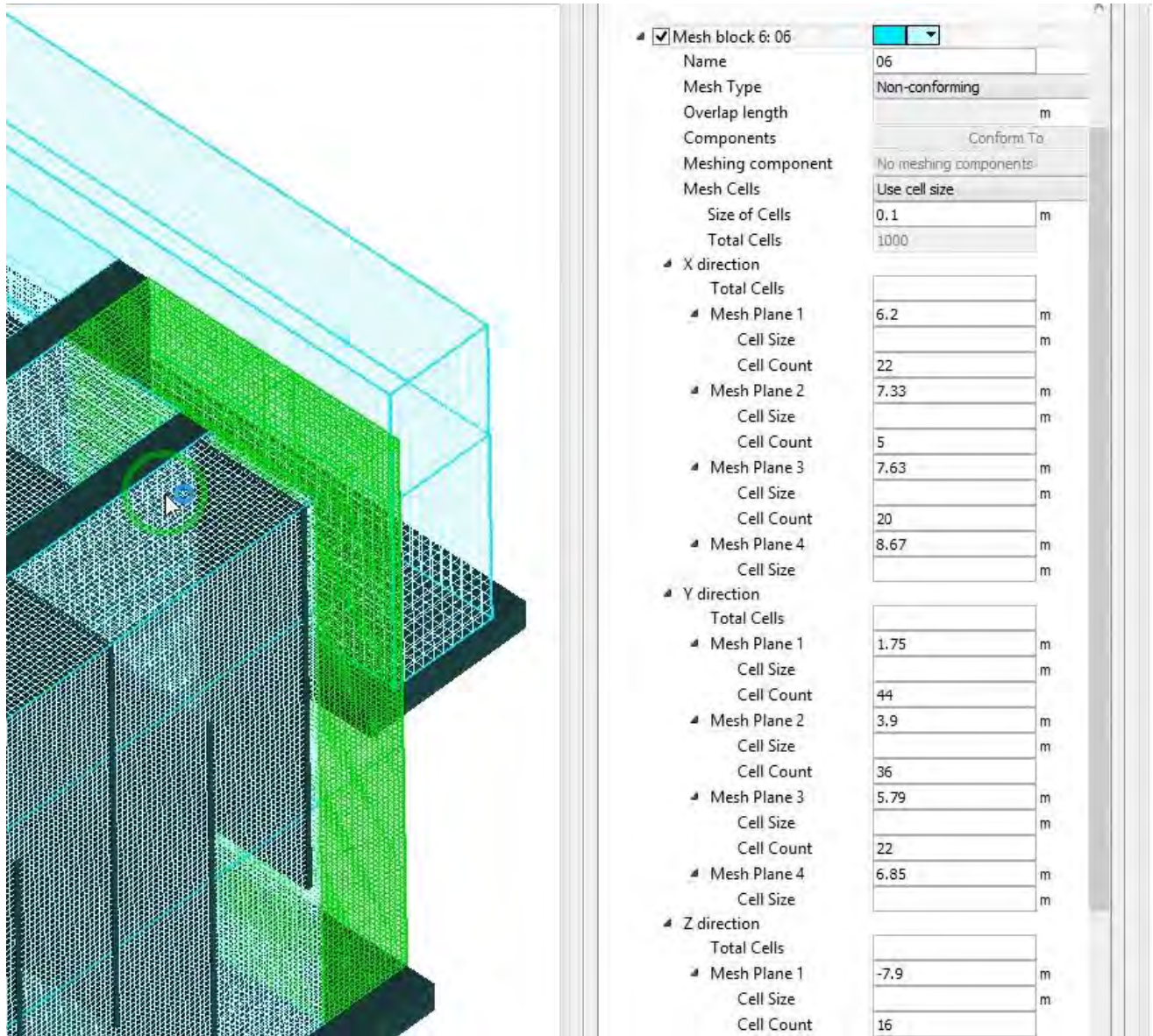


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del quinto bloque que corresponde a la primera cámara de floculación.



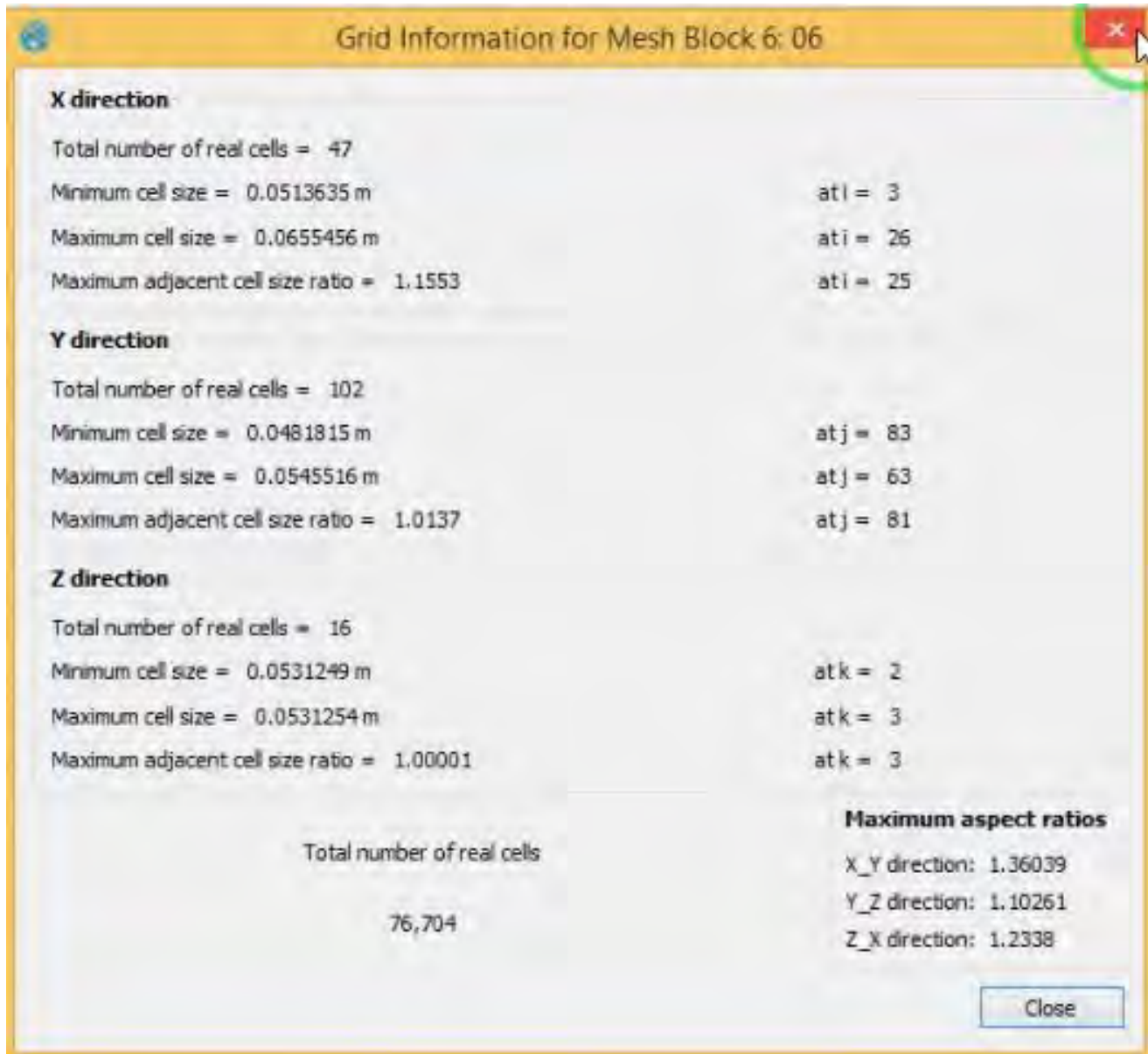
**Figura 74**

*Malla 6: Transición a la 2da etapa de floculación*



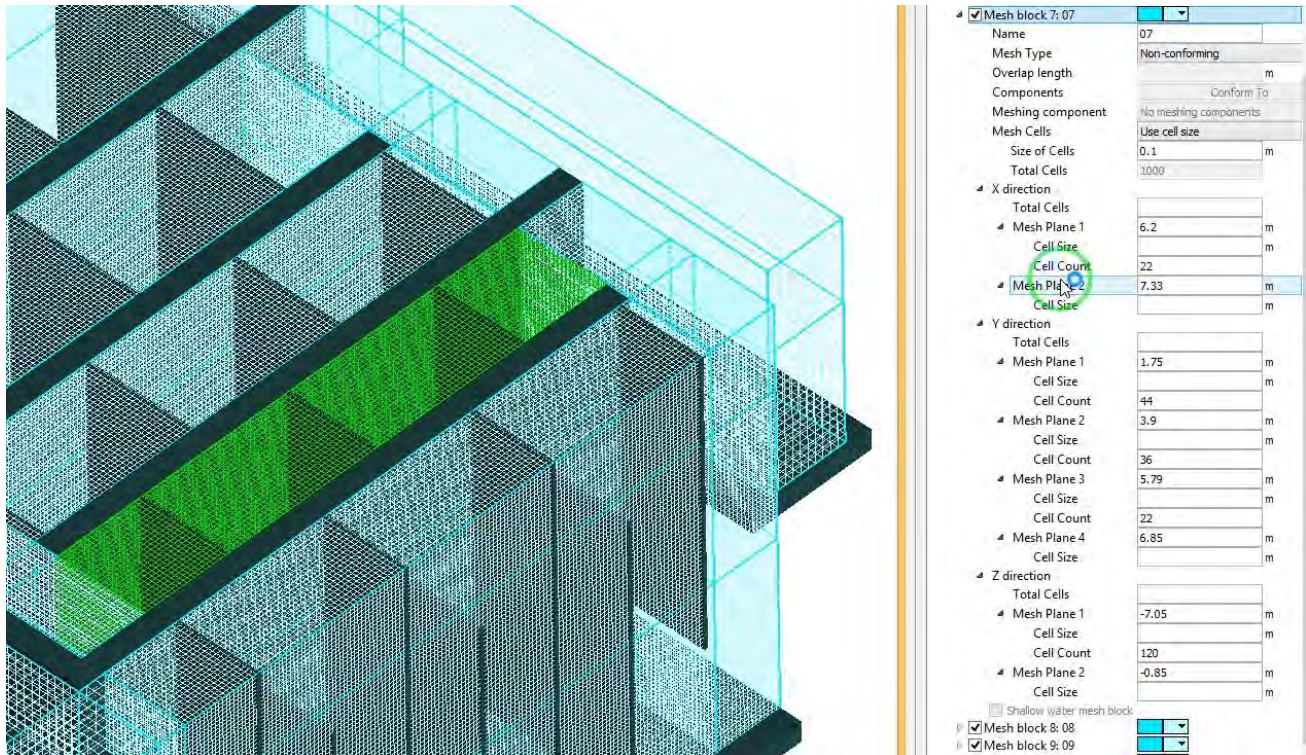
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del sexto bloque que corresponde a la transición a la segunda cámara de floculación.

**Figura 75**  
*Información de la malla 6*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del sexto bloque que corresponde a la transición a la segunda cámara de floculación.



**Figura 76***Malla 07: Segunda cámara de floculación*

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del séptimo bloque que corresponde a la segunda cámara de floculación.

**Figura 77**  
*Información de la malla 07*

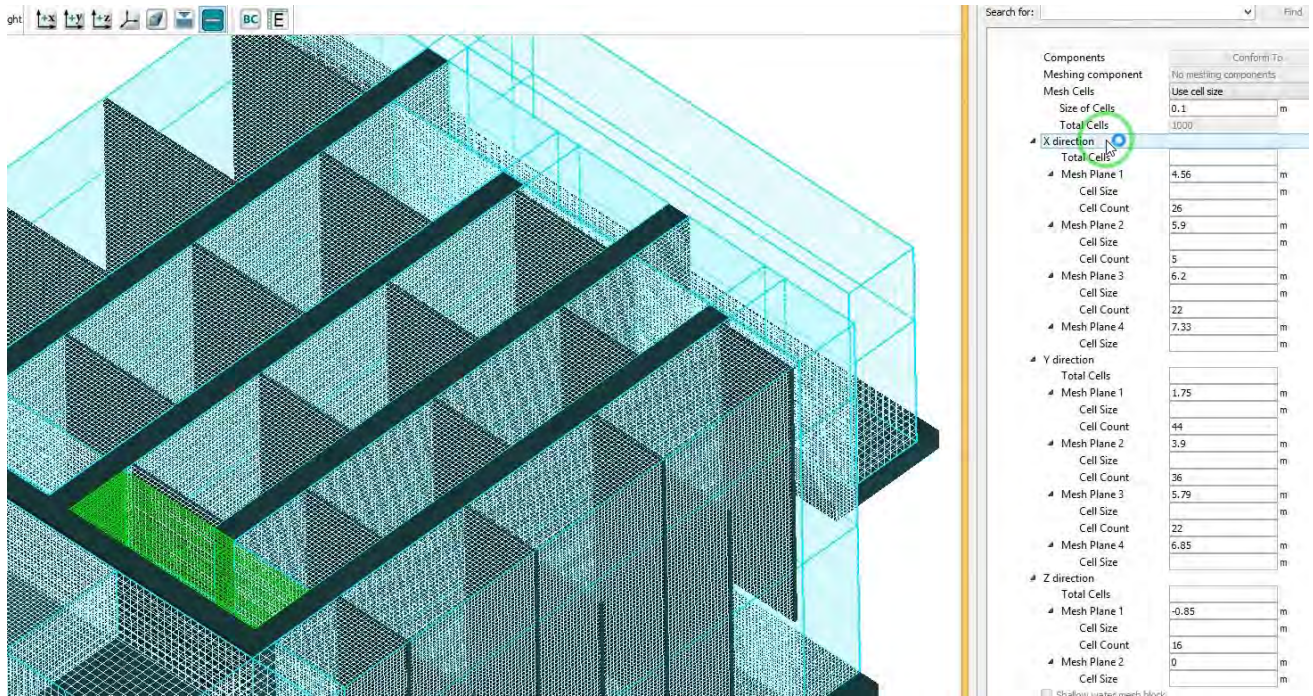


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del séptimo bloque que corresponde a la segunda cámara de floculación.



**Figura 78**

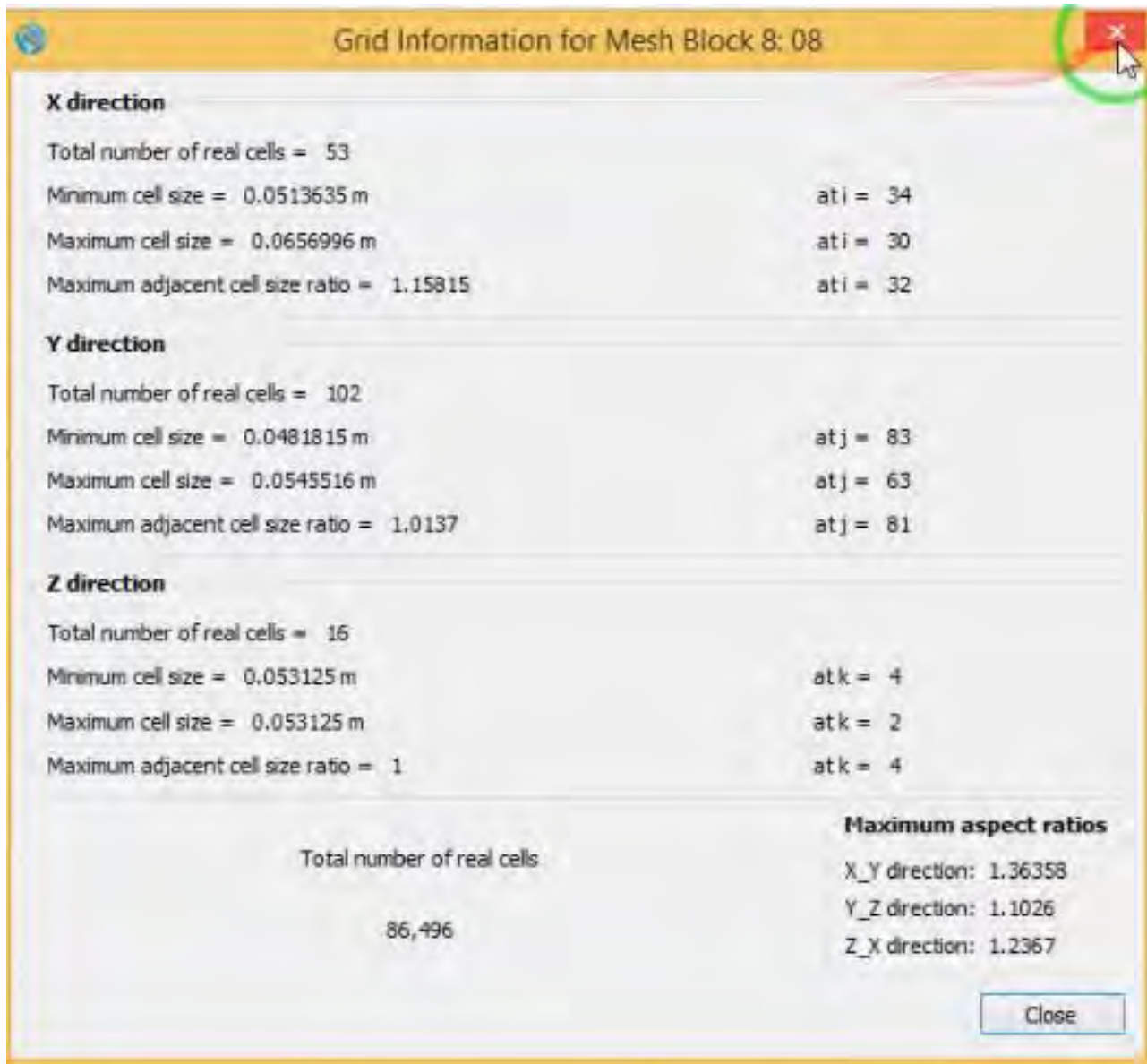
*Malla 8: Transición a la 3ra etapa de floculación*



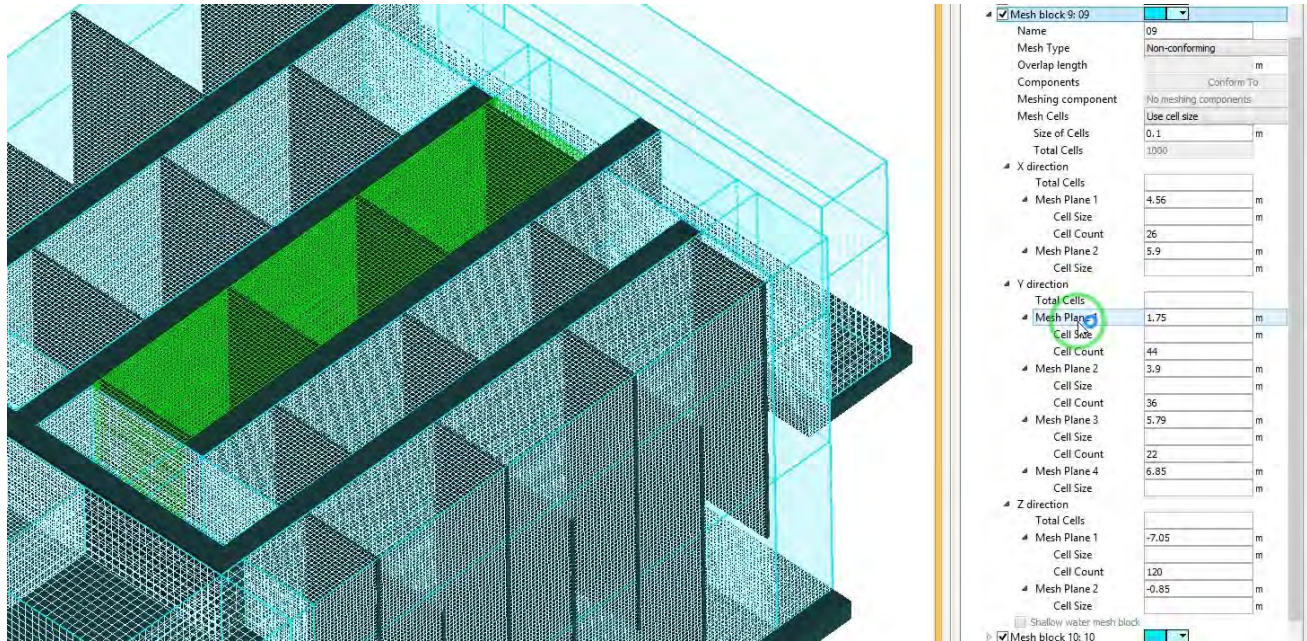
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del octavo bloque que corresponde a la transición a la tercera cámara de floculación.



**Figura 79**  
*Información de la malla 08*

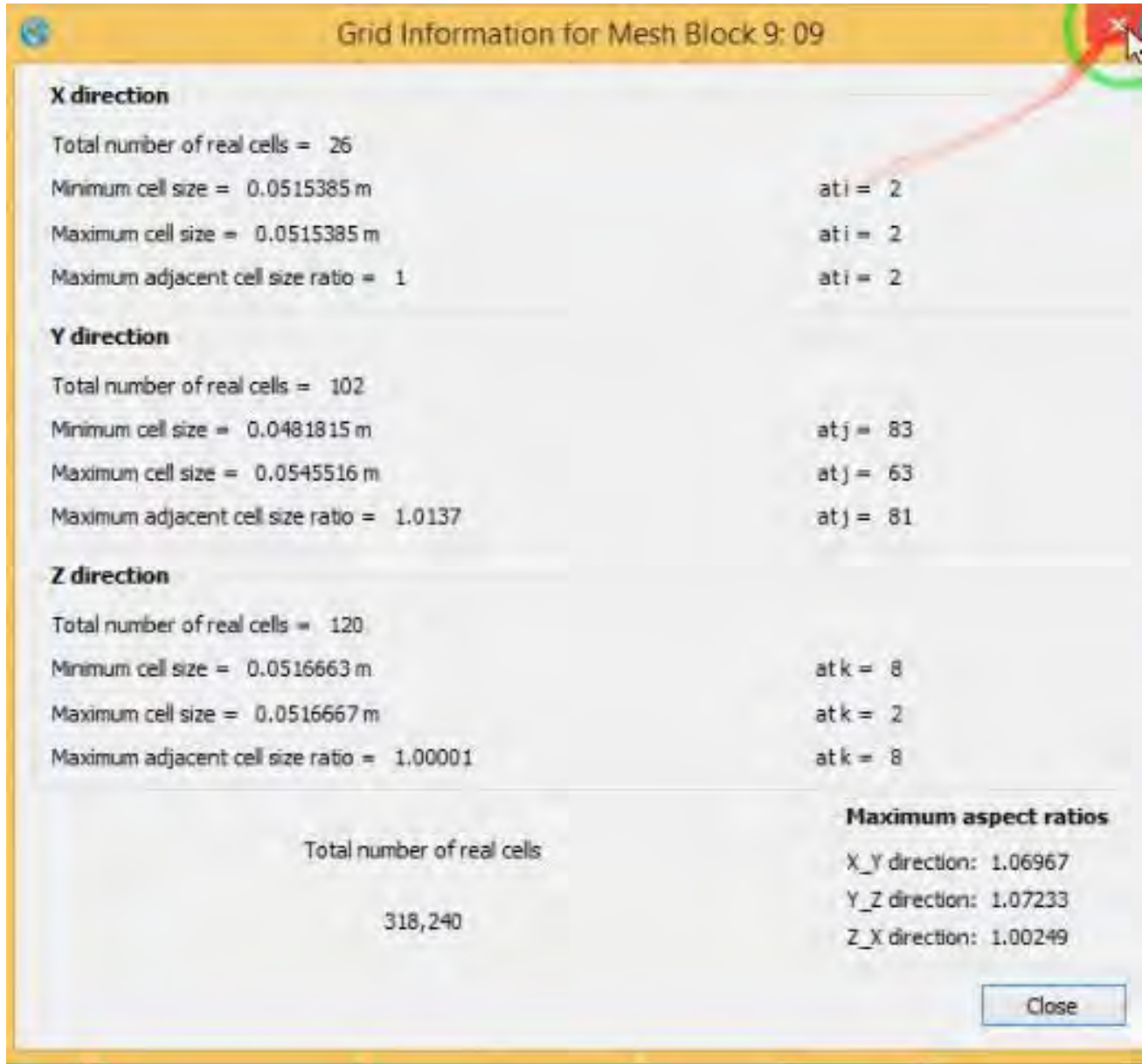


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del octavo bloque que corresponde a la transición a la tercera cámara de floculación.

**Figura 80***Malla 09: Tercera cámara de floculación*

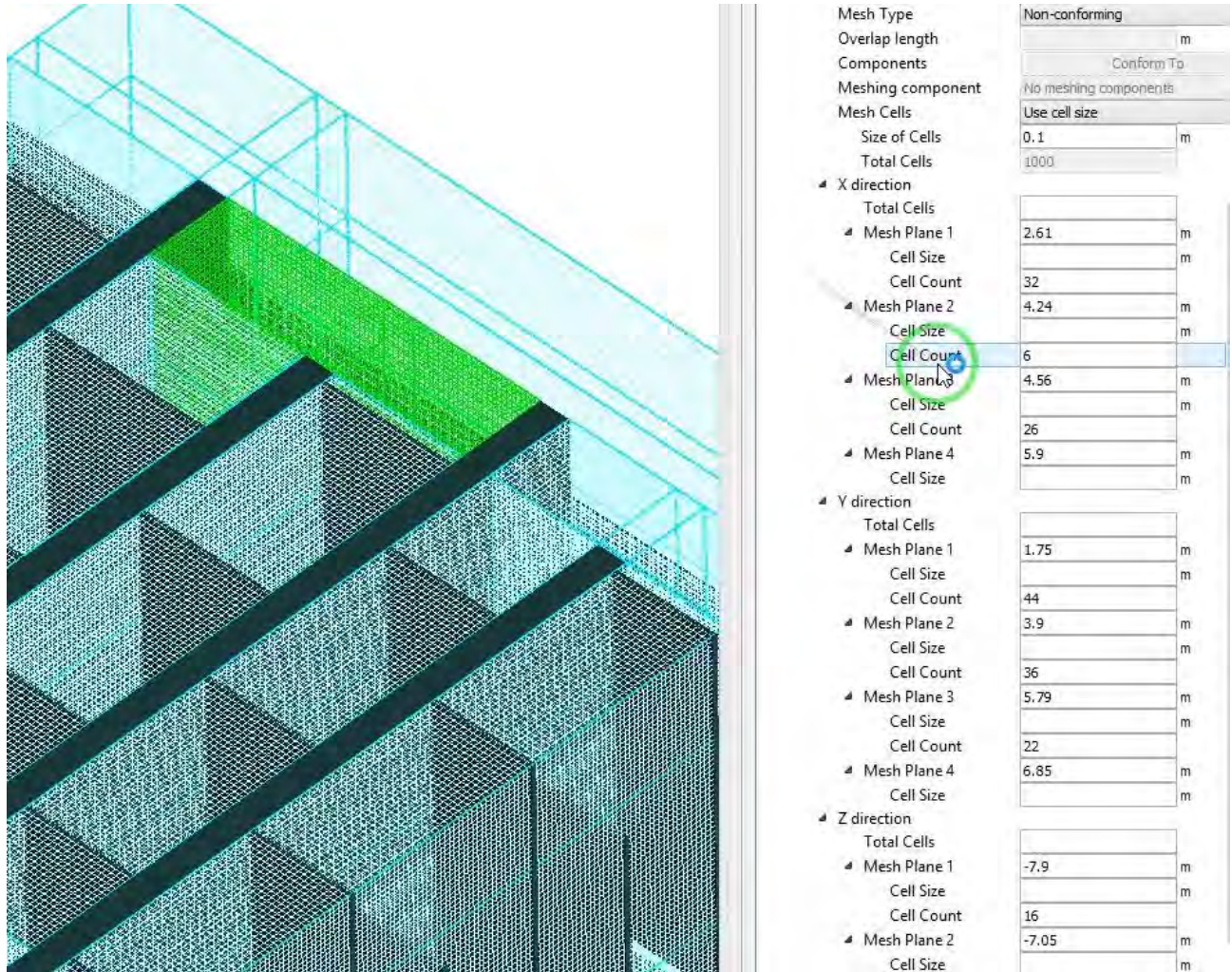
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del noveno bloque que corresponde a la tercera cámara de floculación.

**Figura 81**  
*Información de la malla 09*



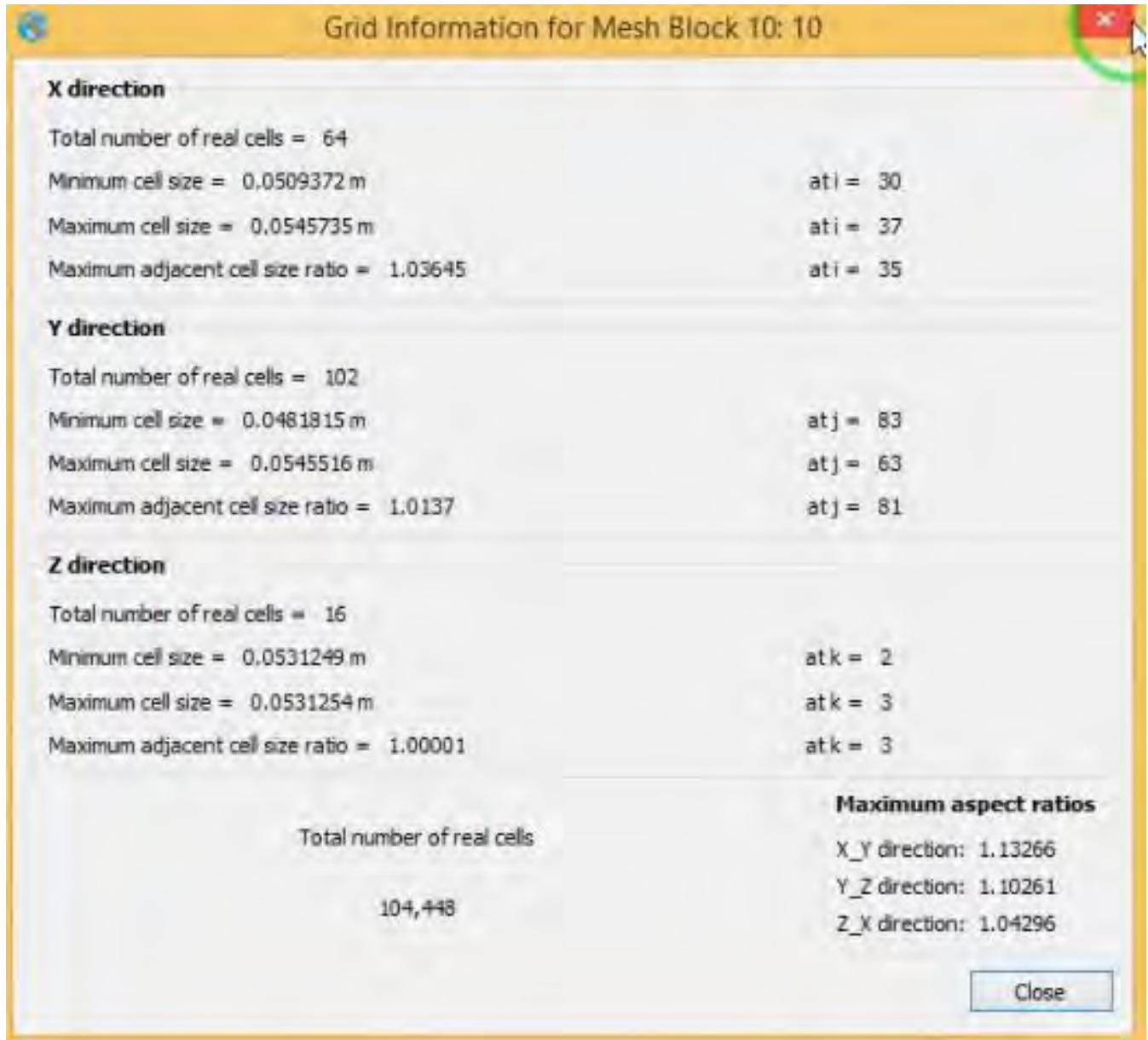
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del noveno bloque que corresponde a la tercera cámara de floculación.



**Figura 82***Malla 10: Transición a la 4ta etapa de floculación*

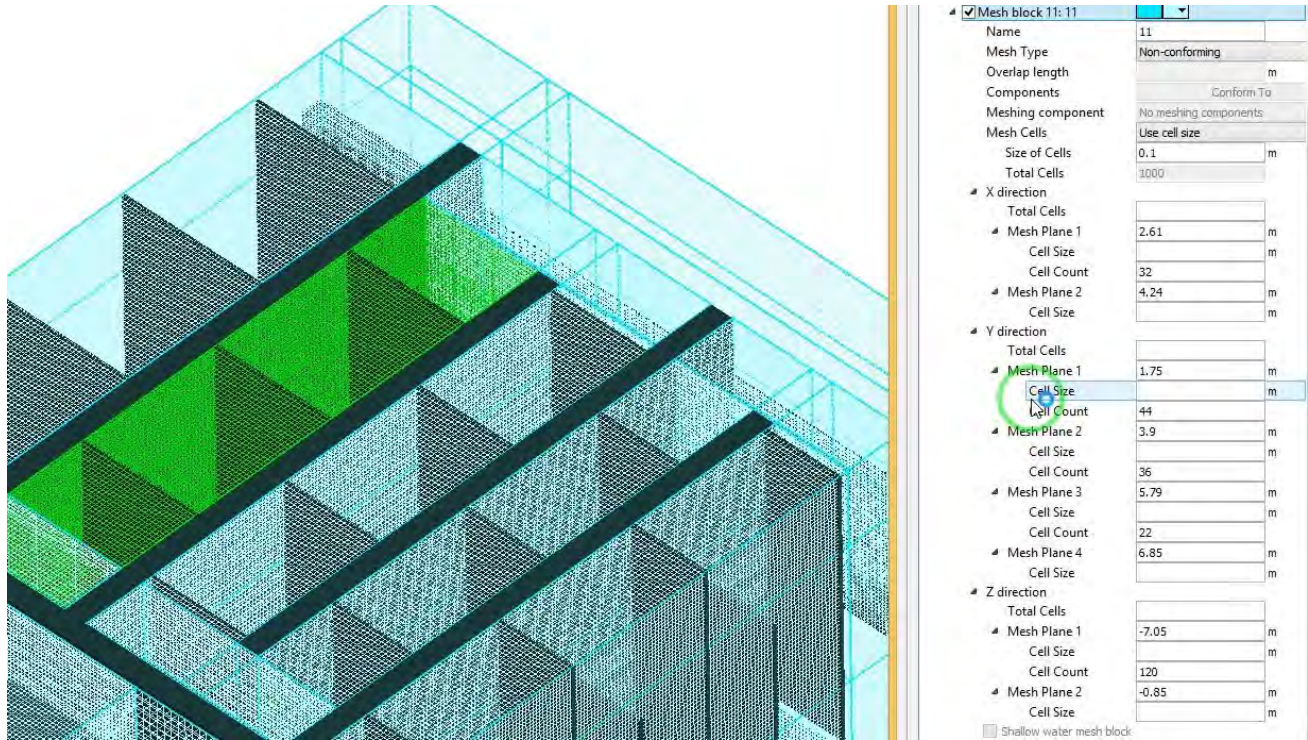
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del décimo bloque que corresponde a la transición a la cuarta cámara de floculación.

**Figura 83**  
*Información de la malla 10*



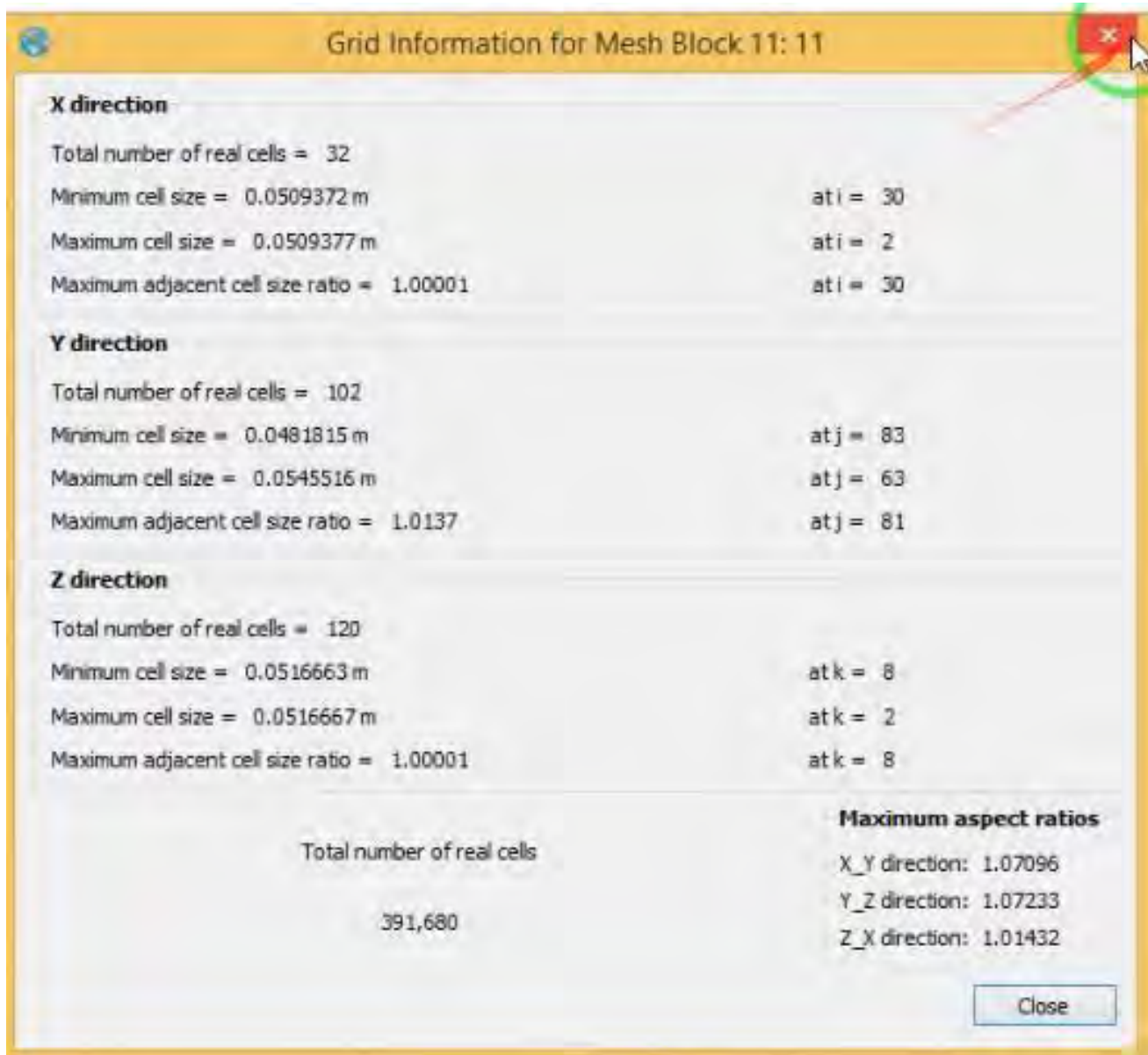
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del décimo bloque que corresponde a la transición a la cuarta cámara de floculación.



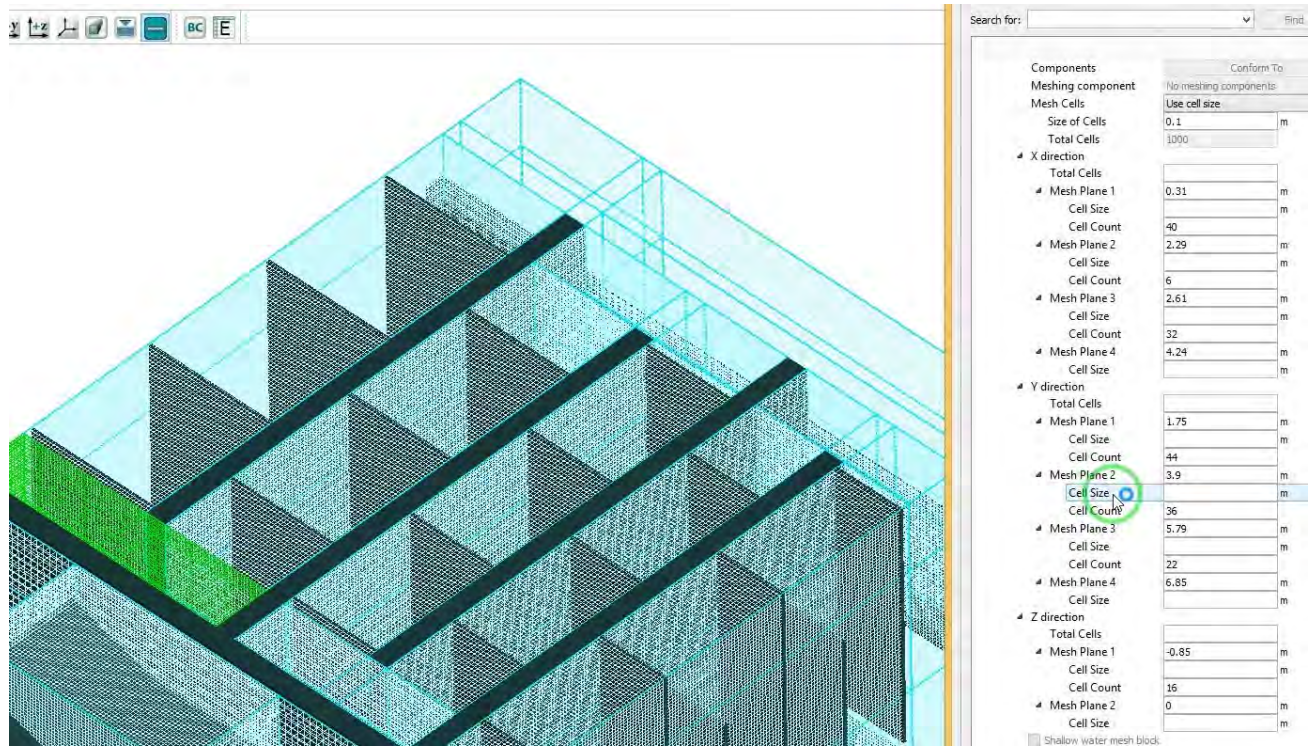
**Figura 84***Malla 11: Cuarta cámara de floculación*

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del onceavo bloque que corresponde a la cuarta cámara de floculación.

**Figura 85**  
*Información de la malla 11*



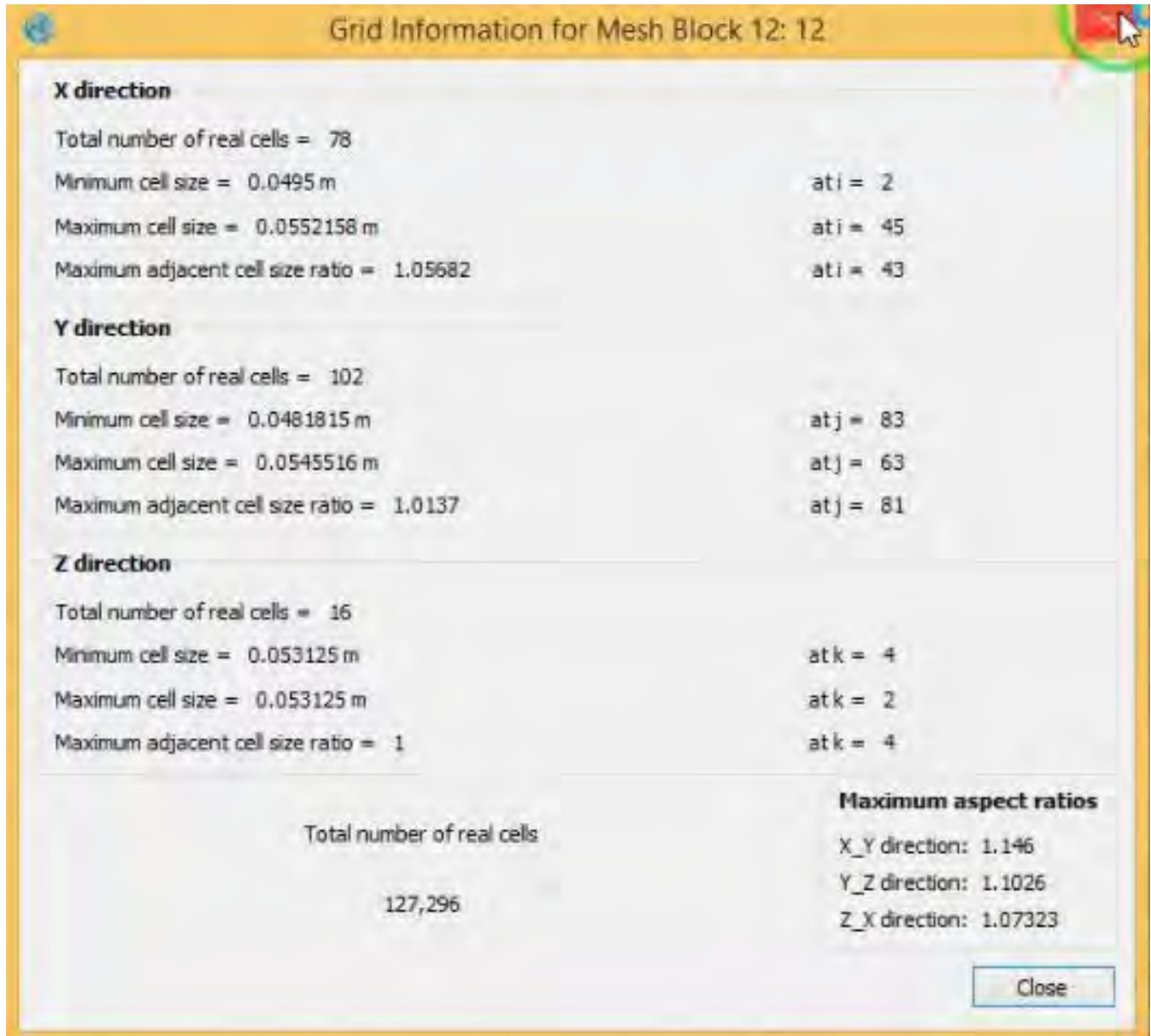
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del onceavo bloque que corresponde a la cuarta cámara de floculación.

**Figura 86***Malla 12: Transición a la 5ta etapa de floculación*

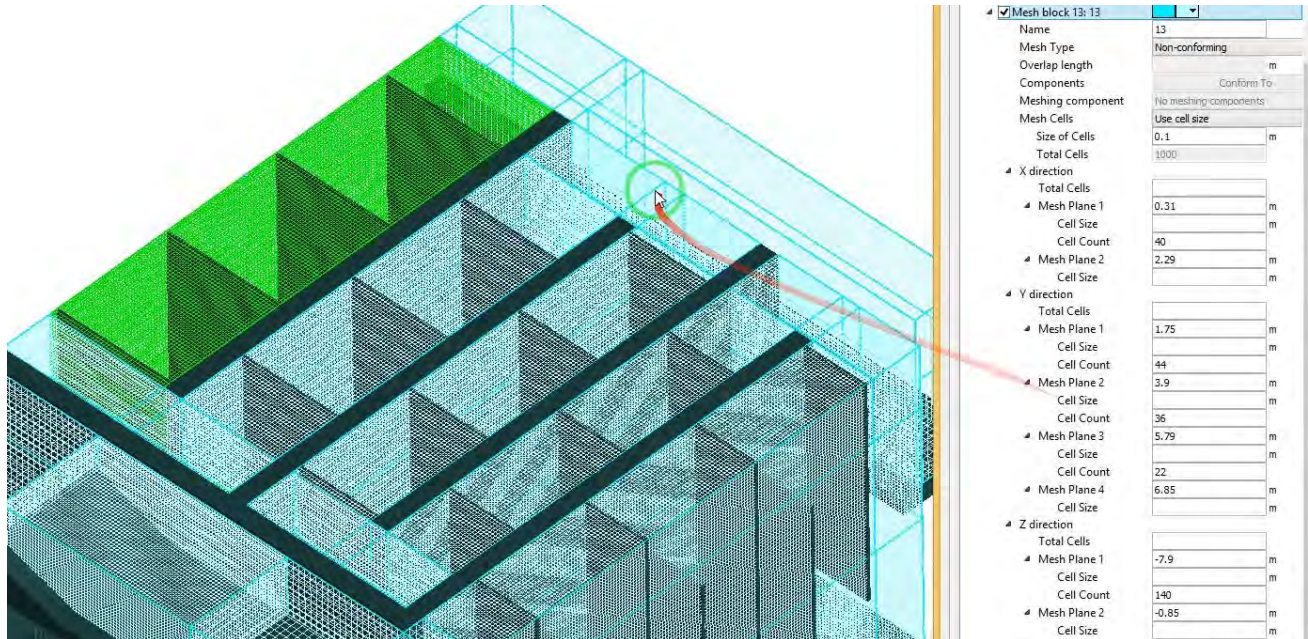
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del doceavo bloque que corresponde a la transición a la quinta cámara de floculación.



**Figura 87**  
*Información de la malla 12*

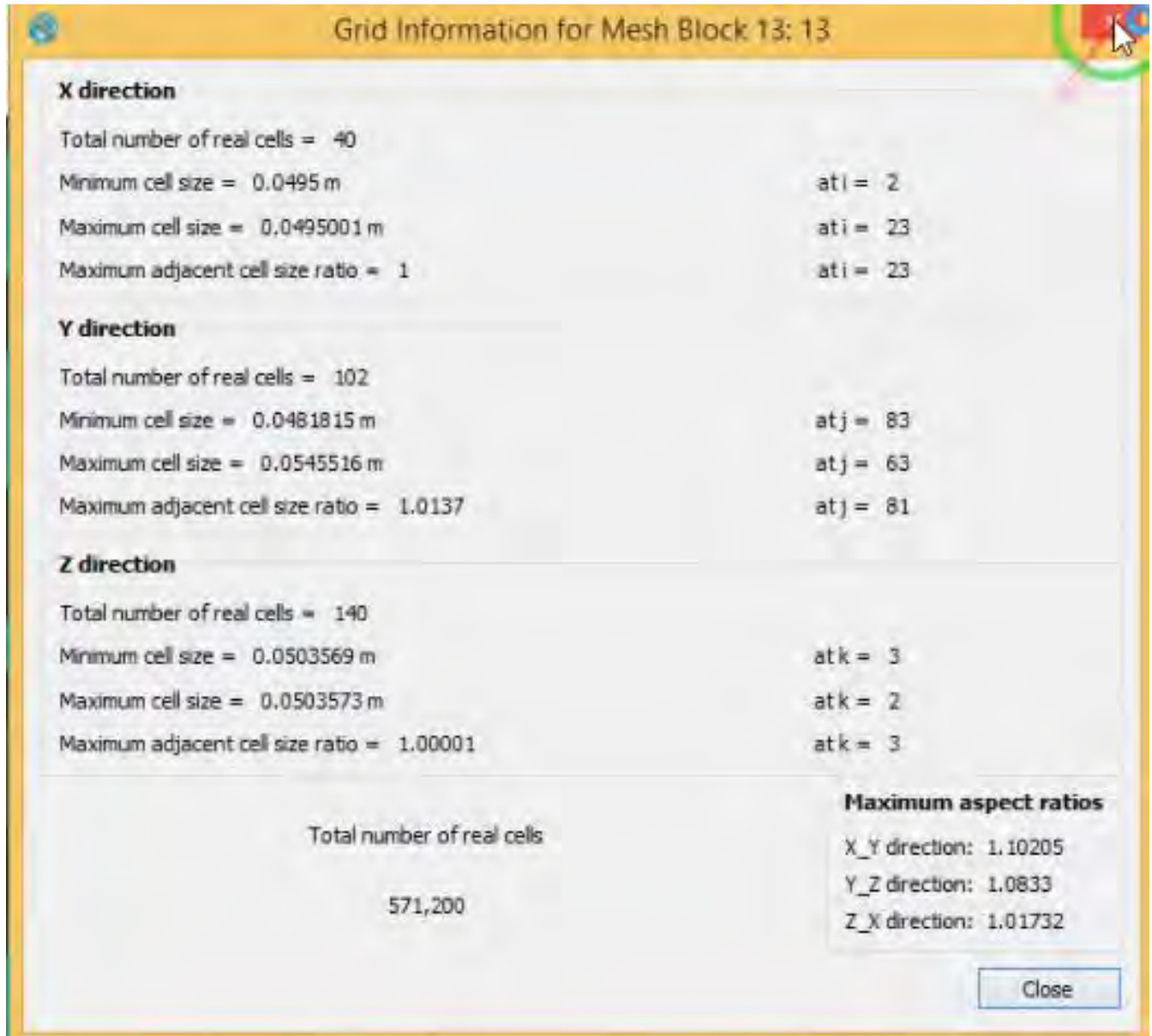


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del décimo bloque que corresponde a la transición a la cuarta cámara de floculación.

**Figura 88***Malla 13: Quinta cámara de floculación*

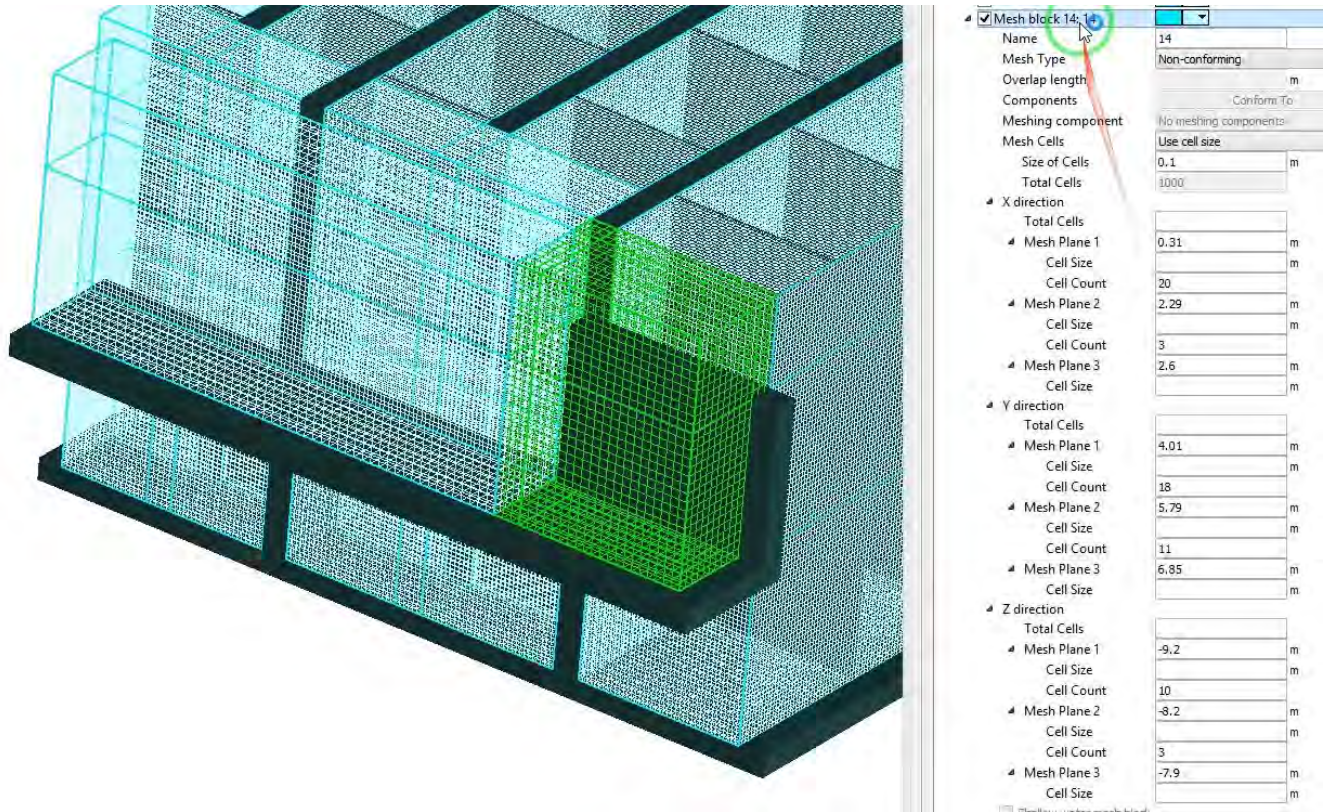
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del treceavo bloque que corresponde a la quinta cámara de floculación.

**Figura 89**  
*Información de la malla 13*



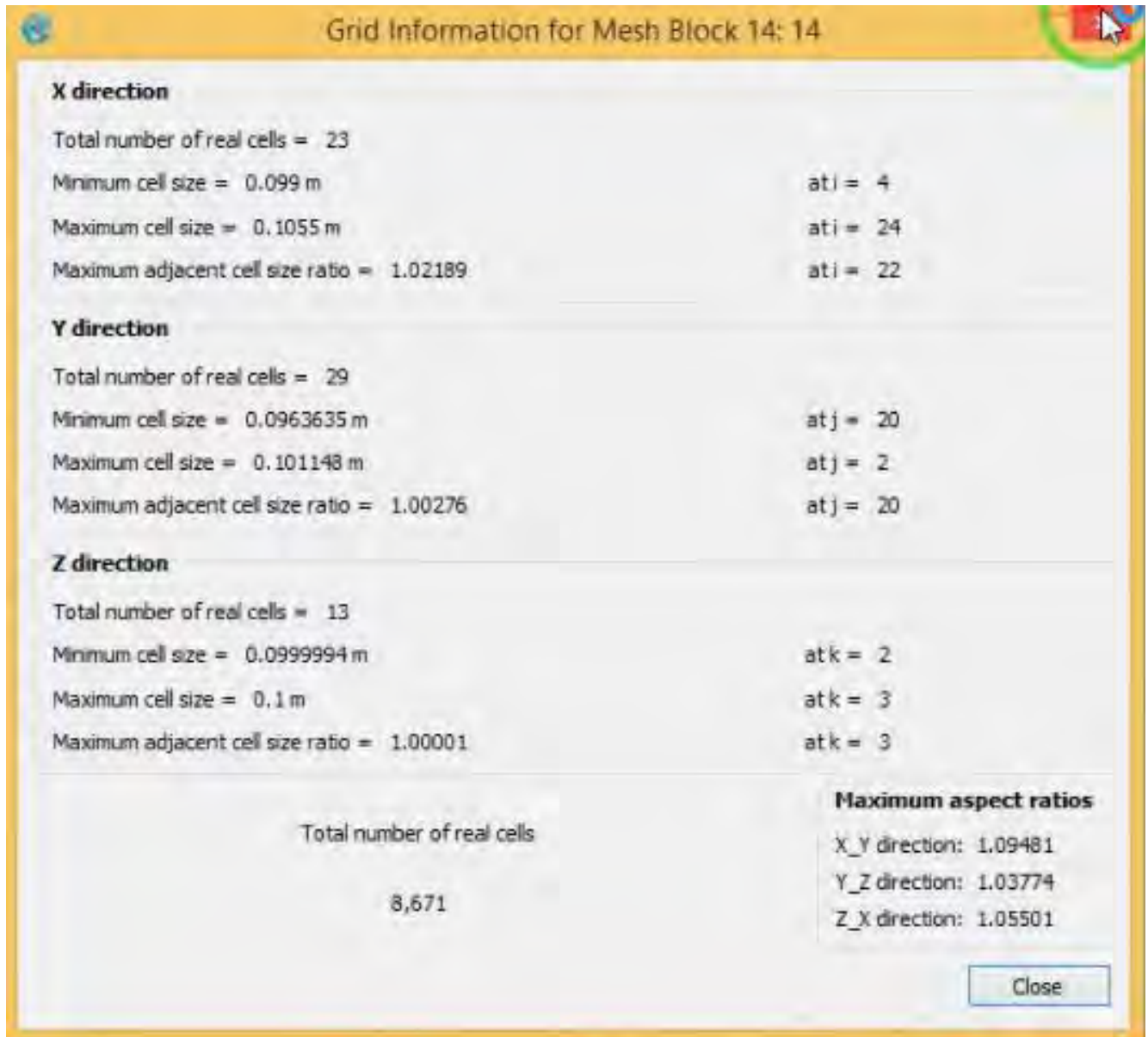
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del treceavo bloque que corresponde a la quinta cámara de floculación.



**Figura 90***Malla 14: Ingreso al canal de distribución*

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del catorceavo bloque que corresponde al ingreso al canal de distribución

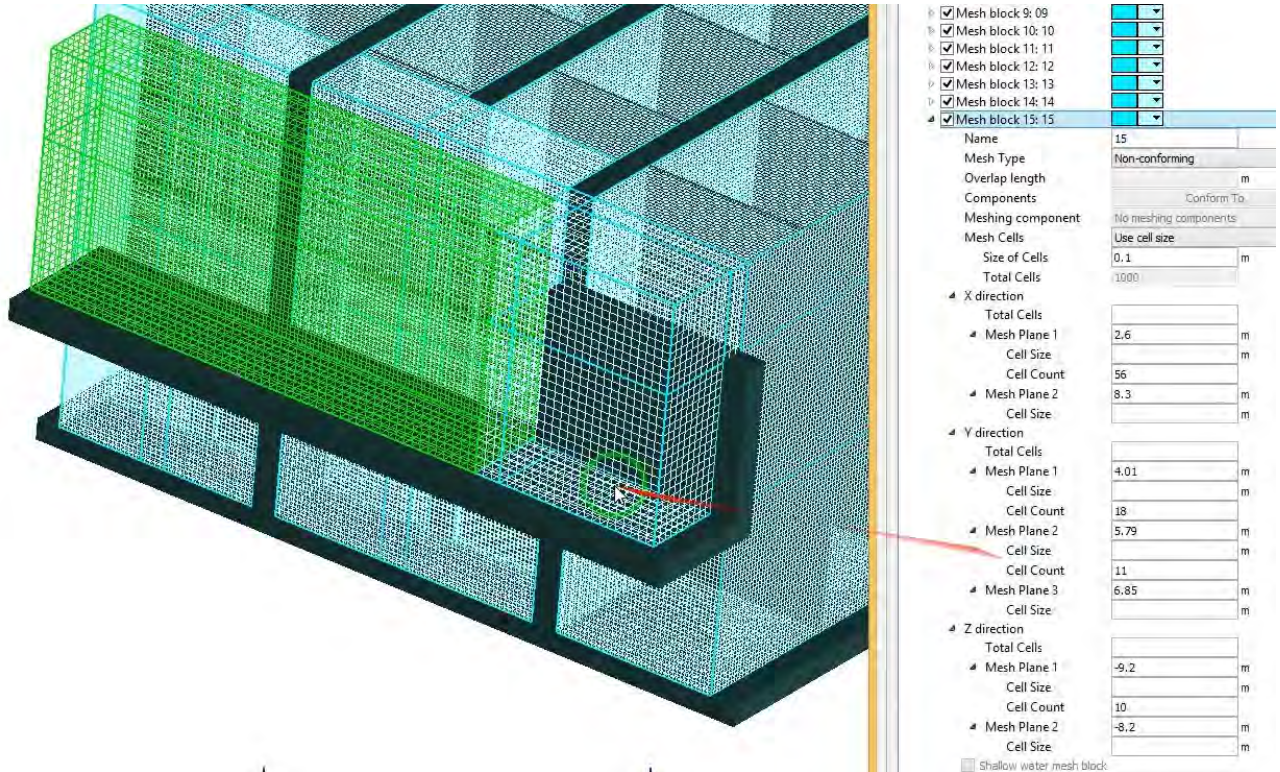
**Figura 91**  
*Información de la malla 14*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del catorceavo bloque que corresponde al ingreso al canal de distribución

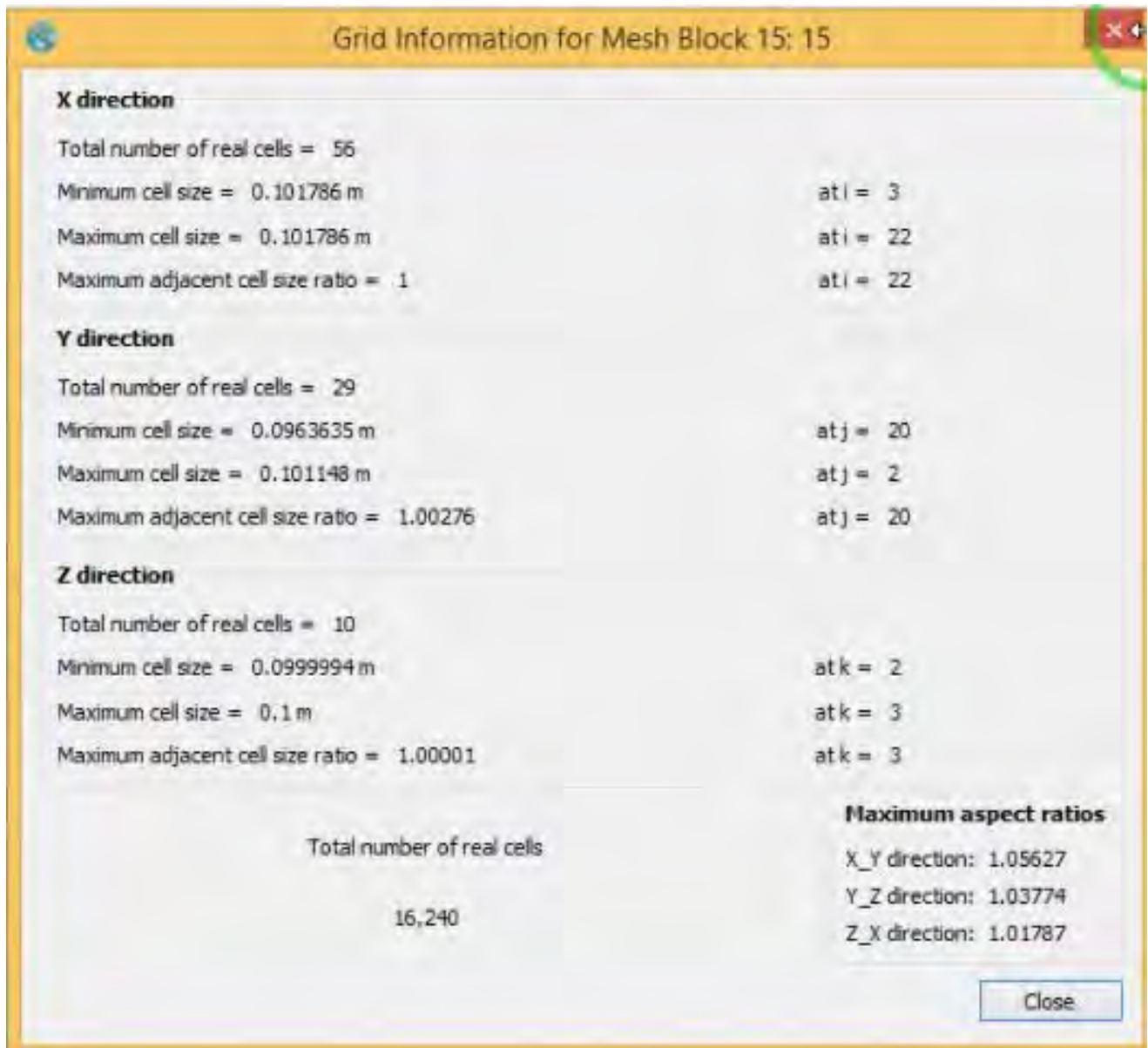


**Figura 92**  
**Malla 15: Canal de distribución**



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado del quinceavo bloque que corresponde al canal de distribución

**Figura 93**  
*Información de la malla 15*

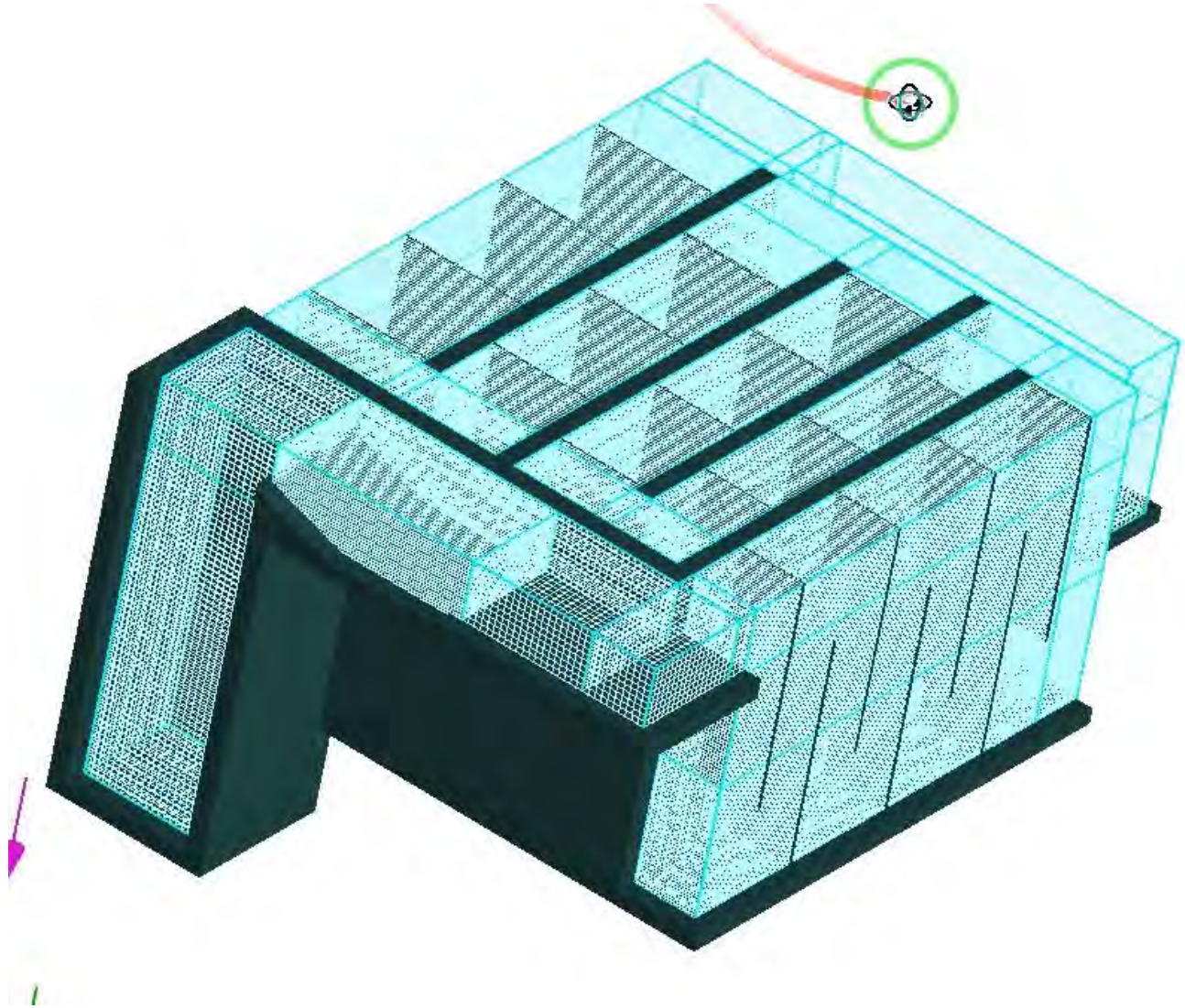


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información del mallado del quinceavo bloque que corresponde al canal de distribución

Una vez definida todas las mallas tenemos el conglomerado de las mallas continuas que se ve en la siguiente figura.



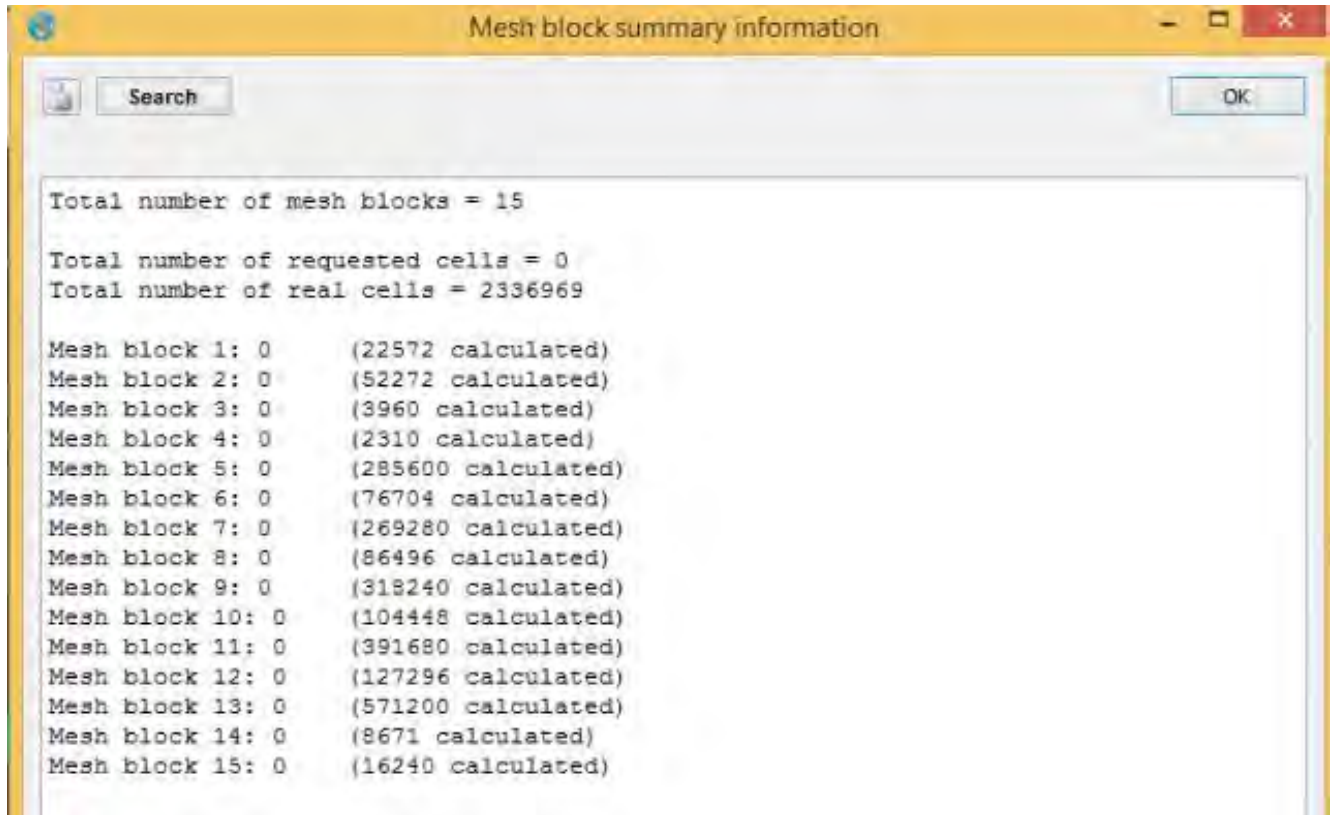
**Figura 94**  
*Mallado de la geometría*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración del mallado de todos los bloques que comprenden el dominio computacional



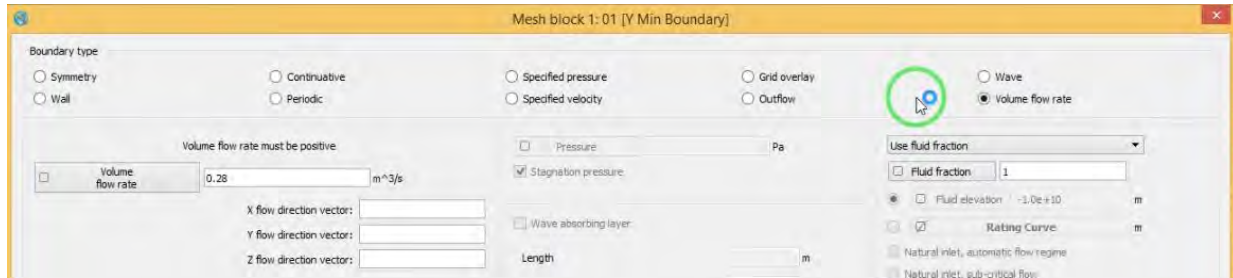
**Figura 95**  
*Información de todas las mallas*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la información detallada de todos los bloques computacionales, así como la cantidad reales de celdas que es 2 336 969.

Una vez definida la discretización del dominio computacional, se establecieron las condiciones de borde y condiciones iniciales del modelo CFD–FSI. La condición de borde principal corresponde al caudal de ingreso, aplicado en la malla N.º 1 (cámara de impulsión). De acuerdo con el expediente técnico del sistema, se adoptó un caudal de diseño de 280 L/s, equivalente a 0.28 m³/s, valor que representa el escenario hidráulico más crítico para la evaluación de las solicitaciones inducidas.

**Figura 96**  
*Condición de borde de entrada de caudal*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración de la condición de borde de la entrada con el caudal de diseño de 280 L/s

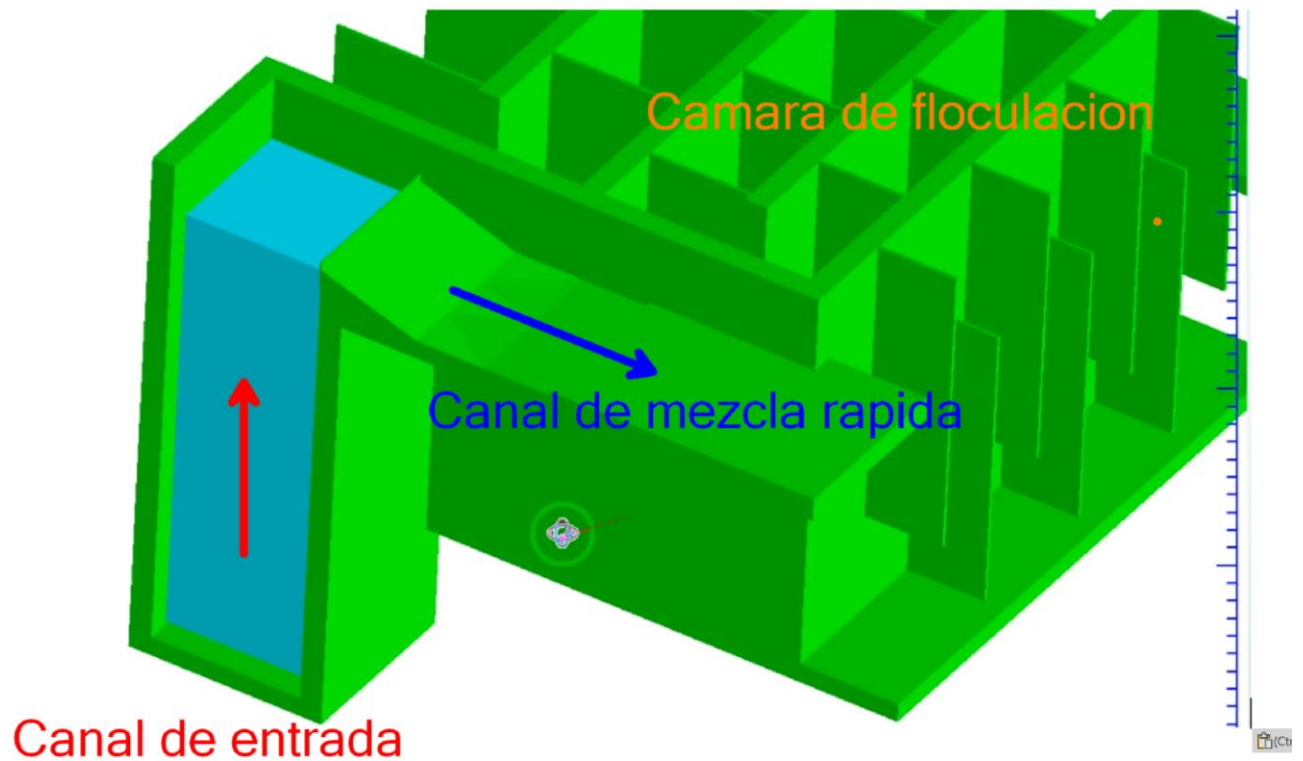
Con el fin de optimizar el tiempo de simulación y reducir el periodo transitorio inicial, se definieron regiones de fluido inicial, las cuales permiten inicializar el dominio con presencia de fluido en zonas específicas del sistema. Estas regiones no representan condiciones estacionarias del flujo, sino una configuración inicial del campo de fluido, que facilita una convergencia más rápida hacia el estado estadísticamente estable.

**Figura 97***Configuración de la región de fluido 1*

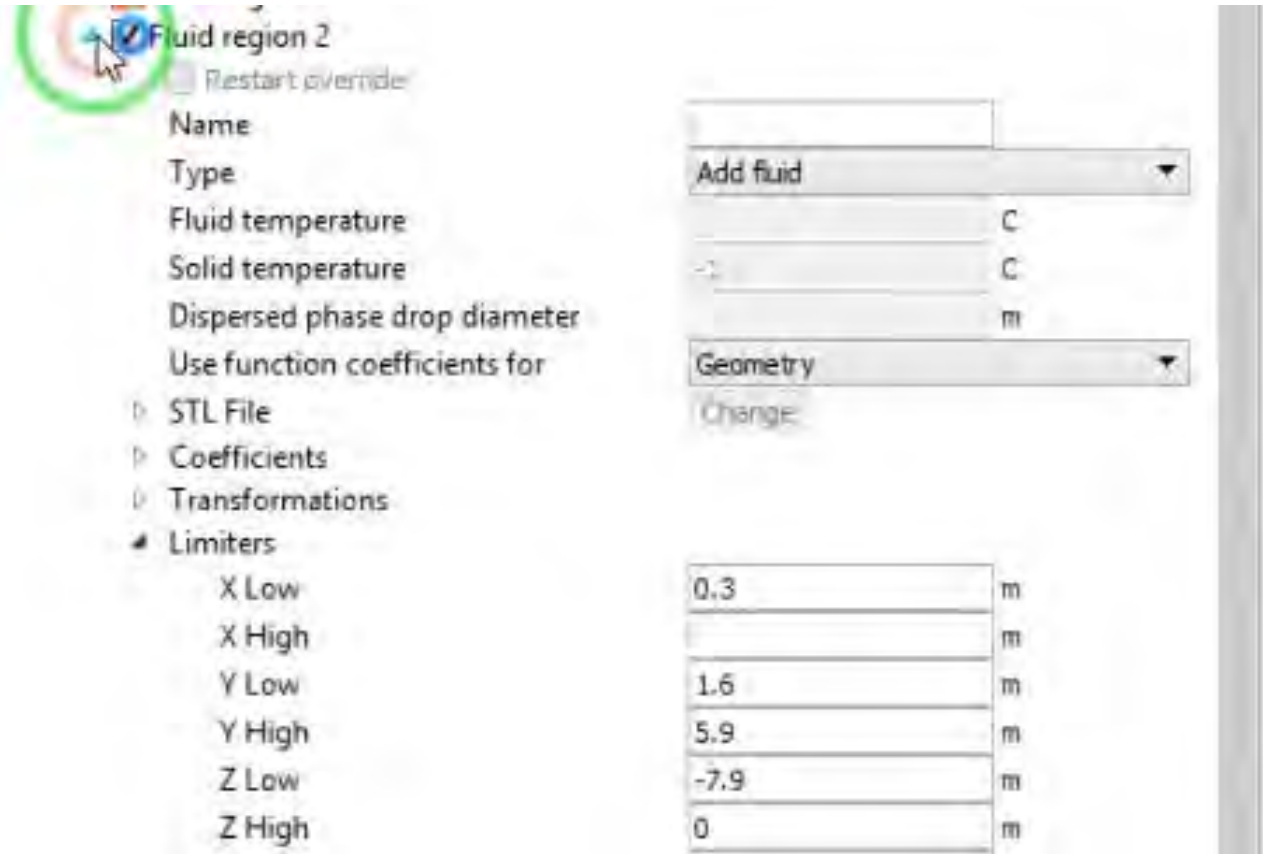
Property	Value	Unit
X Low	0.3	m
X High	2.3	m
Y Low		m
Y High	6	m
Z Low	0.3	m
Z High	2.1	m
Cylinder inner radius		m

*Nota:* La región de fluido 01 corresponde al agua presente en el canal de entrada. El valor -1 indica que no se considera el acoplamiento térmico con el sólido.

**Figura 98**  
*Región de fluido 01*

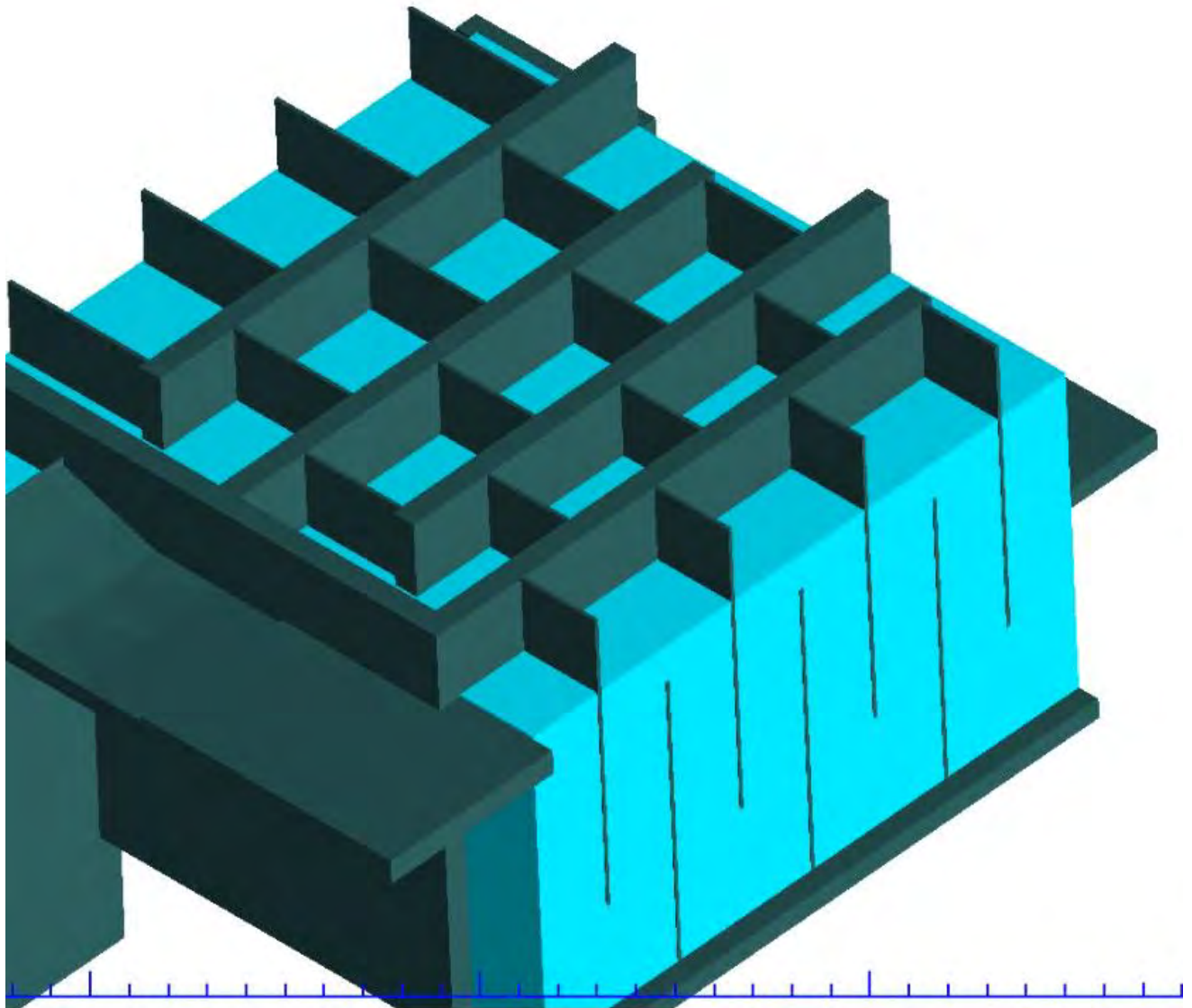


*Nota:* En la figura se muestra la primera región de fluido que corresponde al agua del canal de entrada.

**Figura 99***Configuración de la región de fluido 02*

*Nota:* La región de fluido 02 corresponde al agua presente en las cámaras de floculación.

**Figura 100**  
*Región de fluido 02*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la segunda región de fluido que corresponde al agua presente en las cámaras de floculación.

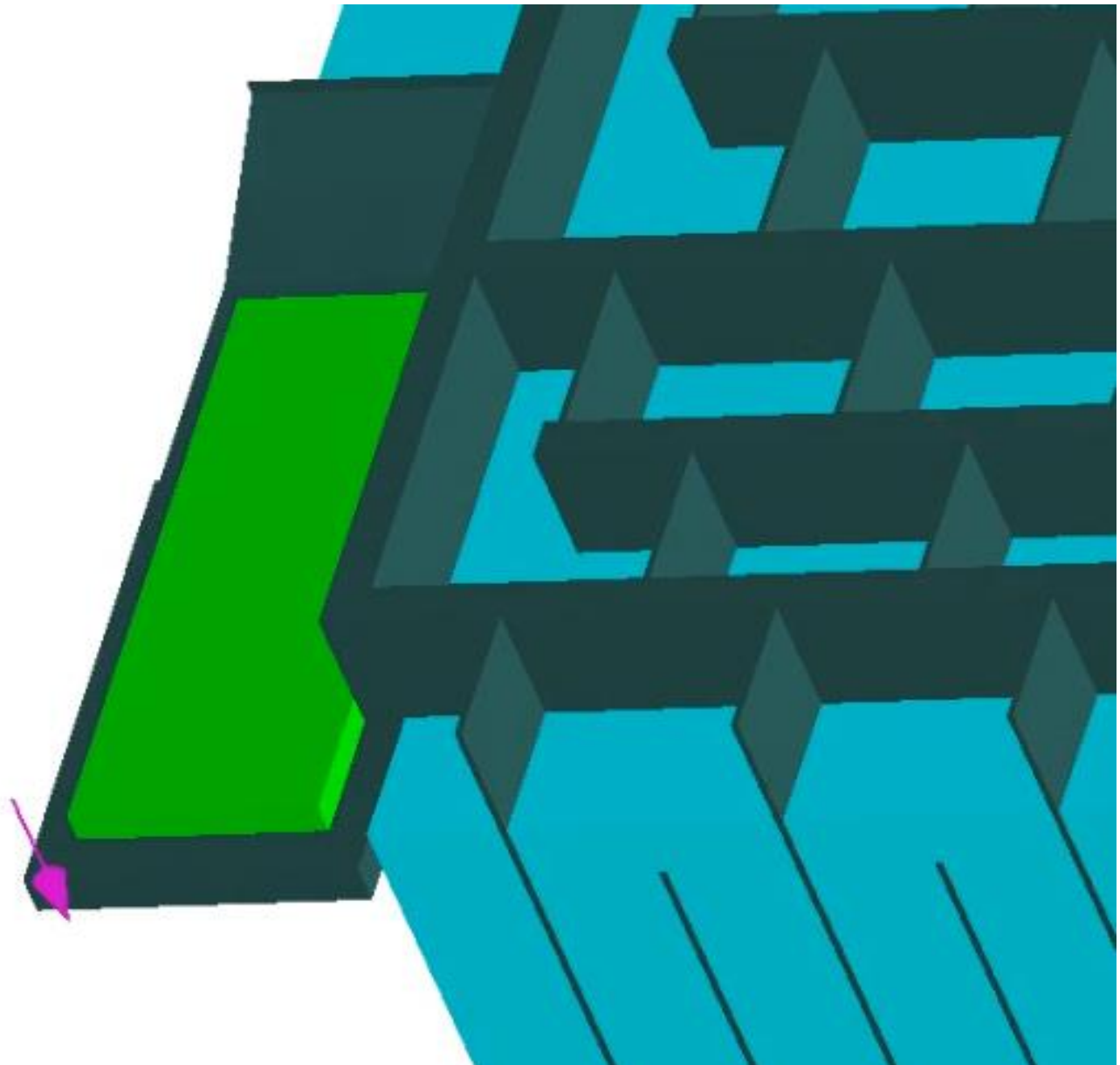
**Figura 101***Configuración de la región de fluido 03*

Fluid region 3	
<input type="checkbox"/> Restart override	
Name	
Type	Add fluid ▼
Fluid temperature	-1 C
Solid temperature	-1 C
Dispersed phase drop diameter	m
Use function coefficients for	Geometry ▼
<ul style="list-style-type: none"> <li>STL File</li> <li>Coefficients</li> <li>Transformations</li> <li>Limiters           <ul style="list-style-type: none"> <li>X Low: 4 m</li> <li>X High: 8.6 m</li> <li>Y Low: 5.7 m</li> <li>Y High: 6.1 m</li> <li>Z Low: 0.3 m</li> </ul> </li> </ul>	

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente la configuración de la tercera región de fluido que corresponde al agua presente en el canal de mezcla rápida



**Figura 102**  
*Región de fluido 03*



*Nota:* La región de fluido 03 corresponde al agua presente en el canal de mezcla rápida.

#### **Tiempo computacional de la simulación**

El tiempo total de ejecución de la simulación fue de aproximadamente 65 días, debido a la alta resolución del mallado, al número elevado de celdas del dominio CFD, y al acoplamiento fluido–estructura (FSI) implementado en el modelo. Este tiempo computacional fue necesario para garantizar

la calidad numérica de los resultados, así como la correcta representación de los campos de velocidad, presión y esfuerzos inducidos en el sistema.

realizada.

### Figura 103

#### *Tiempo total de simulación*

```
restart and spatial data available at t= 2.40007E+01
***
2.40007E+01      65280  1.41E-03  1.41E-03/cz      1  5.08E-01  2.8491E-02  +1.14E-01  0.487      04:46:30  92  05:04:38      00:00:00

end of calculation at t = 2.40007E+01,      cycle = 65280
normal completion: finish time exceeded

flsgrfl.Final_canal-flsgrfl.Final_canal file size: 4 gb

elapsed time = 1.71905E+04 seconds or
               65 days : 4 hours : 46 minutes : 31 seconds

cpu time = 2.33061E+07 seconds

date of completion = 05/19/2025
time               = 05:04:39

Solver Done

Postprocessor starting

Postprocessor Done
```

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente el tiempo total de simulación que fue de 65 días 4 horas 46 minutos y 31 segundos.

**Figura 104**  
*Versión de Flow 3d*



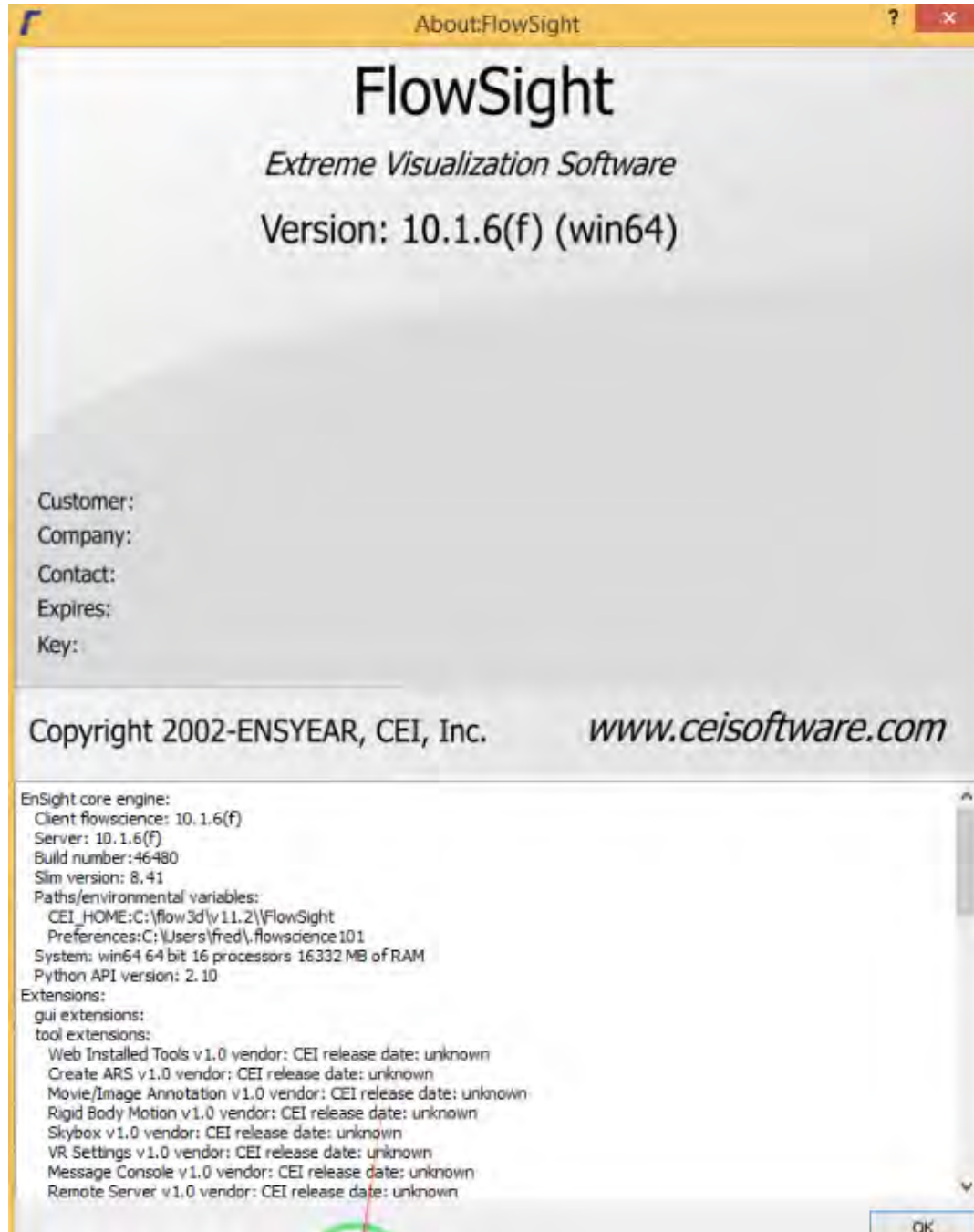
*Nota:* En la figura se muestra la versión del software empleado, correspondiente a FLOW-3D v11.2.0.16, desarrollado por Flow Science, en su versión académica.

Durante el proceso de configuración de la simulación, el software genera un archivo de extensión .prepin, el cual almacena de manera íntegra la información asociada a la geometría, mallado, condiciones de borde, propiedades del fluido y del sólido, así como los parámetros numéricos definidos en la interfaz gráfica. Este archivo permite la reproducibilidad del modelo numérico y su ejecución en otros equipos de cómputo (workstations). La documentación correspondiente se presenta en los apéndices del presente trabajo.

### ***5.1.3. Resultados de la simulación hidráulica***

El procesamiento numérico de la simulación fue realizado mediante el solver FLOW-3D, el cual resuelve las ecuaciones gobernantes de la dinámica del fluido y su interacción con la estructura. Para el análisis e interpretación de los resultados, se empleó el software FlowSight, postprocesador incluido en el entorno de FLOW-3D.

**Figura 105**  
*Versión de Flow Sight*



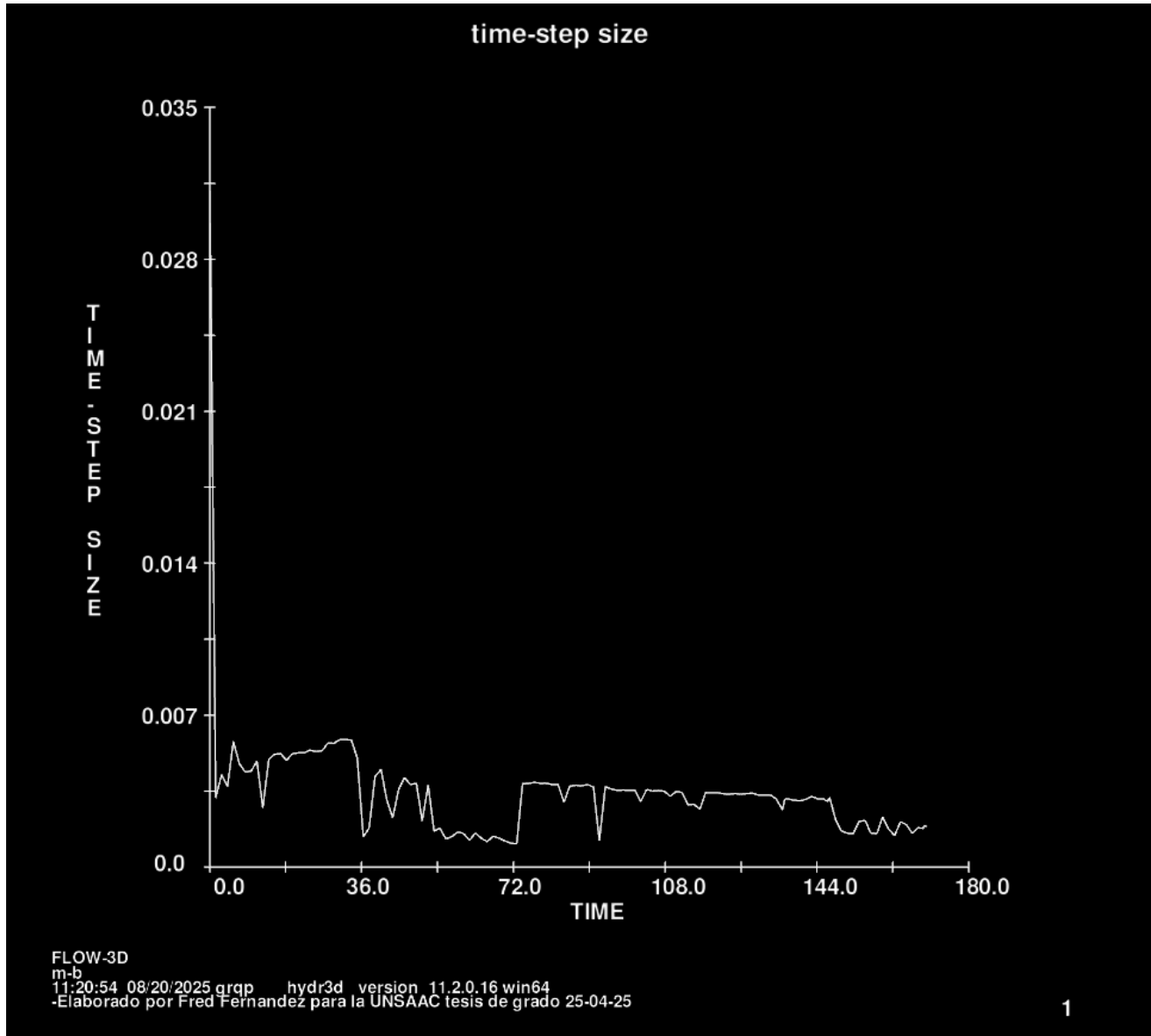
*Nota:* En la siguiente figura se puede ver la versión del software FlowSight versión 10.1.6 desarrollado por Computational Engineering International, Inc, empleado para el posprocesamiento de los resultados numéricos.

Los resultados numéricos obtenidos muestran que la simulación alcanzó un estado estadísticamente estable, entendido como la condición en la cual las variables principales del flujo

(velocidad y presión) presentan fluctuaciones acotadas alrededor de valores medios constantes, sin crecimiento numérico incontrolado ni divergencias del solver.

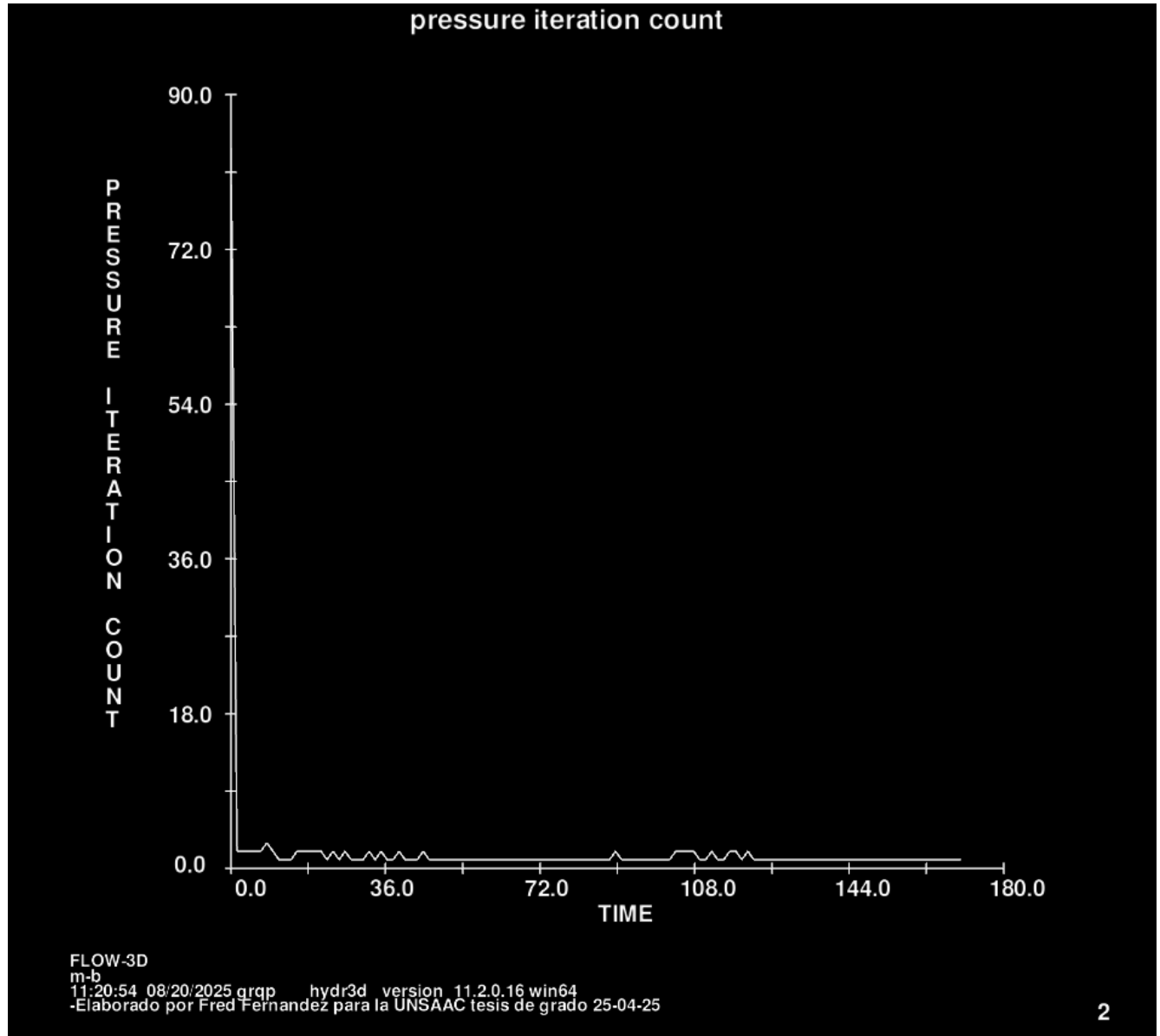
Asimismo, los indicadores de estabilidad numérica reportados por el software se mantuvieron dentro de rangos tolerables, lo que confirma la correcta configuración del modelo, del mallado y de las condiciones de borde, permitiendo la interpretación confiable de los campos hidráulicos obtenidos.

**Figura 106**  
*Paso de tiempo VS Tiempo*

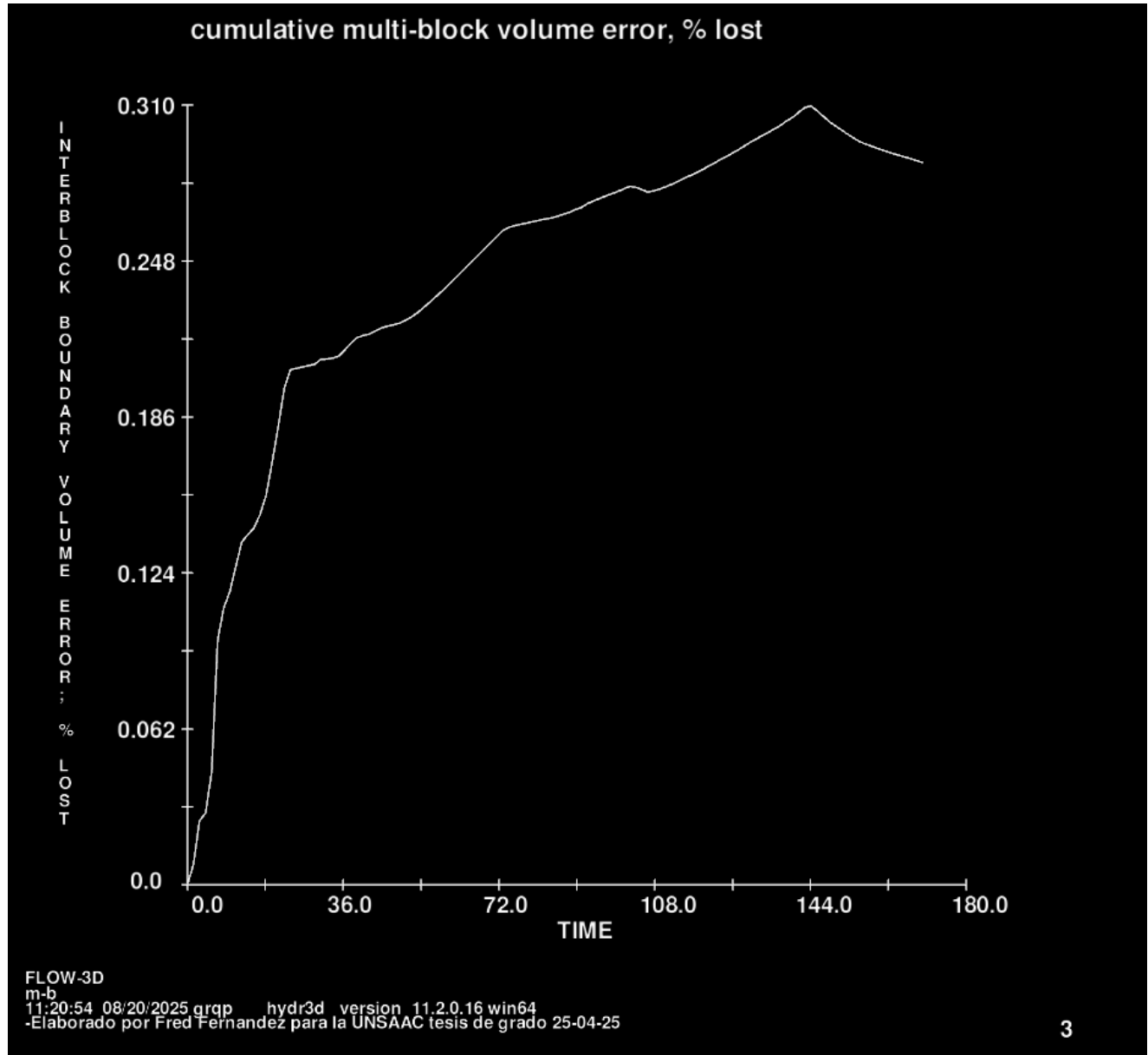


*Nota:* Evolución del tamaño de paso de tiempo (time-step size) durante la simulación numérica transitoria en FLOW-3D. El time-step se mantiene mayoritariamente en el rango aproximado de  $1.0 \times 10^{-3}$  s a  $6.0 \times 10^{-3}$  s, con fluctuaciones controladas durante el periodo transitorio inicial y un comportamiento estable en la etapa posterior. La adaptación automática del time-step responde a los criterios de estabilidad numérica del solver, sin presentarse colapsos ni divergencias, lo que confirma la estabilidad numérica y la confiabilidad de los resultados obtenidos.



**Figura 107***Conteo de iteaciones de presion VS Tiempo*

*Nota:* El conteo de iteraciones de presión se mantiene en valores bajos ( $\approx 1-2$ ) a lo largo del cálculo, lo que confirma una convergencia rápida del solver. Este comportamiento refleja la estabilidad numérica del modelo y la adecuada definición de las condiciones de frontera.

**Figura 108***Error acumulativo multibloque en (%) VS Tiempo*

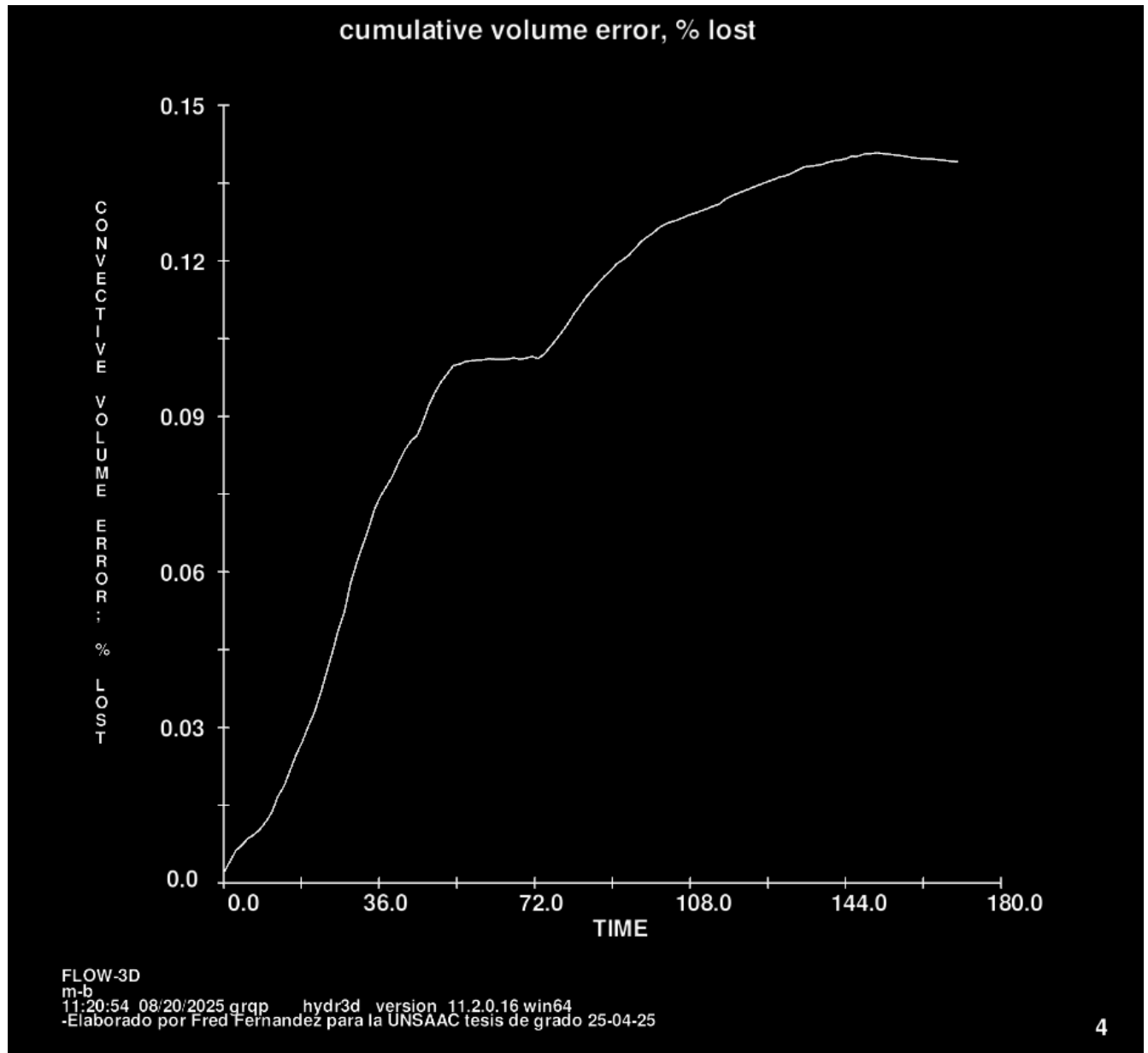
3

*Nota:* Evolución del error volumétrico acumulado entre bloques (cumulative multi-block volume error, % lost) durante la simulación numérica transitoria en FLOW-3D. Este indicador cuantifica la desviación acumulada en la conservación global de volumen (masa) asociada a los flujos que atraviesan las interfaces entre los distintos bloques del mallado. Se observa un incremento más pronunciado del error durante la etapa inicial de la simulación, asociado al llenado del dominio, al desarrollo del flujo y a los ajustes automáticos del time-step y del campo de presión. Posteriormente, el crecimiento del error se desacelera y el valor se estabiliza, alcanzando un máximo del orden de 0.30 %, sin presentar incrementos sostenidos ni comportamiento divergente. Este nivel de error se encuentra dentro de rangos aceptables para simulaciones CFD multi-bloque de gran escala y con acoplamiento fluido–estructura, lo que confirma una adecuada conservación global de volumen, un correcto acoplamiento

entre bloques y la estabilidad numérica del modelo. En consecuencia, los campos hidráulicos y estructurales derivados de la simulación se consideran numéricamente confiables.

**Figura 109**

*Error acumulativo de volumen (%) VS Tiempo*

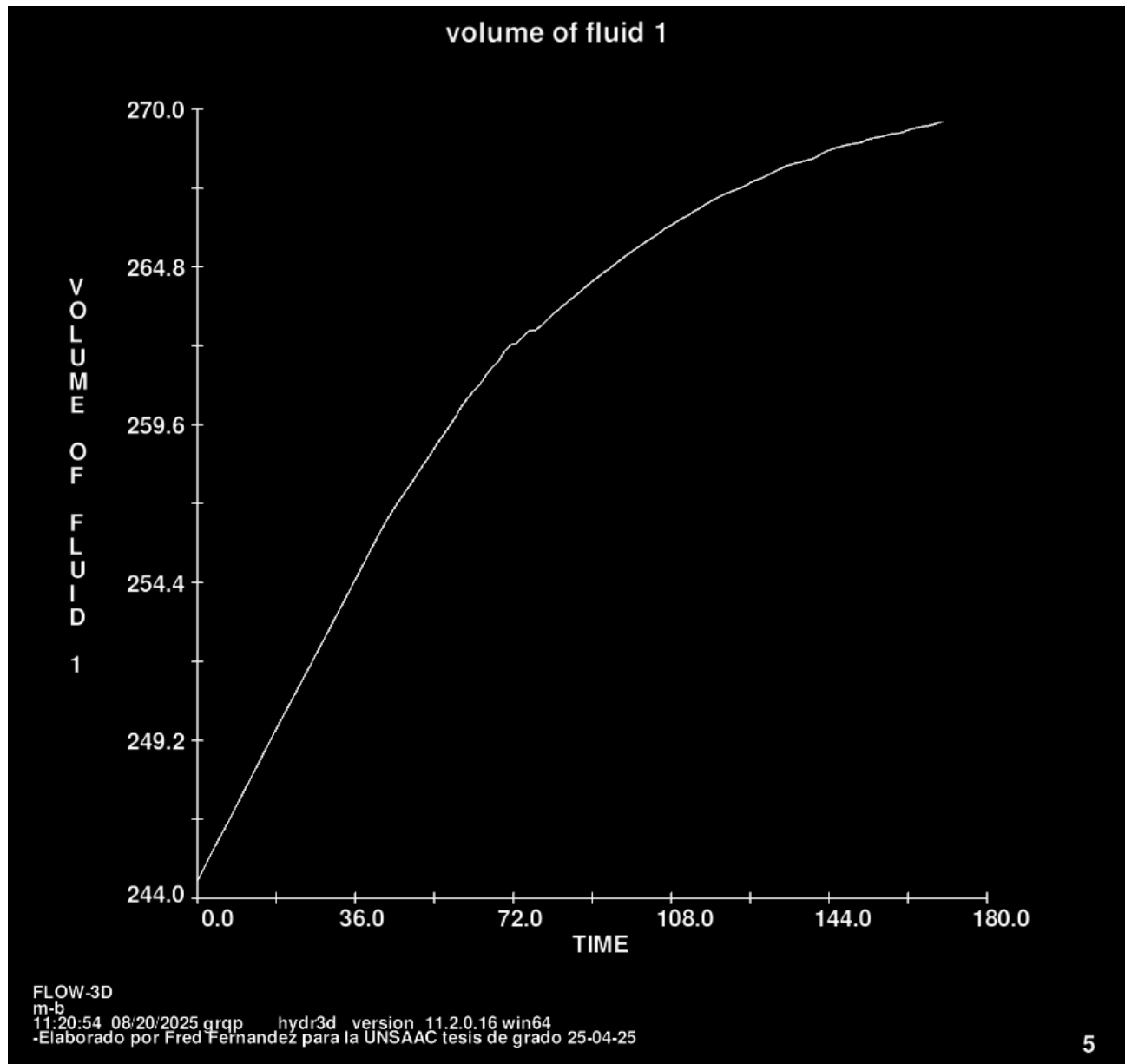


*Nota:* Evolución del error volumétrico acumulado convectivo (cumulative convective volume error, % lost) durante la simulación numérica transitoria en FLOW-3D. Este indicador representa la desviación acumulada en la conservación de volumen asociada a los términos convectivos del flujo, es decir, al transporte de masa a través de las celdas del dominio computacional. Se observa un incremento progresivo del error durante la etapa inicial de la simulación, vinculado al establecimiento del régimen hidráulico y al desarrollo del campo de velocidades, seguido de una desaceleración del crecimiento y una tendencia a la estabilización. El valor máximo alcanzado es del orden de 0.14–0.15 %, sin presentar

incrementos abruptos ni comportamiento divergente. Dicho nivel de error se encuentra ampliamente dentro de los rangos aceptables para simulaciones CFD transitorias con mallado fino y acoplamiento fluido–estructura, confirmando una adecuada conservación global de masa, un correcto tratamiento numérico de los términos convectivos y la estabilidad del modelo hidráulico implementado.

**Figura 110**

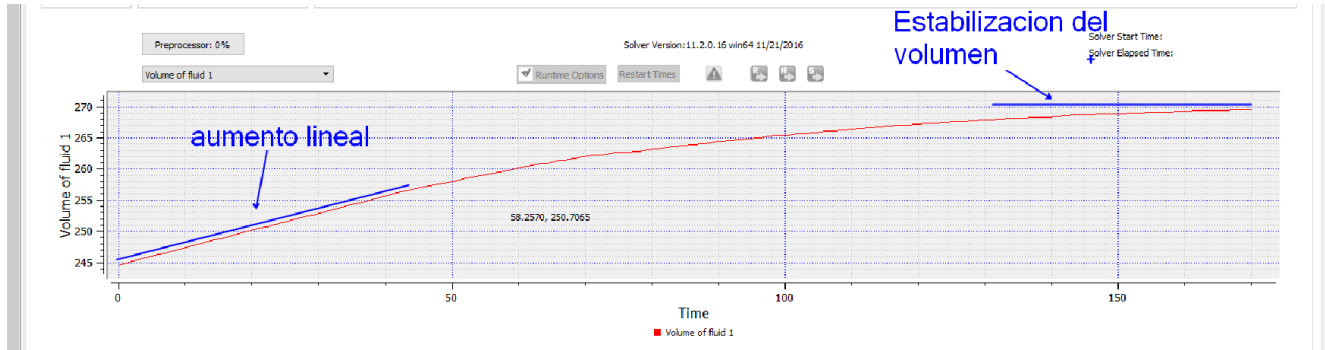
*Volumen del fluido Vs Tiempo*



*Nota:* El volumen de fluido 1 aumenta de  $\approx 2.44 \times 10^2$  a  $2.69 \times 10^2 \text{ m}^3$ , evidenciando el llenado progresivo del dominio hidráulico. La evolución continua y que luego de los 100 segundos que se estabiliza en un valor, indica que se está cumpliendo la conservación de masa del fluido

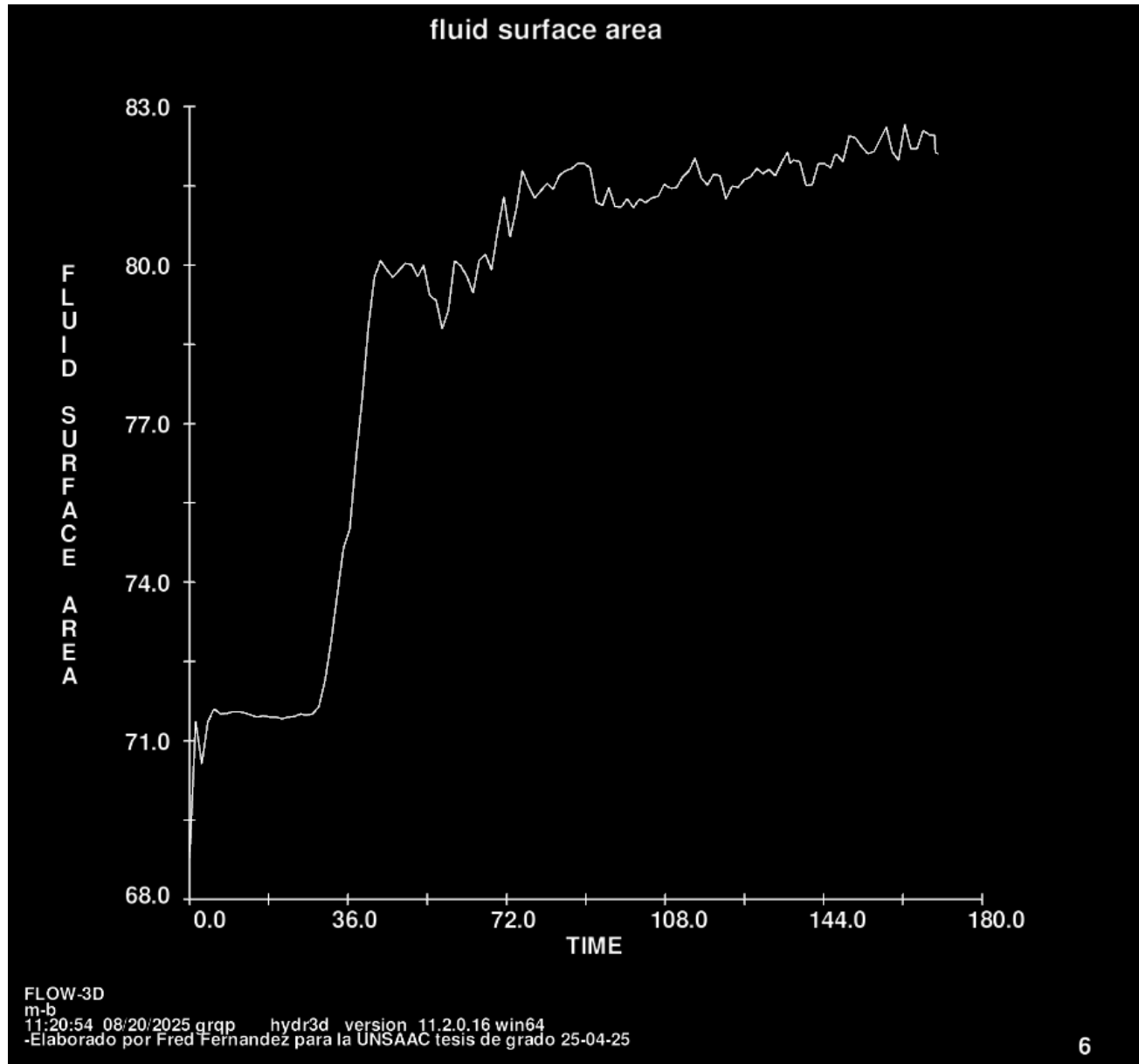
En la siguiente figura se puede ver mejor la estabilización del volumen de fluido a lo largo del tiempo.

**Figura 111**  
*Estabilizacion del volumen*



*Nota:* Durante la etapa inicial de la simulación, el volumen de fluido aumenta de manera progresiva debido al proceso de llenado del dominio hasta alcanzar la condición hidráulica de operación. Posteriormente, el volumen se estabiliza alrededor de 269 m<sup>3</sup>, lo que evidencia el balance entre caudales de entrada y salida. Esta estabilización confirma la conservación de masa y la estabilidad numérica del modelo, validando la confiabilidad de la simulación CFD.

**Figura 112**  
*Area del fluido VS Tiempo*

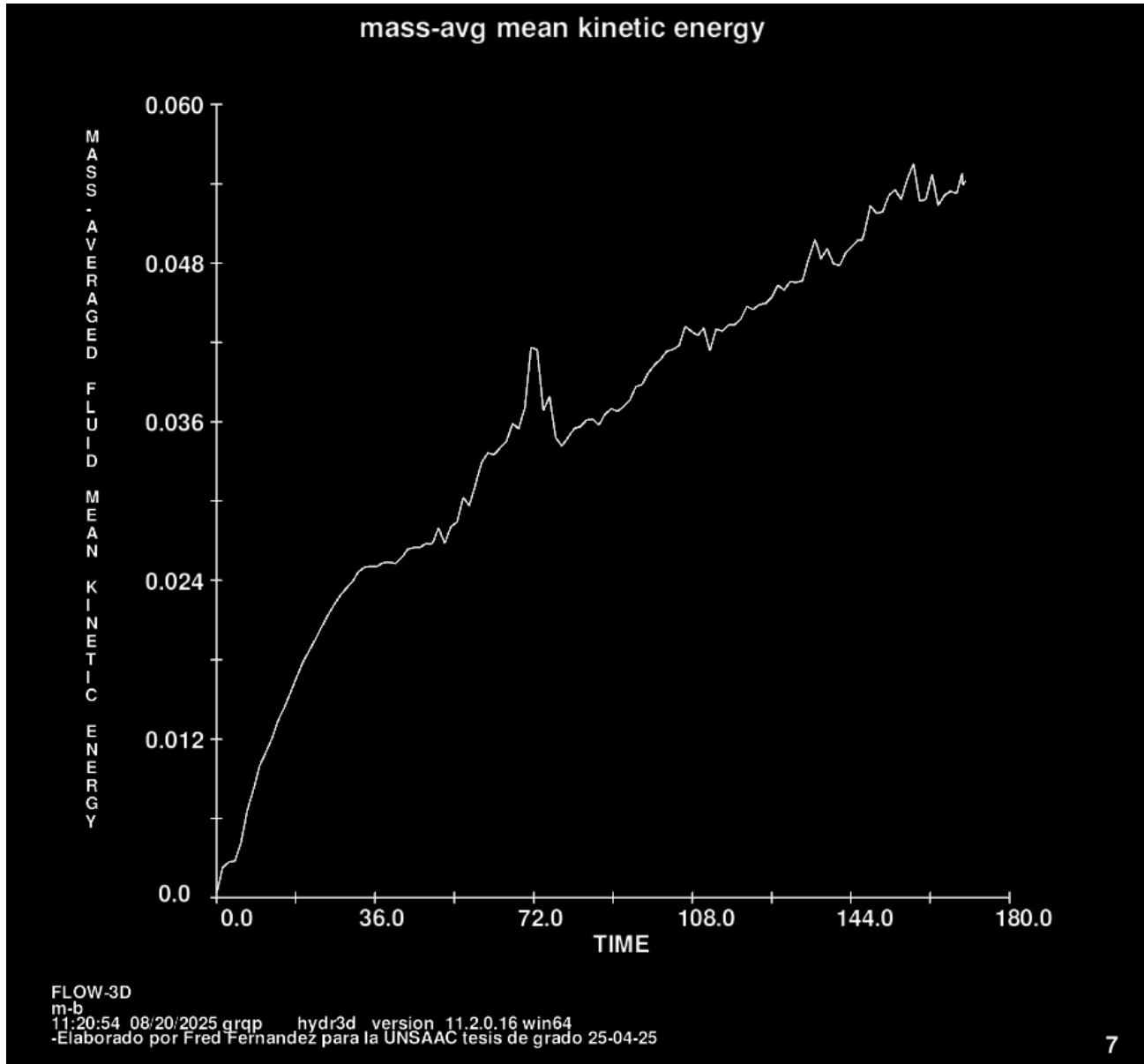


*Nota:* Evolución del área de la superficie libre del fluido (fluid surface area) durante la simulación numérica transitoria en FLOW-3D. Se observa un incremento significativo del área de superficie libre durante la etapa inicial de la simulación, asociado al llenado progresivo del dominio y al establecimiento del régimen hidráulico en el canal de mezcla rápida y las cámaras de floculación. Este incremento refleja la activación de fenómenos hidráulicos como cambios de nivel, recirculaciones y desarrollo de la superficie libre bajo condiciones transitorias. Posteriormente, a partir de aproximadamente 60–80 s, el área de la superficie libre presenta fluctuaciones acotadas alrededor de un valor medio estable, sin incrementos sostenidos ni oscilaciones crecientes. Este comportamiento indica que la geometría de la superficie libre se estabiliza, evidenciando que el flujo alcanza un estado estadísticamente estable. La ausencia de variaciones abruptas confirma una adecuada resolución de la

interfaz fluido-aire, una correcta conservación de masa y la estabilidad numérica del modelo hidráulico implementado.

**Figura 113**

*Energía cinética media del fluido VS Tiempo*

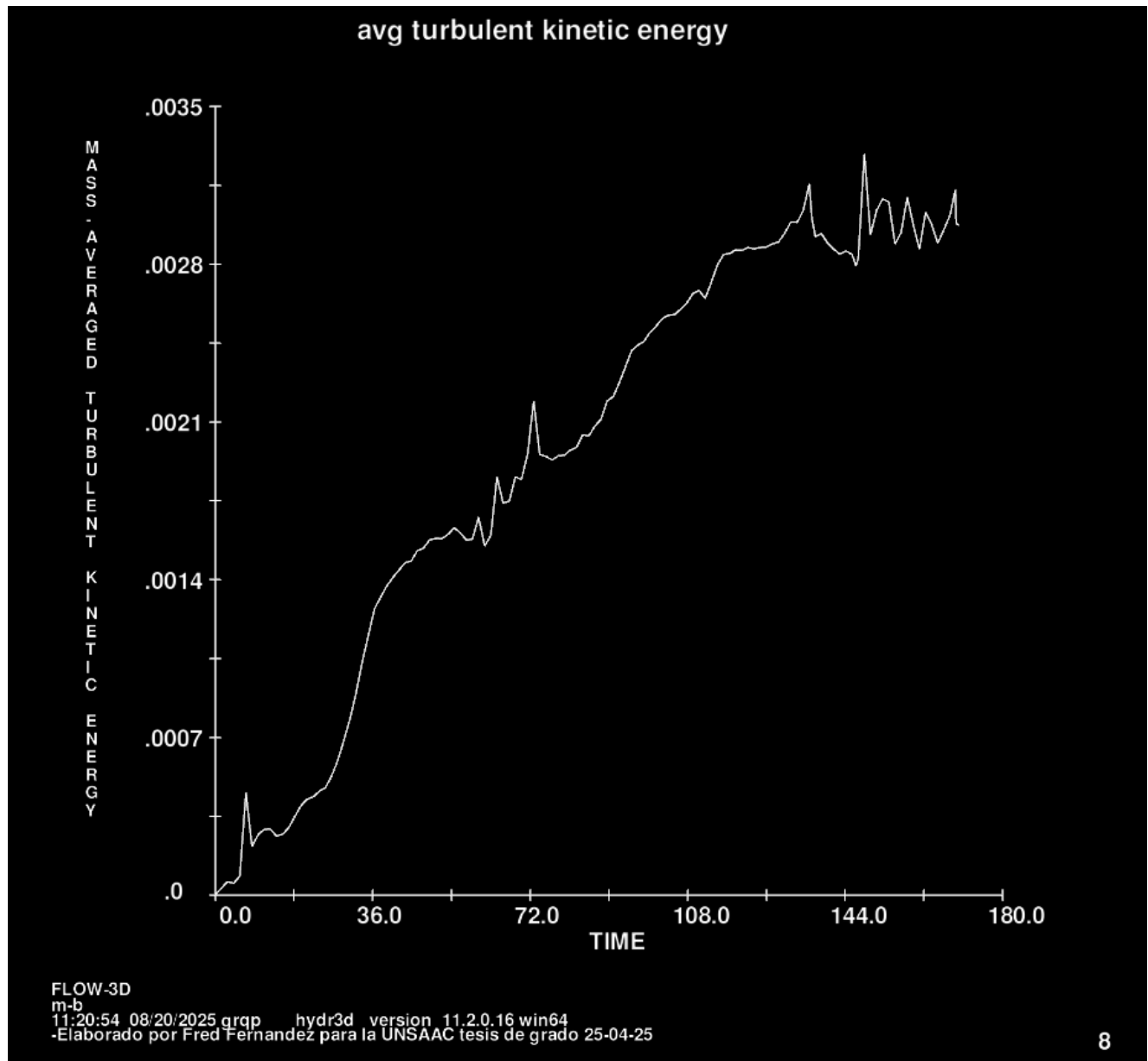


*Nota:* Evolución de la energía cinética media del fluido ponderada por masa (mass-averaged mean kinetic energy) durante la simulación numérica transitoria en FLOW-3D. Se observa un incremento progresivo de la energía cinética media desde valores cercanos a cero hasta magnitudes del orden de 0.05–0.055 J/kg, asociado al establecimiento del régimen hidráulico bajo la condición de caudal impuesto y al desarrollo del campo de velocidades dentro del dominio. Durante la etapa inicial, el crecimiento es más pronunciado, reflejando el proceso de llenado y aceleración del flujo; posteriormente, la variable presenta fluctuaciones acotadas alrededor de una tendencia creciente suavizada, sin oscilaciones divergentes ni comportamientos erráticos. Este patrón indica que el flujo

alcanza un estado estadísticamente estable, en el cual la energía cinética media se mantiene controlada y físicamente consistente con el régimen de operación del sistema. La ausencia de picos abruptos o incrementos incontrolados confirma la estabilidad numérica del modelo y la correcta resolución de la dinámica del flujo, siendo los valores obtenidos representativos del comportamiento hidráulico real del sistema analizado.

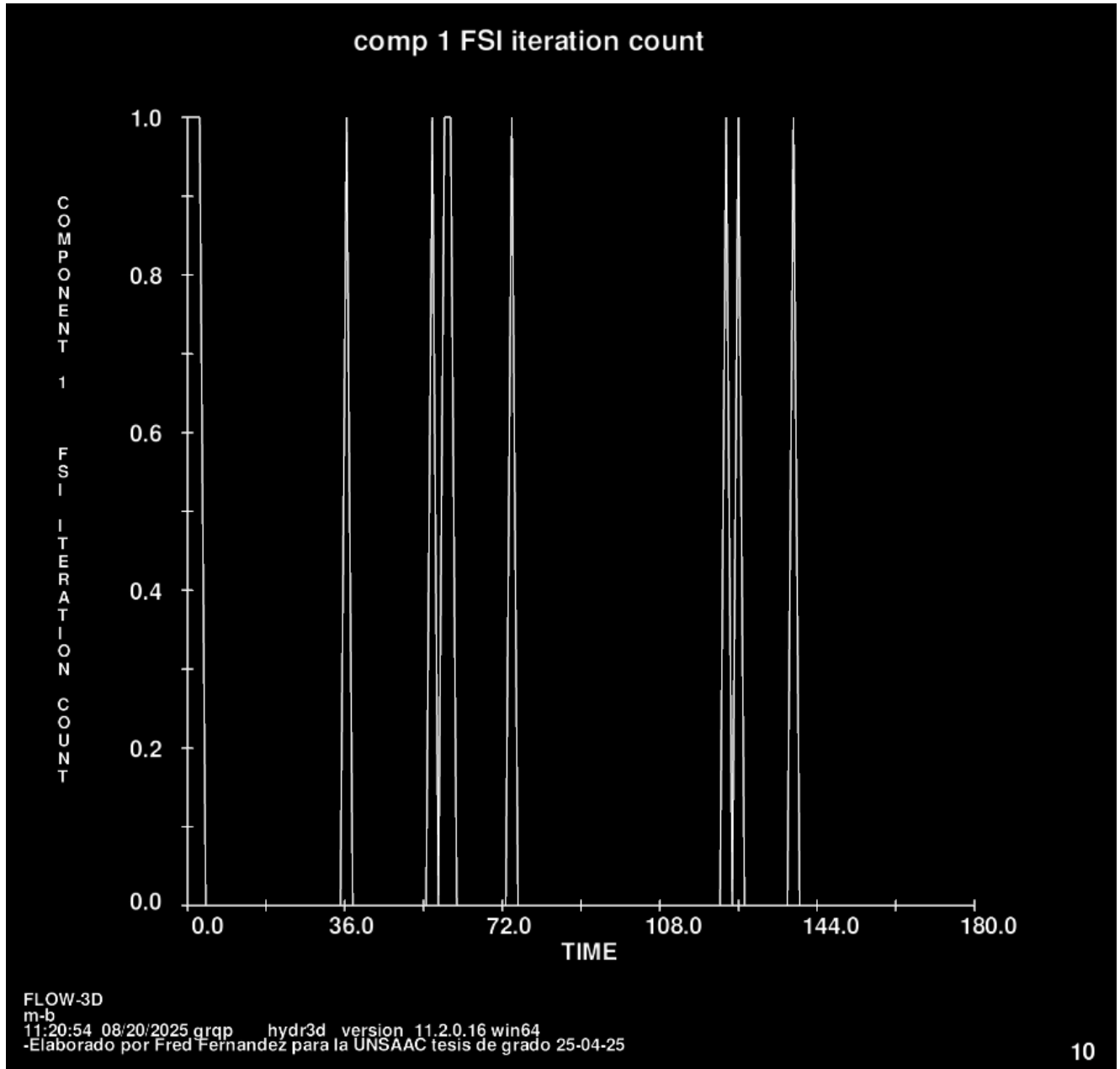
**Figura 114**

*Energía cinética turbulenta media VS Tiempo*



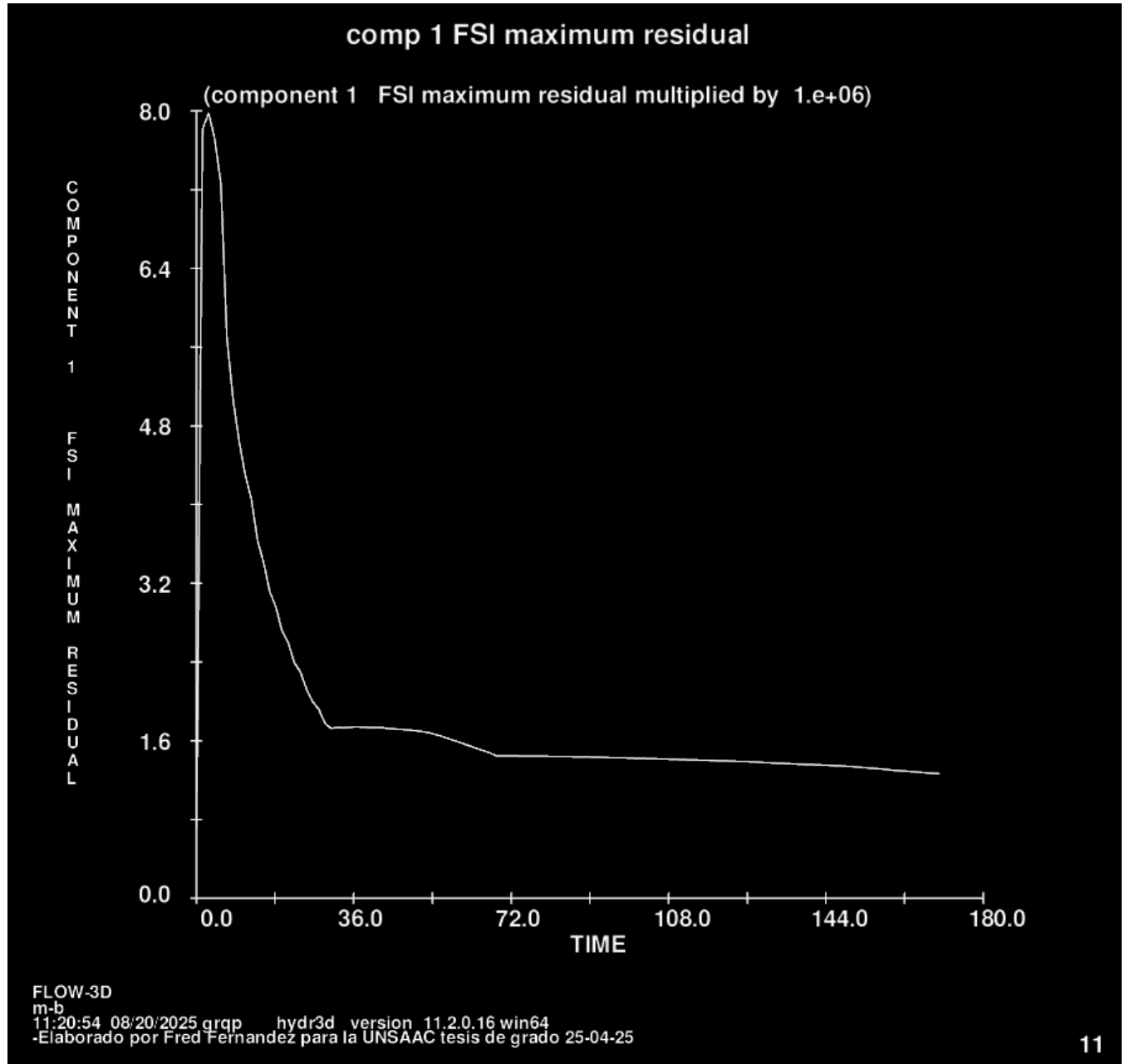
*Nota:* La energía cinética turbulenta media aumenta gradualmente hasta estabilizarse en torno a  $\approx 3.0 \times 10^{-3}$ , confirmando la presencia de un régimen turbulento sostenido. Las oscilaciones observadas reflejan la interacción del flujo con las placas y la dinámica propia del proceso de floculación.



**Figura 115***Conteo de Iteraciones FSI VS Tiempo*

10

*Nota:* El conteo de iteraciones FSI para el componente 1 se mantiene en 1 por ciclo de acoplamiento, evidenciando una convergencia inmediata del modelo. Este comportamiento confirma la estabilidad del acoplamiento fluido–estructura y la correcta transmisión de cargas hidrodinámicas a las placas del floculador.

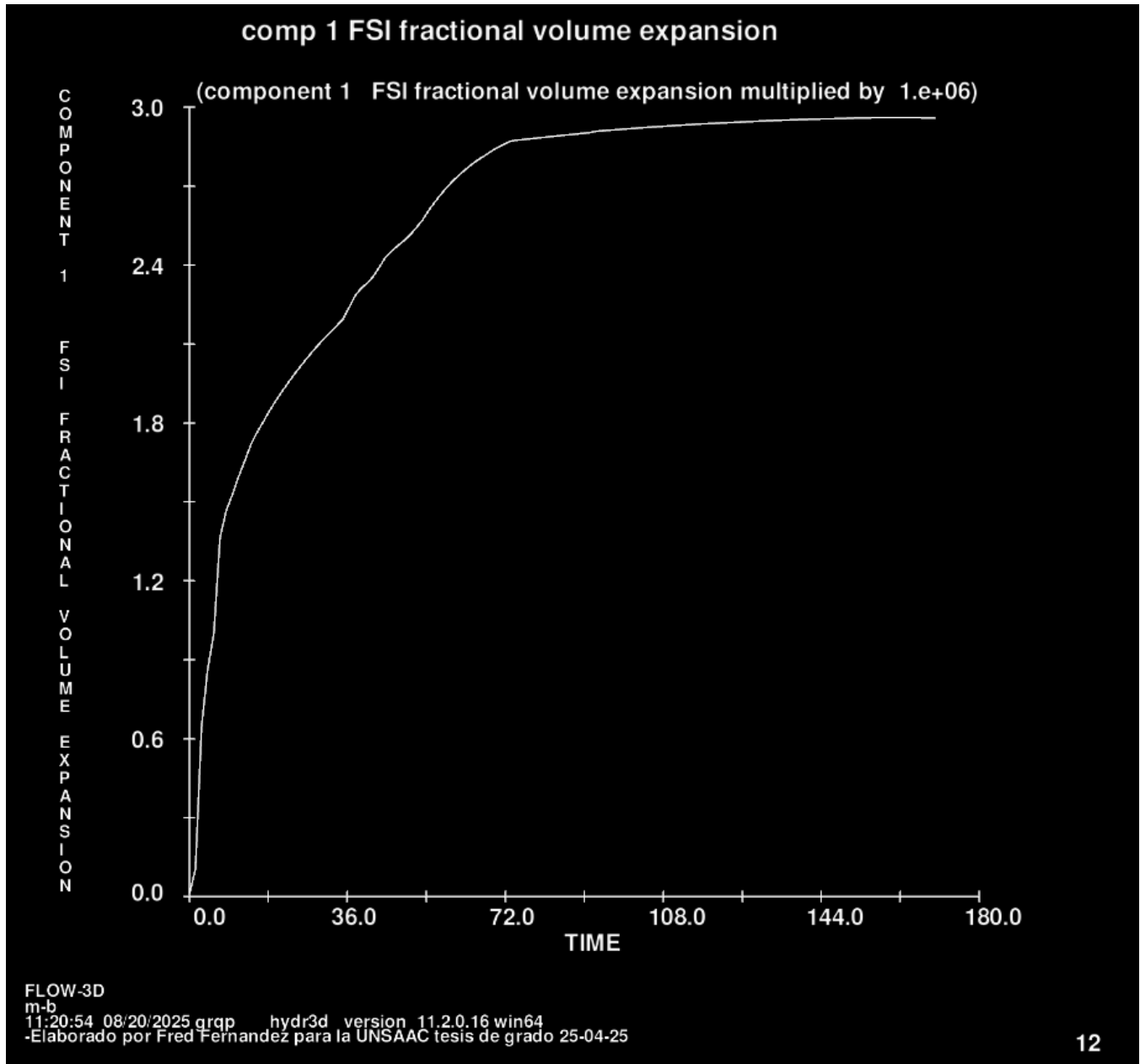
**Figura 116***Residuo maximo del acoplamiento FSI VS Tiempo*

11

*Nota:* El residual máximo del acoplamiento FSI para el componente 1 desciende desde  $\approx 8.0$  hasta estabilizarse en torno a  $1.5 \times 10^6$ , mostrando una clara reducción de error. Este resultado confirma la adecuada convergencia del acoplamiento fluido–estructura durante la simulación.

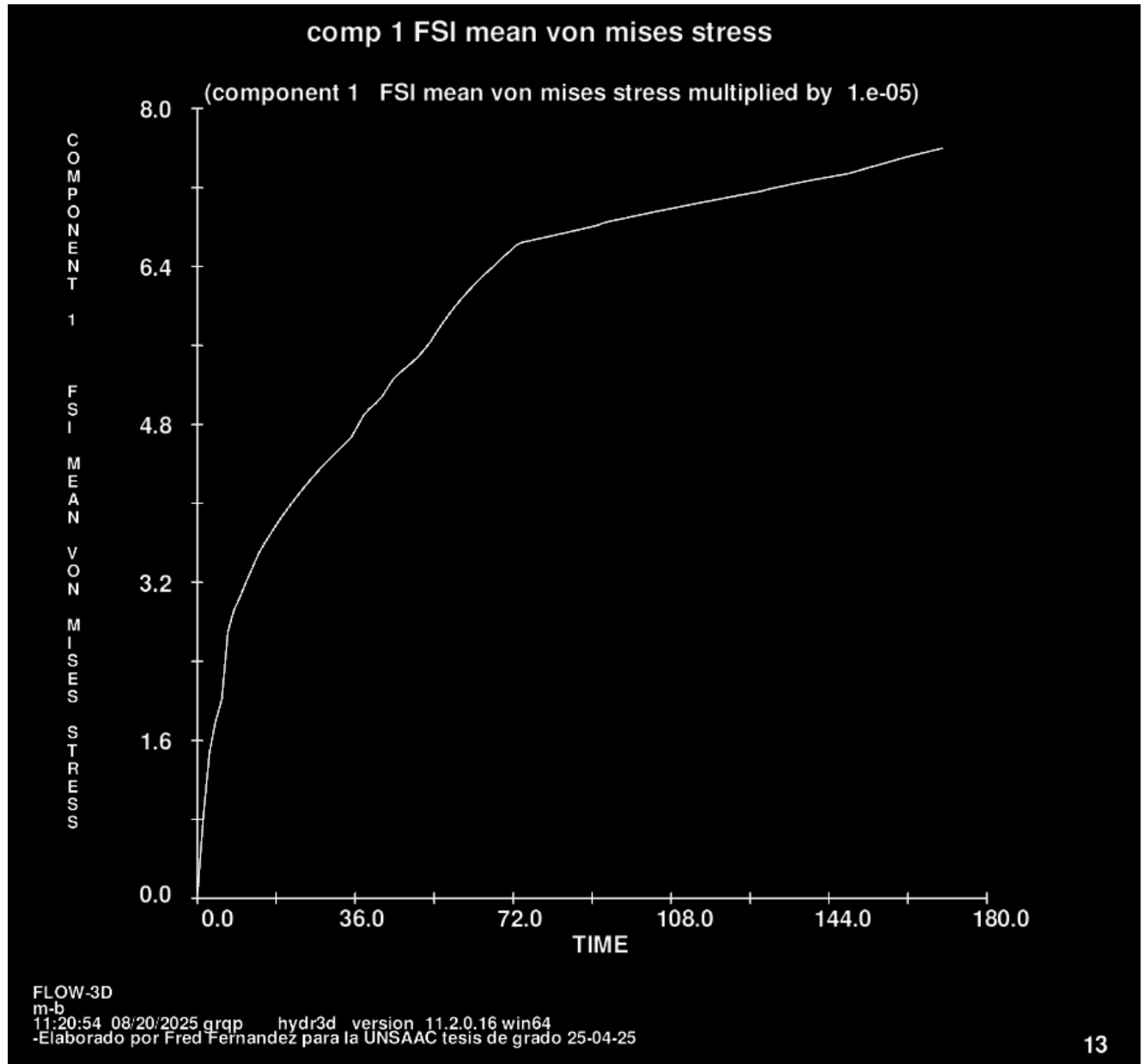
**Figura 117**

*Expansión fraccional de volumen de la geometría VS Tiempo*



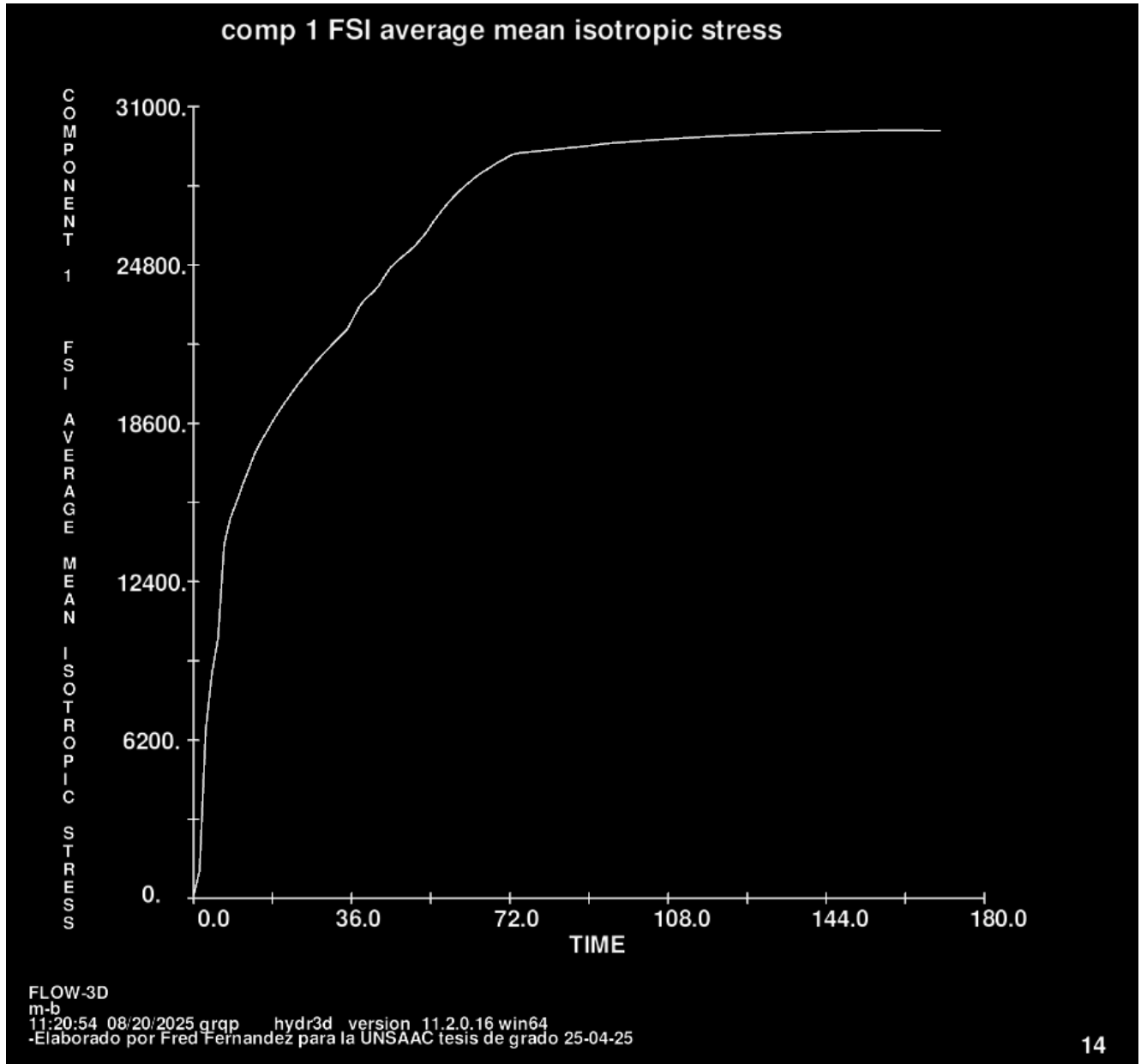
12

*Nota:* La expansión fraccional de volumen del componente 1 alcanza un valor máximo de  $\approx 3.0 \times 10^{-6}$ , estabilizándose hacia el final de la simulación. Este resultado confirma una deformación estructural mínima y controlada, coherente con la estabilidad del acoplamiento fluido-estructura.

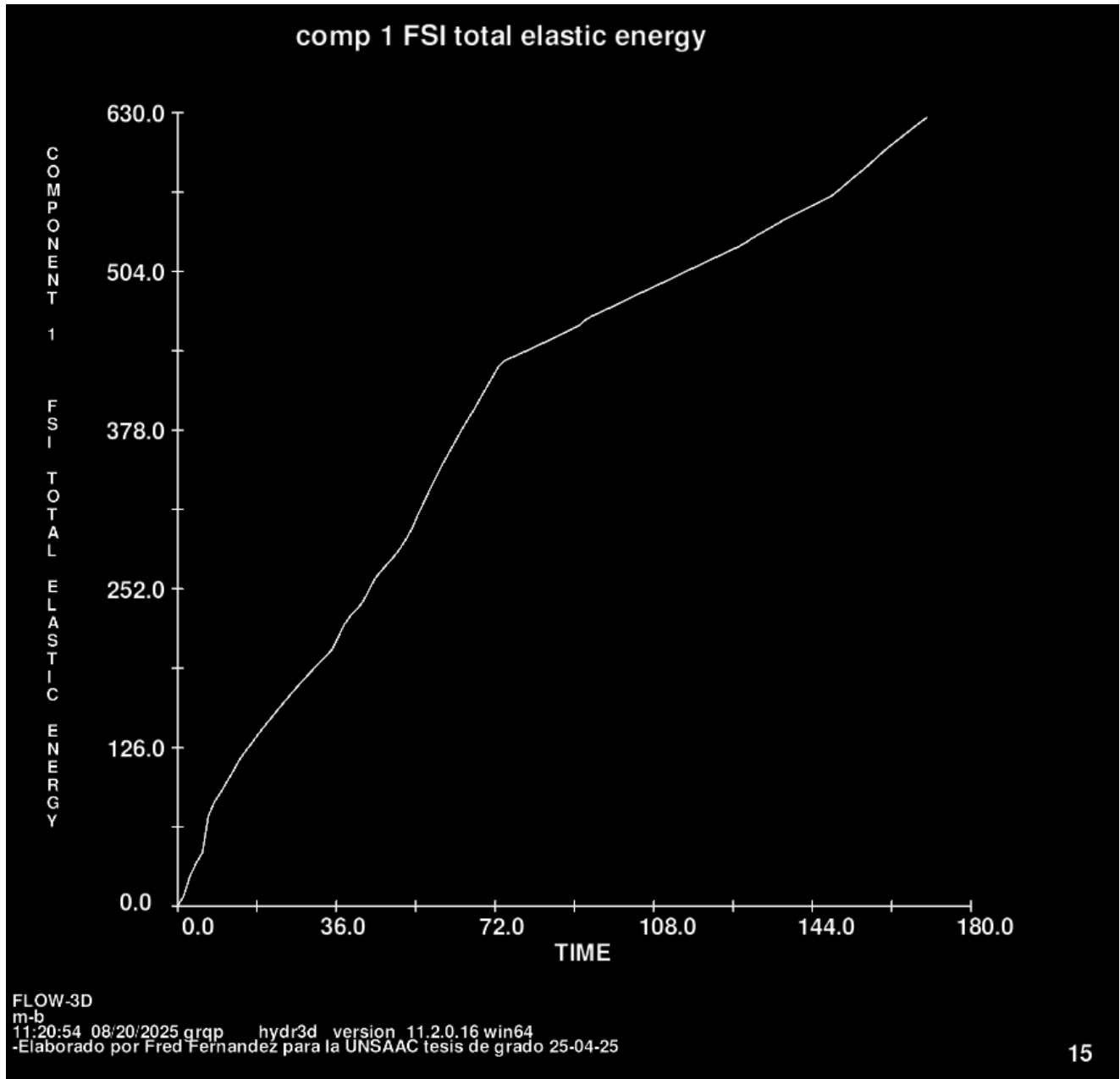
**Figura 118***Esfuerzo medio de von Mises en la geometría VS Tiempo*

13

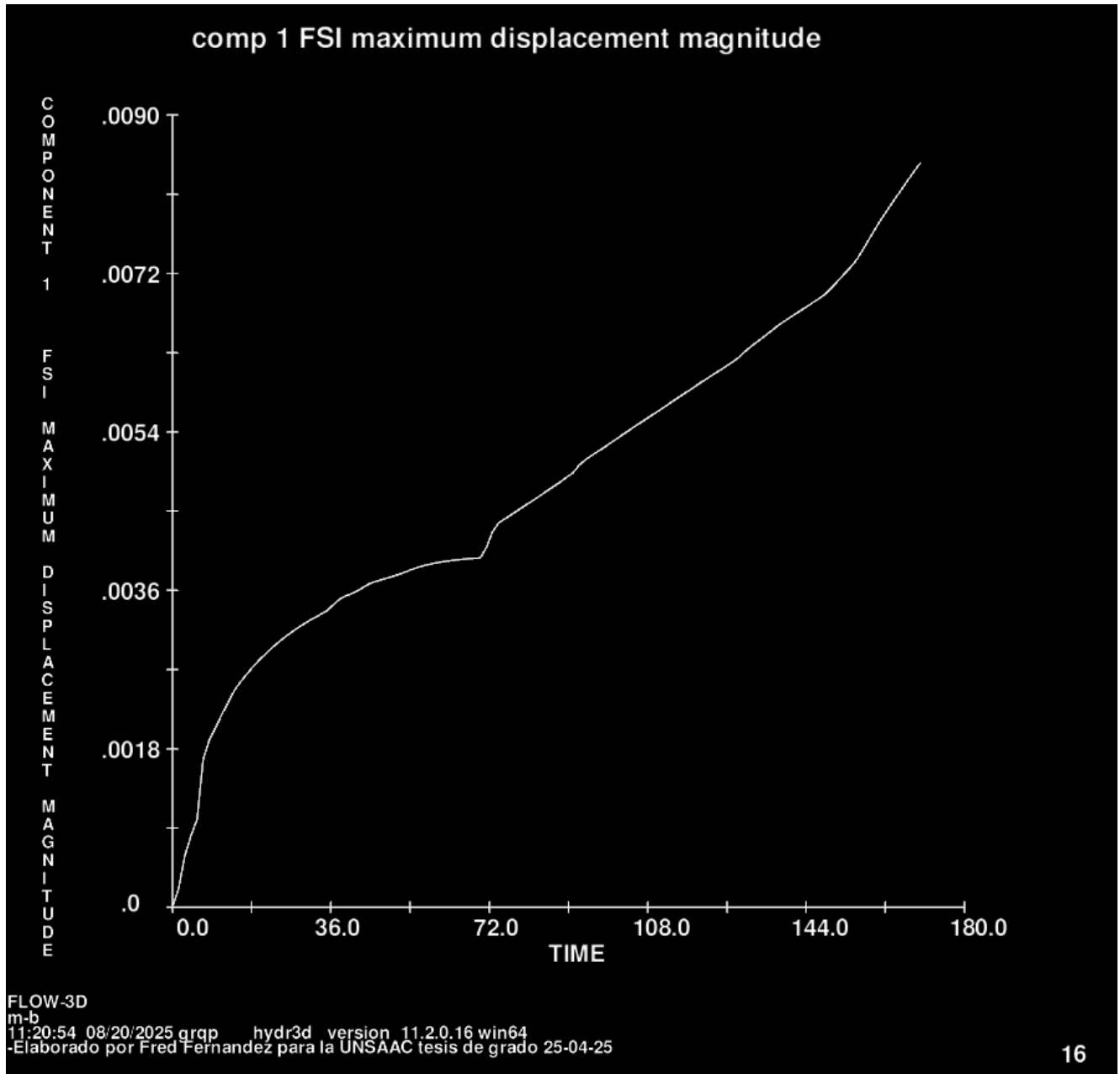
*Nota:* El esfuerzo equivalente de von Mises es una magnitud escalar que integra los esfuerzos normales y cortantes que actúan simultáneamente sobre un elemento estructural, permitiendo representar el estado tensional de forma global. Este esfuerzo se emplea como criterio para evaluar la respuesta mecánica del material frente a cargas complejas, ya que permite comparar directamente el estado de esfuerzos inducido con la capacidad resistente del material. En el análisis de interacción fluido–estructura, el esfuerzo de von Mises resulta especialmente útil para identificar zonas críticas donde la acción del flujo genera mayores demandas estructurales, sin necesidad de analizar cada componente de esfuerzo por separado.

**Figura 119***Esfuerzo medio isótropo de la geomatría VS Tiempo*

*Nota:* El esfuerzo medio isótropo del componente 1 se estabiliza alrededor de  $3.0 \times 10^4$  Pa, reflejando la presión hidrostática promedio ejercida por el flujo sobre las placas. La estabilización confirma un régimen de carga constante y coherente con el comportamiento hidrodinámico del floculador.

**Figura 120***Energía elástica total FSI VS Tiempo*

*Nota:* La energía elástica total del componente 1 se incrementa progresivamente hasta alcanzar  $\approx 6.3 \times 10^2$ , lo que refleja la absorción continua de energía por parte de las placas bajo la acción del flujo. Este comportamiento confirma la transferencia efectiva de cargas hidrodinámicas y la respuesta estructural en régimen elástico.

**Figura 121***Desplazamiento máximo de la geometría VS Tiempo*

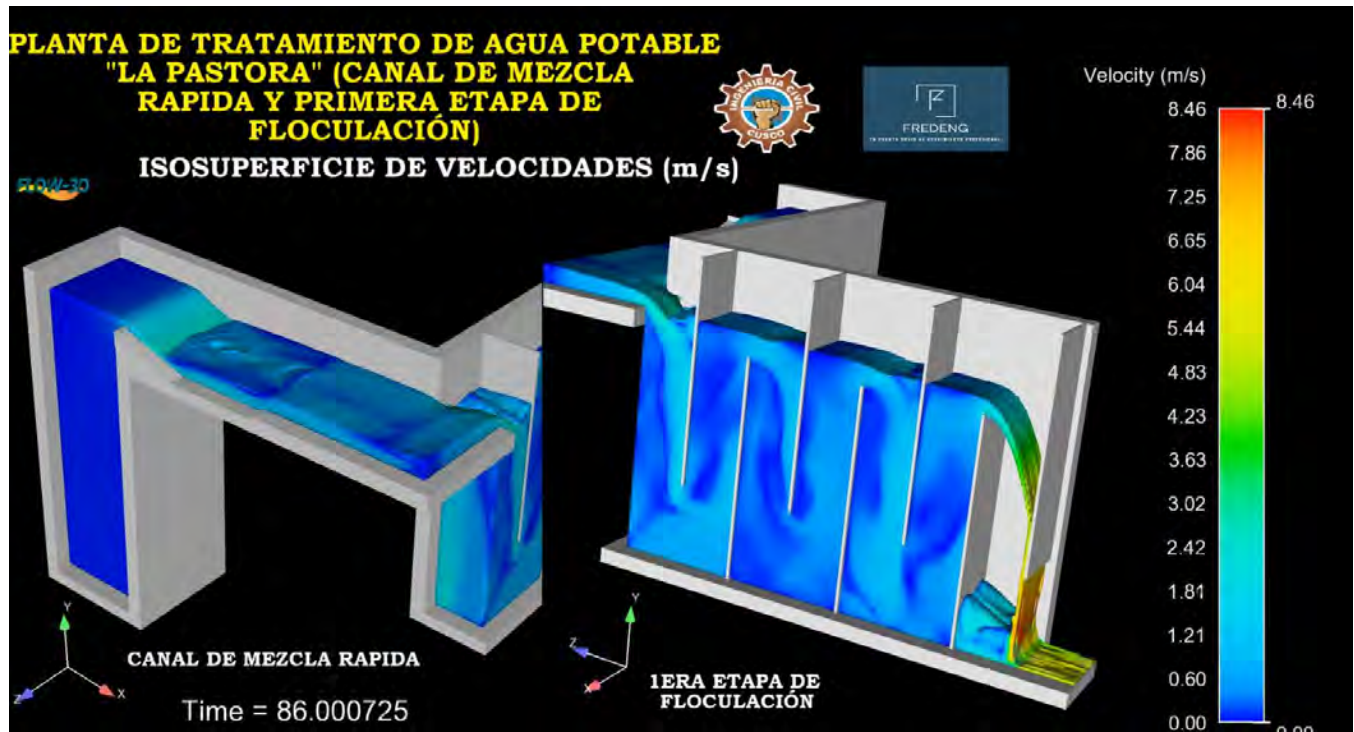
*Nota:* El desplazamiento máximo del componente 1 alcanza aproximadamente  $9.0 \times 10^{-3}$  m, evidenciando una deformación progresiva y estable bajo la acción del flujo. Este nivel de desplazamiento es bajo en términos estructurales, pero confirma la transferencia efectiva de cargas hidrodinámicas hacia las placas.

Los resultados de velocidad postprocesados fueron los siguientes:

Primero se ha postprocesado las isosuperficies, para ver el comportamiento general del fluido

**Figura 122**

*Resultados de isosuperficies de velocidad en primera etapa de floculación*

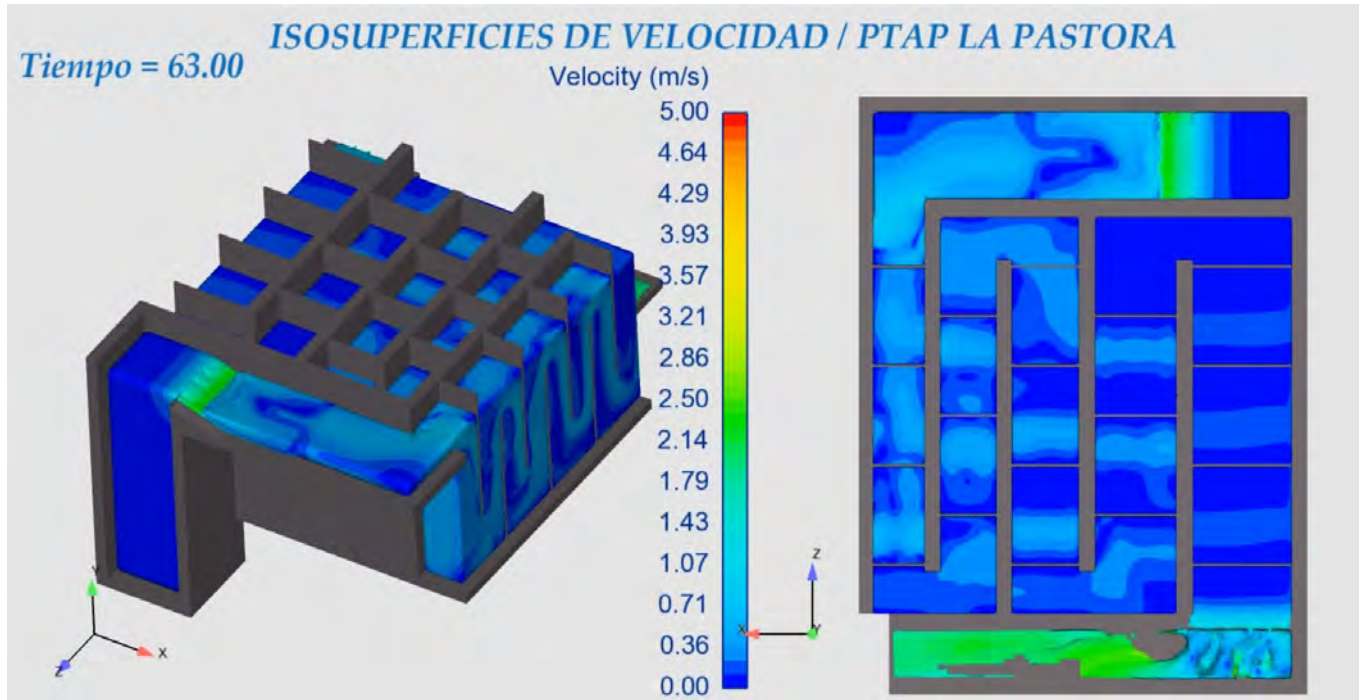


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente las isosuperficies de velocidad de la primera cámara de floculación



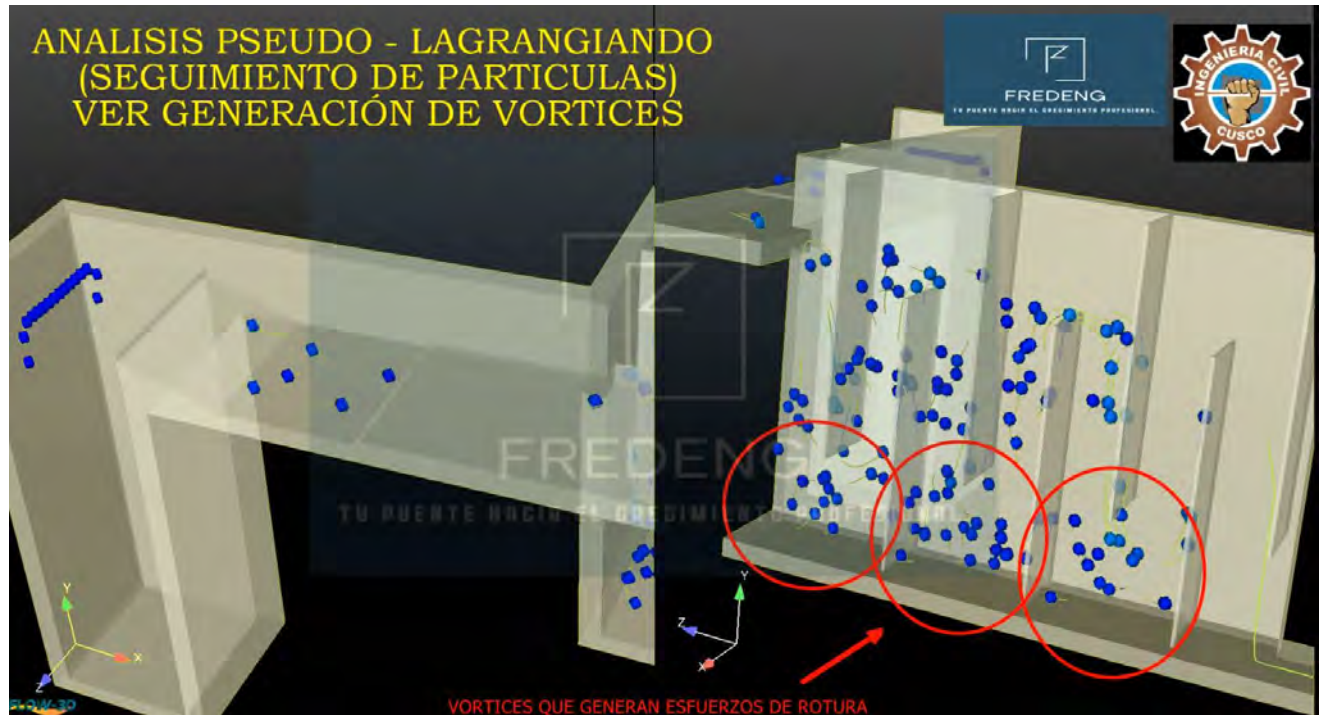
**Figura 123**

*Isosuperficies de velocidad de todo el dominio*

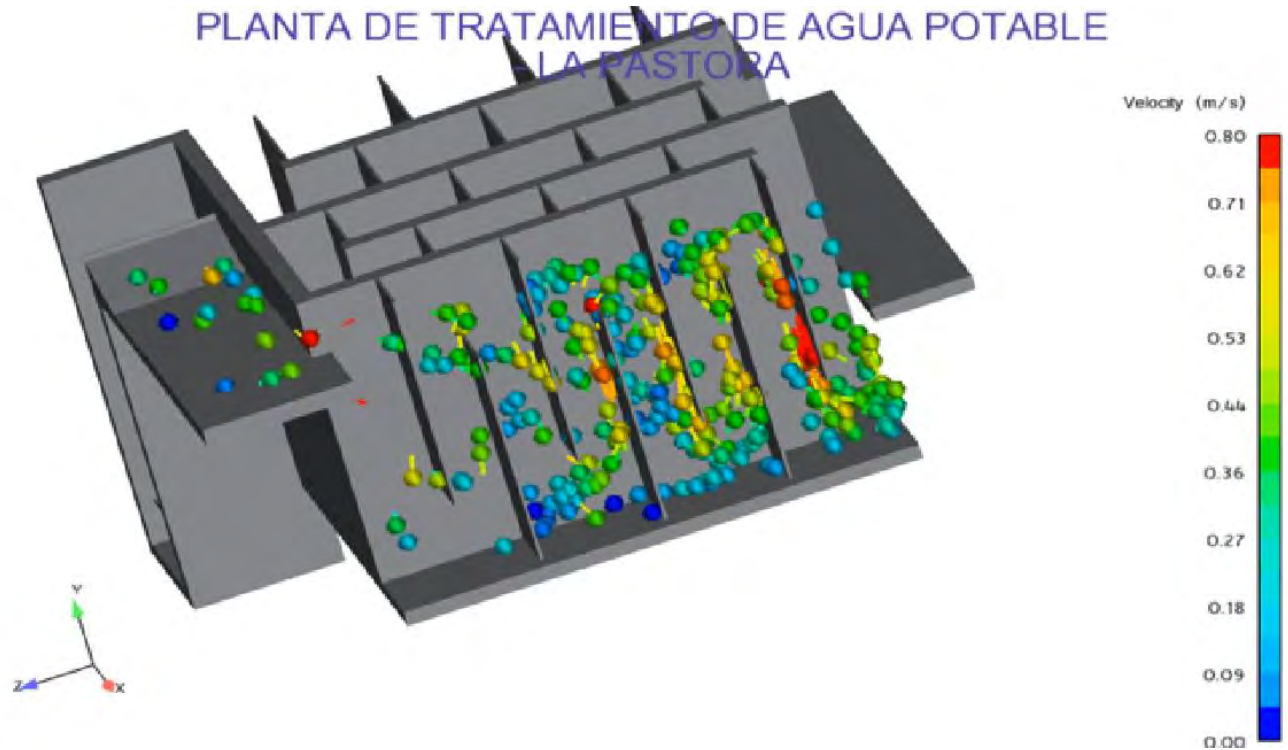


*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente las isosuperficies de velocidad de todo el dominio computacional de simulación

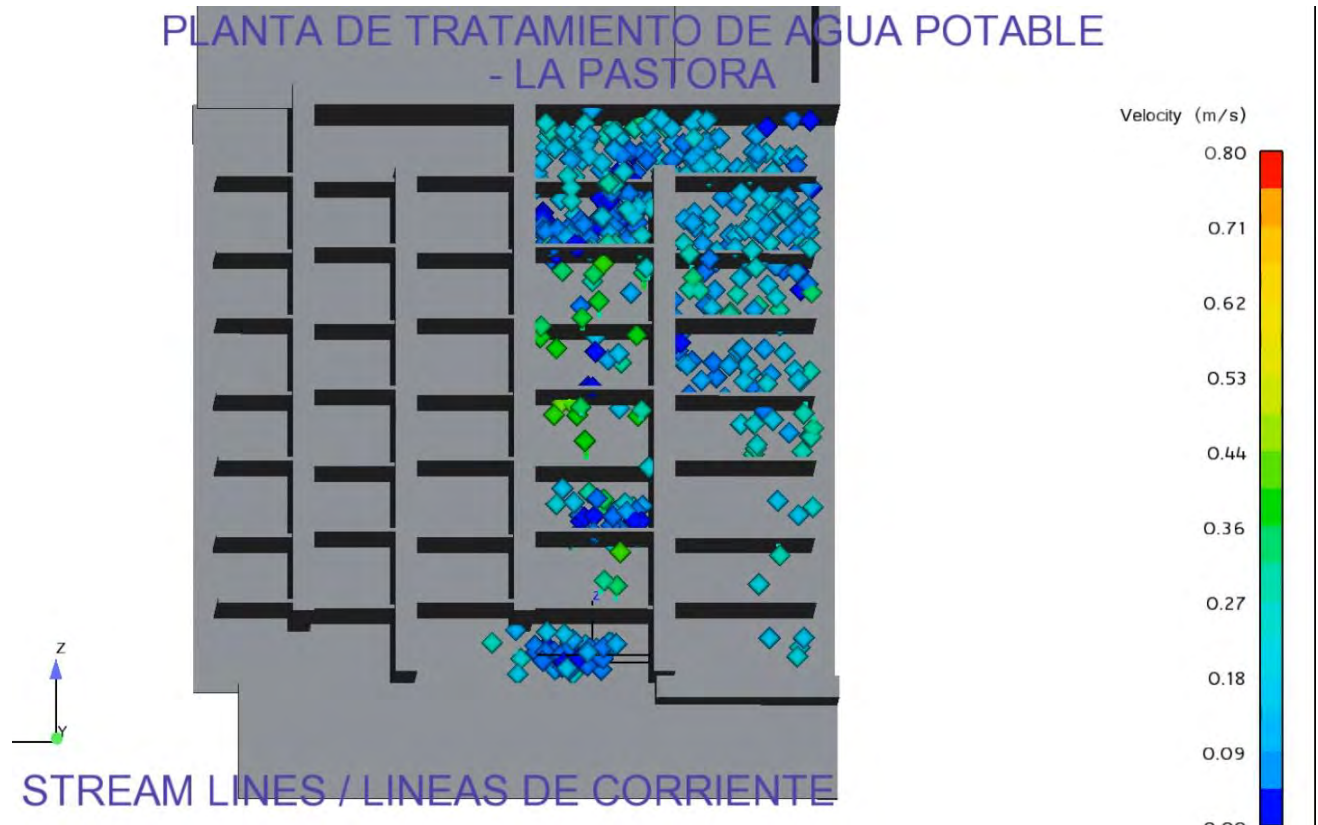
Lo relevante es ver la generación de turbulencia en el fluido en el modelo es por ello que se procesa los vórtices generados por el flujo, como se ve en las siguientes figuras:

**Figura 124***Vorticidad en las placas de floculación*

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver un análisis por partículas gráficamente en la primera cámara de floculación, es decir un modelo pseudo lagrangiano (seguimiento de partículas), en ahí se puede visualizar los vórtices generados en la zona de floculación.

**Figura 125***Vórtices en todo el dominio (1ra parte)*

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver un análisis por partículas gráficamente en las cámaras de floculación, es decir un modelo pseudo lagrangiano (seguimiento de partículas), en ahí se puede visualizar los vórtices generados en la zona de floculación.

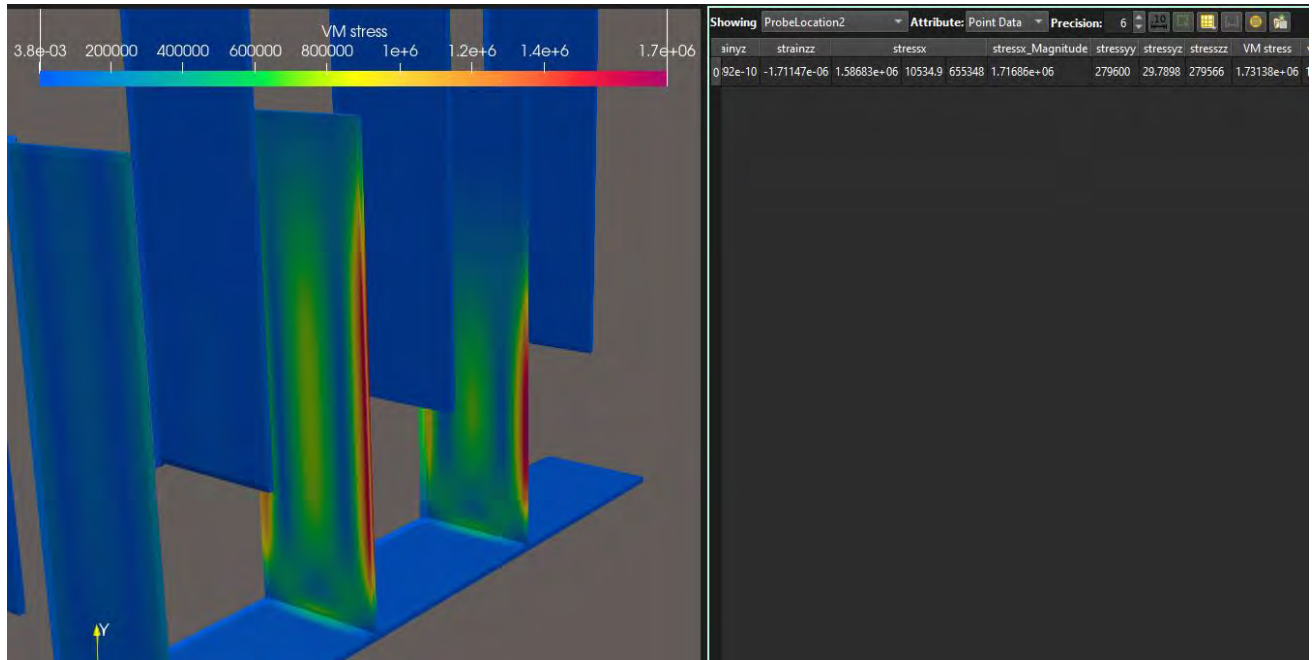
**Figura 126***Vórtices en todo el dominio (2da parte)*

*Nota:* En la siguiente figura se puede ver un análisis por partículas gráficamente en las cámaras de floculación, es decir un modelo pseudo lagrangiano (seguimiento de partículas), en ahí se puede visualizar los vórtices generados en la zona de floculación.

#### **5.1.4. Resultados de interacción fluido-estructura (FSI)**

Los resultados del análisis fluido estructura se han post procesado con el documento de salida .exo que es formato estándar y se puede postprocesar en software libre como Paraview, los resultados son los siguientes:

**Figura 127**  
*Post procesado en ParaView*

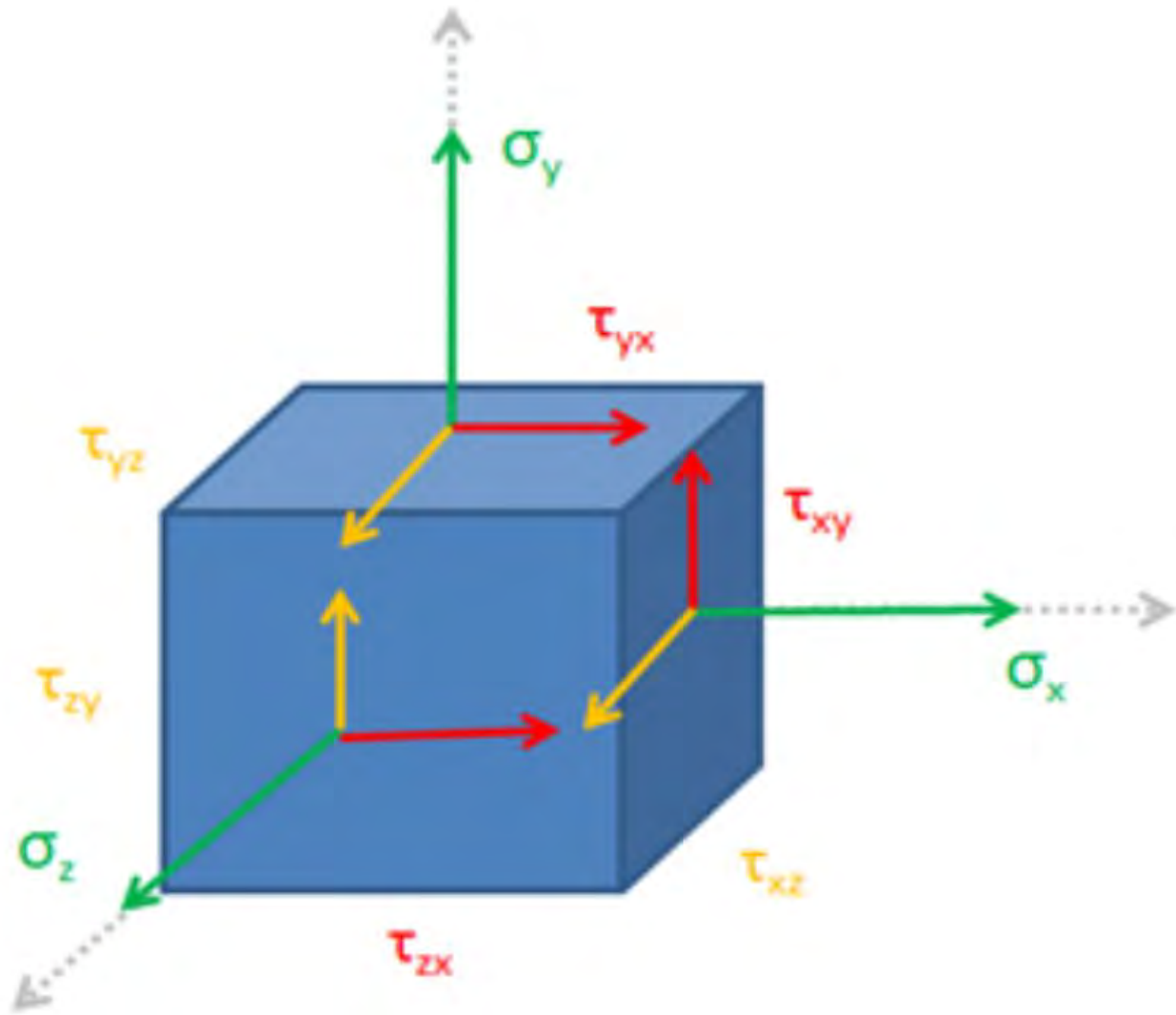


**Nota:** En la imagen se muestra el post procesamiento en la zona de conexión de las placas de floculación, donde se ve los valores a en el estado estadísticamente estable, para el presente estudio, nos va a servir hacer un filtrado de la información para obtener valores críticos (máximos) como se ve a continuación

Exportamos la información para analizar los máximos de los stresses, teniendo los siguientes resultados numéricos, considerando el marco de referencia de la siguiente figura:



**Figura 128**  
*Cubo de deformaciones*



*Nota:* En la figura se muestra un cubo de deformaciones (orientado según los ejes de referencia que estamos manejando) como idea de los esfuerzos resultantes de la simulación realizada

Una vez post procesado los resultados son los siguientes:

**Tabla 20**  
*Resultados numéricos de los esfuerzos máximos*

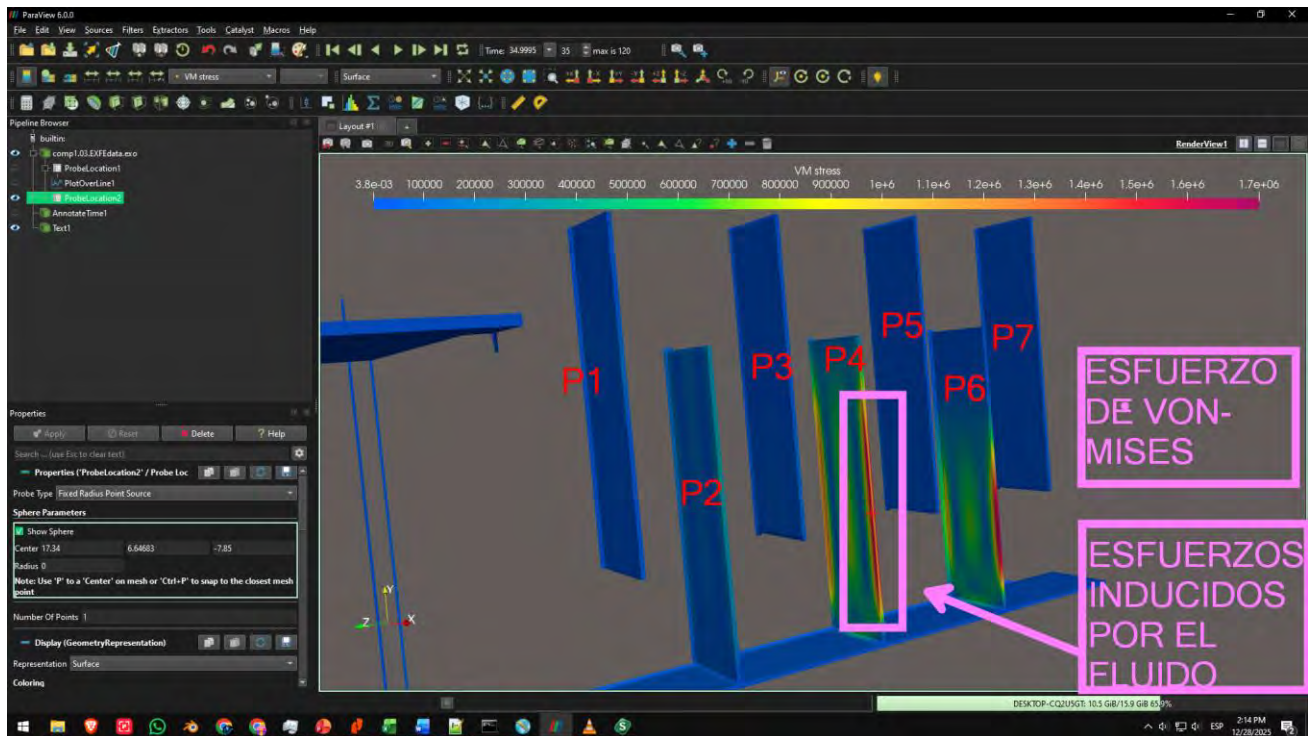
Stressxx	Stressxy	Stressxz	Stressyy	Stressyz	Stresszz
$1.5868 \times 10^6$	$1.0535 \times 10^4$	$6.5535 \times 10^5$	$2.7960 \times 10^5$	$3.0 \times 10^1$	$2.7957 \times 10^5$

*Nota:* En la siguiente tabla se presentan los resultados finales de los esfuerzos máximos en cada eje de referencia, se emplea unidades SI (Pa)

Lo cual concuerda con los resultados de simulación gráficos presentados a continuación.

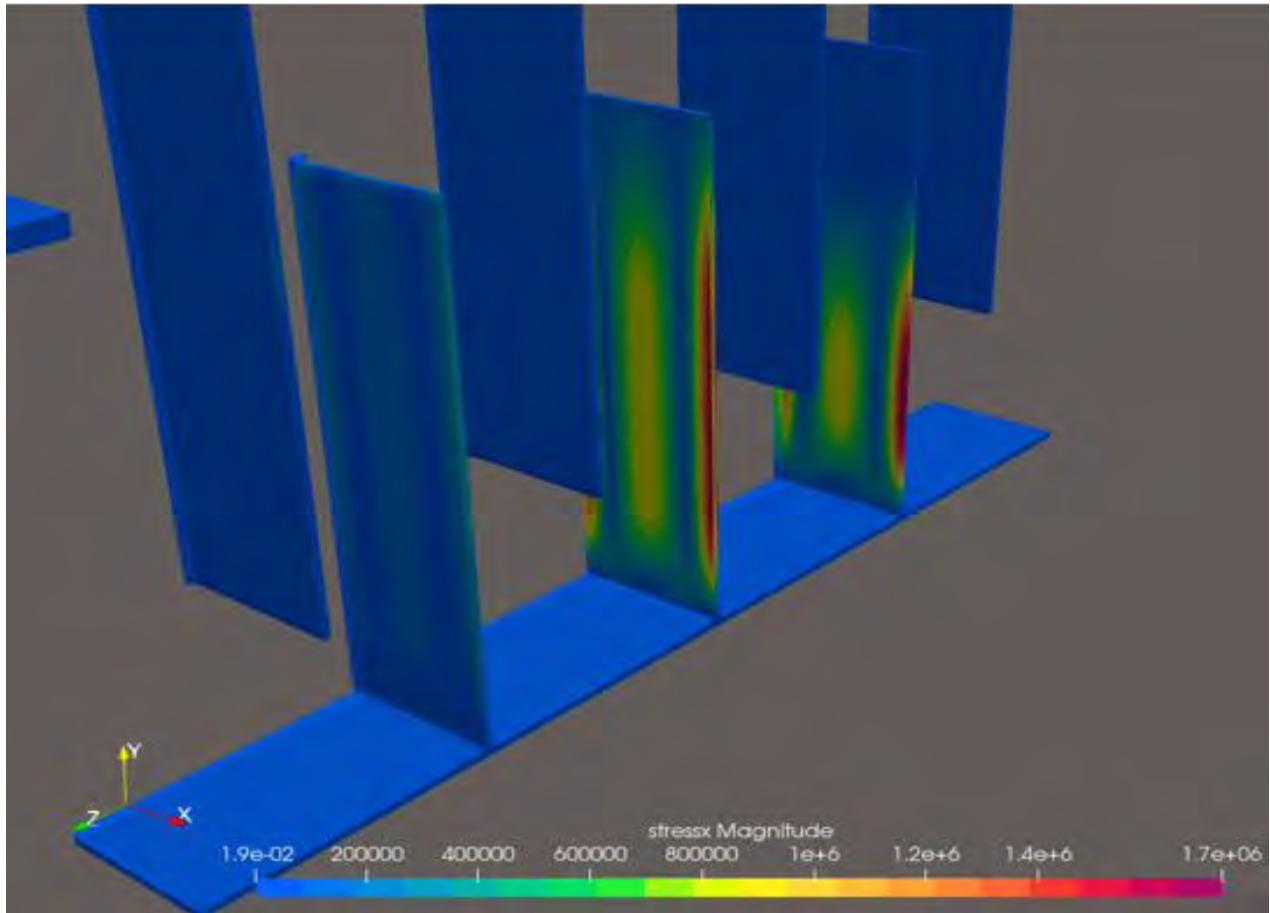
**Figura 129**

*Esfuerzos inducidos por el flujo (Esfuerzos de Von – Mises)*



*Nota:* En la siguiente figura se puede ver gráficamente los resultados posprocesados de esfuerzos inducidos por el fluido.

**Figura 130**  
*Esfuerzos XX*



*Nota:* En la figura se muestra los resultados post procesados de esfuerzos generados por el fluido en la dirección XX.

## 5.2. Pruebas de hipótesis

Con los datos obtenidos se analizará con el objetivo de determinar la falsedad y verdad de las hipótesis planteadas en el apartado de metodología.

### 5.2.1. *Formulación recapitulada de hipótesis*

Se toma en cuenta enunciados alternativos para tener una mayor facilidad de análisis



**Tabla 21**  
*Hipótesis alternativas (para análisis)*

Hipótesis	Enunciado alternativo ( $H_1$ )	Enunciado nulo ( $H_0$ )
Hipótesis general	El par flujo hidráulico ( $Q = 280 \text{ L/s}$ ) – material (concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ ) origina un campo de tensiones capaz de fracturar las placas del 4.º floculador.	El flujo no produce tensiones suficientes para fracturar las placas.
Hipótesis específica 1	Los esfuerzos normales $\sigma_{\max}$ superan la resistencia a tracción $f_t \rightarrow$ fisuración.	$\sigma_{\max} \leq f_t$
Hipótesis específica 2	Los esfuerzos cortantes $\tau_{\max}$ superan la resistencia al corte $\tau_{\text{adm}} \rightarrow$ deslizamiento / rotura.	$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{adm}}$

*Nota:* Esta estructura permite entender de mejor forma como analiza las hipótesis con el fin de dar un mejor veredicto

### 5.2.2. Configuración estructural y esquema de carga

#### 5.2.2.1. Geometría y discretización de la placa

**Tabla 22**  
*Propiedades geométricas para el análisis de hipótesis*

Parámetro	Valor / descripción	Fuente / comentario
Dimensiones nominales	1 000 mm $\times$ 1 000 mm $\times$ 40 mm (rectangular)	Expediente técnico
Ensamble	Placas colocadas <b>una sobre otra</b> en un <b>carril metálico</b> empernado a ambas paredes laterales	
Tipo de elemento para el FEA	Elementos hexaédricos 3-D	
Tamaño de celda	40 mm ( $\approx$ espesor), malla uniforme	

**Nota:** El hecho que se coloquen una sobre otras hace que la placa que idealmente debería trabajar como una sola tenga diferentes particiones, aparte el espesor podría ser mayor sin afectar la principal función hidráulica de esta

### 5.2.2.2. Propiedades del material

**Tabla 23**

*Propiedades del material de la geometría*

Propiedad	Concreto simple	Norma / ensayo
$f'_c$ (resistencia compresión)	210 kg cm <sup>-2</sup> ( $\approx 20,6$ MPa)	Expediente técnico
Módulo de elasticidad E	$\approx 22\,000$ MPa	Aprox. $E = 4\,700 f'_c{}^{0.5}$ (ACI 318 / RNE E.060)
Relación de Poisson $\nu$	0,20	Valor típico para hormigón
Densidad $\rho$	2 400 kg m <sup>-3</sup>	—
Resistencia a tracción $f_t$	$\approx 1,9$ MPa	$f_t \approx 0,33 f'_c{}^{0.5}$ (ACI 318)
Resistencia al corte $\tau_{ult}$	$\approx 2,0$ MPa	Estimada: $\tau_{ult} \approx 0,80 f_t$

**Nota:** El concreto empleado es estándar, el problema como veremos más adelante recae en los carriles de sujeción

### 5.2.2.3. Condiciones de contorno y anclaje

**Tabla 24**

*Condiciones de contorno de los baffles*

Aspecto	Descripción	Observación
Apoyo principal	Placa apoyada y atornillada a carriles metálicos	
Restricciones globales	Carriles empernados a las paredes $\rightarrow$ desplazamientos bloqueados en sus nodos de anclaje.	
Cara en contacto con fluido	100 % de la superficie $1 \times 1$ m expuesta al flujo.	
Flujo incidente	Régimen turbulento (modelo SST k- $\omega$ ).	CFD detecta recirculaciones locales

**Nota:** La sujeción es por carriles anclados a las paredes de concreto mediante pernos M14

### **5.2.3. *Análisis estructural del sistema de anclaje de la placa de floculación***

#### **5.2.3.1. Análisis estructural del sistema de anclaje de la placa de floculación**

El análisis estructural se centró en el sistema de anclaje de las placas de floculación (carriles y pernos), por tratarse del elemento estructural más susceptible frente a las solicitaciones inducidas por la dinámica del flujo.

Los resultados del posprocesamiento del modelo CFD–FSI, mediante el esfuerzo equivalente de Von Mises, evidencian que las mayores concentraciones de esfuerzo se localizan en la zona inferior de las placas, específicamente en la interfaz placa–carril.

Desde el punto de vista mecánico, esta concentración se explica debido a que las cargas hidrodinámicas inducidas por el flujo no se disipan directamente en el cuerpo del concreto, sino que se transfieren y concentran en los elementos de sujeción, los cuales actúan como el principal mecanismo de transmisión de fuerzas hacia la estructura portante.

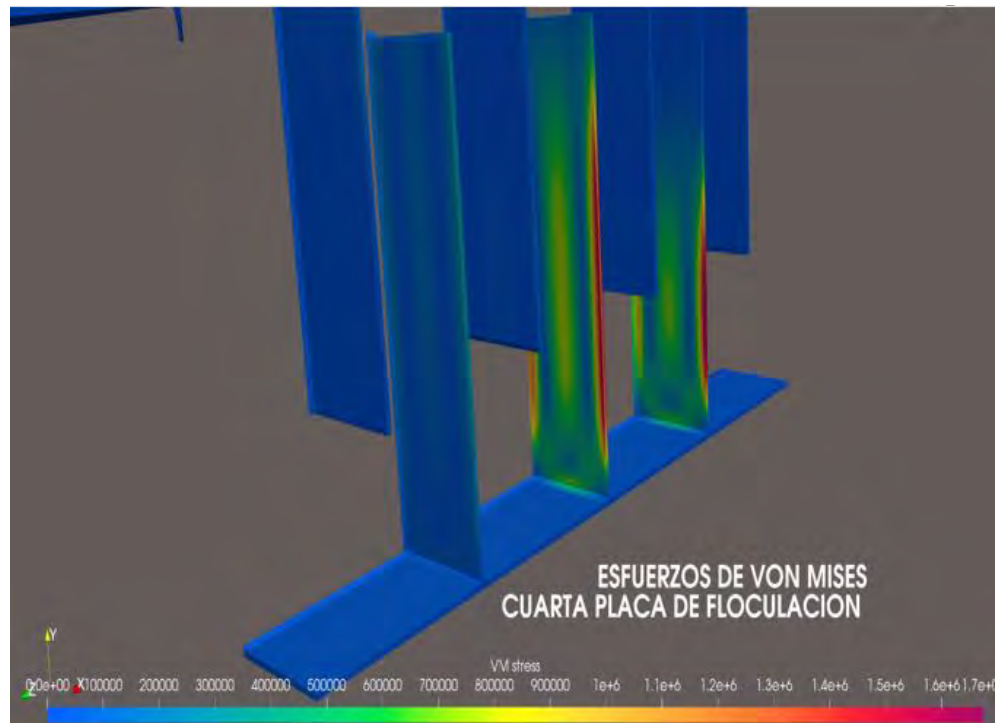
En consecuencia, el sistema de anclaje constituye el eslabón crítico<sup>5</sup> de la cadena resistente, razón por la cual el análisis estructural se orienta a la verificación de los pernos de anclaje conforme a los criterios establecidos en la Norma E.090.

---

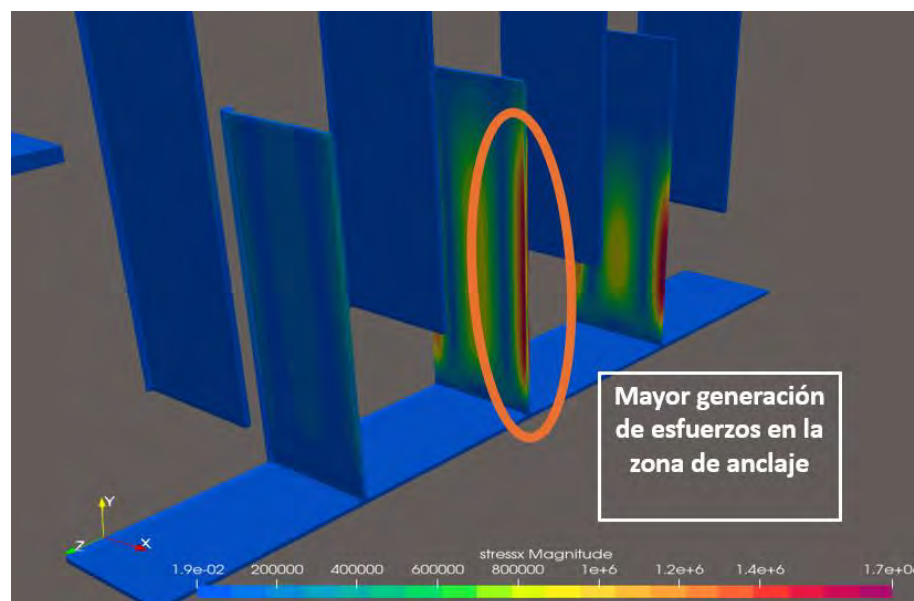
<sup>5</sup> Desde el punto de vista estructural, la placa de floculación trabaja como un elemento flexible sometido a cargas distribuidas generadas por la presión y el arrastre del flujo. Estas cargas producen esfuerzos de flexión y cortante que se cierran mecánicamente en la zona de empotramiento, es decir, en el carril de sujeción.

El carril y los pernos actúan como una condición de borde rígida, por lo que concentran las reacciones necesarias para equilibrar las solicitaciones hidrodinámicas. Este efecto es consistente con la teoría de la mecánica estructural y explica la aparición de máximos esfuerzos de Von Mises en dichas zonas.

**Figura 131**  
*Esfuerzos de Von - Misess*



**Figura 132**  
*Esfuerzos inducidos XX*



### 5.2.3.2. Propiedades geométricas y mecánicas del perno

El perno analizado corresponde a un perno M14, cuyas propiedades se definen a partir de sus dimensiones nominales y de las características mecánicas del acero grado 4.6.

El diámetro nominal del perno es de 14 mm, obteniéndose un área bruta:

$$A_b = \frac{\pi d^2}{4} = 153.94 \text{ mm}^2$$

Considerando la reducción de área debido a la presencia de rosca, se adopta un área resistente equivalente al **75 % del área bruta**, resultando:

$$A_{resis} = 0.75 * A_b = 115.45 \text{ mm}^2$$

La resistencia última del acero se toma como:

$$f_u = 400 \text{ MPa}$$

### 5.2.3.3. Resistencia nominal del perno según la Norma E.090

De acuerdo con la Norma E.090, las resistencias nominales del perno se determinan mediante las siguientes expresiones:

**Resistencia nominal a corte:**

$$R_{n,V} = 0.6 * f_u * A_{resis} = 27.71 \text{ kN}$$

**Resistencia nominal a tracción:**

$$R_{n,T} = 0.75 * f_u * A_{resis} = 64.64 \text{ kN}$$

Estos valores representan la capacidad nominal del perno frente a acciones de corte y tracción, respectivamente.

### 5.2.3.4. Determinación de las fuerzas actuantes a partir del modelo CFD–FSI

El análisis CFD – FSI nos permitió determinar el tensor de esfuerzos en el nodo crítico de la placa de floculación, como se ve en la siguiente figura:

**Figura 133**  
*Tensor de Cauchy*

El tensor de Cauchy queda:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo tus valores:

$$\sigma = \begin{bmatrix} 1.5868 \times 10^6 & 1.0535 \times 10^4 & 6.5535 \times 10^5 \\ 1.0535 \times 10^4 & 2.7960 \times 10^5 & 3.0 \times 10^1 \\ 6.5535 \times 10^5 & 3.0 \times 10^1 & 2.7957 \times 10^5 \end{bmatrix} \text{ Pa}$$

**Nota:** Los valores fueron obtenidos de la simulación estadísticamente estacionaria, mediante el uso de Paraview, con la herramienta Probe en el nodo más crítico

De ahí tomamos los valores de interés para el análisis:

**Tabla 25**  
*Esfuerzos de diseño*

Esfuerzo normal máximo	Esfuerzo cortante máximo
$\sigma_{max} = 279\,566 \text{ Pa}$	$\tau_{max} = 655\,348 \text{ Pa}$

**Nota:** Los esfuerzos se tomarán en cuenta para el análisis, provienen de la simulación CFD – FSI

Calculamos el área bruta de una placa sujeta al carril:

$$A_b = 1m * 1m = 1m^2$$

Dado que las concentraciones de esfuerzo no se distribuyen uniformemente sobre toda la placa, se definió un área efectiva de influencia, correspondiente a la región donde se concentran los esfuerzos máximos. Esta área se estimó como el 40 % del área total de la placa, resultando:

$$A_{ef} = 0.40 * A_b = 0.40 m^2$$

A partir de ello, se determinaron las fuerzas resultantes inducidas por el flujo:

**Tabla 26***Fuerzas resultantes por el fluido*

Fuerza normal máxima	Fuerza cortante máxima
$F_N = \sigma_{max} * A_{ef} = 111.83 \text{ kN}$	$F_V = \tau_{max} * A_{ef} = 262.14 \text{ kN}$

**Nota:** El carril debe resistir **262.14 kN** de corte simultáneo con **111.83 kN** de tracción.

### 5.2.3.5. Transferencia de cargas al sistema de pernos

La placa transmite las cargas hidráulicas al carril metálico mediante contacto directo y fricción, por lo que no la totalidad de las fuerzas resultantes es transferida a los pernos de anclaje. En este contexto, se adopta un coeficiente de transferencia de carga:

$$\alpha = 0.50$$

De esta forma, las fuerzas efectivamente transmitidas al sistema de pernos son:

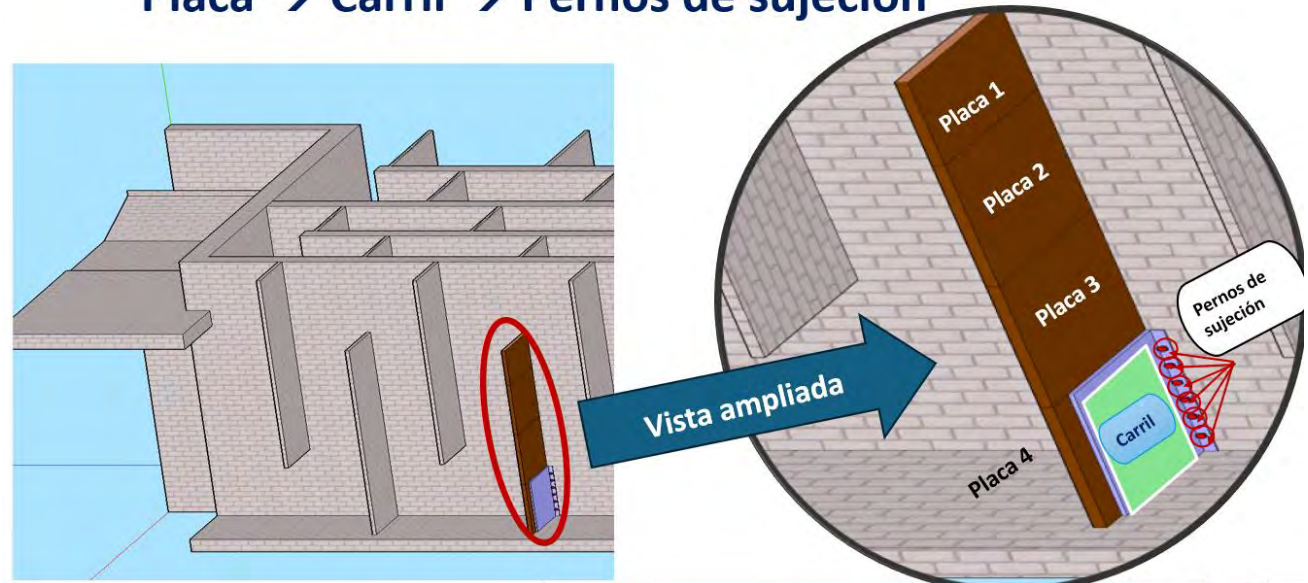
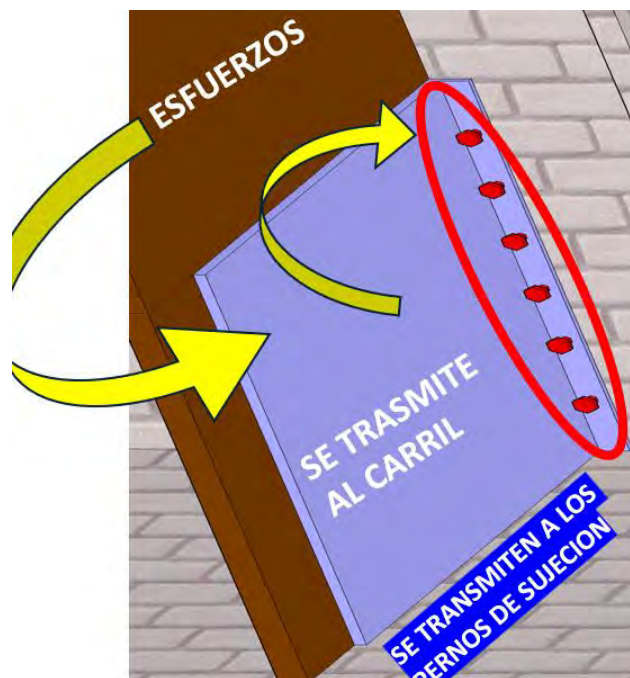
**Tabla 27***Fuerzas actuantes sobre los pernos*

Fuerza normal en pernos	Fuerza cortante en pernos
$F_{N,p} = \alpha * F_N = 55.91 \text{ kN}$	$F_{V,p} = \alpha * F_V = 131.07 \text{ kN}$

**Nota:** Estas son las fuerzas que tiene que soportar los pernos que soportan el carril de sujeción

**Figura 134***Mecanismo de falla del sistema*

**Mecanismo de falla,  
Placa → Carril → Pernos de sujeción**

**Figura 135***Sistema de transmisión de fuerzas*



### 5.2.3.6. Distribución de cargas entre pernos

El carril se encuentra fijado mediante **seis pernos**, asumiéndose una distribución uniforme de las cargas entre ellos. En consecuencia, las fuerzas máximas por perno resultan:

**Tabla 28**

*Fuerzas por cada perno*

Tracción por perno	Corte por perno
$N_{max} = \frac{F_{N,p}}{n} = 9.32 \text{ kN}$	$V_{max} = \frac{F_{V,p}}{n} = 21.84 \text{ kN}$

**Nota:** Estas son las fuerzas que tiene que soportar cada perno que soporta el carril de sujeción

### 5.2.3.7. Verificación del perno según criterio de interacción (Norma E.090)

La Norma E.090 establece que, para pernos sometidos simultáneamente a tracción y corte, debe cumplirse el siguiente criterio de interacción:

$$\frac{N_{max}}{R_{n,T}} + \frac{V_{max}}{R_{n,V}} \leq 1.0$$

Evaluando cada término:

**Tabla 29**

*Verificación según criterio de interacción*

Relación de tracción por perno	Relación de corte por perno
$\frac{N_{max}}{R_{n,T}} = 0.27$	$\frac{V_{max}}{R_{n,V}} = 0.79$
<b>Índice de Interacción</b>	$\frac{N_{max}}{R_{n,T}} + \frac{V_{max}}{R_{n,V}} = 1.06$ (Superior al límite normativo)

**Nota:** Estas son las relaciones por perno para tracción y corte, y el índice de interacción

### 5.2.3.8. Discusión de resultados

El índice de interacción obtenido es ligeramente mayor que la unidad, lo que indica que el sistema de anclaje se encuentra en una condición límite de resistencia. Este resultado no implica un colapso inmediato del sistema, sino que es consistente con un mecanismo de falla progresiva,

caracterizado por la acumulación de daño en los pernos de sujeción bajo condiciones operativas prolongadas.

La localización del daño observada en campo coincide con las zonas de mayor demanda estructural identificadas mediante el análisis CFD–FSI, lo que refuerza la hipótesis de que la dinámica del fluido desempeña un rol determinante en la generación de las sollicitaciones mecánicas que condujeron a la falla del sistema de anclaje.

#### 5.2.4. Veredicto de hipótesis

**Tabla 30**  
*Veredicto de hipótesis*

Hipótesis	Evidencia principal	Resultado
<b>H. General</b> – El flujo + material originan tensiones capaces de fracturar las placas del 4.º floculador.		<b>Verdadera</b>
<b>H. Específica 1</b> – Esfuerzos normales superan la resistencia.	El índice de interacción supera el valor normativo	<b>Verdadera</b>
<b>H. Específica 2</b> – Esfuerzos cortantes superan la resistencia.		<b>Verdadera</b>

**Nota:** La conexión placa-carril pierde capacidad por insuficiencia de pernos M12 Gr 4.6. la falla de los anclajes valida las tres hipótesis al producir la rotura efectiva del cuarto floculador.

### Conclusiones

- La dinámica del fluido influye significativamente en la generación de esfuerzos de rotura en el cuarto floculador, confirmándose la hipótesis general de la investigación mediante simulaciones acopladas CFD–FSI.

- El análisis hidráulico tridimensional evidenció campos de velocidad y presión no uniformes, los cuales inducen esfuerzos normales y cortantes relevantes sobre las placas de floculación, particularmente en condiciones correspondientes al caudal de diseño.

- La comparación entre los resultados numéricos y las mediciones experimentales de velocidad evidenció un error menor al 5 %, validando la confiabilidad del modelo CFD empleado y sustentando el análisis estructural posterior.

-El posprocesamiento estructural mostró que las mayores concentraciones de esfuerzo equivalente de Von Mises se localizan en la zona inferior de las placas, específicamente en la interfaz placa–carril de sujeción.

- El análisis estructural del sistema de anclaje, realizado conforme a la Norma E.090, permitió identificar que los pernos de anclaje constituyen el elemento estructural más crítico del sistema, al presentar un índice de interacción cercano a la unidad.

- El valor del índice de interacción obtenido ( $\approx 1.06$ ) indica una condición de sollicitación límite, coherente con la falla localizada observada en campo, sin que ello implique un colapso global de la estructura.

- En consecuencia, se concluye que la falla observada en el cuarto floculador está asociada principalmente a la insuficiente capacidad del sistema de anclaje, y no al fallo del cuerpo de concreto armado de las placas.

### **Recomendaciones**

- Revisar y rediseñar el sistema de anclaje de las placas de floculación, considerando pernos de mayor capacidad resistente, incremento del número de pernos o mejoras en la configuración del carril de sujeción.

- Incorporar en futuros diseños de floculadores análisis acoplados CFD–FSI que permitan identificar zonas críticas de esfuerzo desde la etapa de diseño y prevenir fallas localizadas.

- Realizar inspecciones periódicas del sistema de anclaje, priorizando los carriles y pernos de sujeción, especialmente bajo condiciones de operación cercanas al caudal de diseño.

- Evaluar la implementación de sistemas de sujeción alternativos o redundantes, que permitan una mejor distribución de las cargas inducidas por la dinámica del flujo.
- Complementar futuros estudios con ensayos mecánicos de los elementos de anclaje, a fin de reducir incertidumbres asociadas a propiedades reales del material y condiciones de instalación.
- Extender la metodología desarrollada en esta investigación a otras unidades hidráulicas de la planta, como canales y estructuras de transición, para fortalecer la gestión integral de la infraestructura.

### **Bibliografía**

- Arteaga, F. (2017). *ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA BOCATOMA MARÍA AUXILIADORA DEL RÍO QUIROZ CON MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL*.
- Arteaga-Acuña, F. (2017). *Análisis hidráulico de la bocatoma María Auxiliadora del río Quiróz con el modelo numérico tridimensional* [Universidad de Piura].  
<https://pirhua.udep.edu.pe/items/78566ea0-1f79-4b1d-8776-b5c882764830>
- Blazek, J. (2001). *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS*.  
[https://dl.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_46/ourdev\\_680516HBAK3D.pdf](https://dl.amobbs.com/bbs_upload782111/files_46/ourdev_680516HBAK3D.pdf)
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004a). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I: Vol. i*.  
<http://www.cepis.ops-oms.org>
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004b). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada* (Vol. 1).
- Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de Mecánica de Fluidos* (Vol. 01). Martin Domingo, Agustin.  
<https://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- Facelli Sanchez, P., & Mercado Hanco, L. (2022). *MUROS TROMBE CON INSERCIÓN DE MEDIOS POROSOS Y SU INFLUENCIA EN EL CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS*

- MULTIFAMILIARES EN LA CIUDAD DEL CUSCO-2024* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/6606>
- Ferdinand Beer, Russel Jhonston, Jhon DeWolf, & David Mazurek. (2018). *Mecánica de Materiales* (Leopoldo Gonzáles, Fernando Velazques, Alvaro Ayala, Antonio Zepeda, Magdaleno Vasquez, & Ricardo Linares, Eds.; 7a ed.). McGraw-Hill. [https://www.ingebook.com/ib/NPcd/IB\\_BooksVis?cod\\_primaria=1000187&codigo\\_libro=8071](https://www.ingebook.com/ib/NPcd/IB_BooksVis?cod_primaria=1000187&codigo_libro=8071)
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, P. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1a ed.). MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/rudics/?p=2612>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *MADRE DE DIOS RESULTADOS DEFINITIVOS*.
- Llamocca, M., & Paliza, D. (2020). *EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE SANTA ANA -CUSCO APLICANDO LA NORMA OS.020 Y EL REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS 2000* [Tesis]. Universidad Andina del Cusco.
- Martinez, M. (2016). *ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA 3D EN EL DISEÑO DE DEFLEXIONES EN CANALES SUPERCRÍTICOS. APLICACIÓN AL MODELO FÍSICO DEL RÁPIDO DE DESCARGA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHUCÁS DE COSTA RICA*. [Tesis]. Universidad de Chile.
- Mendoza, B. (2022). *Simulación del flujo del salto de esquí y de la poza de disipación debido a un mal funcionamiento en la disipación de energía ocasionado por un obstáculo frontal al Reservo*.
- Mendoza, B. (2023, abril 10). *DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL*. Varios. <https://ceintperu.com/noticia/dinamica-de-fluidos->

computacional/?fbclid=IwAR1N5fyTZPXfjNN0J7g--

T5X2oHEunMPZ\_DqNyZA4eSc7cm6WkQxEc9HJp4

Ministerio de Vivienda, C. y S. (2009a). Norma OS.020 Planta de tratamiento de agua para consumo humano. *DS* *N°* *024-2009.*

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686373/OS.020%20Plantas%20de%20tratamiento%20de%20agua%20potable%20DS%20N%C2%B0%20024-2009.pdf?v=1641411243>

Ministerio de Vivienda, C. y S. (2009b). Norma OS.090 Plantas de tratamiento de aguas residuales. *DS* *N°* *022-2009.*

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686395/OS.090%20Plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20DS%20n%C2%B0%20022-2009.pdf?v=1641411306>

Organización de las Naciones Unidas. (2022, mayo 24). *Objetivos de Desarrollo Sostenible.*

<https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible>

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (s/f). *Sunass - Transferencia de Datos.*

Recuperado el 29 de julio de 2023, de

[https://servicio.sunass.gob.pe/gsf/datos/ptap/?action=row\\_view&table=01\\_datos\\_basicos](https://servicio.sunass.gob.pe/gsf/datos/ptap/?action=row_view&table=01_datos_basicos)

## Anexos

## 8.1. Matriz de consistencia

Tabla 31

Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA	POBLACION
<b>Problema general:</b>	<b>Objetivo General: -</b>	<b>Hipótesis general:</b>	<b>Variable independiente (X):</b>		La población de estudio corresponde a las unidades de floculación del sistema de tratamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Pastora, ubicada en la ciudad de Puerto Maldonado, provincia de Tambopata, región Madre de Dios.
¿Cuál es la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos de rotura en el cuarto floculador?	Evaluar la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos de rotura en el cuarto floculador.	La dinámica del fluido influye significativamente en la generación de los esfuerzos de rotura en el cuarto floculador.	Dinámica del fluido	El tipo de investigación es cuantitativa	
<b>Problemas específicos:</b>	<b>Objetivos específicos:</b>	<b>Hipótesis específicas:</b>	<b>Variables dependientes (Y):</b>		

---

¿Cuál es la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos normales de rotura en el cuarto floculador?	Evaluar los esfuerzos normales inducidos por la dinámica del fluido en los elementos estructurales del cuarto floculador.	La dinámica del fluido influye significativamente en la generación de esfuerzos normales de rotura en el cuarto floculador.		El nivel de investigación es de alcance explicativo	La muestra de estudio está constituida por el cuarto floculador de la PTAP La Pastora, el cual se selecciona de manera intencional, debido a que en dicho elemento se concentran las condiciones hidráulicas y estructurales de mayor interés para el análisis de los esfuerzos de rotura inducidos mediante la interacción fluido–estructura.
			Esfuerzos de rotura del cuarto floculador		
¿Cuál es la incidencia de la dinámica del fluido en la generación de los esfuerzos cortantes de rotura en el cuarto floculador?	Evaluar los esfuerzos cortantes inducidos por la dinámica del fluido en los elementos estructurales del cuarto floculador.	La dinámica del fluido influye significativamente en la generación de esfuerzos cortantes de rotura en el cuarto floculador.		El diseño de la presente investigación será no experimental transeccional.	

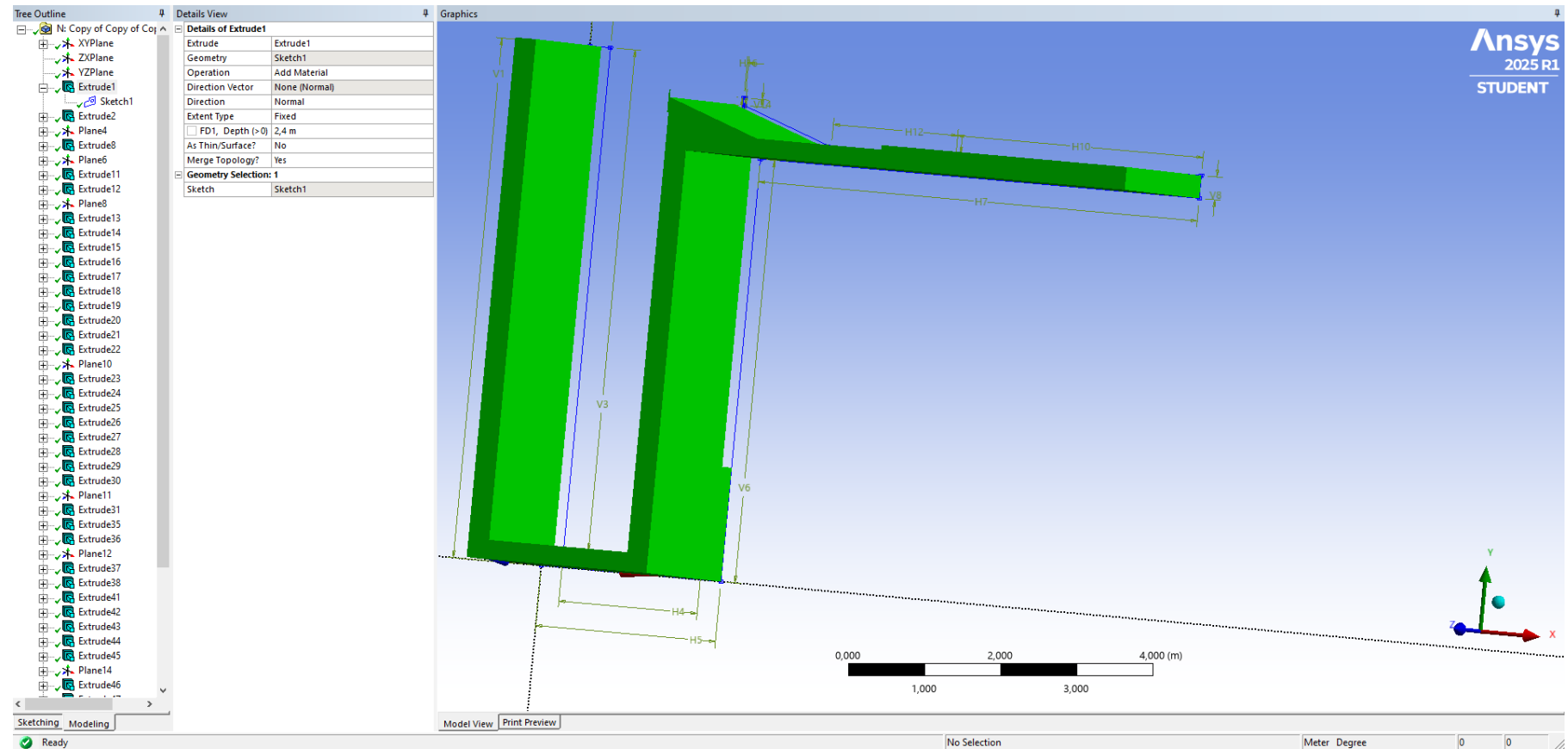
---



## 8.2. Generación de la geometría en Ansys Design Modeler (Versión Estudiante)

**Figura 136**

*Anexos: Elaboración de la geometría 01*



## Figura 137

### Anexos: Elaboración de la Geometría 02

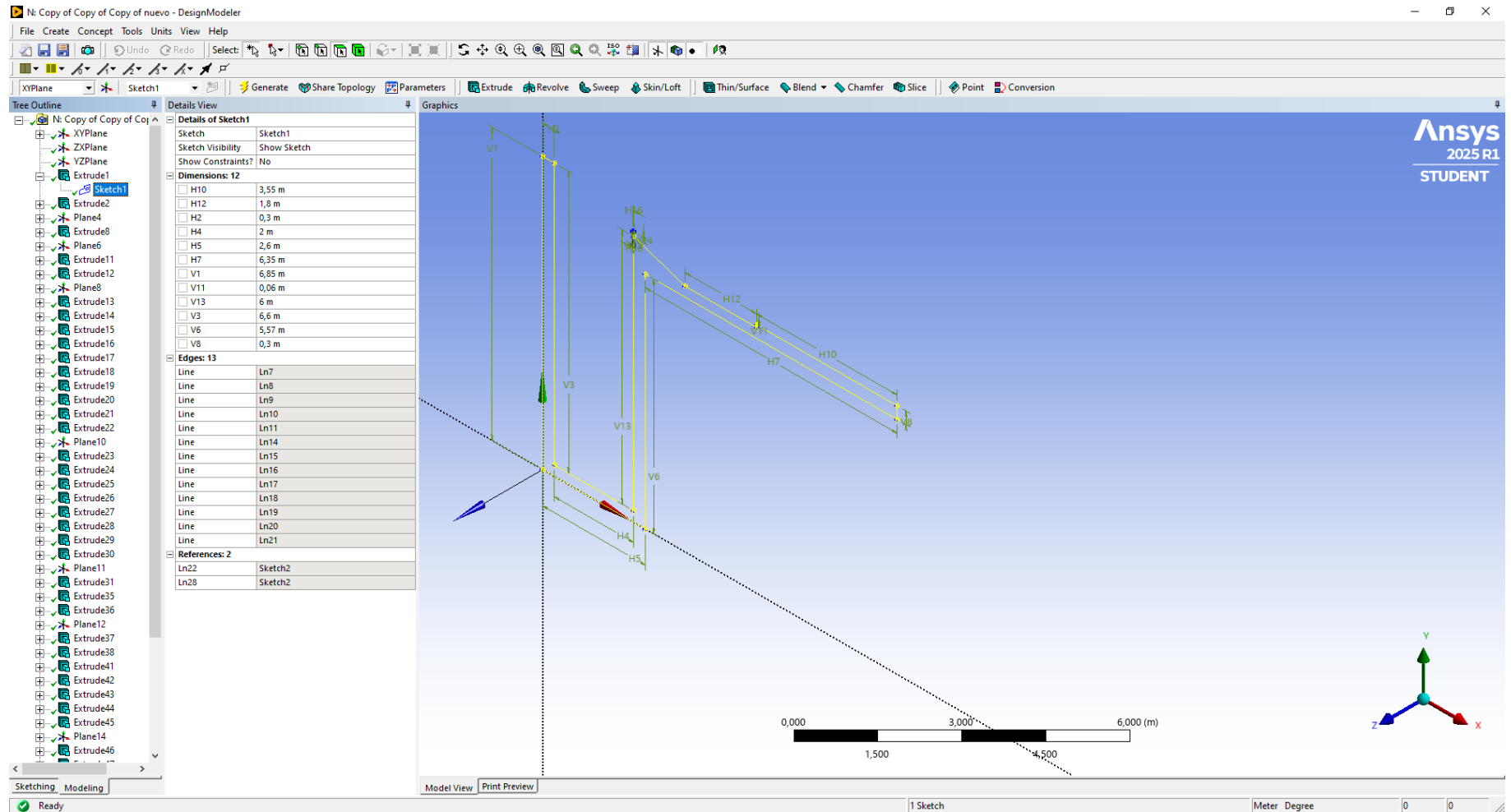


Figura 138

Anexos: Elaboración de la geometría 03

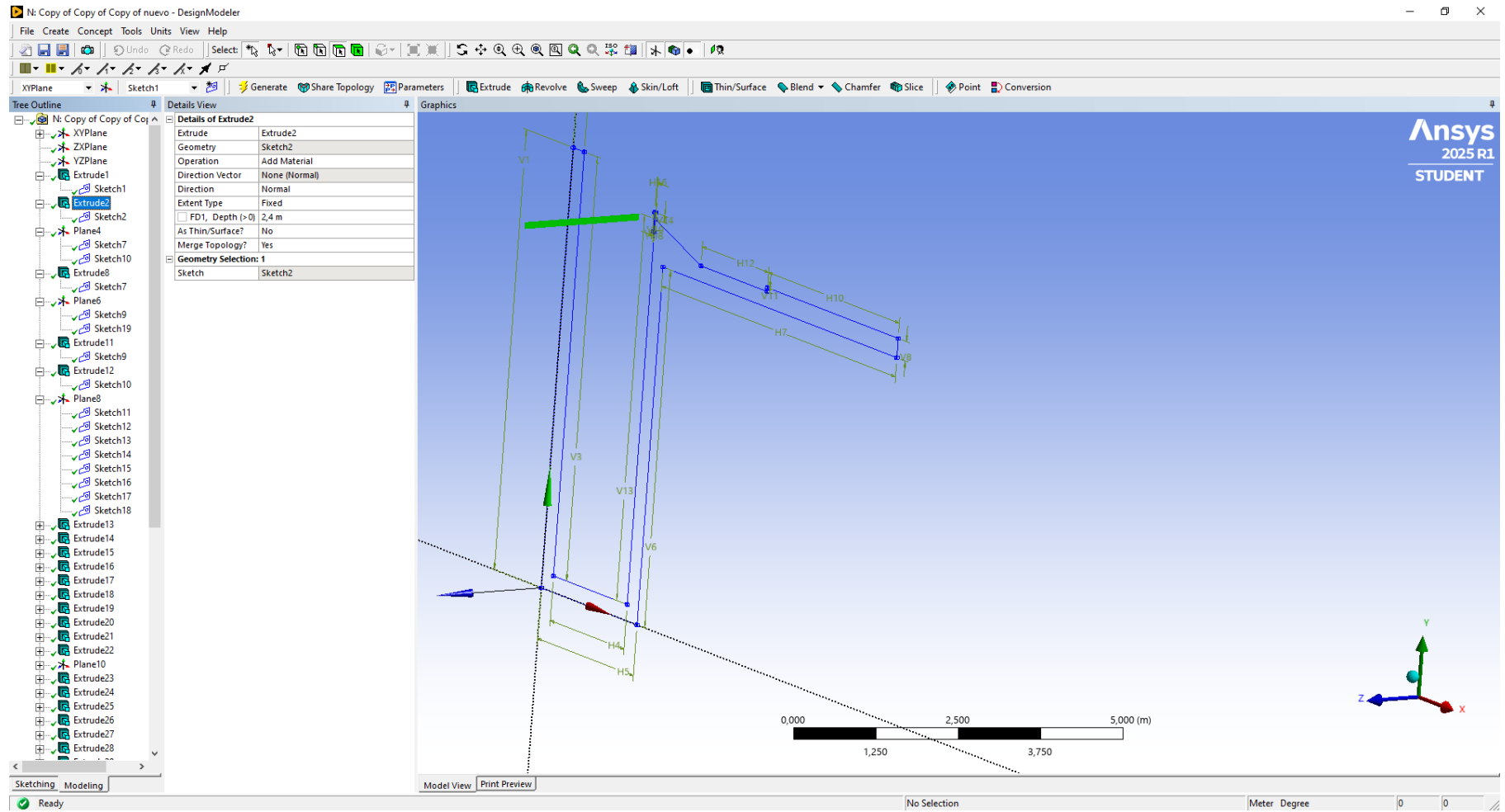


Figura 139

Anexos: Elaboración de la geometría 04

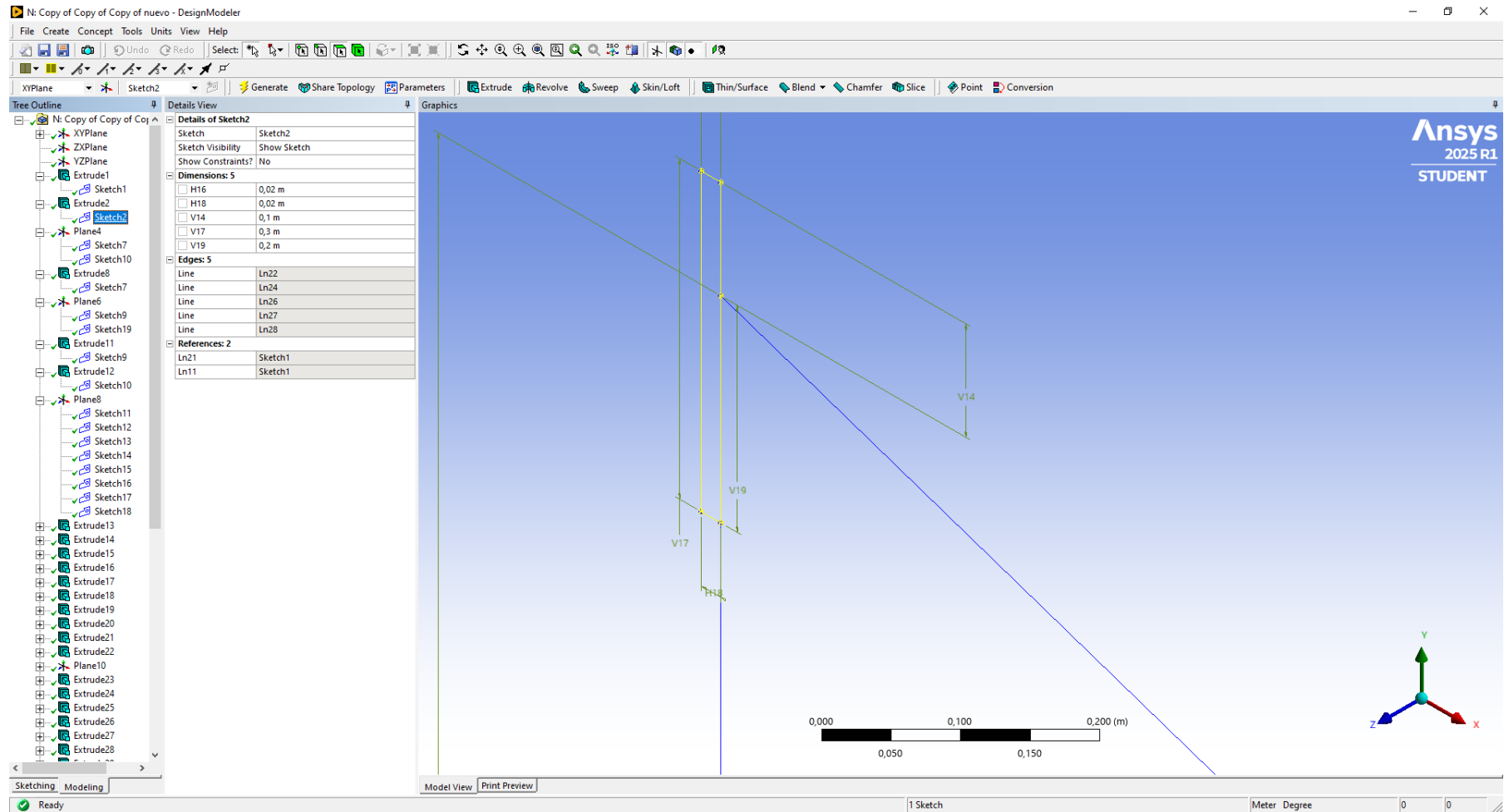


Figura 140

Anexos: Elaboración de la geometría 05

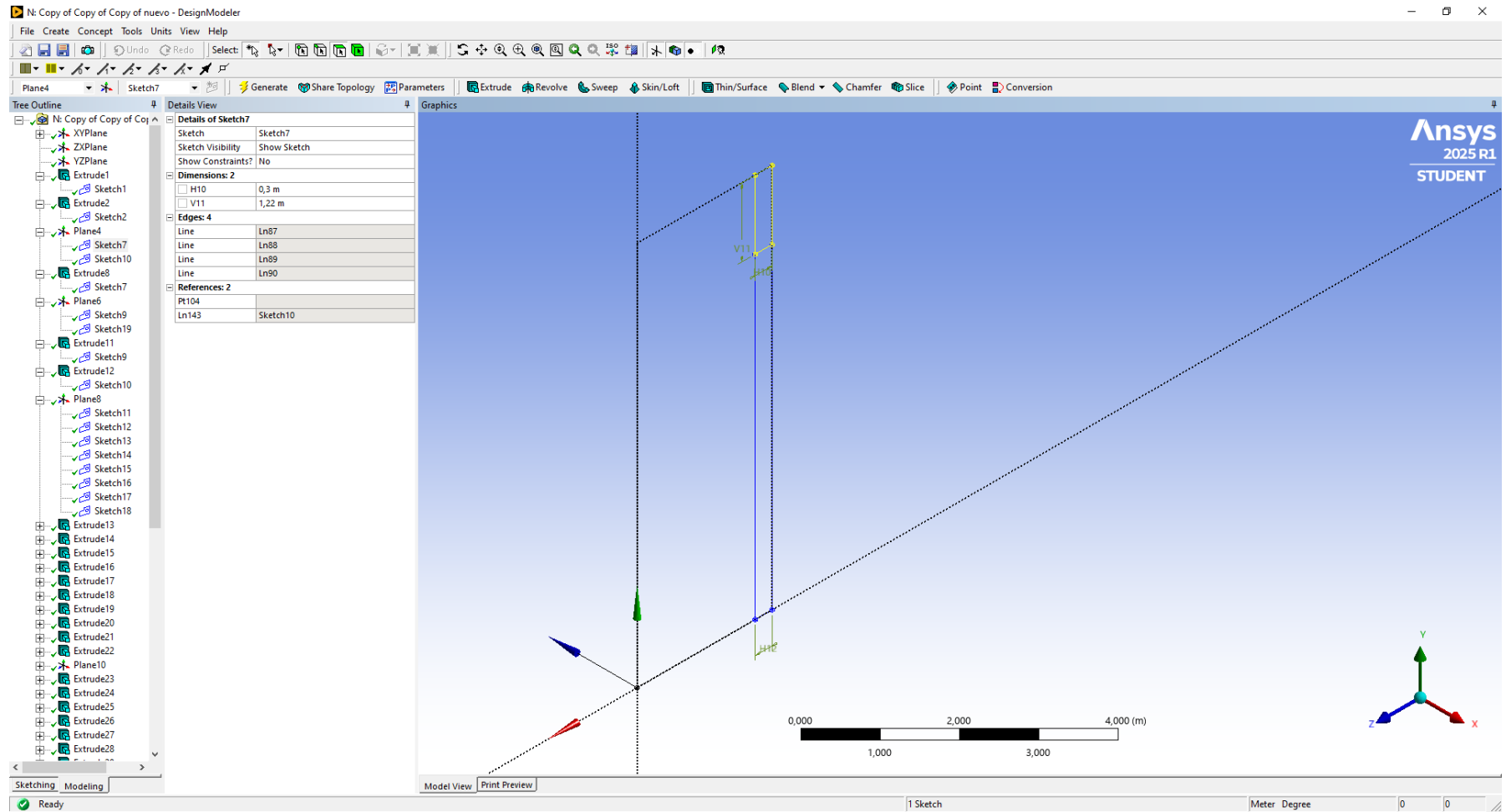


Figura 141

Anexos: Elaboración de la geometría 06

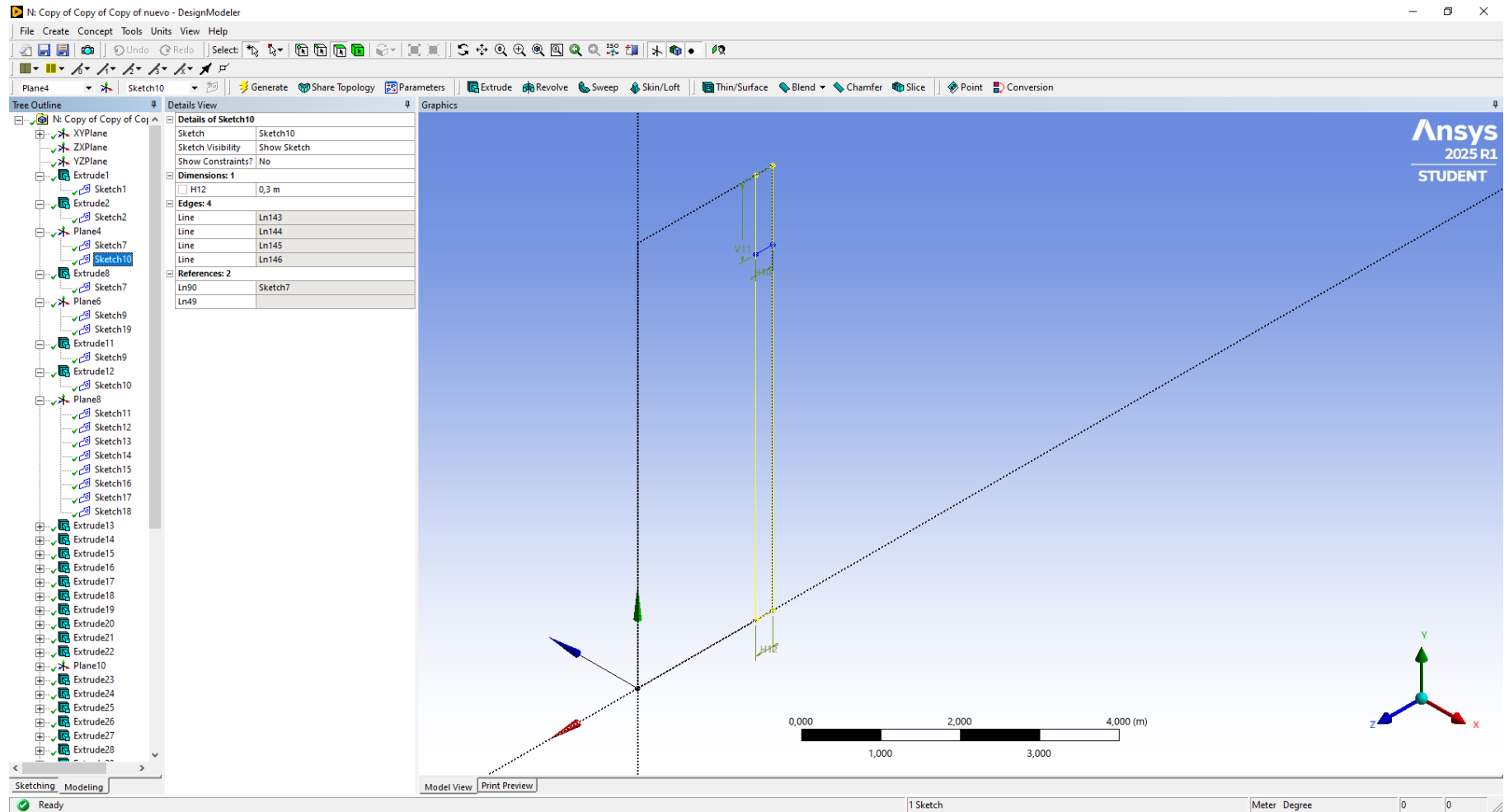
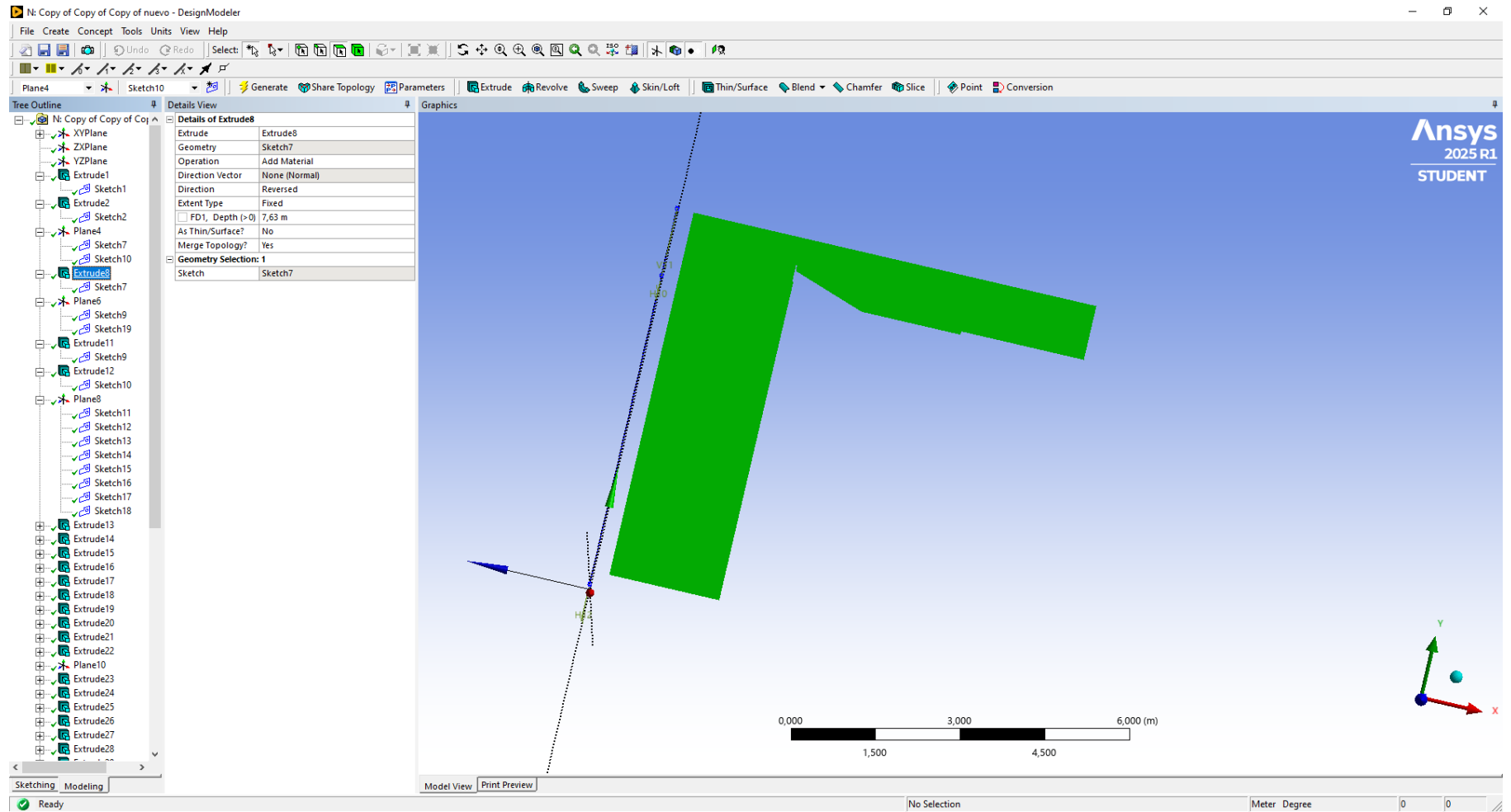
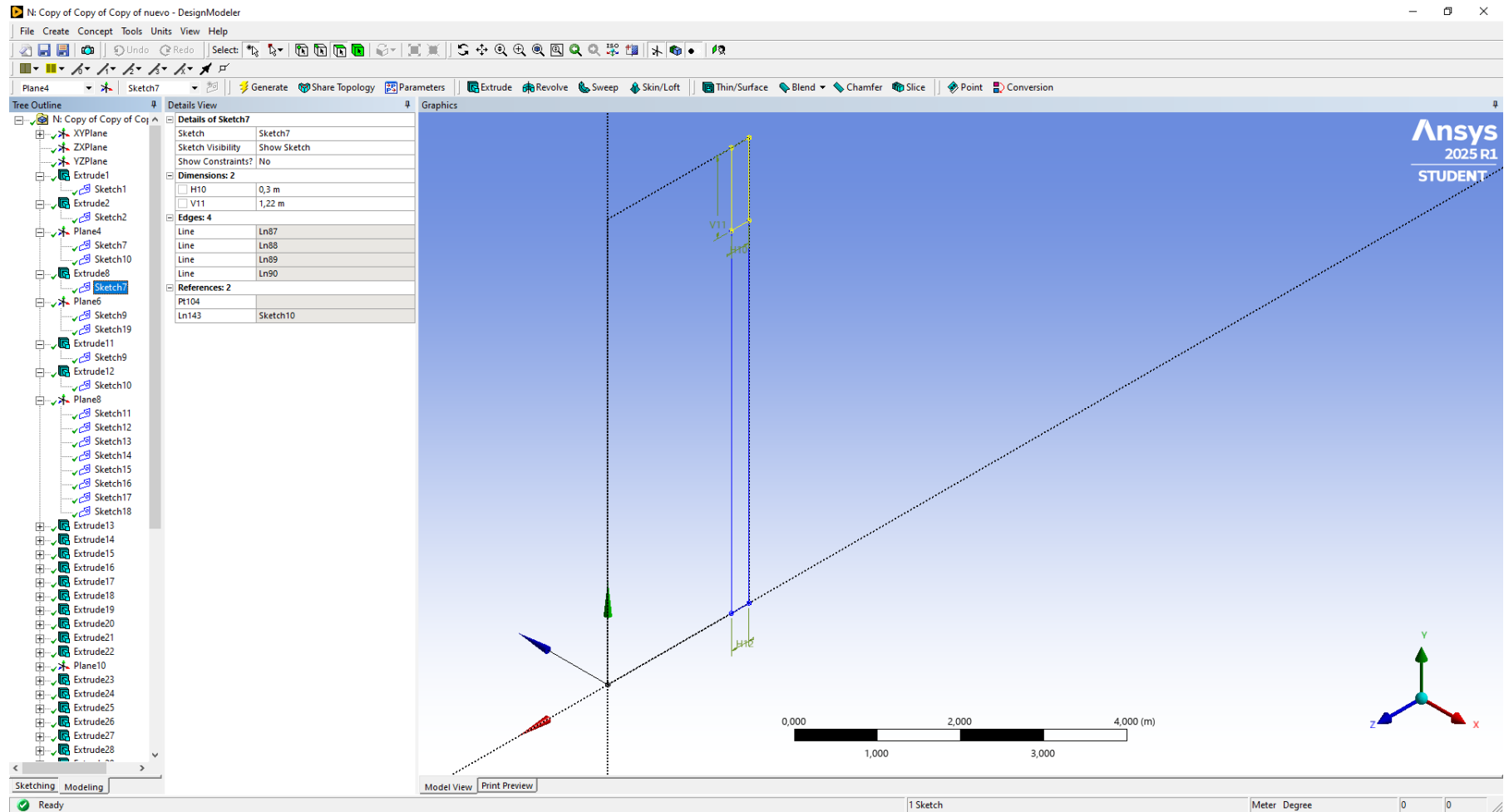


Figura 142

*Anexos: Elaboración de la geometría 07*

**Figura 143***Anexos: Elaboración de la geometría 08*



## Figura 144

Anexos: Elaboración de la geometría 9

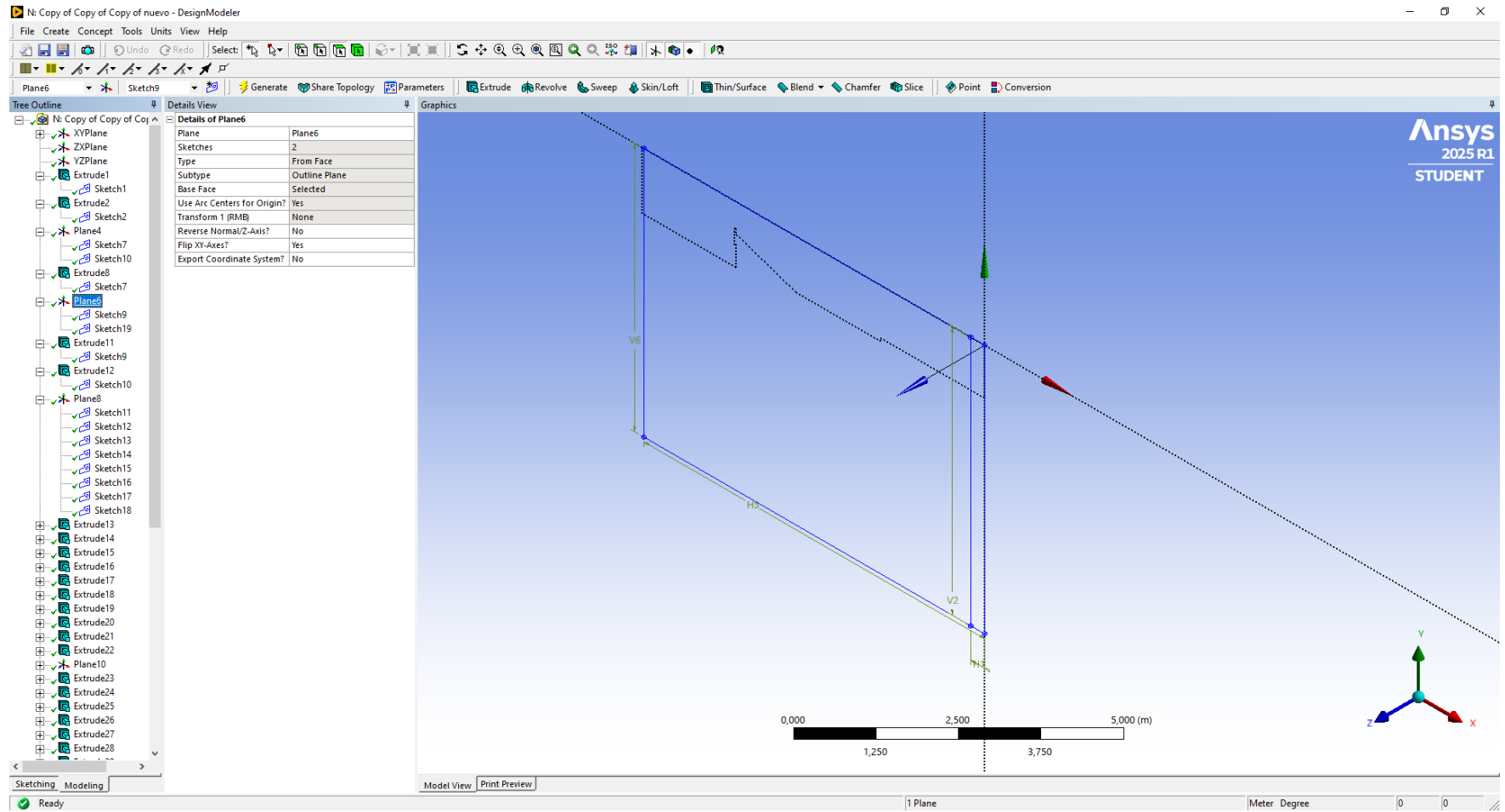


Figura 145

Anexos: Elaboración de la geometría 10

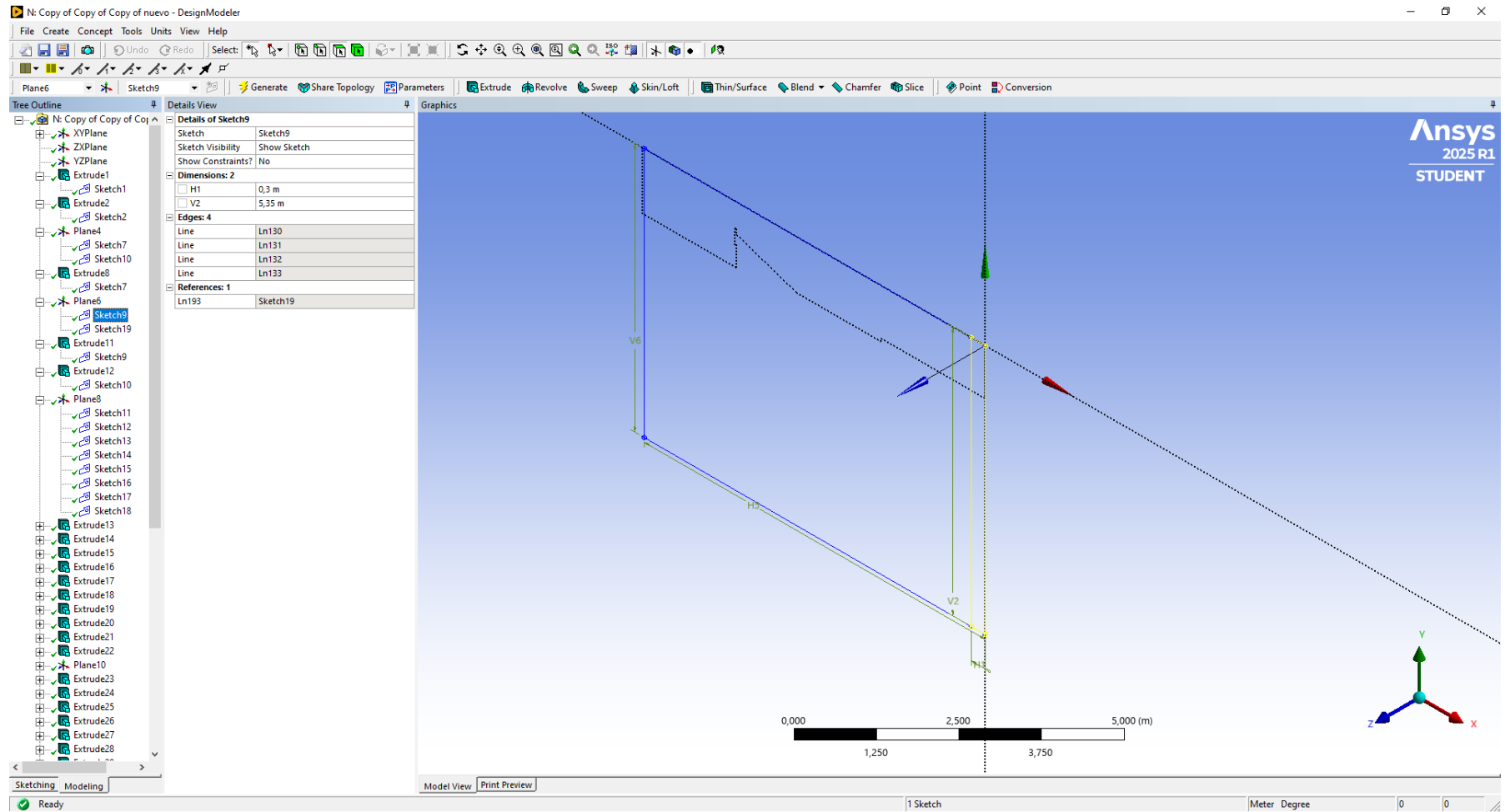
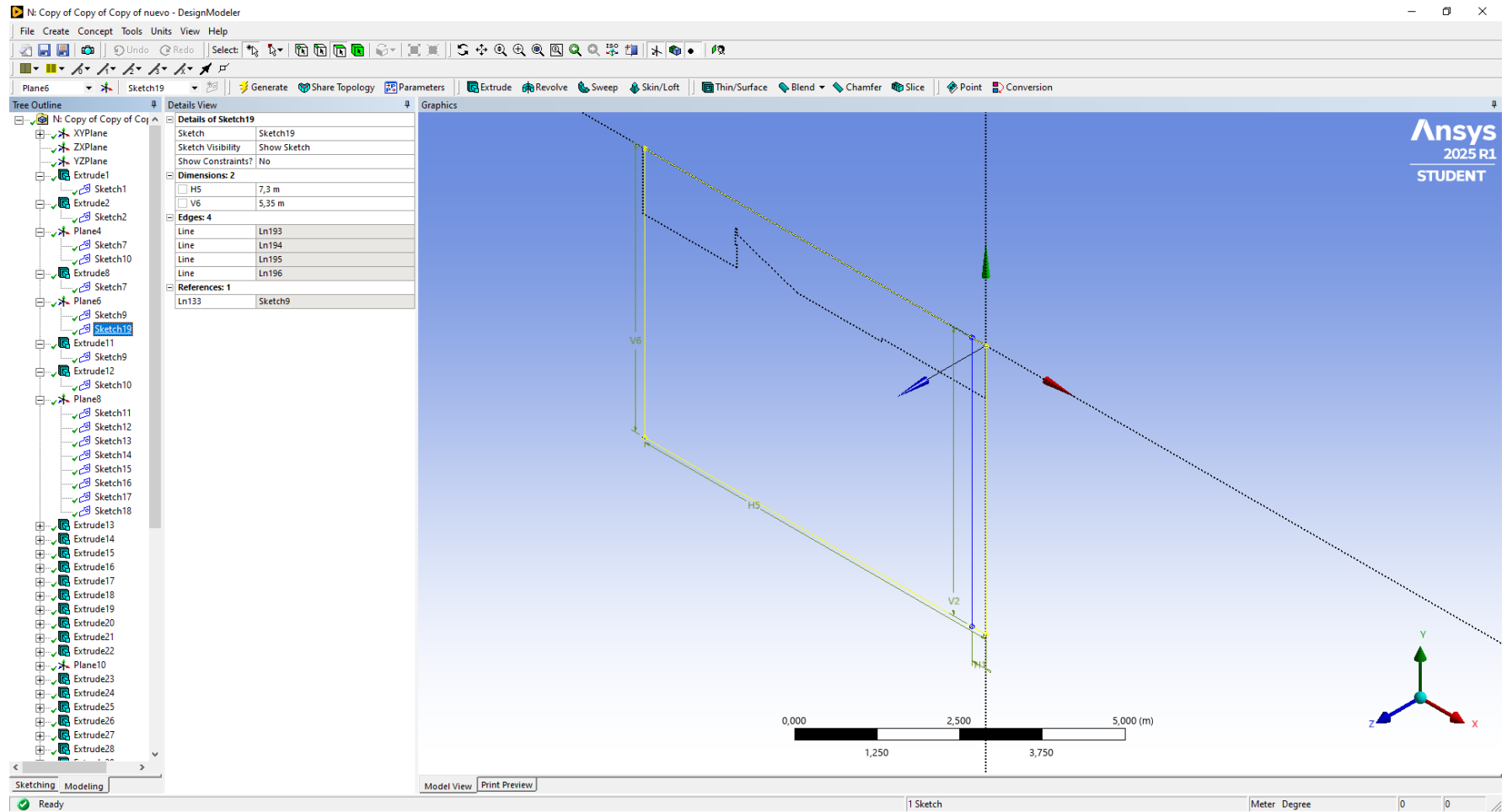
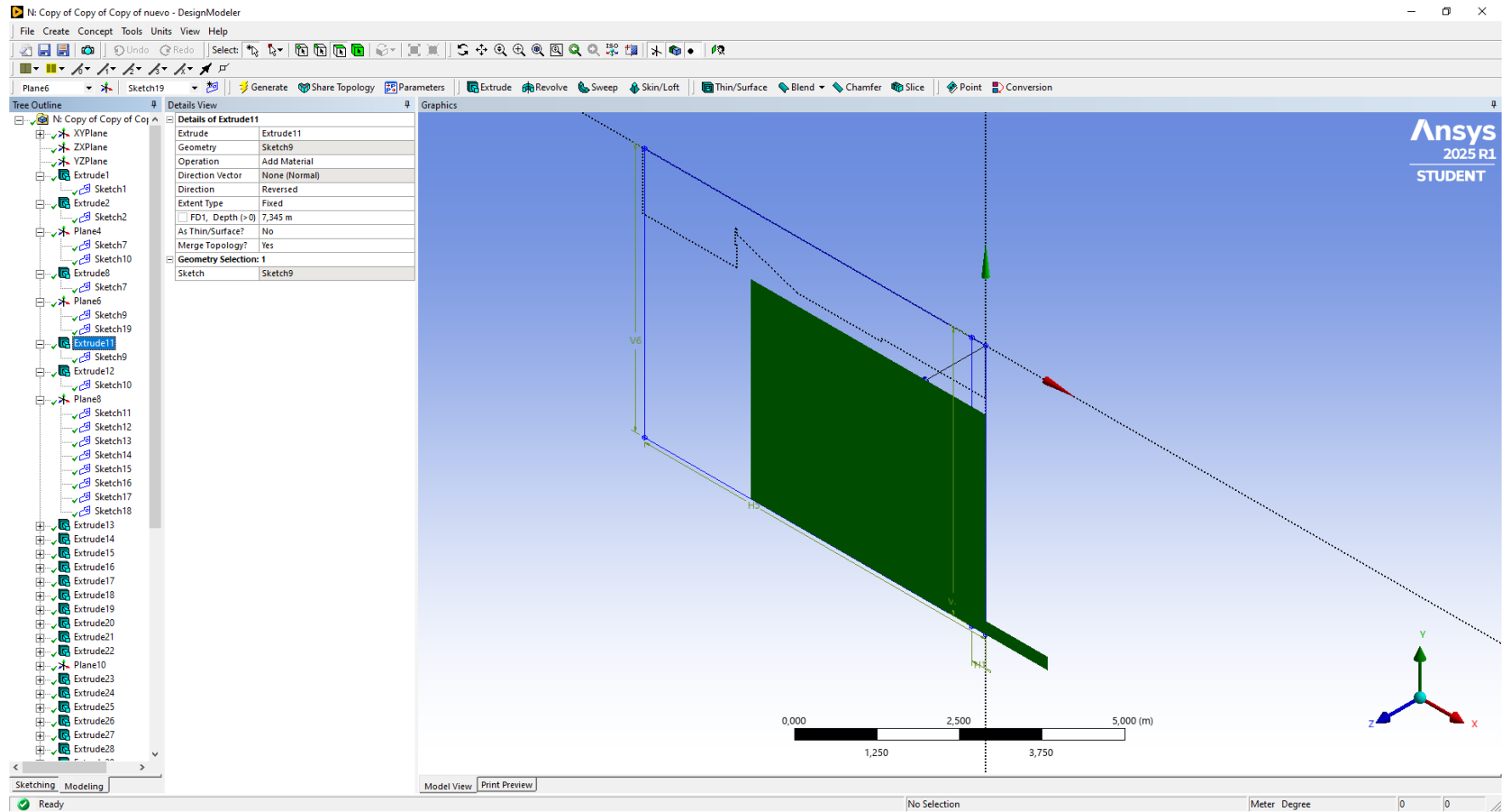


Figura 146

Anexos: Elaboración de la geometría 11



**Figura 147***Anexos: Elaboración de la geometría 12*

## Figura 148

Anexos: Elaboración de la geometría 13

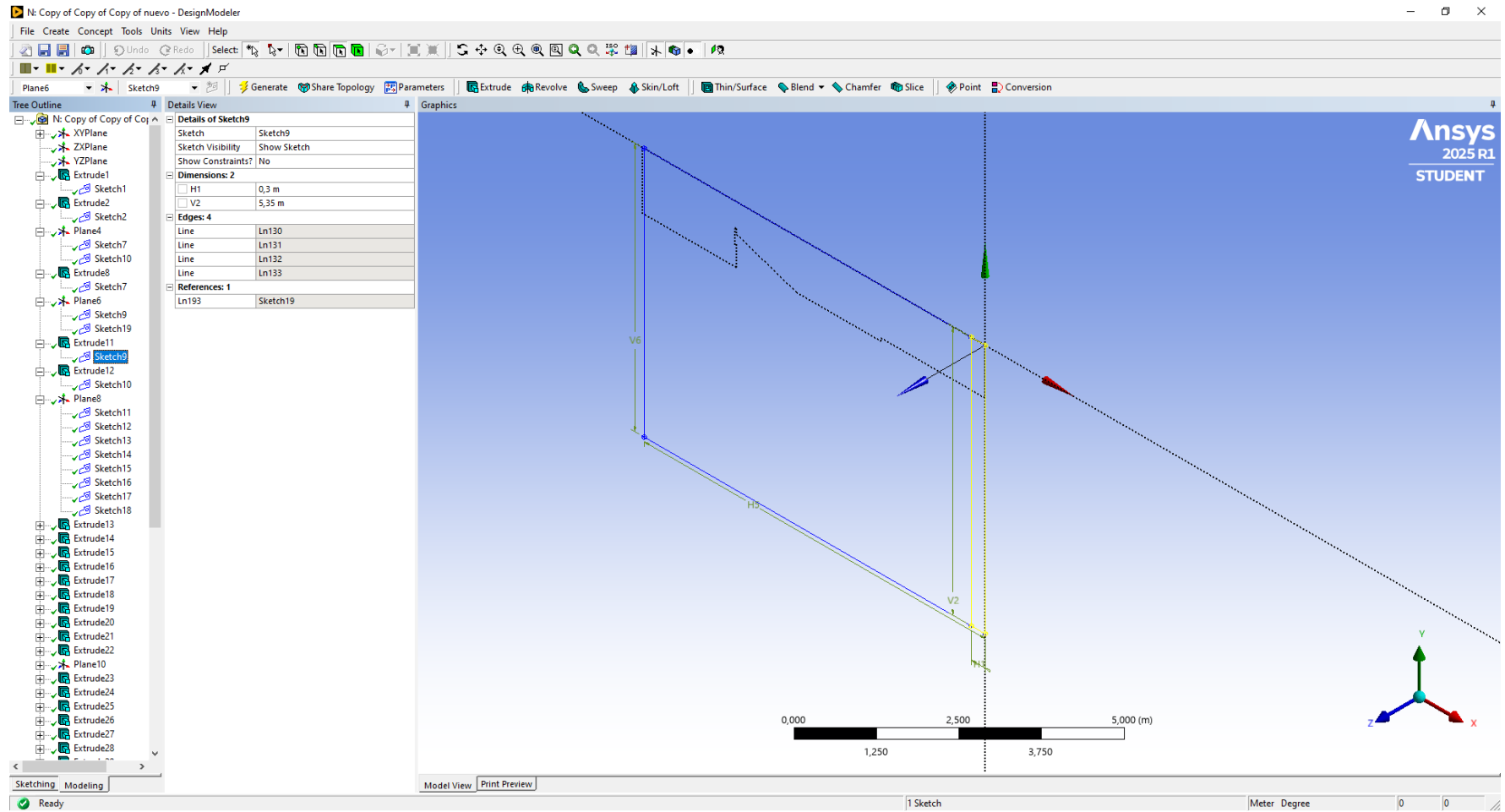
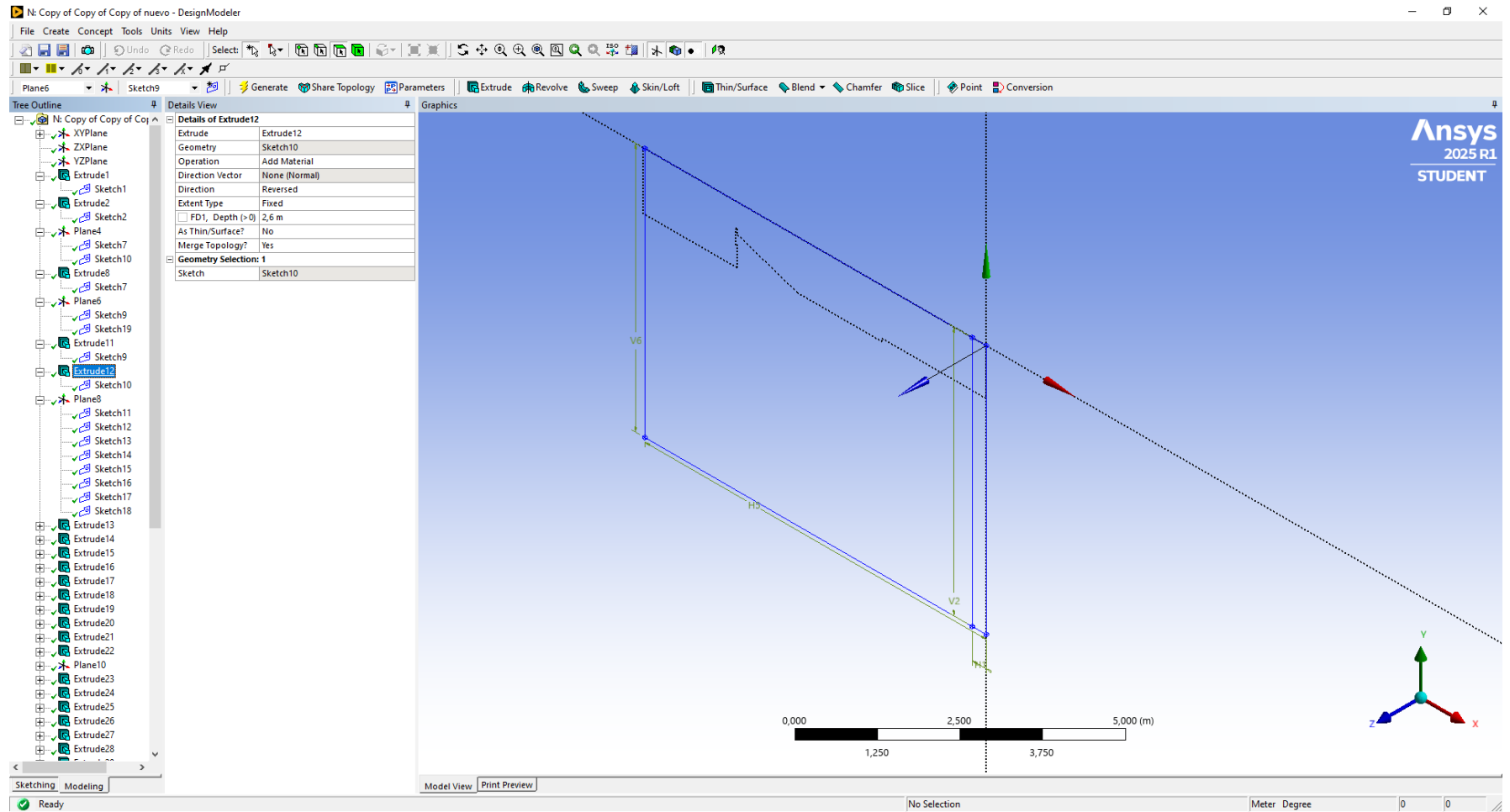
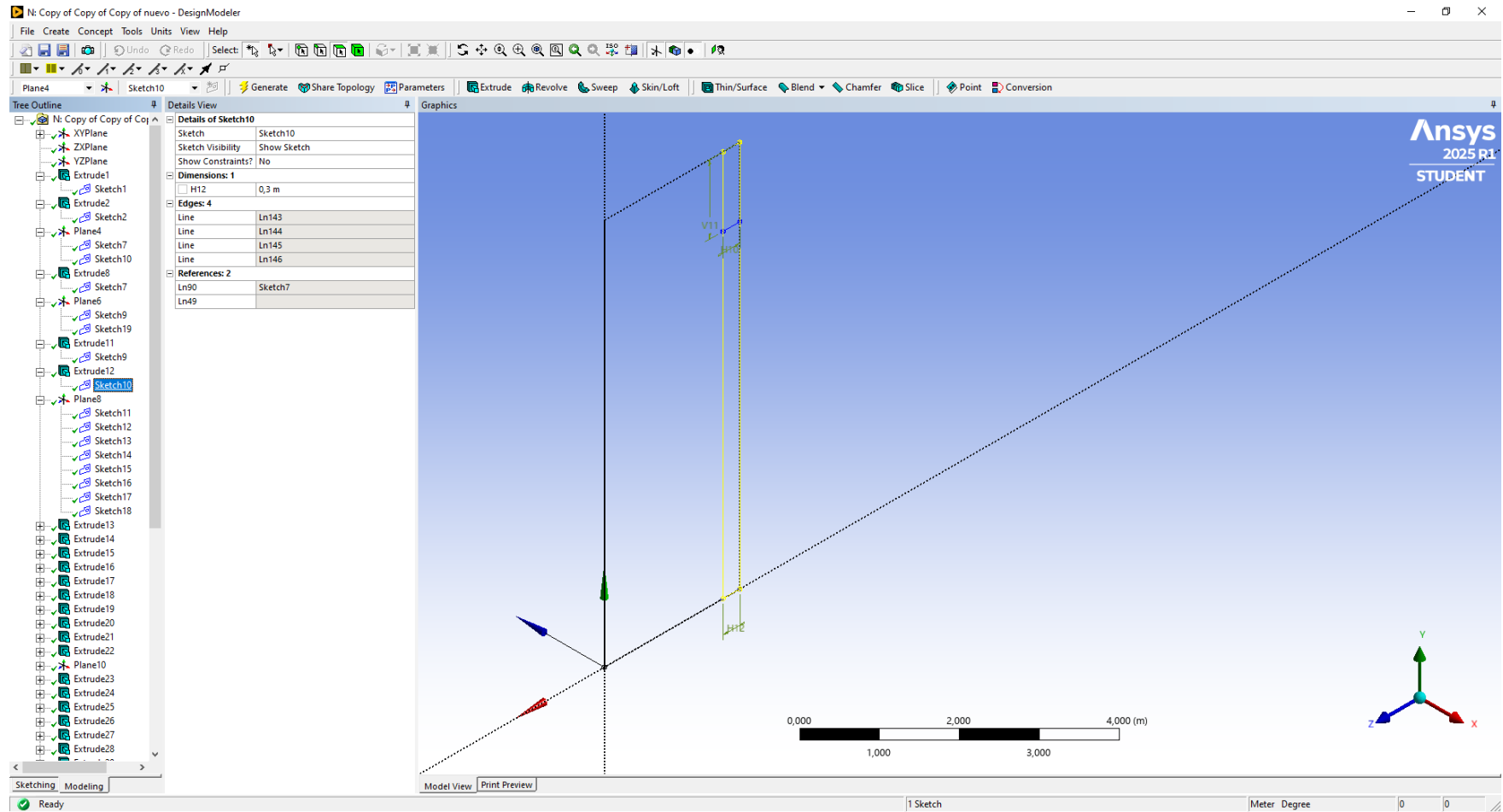


Figura 149

Anexos: Elaboración de la geometría 14



**Figura 150***Anexos: Elaboración de la geometría 15*

**Figura 151**

Anexos: Elaboración de la geometría 16

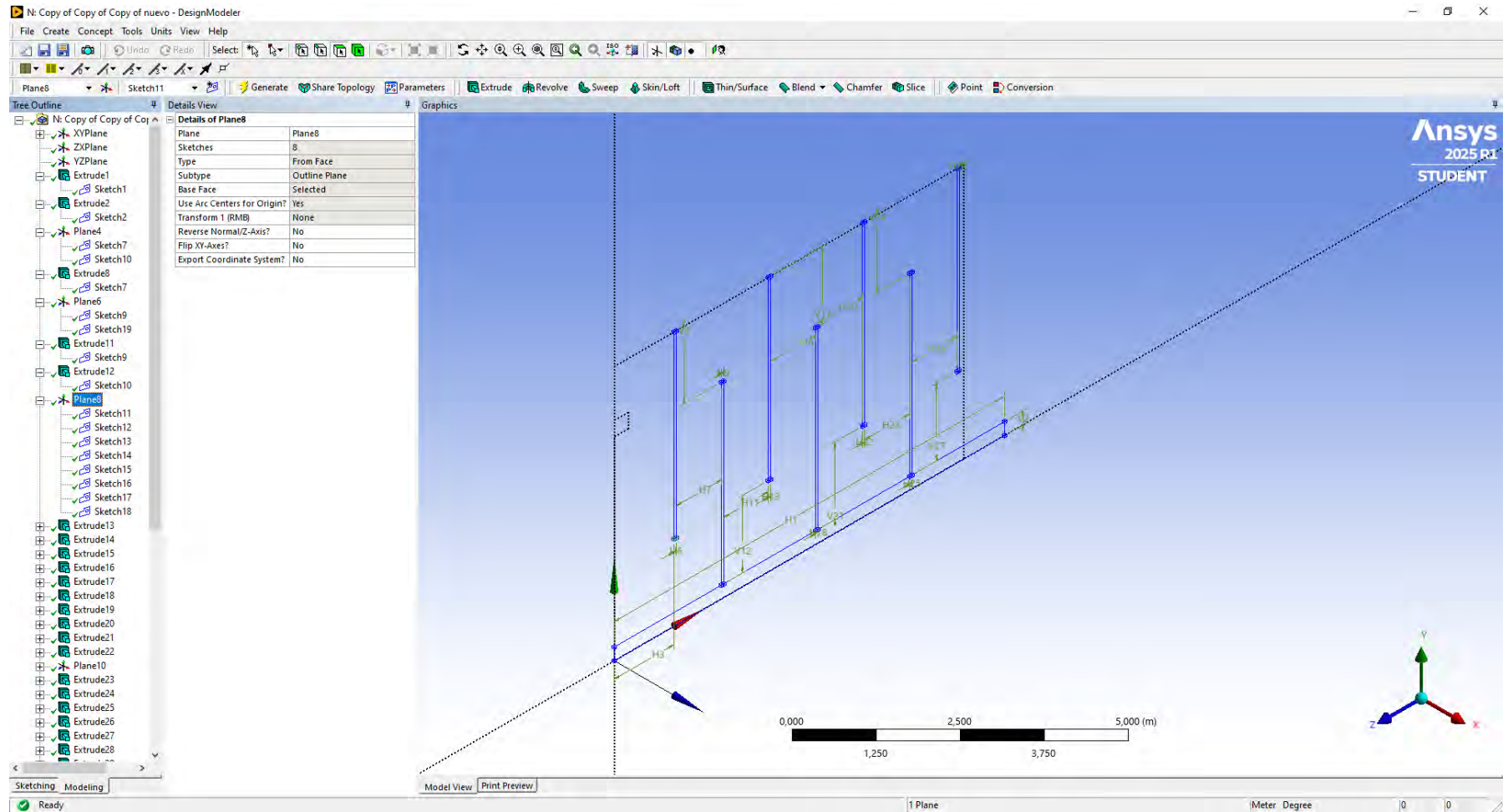




Figura 152

Anexos: Elaboración de la geometría 17

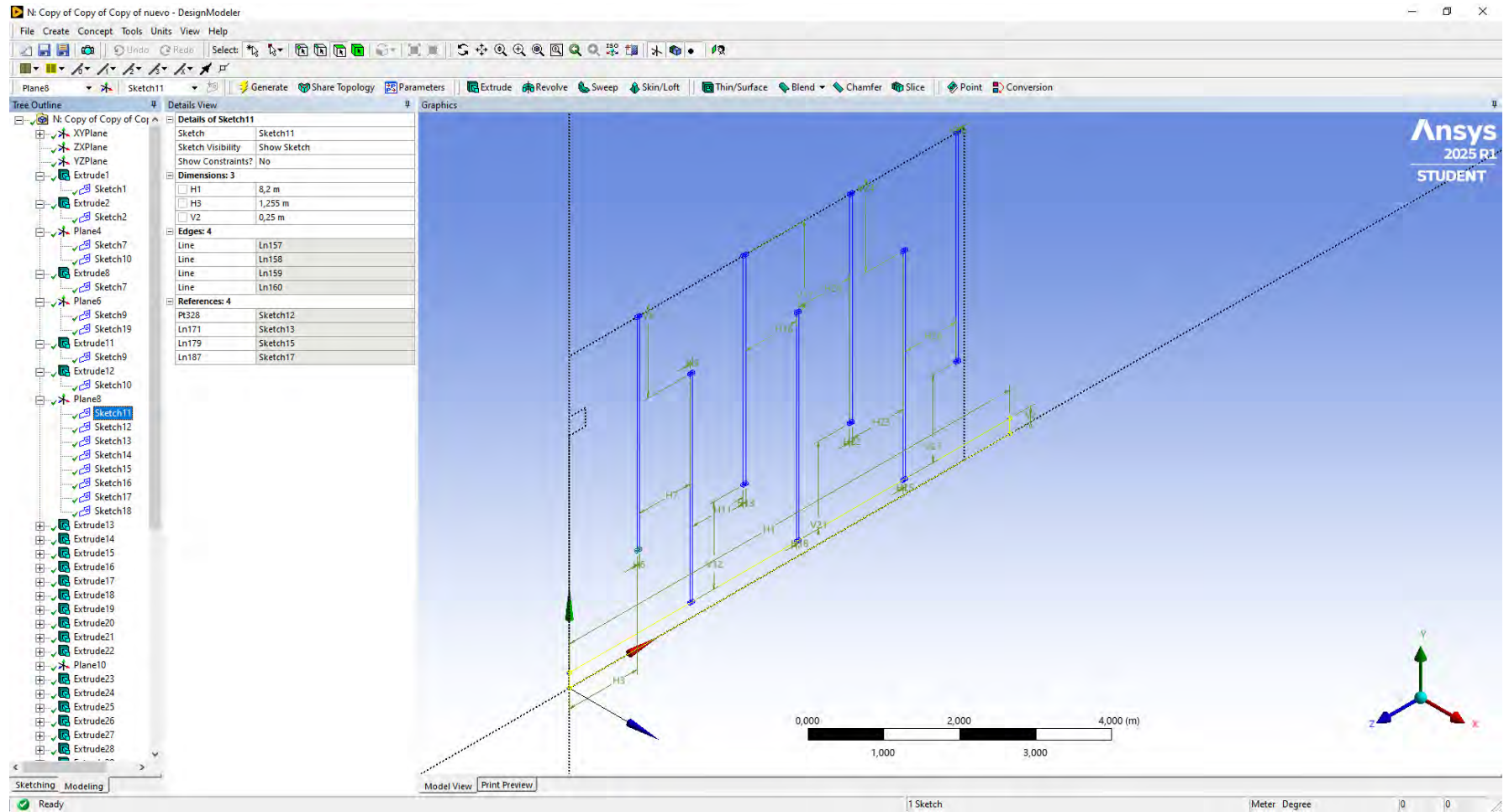


Figura 153

Anexos: Elaboración de la geometría 18

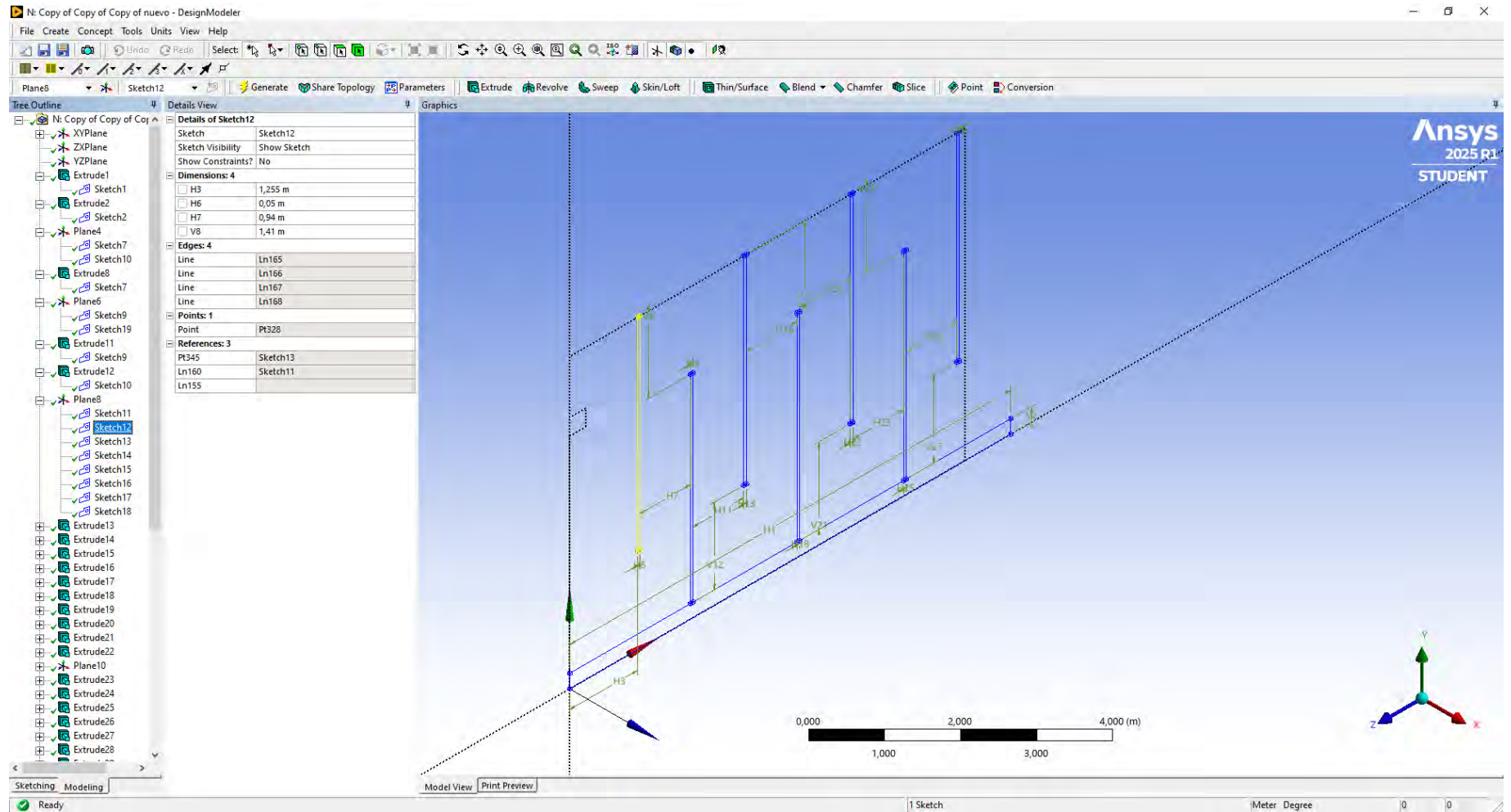
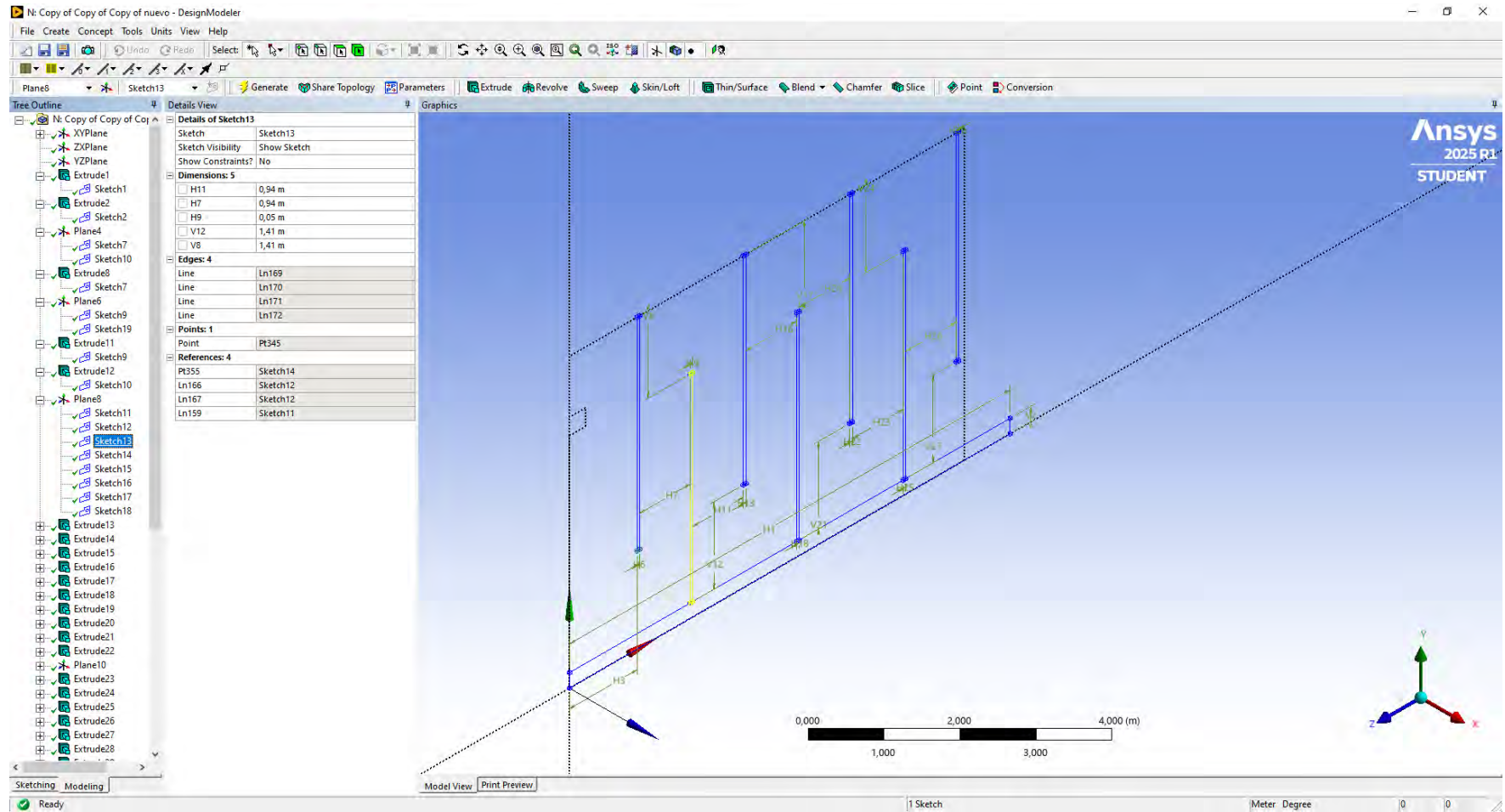


Figura 154

Anexos: Elaboración de la geometría 19





## Figura 155

Anexos: Elaboración de la geometría 20

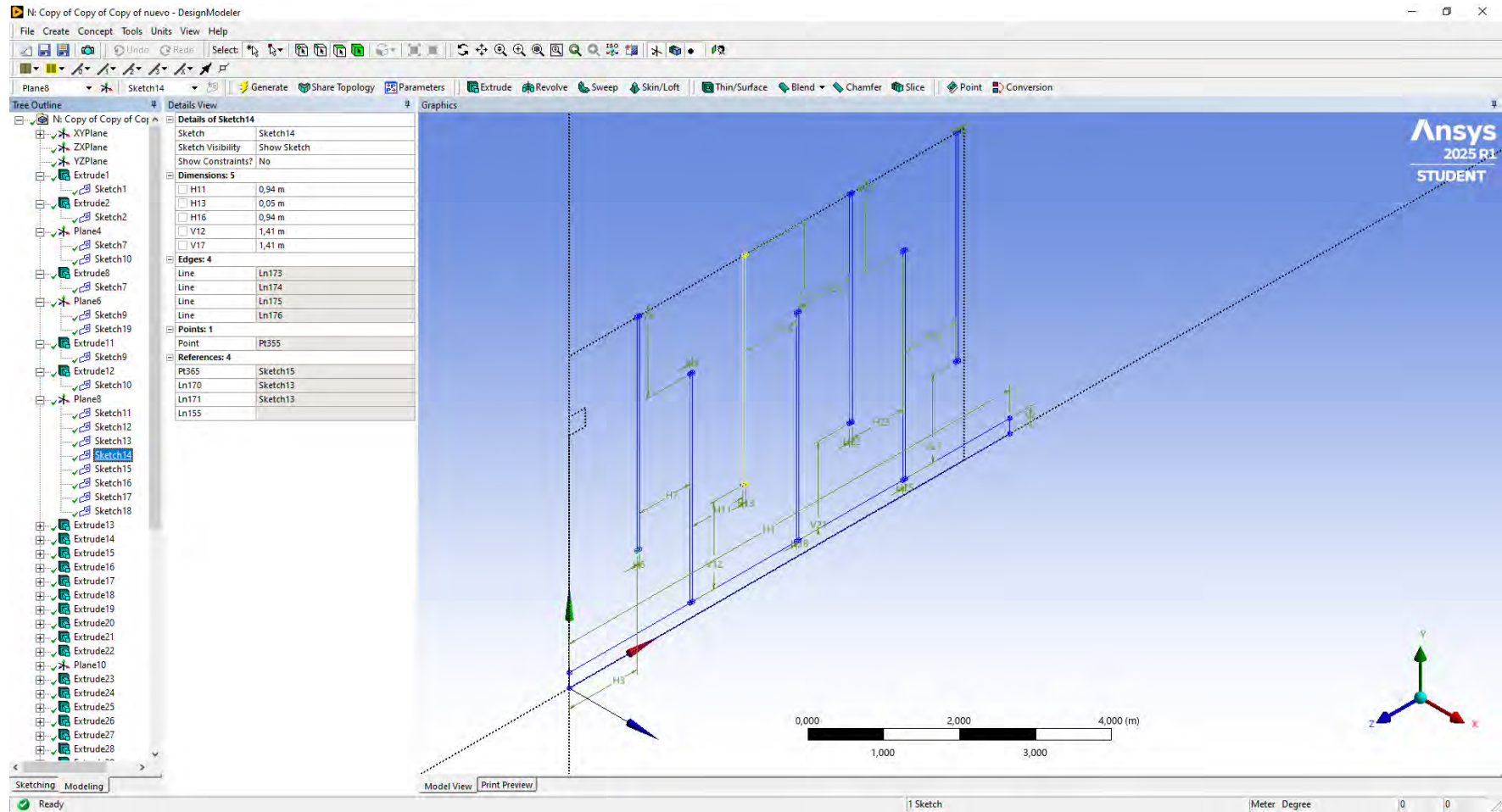


Figura 156

Anexos: Elaboración de la geometría 21

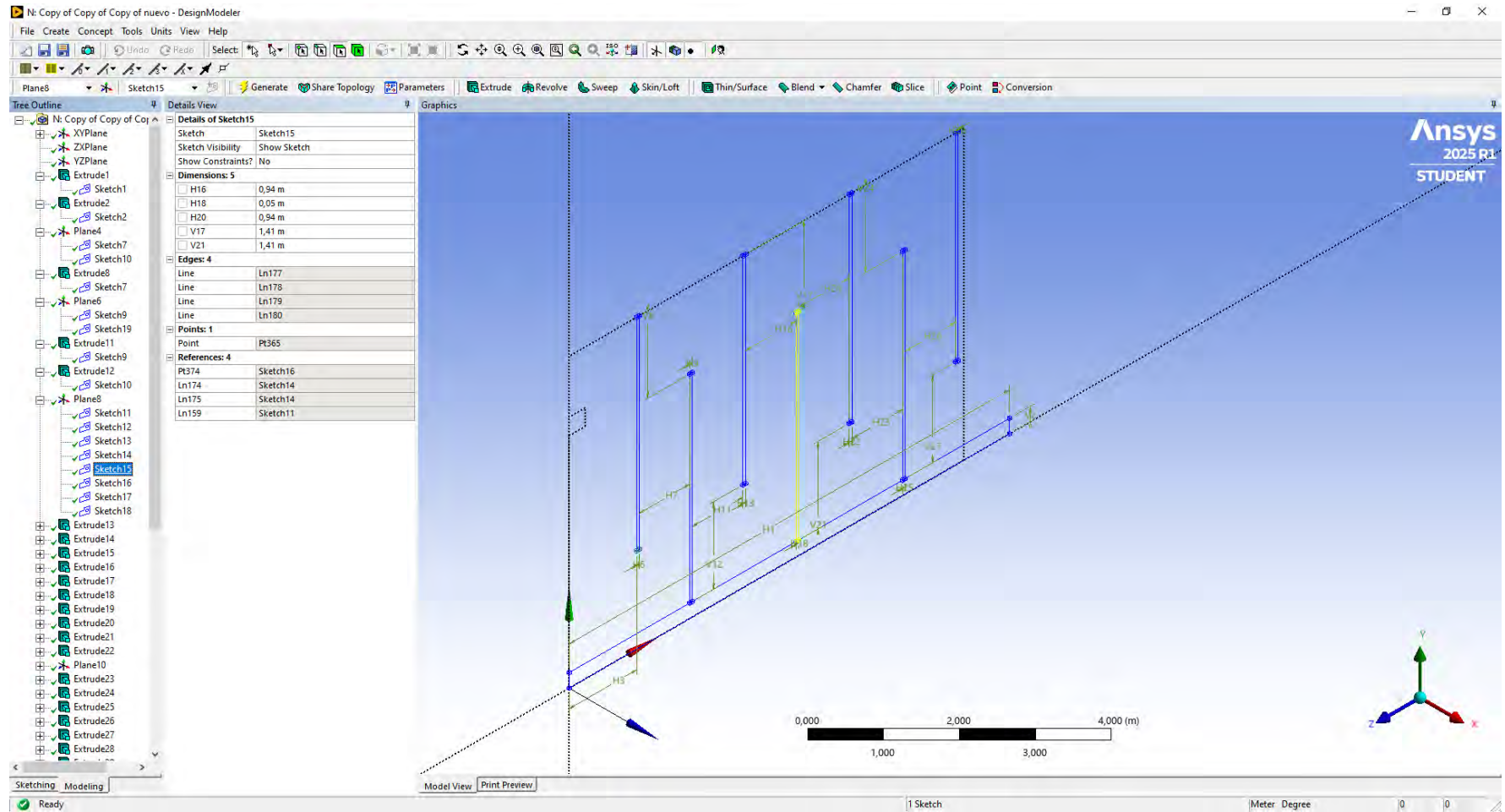


Figura 157

Anexos: Elaboración de la geometría 22

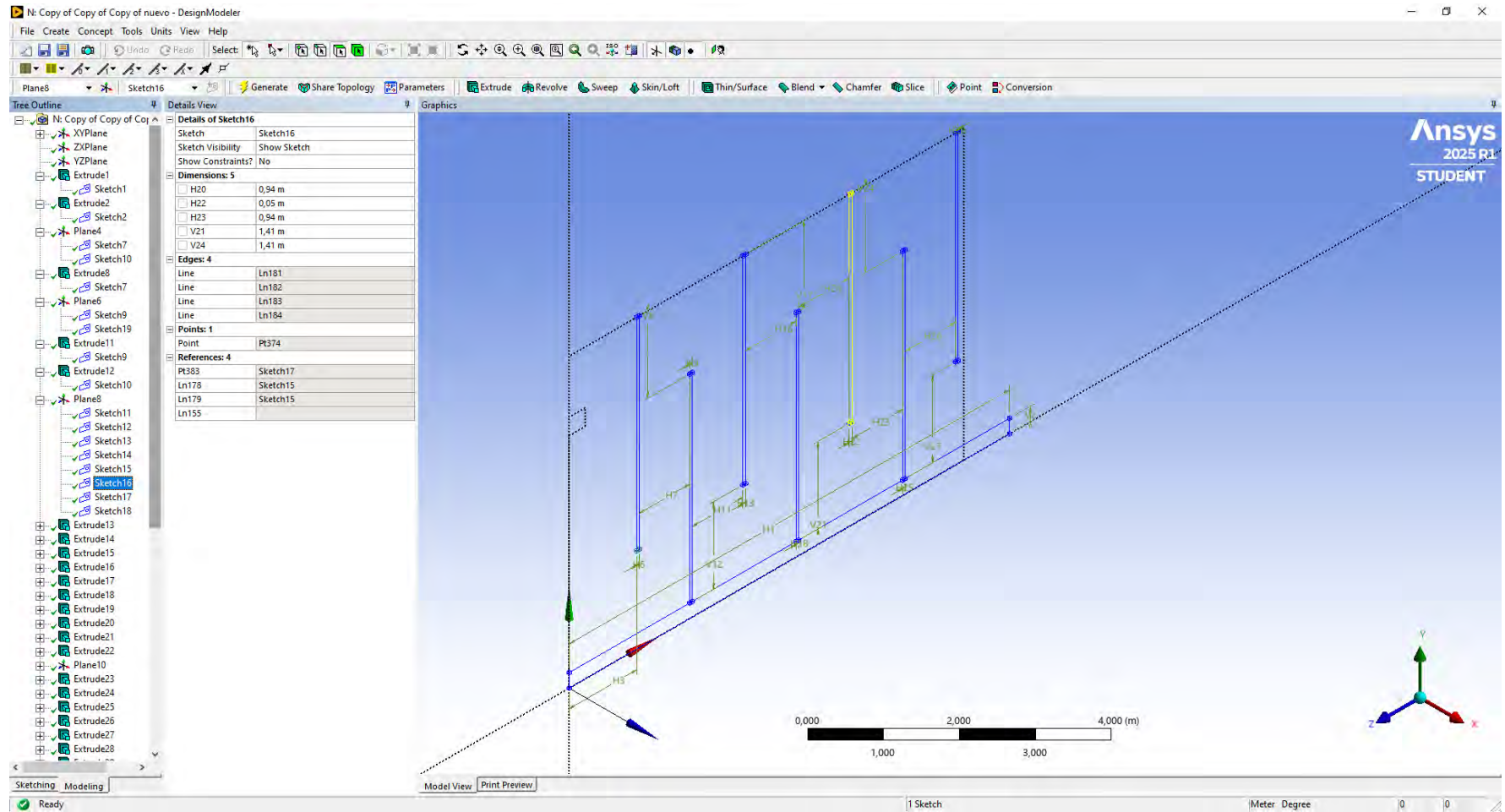




Figura 158

Anexos: Elaboración de la geometría 23

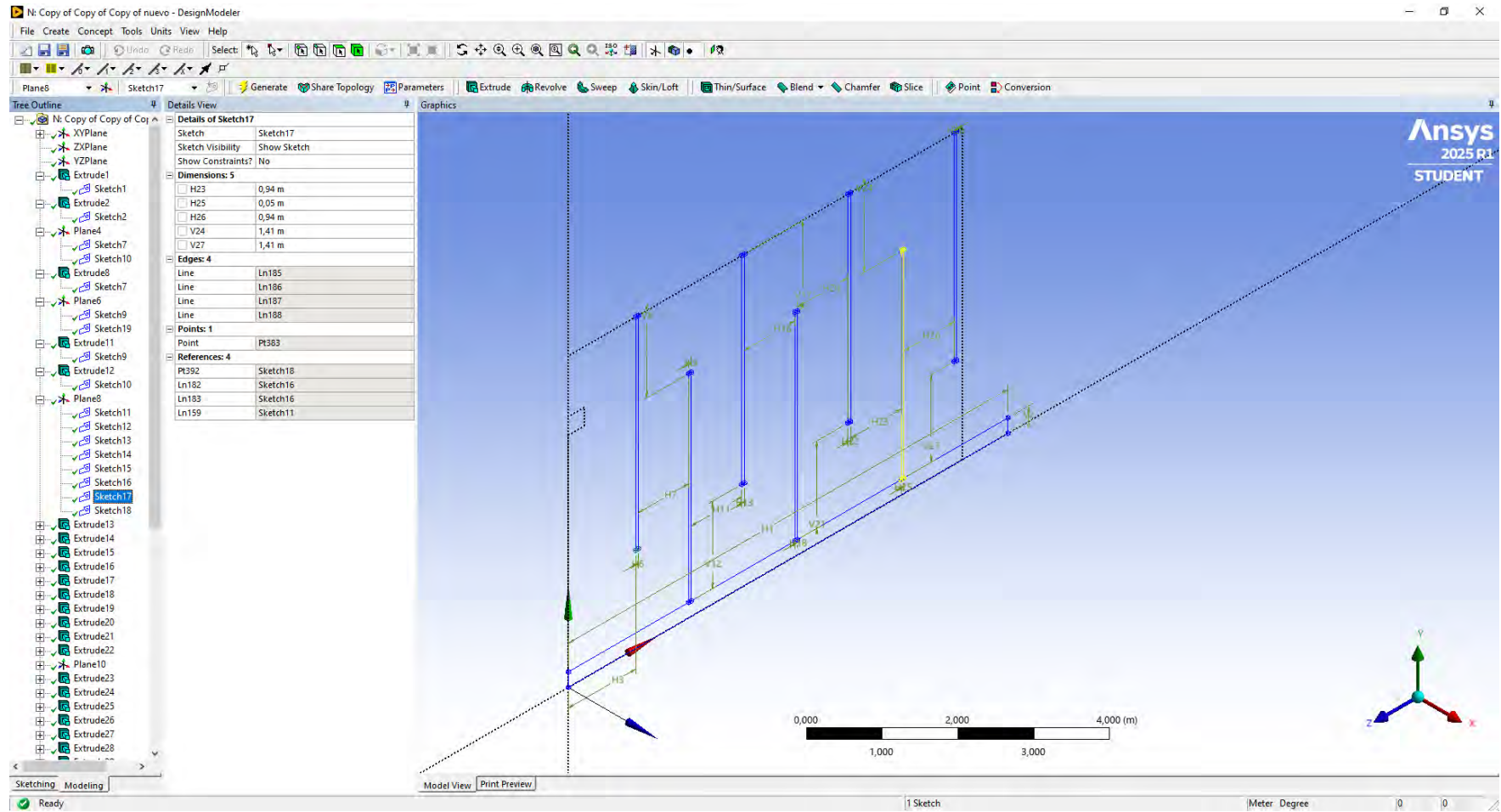


Figura 159

Anexos: Elaboración de la geometría 24

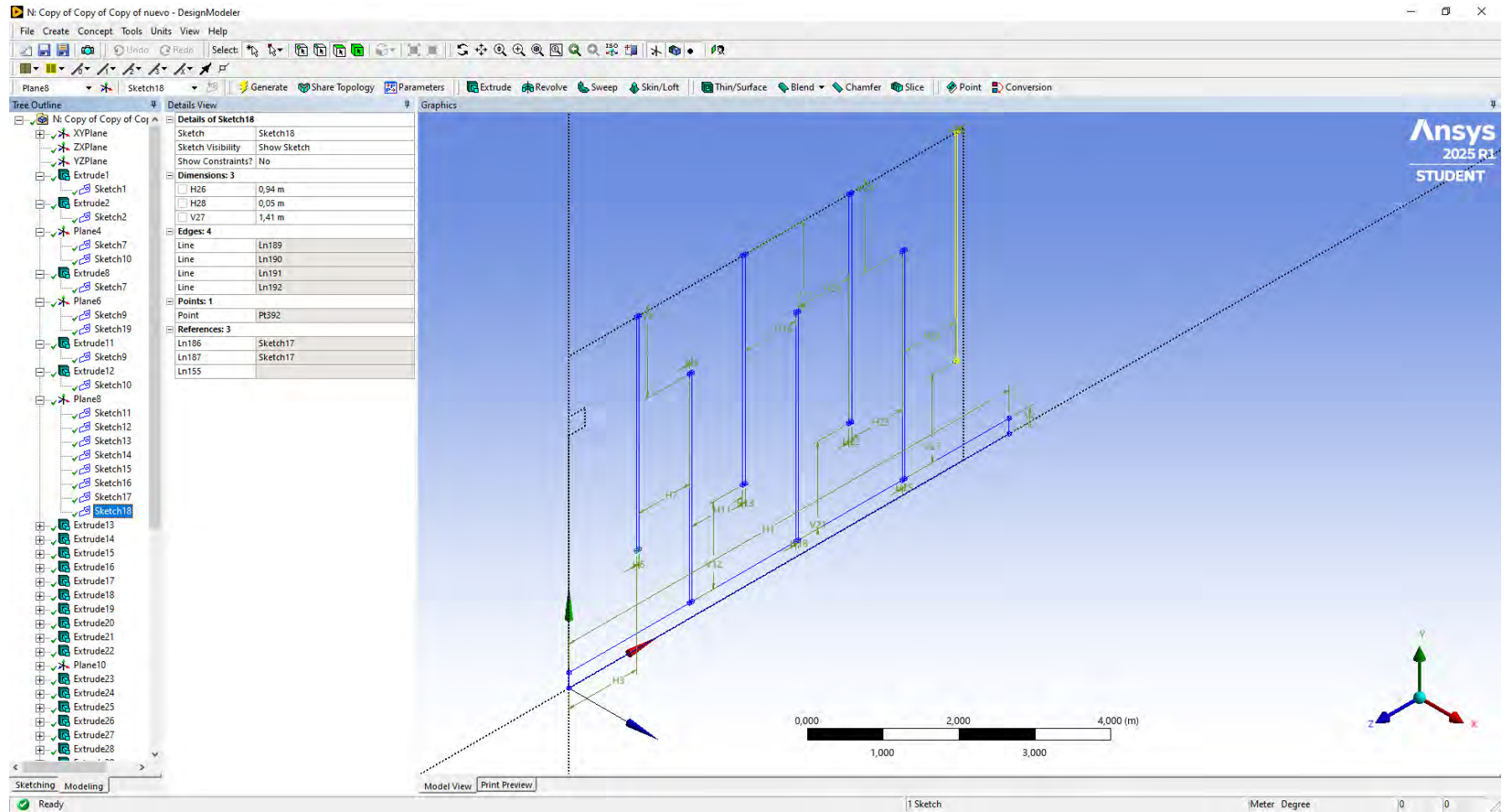




Figura 160

Anexos: Elaboración de la geometría 25

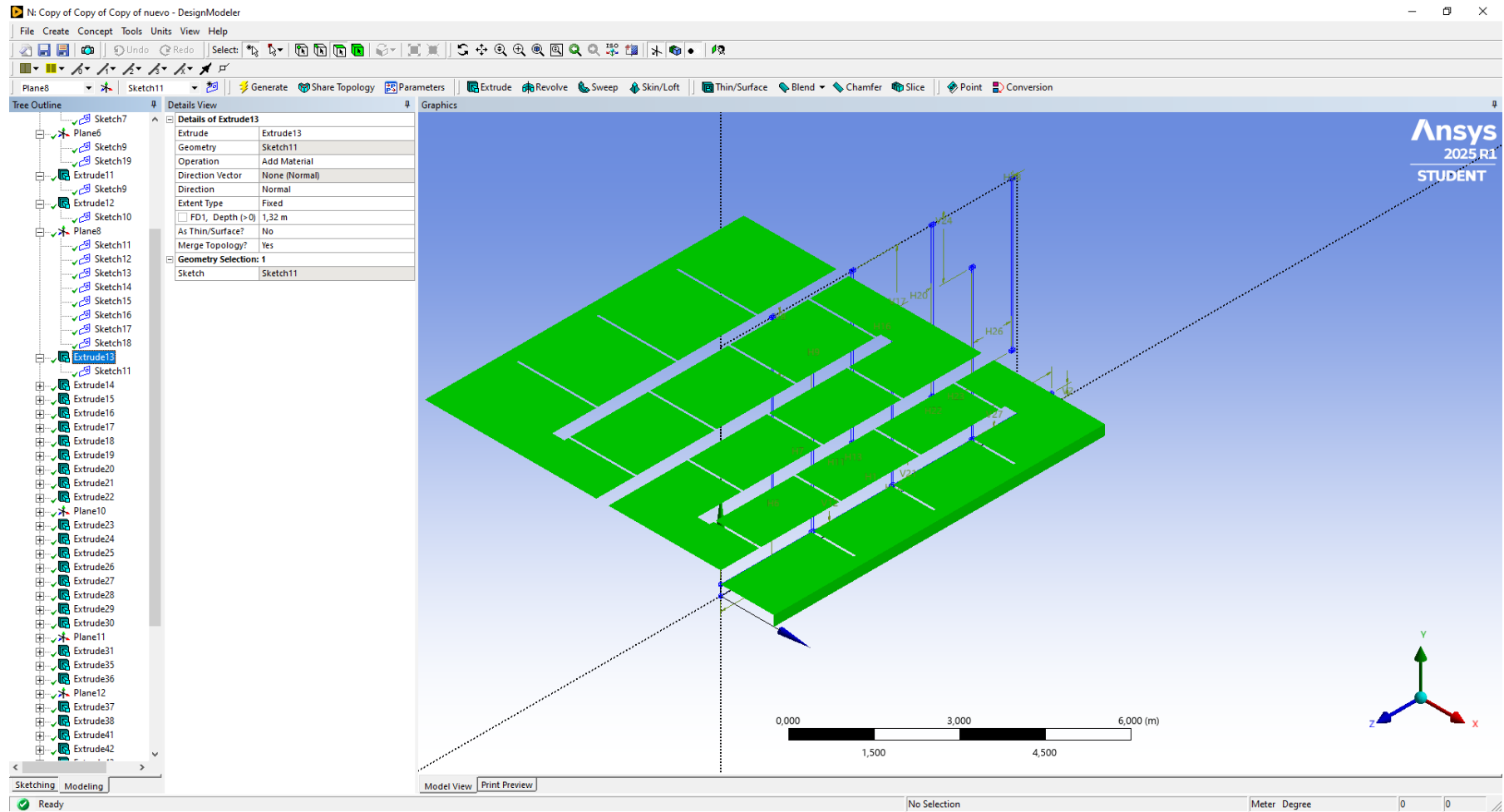


Figura 161

Anexos: Elaboración de la geometría 26

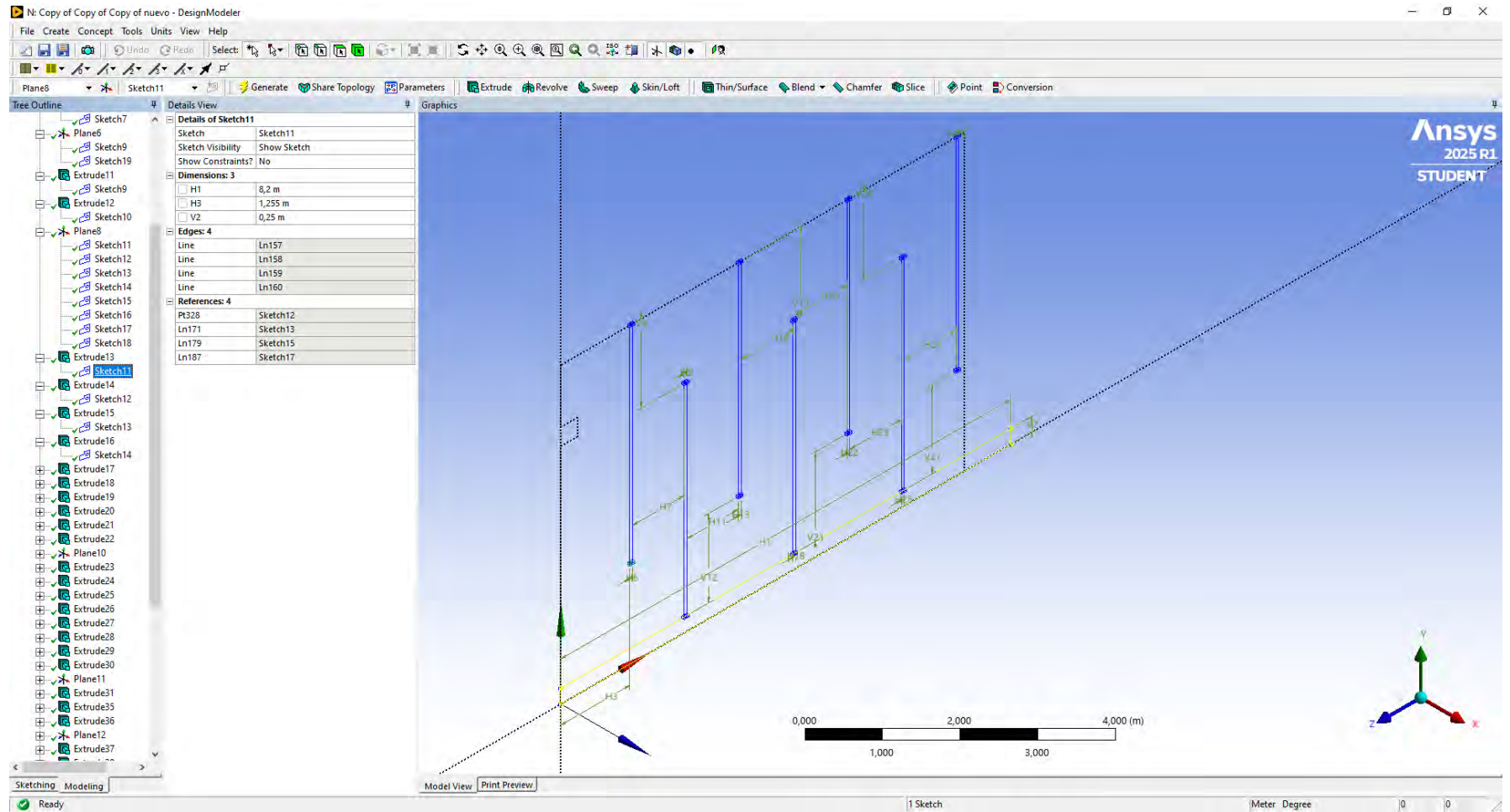


Figura 162

Anexos: Elaboración de la geometría 27

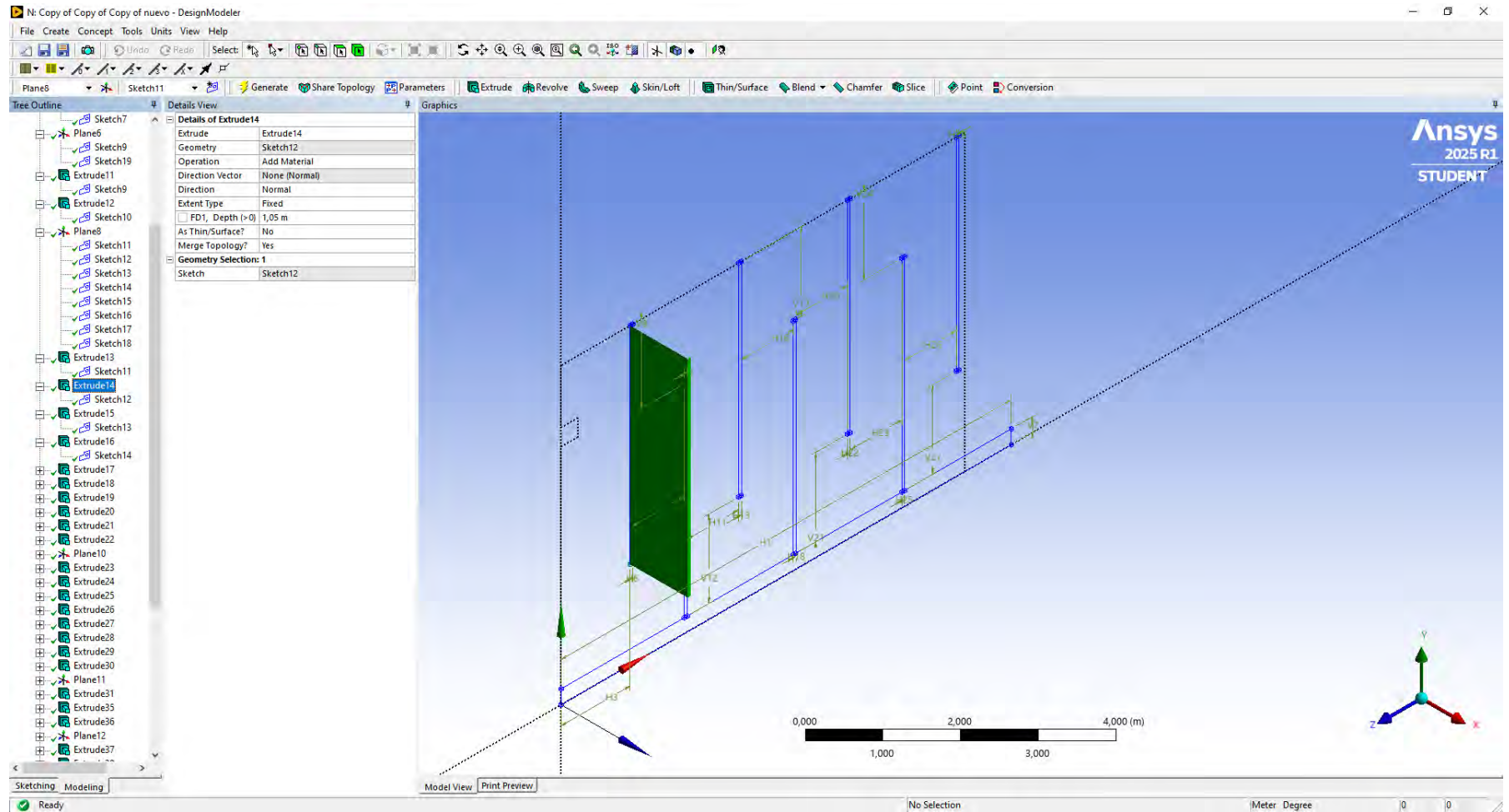


Figura 163

Anexos: Elaboración de la geometría 28

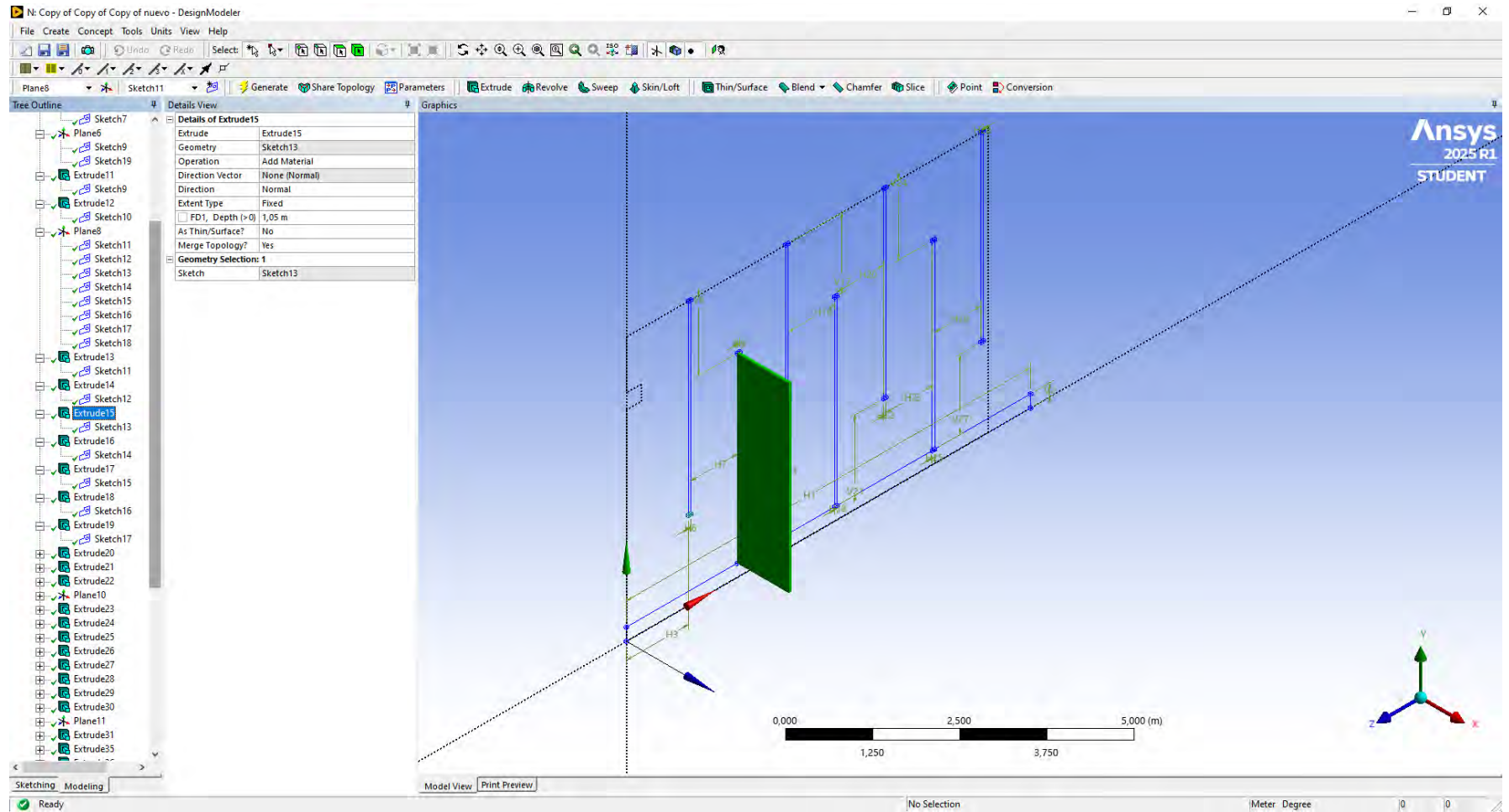




Figura 164

Anexos: Elaboración de la geometría 29

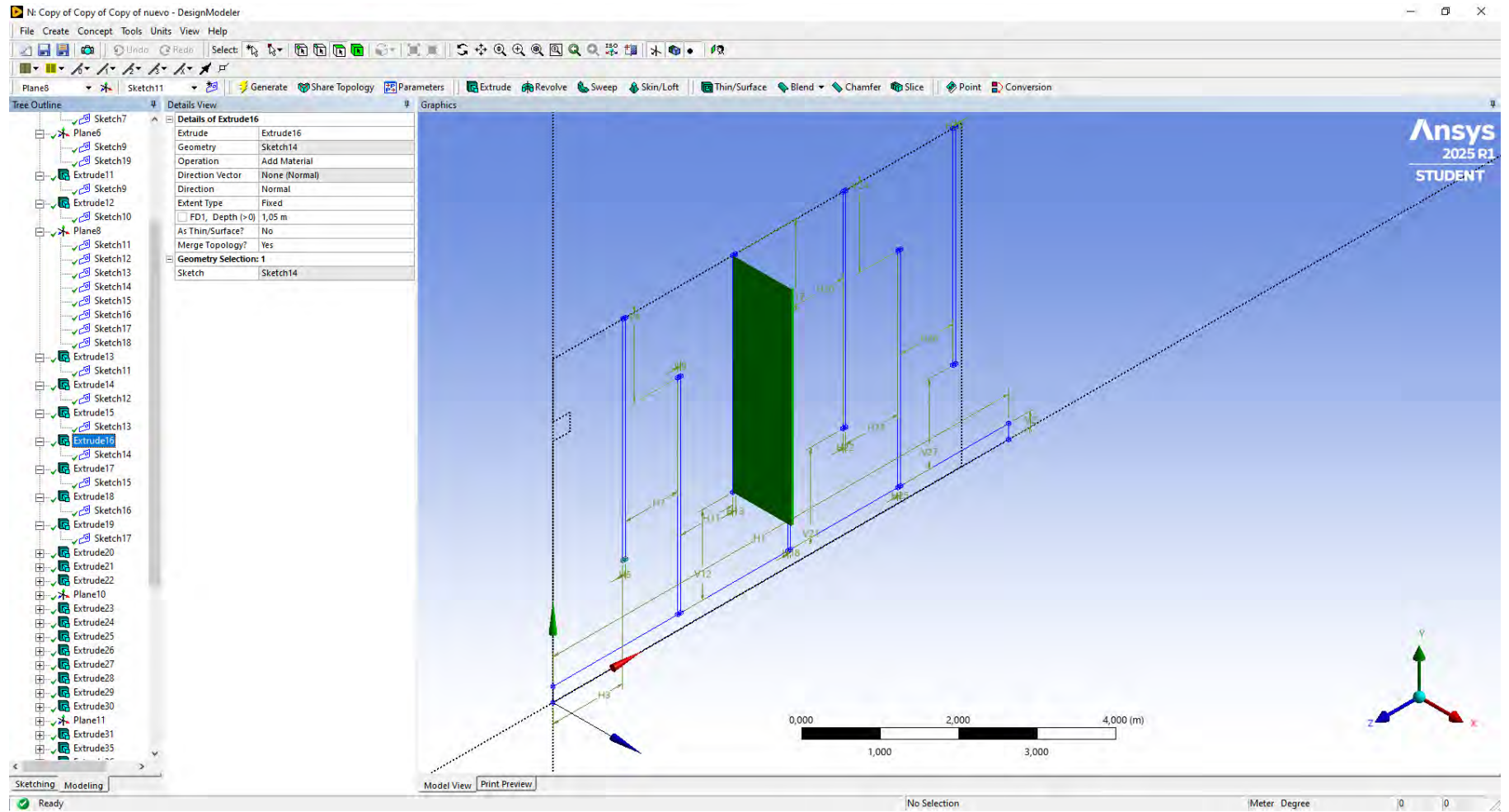


Figura 165

Anexos: Elaboración de la geometría 30

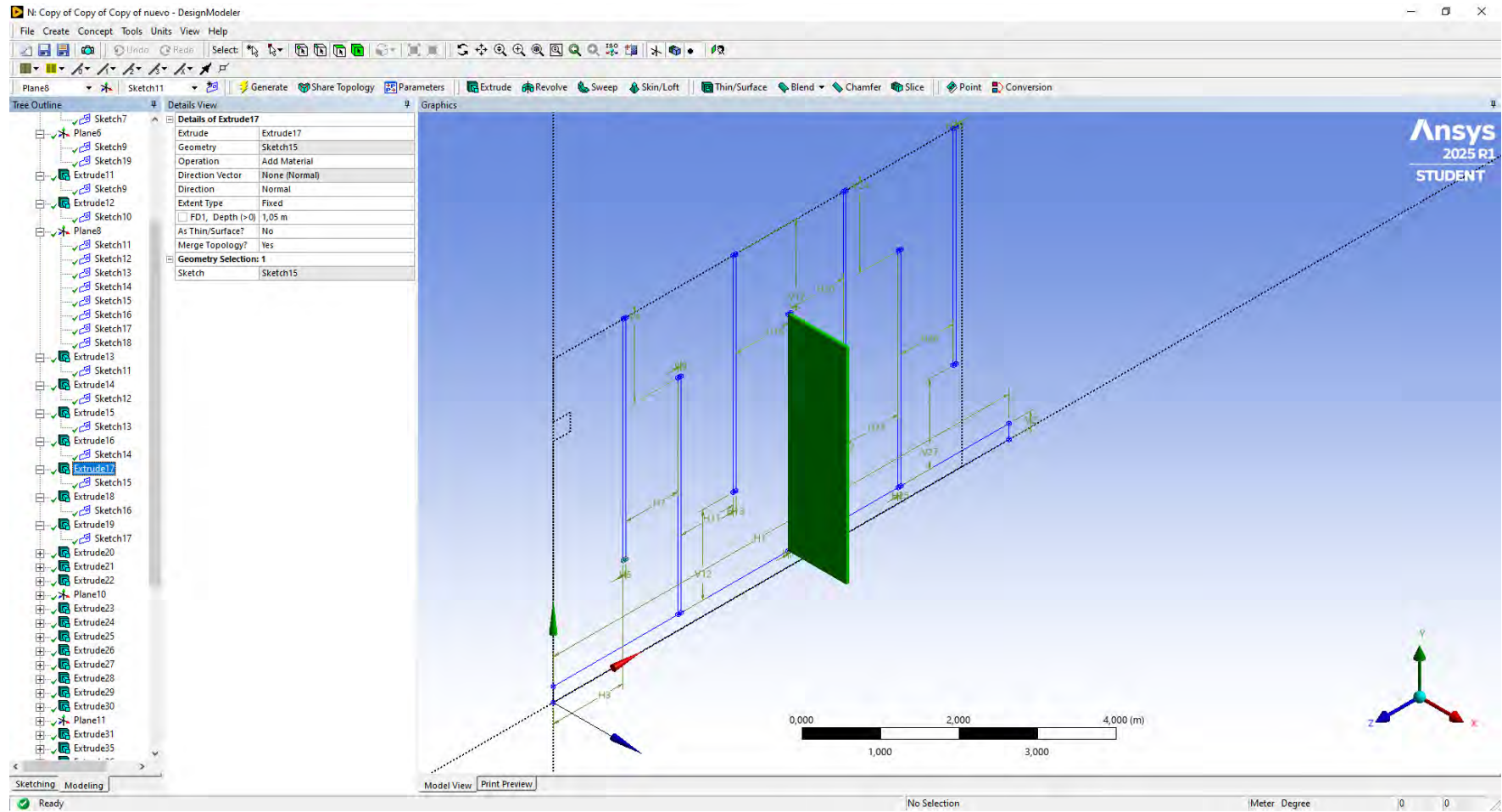


Figura 166

Anexos: Elaboración de la geometría 31

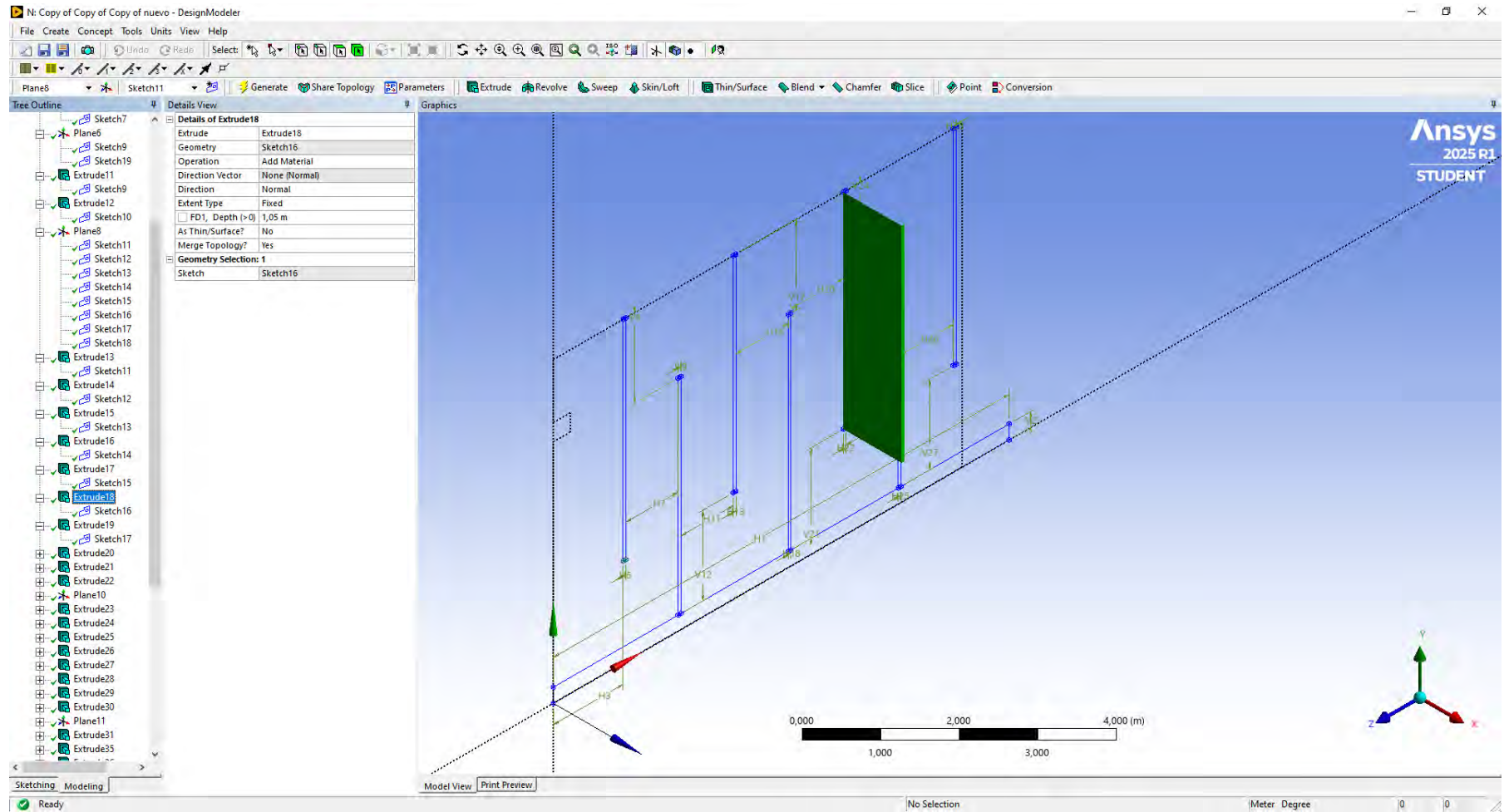




Figura 167

Anexos: Elaboración de la geometría 32

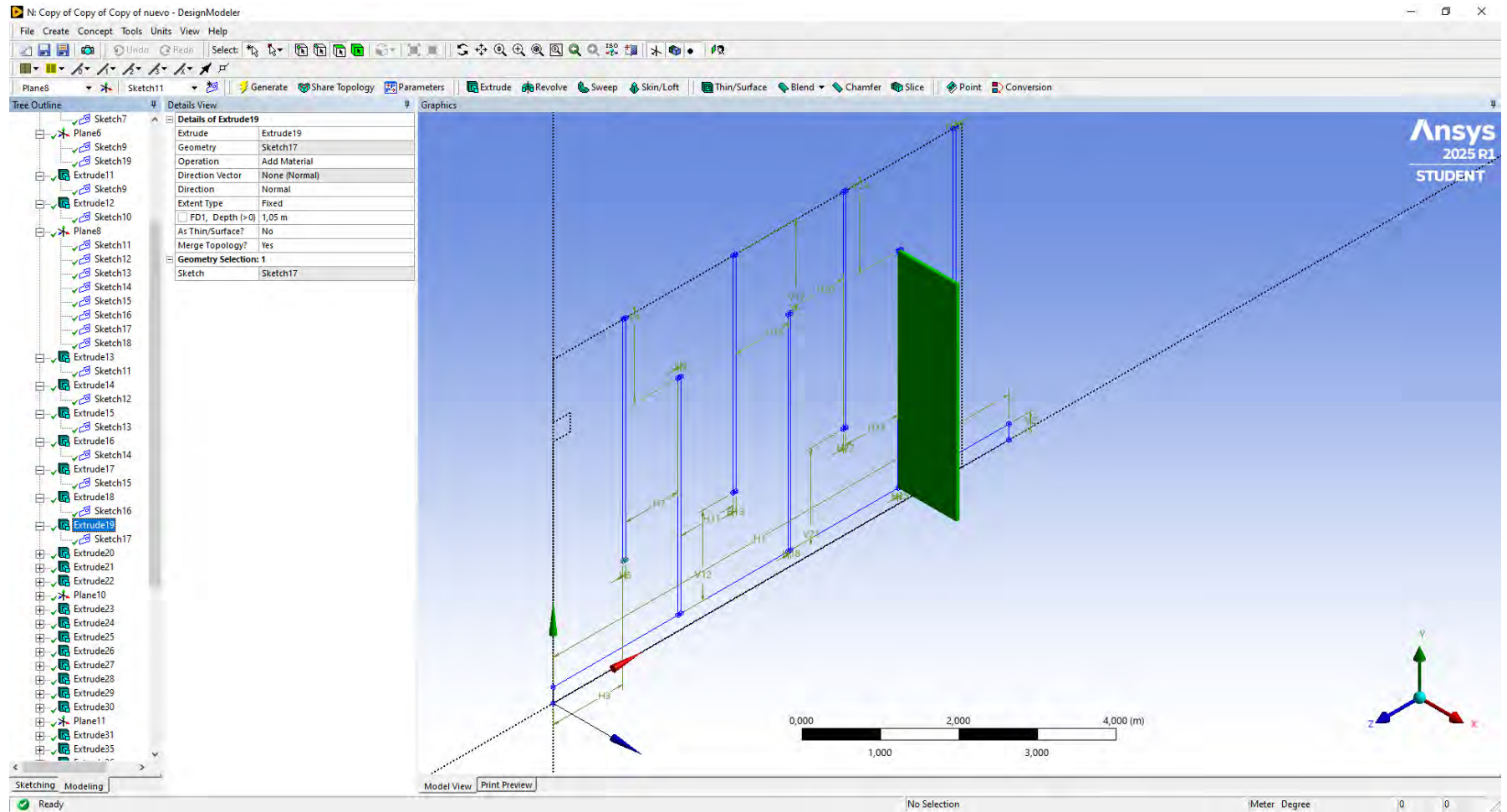




Figura 168

Anexos: Elaboración de la geometría 33

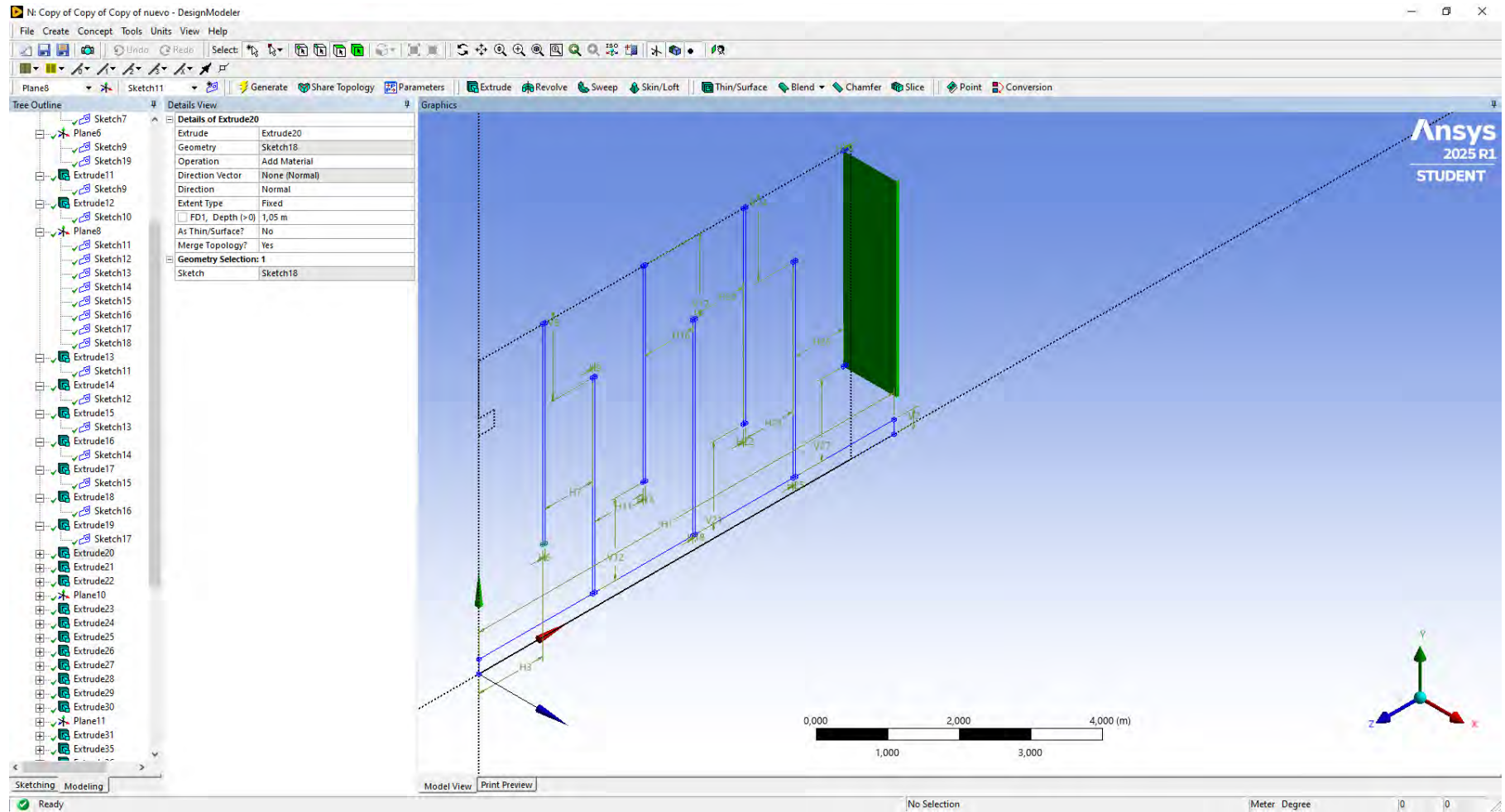
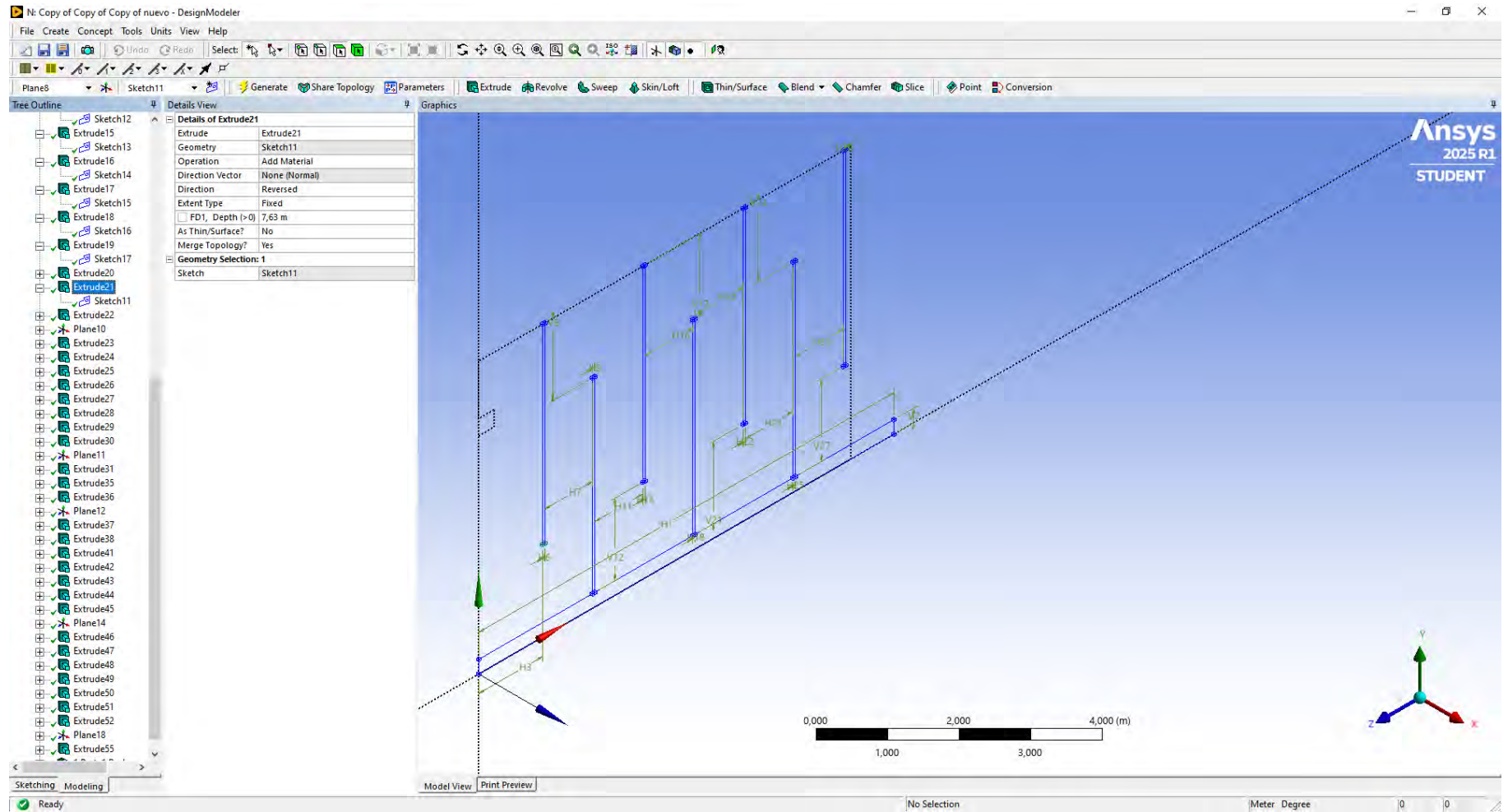


Figura 169

Anexos: Elaboración de la geometría 34



### Figura 170

Anexos: Elaboración de la geometría 35

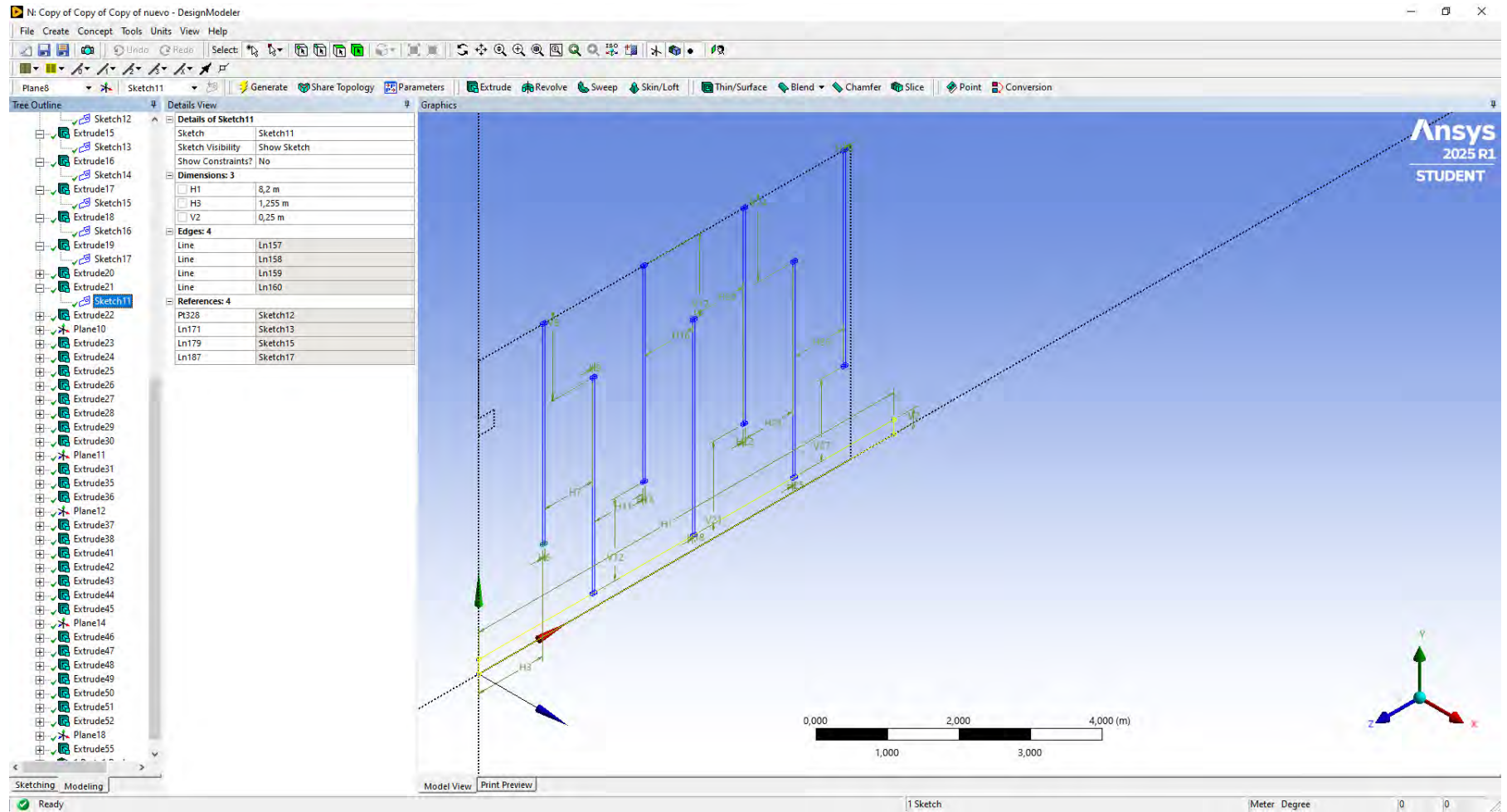
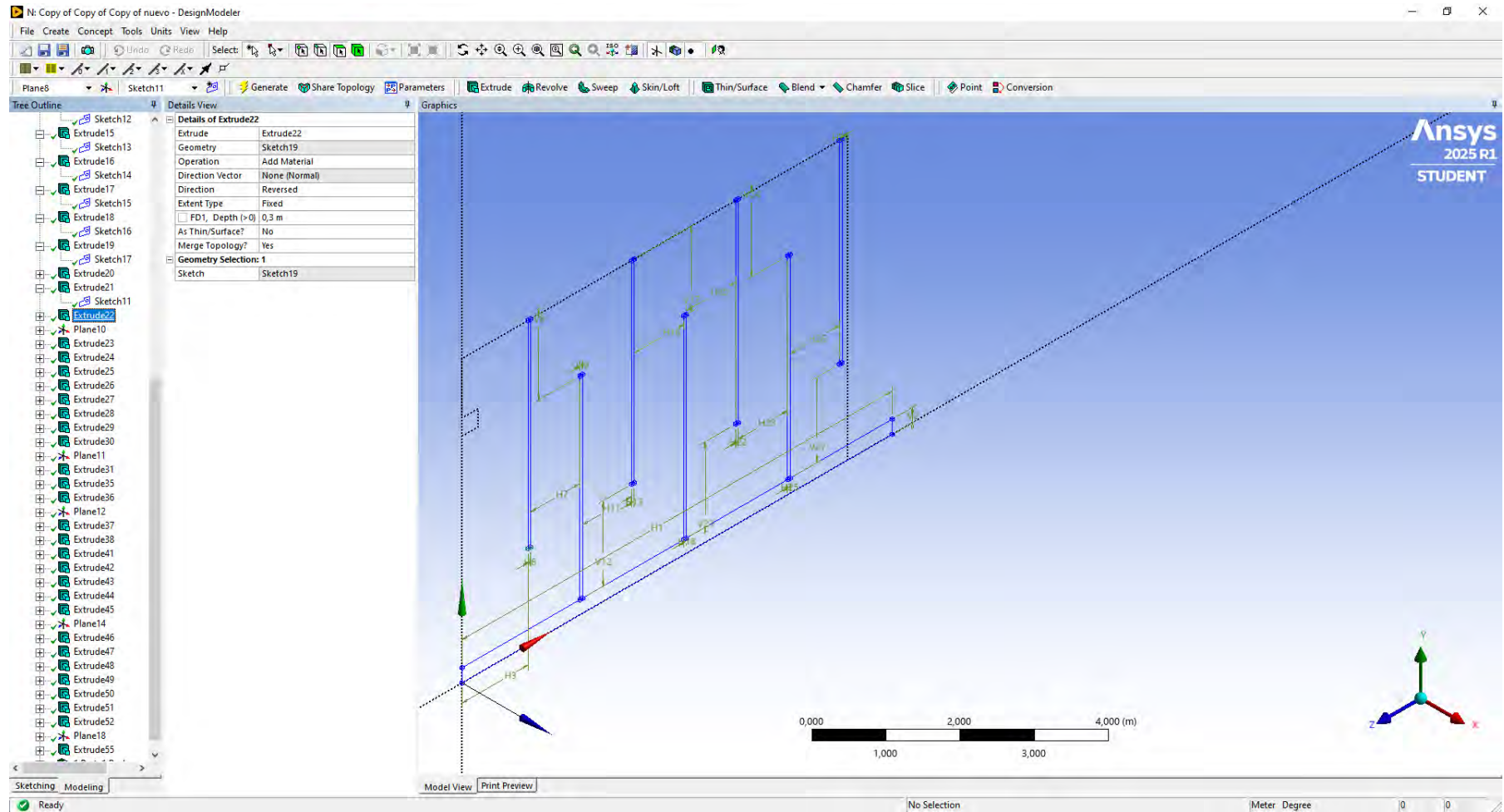




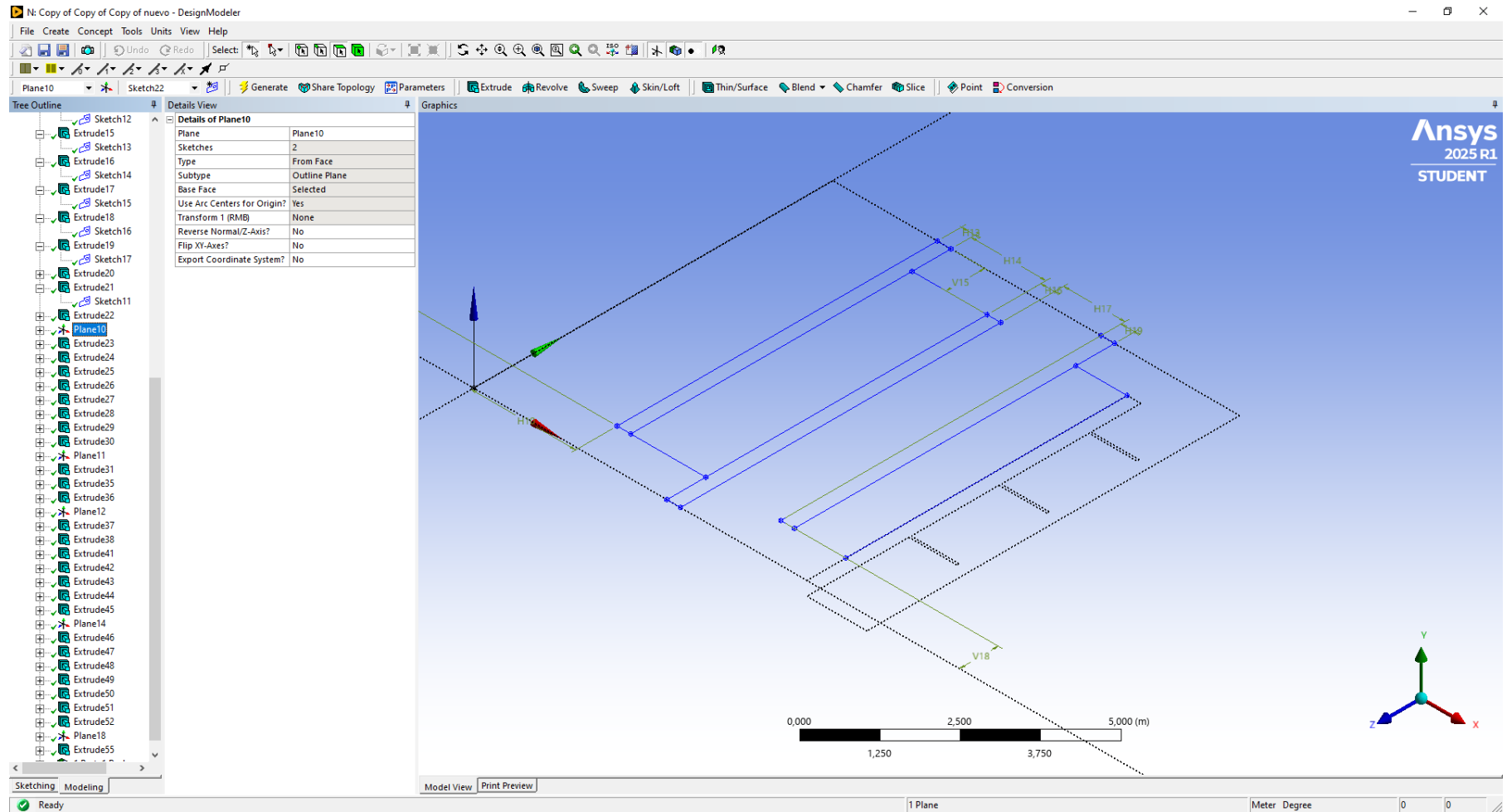
Figura 171

Anexos: Elaboración de la geometría 36



## Figura 172

Anexos: Elaboración de la geometría 37



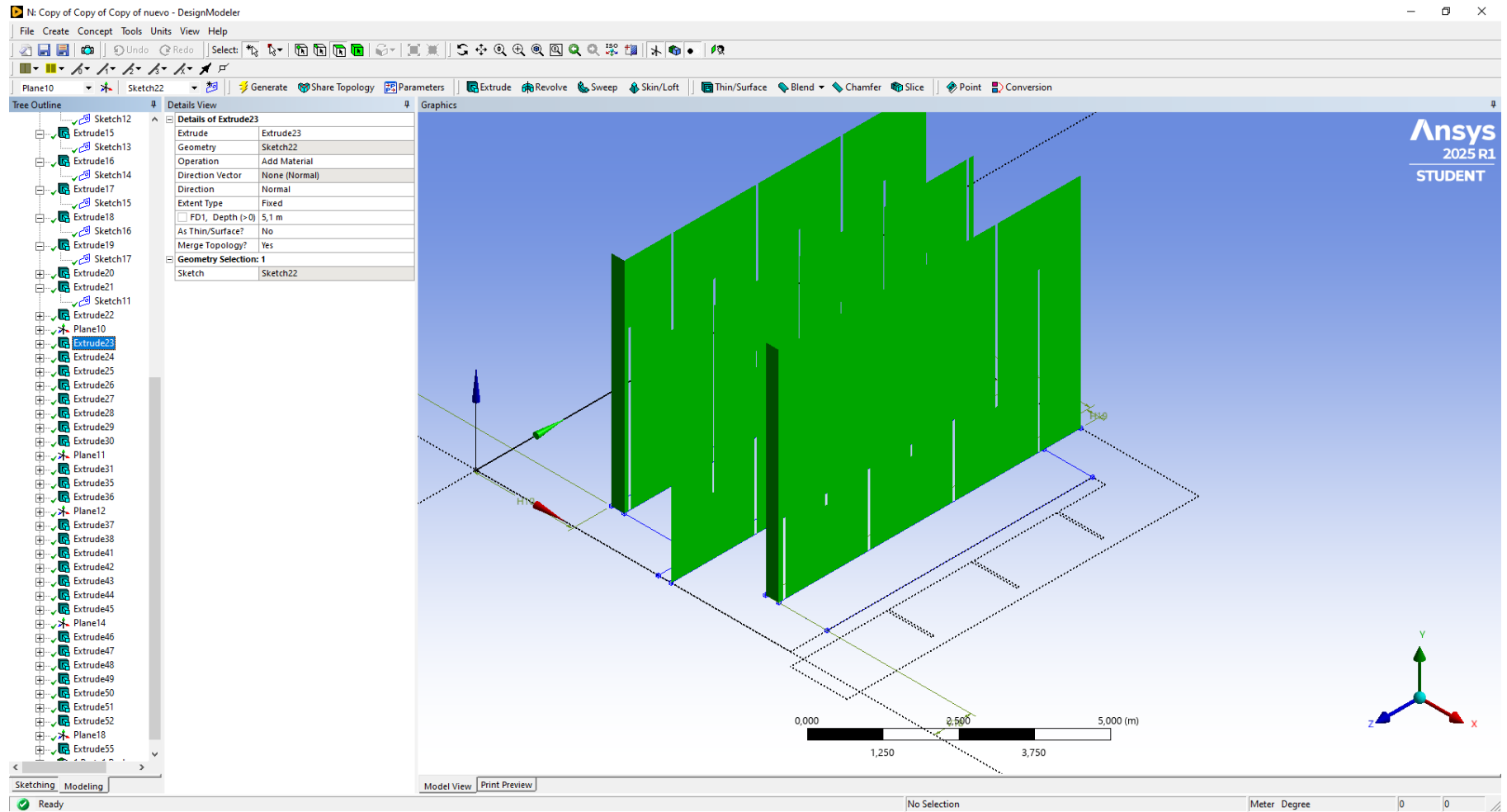
**Figura 173***Anexos: Elaboración de la geometría 38*

Figura 174

Anexos: Elaboración de la geometría 39

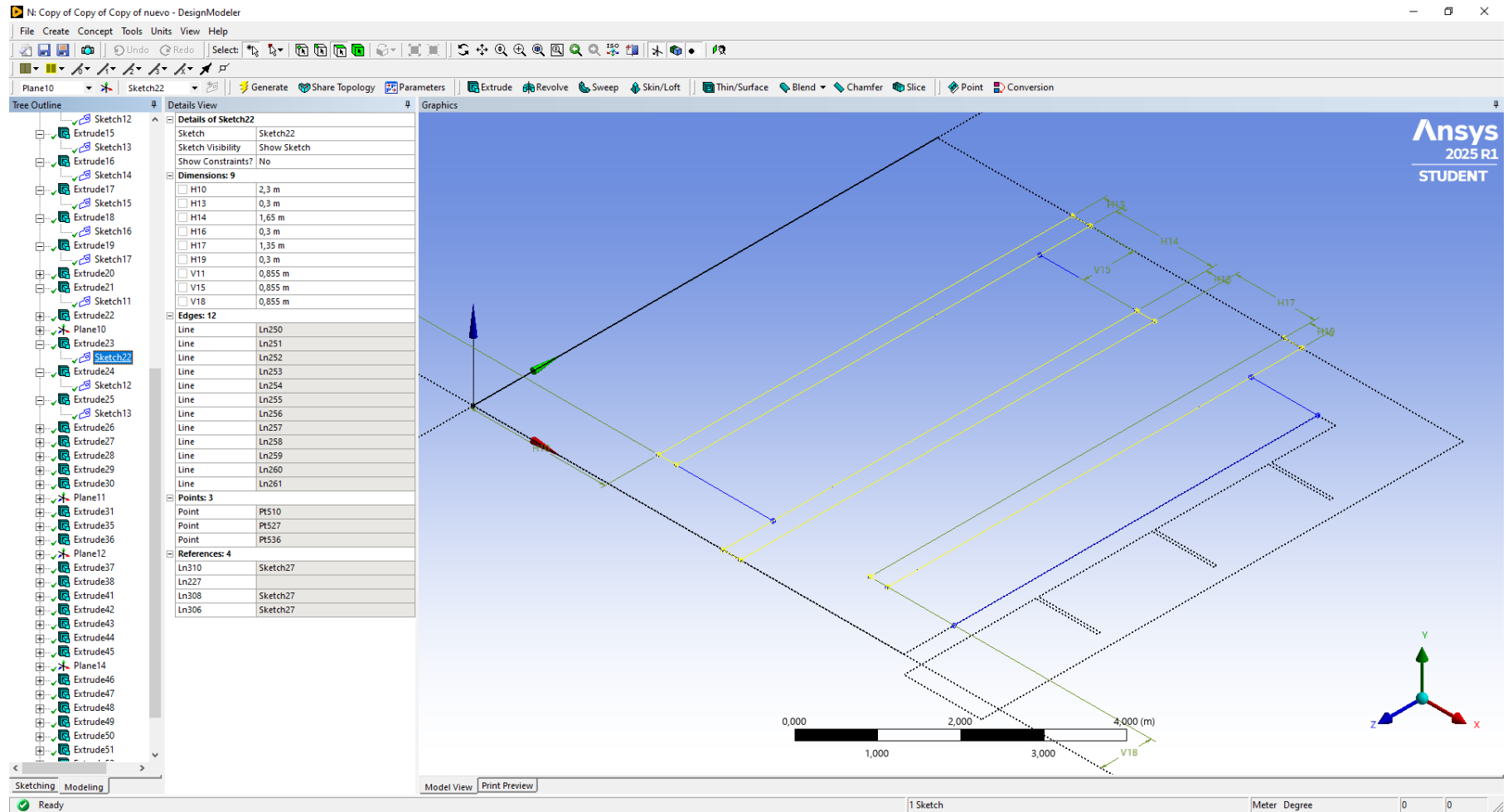


Figura 175

Anexos: Elaboración de la geometría 40

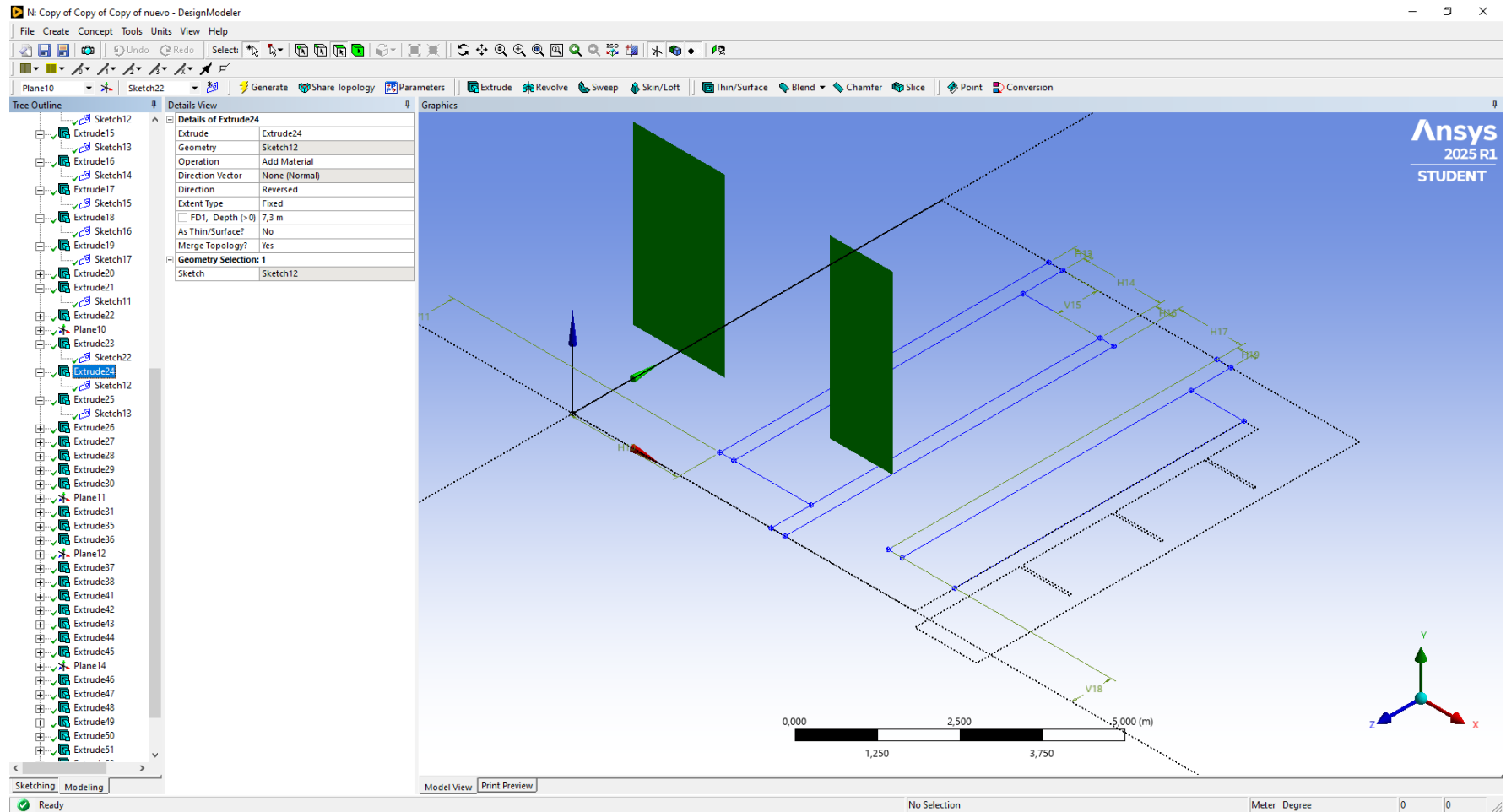




Figura 176

Anexos: Elaboración de la geometría 41

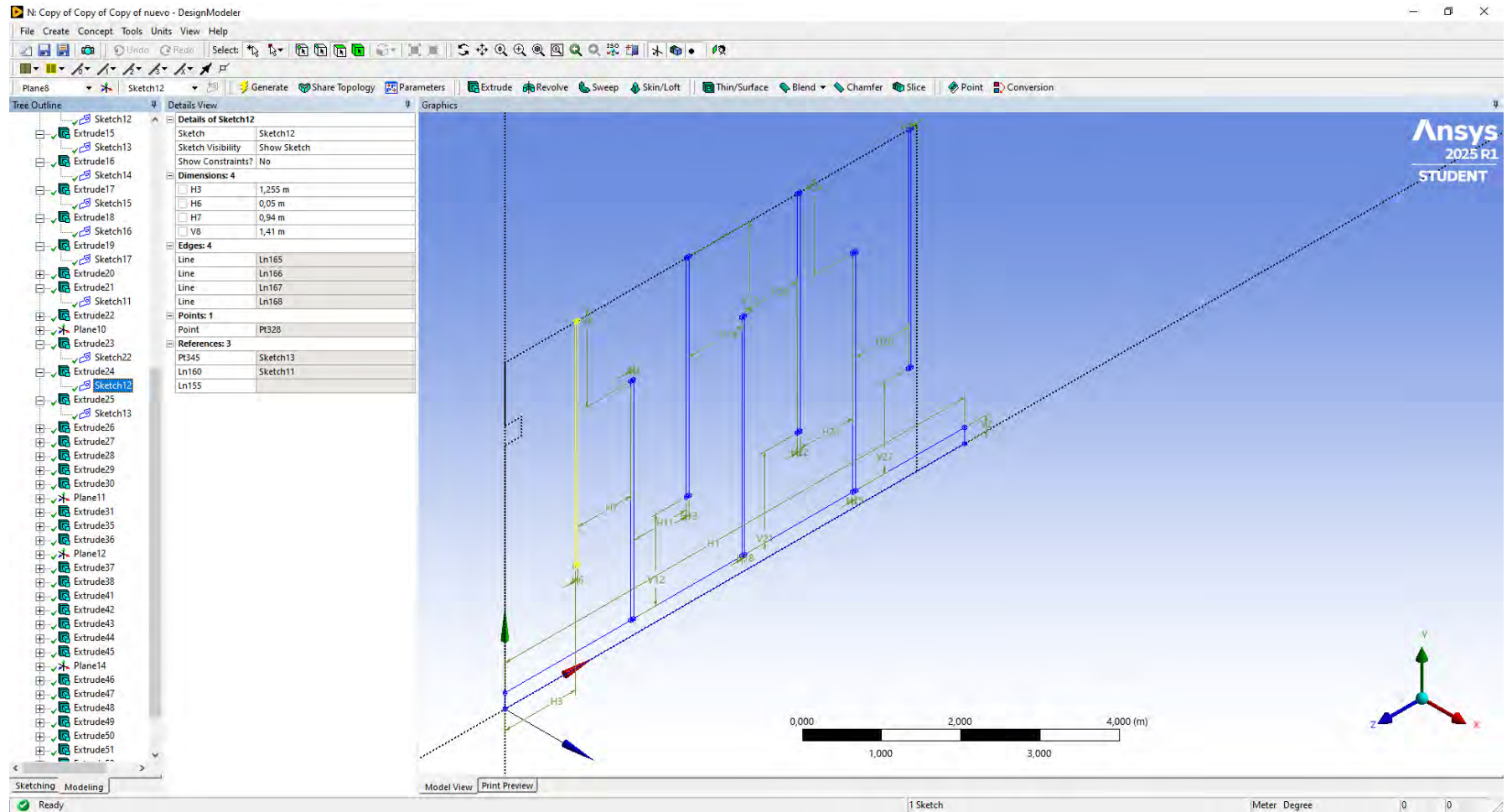


Figura 177

Anexos: Elaboración de la geometría 42

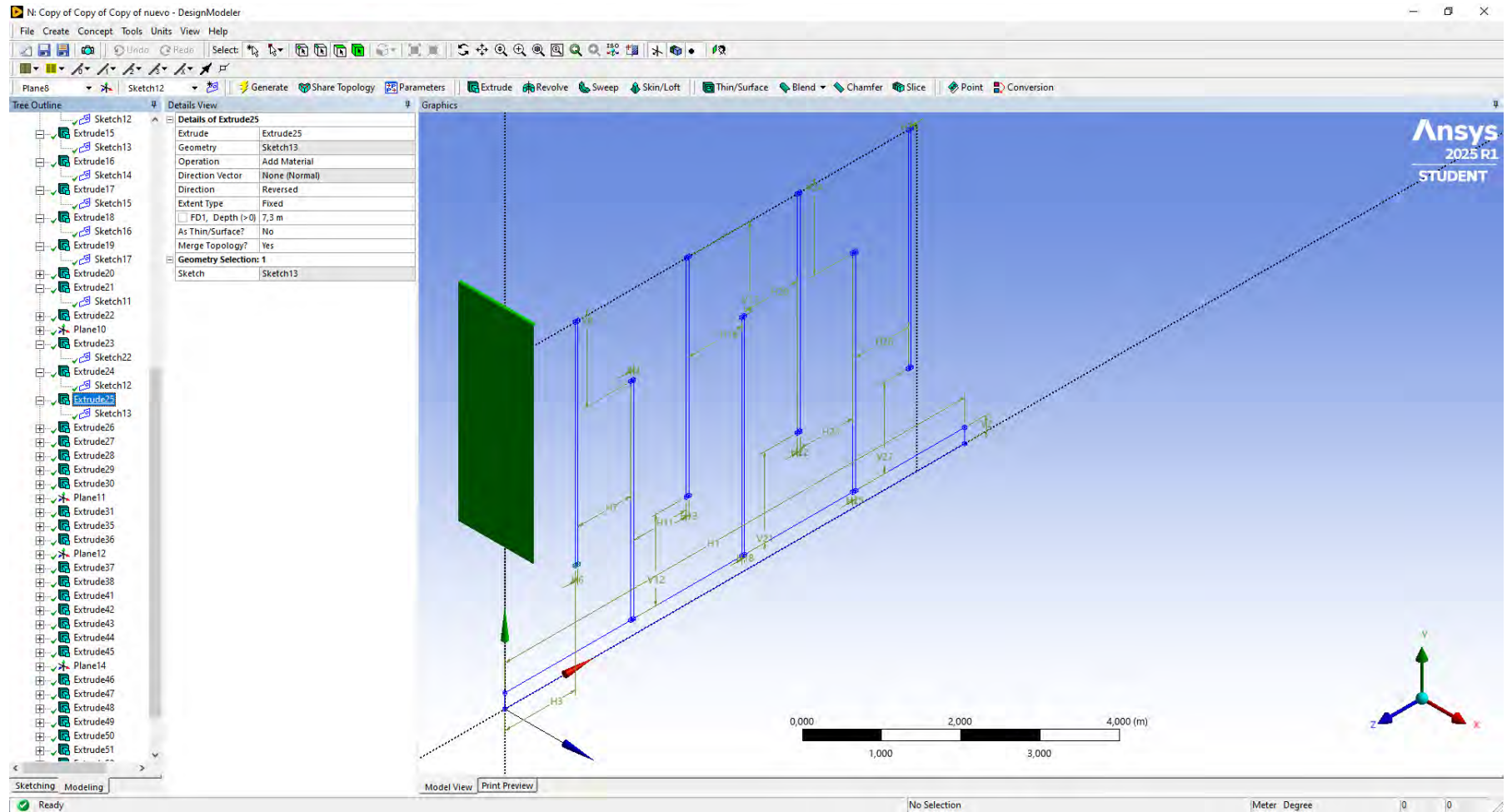


Figura 178

Anexos: Elaboración de la geometría 43

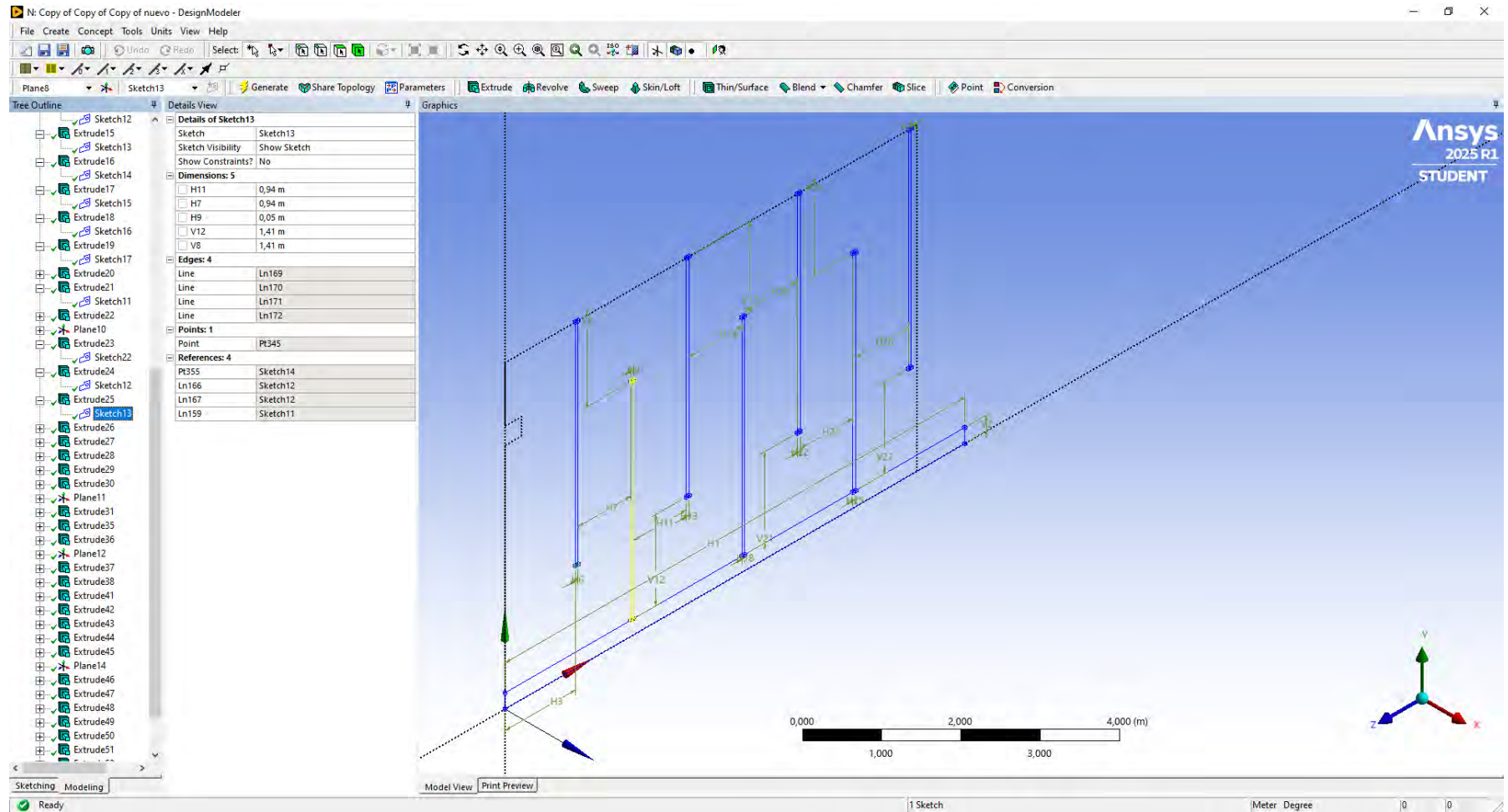




Figura 179

Anexos: Elaboración de la geometría 44

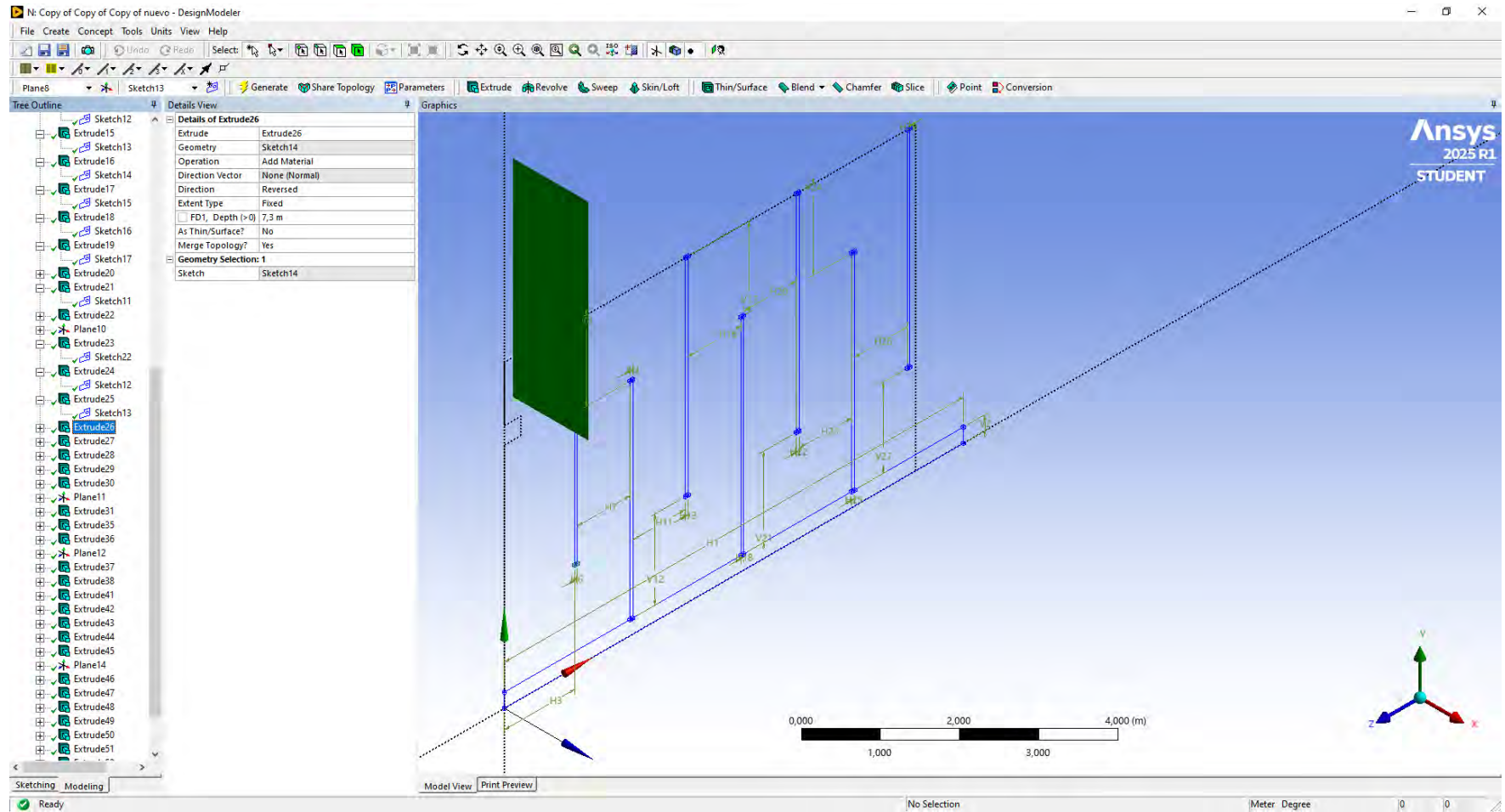


Figura 180

Anexos: Elaboración de la geometría 45

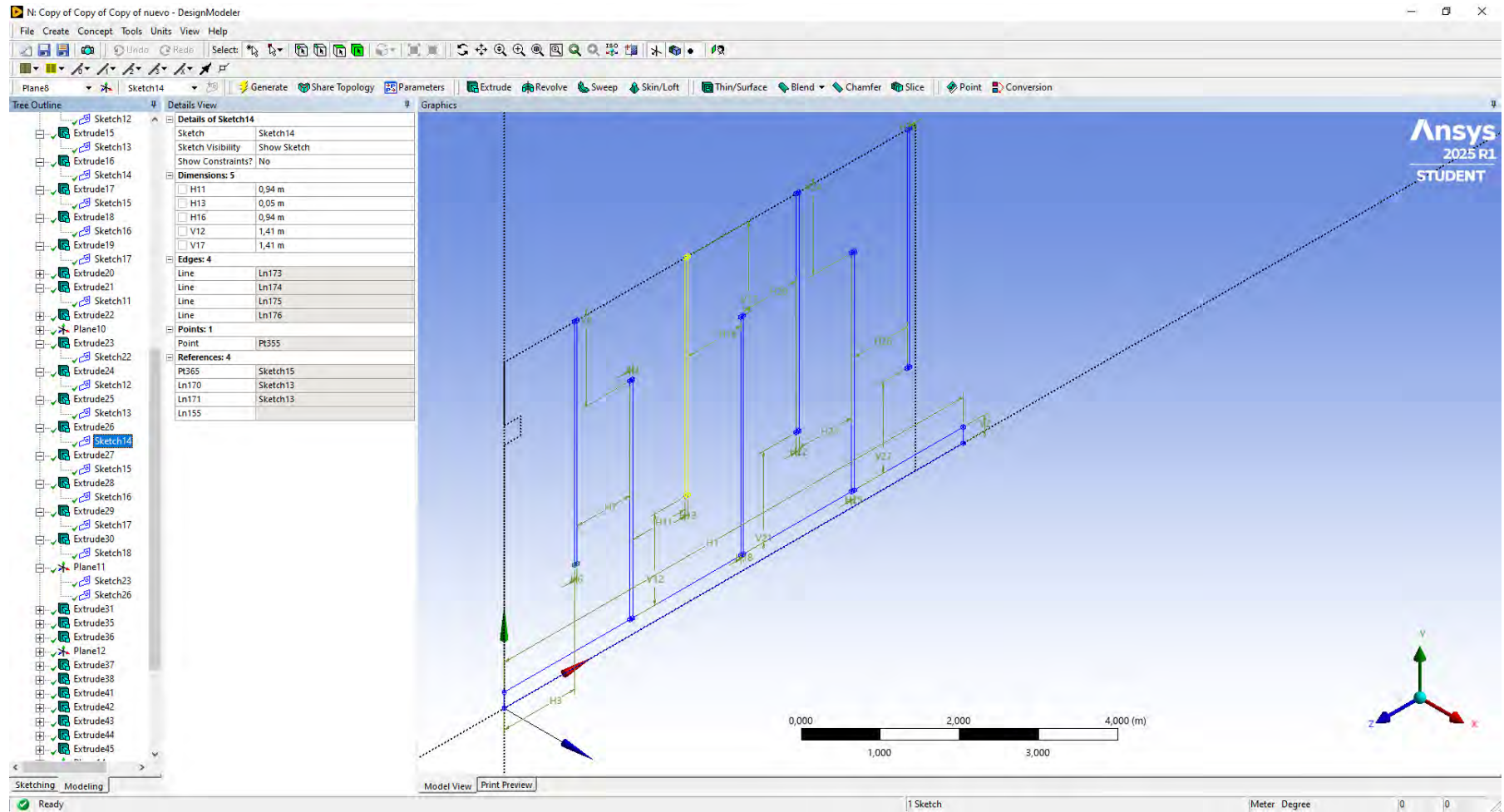


Figura 181

Anexos: Elaboración de la geometría 46

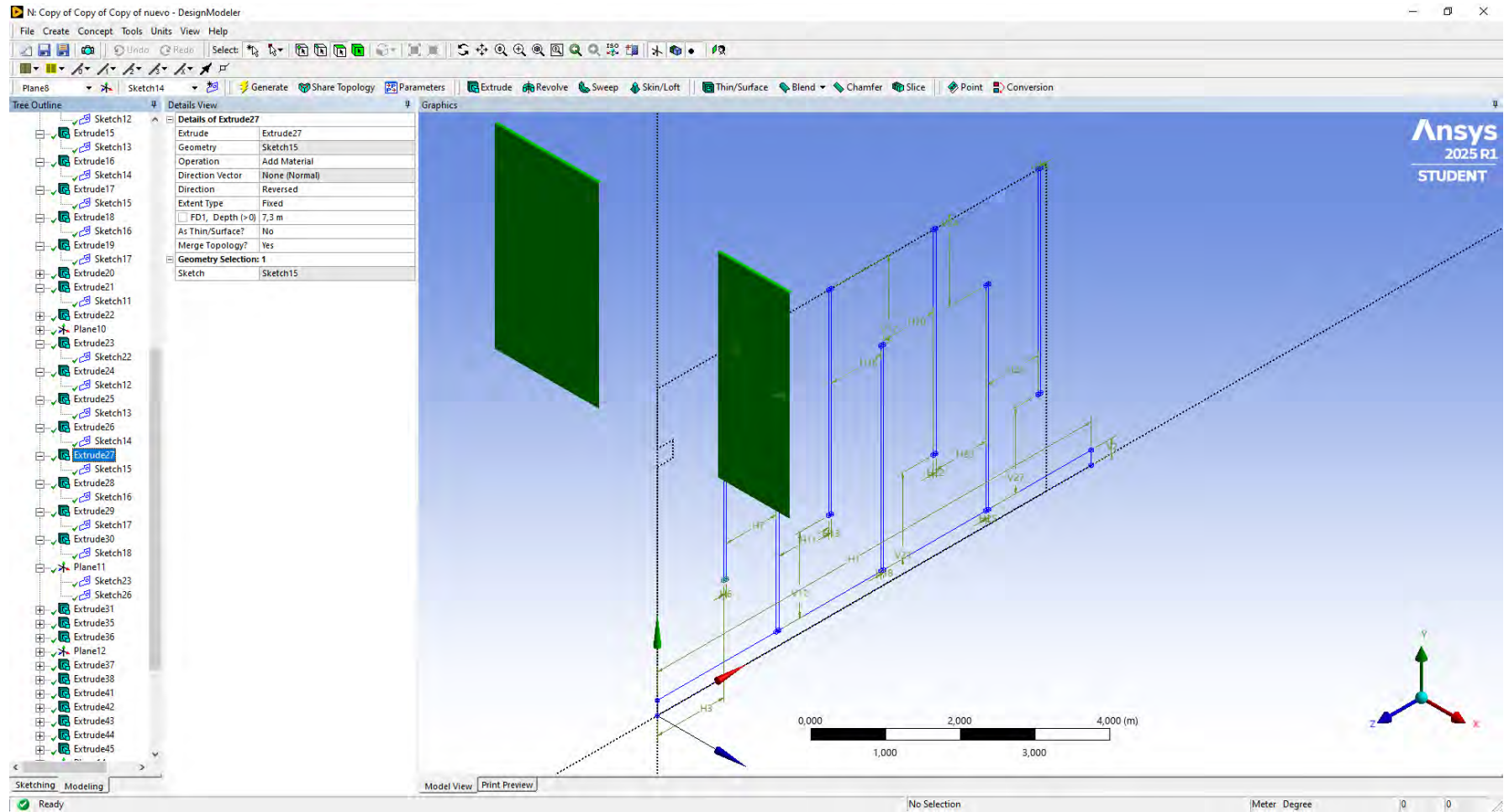
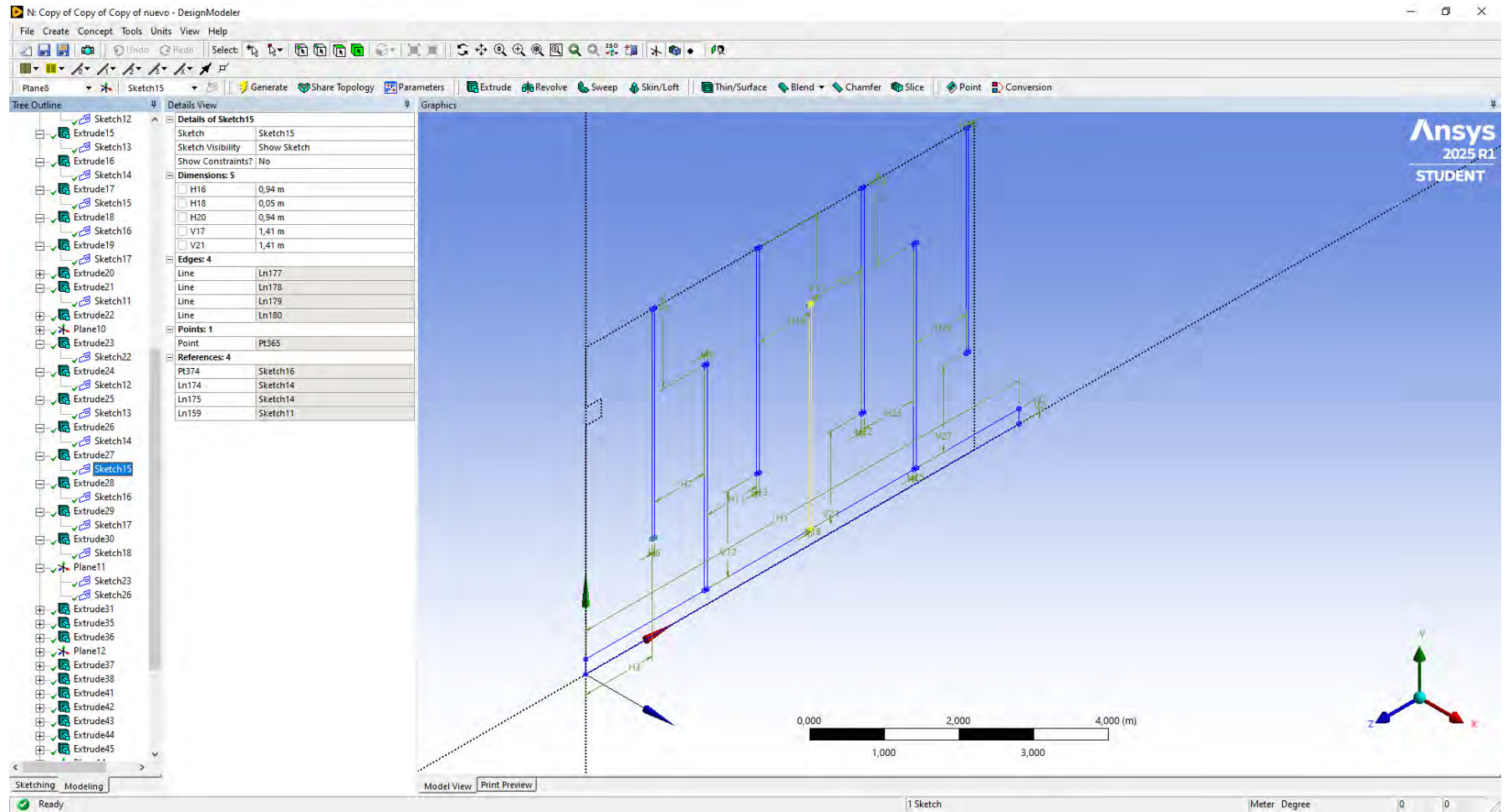




Figura 182

Anexos: Elaboración de la geometría 47



**Figura 183**

*Anexos: Elaboración de la geometría 48*

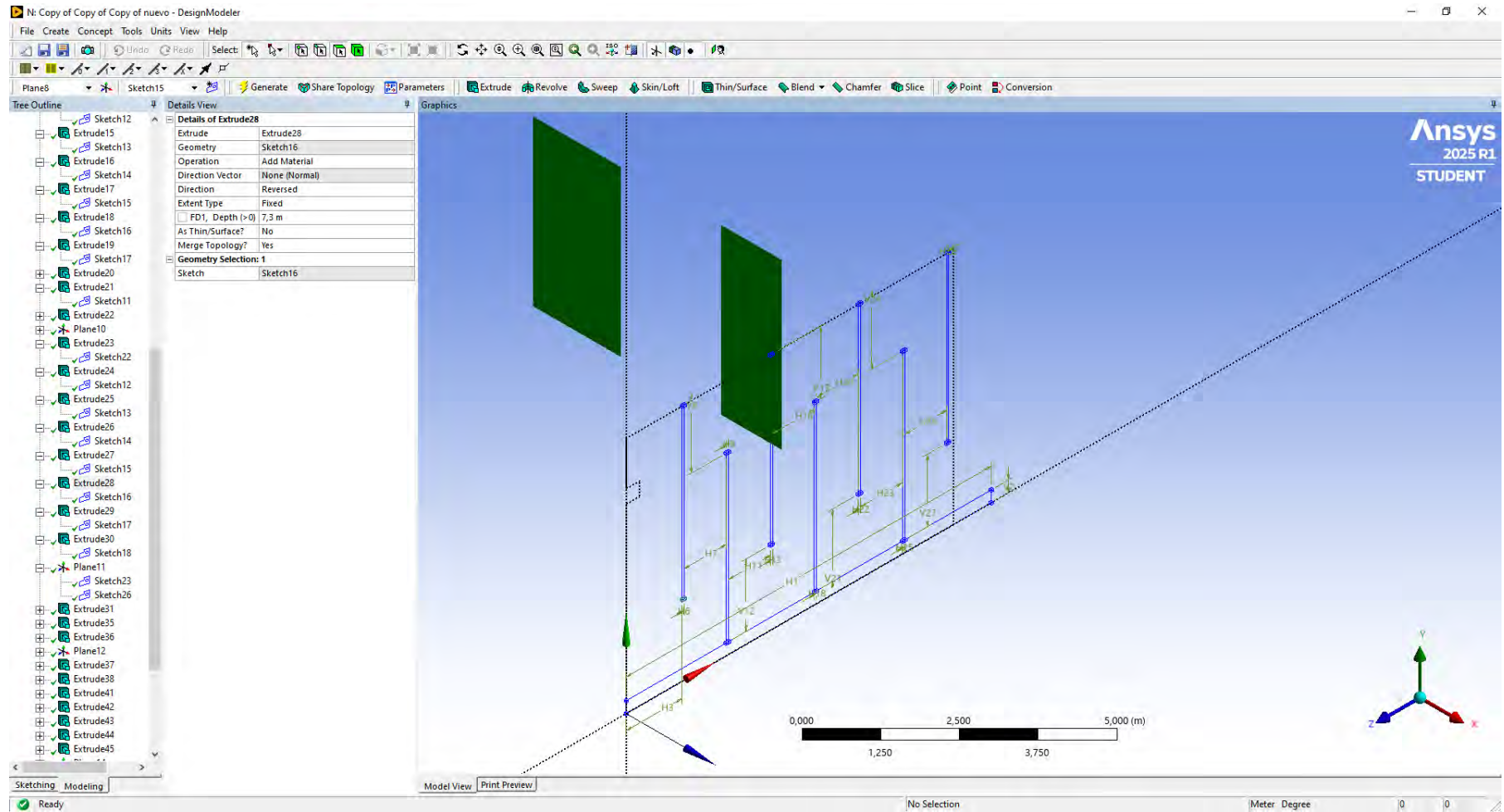




Figura 184

Anexos: Elaboración de la geometría 49

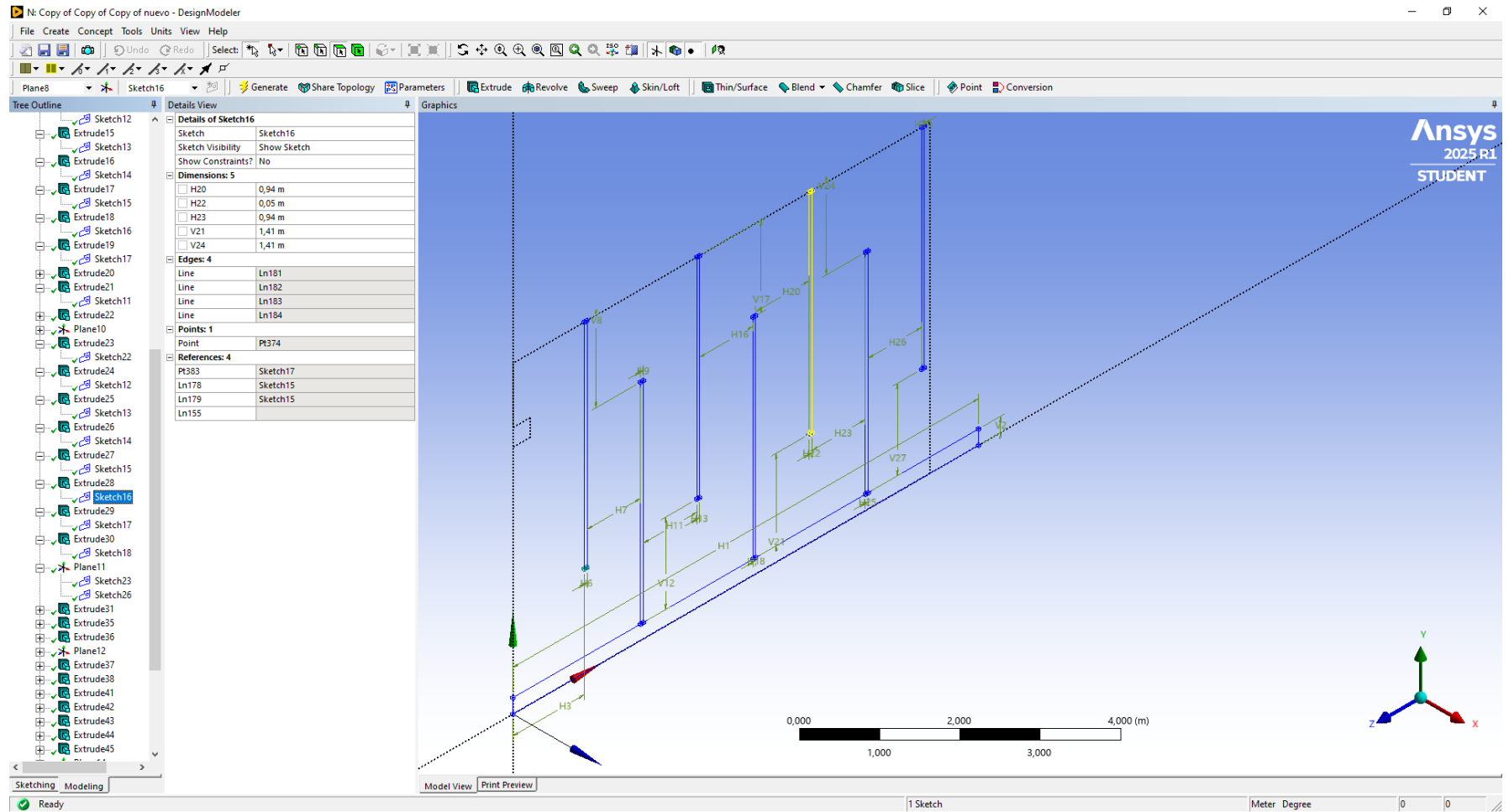


Figura 185

Anexos: Elaboración de la geometría 50

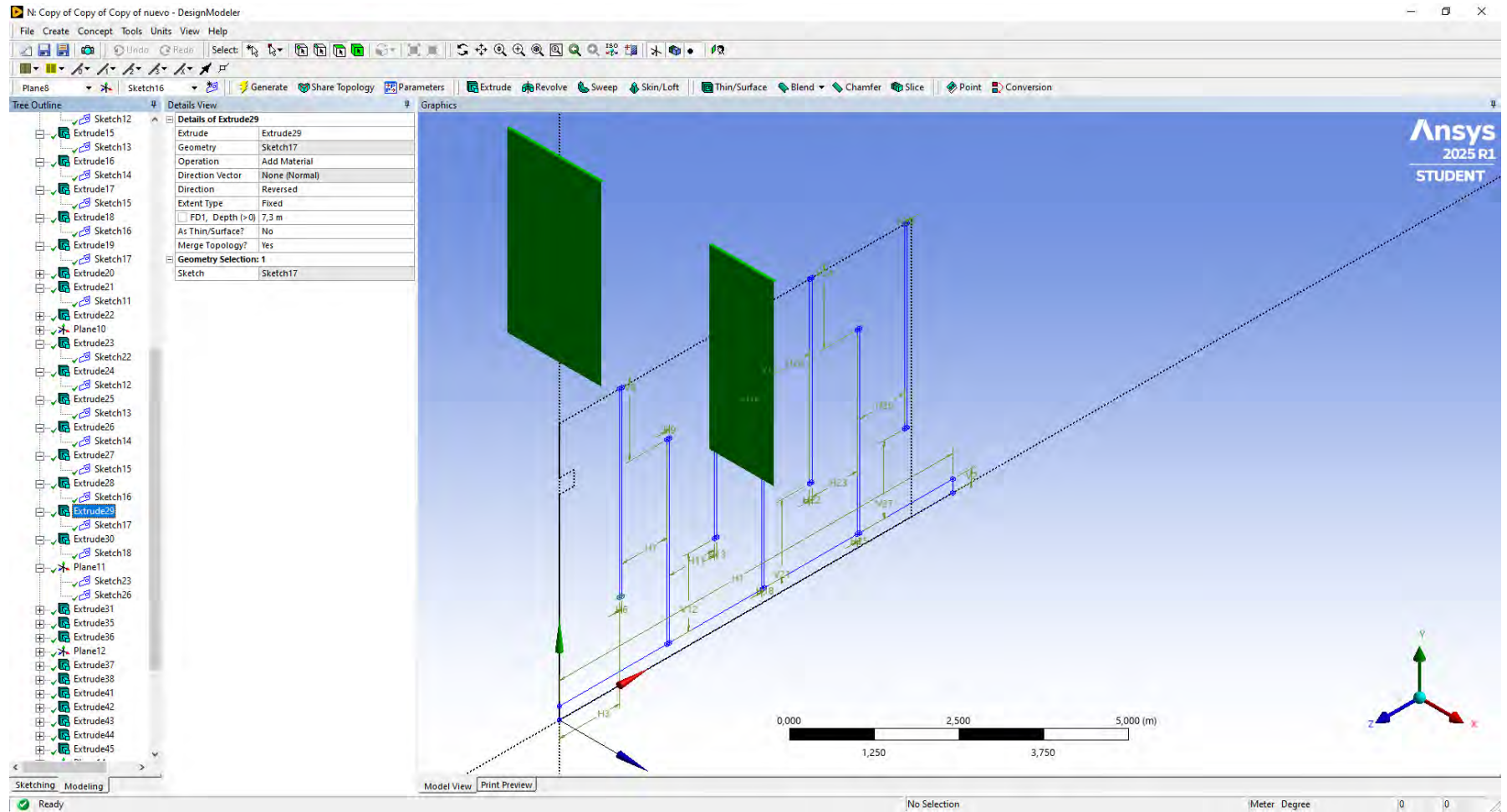


Figura 186

Anexos: Elaboración de la geometría 51

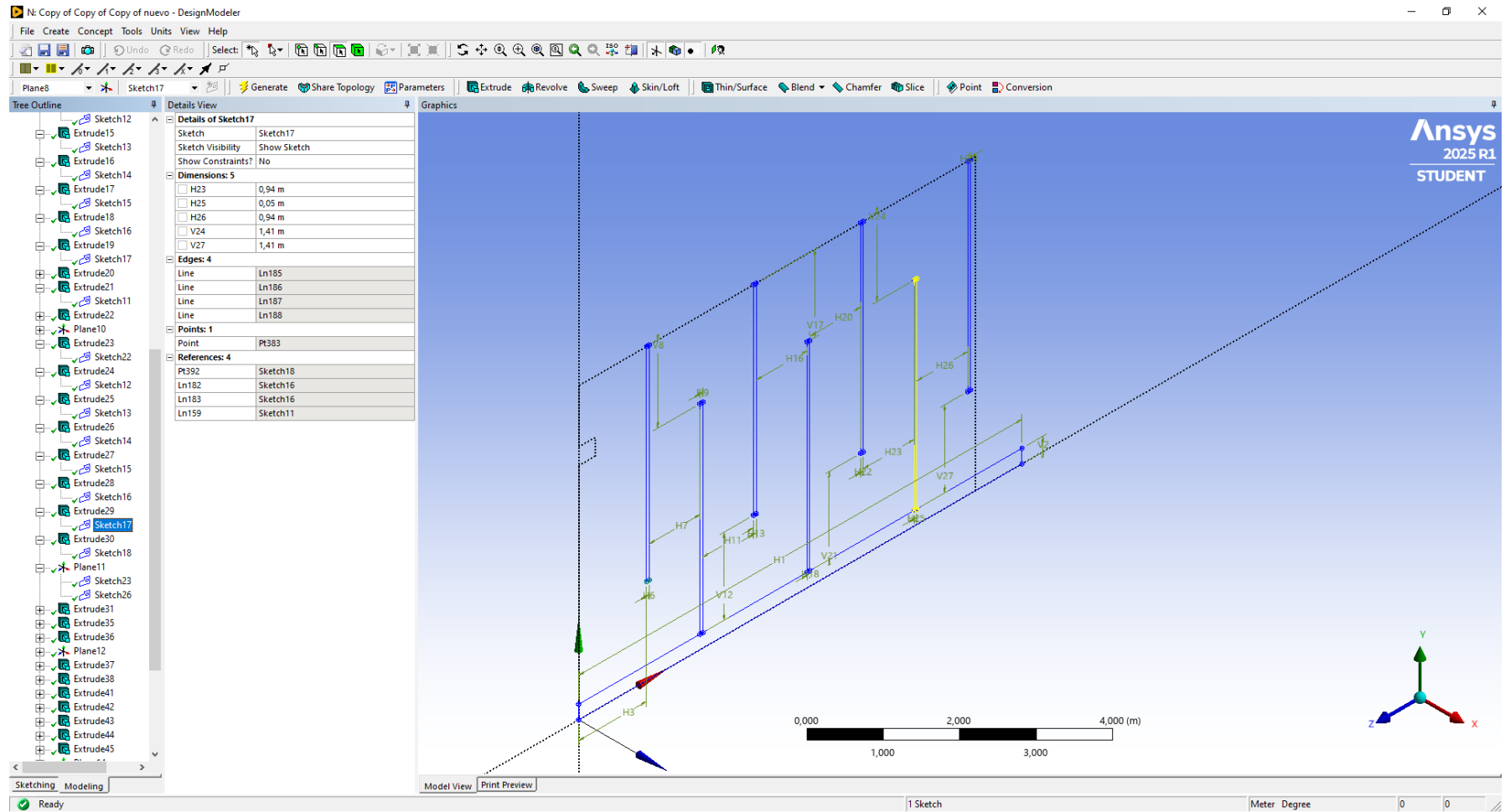


Figura 187

Anexos: Elaboración de la geometría 52

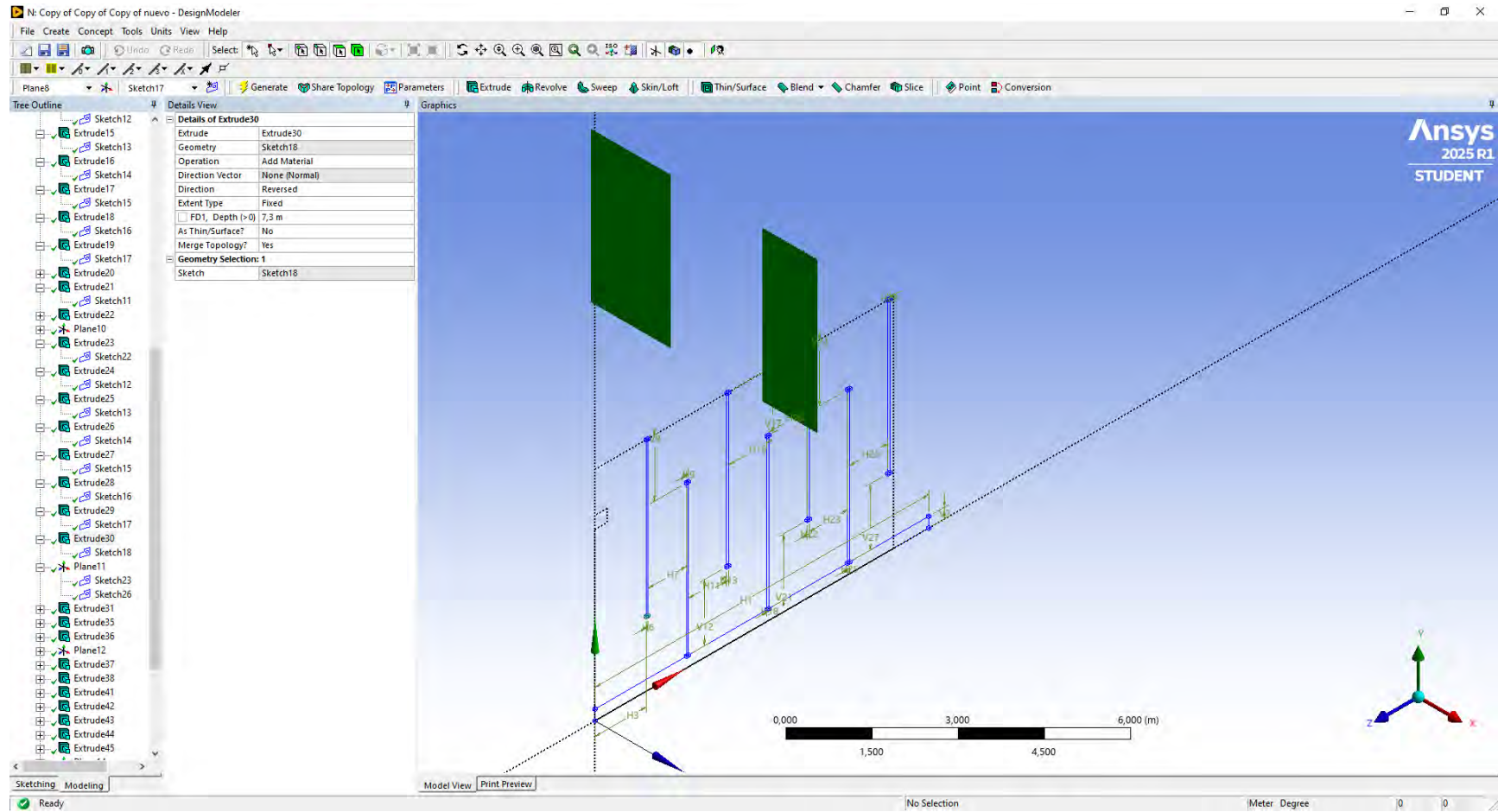
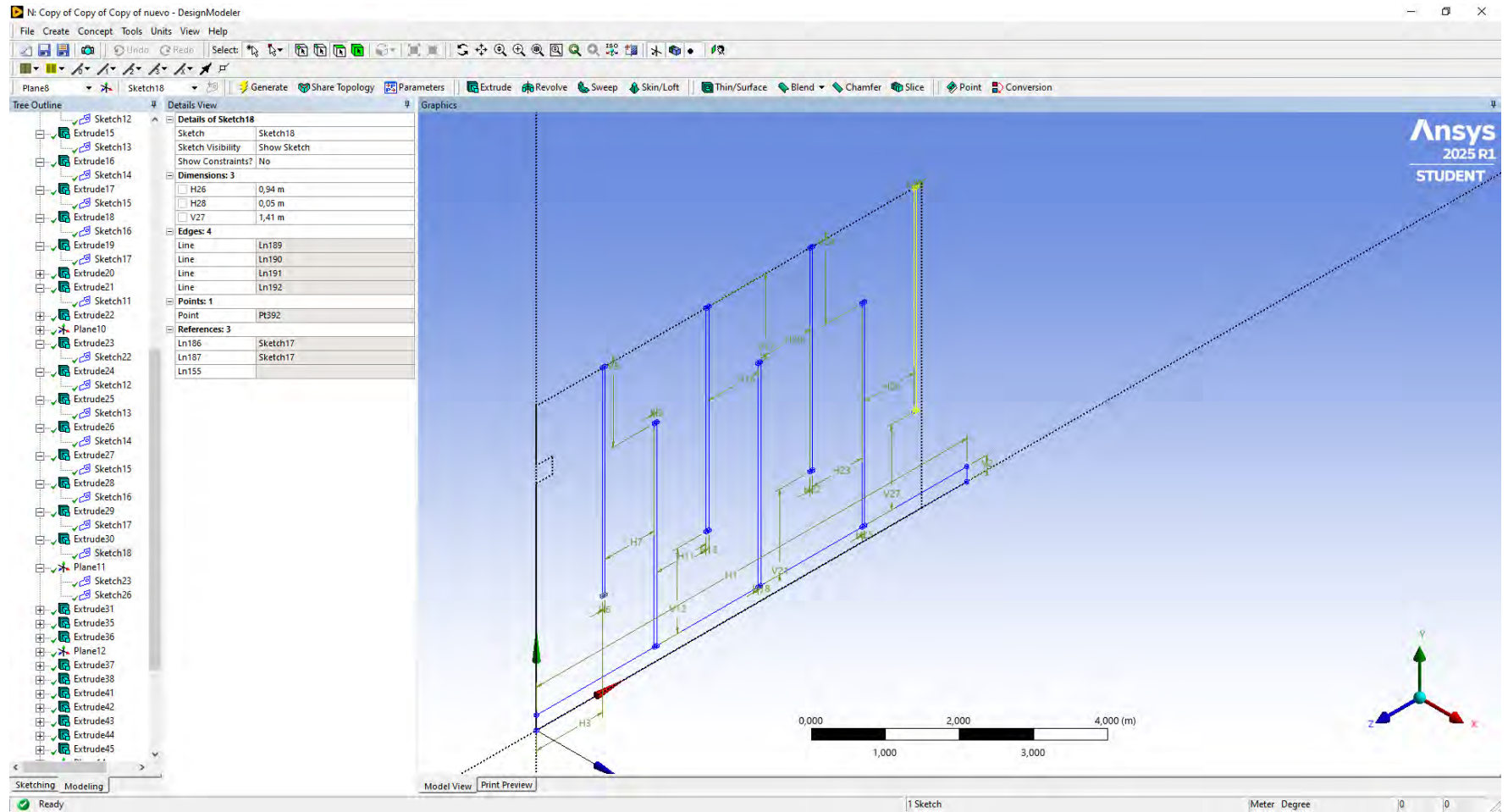


Figura 188

Anexos: Elaboración de la geometría 53



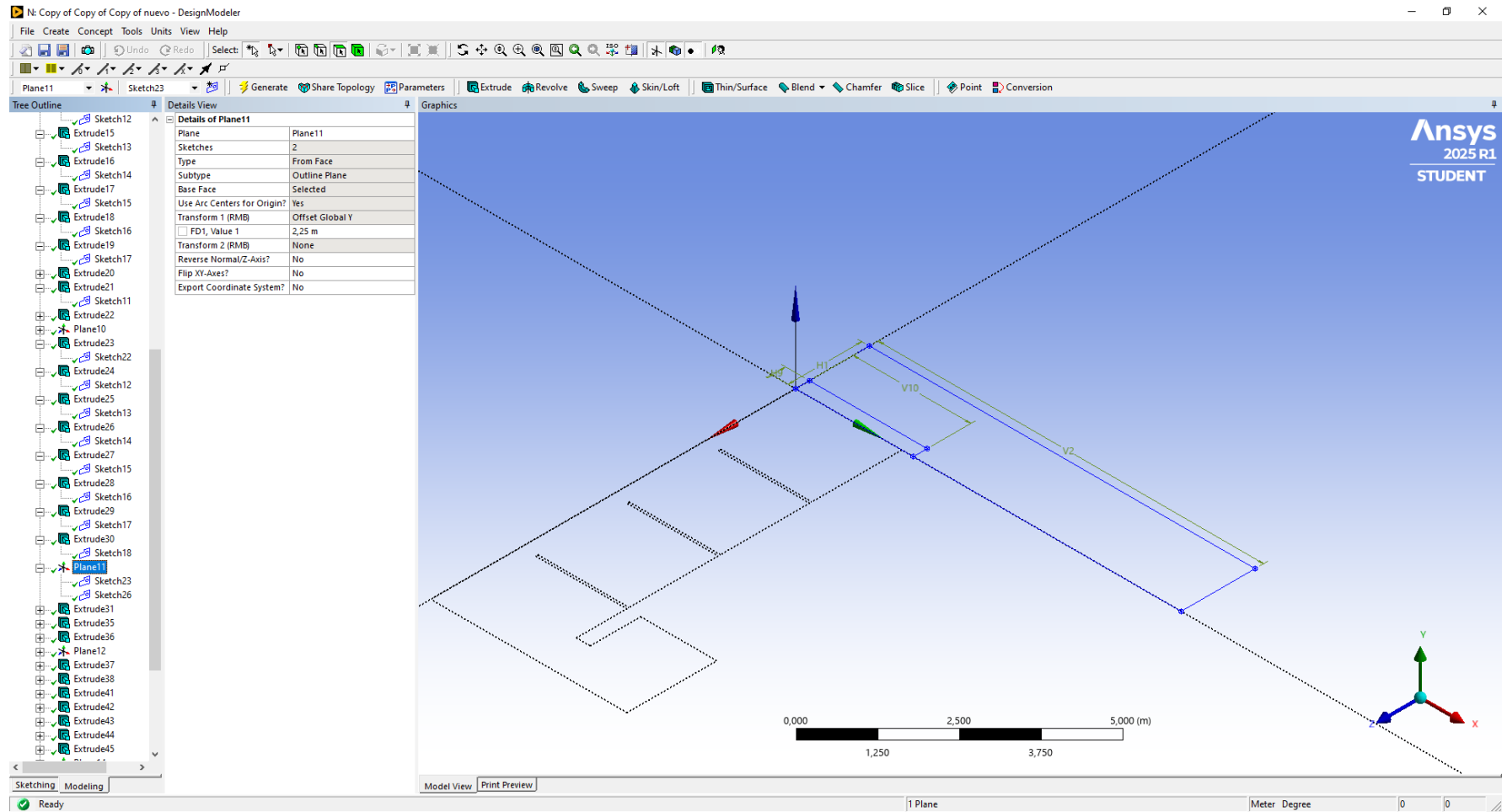
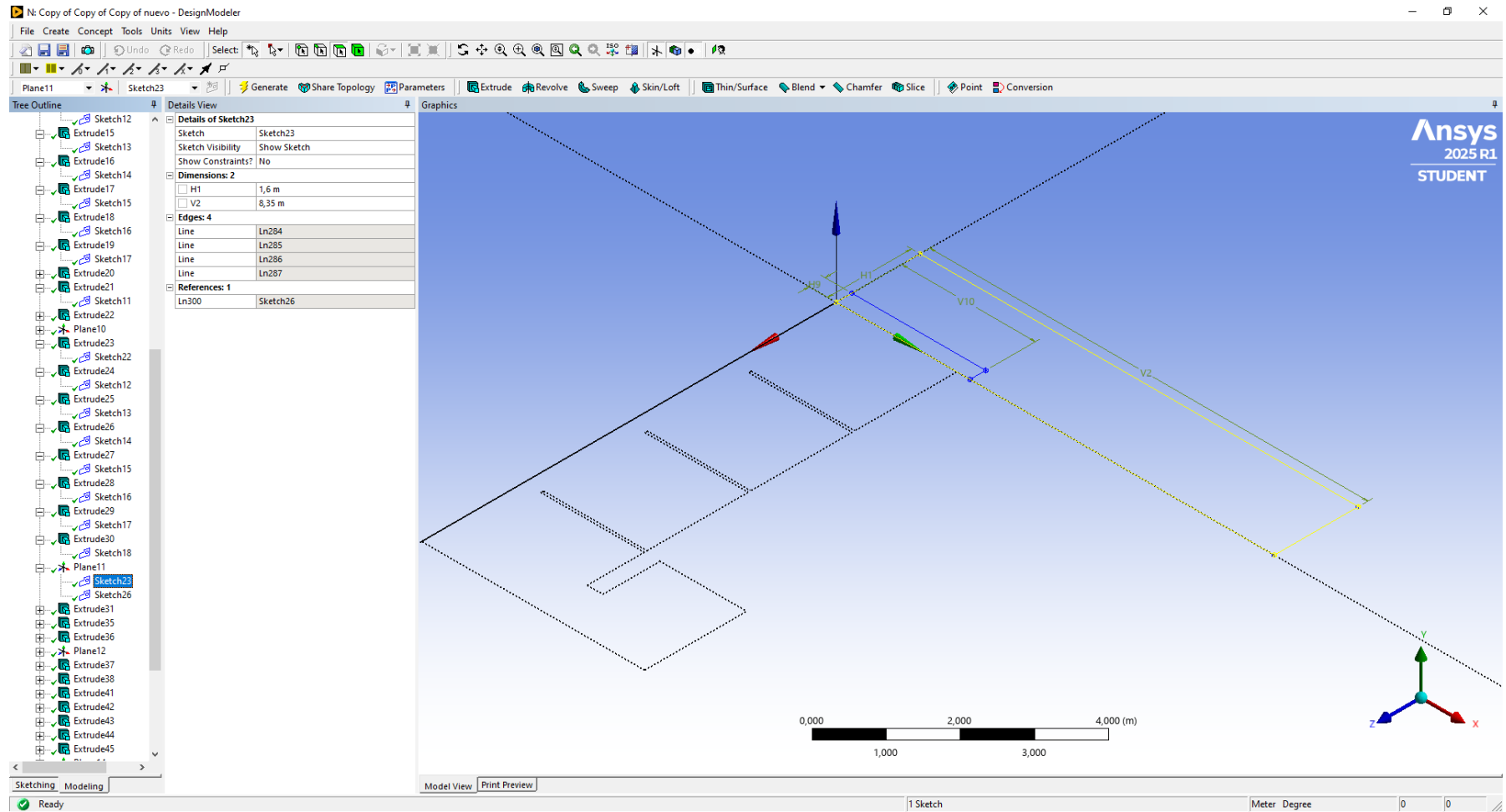
**Figura 189***Anexos: Elaboración de la geometría 54*



Figura 190

Anexos: Elaboración de la geometría 55





## Figura 191

Anexos: Elaboración de la geometría 56

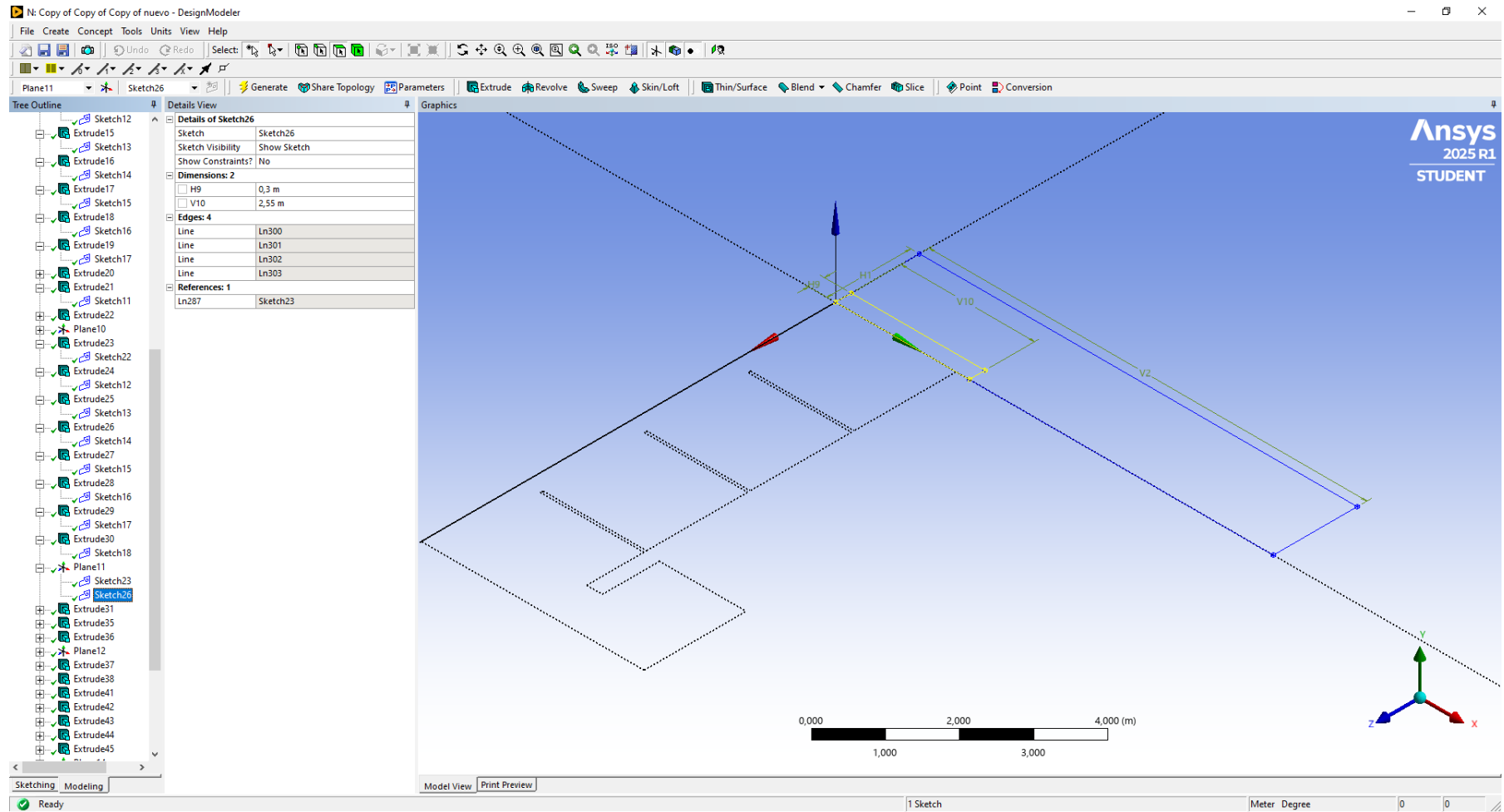


Figura 192

Anexos: Elaboración de la geometría 57

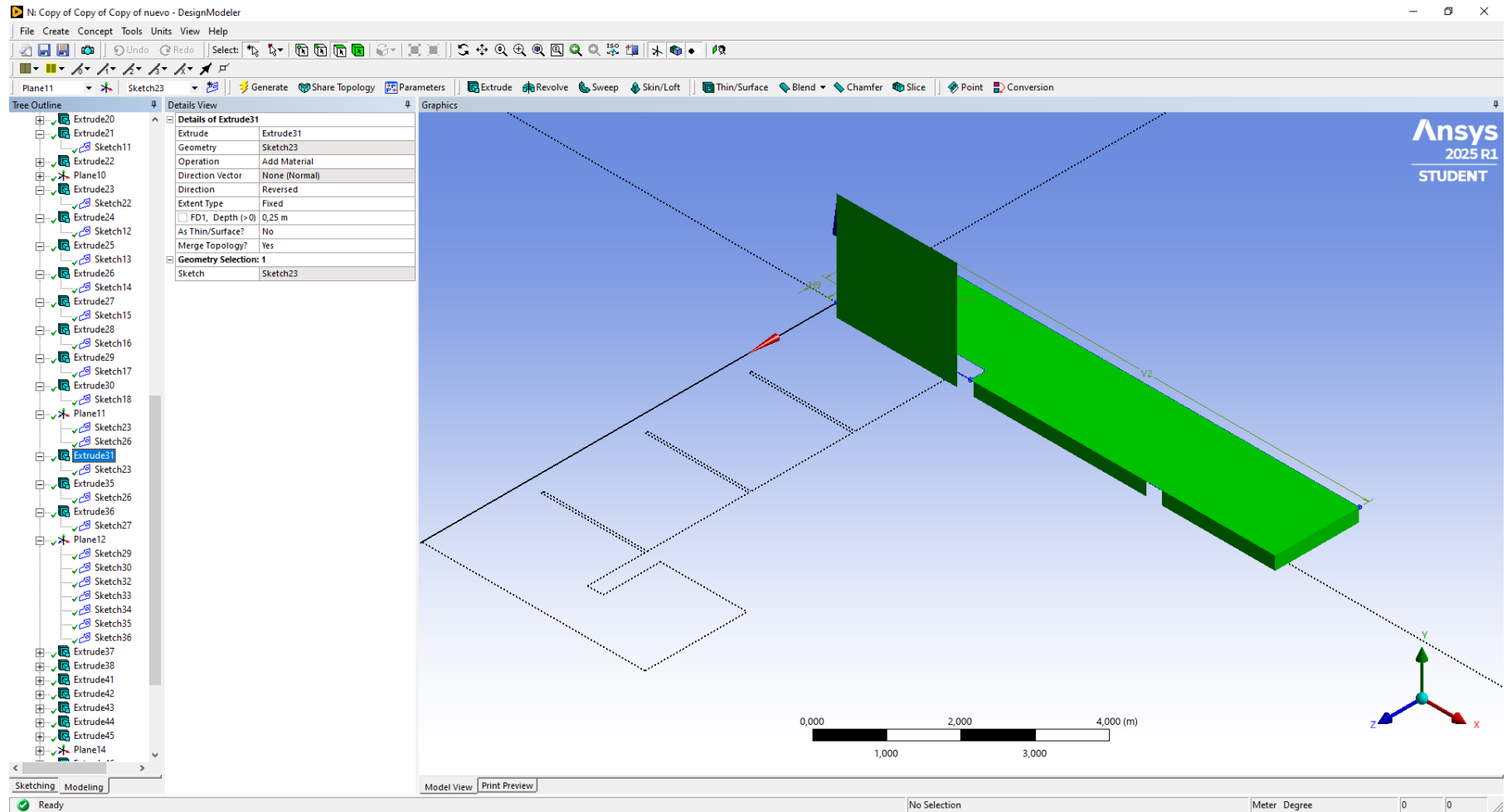
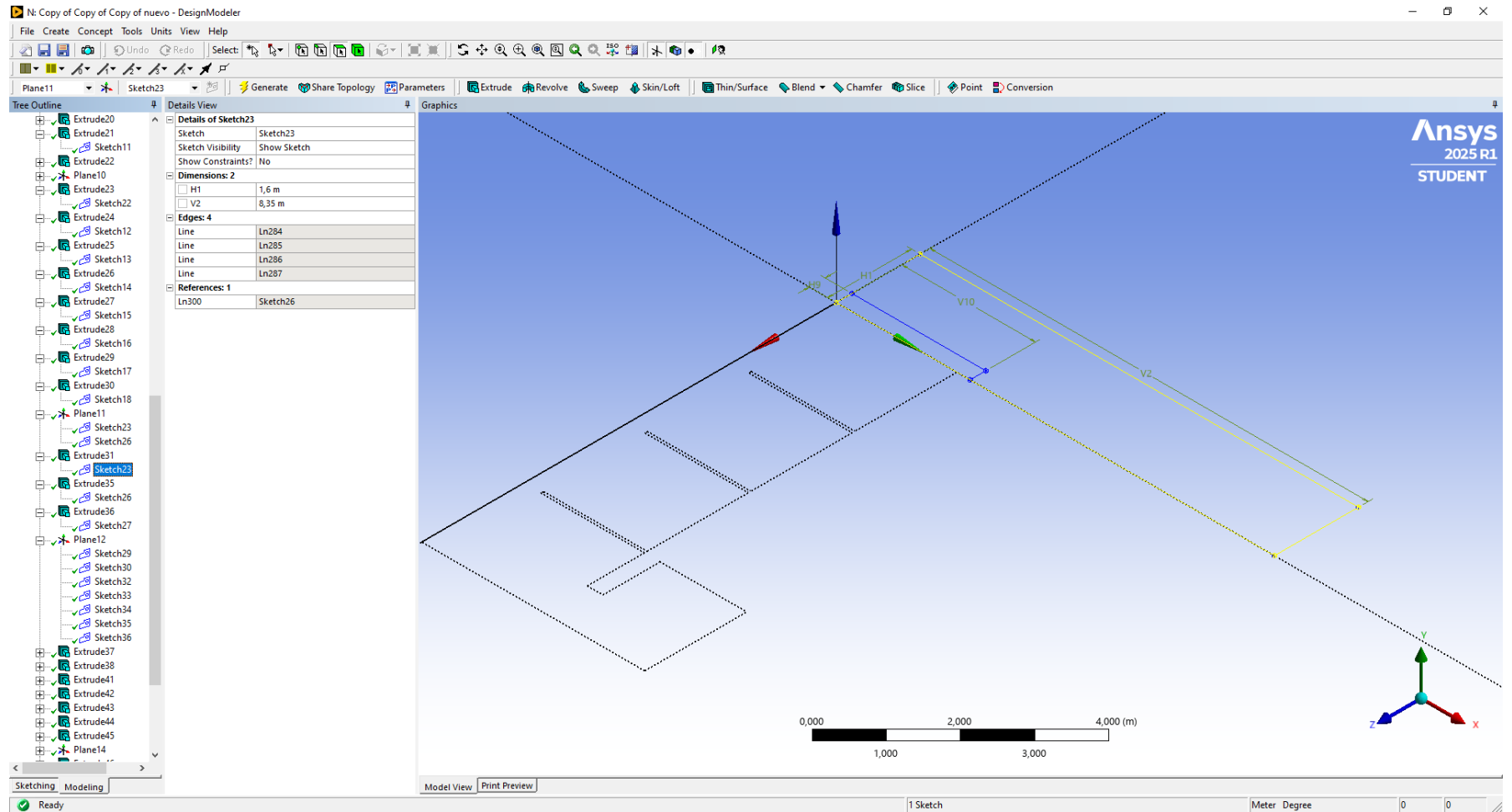
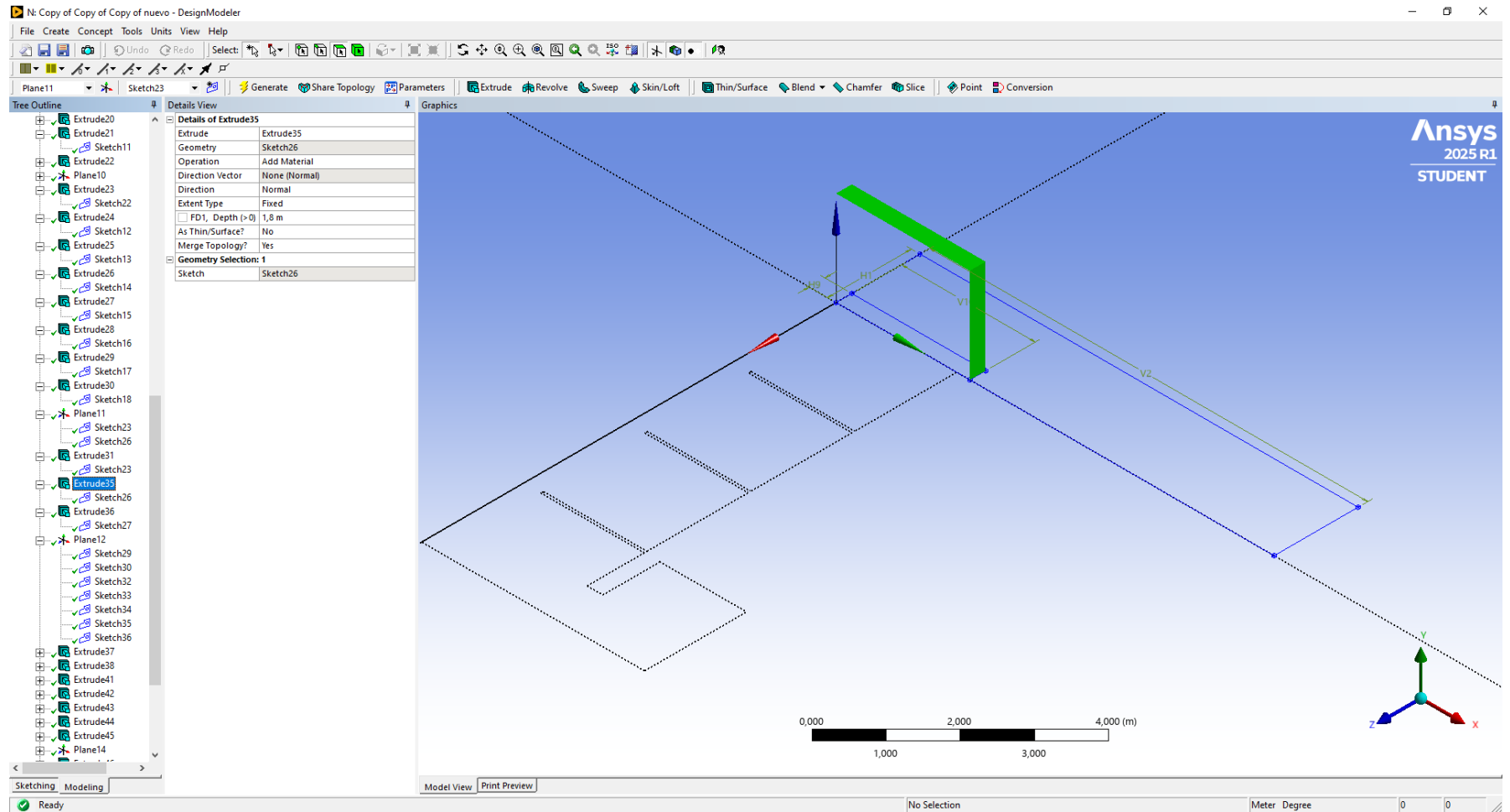


Figura 193

Anexos: Elaboración de la geometría 58



**Figura 194***Anexos: Elaboración de la geometría 59*

## Figura 195

Anexos: Elaboración de la geometría 60

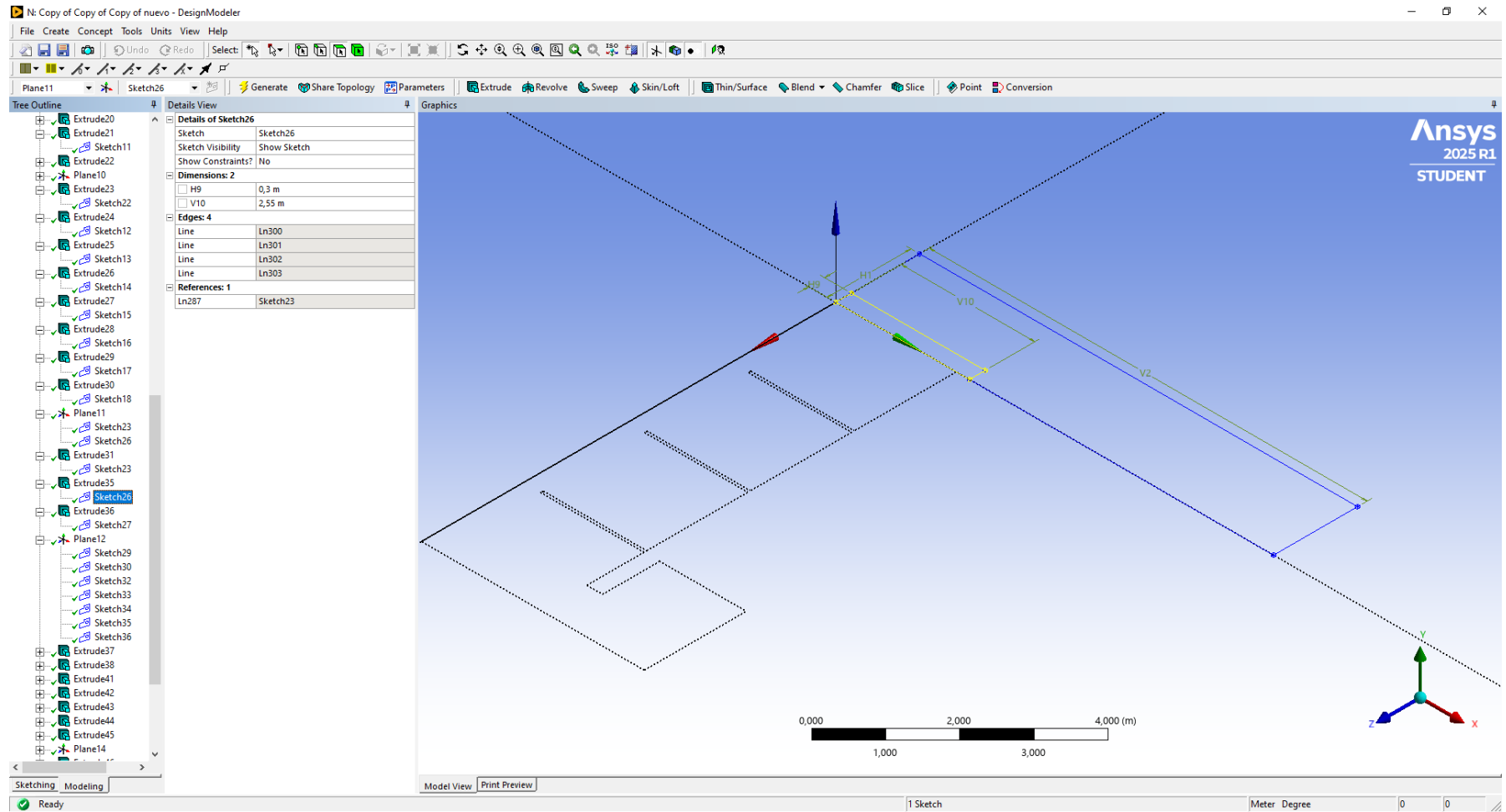


Figura 196

Anexos: Elaboración de la geometría 61

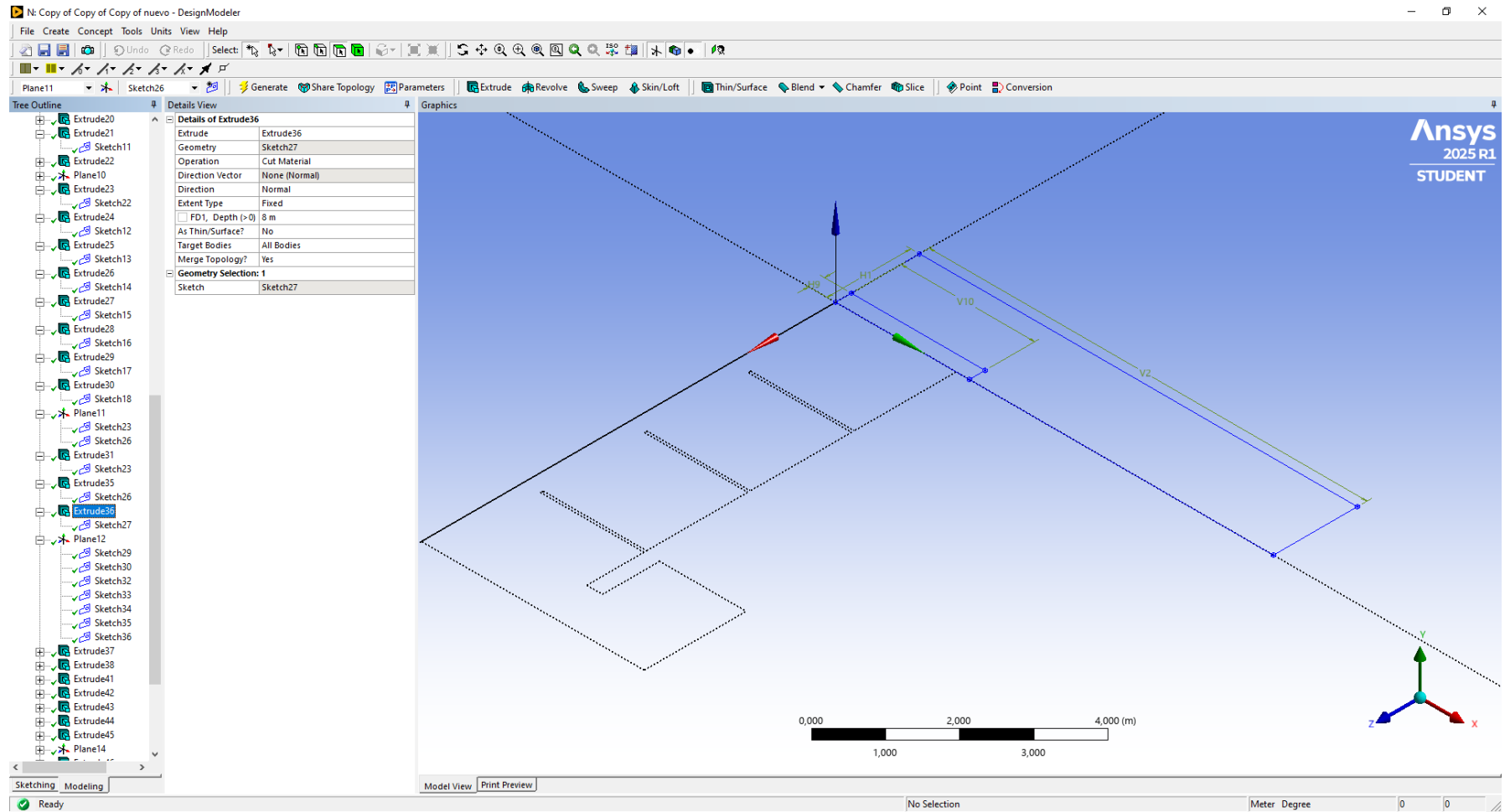


Figura 197

Anexos: Elaboración de la geometría 62

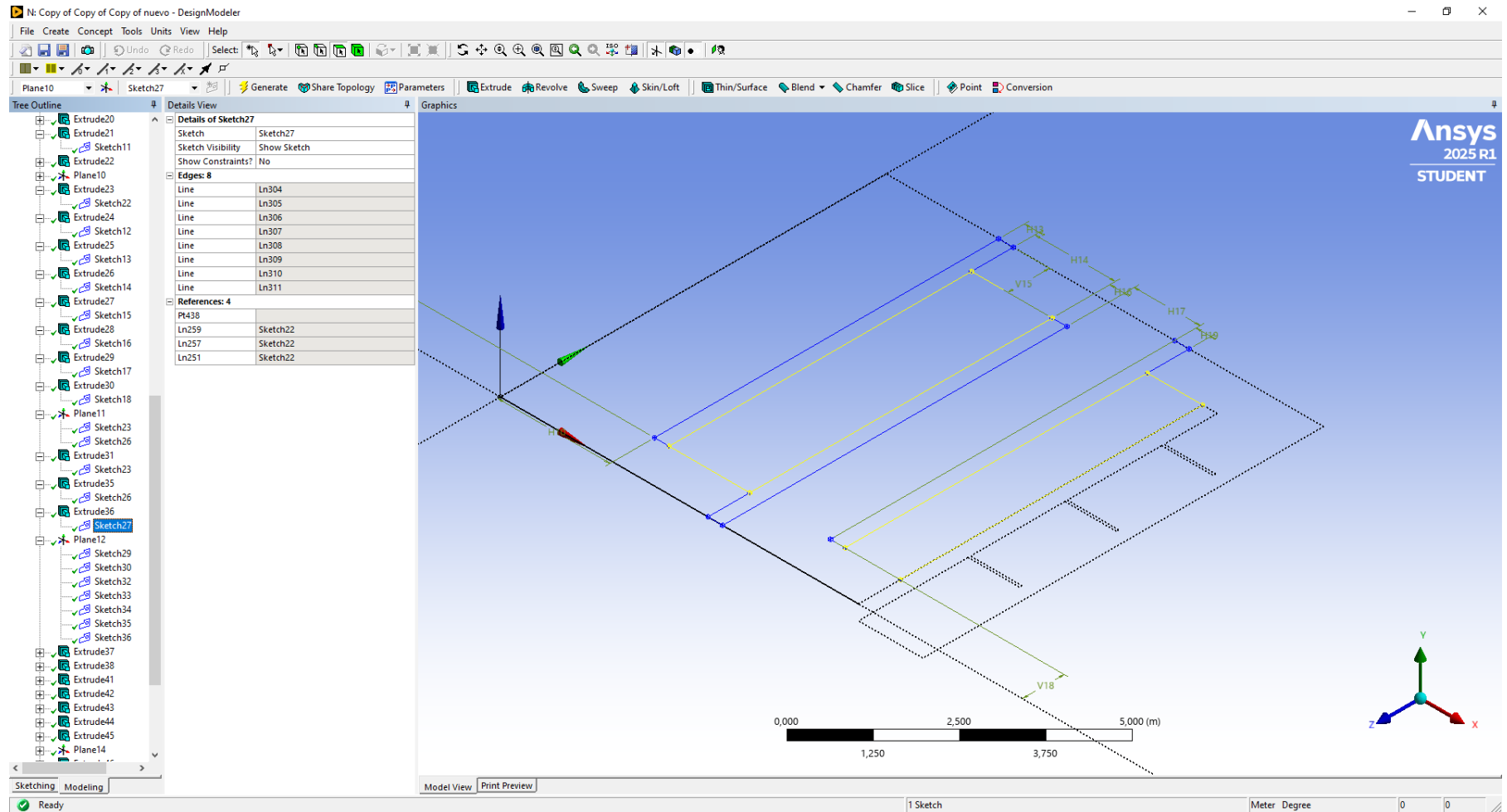




Figura 198

Anexos: Elaboración de la geometría 63

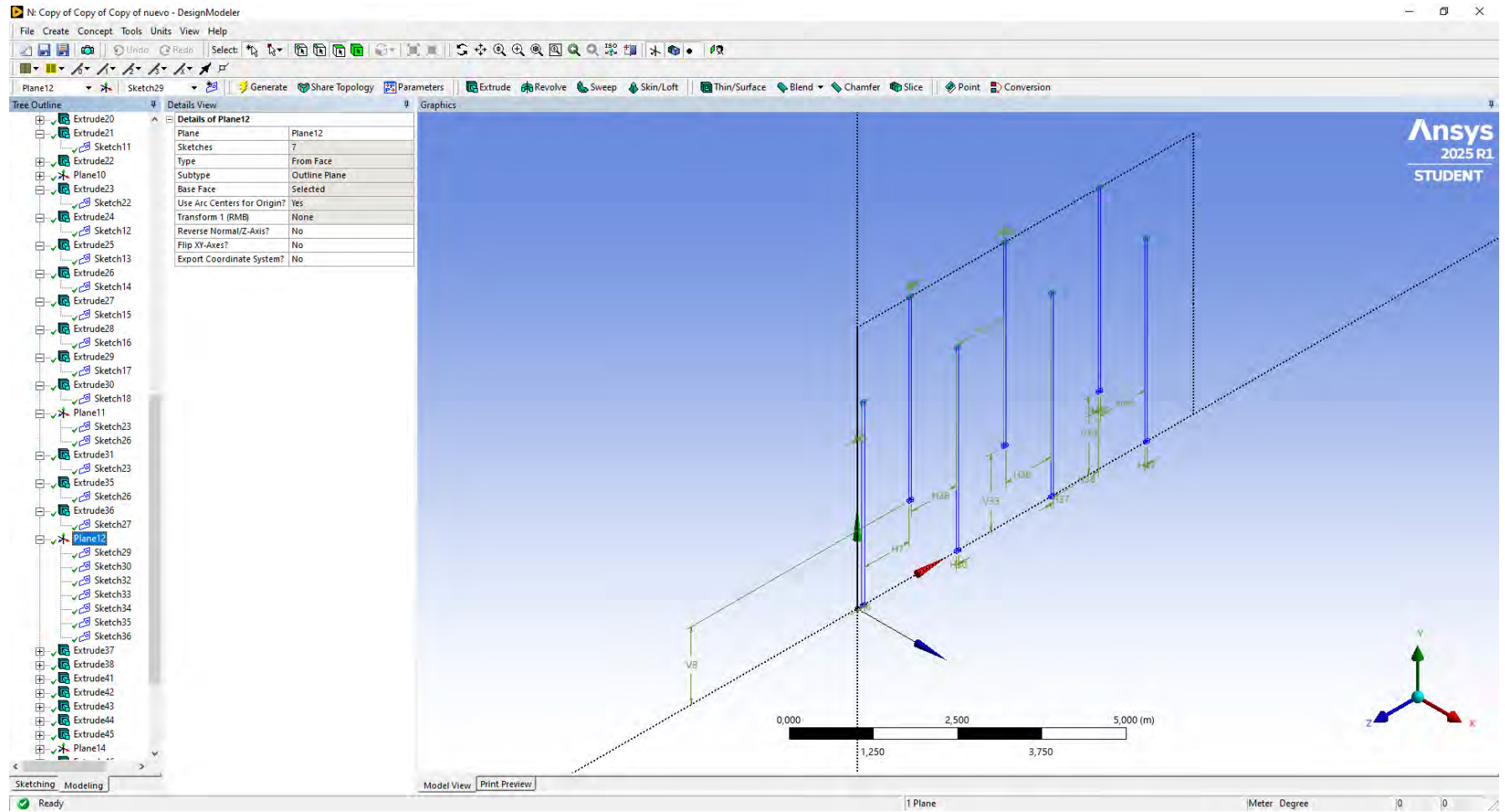


Figura 199

Anexos: Elaboración de la geometría 64

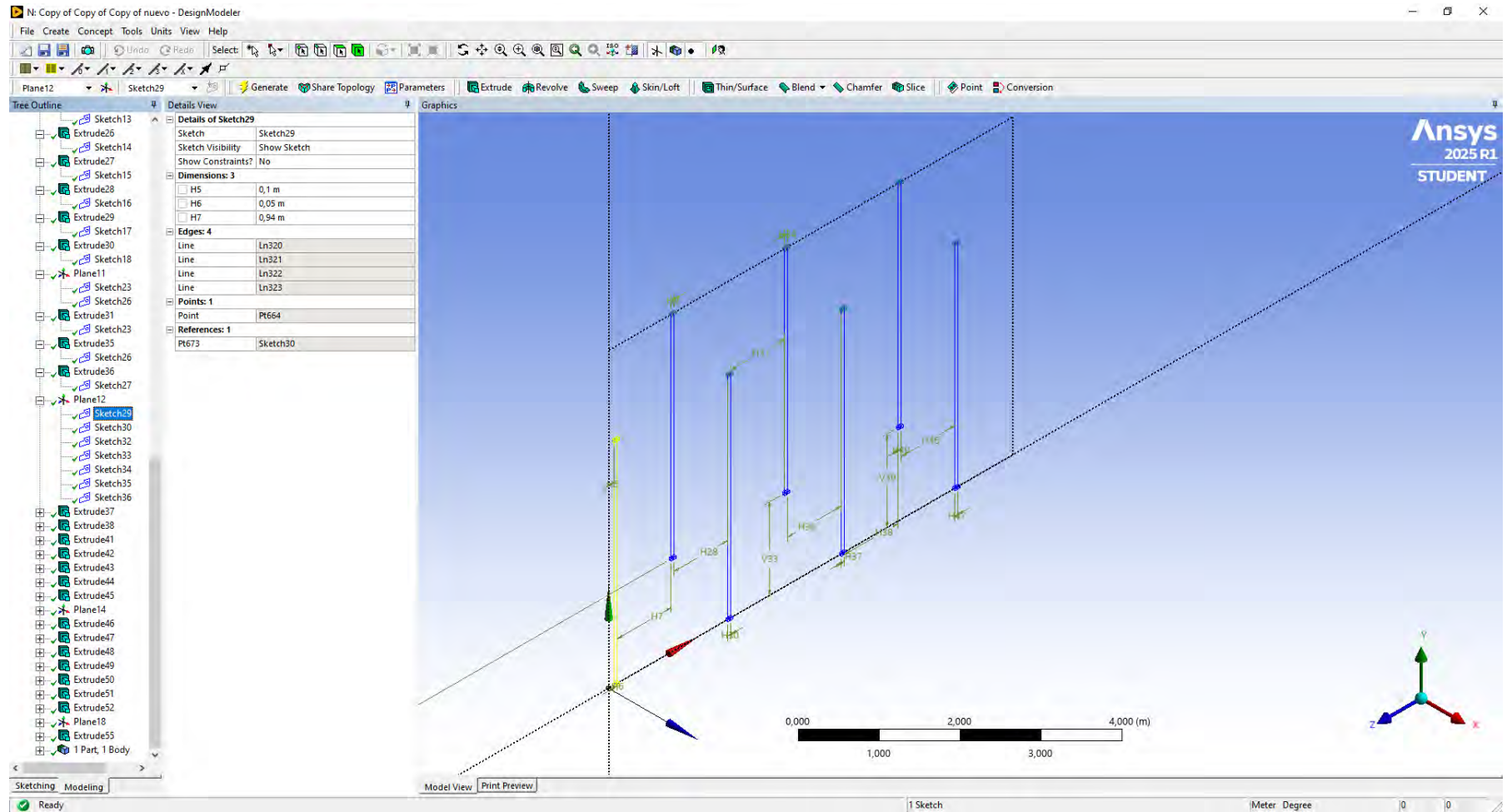


Figura 200

Anexos: Elaboración de la geometría 65

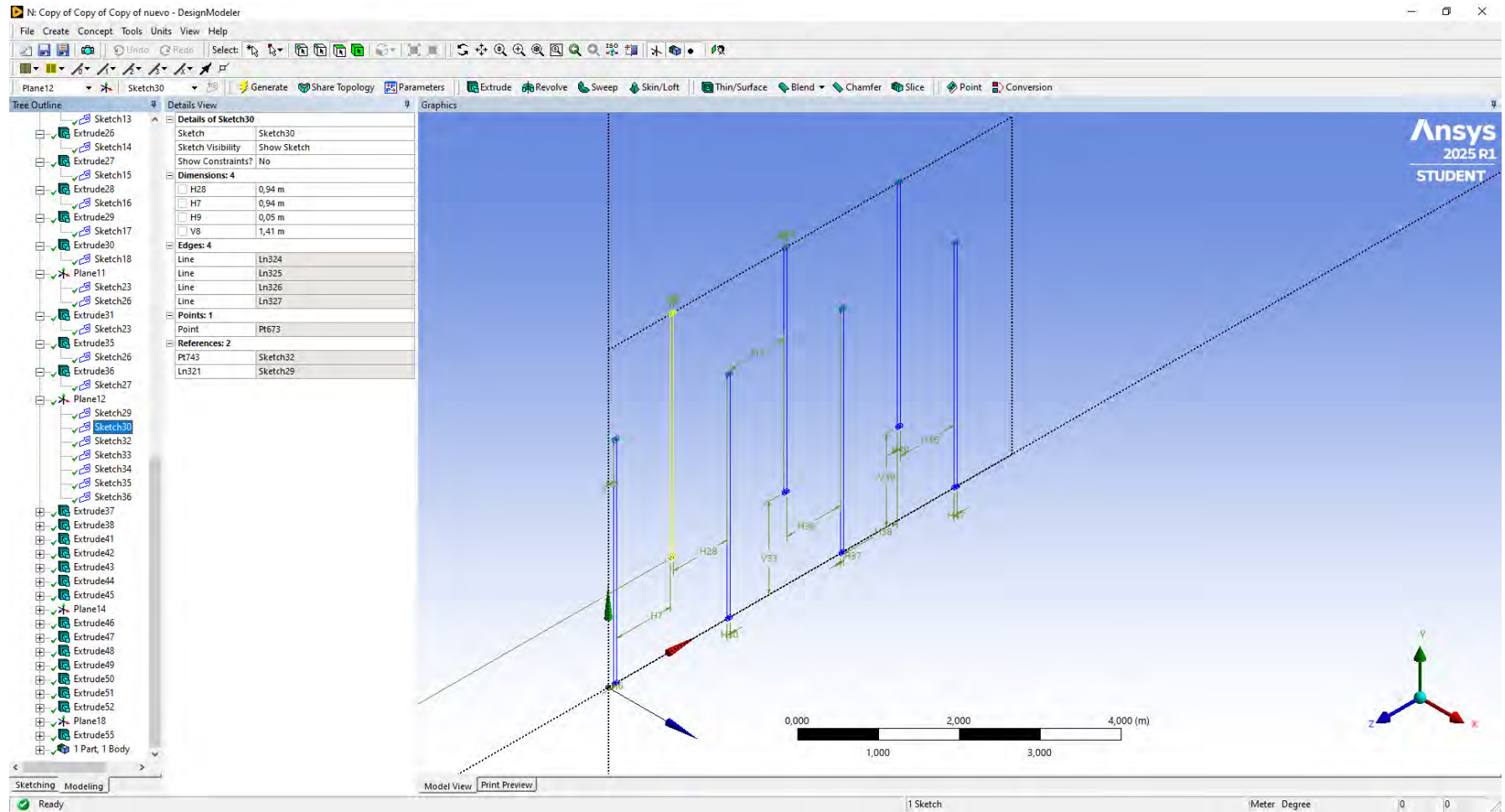


Figura 201

Anexos: Elaboración de la geometría 66

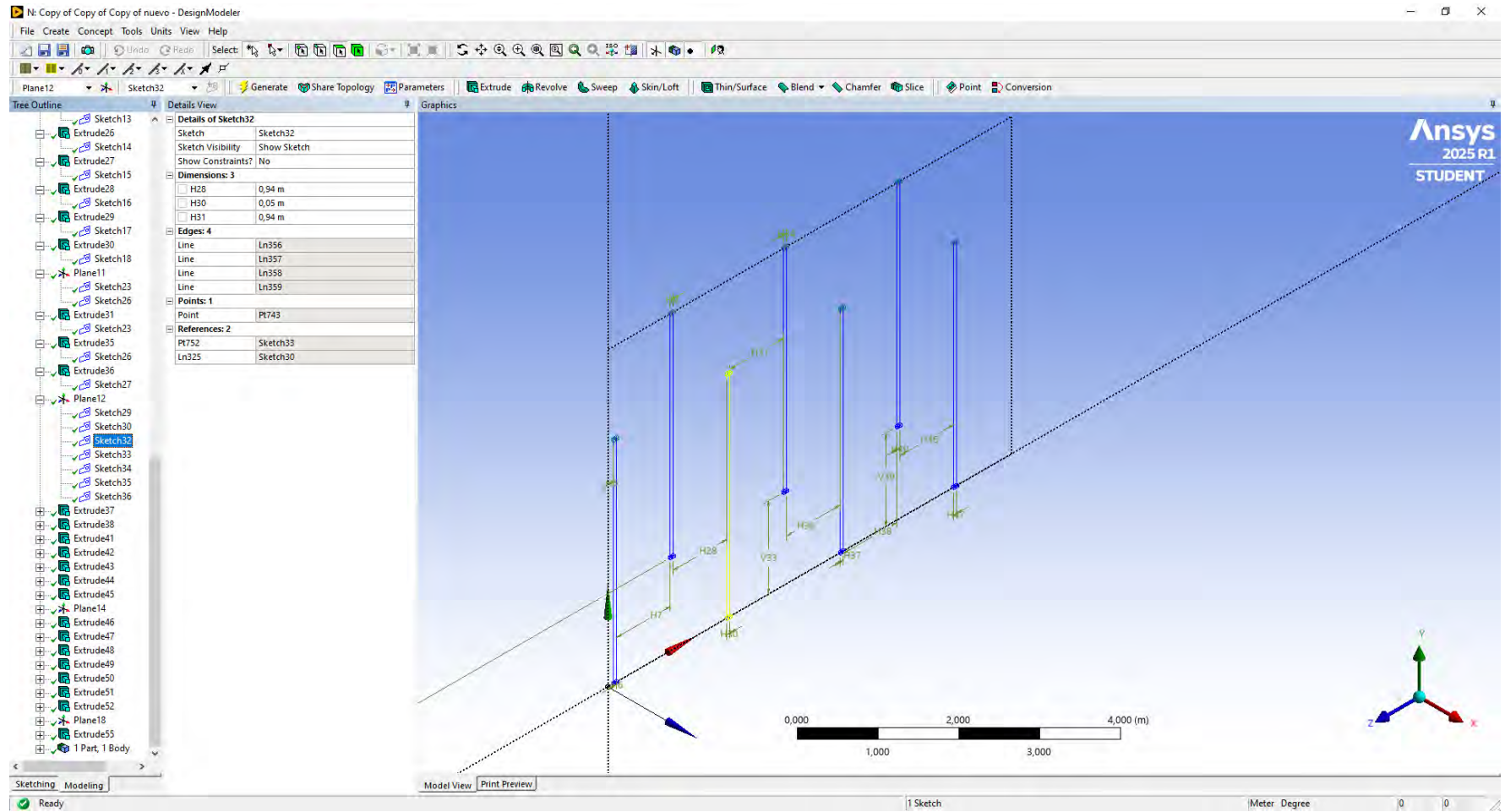




Figura 202

Anexos: Elaboración de la geometría 67

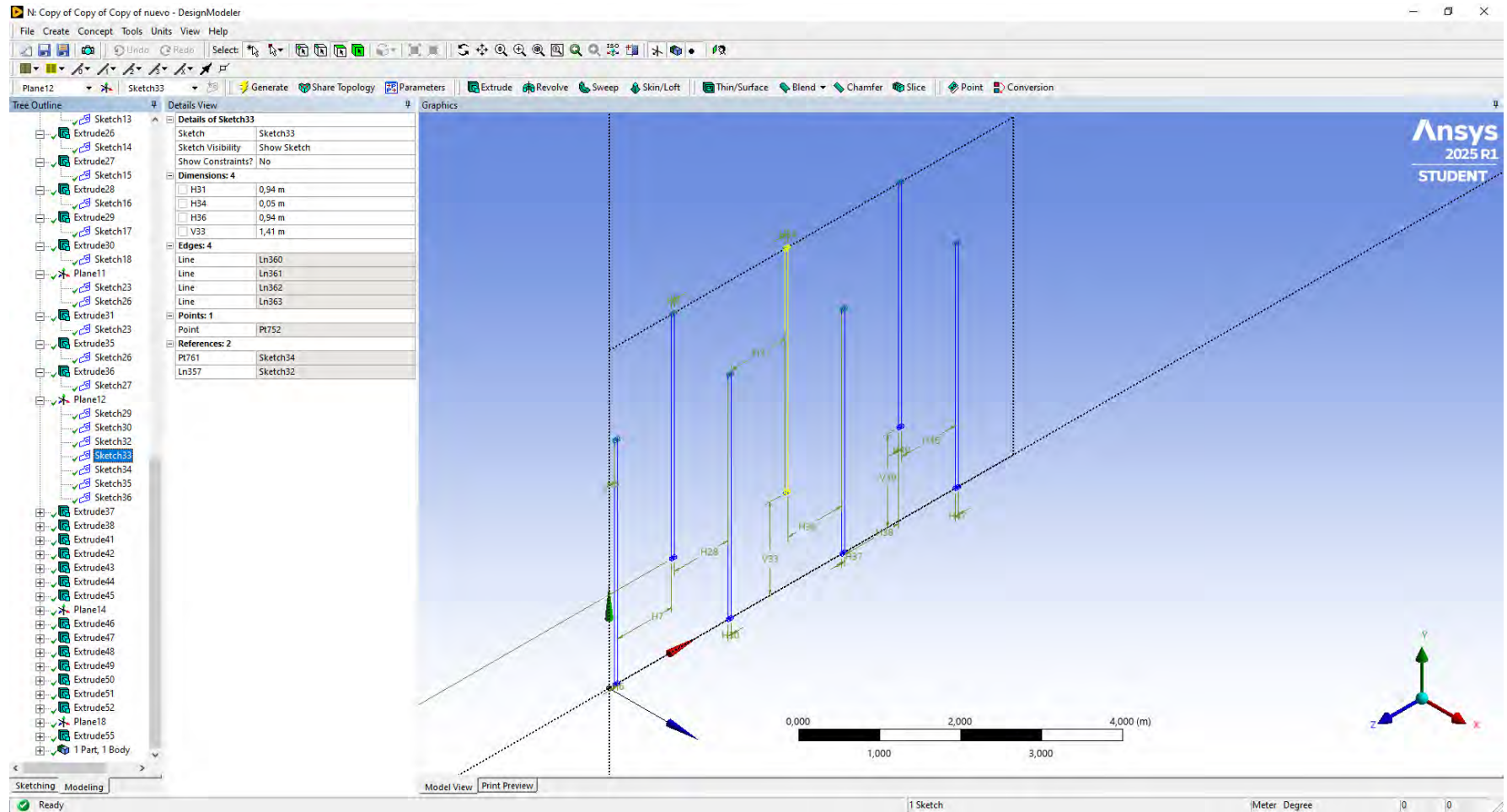


Figura 203

Anexos: Elaboración de la geometría 68

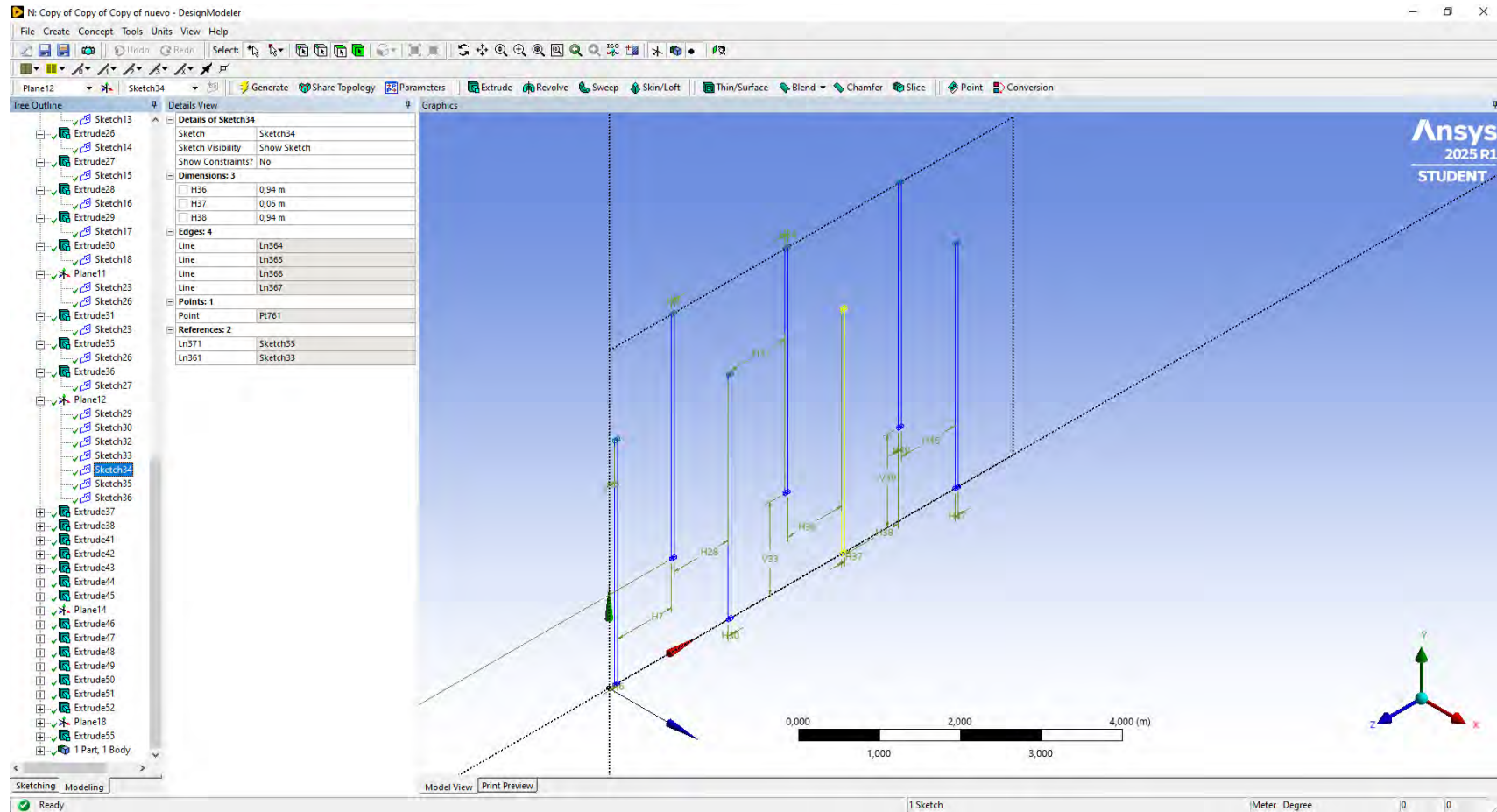
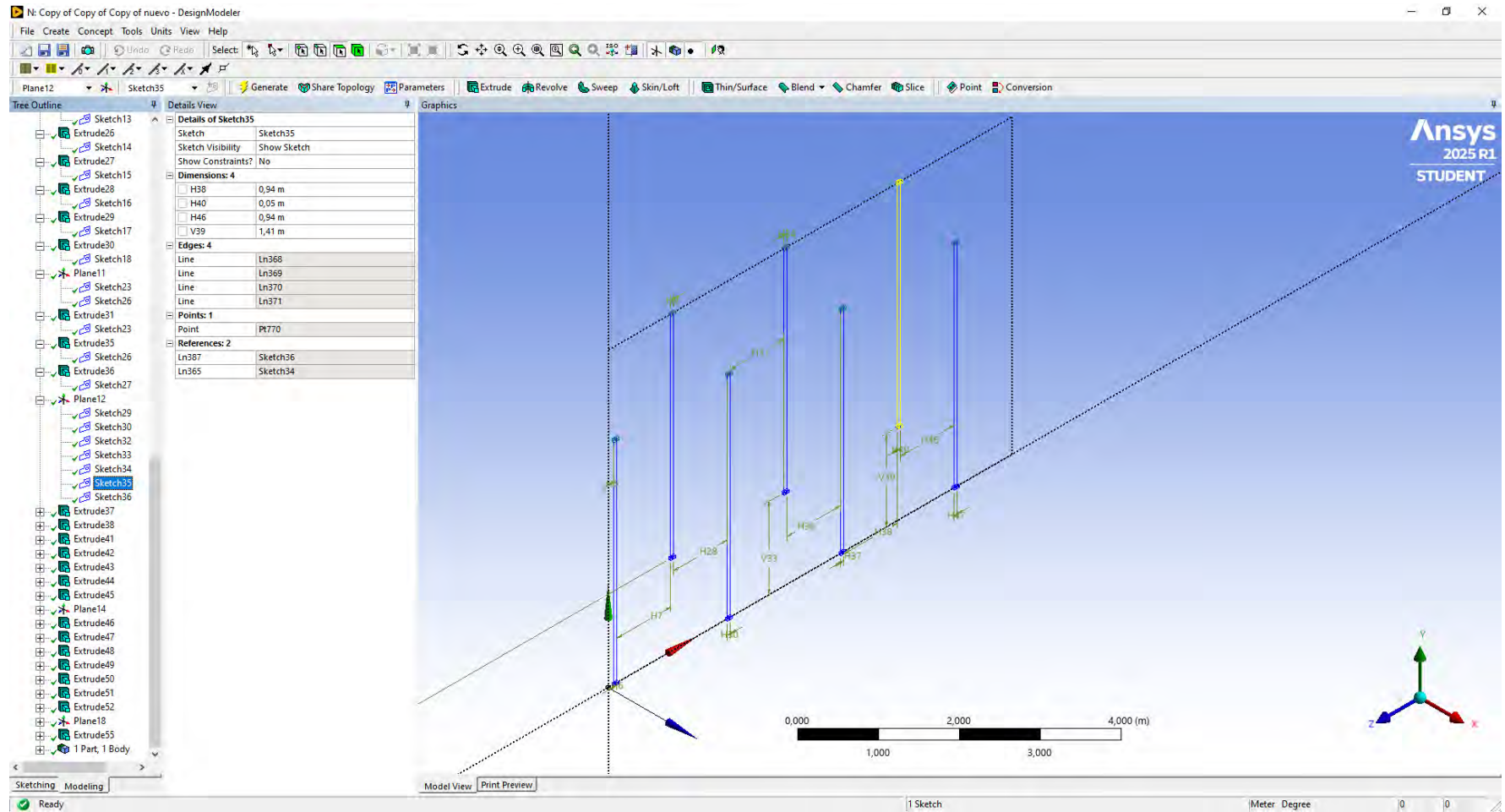


Figura 204

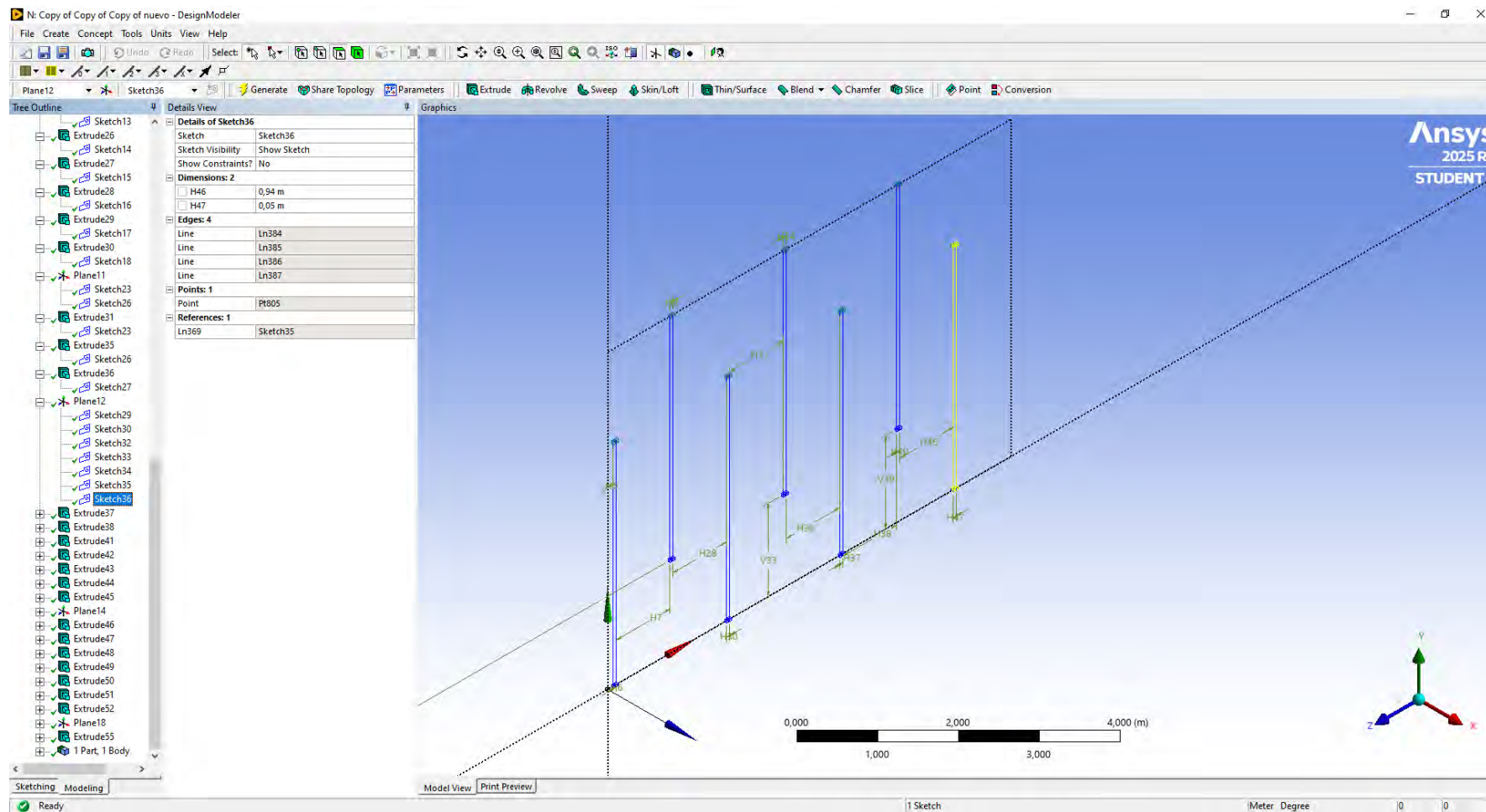
Anexos: Elaboración de la geometría 69





**Figura 205**

Anexos: Elaboración de la geometría 70



**Figura 206**

*Anexos: Elaboración de la geometría 71*

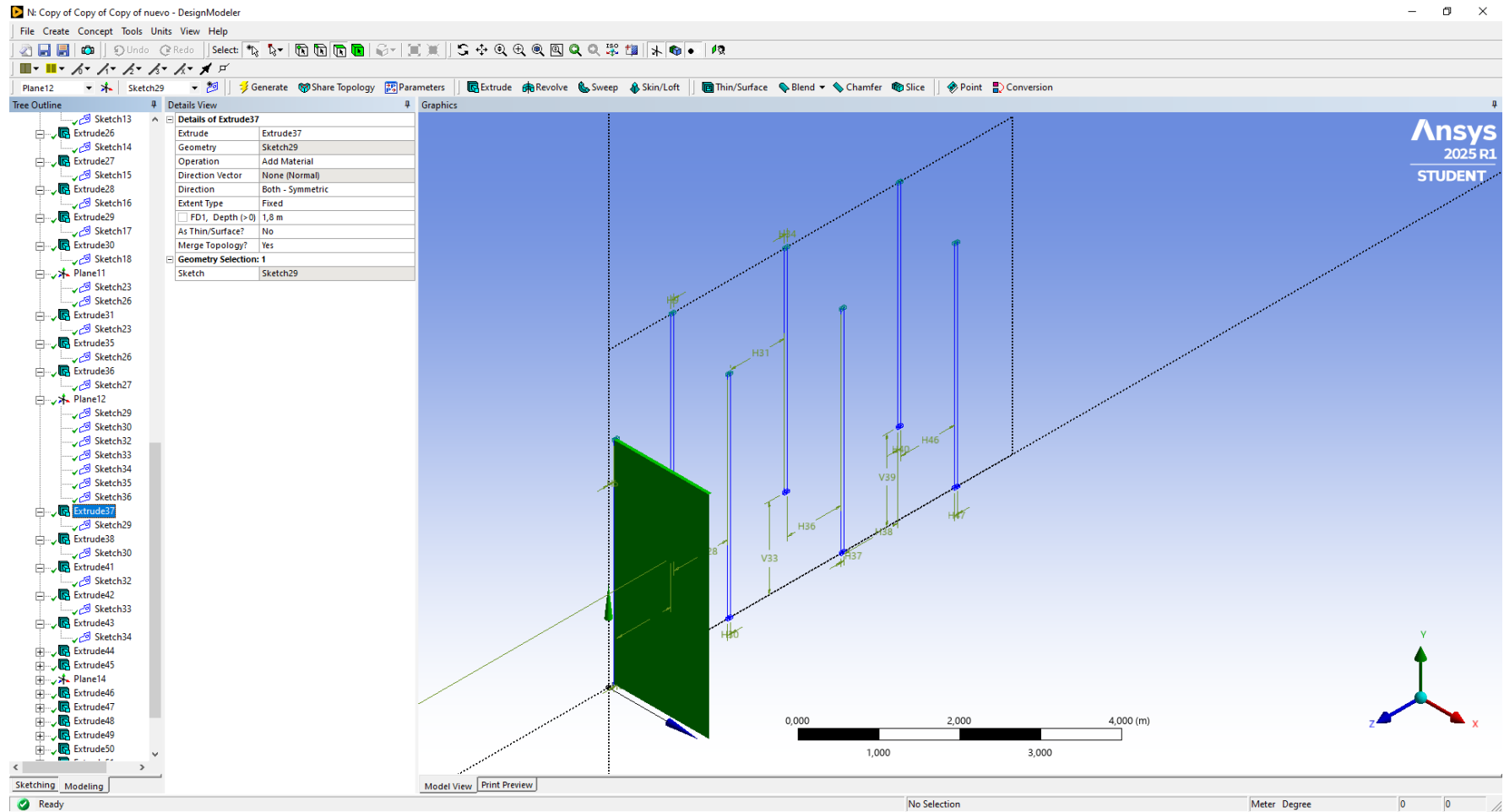


Figura 207

Anexos: Elaboración de la geometría 72

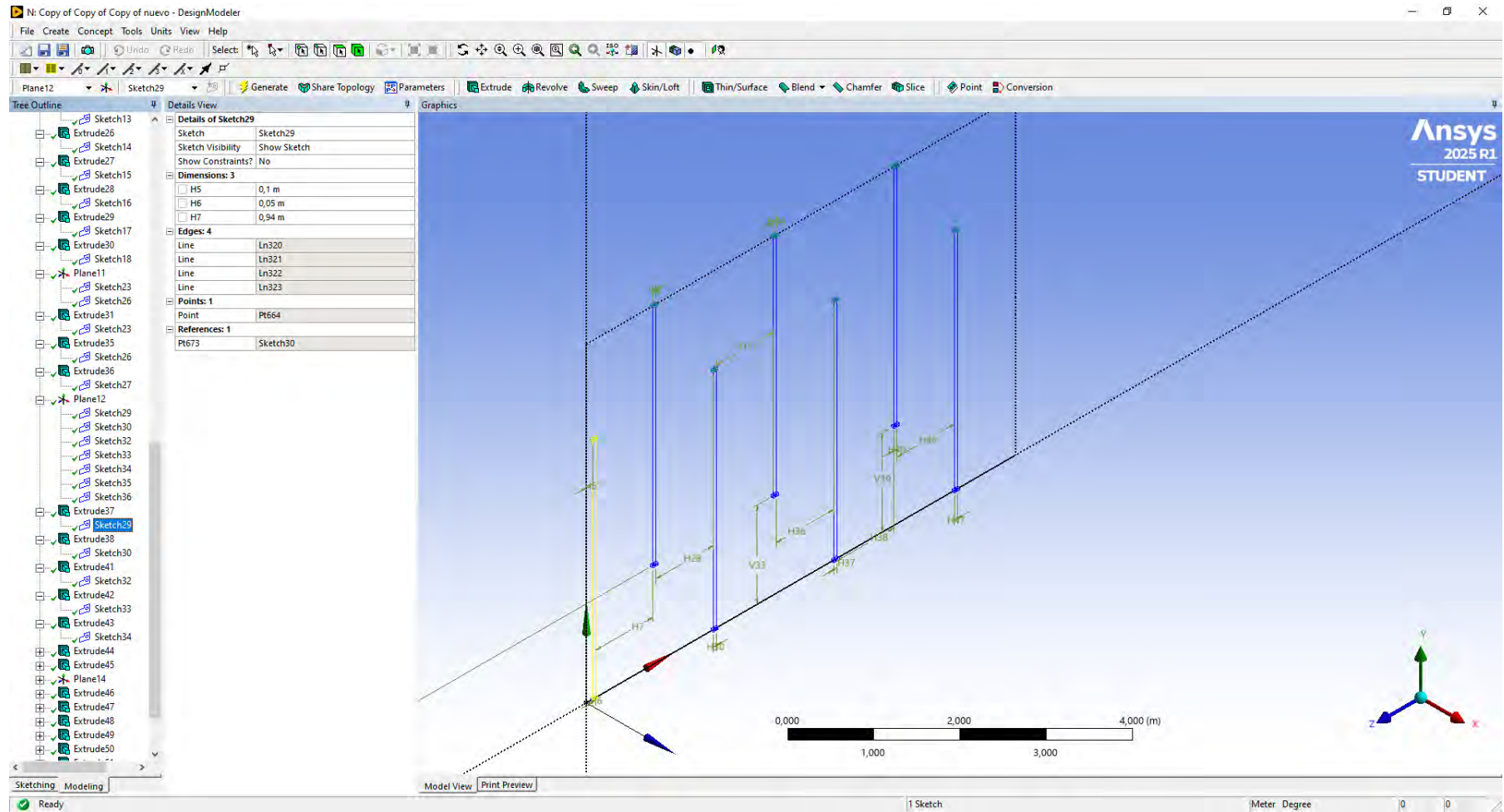


Figura 208

Anexos: Elaboración de la geometría 73

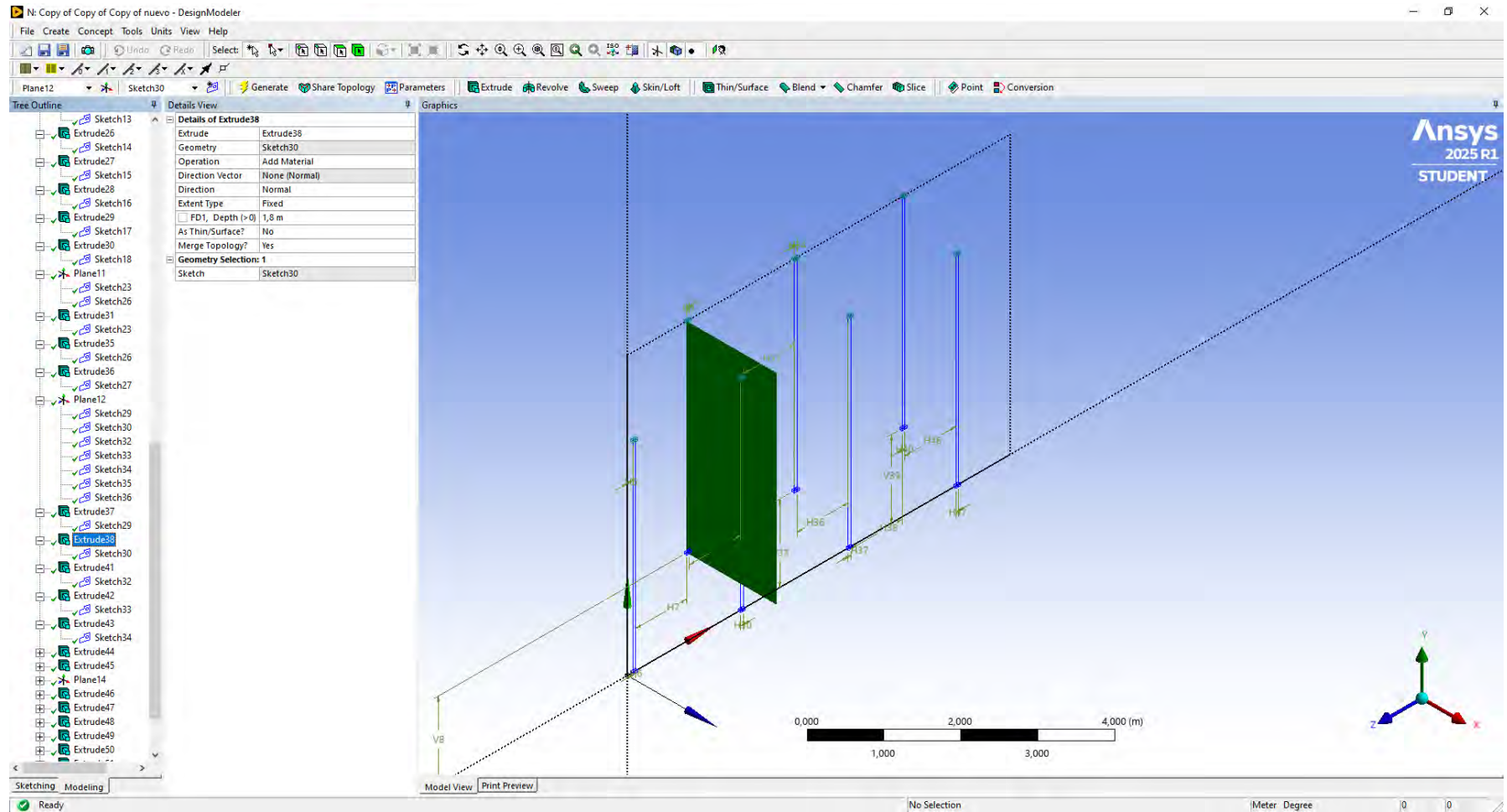
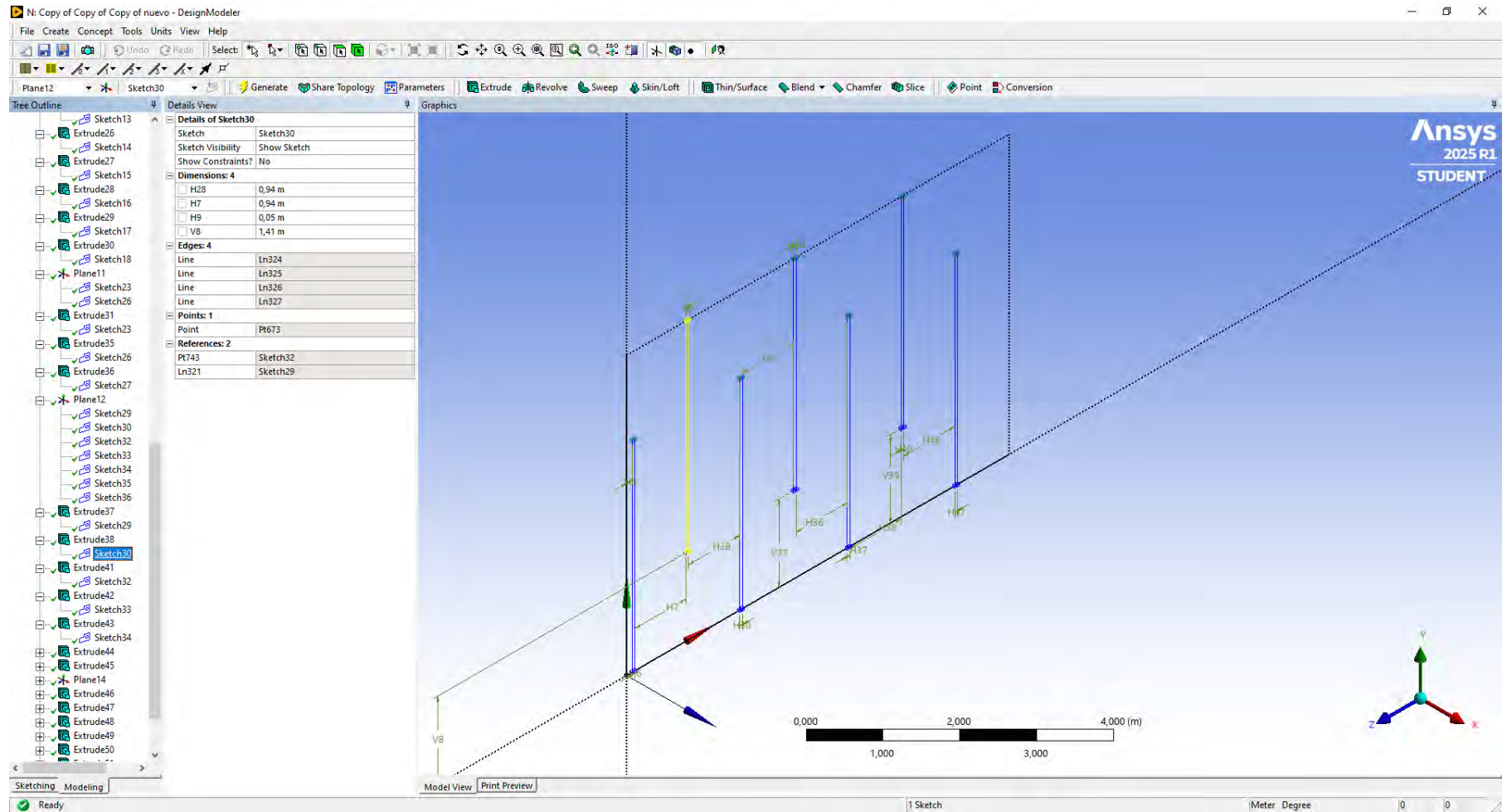




Figura 209

Anexos: Elaboración de la geometría 74



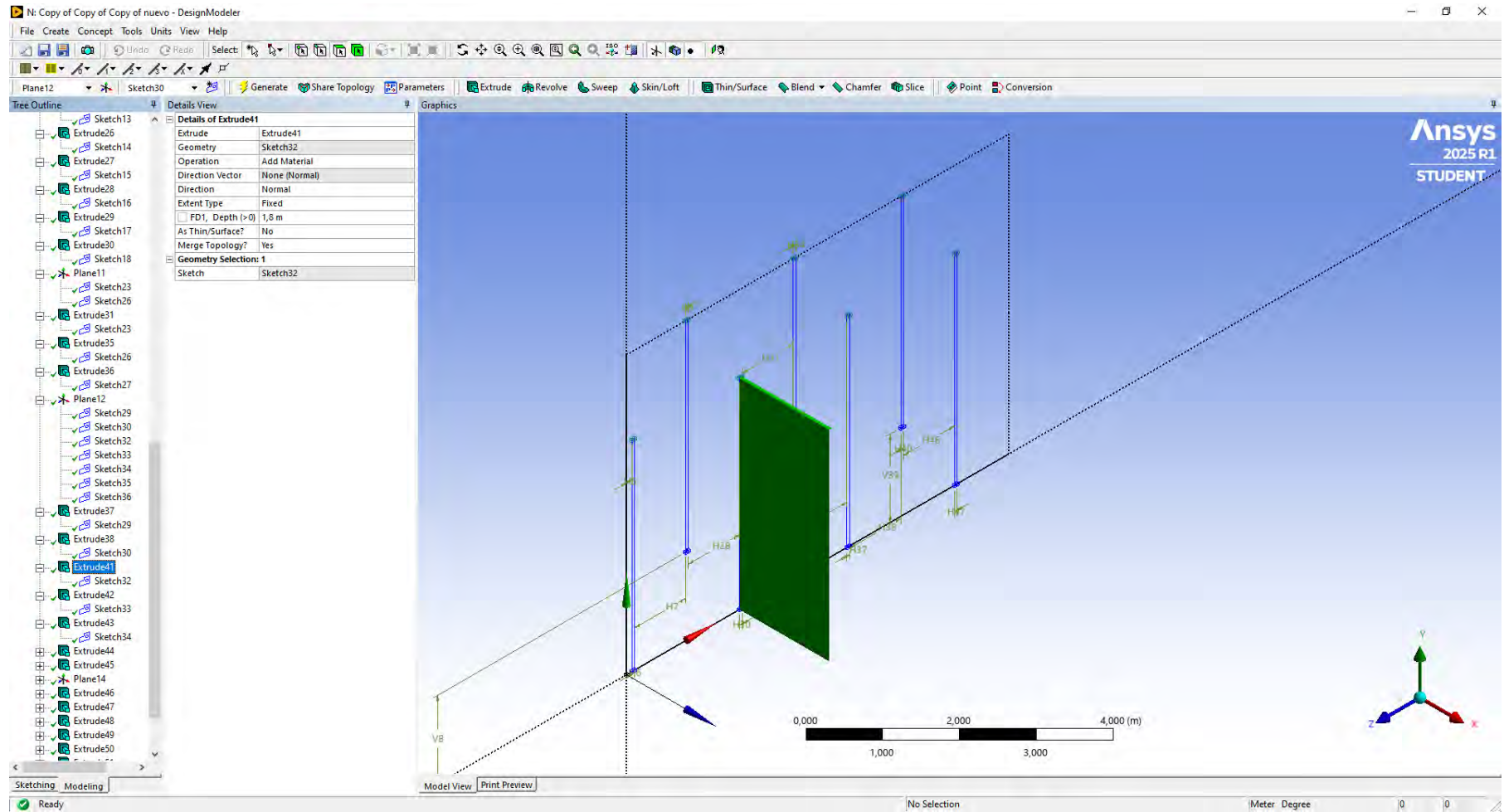
**Figura 210***Anexos: Elaboración de la geometría 75*

Figura 211

Anexos: Elaboración de la geometría 76

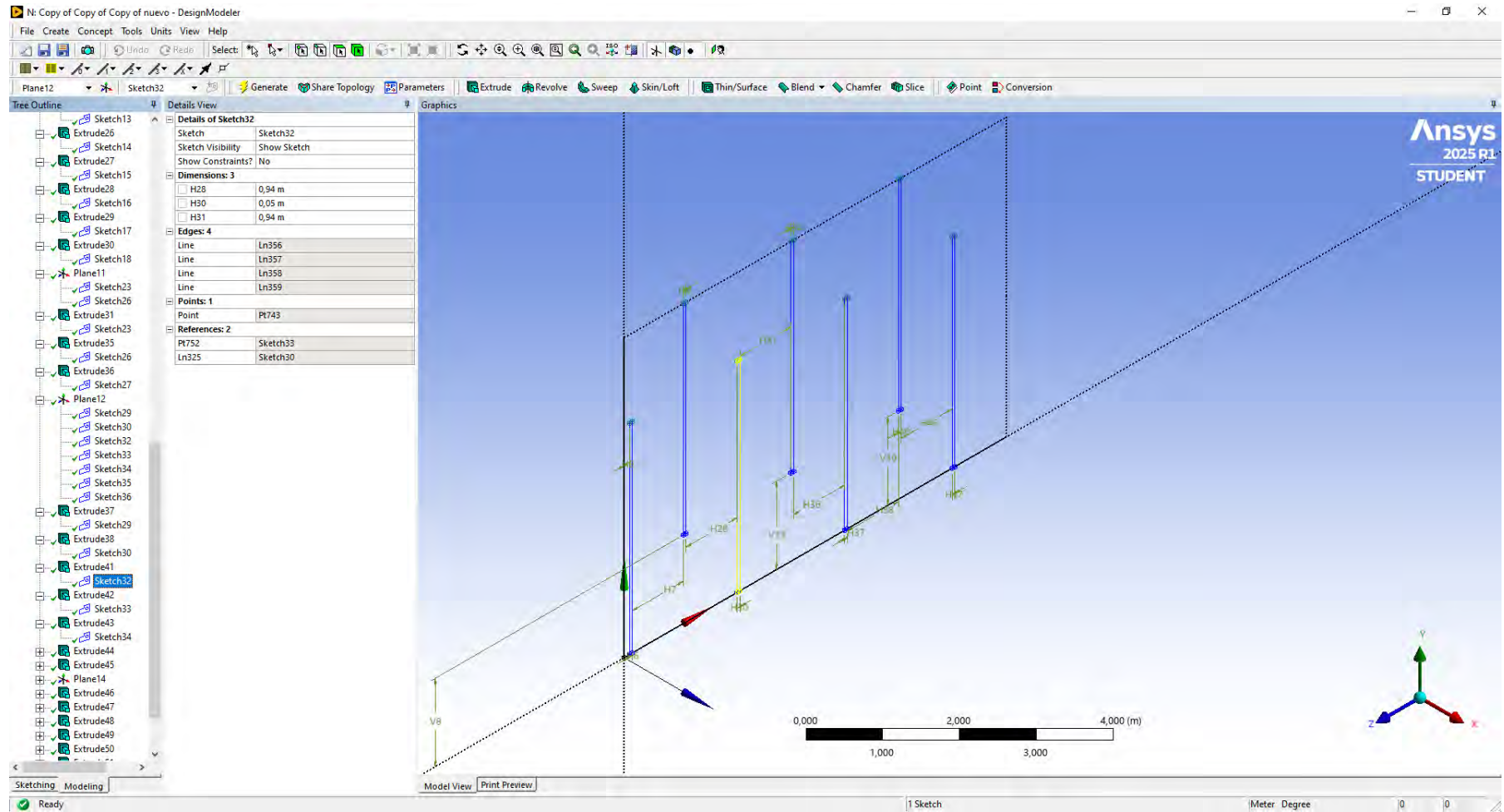




Figura 212

Anexos: Elaboración de la geometría 77

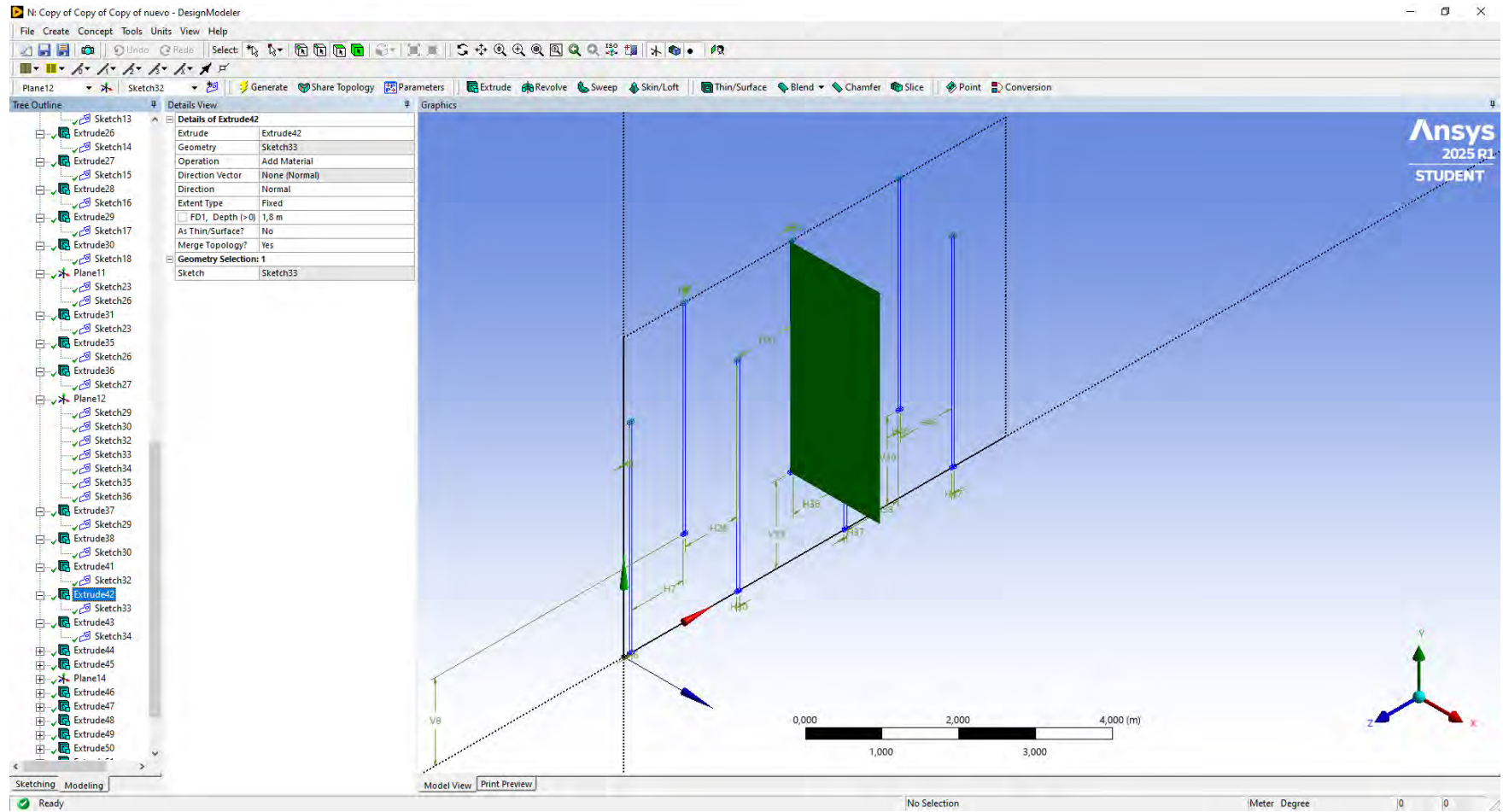


Figura 213

Anexos: Elaboración de la geometría 78

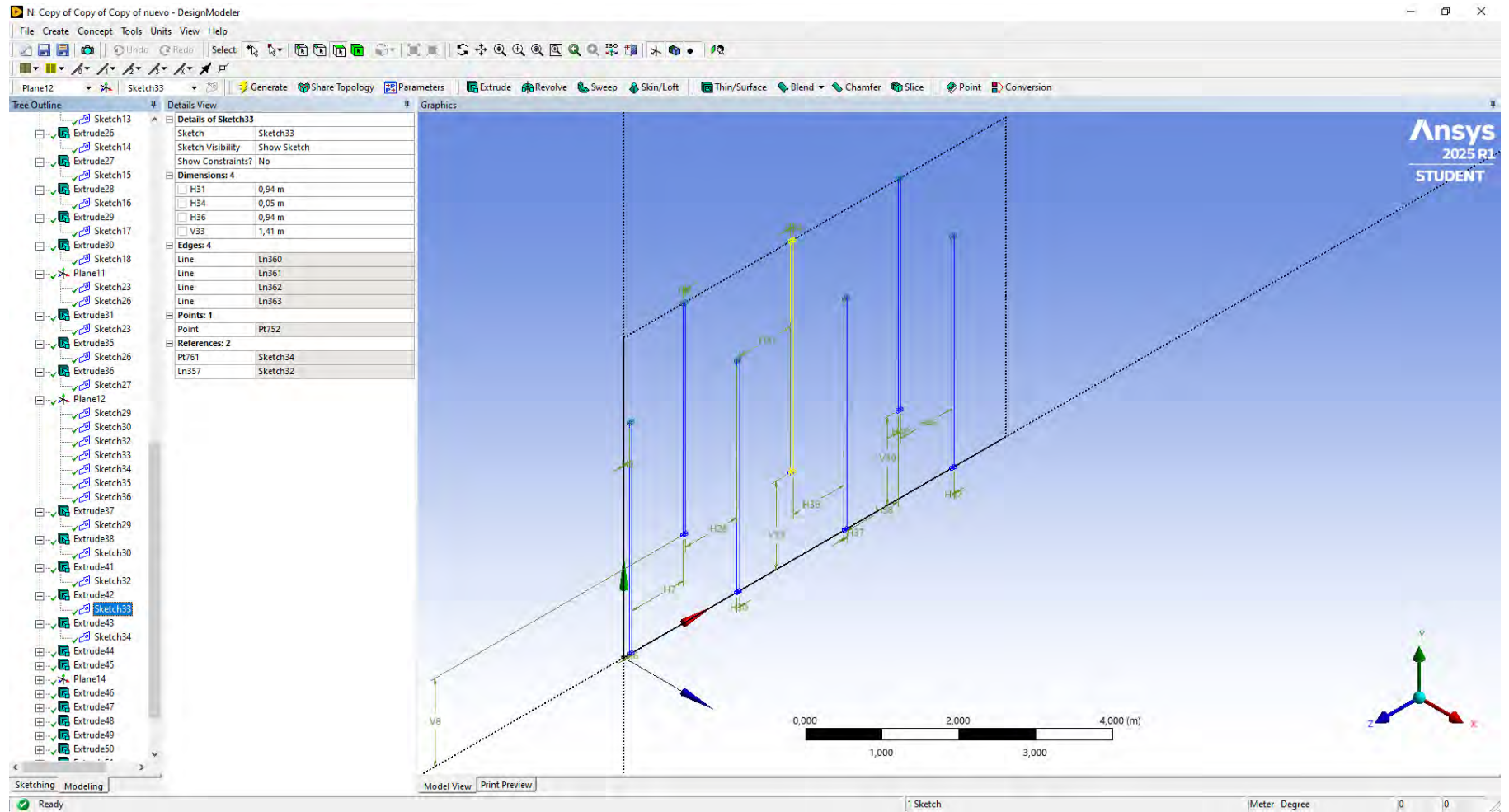


Figura 214

Anexos: Elaboración de la geometría 79

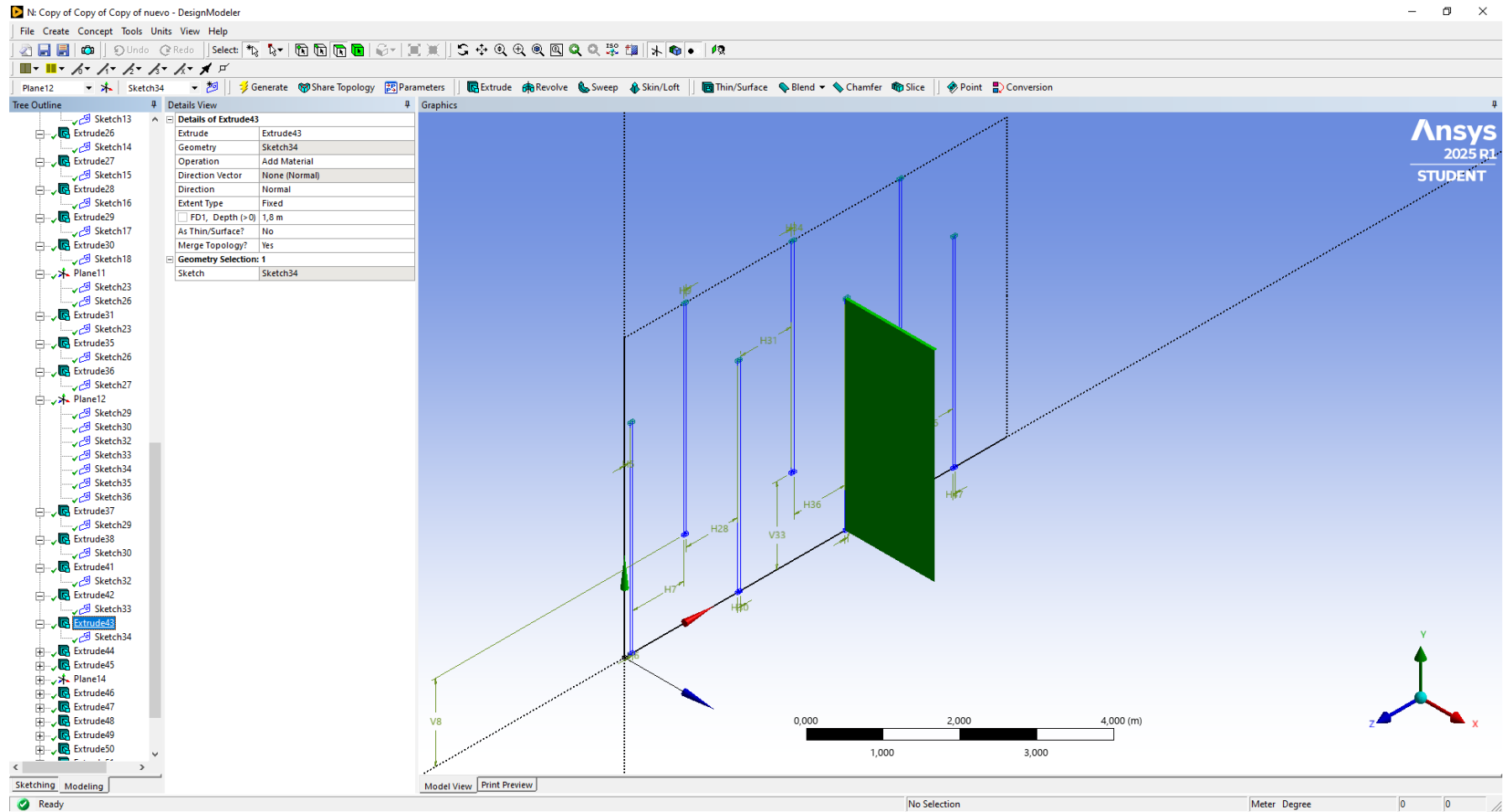


Figura 215

Anexos: Elaboración de la geometría 80

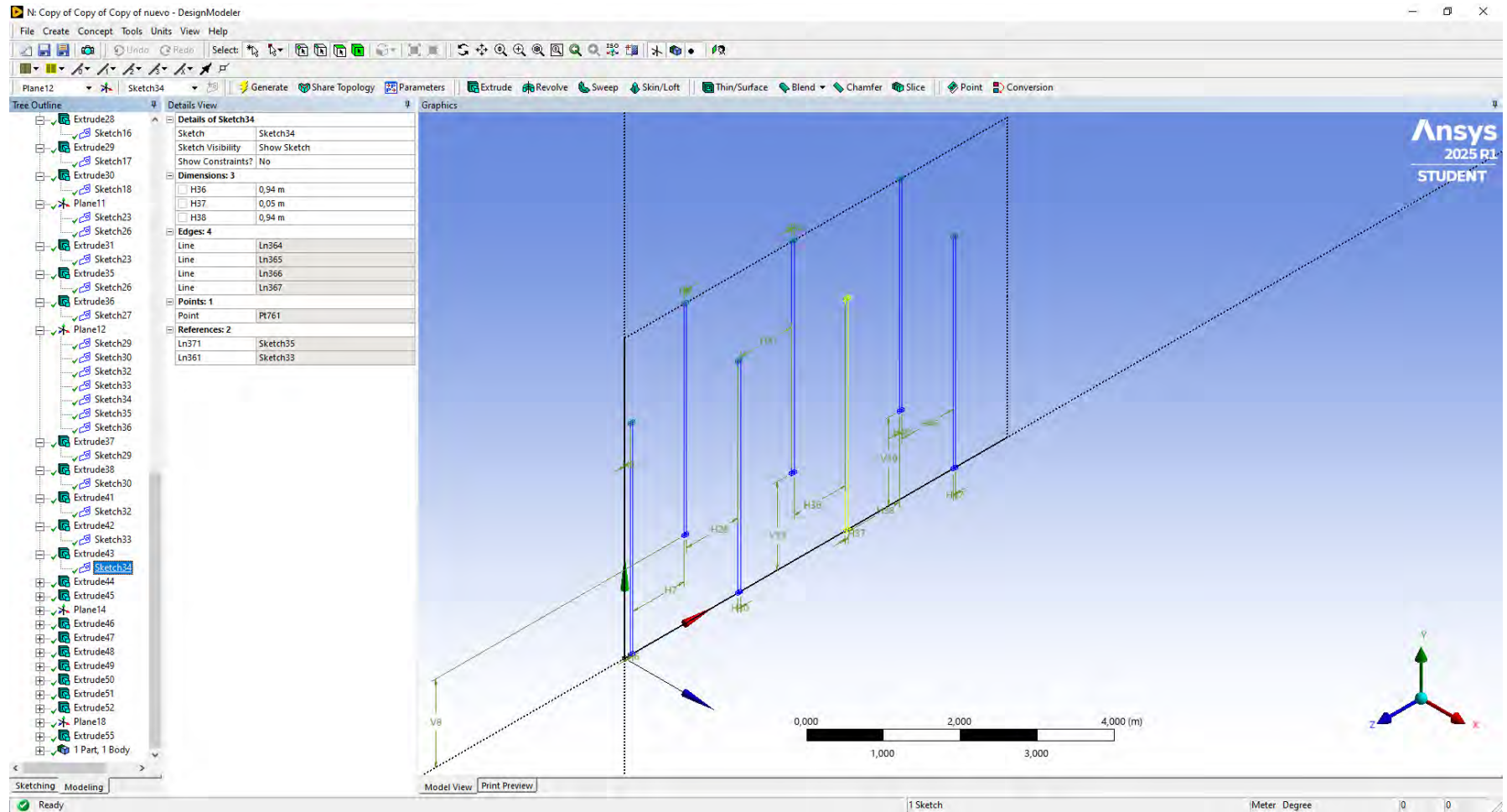




Figura 216

Anexos: Elaboración de la geometría 81

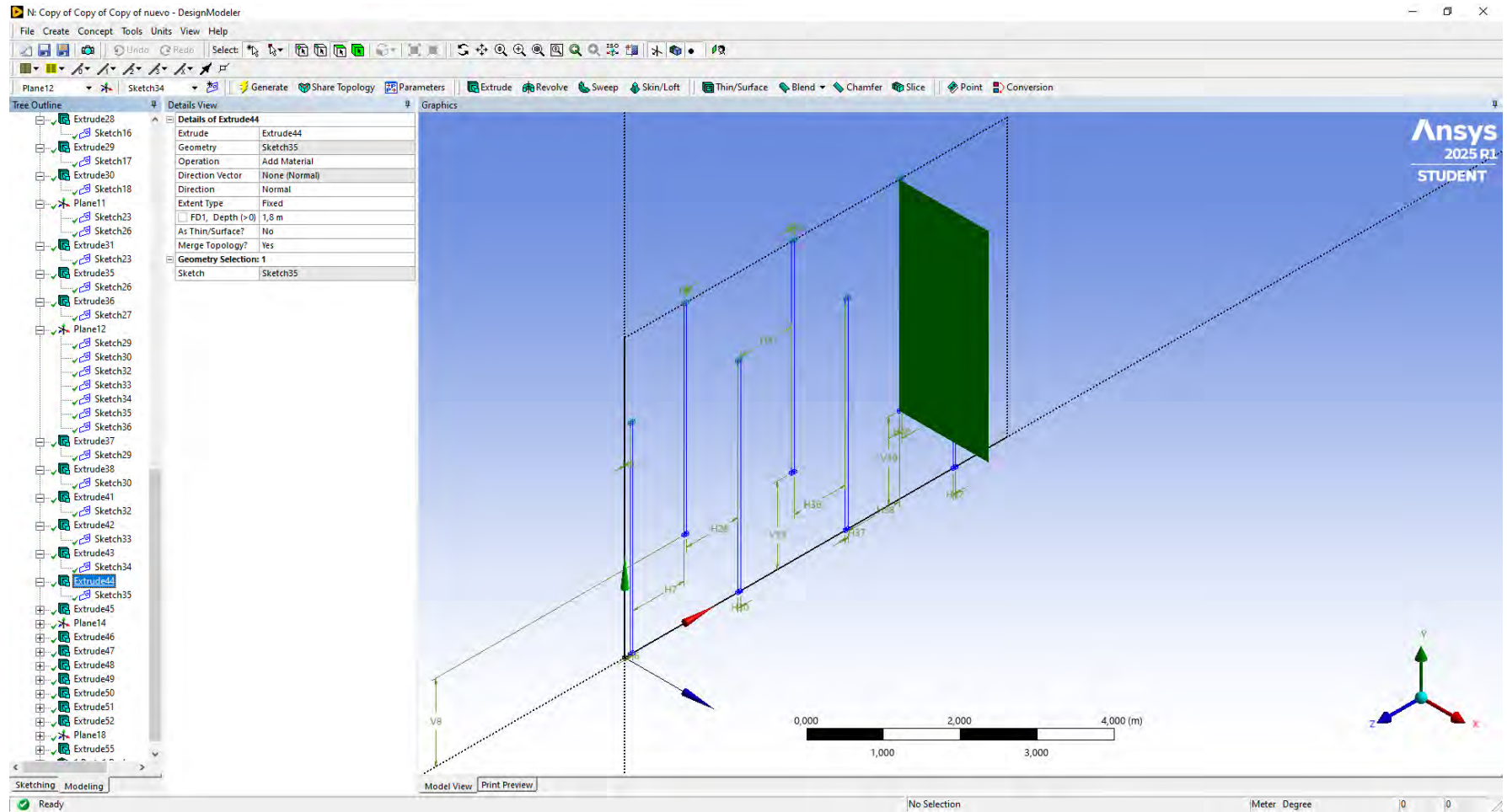


Figura 217

Anexos: Elaboración de la geometría 82

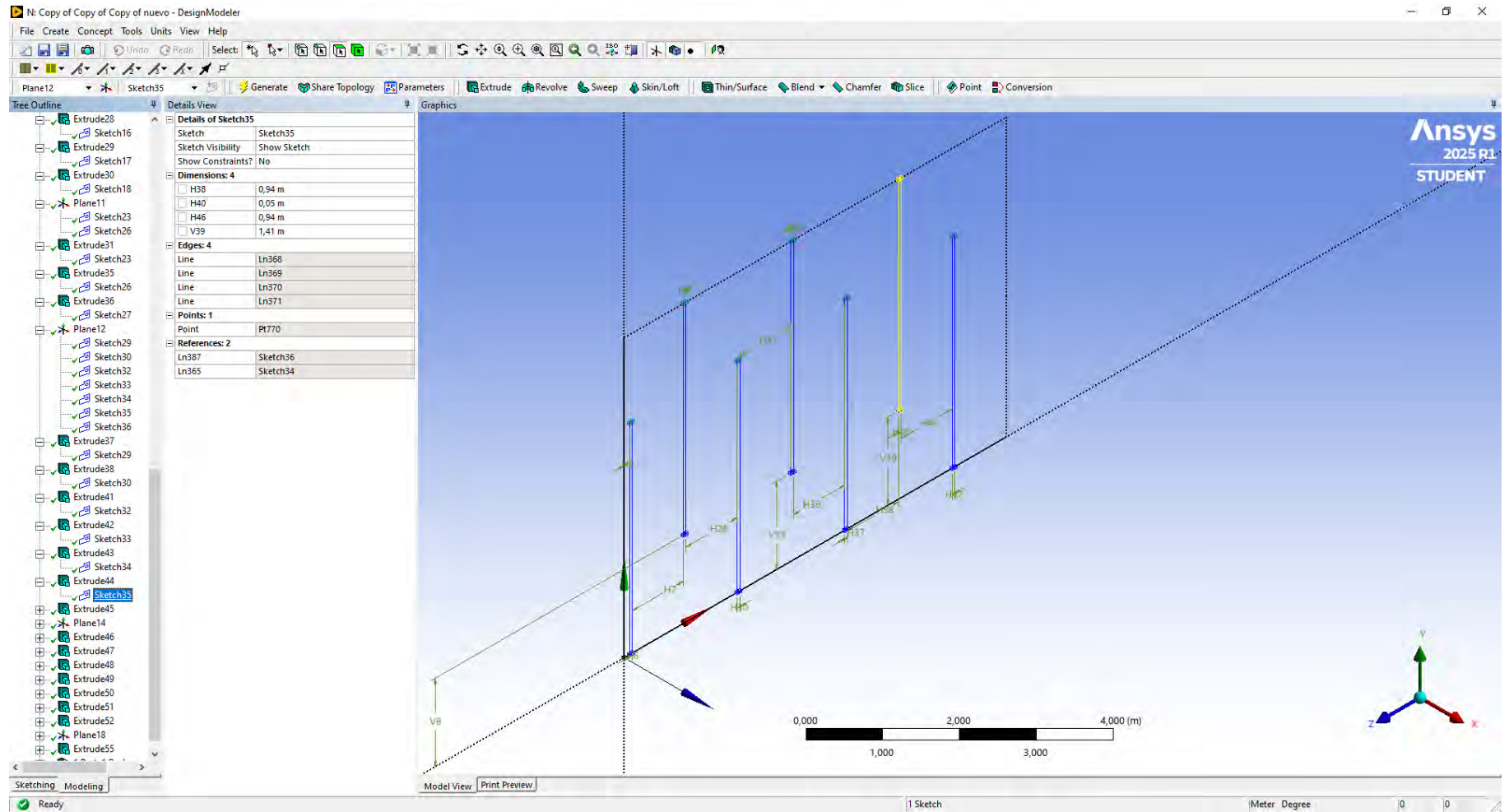
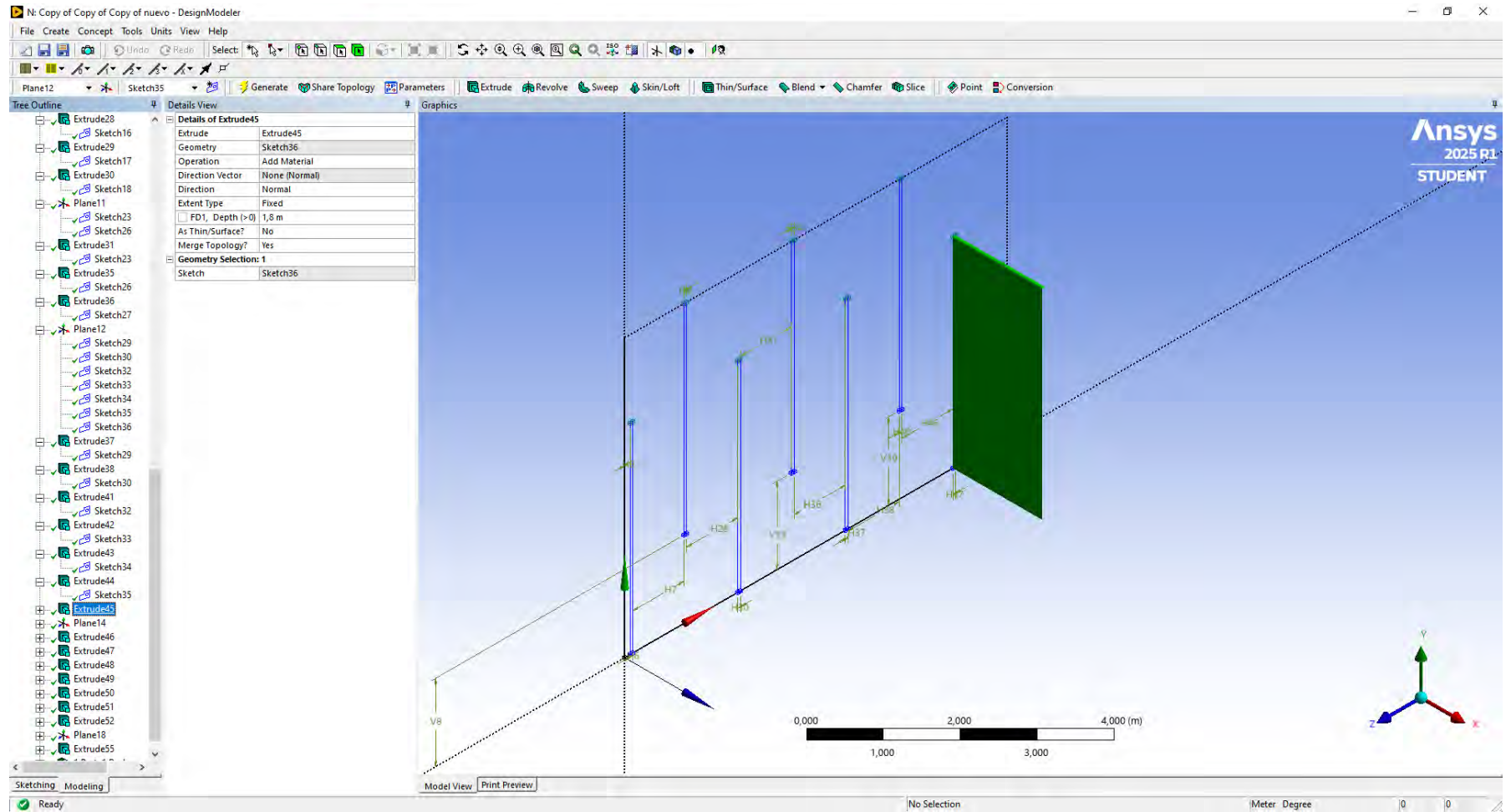


Figura 218

Anexos: Elaboración de la geometría 83





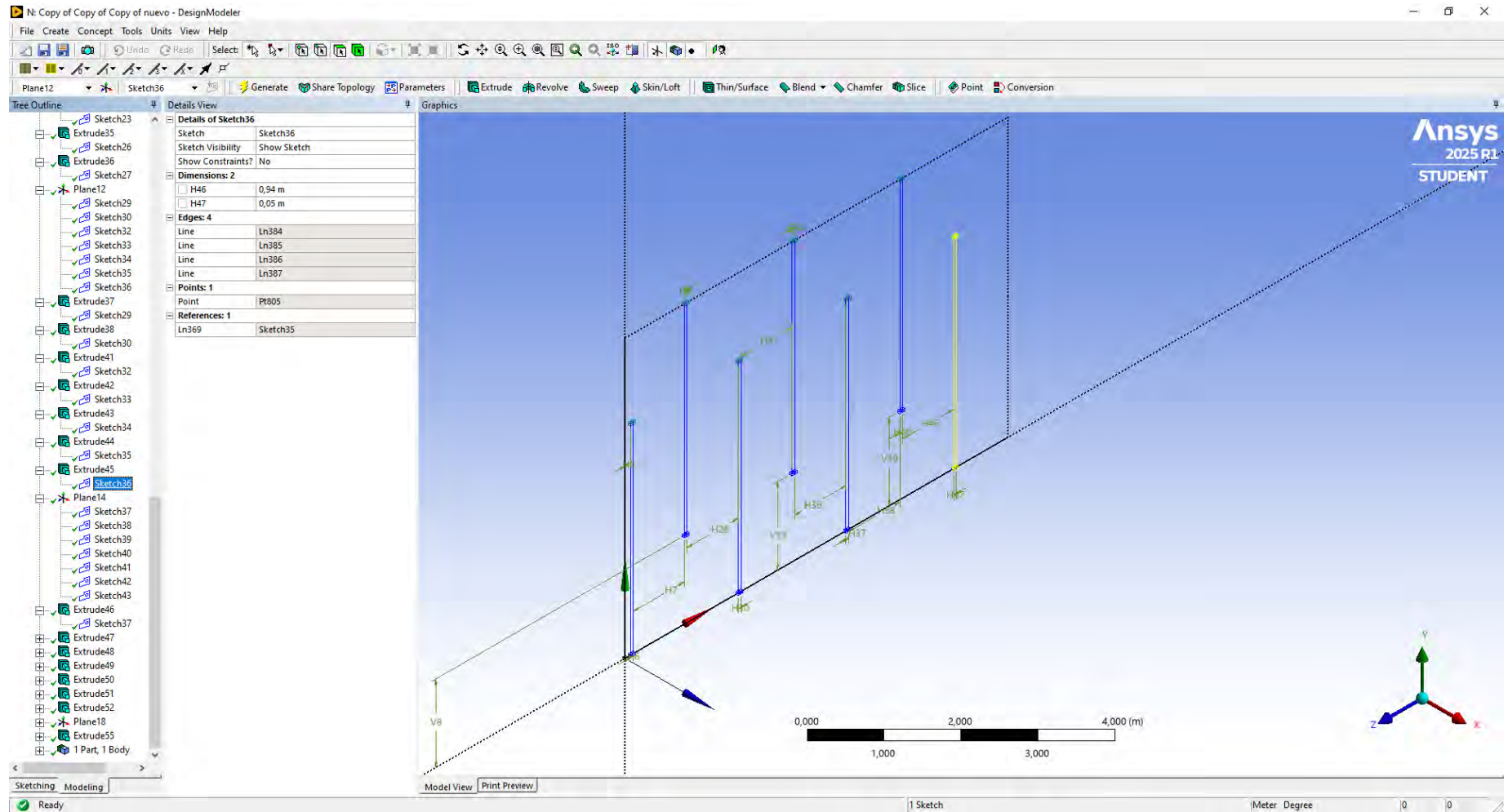
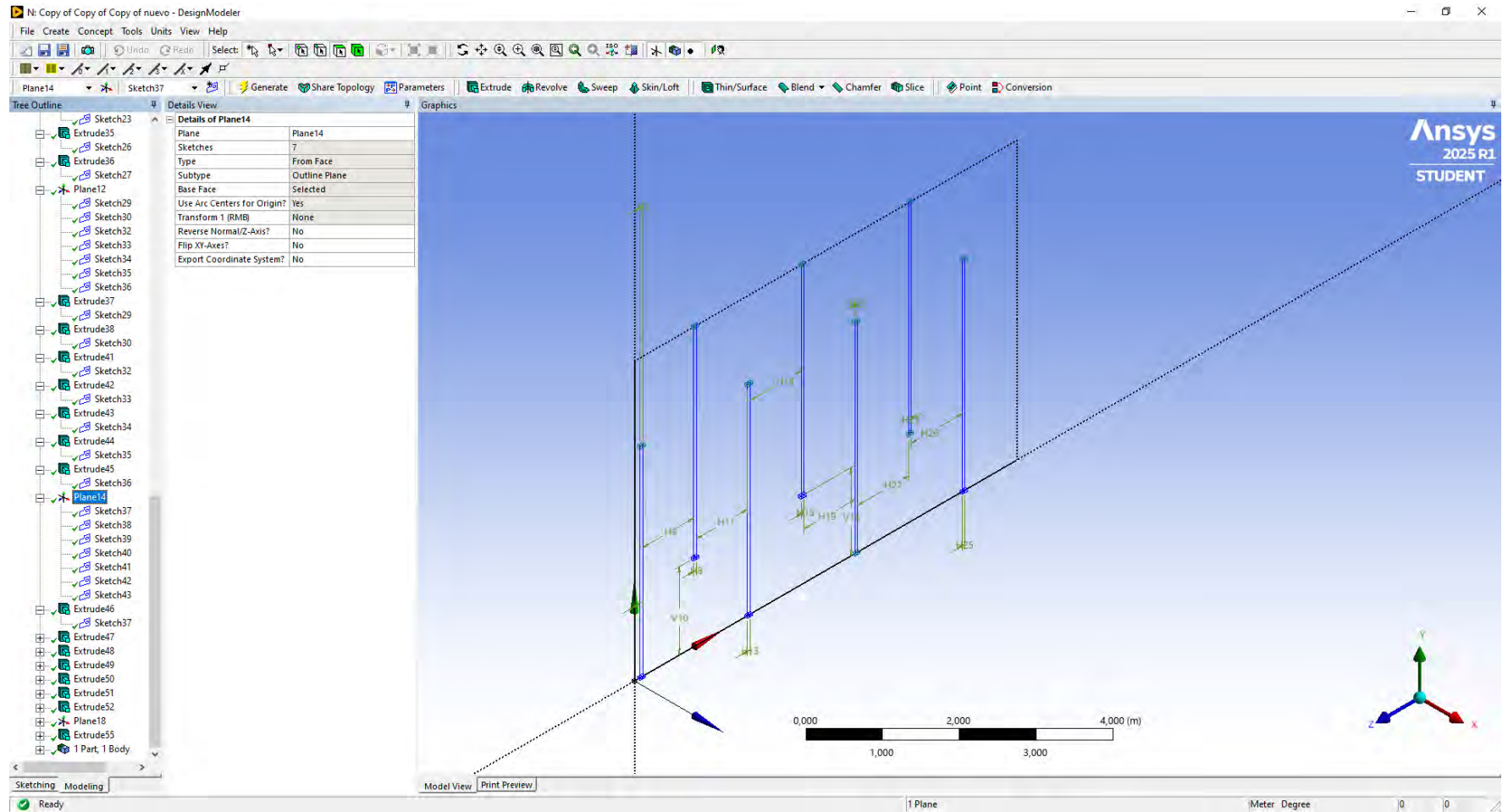
**Figura 219***Anexos: Elaboración de la geometría 84*

Figura 220

Anexos: Elaboración de la geometría 85



**Figura 221**

Anexos: Elaboración de la geometría 86

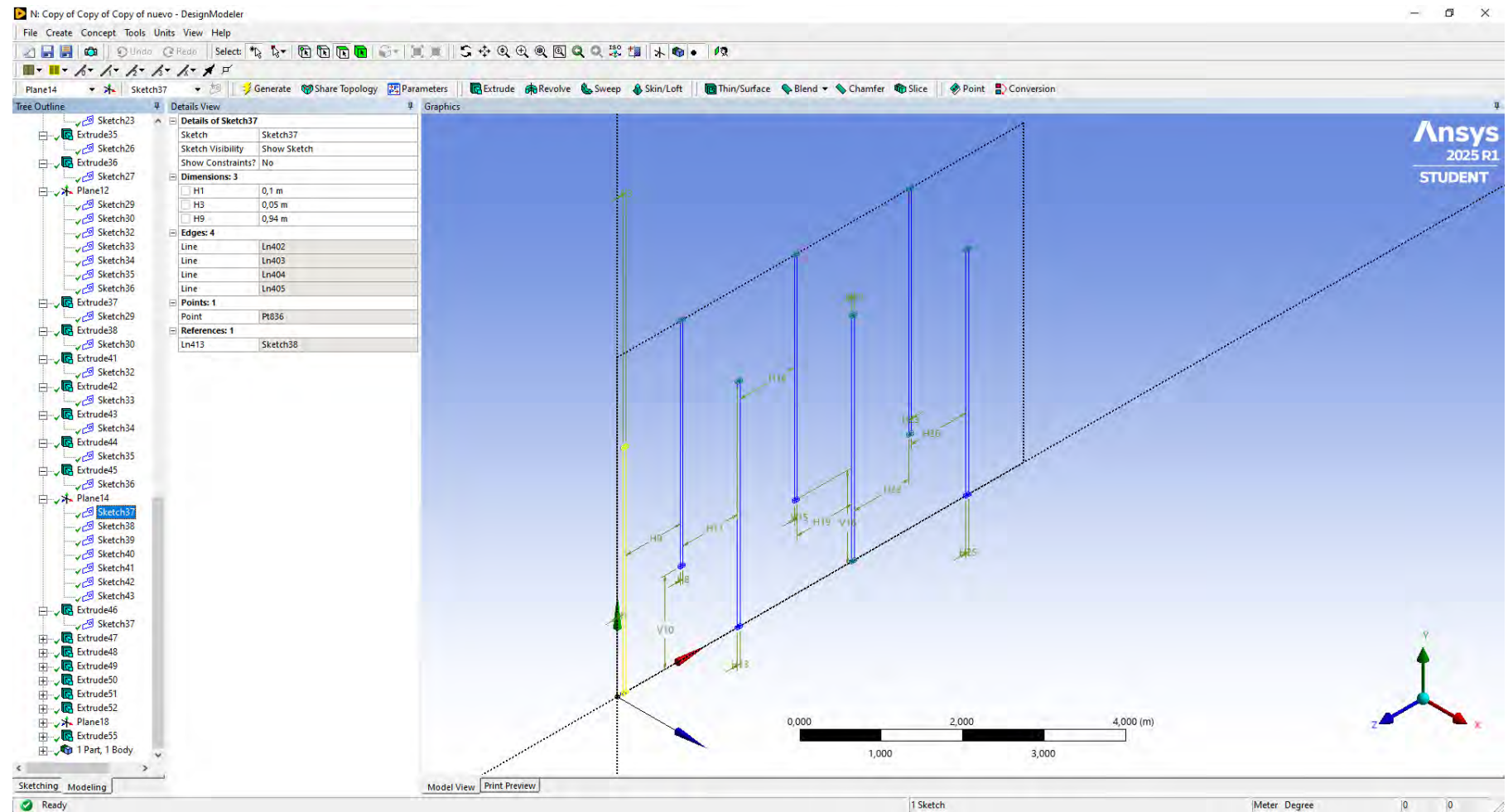


Figura 222

Anexos: Elaboración de la geometría 87

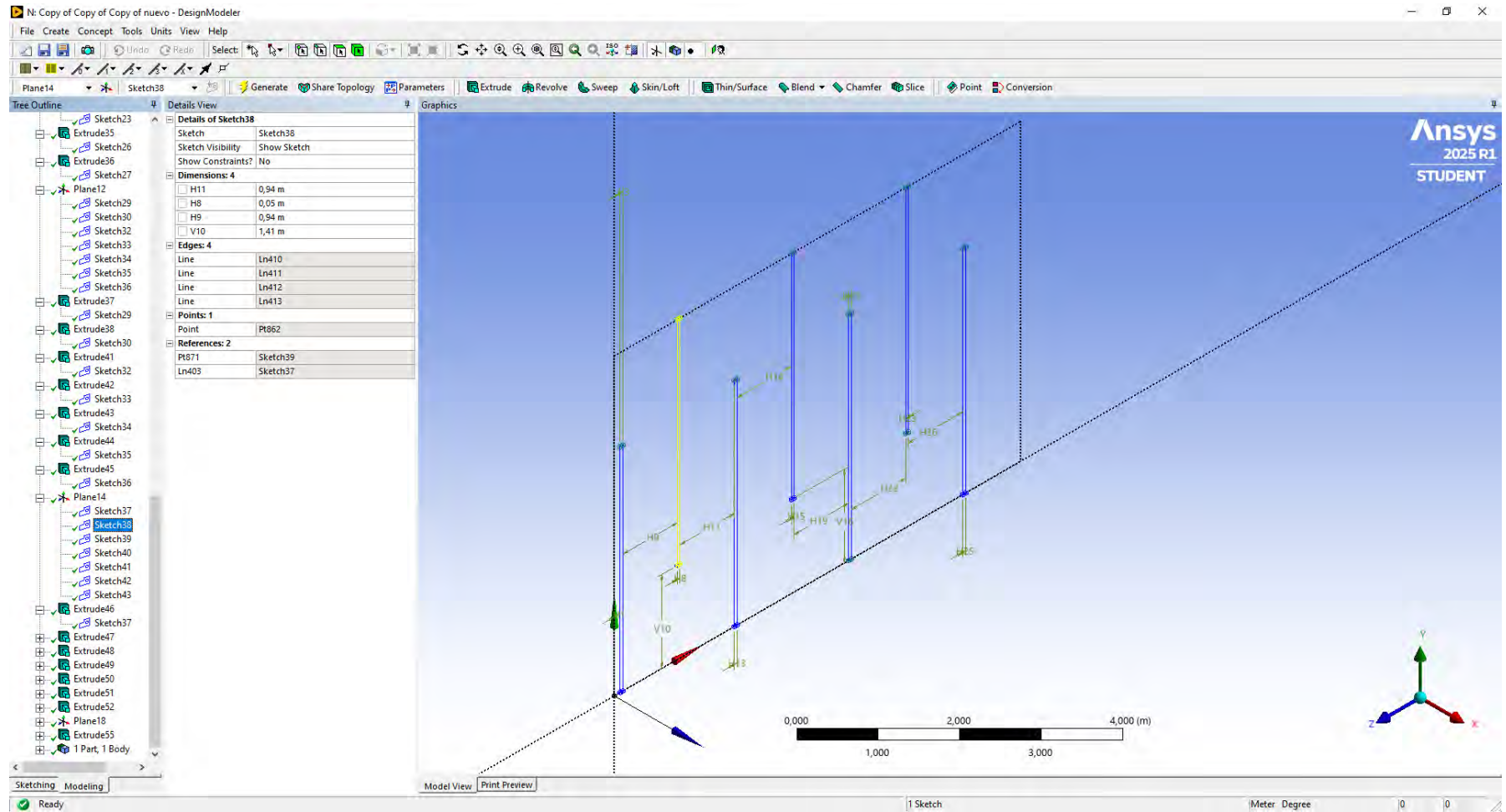




Figura 223

Anexos: Elaboración de la geometría 88

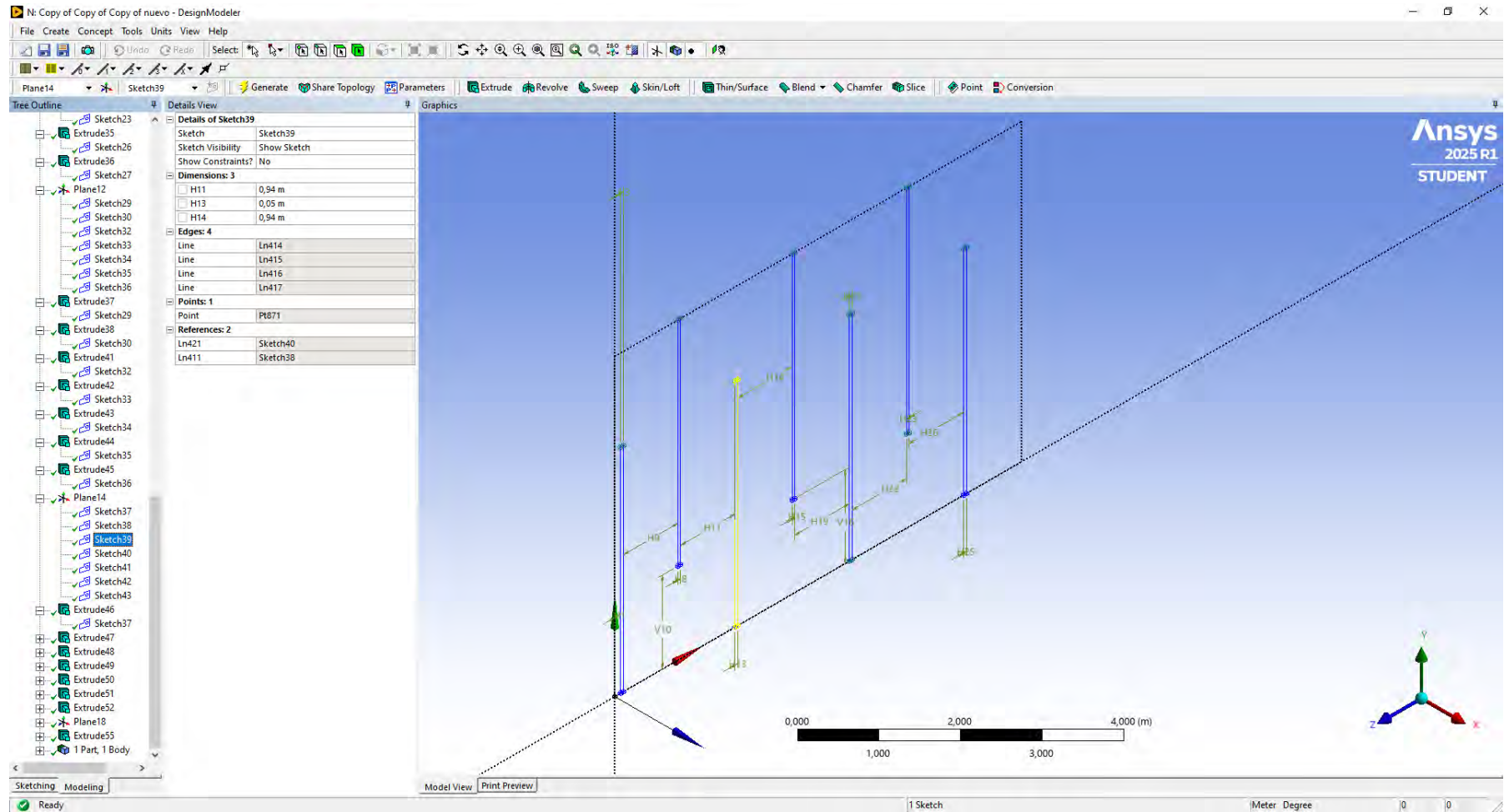


Figura 224

Anexos Elaboración de la geometría 89

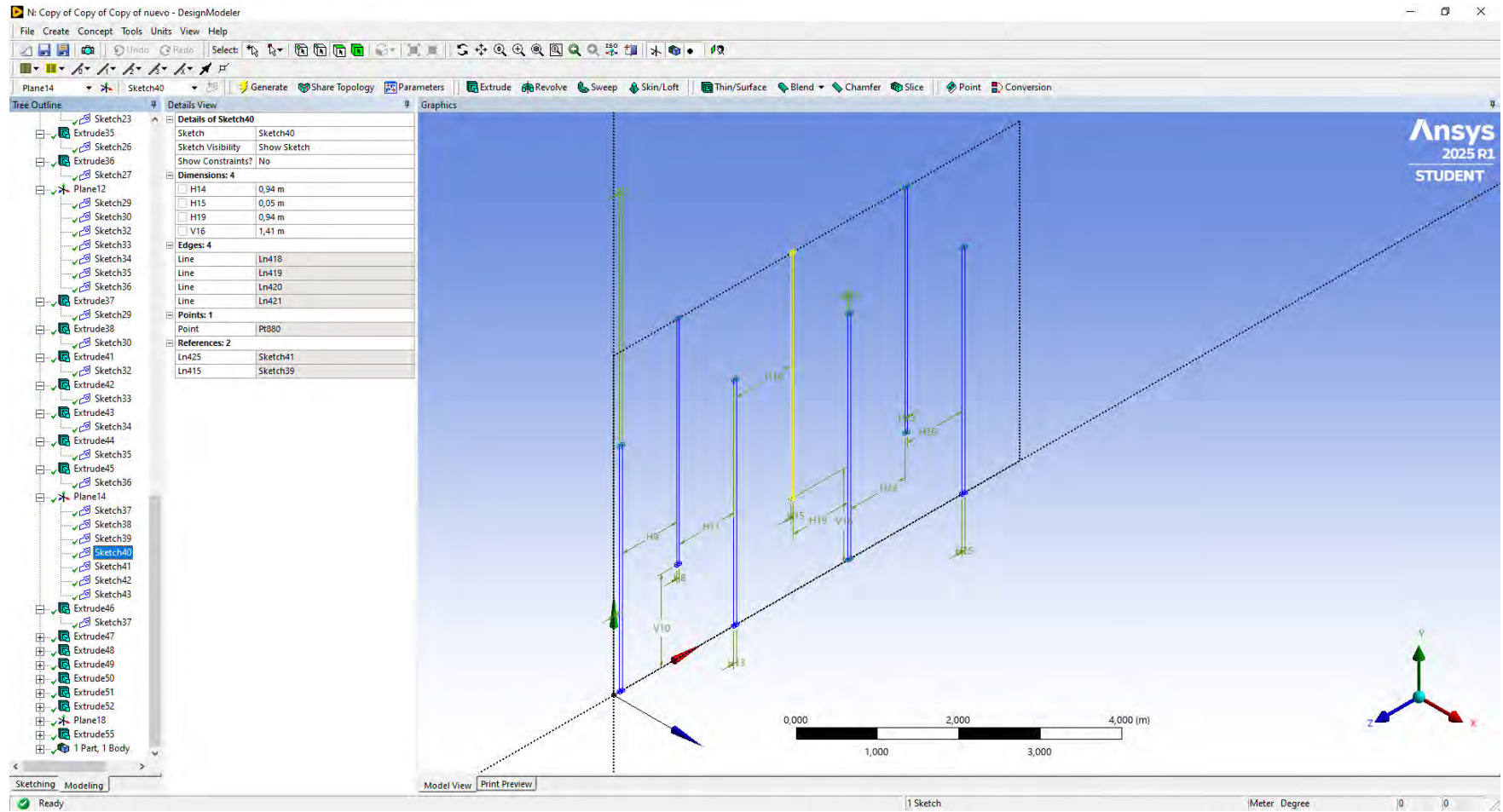


Figura 225

Anexos: Elaboración de la geometría 90

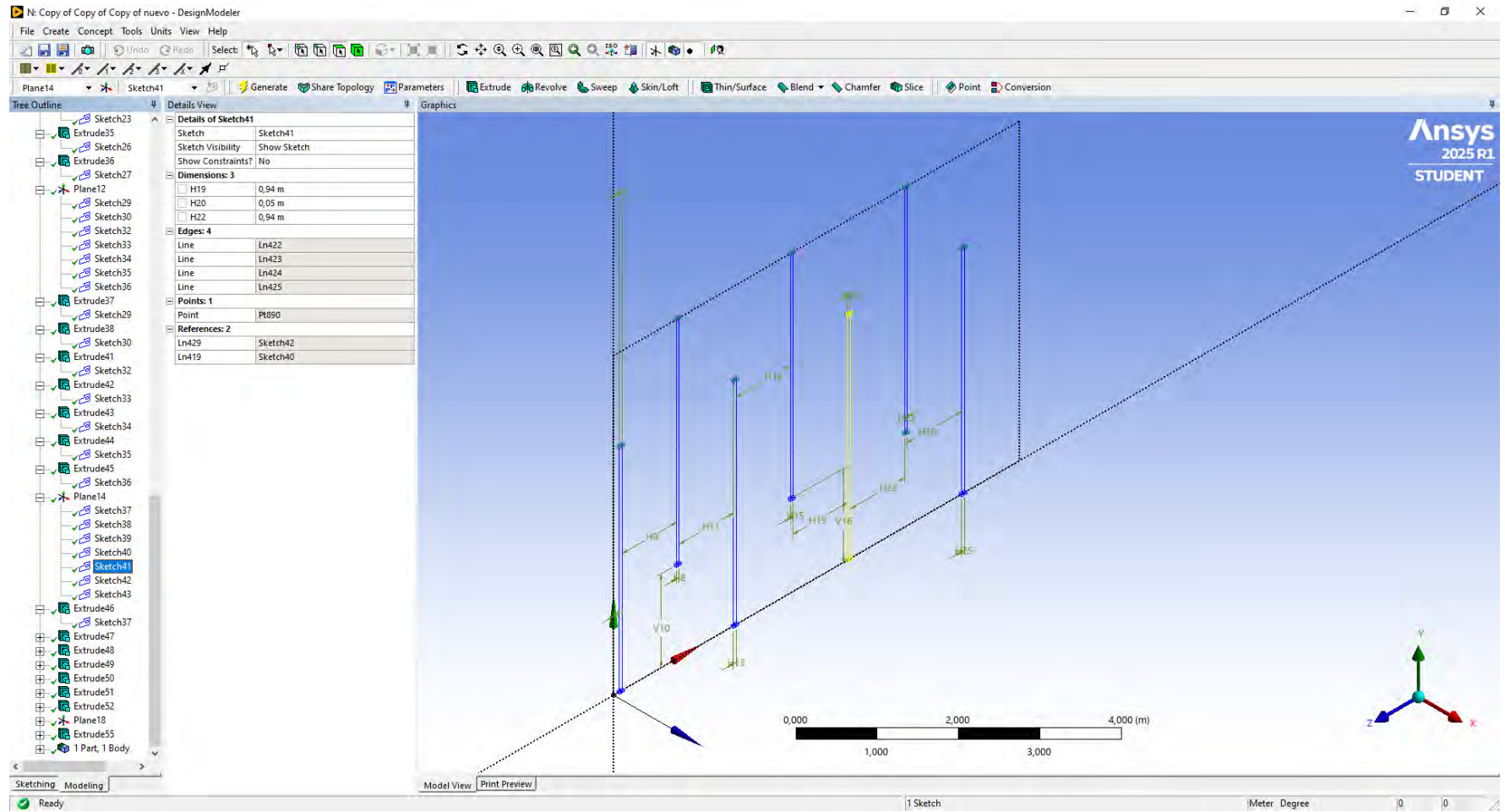




Figura 226

Anexos: Elaboración de la geometría 91

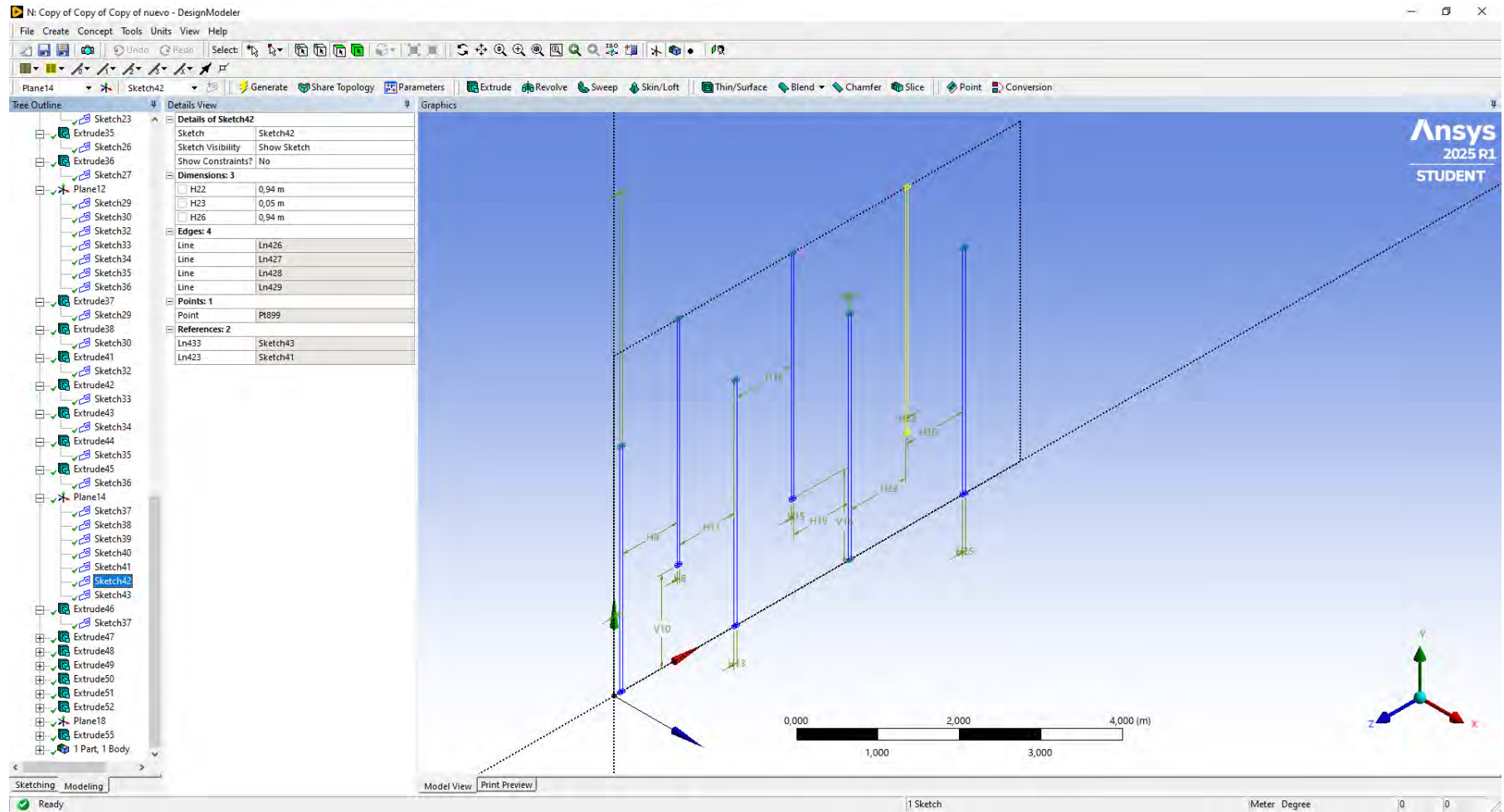


Figura 227

Anexos: Elaboración de la geometría 92

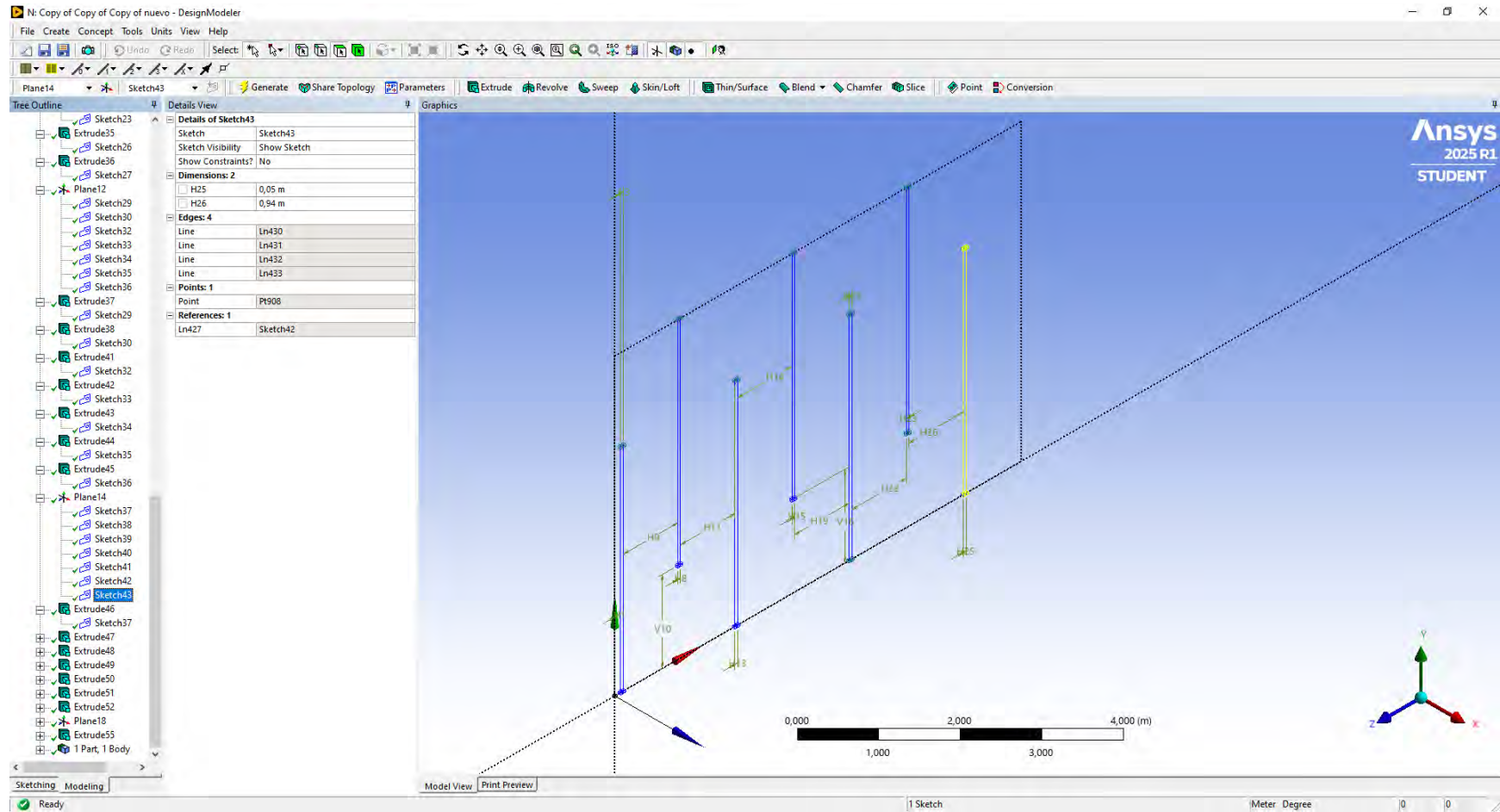
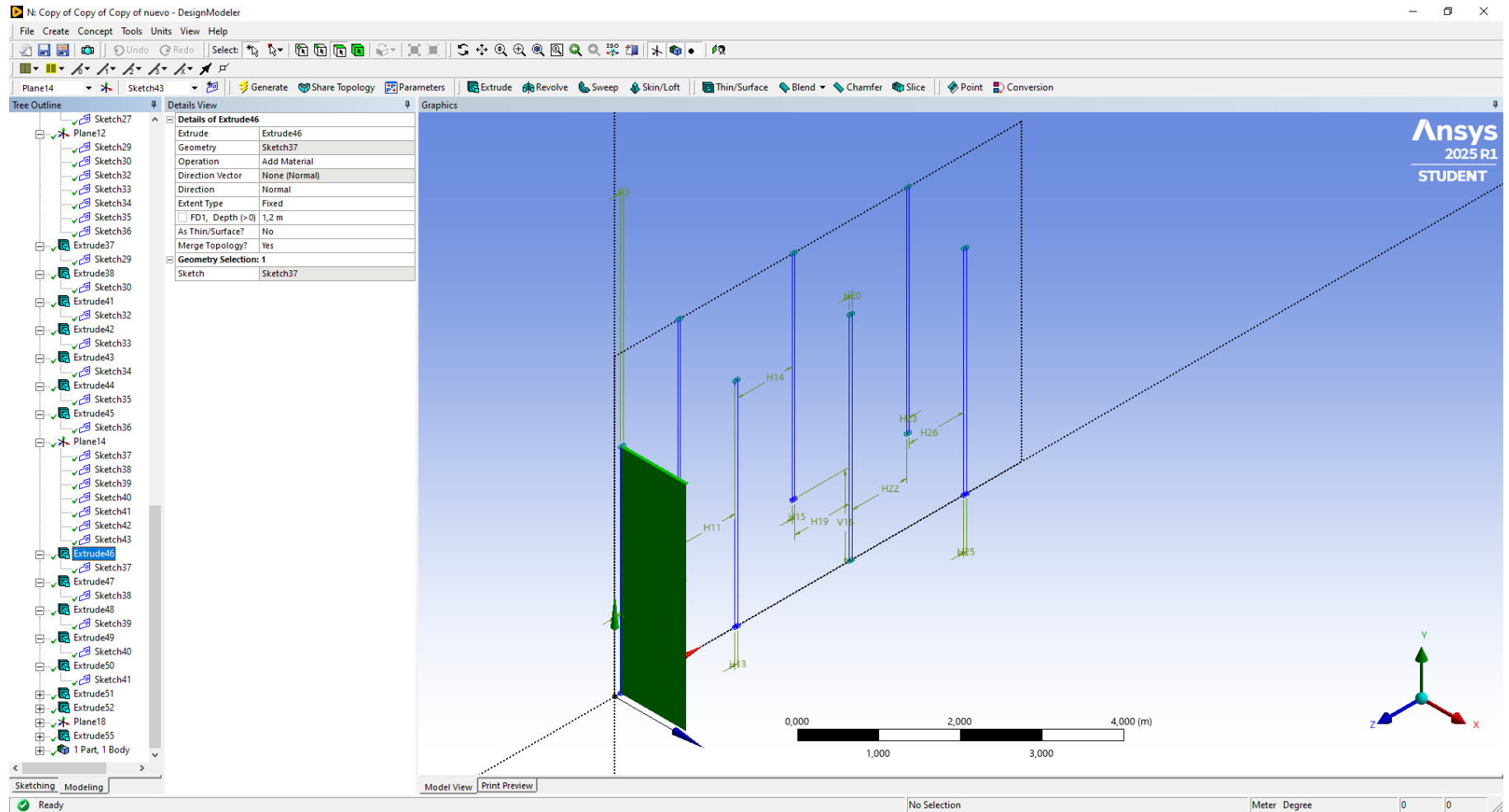
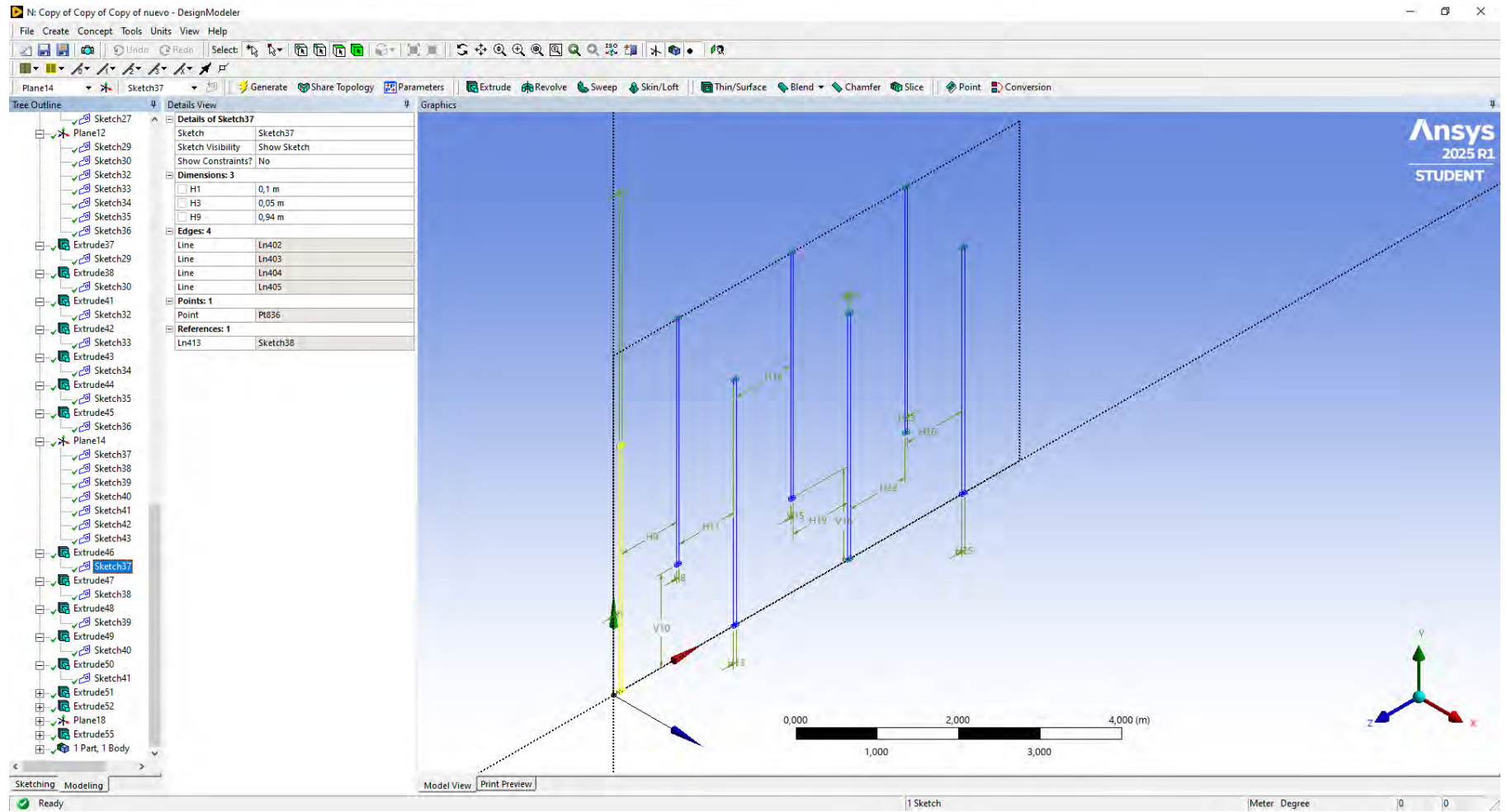


Figura 228

Anexos: Elaboración de la geometría 93



**Figura 229***Anexos: Elaboración de la geometría 94*



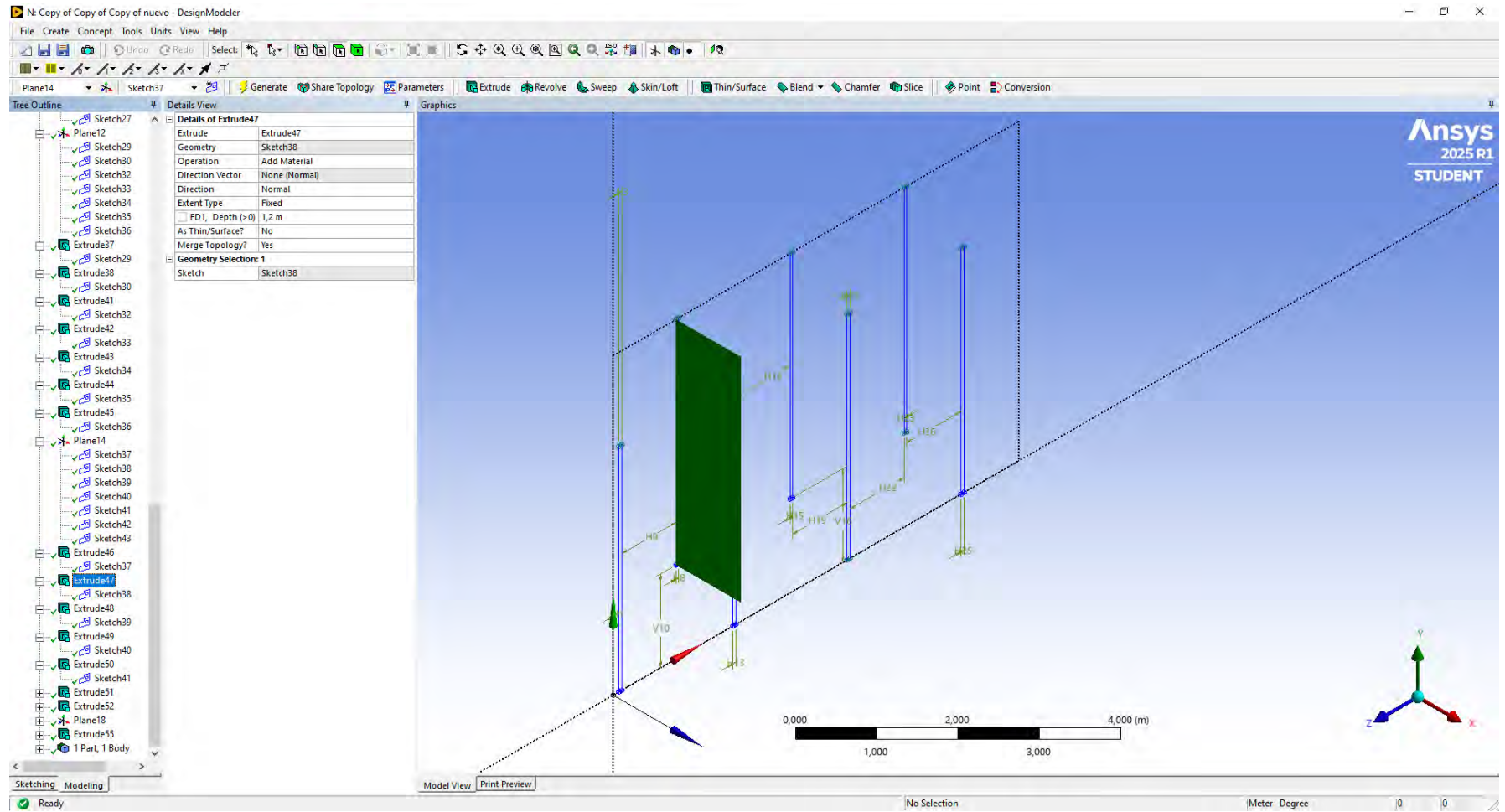
**Figura 230***Anexos: Elaboración de la geometría 95*

Figura 231

Anexos: Elaboración de la geometría 96

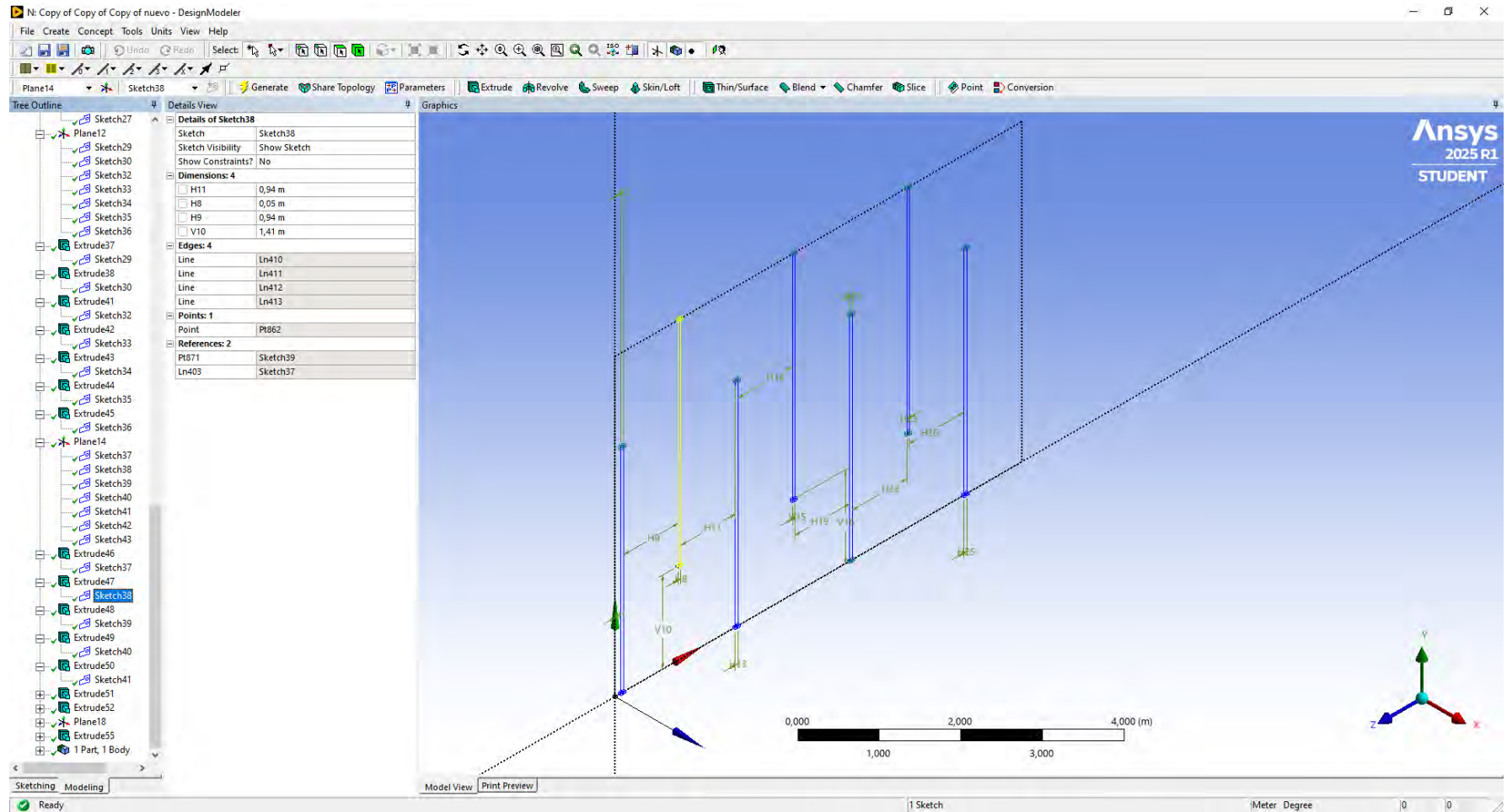


Figura 232

Anexos: Elaboración de la geometría 97

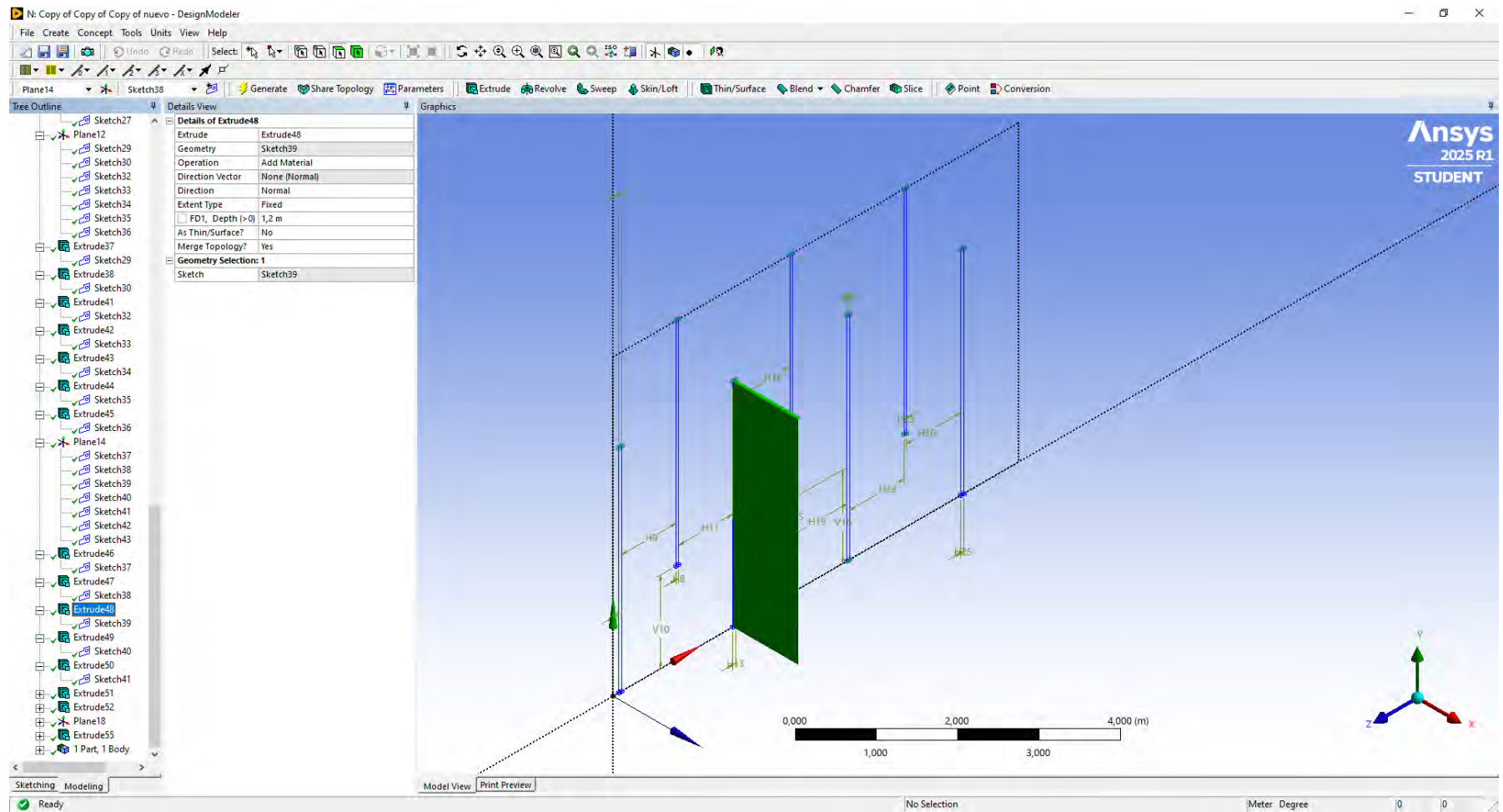




Figura 233

Anexos: Elaboración de la geometría 98

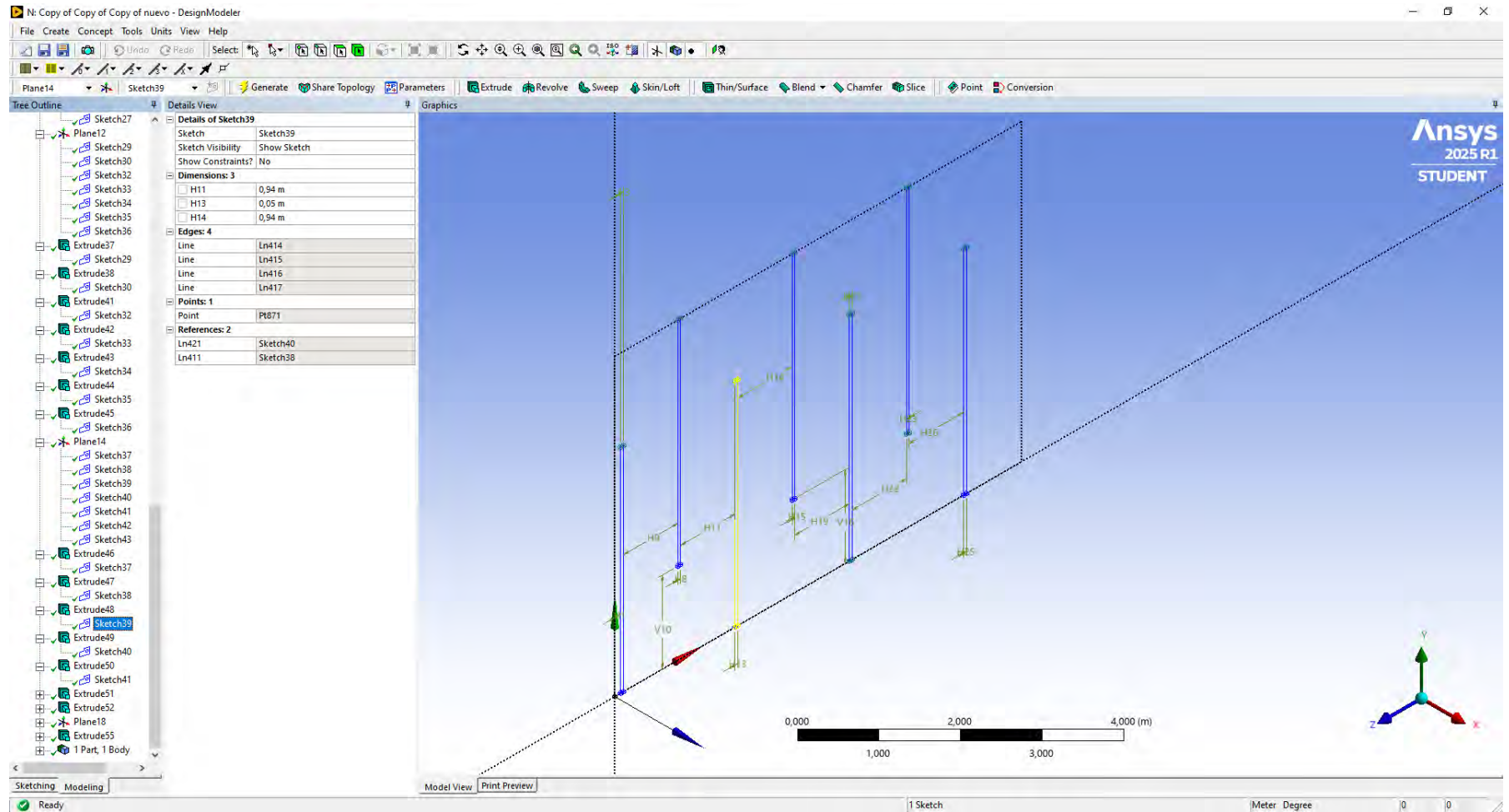


Figura 234

Anexos: Elaboración de la geometría 99

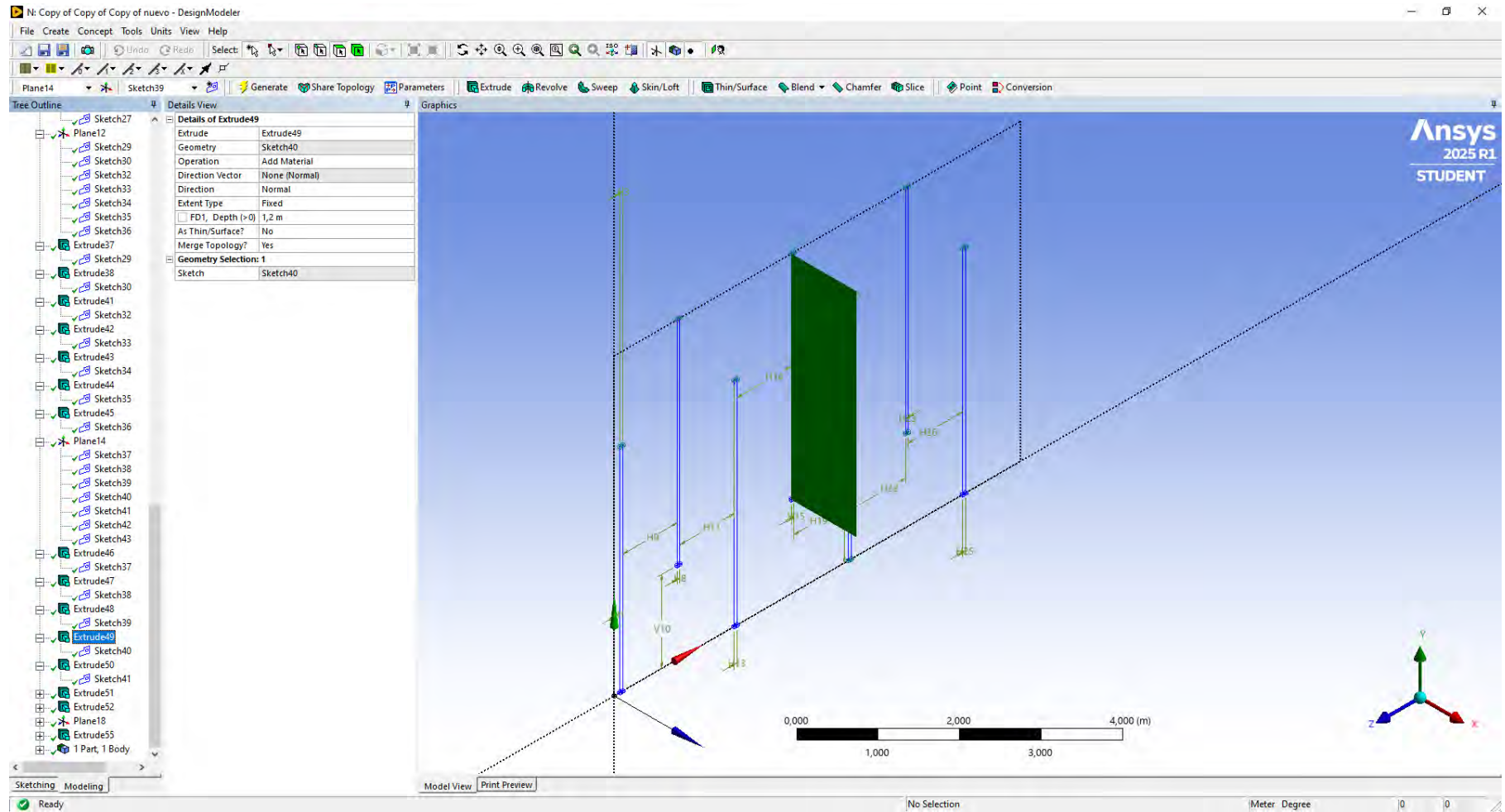


Figura 235

Anexos: Elaboración de la geometría 100

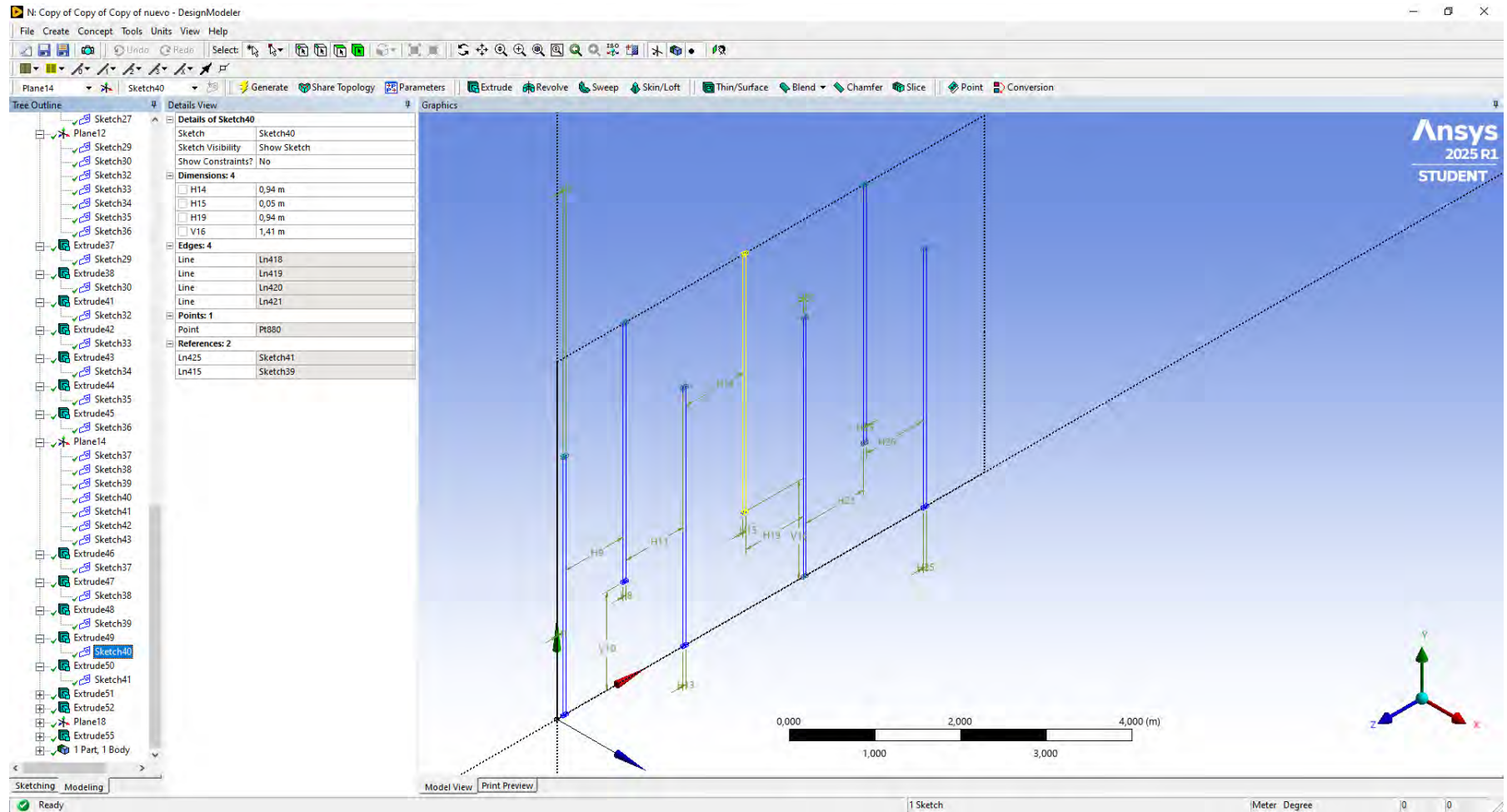
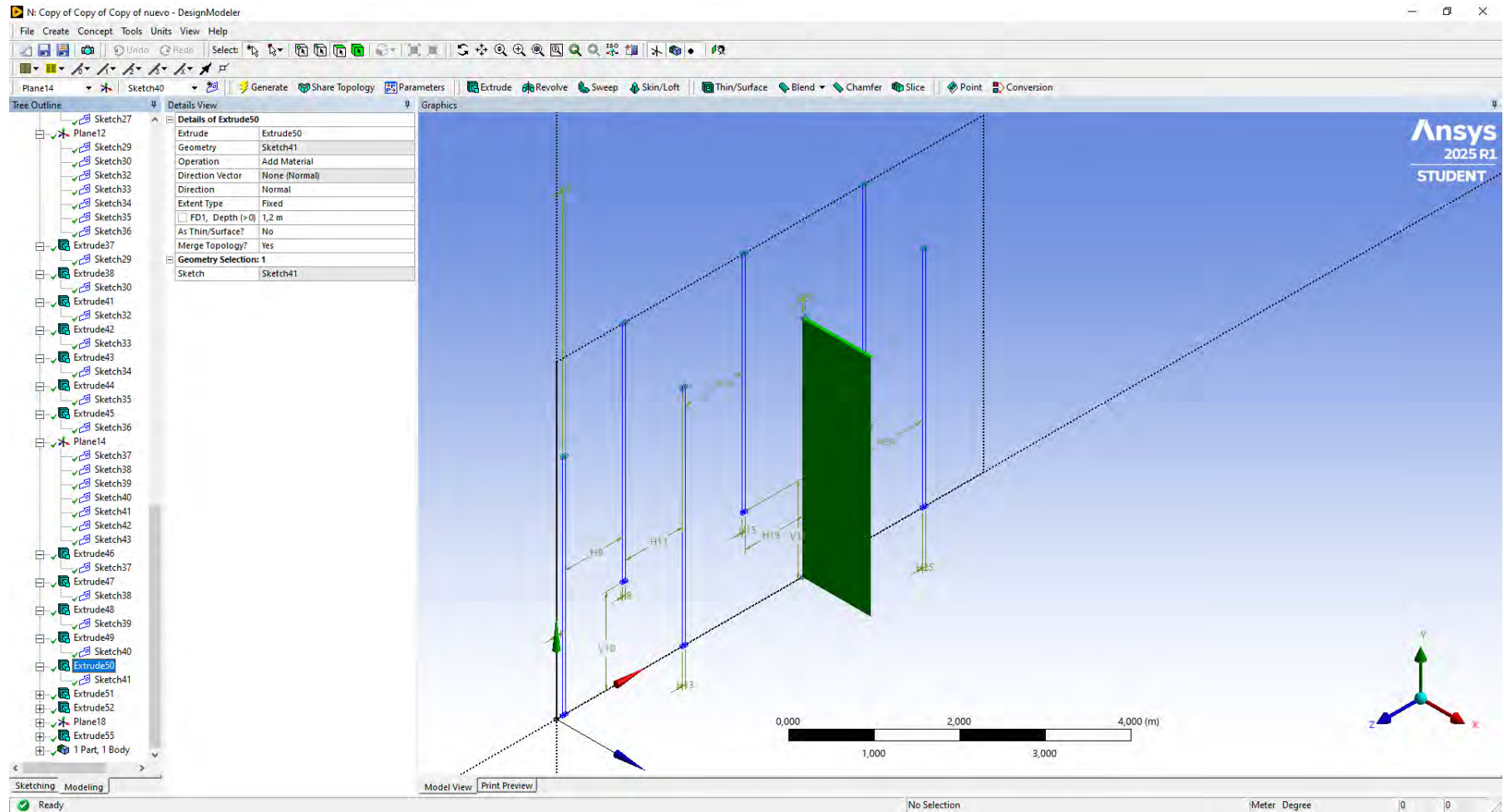
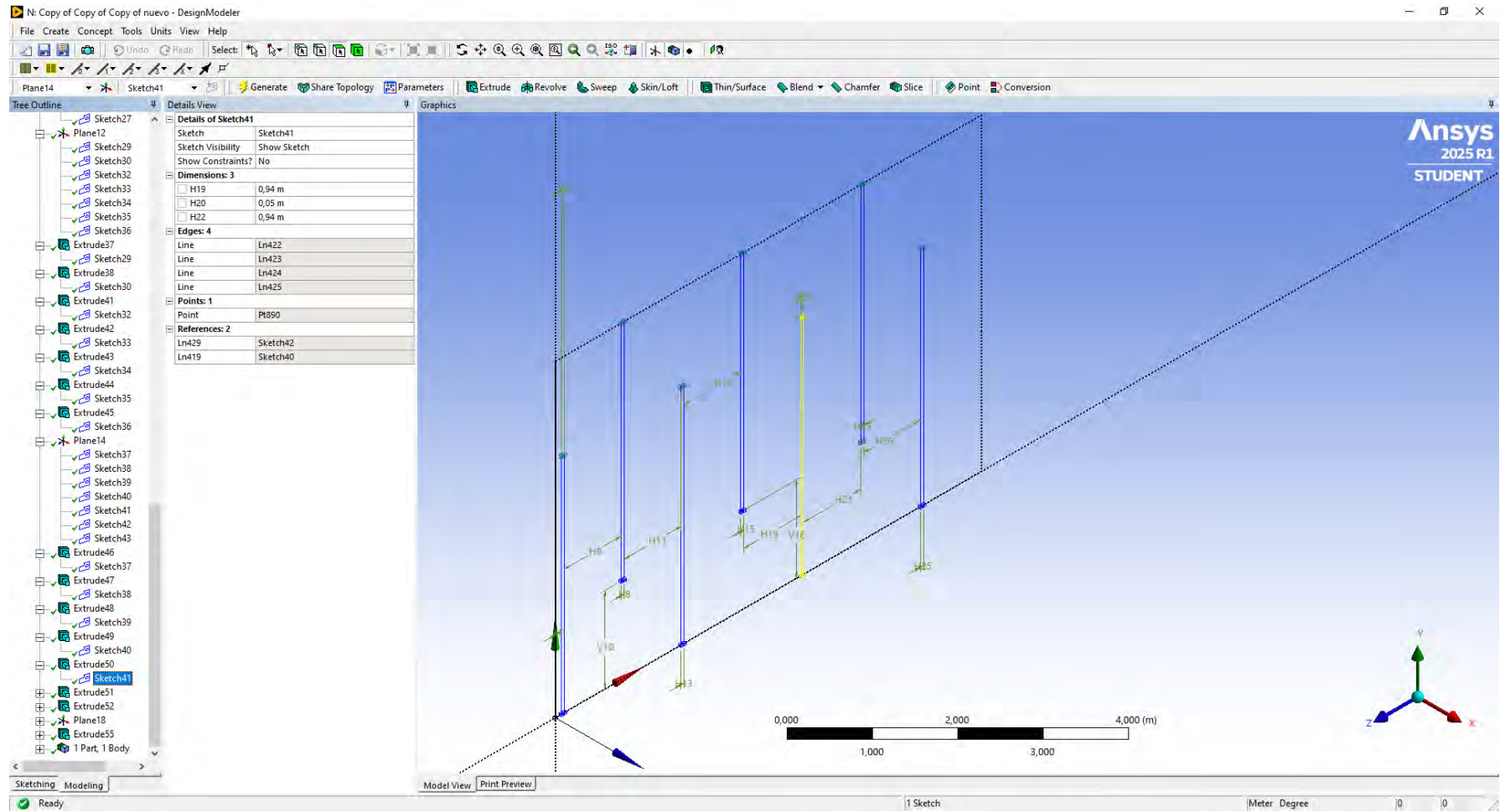




Figura 236

Anexos: Elaboración de la geometría 101



**Figura 237***Anexos: Elaboración de la geometría 102*

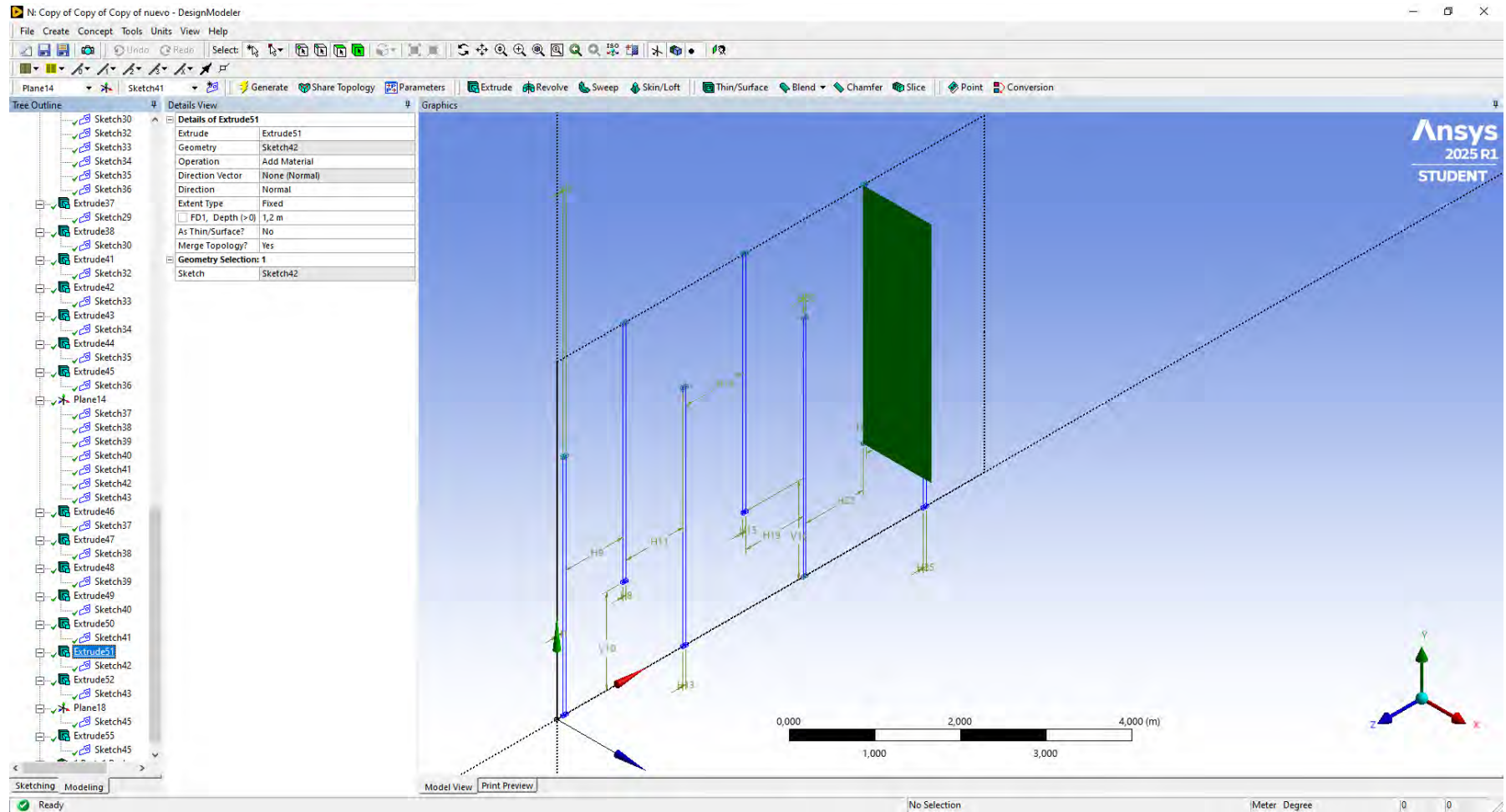
**Figura 238***Anexos: Elaboración de la geometría 103*



Figura 239

Anexos: Elaboración de la geometría 104

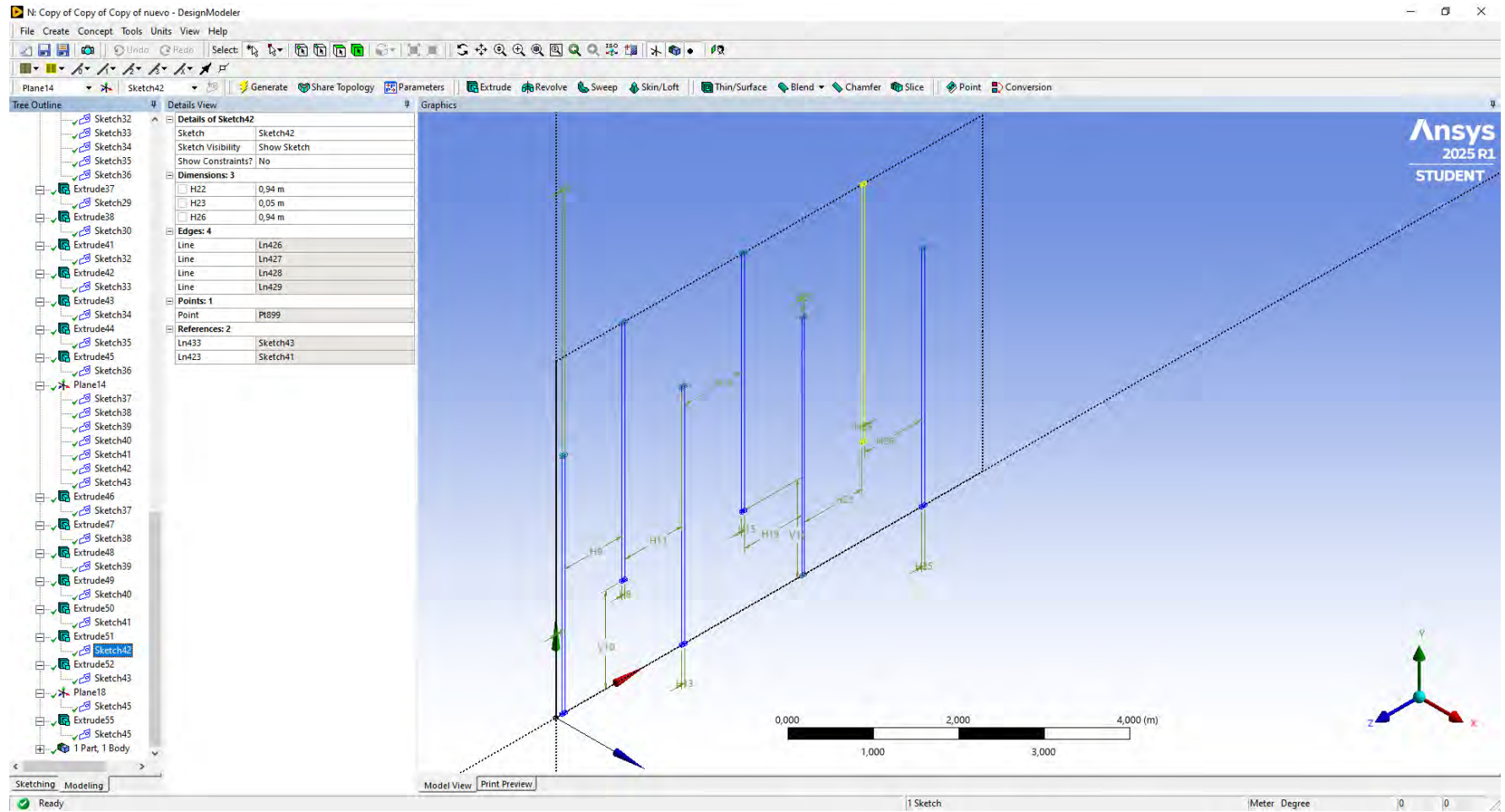




Figura 240

Anexos: Elaboración de la geometría 105

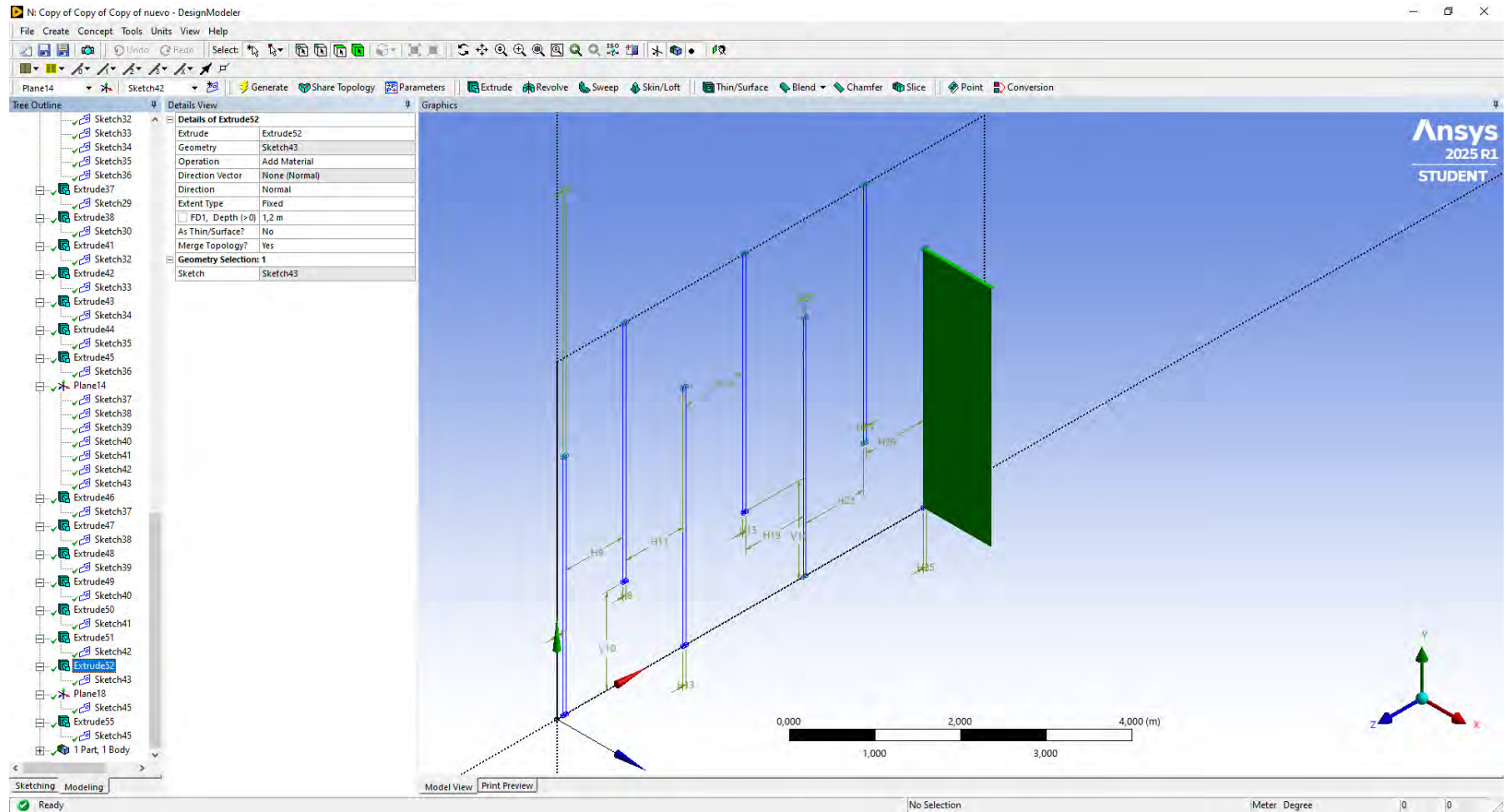
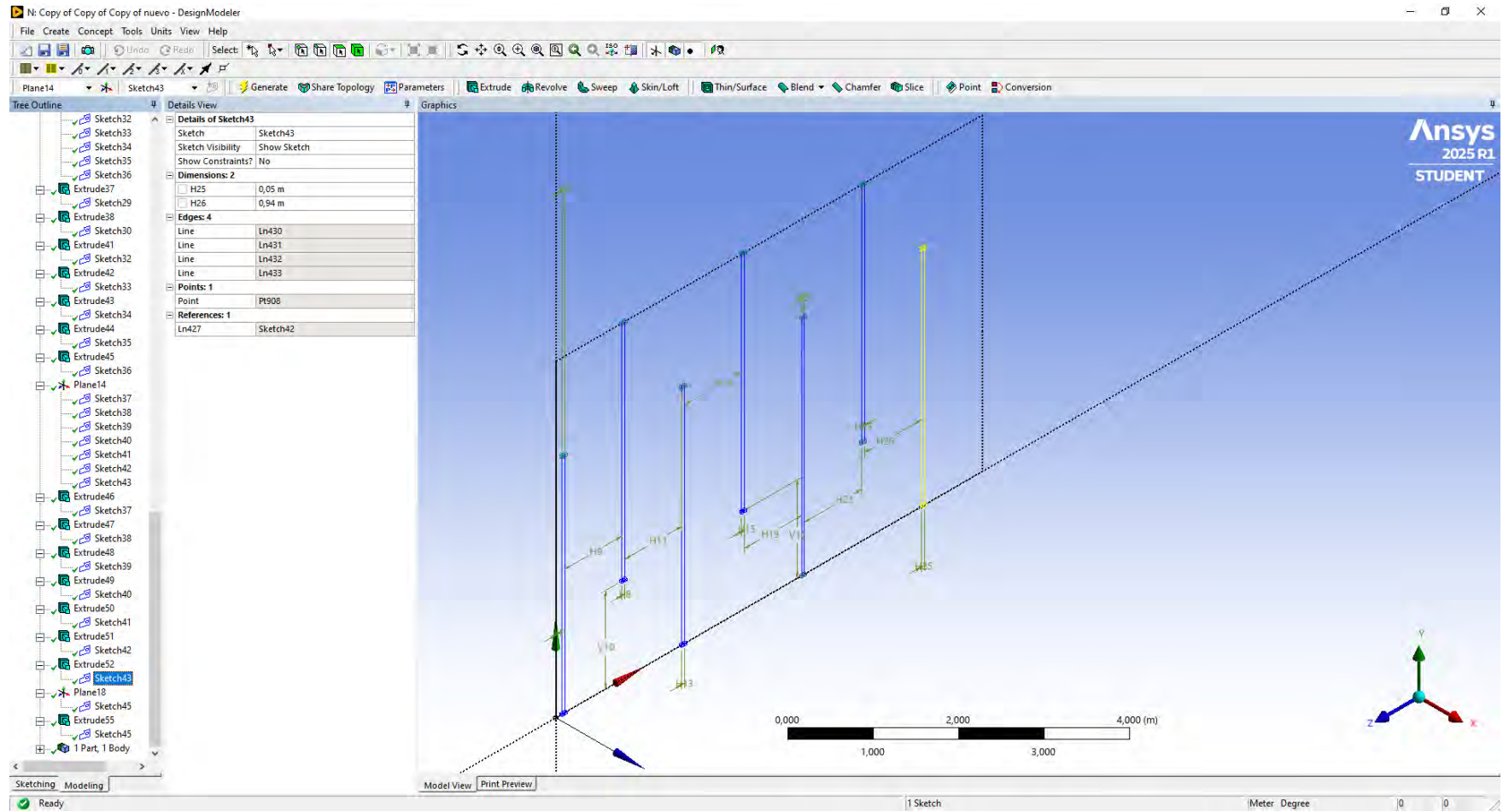
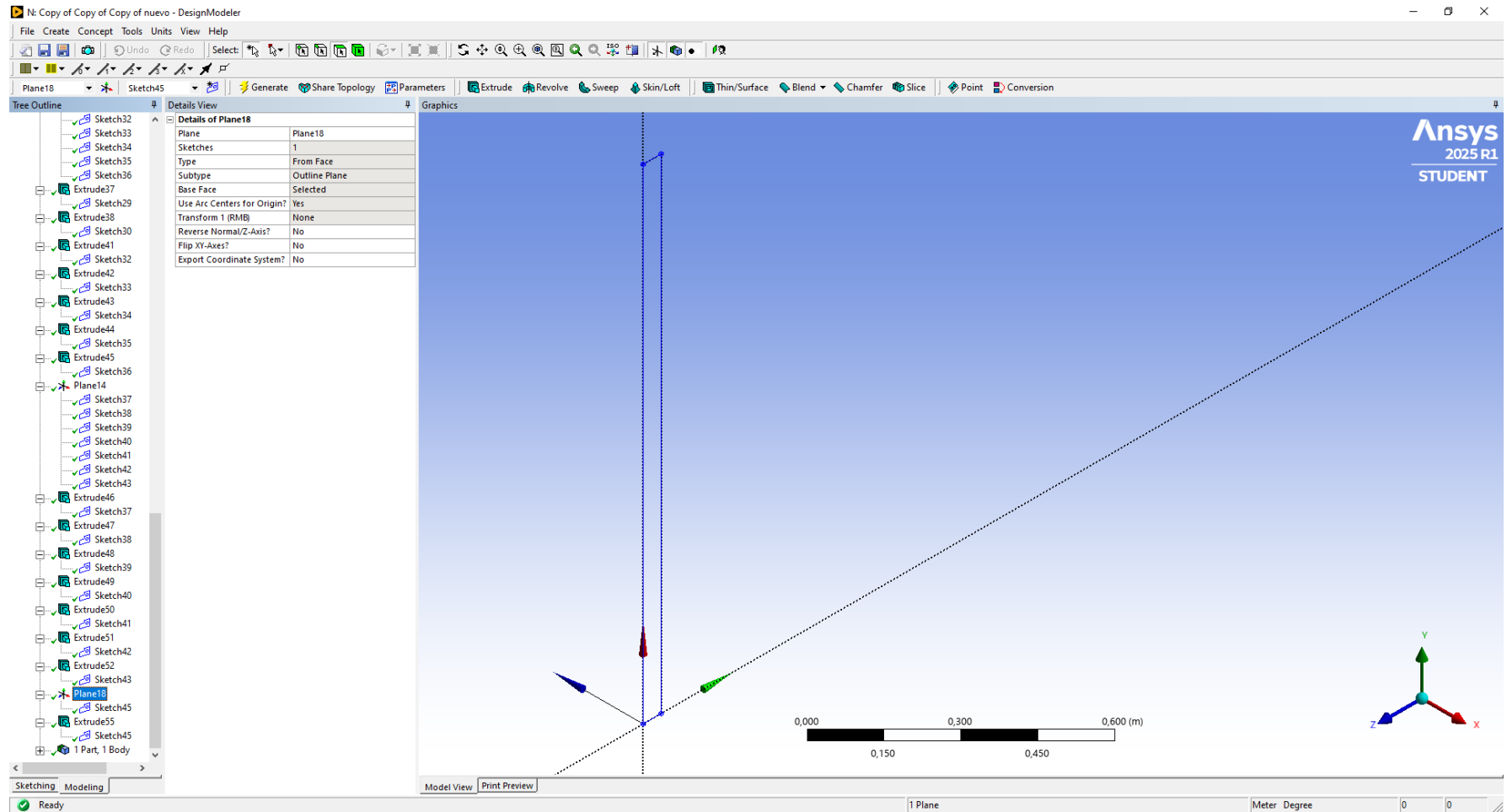
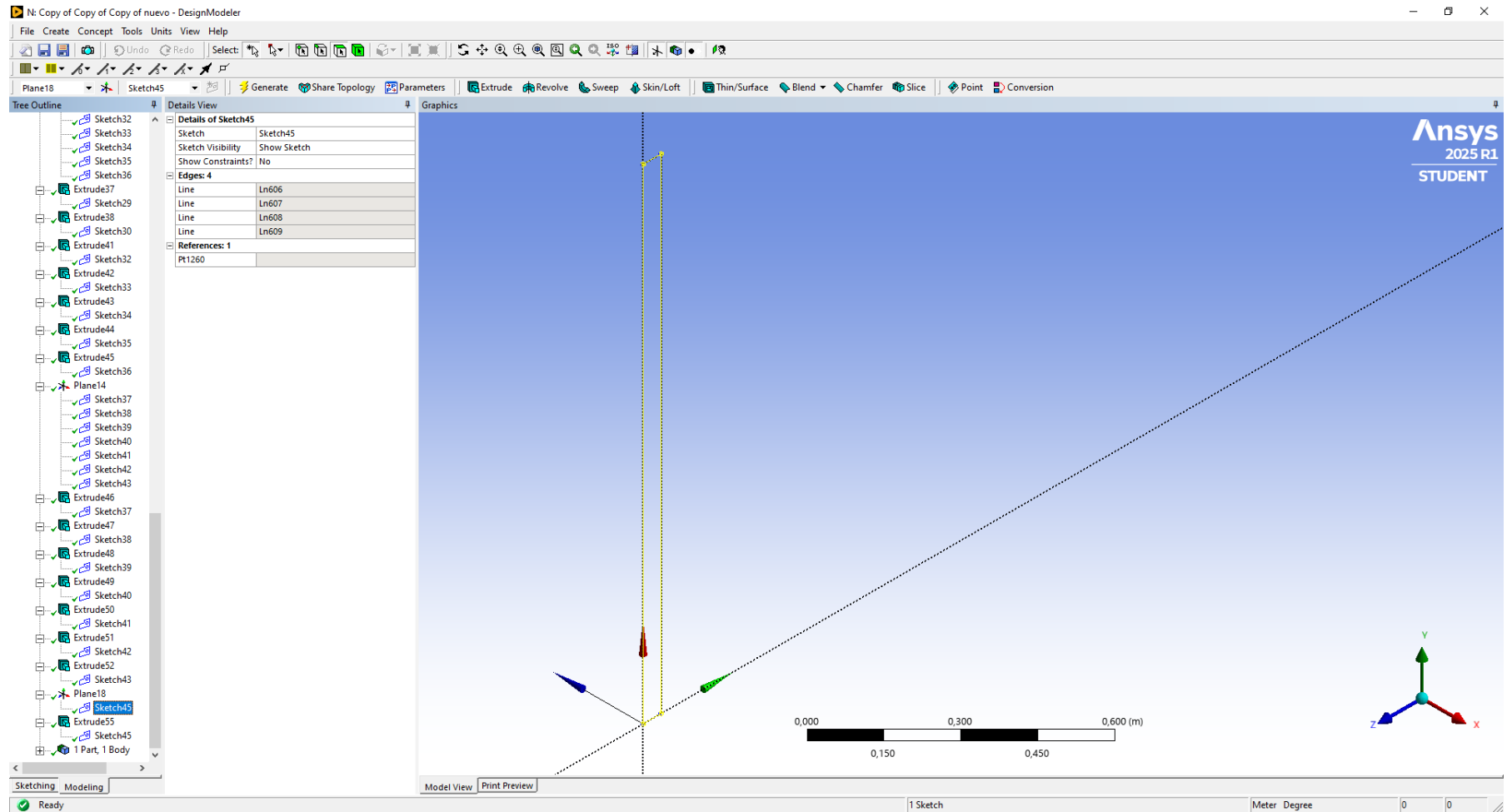


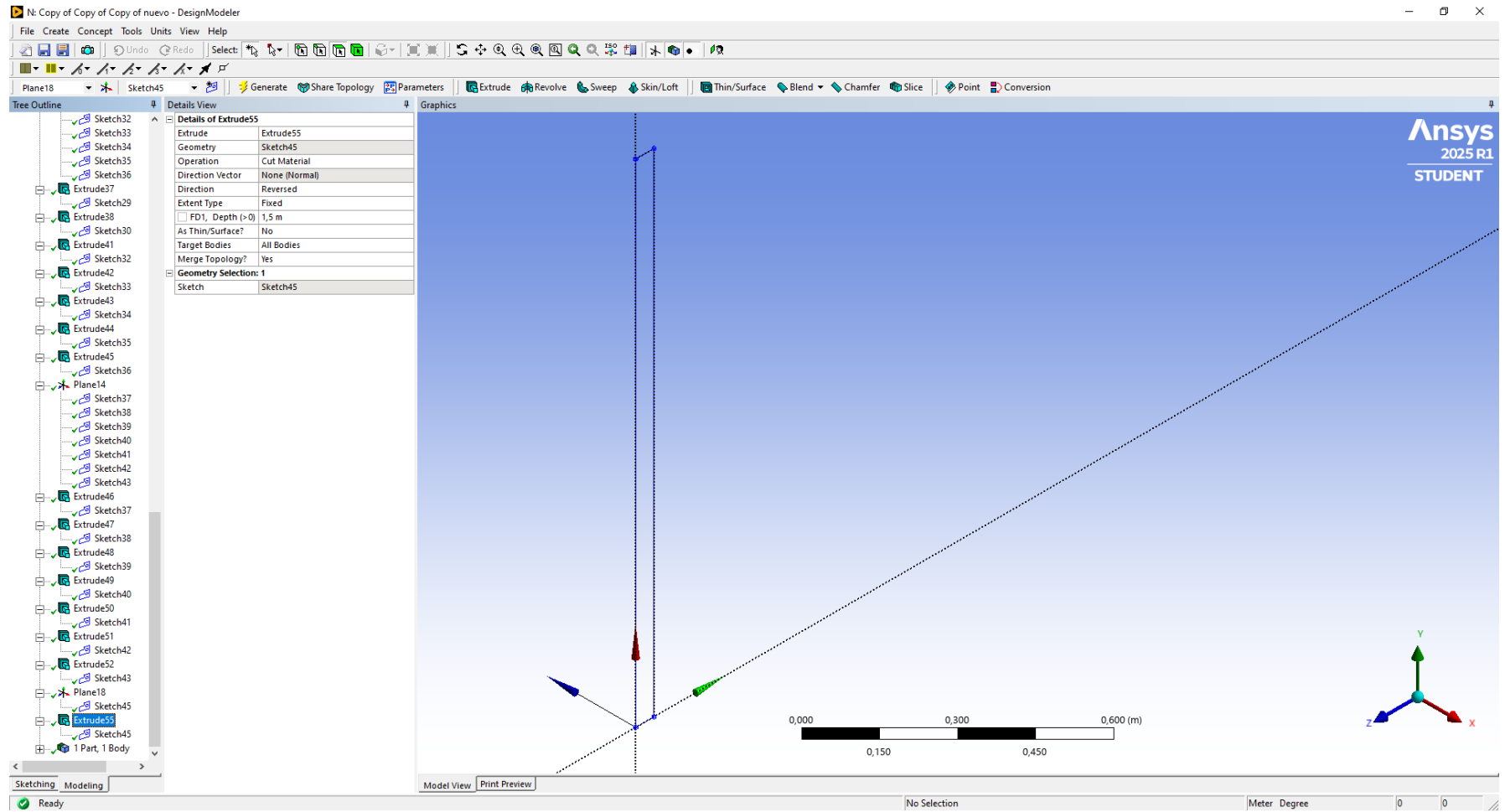
Figura 241

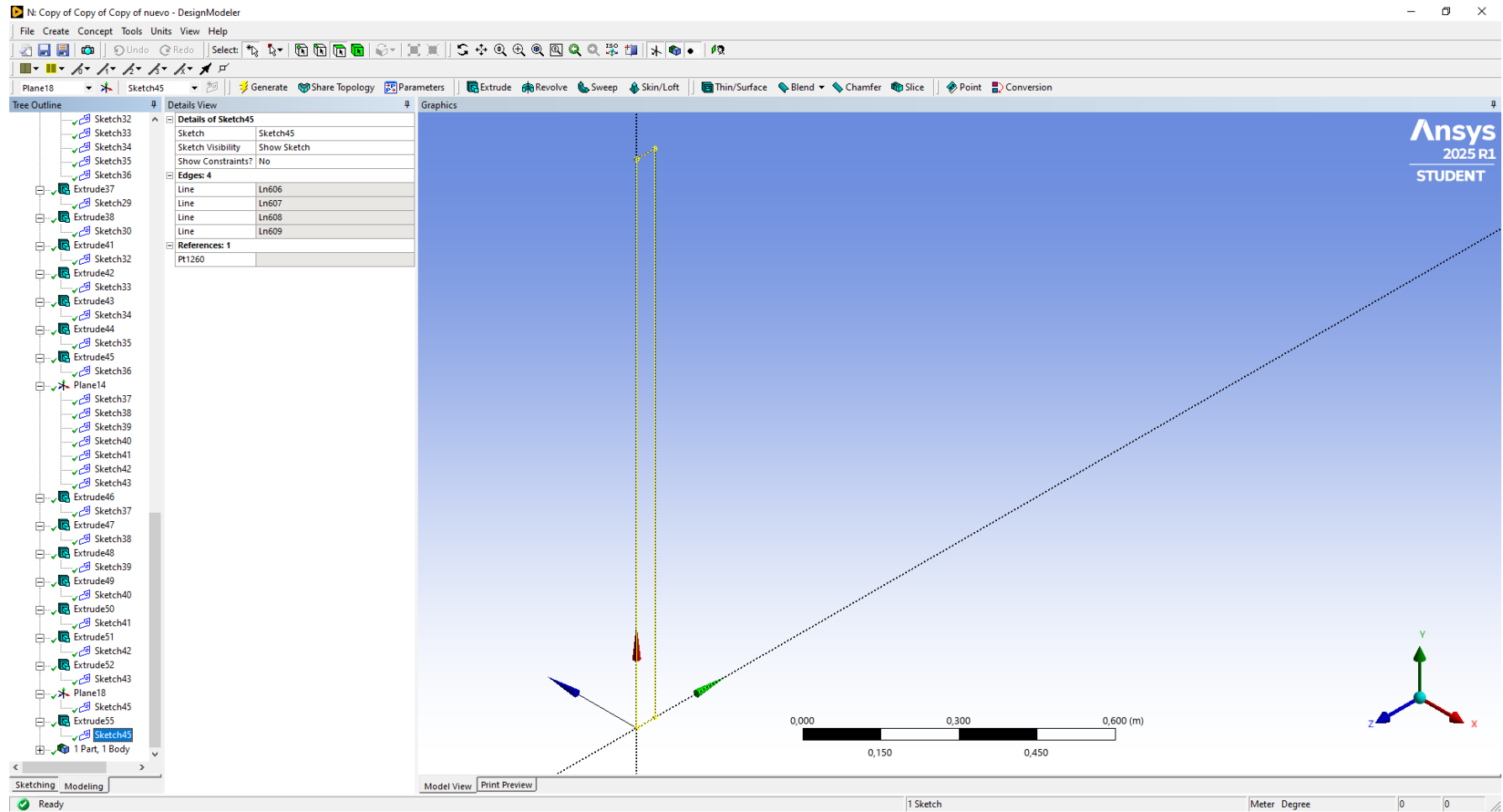
Anexos: Elaboración de la geometría 106



**Figura 242***Anexos: Elaboración de la geometría 107*

**Figura 243***Anexos: Elaboración de la geometría 108*

**Figura 244***Anexos: Elaboración de la geometría 109*

**Figura 245***Anexos: Elaboración de la geometría 110*

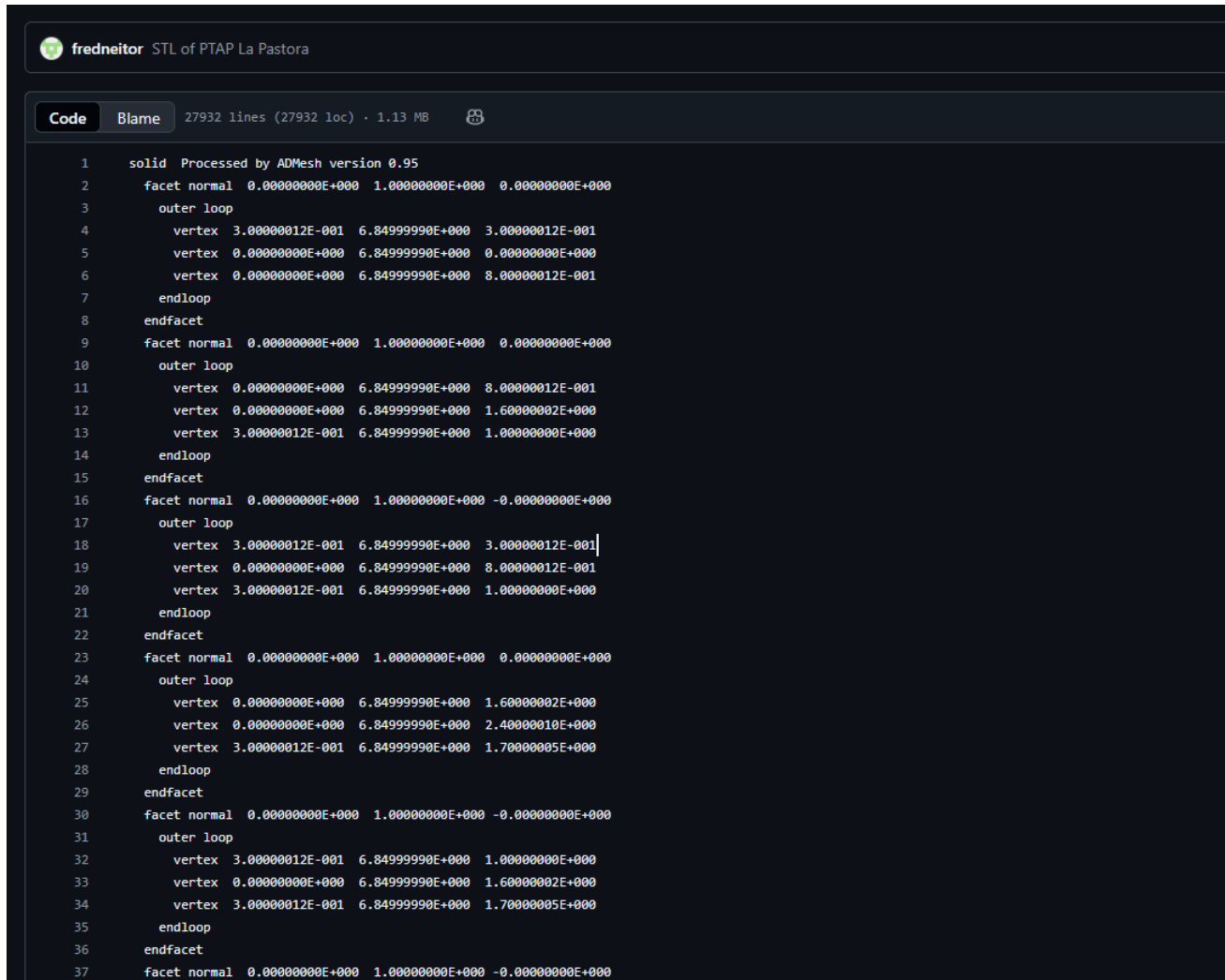
### 8.3. Geometría en formato STL ASCII

En vista que el archivo de geometría es muy pesado (27000 líneas de código ), ha sido subido al repositorio GitHub, mediante el siguiente enlace presentado a continuación:

<https://github.com/fredneitor/Tesis/tree/460a126ead7063c7b6af1d1d195540c411f1a863>

**Figura 246**

*Archivo STL en formato ASCII*



The screenshot displays a GitHub repository page for 'fredneitor STL of PTAP La Pastora'. The 'Code' tab is selected, showing a file with 27932 lines, 27932 loc, and 1.13 MB. The code is an ASCII STL file, starting with 'solid Processed by ADMesh version 0.95'. It contains several facets, each defined by a normal vector and a loop of vertices. The vertices are listed with their coordinates in scientific notation. The code is formatted with line numbers on the left and indentation for the facets and loops.

```

1 solid Processed by ADMesh version 0.95
2 facet normal 0.000000E+000 1.000000E+000 0.000000E+000
3   outer loop
4     vertex 3.0000012E-001 6.8499999E+000 3.0000012E-001
5     vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 0.0000000E+000
6     vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 8.0000012E-001
7   endloop
8 endfacet
9 facet normal 0.000000E+000 1.000000E+000 0.000000E+000
10  outer loop
11    vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 8.0000012E-001
12    vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 1.6000002E+000
13    vertex 3.0000012E-001 6.8499999E+000 1.0000000E+000
14  endloop
15 endfacet
16 facet normal 0.000000E+000 1.000000E+000 -0.000000E+000
17  outer loop
18    vertex 3.0000012E-001 6.8499999E+000 3.0000012E-001
19    vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 8.0000012E-001
20    vertex 3.0000012E-001 6.8499999E+000 1.0000000E+000
21  endloop
22 endfacet
23 facet normal 0.000000E+000 1.000000E+000 0.000000E+000
24  outer loop
25    vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 1.6000002E+000
26    vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 2.4000010E+000
27    vertex 3.0000012E-001 6.8499999E+000 1.7000005E+000
28  endloop
29 endfacet
30 facet normal 0.000000E+000 1.000000E+000 -0.000000E+000
31  outer loop
32    vertex 3.0000012E-001 6.8499999E+000 1.0000000E+000
33    vertex 0.0000000E+000 6.8499999E+000 1.6000002E+000
34    vertex 3.0000012E-001 6.8499999E+000 1.7000005E+000
35  endloop
36 endfacet
37 facet normal 0.000000E+000 1.000000E+000 -0.000000E+000

```

*Nota:* En el enlace puede encontrarse el repositorio, donde también se encontrará el archivo. prepin, que sumado con el archivo STL permite a cualquier lector volver a ejecutar la simulación y modificar o realizar los cambios pertinentes siempre previa comunicación al autor, mediante el correo fredrey21@gmail.com



#### 8.4. Medios de verificación

**Figura 247**

*Visita técnica: Figura 01*



**Figura 248***Visita técnica: Figura 03*



**Figura 249***Visita técnica: Figura 04*

**Figura 250**

*Visita técnica: Figura 05*





**Figura 251**

*Visita técnica: Figura 06*



**viernes, 7 de febrero de 2025**

**12:10:41**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 252***Visita técnica: Figura 07*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**12:00:31**

Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios



**Figura 253***Visita técnica: Figura 08*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**12:10:35**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 254***Visita técnica: Figura 09*

**Figura 255***Visita técnica: Figura 10*



**Figura 256**

*Visita técnica: Figura 11*





**Figura 257***Visita técnica: Figura 12*



**Figura 258***Visita técnica: Figura 13*

viernes, 7 de febrero de 2025

11:59:34

Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios



**Figura 259**

*Visita técnica: Figura 14*





**Figura 260***Visita técnica: Figura 15*



**Figura 261**

*Visita técnica: Figura 16*





**Figura 262***Visita técnica: Figura 17*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**10:26:02**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 263***Visita técnica: Figura 18*



**Figura 264***Visita técnica: Figura 19*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**10:21:40**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 265**

*Visita técnica: Figura 20*





**Figura 266***Visita técnica: Figura 21*



**Figura 267**

*Visita técnica: Figura 22*



**viernes, 7 de febrero de 2025**

**10:21:47**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 268***Visita técnica: Figura 23*



**Figura 269***Visita técnica: Figura 24*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**10:22:48**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 270**

*Visita técnica: Figura 25*



**viernes, 7 de febrero de 2025**

**10:21:54**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 271**

*Visita técnica: Figura 26*





**Figura 272***Visita técnica: Figura 27*



**Figura 273**

*Visita técnica: Figura 28*





**Figura 274**

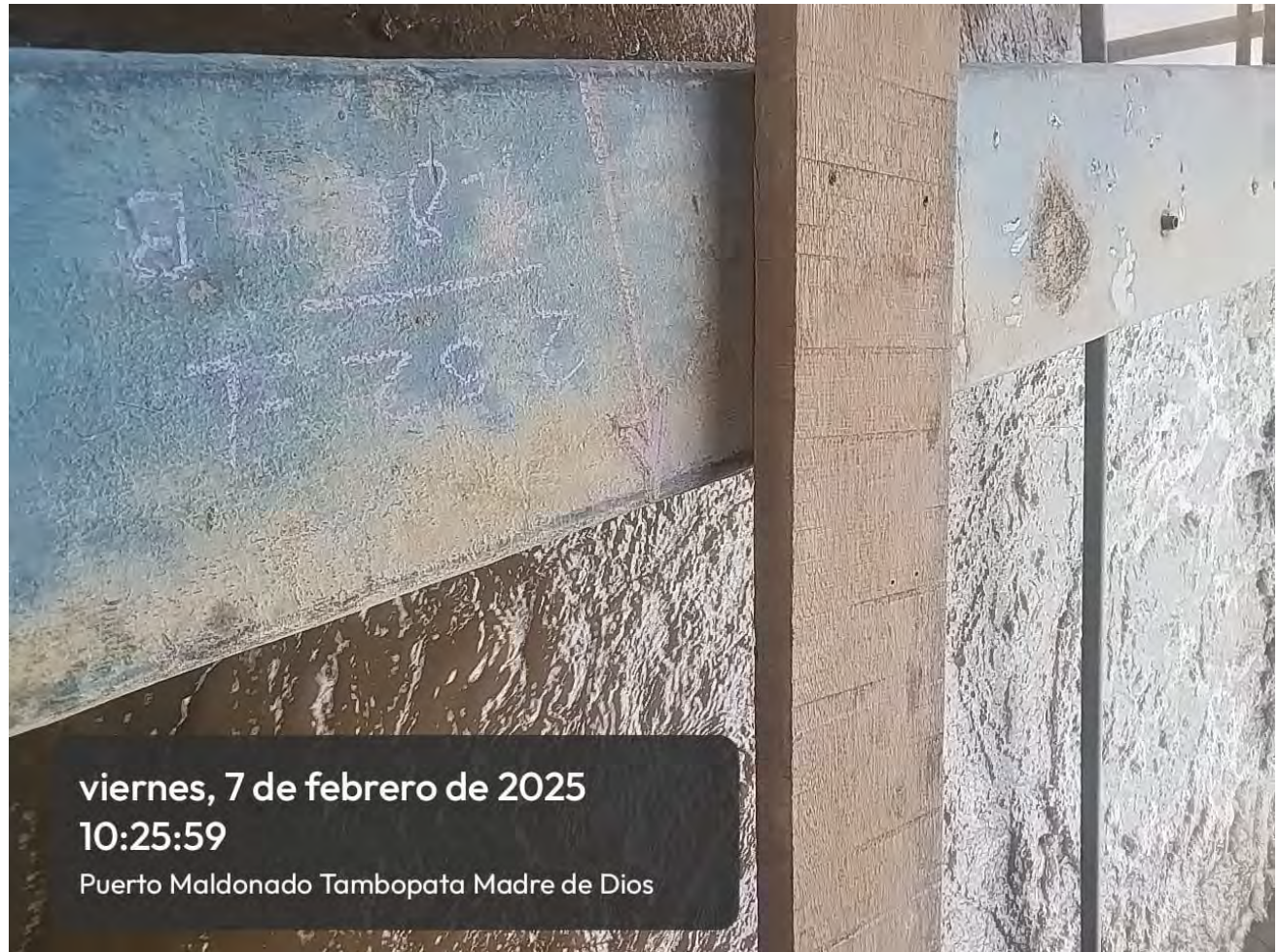
*Visita técnica: Figura 29*





**Figura 275**

*Visita técnica: Figura 30*





**Figura 276***Visita técnica: Figura 31*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**10:26:05**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 277**

*Visita técnica: Figura 32*



viernes, 7 de febrero de 2025

10:22:09

Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios



**Figura 278***Visita técnica: Figura 33*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

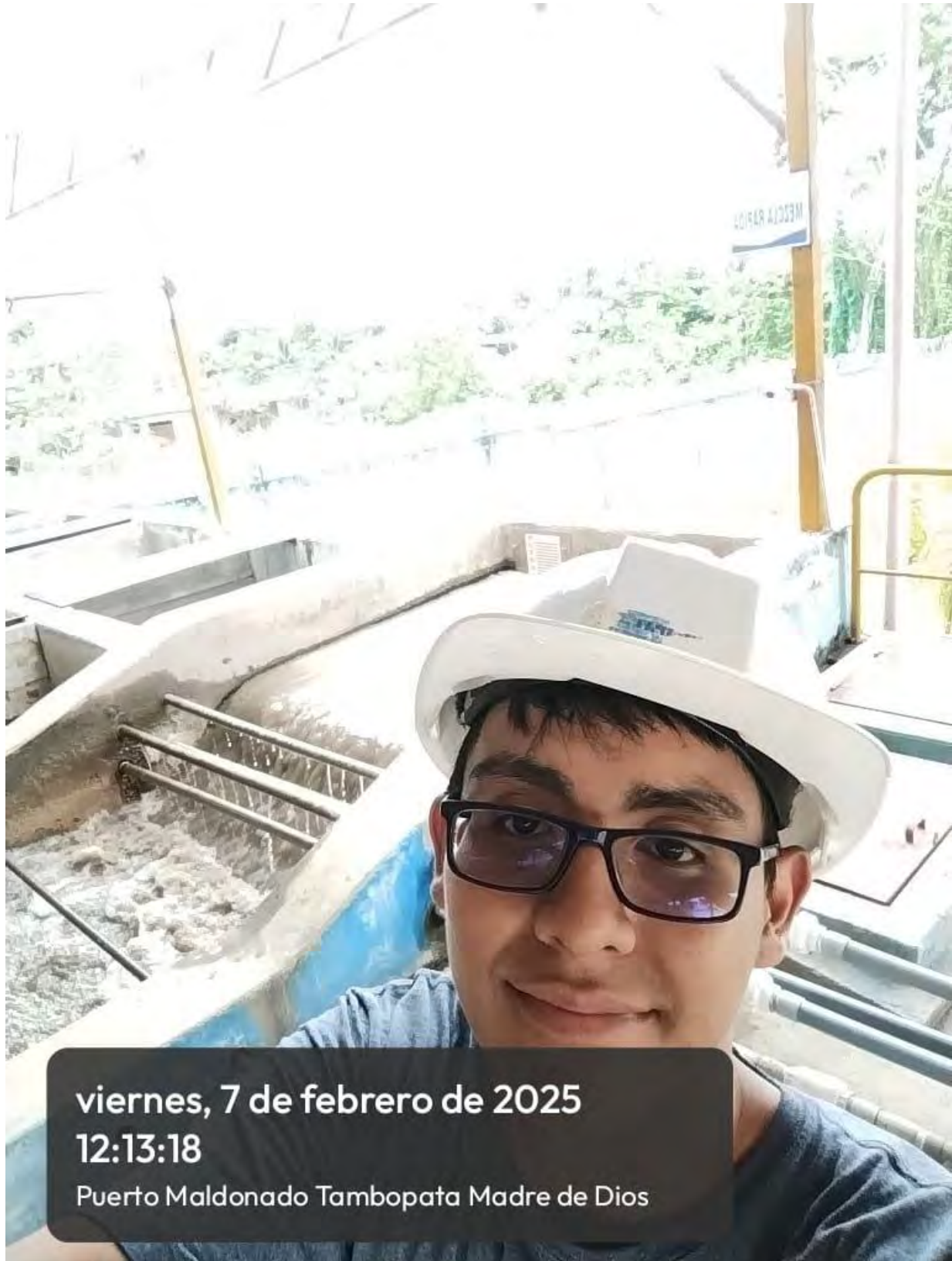
**12:14:07**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 279**

*Visita técnica: Figura 34*





**Figura 280**

*Visita técnica: Figura 35*



**viernes, 7 de febrero de 2025**

**12:14:21**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 281***Visita técnica: Figura 36*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**12:13:07**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 282***Visita técnica: Figura 37*



**Figura 283***Visita técnica: Figura 38*

**viernes, 7 de febrero de 2025**

**12:14:08**

**Puerto Maldonado Tambopata Madre de Dios**



**Figura 284**  
*Visita a EMAPAT*



**8.5. Archivos de la simulación**

**Tabla 32**  
*Archivo .prepin de la simulación numérica*

Archivo .prepin de la simulación numérica
<div><div>-Elaborado por Fred Fernandez para la UNSAAC tesis de grado 25-04-25</div><div>Simulacion CFD+FEA)FSI de la planta de agua potable La Pastora</div><div>-Malla de 4 cm para todo, menos para la parte de mezcla rapida</div><div>2cm</div><div>-Unidades en SI</div><div>-Agua a T - 26C</div><div>-Modelo kw - k omega RANS</div><div>-Gravedad -9.81m/s2</div><div>-Numero de celdas 2336969</div><div>-Tiempo de simlacion 130</div><div>-Flujo incompresible</div><div>&amp;xput</div><div>remark='!! Remarks beginning with "!! " are automatically added and removed</div><div>by FLOW-3D.',</div><div>remark='!! Do not begin any user added remarks with with "!! ". They will</div><div>be removed',</div><div>twfin=140,</div></div>

```

    itb=1,
    ifvisc=1,
    ifvis=5,
    imphtc=0,
    ifdynconv=1,
    gy=-9.81,
    ivort=1,
    idpth=1,
    istnr=1,
    ifmu=1,
    iscpot=1,
    ifsiout=3,
    iexodusout=3,
    fsi_memory=20,
    tedit(1)=0,
    tpltd(1)=20,
    tapltd(1)=1,
/

&limits
/

&props
    units='si',
    tunits='c',
    pcav=0,
    mul=0.001,
    cangle=-90,
    fluid1='Water at 26 C',
    muctst=0.001,
    cvl=4182,
    tll=0.1,
    tsl=0,
    clhtl=3.35e+05,
    cvsl=2100,
    thcs1=2.215,
    rhofs=917,
    tsdrg=1,
    fscr=1,
    fsco=0,
    rhof=996.9,
    sigma=0.073,
    yieldtl=0,
    mus=0,
    thcl=0.597,
    yieldl=-1,
/

&scalar
    ipath=1,
    asqr=0,
    pgasmp=0,
/

```

```
&PCAP
```

```
/
```

```
&BCDATA
```

```
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ibct(1)=2,
  ihtbct(1)=0,
```

```
  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=2,
  ihtbct(2)=0,
```

```
  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=11,
  flrbct(1, 3)=0.28,
  ihtbct(3)=0,
```

```
  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=5,
  fbct(1, 4)=0,
  ihtbct(4)=0,
```

```
  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ibct(5)=2,
  ihtbct(5)=0,
```

```
  remark='!! Boundary condition Z Max',
  ibct(6)=2,
  ihtbct(6)=0,
```

```
/
```

```
&MESH
```

```
  MeshName='01',
  ntotal=1000,
  size=0.1,
```

```
  px(1)=0.35,
  nxcell(1)=19,
  px(2)=2.3,
```

```
  py(1)=0.3,
  nycell(1)=55,
  py(2)=5.79,
  nycell(2)=11,
  py(3)=6.85,
```

```
  pz(1)=0.35,
  nzcell(1)=18,
  pz(2)=2.1,
```

```
/
```

```
&BCDATA
```

```

    remark='!! Boundary condition X Min',
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Max',
    ibct(4)=5,
    fbct(1, 4)=0,
    ihtbct(4)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Min',
    ibct(5)=2,
    ihtbct(5)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Max',
    ibct(6)=2,
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='02',
    ntotal=1000,
    size=0.05,

    px(1)=2.3,
    nxcell(1)=66,
    px(2)=5.6,

    py(1)=5.79,
    nycell(1)=22,
    py(2)=6.85,

    pz(1)=0.35,
    nzcell(1)=36,
    pz(2)=2.1,
/

&BCDATA
    remark='!! Boundary condition X Min',
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

```

```

remark='!! Boundary condition Y Max',
ibct(4)=5,
fbct(1, 4)=0,
ihtbct(4)=0,

remark='!! Boundary condition Z Min',
ibct(5)=2,
ihtbct(5)=0,

remark='!! Boundary condition Z Max',
ibct(6)=2,
ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  MeshName='03',
  ntotal=1000,
  size=0.1,

  px(1)=5.6,
  nxcell(1)=20,
  px(2)=7.63,

  py(1)=5.79,
  nycell(1)=11,
  py(2)=6.85,

  pz(1)=0.35,
  nzcell(1)=18,
  pz(2)=2.1,
/

&BCDATA
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ihtbct(1)=0,

  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=2,
  ihtbct(2)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=2,
  ihtbct(3)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=5,
  fbct(1, 4)=0,
  ihtbct(4)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ihtbct(5)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Max',

```



```

    ibct(6)=2,
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='04',
    ntotal=1000,
    size=0.1,

    px(1)=7.63,
    nxcell(1)=10,
    px(2)=8.67,

    py(1)=5.79,
    nycell(1)=11,
    py(2)=6.85,

    pz(1)=0,
    nzcell(1)=3,
    pz(2)=0.35,
    nzcell(2)=18,
    pz(3)=2.1,
/

&BCDATA
    remark='!! Boundary condition X Min',
    ibct(1)=2,
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ibct(2)=2,
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Max',
    ibct(4)=5,
    fbct(1, 4)=0,
    ihtbct(4)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Min',
    ihtbct(5)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Max',
    ibct(6)=2,
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='05',
    ntotal=1000,

```

```

size=0.1,

px(1)=7.63,
nxcell(1)=20,
px(2)=8.67,

py(1)=1.66,
nycell(1)=44,
py(2)=3.9,
nycell(2)=36,
py(3)=5.79,
nycell(3)=22,
py(4)=6.85,

pz(1)=-7.05,
nzc(1)=140,
pz(2)=0,
/

&BCDATA
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ibct(1)=2,
  ihtbct(1)=0,

  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=2,
  ihtbct(2)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=2,
  ihtbct(3)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=5,
  fbct(1, 4)=0,
  ihtbct(4)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ibct(5)=2,
  ihtbct(5)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Max',
  ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  MeshName='06',
  ntotal=1000,
  size=0.1,

  px(1)=6.2,
  nxcell(1)=22,
  px(2)=7.33,

```

```

    nxcell(2)=5,
    px(3)=7.63,
    nxcell(3)=20,
    px(4)=8.67,

    py(1)=1.66,
    nyccell(1)=44,
    py(2)=3.9,
    nyccell(2)=36,
    py(3)=5.79,
    nyccell(3)=22,
    py(4)=6.85,

    pz(1)=-7.9,
    nzccell(1)=16,
    pz(2)=-7.05,
    if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
    remark='!! Boundary condition X Min',
    ibct(1)=2,
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ibct(2)=2,
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Max',
    ibct(4)=5,
    fbct(1, 4)=0,
    ihtbct(4)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Min',
    ihtbct(5)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Max',
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='07',
    ntotal=1000,
    size=0.1,

    px(1)=6.2,
    nxcell(1)=22,
    px(2)=7.33,

```

```

py(1)=1.66,
nycell(1)=44,
py(2)=3.9,
nycell(2)=36,
py(3)=5.79,
nycell(3)=22,
py(4)=6.85,

pz(1)=-7.05,
nzcell(1)=128,
pz(2)=-0.85,
if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ibct(1)=2,
  ihtbct(1)=0,

  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=2,
  ihtbct(2)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=2,
  ihtbct(3)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=5,
  fbct(1, 4)=0,
  ihtbct(4)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ihtbct(5)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Max',
  ibct(6)=2,
  ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  MeshName='08',
  ntotal=1000,
  size=0.1,

  px(1)=4.56,
  nxcell(1)=26,
  px(2)=5.9,
  nxcell(2)=5,
  px(3)=6.2,
  nxcell(3)=22,
  px(4)=7.33,

```

```

py(1)=1.66,
nycell(1)=44,
py(2)=3.9,
nycell(2)=36,
py(3)=5.79,
nycell(3)=22,
py(4)=6.85,

pz(1)=-0.85,
nzcell(1)=16,
pz(2)=0,
if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ibct(1)=2,
  ihtbct(1)=0,

  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=2,
  ihtbct(2)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=2,
  ihtbct(3)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=5,
  fbct(1, 4)=0,
  ihtbct(4)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ihtbct(5)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Max',
  ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  MeshName='09',
  ntotal=1000,
  size=0.1,

  px(1)=4.56,
  nxcell(1)=26,
  px(2)=5.9,

  py(1)=1.66,
  nycell(1)=44,
  py(2)=3.9,
  nycell(2)=36,
  py(3)=5.79,

```



```

nycell(3)=22,
py(4)=6.85,

pz(1)=-7.05,
nzcell(1)=128,
pz(2)=-0.85,
if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ibct(1)=2,
  ihtbct(1)=0,

  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=2,
  ihtbct(2)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=2,
  ihtbct(3)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=5,
  fbct(1, 4)=0,
  ihtbct(4)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ibct(5)=2,
  ihtbct(5)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Max',
  ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  MeshName='10',
  ntotal=1000,
  size=0.1,

  px(1)=2.61,
  nxcell(1)=32,
  px(2)=4.24,
  nxcell(2)=6,
  px(3)=4.56,
  nxcell(3)=26,
  px(4)=5.9,

  py(1)=1.66,
  nycell(1)=44,
  py(2)=3.9,
  nycell(2)=36,
  py(3)=5.79,

```

```

nycell(3)=22,
py(4)=6.85,

pz(1)=-7.9,
nzcell(1)=16,
pz(2)=-7.05,
if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
  remark='!! Boundary condition X Min',
  ibct(1)=2,
  ihtbct(1)=0,

  remark='!! Boundary condition X Max',
  ibct(2)=2,
  ihtbct(2)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Min',
  ibct(3)=2,
  ihtbct(3)=0,

  remark='!! Boundary condition Y Max',
  ibct(4)=5,
  fbct(1, 4)=0,
  ihtbct(4)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Min',
  ihtbct(5)=0,

  remark='!! Boundary condition Z Max',
  ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  MeshName='11',
  ntotal=1000,
  size=0.1,

  px(1)=2.61,
  nxcell(1)=32,
  px(2)=4.24,

  py(1)=1.66,
  nycell(1)=44,
  py(2)=3.9,
  nycell(2)=36,
  py(3)=5.79,
  nycell(3)=22,
  py(4)=6.85,

  pz(1)=-7.05,
  nzcell(1)=128,

```

```

    pz(2)=-0.85,
    if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
    remark='!! Boundary condition X Min',
    ibct(1)=2,
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ibct(2)=2,
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Max',
    ibct(4)=5,
    fbct(1, 4)=0,
    ihtbct(4)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Min',
    ihtbct(5)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Max',
    ibct(6)=2,
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='12',
    ntotal=1000,
    size=0.1,

    px(1)=0.31,
    nxcell(1)=40,
    px(2)=2.29,
    nxcell(2)=6,
    px(3)=2.61,
    nxcell(3)=32,
    px(4)=4.24,

    py(1)=1.66,
    nycell(1)=44,
    py(2)=3.9,
    nycell(2)=36,
    py(3)=5.79,
    nycell(3)=22,
    py(4)=6.85,

    pz(1)=-0.85,
    nzcell(1)=16,

```

```

    pz(2)=0,
    if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
    remark='!! Boundary condition X Min',
    ibct(1)=2,
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ibct(2)=2,
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Max',
    ibct(4)=5,
    fbct(1, 4)=0,
    ihtbct(4)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Min',
    ihtbct(5)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Max',
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='13',
    ntotal=1000,
    size=0.1,

    px(1)=0.31,
    nxcell(1)=40,
    px(2)=2.29,

    py(1)=1.66,
    nycell(1)=44,
    py(2)=3.9,
    nycell(2)=36,
    py(3)=5.79,
    nycell(3)=22,
    py(4)=6.85,

    pz(1)=-7.9,
    nzcell(1)=140,
    pz(2)=-0.85,
    if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA

```

```

    remark='!! Boundary condition X Min',
    ibct(1)=2,
    ihtbct(1)=0,

    remark='!! Boundary condition X Max',
    ihtbct(2)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Min',
    ibct(3)=2,
    ihtbct(3)=0,

    remark='!! Boundary condition Y Max',
    ibct(4)=5,
    fbct(1, 4)=0,
    ihtbct(4)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Min',
    ibct(5)=2,
    ihtbct(5)=0,

    remark='!! Boundary condition Z Max',
    ihtbct(6)=0,
/

&MESH
    MeshName='l4',
    ntotal=1000,
    size=0.1,

    px(1)=0.31,
    nxcell(1)=20,
    px(2)=2.29,
    nxcell(2)=3,
    px(3)=2.6,

    py(1)=4.01,
    nycell(1)=18,
    py(2)=5.79,
    nycell(2)=11,
    py(3)=6.85,

    pz(1)=-9.2,
    nzcell(1)=10,
    pz(2)=-8.2,
    nzcell(2)=3,
    pz(3)=-7.9,
    if_mesh_enabled=1,
/

&BCDATA
    remark='!! Boundary condition X Min',
    ihtbct(1)=0,

```



```

remark='!! Boundary condition X Max',
ibct(2)=8,
ihtbct(2)=0,

remark='!! Boundary condition Y Min',
ibct(3)=2,
ihtbct(3)=0,

remark='!! Boundary condition Y Max',
ibct(4)=5,
fbct(1, 4)=0,
ihtbct(4)=0,

remark='!! Boundary condition Z Min',
ibct(5)=2,
ihtbct(5)=0,

remark='!! Boundary condition Z Max',
ibct(6)=2,
ihtbct(6)=0,
/

&MESH
  MeshName='15',
  ntotal=1000,
  size=0.1,

  px(1)=2.6,
  nxcell(1)=56,
  px(2)=8.3,

  py(1)=4.01,
  nycell(1)=18,
  py(2)=5.79,
  nycell(2)=11,
  py(3)=6.85,

  pz(1)=-9.2,
  nzcell(1)=10,
  pz(2)=-8.2,
  if_mesh_enabled=1,
/

&obs
  nob=1,

  remark='!! Component 1',
  obsid(1)='geometria',

  remark='!! Subcomponent 1',
  iob(1)=1,
  subcmpid(1)='FR-floculadores',
  igen(1)=3,

```

```

fstl(1)='final_c.stl',

remark='!! Component 1 properties',
ilthobs(1)=0,
ifsi(1)=1,
iffem(1)=1,
ffem(1)='comp1.09.FEmesh',
thexobs(1)=1e-05,
rhobs(1)=2400,
shrmod(1)=9.28e+09,
elastmod(1)=2.134e+10,
poissonr(1)=0.15,

remark='!! Component common parameters',
avrck=-3.1,
/

&fl
  nfls=3,

  remark='!! FluidRegion 1',
  fxl(1)=0.3,
  fxh(1)=2.3,
  fyh(1)=6,
  fzl(1)=0.3,
  fzh(1)=2.1,

  remark='!! FluidRegion 2',
  fxl(2)=0.3,
  fyl(2)=1.6,
  fyh(2)=5.78,
  fzl(2)=-7.9,
  fzh(2)=0,

  remark='!! FluidRegion 3',
  fxl(3)=4,
  fxh(3)=8.6,
  fyl(3)=5.7,
  fyh(3)=6.1,
  fzl(3)=0.3,

  remark='!! Region Pointer common parameters',
  iflinittyp=0,
/

&bf
/

&motn
/

&grafic
  anmtyp(1)='dpth',

```

```

anmtyp(2)='f',
anmtyp(3)='fsi',
anmtyp(4)='p',
anmtyp(5)='path',
anmtyp(6)='scrpot',
anmtyp(7)='stnr',
anmtyp(8)='turb',
anmtyp(9)='vel',
anmtyp(10)='vort',
/

&RENDERSPACE
    iff3d(1)=1,
/

&HEADER
    project='09',
    version='double',
    nprocs=0,
/

&parts
/
    Documentation: general comments, background, expectations, etc.

#start tables:
#end start tables

```

*Nota:* En la siguiente tabla se puede tener la configuración del archivo prepin, el cual puede ser copiada por el lector para poder replicar la simulación, el archivo STL puede ser recreado siguiendo los paso de elaboración de la geometría en los anexos o copiado directamente con su código brindado en los anexos, también se encuentra en el siguiente repositorio <https://github.com/fredneitor/Tesis/tree/460a126ead7063c7b6af1d1d195540c411f1a863>



1.43632E-01	9	1.04E-02	1.04E-02/cx	48	9.85E-01	0	1.95E-02	2.4460E+02	+2.23E-03	0.72	00:03:32	95	11:23:38	1:18:20:35
2.98621E-01	29	5.36E-03	5.36E-03/cx	74	9.91E-01	0	1.02E-02	2.4464E+02	+4.07E-03	0.72	00:06:13	96	11:26:19	1:17:15:25
8.66064E-01	178	3.41E-03	3.41E-03/cz	1	1.67E-01	0	7.50E-03	2.4480E+02	+6.20E-03	0.72	00:16:13	100	11:36:19	1:16:58:06
1.47743E+00	331	2.56E-03	2.56E-03/cy	1	5.98E-01	1	8.11E-03	2.4498E+02	+1.34E-02	0.72	00:26:21	99	11:46:27	1:15:45:06
1.85889E+00	485	5.38E-03	5.38E-03/cy	4	8.51E-01	0	8.09E-03	2.4509E+02	+2.00E-02	0.72	00:36:22	98	11:56:28	1:19:53:46
2.27894E+00	641	1.47E-03	3.03E-03/cy	2	9.30E-01	1	8.06E-03	2.4521E+02	+2.65E-02	0.72	00:46:29	99	12:06:35	1:21:53:12
2.75599E+00	791	4.13E-03	4.33E-03/cz	2	9.60E-01	1	8.00E-03	2.4534E+02	+3.13E-02	0.72	00:56:30	99	12:16:36	1:22:07:49
3.28784E+00	937	5.46E-03	5.76E-03/cy	3	5.73E-01	0	7.96E-03	2.4549E+02	+3.53E-02	0.72	01:06:33	100	12:26:39	1:21:28:56
3.93969E+00	1082	4.20E-03	4.20E-03/cz	2	8.17E-01	0	7.65E-03	2.4568E+02	+3.60E-02	0.72	01:16:35	98	12:36:41	1:19:33:02
4.60414E+00	1227	3.84E-03	4.79E-03/cz	2	7.21E-01	0	7.50E-03	2.4586E+02	+3.60E-02	0.72	01:26:36	98	12:46:42	1:17:59:37
5.37872E+00	1370	5.06E-03	5.73E-03/cx	2	2.16E-01	0	7.31E-03	2.4608E+02	+4.74E-02	0.72	01:36:36	99	12:56:42	1:15:54:56
6.02727E+00	1509	2.79E-03	2.79E-03/cy	1	3.04E-01	0	7.13E-03	2.4625E+02	+6.78E-02	0.72	01:46:38	61	13:06:44	1:15:09:56
6.19569E+00	1631	7.74E-04	7.74E-04/cy	1	4.61E-02	1	6.98E-03	2.4629E+02	+7.52E-02	0.72	01:56:49	79	13:16:55	1:17:43:02
6.27381E+00	1761	5.33E-04	5.33E-04/cy	1	2.19E-02	1	6.89E-03	2.4631E+02	+7.90E-02	0.72	02:06:56	80	13:27:02	1:20:46:03
6.34218E+00	1891	5.31E-04	5.31E-04/cy	1	4.71E-02	1	6.60E-03	2.4633E+02	+8.25E-02	0.72	02:17:01	74	13:37:07	1:23:48:04
6.41182E+00	2021	5.42E-04	5.42E-04/cy	1	2.09E-02	1	6.47E-03	2.4634E+02	+8.68E-02	0.72	02:27:06	79	13:47:12	2:02:45:33
6.44736E+00	2085	5.69E-04	5.69E-04/cy	1	2.64E-02	0	6.27E-03	2.4635E+02	+8.90E-02	0.72	02:32:15	80	13:52:21	2:04:14:41
6.48000E+00	2141	5.96E-04	5.96E-04/cy	1	3.07E-02	1	6.27E-03	2.4636E+02	+9.10E-02	0.72	02:36:58	68	13:57:04	2:05:35:23
6.49812E+00	2171	6.11E-04	6.11E-04/cy	1	8.52E-03	1	6.17E-03	2.4636E+02	+9.22E-02	0.72	02:39:28	71	13:59:34	2:06:17:18
6.52930E+00	2221	6.36E-04	6.36E-04/cy	1	2.16E-02	1	6.12E-03	2.4637E+02	+9.42E-02	0.72	02:43:31	77	14:03:37	2:07:23:56
6.62700E+00	2348	1.32E-03	1.32E-03/cy	1	3.23E-01	0	5.80E-03	2.4639E+02	+1.00E-01	0.72	02:53:32	81	14:13:38	2:09:53:59
6.77590E+00	2417	2.93E-03	2.93E-03/cy	1	3.63E-01	0	5.78E-03	2.4643E+02	+1.04E-01	0.72	02:58:59	79	14:19:05	2:10:21:07
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
7.26322E+00	2550	3.00E-03	3.00E-03/cy	1	5.15E-01	0	5.54E-03	2.4657E+02	+1.11E-01	0.73	03:08:60	92	14:29:06	2:09:17:08
7.69612E+00	2688	4.91E-03	4.91E-03/cz	2	9.12E-01	0	5.27E-03	2.4669E+02	+1.15E-01	0.73	03:19:01	95	14:39:07	2:08:45:30
8.19540E+00	2833	3.01E-03	3.01E-03/cy	1	4.73E-01	0	5.13E-03	2.4684E+02	+1.19E-01	0.73	03:29:04	96	14:49:10	2:07:47:36
8.78615E+00	2971	4.28E-03	4.68E-03/cx	2	6.89E-01	1	4.91E-03	2.4701E+02	+1.22E-01	0.73	03:39:10	93	14:59:16	2:06:19:22
9.48688E+00	3113	4.92E-03	4.92E-03/cx	2	2.21E-01	0	4.79E-03	2.4720E+02	+1.27E-01	0.73	03:49:13	94	15:09:19	2:04:20:46
9.64627E+00	3151	4.85E-03	4.89E-03/cx	3	1.19E-01	1	4.69E-03	2.4725E+02	+1.28E-01	0.73	03:52:03	91	15:12:09	2:04:03:25
1.01880E+01	3285	4.89E-03	4.89E-03/cx	1	6.45E-01	0	4.53E-03	2.4740E+02	+1.31E-01	0.73	04:01:49	96	15:21:55	2:03:09:29
1.07039E+01	3403	4.90E-03	4.90E-03/cx	1	4.45E-01	0	4.40E-03	2.4754E+02	+1.36E-01	0.73	04:10:22	90	15:30:28	2:02:13:05
1.08883E+01	3448	3.29E-03	4.91E-03/cx	1	5.04E-01	0	4.38E-03	2.4759E+02	+1.38E-01	0.73	04:13:31	93	15:33:37	2:01:55:13
1.12809E+01	3541	4.88E-03	4.88E-03/cx	1	6.84E-01	1	4.36E-03	2.4770E+02	+1.41E-01	0.73	04:20:09	92	15:40:15	2:01:17:56
1.19292E+01	3689	4.88E-03	4.88E-03/cx	2	5.64E-01	0	4.15E-03	2.4788E+02	+1.49E-01	0.73	04:30:10	87	15:50:16	2:00:10:39
1.25509E+01	3837	2.97E-03	2.97E-03/cx	1	3.29E-01	0	4.07E-03	2.4805E+02	+1.53E-01	0.73	04:40:12	94	16:00:18	1:23:15:55
1.29091E+01	3986	2.60E-03	2.60E-03/cy	1	7.03E-01	0	3.86E-03	2.4815E+02	+1.54E-01	0.73	04:50:14	84	16:10:20	1:23:28:15



1.35520E+01	4130	4.94E-03	4.94E-03/cx	2	6.52E-01	0	3.72E-03	2.4833E+02	+1.57E-01	0.73	05:00:17	99	16:20:23	1:22:33:13
1.42140E+01	4271	4.98E-03	4.98E-03/cx	2	1.69E-01	1	3.58E-03	2.4852E+02	+1.59E-01	0.73	05:10:23	94	16:30:29	1:21:38:36
1.49149E+01	4417	5.24E-03	5.24E-03/cx	2	1.67E-01	0	3.50E-03	2.4871E+02	+1.62E-01	0.73	05:20:25	95	16:40:31	1:20:39:31
1.51008E+01	4453	5.23E-03	5.23E-03/cx	2	1.81E-01	0	3.47E-03	2.4877E+02	+1.63E-01	0.73	05:23:04	88	16:43:10	1:20:24:33
1.58054E+01	4595	5.18E-03	5.18E-03/cx	2	2.73E-01	0	3.33E-03	2.4896E+02	+1.65E-01	0.73	05:33:07	95	16:53:13	1:19:30:21
1.65146E+01	4731	5.22E-03	5.22E-03/cx	2	8.61E-02	1	3.16E-03	2.4916E+02	+1.70E-01	0.73	05:43:08	97	17:03:14	1:18:38:49
1.71982E+01	4871	5.22E-03	5.22E-03/cx	2	1.56E-01	1	3.05E-03	2.4935E+02	+1.74E-01	0.73	05:53:13	95	17:13:19	1:17:55:34
1.77401E+01	4977	5.23E-03	5.23E-03/cx	2	2.87E-01	0	3.03E-03	2.4950E+02	+1.78E-01	0.73	06:01:02	90	17:21:08	1:17:21:46
1.83798E+01	5109	5.25E-03	5.25E-03/cx	2	5.74E-01	0	2.88E-03	2.4968E+02	+1.84E-01	0.73	06:11:04	97	17:31:10	1:16:49:18
1.91155E+01	5251	5.21E-03	5.21E-03/cx	2	2.02E-01	1	2.79E-03	2.4988E+02	+1.92E-01	0.74	06:21:14	91	17:41:20	1:16:05:03
<hr/>														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
<hr/>														
1.98588E+01	5393	5.23E-03	5.23E-03/cx	2	1.25E-01	0	2.74E-03	2.5008E+02	+2.01E-01	0.74	06:31:15	94	17:51:21	1:15:21:28
***														
restart and spatial data available at t= 1.99985E+01														
***														
1.99985E+01	5420	5.26E-03	5.26E-03/cx	2	4.79E-01	0	2.72E-03	2.5012E+02	+2.03E-01	0.74	06:33:07	97	17:53:13	1:15:13:23
2.05174E+01	5525	5.26E-03	5.26E-03/cx	2	1.34E-01	0	2.60E-03	2.5026E+02	+2.09E-01	0.74	06:41:19	97	18:01:25	1:14:51:42
2.12603E+01	5668	5.27E-03	5.27E-03/cx	1	3.92E-01	0	2.52E-03	2.5046E+02	+2.19E-01	0.74	06:51:19	98	18:11:25	1:14:12:06
2.20156E+01	5813	5.27E-03	5.27E-03/cx	2	9.89E-02	0	2.48E-03	2.5066E+02	+2.29E-01	0.74	07:01:19	94	18:21:25	1:13:32:60
2.23733E+01	5881	5.27E-03	5.27E-03/cx	2	1.67E-01	1	2.45E-03	2.5076E+02	+2.34E-01	0.74	07:06:15	96	18:26:21	1:13:16:07
2.28800E+01	5979	5.29E-03	5.29E-03/cx	1	9.06E-01	0	2.39E-03	2.5089E+02	+2.39E-01	0.74	07:13:17	95	18:33:23	1:12:53:11
2.30231E+01	6006	5.30E-03	5.30E-03/cx	2	2.16E-01	0	2.33E-03	2.5093E+02	+2.40E-01	0.74	07:15:15	99	18:35:21	1:12:46:47
2.34178E+01	6082	5.38E-03	5.38E-03/cx	2	1.31E-01	0	2.29E-03	2.5104E+02	+2.43E-01	0.74	07:20:24	96	18:40:30	1:12:27:52
2.41987E+01	6231	5.42E-03	5.42E-03/cx	1	5.64E-01	1	2.22E-03	2.5125E+02	+2.46E-01	0.74	07:30:25	99	18:50:31	1:11:51:02
2.50000E+01	6384	5.34E-03	5.34E-03/cx	2	8.57E-02	0	2.14E-03	2.5147E+02	+2.48E-01	0.74	07:40:27	97	19:00:33	1:11:13:51
2.58202E+01	6538	5.30E-03	5.30E-03/cx	2	6.37E-02	0	2.11E-03	2.5169E+02	+2.52E-01	0.74	07:50:28	99	19:10:34	1:10:36:24
2.63192E+01	6631	5.45E-03	5.45E-03/cx	1	7.39E-01	1	2.03E-03	2.5183E+02	+2.54E-01	0.74	07:56:43	99	19:16:49	1:10:15:06
2.71057E+01	6780	5.32E-03	5.32E-03/cx	2	8.87E-02	0	2.00E-03	2.5205E+02	+2.56E-01	0.74	08:06:44	94	19:26:50	1:09:43:26
2.78652E+01	6929	5.68E-03	5.68E-03/cx	2	2.23E-01	0	1.89E-03	2.5226E+02	+2.58E-01	0.74	08:16:45	100	19:36:51	1:09:15:20
2.87372E+01	7083	5.63E-03	5.63E-03/cx	1	4.29E-01	0	1.83E-03	2.5249E+02	+2.62E-01	0.74	08:26:48	96	19:46:54	1:08:38:37
2.95944E+01	7237	5.83E-03	5.83E-03/cx	1	4.24E-01	0	1.80E-03	2.5273E+02	+2.65E-01	0.74	08:36:48	96	19:56:54	1:08:04:34
3.04521E+01	7386	5.86E-03	5.86E-03/cx	1	5.68E-01	0	1.73E-03	2.5296E+02	+2.70E-01	0.74	08:46:49	98	20:06:56	1:07:31:53
3.12740E+01	7536	5.72E-03	5.72E-03/cx	1	5.61E-01	0	1.73E-03	2.5319E+02	+2.72E-01	0.74	08:56:52	97	20:16:58	1:07:03:16
3.20811E+01	7682	5.37E-03	5.67E-03/cx	1	8.68E-01	0	1.73E-03	2.5341E+02	+2.74E-01	0.75	09:06:52	100	20:26:58	1:06:36:34
3.29041E+01	7832	5.86E-03	5.86E-03/cz	2	1.14E-01	0	1.73E-03	2.5364E+02	+2.75E-01	0.75	09:16:55	99	20:37:01	1:06:09:39
3.37836E+01	7986	5.89E-03	5.89E-03/cx	1	4.37E-01	0	1.74E-03	2.5388E+02	+2.78E-01	0.75	09:26:56	98	20:47:02	1:05:39:34

3.40468E+01	8033	4.10E-03	5.48E-03/cx	2	1.62E-01	0	1.73E-03	2.5395E+02	+2.80E-01	0.75	09:30:06	96	20:50:12	1:05:31:17
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
3.47704E+01	8168	5.85E-03	5.85E-03/cx	1	3.93E-01	0	1.74E-03	2.5415E+02	+2.82E-01	0.75	09:40:07	94	21:00:13	1:05:12:54
3.55474E+01	8308	5.12E-03	5.12E-03/cy	1	7.21E-01	0	1.74E-03	2.5437E+02	+2.84E-01	0.75	09:50:09	93	21:10:15	1:04:51:23
3.60021E+01	8458	1.83E-03	1.83E-03/cy	1	4.04E-02	0	1.74E-03	2.5449E+02	+2.86E-01	0.75	10:00:17	78	21:20:23	1:04:51:22
3.62365E+01	8609	1.48E-03	1.48E-03/cy	1	2.11E-02	0	1.74E-03	2.5456E+02	+2.87E-01	0.75	10:10:17	92	21:30:23	1:05:04:56
3.62484E+01	8617	1.48E-03	1.48E-03/cy	1	3.05E-02	0	1.74E-03	2.5456E+02	+2.87E-01	0.75	10:10:51	93	21:30:57	1:05:05:47
3.64853E+01	8761	2.26E-03	2.26E-03/vs	1	1.72E-01	1	1.74E-03	2.5463E+02	+2.88E-01	0.75	10:21:02	80	21:41:08	1:05:19:23
3.69248E+01	8901	2.99E-03	2.99E-03/cy	1	1.82E-02	1	1.74E-03	2.5475E+02	+2.89E-01	0.75	10:31:03	79	21:51:09	1:05:19:00
3.72118E+01	9001	2.76E-03	2.76E-03/cy	1	3.38E-02	1	1.74E-03	2.5483E+02	+2.90E-01	0.75	10:38:14	85	21:58:20	1:05:20:26
3.75799E+01	9146	2.22E-03	2.22E-03/cy	1	3.10E-02	0	1.74E-03	2.5493E+02	+2.91E-01	0.75	10:48:15	82	22:08:21	1:05:24:15
3.77927E+01	9253	1.80E-03	1.80E-03/cy	1	8.88E-02	0	1.74E-03	2.5499E+02	+2.92E-01	0.75	10:55:47	92	22:15:53	1:05:31:01
3.80372E+01	9401	2.04E-03	2.55E-03/vs	2	1.02E-01	1	1.74E-03	2.5506E+02	+2.93E-01	0.75	11:05:51	94	22:25:57	1:05:42:26
3.87456E+01	9547	6.36E-03	6.36E-03/cy	1	7.60E-01	0	1.74E-03	2.5525E+02	+2.95E-01	0.75	11:15:54	95	22:36:00	1:05:23:56
3.94911E+01	9687	5.63E-03	6.60E-03/cx	2	8.11E-01	0	1.74E-03	2.5546E+02	+2.97E-01	0.75	11:25:55	87	22:46:01	1:05:03:24
***														
restart and spatial data available at t= 3.99983E+01														
***														
3.99983E+01	9781	5.29E-03	6.55E-03/cx	2	2.47E-01	1	1.74E-03	2.5560E+02	+2.98E-01	0.75	11:32:45	95	22:52:51	1:04:49:41
4.01843E+01	9818	3.93E-03	4.78E-03/cx	1	8.72E-01	0	1.74E-03	2.5565E+02	+2.98E-01	0.75	11:35:56	96	22:56:02	1:04:46:22
4.08056E+01	9960	5.94E-03	6.56E-03/cx	3	1.43E-01	0	1.74E-03	2.5583E+02	+3.00E-01	0.75	11:45:57	98	23:06:03	1:04:33:52
4.10322E+01	10023	5.31E-03	6.59E-03/cx	2	7.36E-02	0	1.74E-03	2.5589E+02	+3.00E-01	0.75	11:50:21	99	23:10:27	1:04:31:08
4.16995E+01	10175	3.18E-03	3.78E-03/cy	1	8.75E-01	0	1.73E-03	2.5607E+02	+3.02E-01	0.75	12:00:22	100	23:20:28	1:04:15:59
4.18424E+01	10215	3.45E-03	3.45E-03/cy	1	1.09E-01	0	1.73E-03	2.5611E+02	+3.02E-01	0.75	12:02:53	94	23:22:59	1:04:13:39
4.21174E+01	10303	2.84E-03	2.84E-03/cy	1	1.42E-01	0	1.74E-03	2.5618E+02	+3.03E-01	0.75	12:09:03	95	23:29:09	1:04:12:13
4.21231E+01	10305	2.84E-03	2.84E-03/cy	1	4.23E-01	0	1.74E-03	2.5618E+02	+3.03E-01	0.75	12:09:09	98	23:29:15	1:04:12:08
4.22513E+01	10351	2.79E-03	2.79E-03/cy	1	2.48E-01	1	1.74E-03	2.5621E+02	+3.03E-01	0.75	12:12:10	95	23:32:16	1:04:11:45
4.26662E+01	10510	2.52E-03	2.52E-03/cy	1	8.20E-02	0	1.73E-03	2.5632E+02	+3.04E-01	0.75	12:22:13	99	23:42:19	1:04:11:06
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
4.30497E+01	10668	2.35E-03	2.35E-03/cy	1	2.09E-01	0	1.73E-03	2.5641E+02	+3.05E-01	0.75	12:32:16	100	23:52:22	1:04:12:04
4.34138E+01	10826	2.27E-03	2.27E-03/cy	1	8.52E-02	0	1.73E-03	2.5650E+02	+3.05E-01	0.75	12:42:16	97	00:02:22	1:04:13:50
4.37670E+01	10985	2.09E-03	2.09E-03/cy	1	9.27E-02	0	1.73E-03	2.5659E+02	+3.06E-01	0.75	12:52:18	100	00:12:24	1:04:16:05
4.40661E+01	11142	1.39E-03	1.39E-03/vs	1	1.44E-02	0	1.73E-03	2.5666E+02	+3.07E-01	0.75	13:02:18	99	00:22:24	1:04:21:07

4.43774E+01	11301	3.23E-03	3.23E-03/vs	1	6.57E-02	1	1.72E-03	2.5673E+02	+3.07E-01	0.76	13:12:23	99	00:32:29	1:04:25:26
4.49927E+01	11452	3.63E-03	3.63E-03/cy	1	9.22E-01	0	1.72E-03	2.5688E+02	+3.08E-01	0.76	13:22:26	100	00:42:32	1:04:12:30
4.54791E+01	11611	3.51E-03	3.51E-03/cy	1	1.16E-01	1	1.72E-03	2.5699E+02	+3.09E-01	0.76	13:32:35	98	00:52:41	1:04:06:54
4.60749E+01	11768	3.84E-03	3.84E-03/cy	1	2.90E-01	0	1.72E-03	2.5712E+02	+3.11E-01	0.76	13:42:38	99	01:02:44	1:03:55:05
4.66909E+01	11925	3.74E-03	3.74E-03/cy	1	3.85E-01	0	1.72E-03	2.5723E+02	+3.12E-01	0.76	13:52:38	95	01:12:44	1:03:42:09
4.72906E+01	12081	3.79E-03	3.79E-03/cy	1	1.18E-01	1	1.71E-03	2.5736E+02	+3.14E-01	0.76	14:02:39	98	01:22:45	1:03:30:08
4.78965E+01	12241	3.82E-03	3.82E-03/cy	1	3.63E-01	1	1.71E-03	2.5749E+02	+3.15E-01	0.76	14:12:48	98	01:32:55	1:03:18:09
4.84789E+01	12398	3.31E-03	3.31E-03/cy	1	1.70E-01	0	1.71E-03	2.5760E+02	+3.17E-01	0.76	14:22:49	100	01:42:55	1:03:07:08
4.90523E+01	12554	3.86E-03	3.86E-03/cy	1	6.14E-01	0	1.71E-03	2.5773E+02	+3.18E-01	0.76	14:32:52	99	01:52:58	1:02:56:40
4.96070E+01	12712	3.89E-03	3.89E-03/cy	1	1.26E-01	0	1.70E-03	2.5785E+02	+3.19E-01	0.76	14:42:53	100	02:02:59	1:02:47:06
5.01735E+01	12868	2.73E-03	2.73E-03/cy	1	7.68E-02	0	1.70E-03	2.5799E+02	+3.20E-01	0.76	14:52:54	96	02:13:00	1:02:36:56
5.05254E+01	13026	1.95E-03	1.95E-03/cy	1	4.16E-02	0	1.70E-03	2.5807E+02	+3.21E-01	0.76	15:02:56	96	02:23:02	1:02:37:22
5.08448E+01	13184	2.35E-03	2.35E-03/cy	1	2.64E-01	0	1.70E-03	2.5814E+02	+3.22E-01	0.76	15:12:59	99	02:33:05	1:02:39:17
5.12376E+01	13341	2.54E-03	2.54E-03/cy	1	6.03E-02	1	1.69E-03	2.5822E+02	+3.23E-01	0.76	15:23:08	99	02:43:14	1:02:37:37
5.16876E+01	13500	3.79E-03	3.79E-03/cy	1	1.51E-01	0	1.69E-03	2.5831E+02	+3.24E-01	0.76	15:33:10	97	02:53:16	1:02:32:50
5.21914E+01	13656	2.42E-03	2.42E-03/cy	1	5.57E-02	0	1.69E-03	2.5843E+02	+3.25E-01	0.76	15:43:12	98	03:03:18	1:02:25:19
5.25031E+01	13814	1.57E-03	1.57E-03/cy	1	1.13E-01	0	1.69E-03	2.5850E+02	+3.26E-01	0.76	15:53:13	97	03:13:19	1:02:27:00
5.27665E+01	13972	2.07E-03	2.07E-03/cy	1	4.19E-02	0	1.68E-03	2.5855E+02	+3.26E-01	0.76	16:03:14	99	03:23:20	1:02:30:54
5.31037E+01	14131	1.84E-03	1.84E-03/cy	1	7.52E-02	1	1.68E-03	2.5862E+02	+3.27E-01	0.76	16:13:24	99	03:33:30	1:02:31:20
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
5.33633E+01	14291	1.47E-03	1.47E-03/cy	1	9.17E-02	1	1.68E-03	2.5867E+02	+3.28E-01	0.76	16:23:33	99	03:43:39	1:02:35:20
5.35671E+01	14451	1.17E-03	1.17E-03/cy	1	2.60E-02	1	1.68E-03	2.5872E+02	+3.28E-01	0.76	16:33:40	99	03:53:46	1:02:41:50
5.37786E+01	14611	1.60E-03	1.60E-03/cy	1	7.85E-02	1	1.67E-03	2.5877E+02	+3.28E-01	0.76	16:43:47	99	04:03:53	1:02:47:51
5.40595E+01	14770	1.60E-03	1.60E-03/cy	1	9.66E-02	0	1.67E-03	2.5883E+02	+3.29E-01	0.76	16:53:49	99	04:13:55	1:02:50:14
5.42928E+01	14928	1.43E-03	1.43E-03/cy	1	1.46E-02	0	1.67E-03	2.5889E+02	+3.29E-01	0.76	17:03:49	99	04:23:55	1:02:54:46
5.45447E+01	15086	1.78E-03	1.78E-03/cy	1	3.97E-02	0	1.67E-03	2.5894E+02	+3.29E-01	0.76	17:13:51	97	04:33:57	1:02:58:17
5.48195E+01	15244	1.63E-03	1.63E-03/cy	1	6.30E-02	0	1.66E-03	2.5900E+02	+3.30E-01	0.76	17:23:53	99	04:43:59	1:03:00:36
5.50524E+01	15401	1.38E-03	1.38E-03/cy	1	2.23E-02	1	1.66E-03	2.5905E+02	+3.31E-01	0.76	17:33:55	98	04:54:01	1:03:04:49
5.52820E+01	15561	1.68E-03	1.68E-03/cy	1	1.19E-02	1	1.66E-03	2.5910E+02	+3.31E-01	0.76	17:44:02	98	05:04:08	1:03:09:11
5.55700E+01	15721	1.72E-03	1.72E-03/cy	1	8.64E-02	1	1.65E-03	2.5916E+02	+3.31E-01	0.76	17:54:09	99	05:14:15	1:03:10:37
5.58155E+01	15881	1.39E-03	1.39E-03/cy	1	2.04E-02	1	1.65E-03	2.5921E+02	+3.32E-01	0.76	18:04:18	99	05:24:24	1:03:14:01
5.60239E+01	16039	1.35E-03	1.35E-03/cy	1	2.47E-02	0	1.65E-03	2.5925E+02	+3.32E-01	0.76	18:14:19	98	05:34:25	1:03:18:56
5.62935E+01	16197	1.75E-03	1.75E-03/cy	1	6.38E-02	0	1.64E-03	2.5930E+02	+3.33E-01	0.76	18:24:21	99	05:44:27	1:03:20:45
5.65444E+01	16355	1.43E-03	1.43E-03/cy	1	9.58E-02	0	1.64E-03	2.5936E+02	+3.33E-01	0.76	18:34:21	100	05:54:27	1:03:23:20
5.67437E+01	16513	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	2.11E-02	0	1.64E-03	2.5940E+02	+3.33E-01	0.76	18:44:23	98	06:04:29	1:03:28:23
5.69179E+01	16671	1.12E-03	1.12E-03/cy	1	8.74E-02	1	1.63E-03	2.5943E+02	+3.34E-01	0.76	18:54:24	98	06:14:30	1:03:34:31

5.71494E+01	16829	1.68E-03	1.68E-03/cy	1	1.90E-02	0	1.63E-03	2.5948E+02	+3.34E-01	0.76	19:04:25	99	06:24:31	1:03:37:44
5.73978E+01	16987	1.41E-03	1.41E-03/cy	1	2.91E-02	0	1.63E-03	2.5954E+02	+3.34E-01	0.76	19:14:26	100	06:34:32	1:03:40:03
5.76039E+01	17144	1.28E-03	1.28E-03/cy	1	7.54E-02	0	1.62E-03	2.5959E+02	+3.35E-01	0.76	19:24:27	98	06:44:33	1:03:44:18
5.78332E+01	17302	1.73E-03	1.73E-03/cy	1	5.03E-02	0	1.62E-03	2.5964E+02	+3.35E-01	0.76	19:34:27	99	06:54:33	1:03:47:18
5.81023E+01	17460	1.56E-03	1.56E-03/cy	1	8.38E-02	0	1.62E-03	2.5969E+02	+3.36E-01	0.76	19:44:27	98	07:04:33	1:03:48:14
5.83267E+01	17618	1.31E-03	1.31E-03/cy	1	6.48E-02	0	1.61E-03	2.5973E+02	+3.37E-01	0.76	19:54:29	96	07:14:35	1:03:51:19
5.85240E+01	17776	1.32E-03	1.32E-03/cy	1	1.69E-02	0	1.61E-03	2.5978E+02	+3.36E-01	0.76	20:04:29	96	07:24:35	1:03:55:34
<hr/>														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
<hr/>														
5.87715E+01	17934	1.65E-03	1.65E-03/cy	1	6.46E-02	0	1.61E-03	2.5983E+02	+3.37E-01	0.76	20:14:31	95	07:34:37	1:03:57:19
5.90055E+01	18091	1.36E-03	1.36E-03/cy	1	2.95E-02	1	1.60E-03	2.5989E+02	+3.37E-01	0.76	20:24:34	98	07:44:40	1:03:59:40
5.92109E+01	18251	1.24E-03	1.24E-03/cy	1	2.25E-02	1	1.60E-03	2.5994E+02	+3.38E-01	0.76	20:34:41	99	07:54:47	1:04:03:23
5.94262E+01	18411	1.65E-03	1.65E-03/cy	1	8.71E-02	1	1.60E-03	2.6000E+02	+3.38E-01	0.76	20:44:48	99	08:04:54	1:04:06:32
5.96824E+01	18569	1.58E-03	1.58E-03/cy	1	2.31E-02	0	1.59E-03	2.6006E+02	+3.38E-01	0.76	20:54:48	98	08:14:54	1:04:07:25
5.99044E+01	18726	1.29E-03	1.29E-03/cy	1	1.07E-02	0	1.59E-03	2.6012E+02	+3.39E-01	0.77	21:04:49	99	08:24:55	1:04:09:54
***														
restart and spatial data available at t= 5.99995E+01														
***														
5.99995E+01	18802	1.22E-03	1.22E-03/cy	1	1.68E-02	0	1.59E-03	2.6015E+02	+3.39E-01	0.77	21:09:41	97	08:29:47	1:04:11:42
6.00872E+01	18875	1.19E-03	1.19E-03/cy	1	6.79E-03	0	1.59E-03	2.6017E+02	+3.39E-01	0.77	21:14:51	95	08:34:57	1:04:14:15
6.03192E+01	19032	1.72E-03	1.72E-03/cy	1	4.05E-02	0	1.58E-03	2.6023E+02	+3.39E-01	0.77	21:24:51	99	08:44:57	1:04:16:03
6.05705E+01	19191	1.42E-03	1.42E-03/cy	1	1.48E-02	1	1.58E-03	2.6030E+02	+3.40E-01	0.77	21:34:55	98	08:55:01	1:04:16:54
6.07792E+01	19351	1.23E-03	1.23E-03/cy	1	4.81E-02	1	1.57E-03	2.6035E+02	+3.40E-01	0.77	21:45:03	98	09:05:09	1:04:19:50
6.09760E+01	19511	1.31E-03	1.31E-03/cy	1	5.14E-02	1	1.57E-03	2.6038E+02	+3.41E-01	0.77	21:55:11	99	09:15:17	1:04:23:16
6.12267E+01	19669	1.72E-03	1.72E-03/cy	1	8.59E-02	0	1.57E-03	2.6042E+02	+3.41E-01	0.77	22:05:11	96	09:25:17	1:04:23:47
6.14679E+01	19827	1.36E-03	1.36E-03/cy	1	4.48E-02	0	1.56E-03	2.6045E+02	+3.42E-01	0.77	22:15:13	97	09:35:19	1:04:24:43
6.16661E+01	19984	1.19E-03	1.19E-03/cy	1	6.49E-01	0	1.56E-03	2.6048E+02	+3.42E-01	0.77	22:25:13	96	09:45:19	1:04:27:39
6.18674E+01	20142	1.62E-03	1.62E-03/cy	1	3.18E-02	0	1.56E-03	2.6051E+02	+3.42E-01	0.77	22:35:14	99	09:55:20	1:04:30:22
6.20671E+01	20261	1.63E-03	1.63E-03/cy	1	8.35E-02	1	1.56E-03	2.6054E+02	+3.42E-01	0.77	22:43:13	90	10:03:19	1:04:30:32
6.22808E+01	20407	1.33E-03	1.33E-03/cy	1	6.75E-02	0	1.55E-03	2.6057E+02	+3.43E-01	0.77	22:53:16	89	10:13:22	1:04:32:32
6.23459E+01	20457	1.27E-03	1.27E-03/cy	1	1.56E-02	0	1.55E-03	2.6058E+02	+3.43E-01	0.77	22:56:48	86	10:16:54	1:04:33:42
6.23986E+01	20499	1.24E-03	1.24E-03/cy	1	3.65E-02	0	1.55E-03	2.6059E+02	+3.43E-01	0.77	22:59:38	92	10:19:44	1:04:34:37
6.25735E+01	20647	1.25E-03	1.25E-03/cy	1	4.40E-02	0	1.55E-03	2.6063E+02	+3.43E-01	0.77	23:09:39	93	10:29:45	1:04:38:23
6.27777E+01	20791	1.67E-03	1.67E-03/cy	1	7.39E-02	1	1.54E-03	2.6067E+02	+3.44E-01	0.77	23:19:42	85	10:39:48	1:04:40:38
6.30127E+01	20932	1.55E-03	1.55E-03/cy	1	3.07E-02	0	1.54E-03	2.6072E+02	+3.44E-01	0.77	23:29:43	85	10:49:49	1:04:41:14
<hr/>														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			

sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
6.32069E+01	21074	1.20E-03	1.20E-03/cy	1	2.23E-01	0	1.54E-03	2.6075E+02	+3.44E-01	0.77	23:39:44	79	10:59:50	1:04:43:47
6.33634E+01	21216	1.05E-03	1.05E-03/cy	1	7.73E-03	0	1.54E-03	2.6077E+02	+3.45E-01	0.77	23:49:44	90	11:09:50	1:04:48:07
6.34185E+01	21271	1.07E-03	1.07E-03/cy	1	9.56E-02	1	1.53E-03	2.6078E+02	+3.45E-01	0.77	23:53:37	87	11:13:43	1:04:50:04
6.35933E+01	21415	1.46E-03	1.46E-03/cy	1	4.45E-02	0	1.53E-03	2.6079E+02	+3.45E-01	0.77	1:00:03:41	89	11:23:47	1:04:53:28
6.38076E+01	21551	1.53E-03	1.53E-03/cy	1	2.44E-02	1	1.53E-03	2.6082E+02	+3.45E-01	0.77	1:00:13:44	75	11:33:50	1:04:54:48
6.40064E+01	21694	1.28E-03	1.28E-03/cy	1	4.86E-02	0	1.53E-03	2.6085E+02	+3.46E-01	0.77	1:00:23:47	92	11:43:53	1:04:56:49
6.41861E+01	21841	1.18E-03	1.18E-03/cy	1	1.62E-02	1	1.52E-03	2.6088E+02	+3.46E-01	0.77	1:00:33:57	85	11:54:03	1:04:59:53
6.43608E+01	21987	1.26E-03	1.26E-03/cy	1	1.62E-02	0	1.52E-03	2.6092E+02	+3.46E-01	0.77	1:00:43:59	92	12:04:05	1:05:02:57
6.45601E+01	22126	1.67E-03	1.67E-03/cy	1	5.95E-02	0	1.51E-03	2.6096E+02	+3.47E-01	0.77	1:00:54:02	87	12:14:08	1:05:04:44
6.47719E+01	22263	8.95E-04	1.41E-03/cy	1	5.75E-01	0	1.51E-03	2.6100E+02	+3.47E-01	0.77	1:01:04:02	87	12:24:08	1:05:05:46
6.49498E+01	22405	1.14E-03	1.14E-03/cy	1	2.33E-02	0	1.51E-03	2.6104E+02	+3.47E-01	0.77	1:01:14:05	78	12:34:11	1:05:08:28
6.51049E+01	22545	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	1.03E-02	0	1.51E-03	2.6107E+02	+3.48E-01	0.77	1:01:23:49	93	12:43:55	1:05:11:54
6.52894E+01	22687	1.60E-03	1.60E-03/cy	1	2.25E-02	0	1.50E-03	2.6111E+02	+3.48E-01	0.77	1:01:33:53	91	12:53:59	1:05:14:10
6.55125E+01	22828	1.45E-03	1.45E-03/cy	1	3.71E-01	0	1.50E-03	2.6116E+02	+3.48E-01	0.77	1:01:43:53	98	13:03:59	1:05:14:21
6.57189E+01	22984	1.22E-03	1.22E-03/cy	1	2.08E-02	0	1.50E-03	2.6121E+02	+3.49E-01	0.77	1:01:53:56	99	13:14:02	1:05:15:21
6.59025E+01	23141	1.14E-03	1.14E-03/cy	1	1.58E-02	1	1.50E-03	2.6126E+02	+3.49E-01	0.77	1:02:04:00	97	13:24:06	1:05:17:28
6.60961E+01	23298	1.46E-03	1.46E-03/cy	1	5.48E-02	0	1.49E-03	2.6130E+02	+3.50E-01	0.77	1:02:14:01	98	13:34:07	1:05:18:56
6.63498E+01	23454	1.53E-03	1.53E-03/cy	1	2.22E-02	0	1.49E-03	2.6136E+02	+3.50E-01	0.77	1:02:24:02	97	13:44:08	1:05:17:18
6.65633E+01	23611	1.24E-03	1.24E-03/cy	1	2.81E-02	1	1.48E-03	2.6140E+02	+3.50E-01	0.77	1:02:34:07	97	13:54:13	1:05:17:42
6.67482E+01	23770	1.12E-03	1.12E-03/cy	1	3.79E-03	0	1.48E-03	2.6142E+02	+3.51E-01	0.77	1:02:44:08	99	14:04:14	1:05:19:26
6.69379E+01	23926	1.55E-03	1.55E-03/cy	1	1.20E-01	0	1.48E-03	2.6145E+02	+3.51E-01	0.77	1:02:54:09	99	14:14:15	1:05:20:50
6.71761E+01	24081	1.47E-03	1.47E-03/cy	1	6.37E-02	1	1.48E-03	2.6148E+02	+3.52E-01	0.77	1:03:04:14	98	14:24:20	1:05:19:48
6.73802E+01	24240	1.14E-03	1.14E-03/cy	1	1.47E-02	0	1.47E-03	2.6151E+02	+3.52E-01	0.77	1:03:14:17	97	14:34:23	1:05:20:22
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1		performance				
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
6.75426E+01	24396	9.63E-04	9.63E-04/cy	1	9.71E-03	0	1.47E-03	2.6154E+02	+3.52E-01	0.77	1:03:24:18	98	14:44:24	1:05:22:58
6.77084E+01	24552	1.27E-03	1.27E-03/cy	1	1.44E-02	0	1.47E-03	2.6156E+02	+3.52E-01	0.77	1:03:34:20	98	14:54:26	1:05:25:20
6.78866E+01	24688	1.39E-03	1.39E-03/cy	1	1.31E-02	0	1.46E-03	2.6159E+02	+3.53E-01	0.77	1:03:44:23	72	15:04:29	1:05:27:02
6.80461E+01	24807	1.29E-03	1.29E-03/cy	1	1.48E-01	0	1.46E-03	2.6160E+02	+3.53E-01	0.77	1:03:54:24	77	15:14:30	1:05:29:36
6.81973E+01	24929	1.19E-03	1.19E-03/cy	1	5.59E-03	0	1.45E-03	2.6162E+02	+3.53E-01	0.77	1:04:04:26	76	15:24:32	1:05:32:30
6.82399E+01	24965	1.17E-03	1.17E-03/cy	1	2.35E-03	0	1.45E-03	2.6162E+02	+3.53E-01	0.77	1:04:07:47	78	15:27:53	1:05:33:53
6.83745E+01	25081	1.16E-03	1.16E-03/cy	1	9.47E-03	1	1.45E-03	2.6164E+02	+3.53E-01	0.77	1:04:17:56	72	15:38:02	1:05:37:42
6.85139E+01	25198	1.24E-03	1.24E-03/cy	1	3.27E-02	0	1.45E-03	2.6167E+02	+3.54E-01	0.77	1:04:27:56	70	15:48:02	1:05:41:04
6.86770E+01	25321	1.39E-03	1.39E-03/cy	1	3.51E-02	1	1.45E-03	2.6170E+02	+3.54E-01	0.77	1:04:38:00	79	15:58:06	1:05:43:14
6.88458E+01	25445	1.31E-03	1.31E-03/cy	1	5.86E-03	0	1.45E-03	2.6173E+02	+3.54E-01	0.77	1:04:48:01	78	16:08:07	1:05:45:01



6.90008E+01	25571	1.15E-03	1.15E-03/cy	1	1.49E-02	1	1.45E-03	2.6177E+02	+3.54E-01	0.77	1:04:58:15	72	16:18:21	1:05:47:38
6.91448E+01	25703	1.08E-03	1.08E-03/cy	1	1.19E-02	0	1.45E-03	2.6180E+02	+3.55E-01	0.77	1:05:08:16	90	16:28:22	1:05:50:35
6.92978E+01	25846	1.08E-03	1.08E-03/cy	1	8.80E-02	0	1.45E-03	2.6184E+02	+3.55E-01	0.77	1:05:18:19	91	16:38:25	1:05:53:00
6.94604E+01	25996	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	2.26E-02	0	1.45E-03	2.6188E+02	+3.55E-01	0.77	1:05:28:21	95	16:48:27	1:05:54:54
6.96288E+01	26149	1.11E-03	1.11E-03/cy	1	2.73E-02	0	1.45E-03	2.6192E+02	+3.56E-01	0.77	1:05:38:24	93	16:58:30	1:05:56:26
6.97869E+01	26295	1.07E-03	1.07E-03/cy	1	7.58E-03	0	1.45E-03	2.6196E+02	+3.56E-01	0.77	1:05:48:26	89	17:08:32	1:05:58:26
6.99421E+01	26441	1.15E-03	1.15E-03/cy	1	9.73E-02	1	1.45E-03	2.6199E+02	+3.56E-01	0.77	1:05:58:34	82	17:18:40	1:06:00:37
7.01169E+01	26586	1.21E-03	1.21E-03/cy	1	5.18E-03	0	1.45E-03	2.6203E+02	+3.57E-01	0.77	1:06:08:35	91	17:28:41	1:06:01:38
7.02960E+01	26732	1.18E-03	1.18E-03/cy	1	4.19E-02	0	1.45E-03	2.6205E+02	+3.57E-01	0.77	1:06:18:38	91	17:38:44	1:06:02:24
7.04580E+01	26876	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	2.74E-02	0	1.45E-03	2.6207E+02	+3.57E-01	0.77	1:06:28:38	83	17:48:44	1:06:03:57
7.06067E+01	27011	1.11E-03	1.11E-03/cy	1	3.62E-02	1	1.45E-03	2.6209E+02	+3.58E-01	0.77	1:06:38:46	79	17:58:52	1:06:06:16
7.07589E+01	27147	1.13E-03	1.13E-03/cy	1	2.51E-02	0	1.45E-03	2.6211E+02	+3.58E-01	0.77	1:06:48:49	86	18:08:55	1:06:08:16
7.09047E+01	27276	1.13E-03	1.13E-03/cy	1	5.18E-02	0	1.45E-03	2.6214E+02	+3.58E-01	0.77	1:06:58:52	87	18:18:58	1:06:10:32
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
7.10187E+01	27377	1.13E-03	1.13E-03/cy	1	5.39E-02	0	1.45E-03	2.6216E+02	+3.58E-01	0.77	1:07:08:55	47	18:29:01	1:06:14:24
7.11062E+01	27455	1.12E-03	1.12E-03/cy	1	4.37E-03	0	1.45E-03	2.6218E+02	+3.58E-01	0.77	1:07:18:58	29	18:39:04	1:06:19:37
7.12022E+01	27541	1.11E-03	1.11E-03/cy	1	2.07E-02	1	1.45E-03	2.6220E+02	+3.59E-01	0.77	1:07:29:07	53	18:49:13	1:06:24:26
7.13067E+01	27635	1.11E-03	1.11E-03/cy	1	2.71E-02	0	1.45E-03	2.6222E+02	+3.59E-01	0.77	1:07:39:10	48	18:59:16	1:06:28:41
7.14256E+01	27745	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	9.44E-03	0	1.45E-03	2.6224E+02	+3.59E-01	0.77	1:07:49:12	78	19:09:18	1:06:32:07
7.15659E+01	27873	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	3.13E-03	0	1.45E-03	2.6225E+02	+3.59E-01	0.77	1:07:59:13	81	19:19:19	1:06:34:21
7.17103E+01	28004	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	2.50E-02	0	1.45E-03	2.6225E+02	+3.60E-01	0.77	1:08:09:16	83	19:29:22	1:06:36:22
7.18544E+01	28135	1.10E-03	1.10E-03/cy	1	2.52E-02	0	1.45E-03	2.6224E+02	+3.60E-01	0.77	1:08:19:19	82	19:39:25	1:06:38:21
7.19991E+01	28266	1.11E-03	1.11E-03/cy	1	2.14E-02	0	1.45E-03	2.6224E+02	+3.60E-01	0.77	1:08:29:23	82	19:49:29	1:06:40:16
7.21438E+01	28396	1.12E-03	1.12E-03/cy	1	7.58E-03	0	1.45E-03	2.6225E+02	+3.61E-01	0.77	1:08:39:26	83	19:59:32	1:06:42:07
7.22903E+01	28527	1.12E-03	1.12E-03/cy	1	3.58E-02	0	1.45E-03	2.6225E+02	+3.61E-01	0.77	1:08:49:28	82	20:09:34	1:06:43:49
7.24356E+01	28658	1.11E-03	1.11E-03/cy	1	5.99E-02	0	1.45E-03	2.6226E+02	+3.61E-01	0.77	1:08:59:29	75	20:19:35	1:06:45:30
7.25807E+01	28790	1.09E-03	1.09E-03/cy	1	6.92E-02	0	1.44E-03	2.6226E+02	+3.61E-01	0.77	1:09:09:32	81	20:29:38	1:06:47:12
7.27187E+01	28921	1.08E-03	1.08E-03/cy	1	8.79E-03	1	1.45E-03	2.6227E+02	+3.61E-01	0.77	1:09:19:38	81	20:39:44	1:06:49:16
7.28601E+01	29053	1.06E-03	1.06E-03/cy	1	5.14E-02	0	1.45E-03	2.6229E+02	+3.61E-01	0.77	1:09:29:40	80	20:49:46	1:06:51:03
7.30008E+01	29185	1.07E-03	1.07E-03/cy	1	2.72E-02	0	1.44E-03	2.6230E+02	+3.61E-01	0.77	1:09:39:48	70	20:59:54	1:06:52:55
7.31482E+01	29317	1.14E-03	1.14E-03/cy	1	1.51E-02	0	1.45E-03	2.6232E+02	+3.62E-01	0.77	1:09:49:50	83	21:09:56	1:06:54:17
7.32959E+01	29449	1.21E-03	1.21E-03/cy	1	2.87E-02	0	1.44E-03	2.6233E+02	+3.62E-01	0.77	1:09:59:51	82	21:19:57	1:06:55:34
7.36089E+01	29579	3.95E-03	3.95E-03/cy	1	3.60E-01	0	1.44E-03	2.6236E+02	+3.62E-01	0.77	1:10:09:53	84	21:29:59	1:06:48:03
7.41104E+01	29707	3.68E-03	3.68E-03/cy	1	2.66E-01	0	1.44E-03	2.6247E+02	+3.63E-01	0.77	1:10:19:53	81	21:39:59	1:06:30:34
7.44762E+01	29803	2.81E-03	2.81E-03/cx	2	2.66E-01	0	1.44E-03	2.6256E+02	+3.63E-01	0.77	1:10:27:41	78	21:47:47	1:06:18:20
7.49570E+01	29928	3.87E-03	3.87E-03/cy	1	2.60E-01	0	1.44E-03	2.6263E+02	+3.65E-01	0.77	1:10:37:45	79	21:57:51	1:06:02:08

7.54301E+01	30051	3.87E-03	3.87E-03/cy	1	4.21E-01	1	1.44E-03	2.6269E+02	+3.65E-01	0.77	1:10:47:50	84	22:07:56	1:05:46:27
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
7.59569E+01	30186	3.95E-03	3.95E-03/cy	1	1.84E-01	0	1.44E-03	2.6269E+02	+3.66E-01	0.77	1:10:57:52	72	22:17:58	1:05:28:02
7.64550E+01	30317	3.50E-03	3.50E-03/cy	2	1.56E-01	0	1.44E-03	2.6269E+02	+3.67E-01	0.77	1:11:07:55	89	22:28:01	1:05:11:13
7.70059E+01	30459	3.92E-03	3.92E-03/cy	1	2.01E-01	0	1.44E-03	2.6271E+02	+3.67E-01	0.77	1:11:17:58	87	22:38:04	1:04:51:50
7.75346E+01	30601	3.87E-03	3.87E-03/cy	1	5.44E-01	1	1.44E-03	2.6276E+02	+3.68E-01	0.77	1:11:27:58	84	22:48:04	1:04:33:39
7.80789E+01	30741	3.88E-03	3.88E-03/cy	1	1.20E-01	1	1.44E-03	2.6282E+02	+3.69E-01	0.77	1:11:37:53	96	22:57:59	1:04:14:44
7.86585E+01	30897	3.90E-03	3.90E-03/cy	2	2.60E-02	0	1.44E-03	2.6289E+02	+3.70E-01	0.77	1:11:47:56	96	23:08:02	1:03:54:21
7.92468E+01	31052	3.85E-03	3.85E-03/cy	1	2.81E-01	0	1.44E-03	2.6297E+02	+3.71E-01	0.77	1:11:57:57	96	23:18:03	1:03:33:39
7.98593E+01	31211	3.85E-03	3.85E-03/cy	1	1.70E-01	1	1.44E-03	2.6307E+02	+3.72E-01	0.77	1:12:08:04	98	23:28:10	1:03:12:02
***														
restart and spatial data available at t= 8.00015E+01														
***														
8.00015E+01	31248	3.87E-03	3.87E-03/cy	1	5.58E-02	0	1.44E-03	2.6309E+02	+3.72E-01	0.77	1:12:10:20	100	23:30:26	1:03:06:59
8.04360E+01	31361	3.86E-03	3.86E-03/cy	1	8.12E-02	1	1.44E-03	2.6316E+02	+3.73E-01	0.77	1:12:18:10	99	23:38:16	1:02:52:17
8.10274E+01	31518	3.75E-03	3.87E-03/cy	2	1.77E-01	0	1.44E-03	2.6323E+02	+3.74E-01	0.77	1:12:28:10	99	23:48:16	1:02:31:55
8.16344E+01	31676	3.87E-03	3.87E-03/cy	1	9.71E-02	0	1.44E-03	2.6330E+02	+3.75E-01	0.77	1:12:38:12	100	23:58:18	1:02:10:58
8.22190E+01	31832	3.89E-03	3.89E-03/cy	1	3.49E-01	0	1.44E-03	2.6338E+02	+3.76E-01	0.77	1:12:48:14	99	00:08:20	1:01:51:14
8.28109E+01	31991	3.82E-03	3.82E-03/cy	1	2.00E-01	1	1.44E-03	2.6345E+02	+3.77E-01	0.77	1:12:58:22	99	00:18:29	1:01:31:22
8.34066E+01	32147	3.82E-03	3.82E-03/cy	1	3.97E-01	0	1.44E-03	2.6352E+02	+3.77E-01	0.78	1:13:08:23	96	00:28:29	1:01:11:23
8.39717E+01	32303	3.08E-03	3.08E-03/cx	1	3.75E-01	0	1.44E-03	2.6359E+02	+3.78E-01	0.78	1:13:18:23	98	00:38:29	1:00:52:54
8.44376E+01	32461	3.90E-03	3.90E-03/cy	1	6.90E-01	1	1.44E-03	2.6364E+02	+3.79E-01	0.78	1:13:28:31	98	00:48:37	1:00:38:59
8.50259E+01	32619	3.85E-03	3.85E-03/cy	1	4.09E-01	0	1.44E-03	2.6371E+02	+3.80E-01	0.78	1:13:38:33	97	00:58:39	1:00:19:41
8.56095E+01	32775	3.79E-03	3.79E-03/cy	1	5.17E-01	0	1.44E-03	2.6379E+02	+3.80E-01	0.78	1:13:48:36	100	01:08:42	1:00:00:44
8.61991E+01	32931	3.74E-03	3.74E-03/cy	2	6.77E-02	1	1.44E-03	2.6385E+02	+3.81E-01	0.78	1:13:58:40	98	01:18:46	23:41:39
8.68023E+01	33091	3.77E-03	3.77E-03/cy	1	8.48E-02	1	1.44E-03	2.6392E+02	+3.82E-01	0.78	1:14:08:49	95	01:28:55	23:22:10
8.73939E+01	33249	3.73E-03	3.73E-03/cy	1	1.34E-01	0	1.44E-03	2.6400E+02	+3.83E-01	0.78	1:14:18:50	97	01:38:56	23:03:13
8.79788E+01	33406	3.69E-03	3.69E-03/cy	1	2.31E-01	0	1.44E-03	2.6407E+02	+3.84E-01	0.78	1:14:28:52	97	01:48:58	22:44:40
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
8.85601E+01	33562	3.70E-03	3.70E-03/cy	1	5.74E-01	0	1.44E-03	2.6414E+02	+3.85E-01	0.78	1:14:38:54	97	01:59:00	22:26:23
8.90881E+01	33720	3.07E-03	3.07E-03/cx	1	1.13E-01	0	1.44E-03	2.6421E+02	+3.86E-01	0.78	1:14:48:55	99	02:09:01	22:10:24
8.95274E+01	33878	2.61E-03	2.61E-03/cx	1	1.41E-01	0	1.44E-03	2.6427E+02	+3.86E-01	0.78	1:14:58:56	97	02:19:02	21:58:05
9.00805E+01	34032	3.77E-03	3.77E-03/cy	1	5.90E-01	0	1.44E-03	2.6432E+02	+3.87E-01	0.78	1:15:08:57	98	02:29:03	21:41:12

9.06696E+01	34191	3.70E-03	3.70E-03/cy	1	3.84E-01	1	1.43E-03	2.6439E+02	+3.88E-01	0.78	1:15:19:02	99	02:39:08	21:22:58
9.12570E+01	34350	3.71E-03	3.71E-03/cy	1	5.53E-01	0	1.43E-03	2.6445E+02	+3.89E-01	0.78	1:15:29:04	96	02:49:10	21:04:54
9.17326E+01	34508	1.87E-03	1.87E-03/vs	1	3.40E-01	0	1.43E-03	2.6451E+02	+3.90E-01	0.78	1:15:39:07	99	02:59:13	20:51:21
9.19749E+01	34666	1.37E-03	1.37E-03/vs	1	3.64E-02	0	1.43E-03	2.6454E+02	+3.90E-01	0.78	1:15:49:09	99	03:09:15	20:47:01
9.21797E+01	34822	1.28E-03	1.28E-03/vs	1	4.11E-02	0	1.43E-03	2.6457E+02	+3.90E-01	0.78	1:15:59:09	100	03:19:15	20:44:08
9.23800E+01	34981	1.23E-03	1.23E-03/vs	1	5.14E-02	1	1.43E-03	2.6459E+02	+3.91E-01	0.78	1:16:09:13	98	03:29:19	20:41:26
9.25728E+01	35141	1.81E-03	1.93E-03/vs	1	1.50E-01	1	1.43E-03	2.6461E+02	+3.91E-01	0.78	1:16:19:22	98	03:39:28	20:39:01
9.30477E+01	35299	3.37E-03	3.37E-03/cy	1	5.51E-01	0	1.43E-03	2.6465E+02	+3.92E-01	0.78	1:16:29:22	95	03:49:28	20:25:24
9.35843E+01	35455	3.47E-03	3.47E-03/cy	1	1.72E-01	0	1.43E-03	2.6471E+02	+3.93E-01	0.78	1:16:39:23	99	03:59:29	20:09:25
9.41416E+01	35611	3.60E-03	3.60E-03/cy	1	3.12E-01	1	1.43E-03	2.6477E+02	+3.93E-01	0.78	1:16:49:26	98	04:09:32	19:52:43
9.47132E+01	35771	3.64E-03	3.64E-03/cy	1	2.54E-01	1	1.43E-03	2.6483E+02	+3.94E-01	0.78	1:16:59:33	99	04:19:39	19:35:35
9.52797E+01	35929	3.62E-03	3.62E-03/cy	1	5.34E-02	0	1.43E-03	2.6490E+02	+3.95E-01	0.78	1:17:09:33	98	04:29:39	19:18:40
9.58444E+01	36087	3.59E-03	3.59E-03/cy	1	5.61E-01	0	1.43E-03	2.6499E+02	+3.96E-01	0.78	1:17:19:35	99	04:39:42	19:01:56
9.63756E+01	36242	3.57E-03	3.57E-03/cy	1	1.44E-01	0	1.43E-03	2.6502E+02	+3.97E-01	0.78	1:17:29:36	97	04:49:42	18:46:30
9.69412E+01	36401	3.55E-03	3.55E-03/cy	1	9.41E-01	1	1.43E-03	2.6507E+02	+3.98E-01	0.78	1:17:39:42	100	04:59:48	18:29:54
9.74997E+01	36559	3.54E-03	3.54E-03/cy	1	6.88E-02	0	1.43E-03	2.6514E+02	+3.99E-01	0.78	1:17:49:42	100	05:09:48	18:13:35
9.80529E+01	36715	3.54E-03	3.54E-03/cy	1	6.71E-02	0	1.43E-03	2.6521E+02	+3.99E-01	0.78	1:17:59:43	96	05:19:50	17:57:33
9.85950E+01	36872	3.53E-03	3.53E-03/cy	1	1.71E-01	0	1.42E-03	2.6527E+02	+4.00E-01	0.78	1:18:09:44	100	05:29:50	17:41:58
9.91162E+01	37028	3.01E-03	3.52E-03/cy	1	1.98E-01	0	1.42E-03	2.6531E+02	+4.01E-01	0.78	1:18:19:44	98	05:39:50	17:27:13
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
9.96565E+01	37186	3.51E-03	3.51E-03/cy	1	5.31E-02	0	1.42E-03	2.6537E+02	+4.02E-01	0.78	1:18:29:46	99	05:49:52	17:11:50
***														
restart and spatial data available at t= 1.00001E+02														
***														
1.00001E+02	37284	3.51E-03	3.51E-03/cy	1	5.87E-02	0	1.42E-03	2.6541E+02	+4.02E-01	0.78	1:18:36:06	97	05:56:12	17:02:03
1.00164E+02	37332	2.06E-03	2.57E-03/cy	2	1.58E-01	0	1.42E-03	2.6542E+02	+4.02E-01	0.78	1:18:39:46	99	05:59:52	16:57:41
1.00690E+02	37491	3.18E-03	3.48E-03/cy	1	2.40E-01	1	1.42E-03	2.6546E+02	+4.03E-01	0.78	1:18:49:53	99	06:09:59	16:42:56
1.01162E+02	37647	3.49E-03	3.49E-03/cy	1	6.07E-01	0	1.42E-03	2.6551E+02	+4.03E-01	0.78	1:18:59:56	98	06:20:02	16:30:08
1.01690E+02	37804	3.46E-03	3.46E-03/cy	1	2.29E-01	0	1.42E-03	2.6557E+02	+4.04E-01	0.78	1:19:09:59	96	06:30:05	16:15:24
1.02202E+02	37957	3.17E-03	3.56E-03/cy	1	3.80E-01	0	1.42E-03	2.6562E+02	+4.05E-01	0.78	1:19:20:02	84	06:40:08	16:01:15
1.02734E+02	38110	3.58E-03	3.58E-03/cy	1	3.15E-01	0	1.42E-03	2.6567E+02	+4.05E-01	0.78	1:19:30:03	97	06:50:09	15:46:26
1.03215E+02	38254	2.82E-03	3.53E-03/cy	1	8.49E-01	0	1.42E-03	2.6572E+02	+4.05E-01	0.78	1:19:40:05	98	07:00:11	15:33:26
1.03704E+02	38397	3.53E-03	3.53E-03/cy	2	1.21E-02	0	1.42E-03	2.6575E+02	+4.05E-01	0.78	1:19:50:06	99	07:10:12	15:20:13
1.04161E+02	38541	3.54E-03	3.54E-03/cy	2	4.63E-02	1	1.42E-03	2.6581E+02	+4.04E-01	0.78	1:20:00:12	99	07:20:18	15:08:06
1.04643E+02	38686	3.49E-03	3.49E-03/cy	2	6.69E-02	0	1.42E-03	2.6585E+02	+4.04E-01	0.78	1:20:10:14	99	07:30:20	14:55:09
1.05132E+02	38826	3.44E-03	3.44E-03/cy	1	9.85E-01	0	1.42E-03	2.6589E+02	+4.04E-01	0.78	1:20:20:14	100	07:40:20	14:41:59

1.05630E+02	38969	3.50E-03	3.50E-03/cy	2	2.78E-02	0	1.42E-03	2.6595E+02	+4.04E-01	0.78	1:20:30:17	97	07:50:23	14:28:34
1.06109E+02	39111	3.48E-03	3.48E-03/cy	2	4.65E-02	1	1.42E-03	2.6601E+02	+4.03E-01	0.78	1:20:40:24	100	08:00:30	14:15:49
1.06601E+02	39254	3.50E-03	3.50E-03/cy	2	5.86E-02	0	1.42E-03	2.6606E+02	+4.04E-01	0.78	1:20:50:25	98	08:10:31	14:02:39
1.07081E+02	39396	3.47E-03	3.47E-03/cy	2	2.66E-02	0	1.42E-03	2.6608E+02	+4.04E-01	0.78	1:21:00:27	97	08:20:33	13:49:53
1.07582E+02	39540	3.50E-03	3.50E-03/cy	2	3.28E-02	0	1.41E-03	2.6612E+02	+4.05E-01	0.78	1:21:10:29	97	08:30:35	13:36:28
1.08070E+02	39681	3.43E-03	3.43E-03/cy	2	1.10E-02	1	1.41E-03	2.6617E+02	+4.05E-01	0.78	1:21:20:32	99	08:40:38	13:23:33
1.08571E+02	39829	3.02E-03	3.48E-03/cy	2	1.14E-01	0	1.41E-03	2.6621E+02	+4.05E-01	0.78	1:21:30:33	97	08:50:39	13:10:10
1.09080E+02	39977	2.38E-03	2.38E-03/cy	2	1.65E-01	0	1.41E-03	2.6626E+02	+4.06E-01	0.78	1:21:40:34	98	09:00:40	12:56:35
1.09588E+02	40129	3.46E-03	3.46E-03/cy	1	4.14E-01	0	1.41E-03	2.6631E+02	+4.06E-01	0.78	1:21:50:37	100	09:10:43	12:43:05
1.10106E+02	40281	3.43E-03	3.43E-03/cy	2	3.41E-02	1	1.41E-03	2.6637E+02	+4.07E-01	0.78	1:22:00:37	99	09:20:43	12:29:16
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
1.10628E+02	40438	3.47E-03	3.47E-03/cy	1	1.18E-01	0	1.41E-03	2.6641E+02	+4.07E-01	0.78	1:22:10:40	100	09:30:46	12:15:23
1.11156E+02	40592	3.46E-03	3.46E-03/cy	1	1.59E-01	0	1.41E-03	2.6646E+02	+4.08E-01	0.78	1:22:20:40	97	09:40:46	12:01:19
1.11668E+02	40749	3.47E-03	3.47E-03/cy	1	1.37E-01	0	1.41E-03	2.6648E+02	+4.08E-01	0.78	1:22:30:42	100	09:50:48	11:47:49
1.12149E+02	40898	3.50E-03	3.50E-03/cy	2	3.25E-02	0	1.41E-03	2.6651E+02	+4.09E-01	0.78	1:22:40:42	96	10:00:48	11:35:18
1.12630E+02	41048	3.45E-03	3.45E-03/cy	2	2.39E-02	0	1.41E-03	2.6655E+02	+4.09E-01	0.78	1:22:50:45	97	10:10:51	11:22:49
1.13136E+02	41199	3.45E-03	3.45E-03/cy	2	1.66E-02	0	1.41E-03	2.6662E+02	+4.10E-01	0.78	1:23:00:45	100	10:20:51	11:09:33
1.13616E+02	41355	3.48E-03	3.48E-03/cy	1	2.76E-01	0	1.41E-03	2.6667E+02	+4.11E-01	0.78	1:23:10:46	96	10:30:52	10:57:10
1.14023E+02	41477	3.47E-03	3.47E-03/cy	1	4.54E-01	0	1.41E-03	2.6669E+02	+4.11E-01	0.78	1:23:20:47	77	10:40:53	10:46:59
1.14438E+02	41600	2.61E-03	2.61E-03/cy	1	3.27E-01	0	1.40E-03	2.6672E+02	+4.12E-01	0.78	1:23:30:48	81	10:50:54	10:36:35
1.14814E+02	41725	2.98E-03	2.98E-03/cy	1	1.22E-01	0	1.40E-03	2.6676E+02	+4.12E-01	0.78	1:23:40:49	74	11:00:55	10:27:22
1.15227E+02	41850	3.23E-03	3.23E-03/cy	1	3.08E-01	0	1.40E-03	2.6679E+02	+4.13E-01	0.78	1:23:50:51	81	11:10:57	10:17:02
1.15616E+02	41976	2.28E-03	2.28E-03/cy	2	1.75E-01	0	1.40E-03	2.6683E+02	+4.13E-01	0.78	2:00:00:56	82	11:21:02	10:07:24
1.16090E+02	42119	3.45E-03	3.45E-03/cy	1	1.40E-01	0	1.40E-03	2.6688E+02	+4.14E-01	0.79	2:00:10:56	95	11:31:02	09:55:14
1.16549E+02	42261	3.10E-03	3.10E-03/cx	1	3.67E-01	1	1.40E-03	2.6692E+02	+4.14E-01	0.79	2:00:21:06	81	11:41:12	09:43:33
1.17003E+02	42400	3.47E-03	3.47E-03/cy	1	9.92E-02	0	1.40E-03	2.6695E+02	+4.15E-01	0.79	2:00:31:12	79	11:51:18	09:32:01
1.17483E+02	42541	3.38E-03	3.38E-03/cy	2	1.27E-02	1	1.40E-03	2.6699E+02	+4.15E-01	0.79	2:00:41:22	86	12:01:28	09:19:44
1.17938E+02	42682	3.40E-03	3.40E-03/cy	2	3.04E-02	0	1.40E-03	2.6703E+02	+4.16E-01	0.79	2:00:51:25	88	12:11:31	09:08:12
1.18198E+02	42759	3.40E-03	3.40E-03/cy	1	7.57E-02	0	1.40E-03	2.6705E+02	+4.16E-01	0.79	2:00:56:47	91	12:16:53	09:01:31
1.18647E+02	42900	3.42E-03	3.42E-03/cy	1	1.68E-01	0	1.40E-03	2.6709E+02	+4.17E-01	0.79	2:01:06:49	92	12:26:55	08:50:10
1.19059E+02	43032	3.40E-03	3.40E-03/cy	2	2.72E-02	0	1.40E-03	2.6712E+02	+4.17E-01	0.79	2:01:16:50	92	12:36:56	08:39:54
1.19465E+02	43174	3.43E-03	3.43E-03/cy	1	1.24E-01	0	1.40E-03	2.6715E+02	+4.18E-01	0.79	2:01:26:51	96	12:46:57	08:29:50
1.19886E+02	43303	3.42E-03	3.42E-03/cy	1	3.23E-01	0	1.40E-03	2.6718E+02	+4.19E-01	0.79	2:01:35:51	97	12:55:57	08:19:08
***														
restart and spatial data available at t= 1.19999E+02														
***														


1.19999E+02	43340	2.76E-03	3.41E-03/cy	1	3.86E-01	0	1.40E-03	2.6719E+02	+4.19E-01	0.79	2:01:38:14	96	12:58:20	08:16:15
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
1.20323E+02	43446	3.42E-03	3.42E-03/cy	1	1.01E-01	0	1.40E-03	2.6721E+02	+4.19E-01	0.79	2:01:45:53	100	13:05:59	08:08:09
1.20803E+02	43597	3.40E-03	3.40E-03/cy	1	2.45E-01	0	1.40E-03	2.6723E+02	+4.20E-01	0.79	2:01:55:54	96	13:16:00	07:55:56
1.21301E+02	43748	3.41E-03	3.41E-03/cy	1	7.33E-02	0	1.39E-03	2.6726E+02	+4.20E-01	0.79	2:02:05:56	99	13:26:02	07:43:15
1.21801E+02	43898	3.38E-03	3.38E-03/cy	1	2.37E-01	0	1.39E-03	2.6729E+02	+4.21E-01	0.79	2:02:15:58	99	13:36:04	07:30:30
1.22306E+02	44050	2.96E-03	2.96E-03/cy	2	7.29E-02	0	1.39E-03	2.6731E+02	+4.22E-01	0.79	2:02:26:00	99	13:46:06	07:17:39
1.22816E+02	44206	3.41E-03	3.41E-03/cy	1	9.36E-02	0	1.39E-03	2.6734E+02	+4.22E-01	0.79	2:02:36:01	99	13:56:07	07:04:39
1.23333E+02	44361	3.02E-03	3.39E-03/cy	1	2.53E-01	1	1.39E-03	2.6737E+02	+4.23E-01	0.79	2:02:46:04	99	14:06:11	06:51:32
1.23837E+02	44518	3.41E-03	3.41E-03/cy	1	2.34E-01	0	1.39E-03	2.6740E+02	+4.24E-01	0.79	2:02:56:05	98	14:16:11	06:38:46
1.24351E+02	44673	3.39E-03	3.39E-03/cy	1	2.49E-01	0	1.39E-03	2.6743E+02	+4.24E-01	0.79	2:03:06:05	96	14:26:11	06:25:44
1.24883E+02	44831	3.38E-03	3.38E-03/cy	1	3.72E-02	1	1.39E-03	2.6746E+02	+4.25E-01	0.79	2:03:16:12	99	14:36:18	06:12:16
1.25395E+02	44988	3.36E-03	3.36E-03/cy	1	3.41E-01	0	1.39E-03	2.6751E+02	+4.25E-01	0.79	2:03:26:13	99	14:46:19	05:59:22
1.25853E+02	45143	3.34E-03	3.34E-03/cy	1	5.59E-01	0	1.39E-03	2.6755E+02	+4.26E-01	0.79	2:03:36:14	97	14:56:20	05:47:56
1.26339E+02	45299	3.35E-03	3.35E-03/cy	1	3.62E-02	0	1.39E-03	2.6759E+02	+4.27E-01	0.79	2:03:46:16	98	15:06:22	05:35:46
1.26830E+02	45455	1.79E-03	2.02E-03/cy	2	7.60E-02	0	1.39E-03	2.6762E+02	+4.27E-01	0.79	2:03:56:17	99	15:16:23	05:23:30
1.27320E+02	45611	3.39E-03	3.39E-03/cy	1	5.95E-02	1	1.39E-03	2.6766E+02	+4.28E-01	0.79	2:04:06:25	98	15:26:31	05:11:17
1.27830E+02	45769	3.39E-03	3.39E-03/cy	1	2.95E-01	0	1.39E-03	2.6769E+02	+4.29E-01	0.79	2:04:16:27	98	15:36:33	04:58:32
1.28197E+02	45898	1.88E-03	1.88E-03/cy	2	1.29E-01	0	1.39E-03	2.6771E+02	+4.29E-01	0.79	2:04:26:29	77	15:46:35	04:49:36
1.28579E+02	46028	3.31E-03	3.31E-03/cy	1	9.11E-02	0	1.38E-03	2.6772E+02	+4.30E-01	0.79	2:04:36:31	86	15:56:37	04:40:18
1.28923E+02	46167	2.84E-03	3.39E-03/cy	1	2.92E-01	0	1.38E-03	2.6774E+02	+4.30E-01	0.79	2:04:46:31	91	16:06:37	04:31:59
1.29338E+02	46309	3.35E-03	3.35E-03/cy	1	1.17E-01	0	1.38E-03	2.6778E+02	+4.31E-01	0.79	2:04:56:34	86	16:16:40	04:21:46
1.29720E+02	46447	3.32E-03	3.32E-03/cy	1	1.05E-01	0	1.38E-03	2.6780E+02	+4.31E-01	0.79	2:05:06:37	88	16:26:43	04:12:28
1.30191E+02	46591	3.32E-03	3.32E-03/cy	1	1.52E-01	1	1.38E-03	2.6783E+02	+4.32E-01	0.79	2:05:16:39	87	16:36:45	04:00:47
1.30616E+02	46732	3.35E-03	3.35E-03/cy	1	7.34E-02	0	1.38E-03	2.6786E+02	+4.32E-01	0.79	2:05:26:39	88	16:46:45	03:50:18
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
1.31066E+02	46871	3.34E-03	3.34E-03/cy	1	6.27E-02	1	1.38E-03	2.6790E+02	+4.33E-01	0.79	2:05:36:43	85	16:56:49	03:39:12
1.31536E+02	47015	3.32E-03	3.32E-03/cy	1	6.55E-01	0	1.37E-03	2.6793E+02	+4.33E-01	0.79	2:05:46:45	91	17:06:51	03:27:34
1.31987E+02	47151	3.31E-03	3.31E-03/cy	1	1.92E-01	1	1.37E-03	2.6796E+02	+4.34E-01	0.79	2:05:56:46	87	17:16:52	03:16:27
1.32464E+02	47295	3.31E-03	3.31E-03/cy	1	7.42E-02	0	1.37E-03	2.6800E+02	+4.35E-01	0.79	2:06:06:47	90	17:26:53	03:04:39
1.32939E+02	47439	3.32E-03	3.32E-03/cy	1	1.08E-01	0	1.37E-03	2.6802E+02	+4.35E-01	0.79	2:06:16:49	92	17:36:55	02:52:56
1.33406E+02	47581	3.19E-03	3.19E-03/cy	1	1.66E-01	1	1.37E-03	2.6807E+02	+4.36E-01	0.79	2:06:26:49	88	17:46:55	02:41:26
1.33596E+02	47641	3.14E-03	3.14E-03/cy	1	3.05E-01	1	1.37E-03	2.6808E+02	+4.36E-01	0.79	2:06:30:59	88	17:51:05	02:36:46



1.34023E+02	47784	3.17E-03	3.17E-03/cy	1	1.49E-01	0	1.37E-03	2.6810E+02	+4.37E-01	0.79	2:06:41:01	93	18:01:07	02:26:17
1.34459E+02	47924	3.16E-03	3.16E-03/cy	1	2.13E-01	0	1.37E-03	2.6813E+02	+4.38E-01	0.79	2:06:51:04	91	18:11:10	02:15:35
1.34891E+02	48061	3.11E-03	3.11E-03/cy	1	3.43E-01	1	1.37E-03	2.6815E+02	+4.38E-01	0.79	2:07:01:10	85	18:21:16	02:05:01
1.35322E+02	48202	2.93E-03	2.93E-03/cy	1	6.25E-01	0	1.37E-03	2.6817E+02	+4.38E-01	0.79	2:07:11:13	89	18:31:19	01:54:26
1.35723E+02	48347	2.65E-03	2.65E-03/cy	1	1.55E-01	0	1.37E-03	2.6818E+02	+4.39E-01	0.79	2:07:21:15	92	18:41:21	01:44:38
1.36134E+02	48492	3.08E-03	3.08E-03/cy	1	4.66E-01	0	1.37E-03	2.6821E+02	+4.39E-01	0.79	2:07:31:18	93	18:51:24	01:34:35
1.36399E+02	48579	3.14E-03	3.14E-03/cy	1	3.00E-01	0	1.36E-03	2.6822E+02	+4.40E-01	0.79	2:07:37:14	90	18:57:20	01:28:05
***														
solver options updated at t= 1.36402E+02, cycle= 48580														
***														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
1.36575E+02	48637	3.15E-03	3.15E-03/cy	1	9.98E-02	0	1.36E-03	2.6822E+02	+4.40E-01	0.79	2:07:41:18	96	19:01:24	09:32:55
1.36967E+02	48781	3.14E-03	3.14E-03/cy	1	2.10E-01	1	1.36E-03	2.6822E+02	+4.40E-01	0.79	2:07:51:19	89	19:11:25	09:23:26
1.37414E+02	48927	2.93E-03	3.20E-03/cy	1	5.69E-01	0	1.36E-03	2.6824E+02	+4.41E-01	0.79	2:08:01:20	93	19:21:26	09:12:20
1.37868E+02	49073	3.15E-03	3.15E-03/cy	1	2.57E-01	0	1.36E-03	2.6826E+02	+4.41E-01	0.79	2:08:11:23	92	19:31:29	09:01:04
1.38319E+02	49219	3.08E-03	3.08E-03/cy	1	9.71E-01	0	1.36E-03	2.6828E+02	+4.42E-01	0.79	2:08:21:24	91	19:41:30	08:49:52
1.38769E+02	49365	3.12E-03	3.12E-03/cy	1	4.78E-01	0	1.36E-03	2.6831E+02	+4.43E-01	0.79	2:08:31:27	92	19:51:33	08:38:44
1.39227E+02	49511	3.13E-03	3.13E-03/cy	1	1.93E-01	1	1.36E-03	2.6831E+02	+4.43E-01	0.79	2:08:41:30	90	20:01:36	08:27:23
1.39690E+02	49660	3.14E-03	3.14E-03/cy	1	9.03E-02	0	1.36E-03	2.6833E+02	+4.44E-01	0.79	2:08:51:32	91	20:11:38	08:15:53
***														
restart and spatial data available at t= 1.39999E+02														
***														
1.39999E+02	49763	3.05E-03	3.05E-03/cy	1	2.51E-01	0	1.36E-03	2.6834E+02	+4.44E-01	0.79	2:08:58:41	92	20:18:47	08:08:17
1.40104E+02	49797	3.07E-03	3.07E-03/cy	1	2.70E-01	0	1.36E-03	2.6835E+02	+4.44E-01	0.79	2:09:01:32	90	20:21:38	08:05:45
1.40568E+02	49945	3.06E-03	3.06E-03/cy	1	7.28E-02	0	1.36E-03	2.6837E+02	+4.45E-01	0.79	2:09:11:34	93	20:31:40	07:54:15
1.41008E+02	50086	3.12E-03	3.12E-03/cy	1	2.20E-01	0	1.36E-03	2.6841E+02	+4.46E-01	0.79	2:09:21:35	88	20:41:41	07:43:25
1.41355E+02	50201	3.16E-03	3.16E-03/cy	1	3.09E-01	1	1.36E-03	2.6844E+02	+4.47E-01	0.79	2:09:29:58	84	20:50:04	07:34:57
1.41776E+02	50344	3.12E-03	3.12E-03/cy	1	3.59E-01	0	1.36E-03	2.6847E+02	+4.47E-01	0.79	2:09:40:01	93	21:00:07	07:24:39
1.42214E+02	50485	3.18E-03	3.18E-03/cy	1	3.56E-01	0	1.35E-03	2.6851E+02	+4.48E-01	0.79	2:09:50:02	88	21:10:08	07:13:52
1.42664E+02	50629	3.12E-03	3.12E-03/cy	1	2.37E-01	0	1.35E-03	2.6855E+02	+4.48E-01	0.79	2:10:00:04	93	21:20:10	07:02:46
1.43089E+02	50772	3.11E-03	3.11E-03/cy	1	1.54E-01	0	1.35E-03	2.6859E+02	+4.49E-01	0.79	2:10:10:07	97	21:30:13	06:52:23
1.43517E+02	50920	3.15E-03	3.15E-03/cy	1	1.33E-01	0	1.35E-03	2.6861E+02	+4.49E-01	0.79	2:10:20:07	96	21:40:13	06:41:54
1.43976E+02	51069	3.16E-03	3.16E-03/cy	1	1.96E-01	0	1.35E-03	2.6864E+02	+4.50E-01	0.79	2:10:30:08	92	21:50:14	06:30:33
1.44008E+02	51079	3.11E-03	3.11E-03/cy	1	3.05E-01	0	1.35E-03	2.6864E+02	+4.50E-01	0.79	2:10:30:53	91	21:50:59	06:29:47
1.44324E+02	51181	2.81E-03	3.08E-03/cy	1	5.39E-01	1	1.35E-03	2.6866E+02	+4.49E-01	0.79	2:10:37:52	89	21:57:58	06:22:00
1.44785E+02	51329	3.13E-03	3.13E-03/cy	1	8.02E-01	0	1.35E-03	2.6869E+02	+4.49E-01	0.79	2:10:47:53	92	22:07:59	06:10:37

1.45006E+02	51401	3.12E-03	3.12E-03/cy	1	3.84E-01	1	1.35E-03	2.6870E+02	+4.49E-01	0.79	2:10:52:54	96	22:13:00	06:05:12
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
1.45293E+02	51493	3.24E-03	3.24E-03/cy	1	4.07E-01	0	1.35E-03	2.6871E+02	+4.48E-01	0.79	2:10:59:35	80	22:19:41	05:58:11
1.45658E+02	51611	3.02E-03	3.20E-03/cy	2	3.77E-02	1	1.35E-03	2.6872E+02	+4.48E-01	0.79	2:11:08:18	89	22:28:24	05:49:17
1.46056E+02	51746	3.21E-03	3.21E-03/cy	1	1.07E-01	0	1.35E-03	2.6874E+02	+4.47E-01	0.79	2:11:18:20	85	22:38:26	05:39:37
1.46306E+02	51827	3.14E-03	3.14E-03/cy	1	2.95E-01	0	1.35E-03	2.6874E+02	+4.47E-01	0.79	2:11:24:14	97	22:44:20	05:33:32
1.46472E+02	51883	3.05E-03	3.05E-03/cy	1	2.01E-01	0	1.35E-03	2.6875E+02	+4.46E-01	0.79	2:11:28:04	96	22:48:10	05:29:27
1.46509E+02	51895	3.02E-03	3.02E-03/cy	1	8.24E-01	0	1.35E-03	2.6875E+02	+4.46E-01	0.79	2:11:28:50	97	22:48:56	05:28:33
***														
solver options updated at t= 1.46512E+02, cycle= 51896														
***														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
1.46581E+02	51919	2.97E-03	2.97E-03/cy	1	2.72E-01	0	1.35E-03	2.6875E+02	+4.46E-01	0.79	2:11:30:21	96	22:50:27	13:33:48
1.47062E+02	52071	3.22E-03	3.22E-03/cy	1	2.08E-01	1	1.35E-03	2.6878E+02	+4.46E-01	0.79	2:11:40:21	98	23:00:27	13:21:42
1.47566E+02	52230	3.25E-03	3.25E-03/cy	1	3.70E-01	0	1.34E-03	2.6882E+02	+4.45E-01	0.79	2:11:50:23	100	23:10:29	13:08:57
1.48014E+02	52385	2.21E-03	2.21E-03/cy	1	2.18E-01	0	1.34E-03	2.6882E+02	+4.44E-01	0.79	2:12:00:24	96	23:20:30	12:57:51
1.48378E+02	52542	2.22E-03	2.22E-03/cy	1	1.06E-01	0	1.34E-03	2.6882E+02	+4.44E-01	0.79	2:12:10:26	97	23:30:32	12:49:15
1.48725E+02	52701	2.15E-03	2.15E-03/cy	1	1.77E-01	1	1.34E-03	2.6882E+02	+4.44E-01	0.79	2:12:20:35	99	23:40:41	12:41:10
1.49042E+02	52858	1.92E-03	1.92E-03/cy	1	6.46E-02	0	1.34E-03	2.6882E+02	+4.43E-01	0.79	2:12:30:37	99	23:50:43	12:33:56
1.49316E+02	53015	1.69E-03	1.69E-03/cy	1	6.97E-02	0	1.34E-03	2.6884E+02	+4.43E-01	0.79	2:12:40:39	100	00:00:45	12:27:57
1.49602E+02	53172	2.05E-03	2.05E-03/cy	1	1.19E-01	0	1.34E-03	2.6885E+02	+4.43E-01	0.79	2:12:50:39	100	00:10:45	12:21:37
1.49885E+02	53331	1.56E-03	1.56E-03/cy	1	7.81E-02	1	1.34E-03	2.6886E+02	+4.42E-01	0.79	2:13:00:48	99	00:20:54	12:15:21
1.50154E+02	53488	2.07E-03	2.07E-03/cy	1	5.00E-02	0	1.34E-03	2.6886E+02	+4.42E-01	0.79	2:13:10:48	98	00:30:54	12:09:27
1.50466E+02	53645	1.71E-03	1.71E-03/cy	1	1.20E-01	0	1.34E-03	2.6886E+02	+4.42E-01	0.79	2:13:20:49	97	00:40:55	12:02:18
1.50715E+02	53802	1.72E-03	1.72E-03/cy	1	9.01E-02	0	1.33E-03	2.6887E+02	+4.41E-01	0.79	2:13:30:51	97	00:50:57	11:56:58
1.51036E+02	53959	1.94E-03	1.94E-03/cy	1	5.67E-02	0	1.33E-03	2.6889E+02	+4.41E-01	0.79	2:13:40:53	97	01:00:59	11:49:32
1.51294E+02	54116	1.55E-03	1.55E-03/cy	1	5.90E-02	0	1.33E-03	2.6889E+02	+4.41E-01	0.79	2:13:50:55	100	01:11:01	11:43:55
1.51602E+02	54273	2.22E-03	2.22E-03/cy	1	1.07E-01	0	1.33E-03	2.6890E+02	+4.40E-01	0.79	2:14:00:57	98	01:21:03	11:36:51
1.51881E+02	54431	1.51E-03	1.51E-03/cy	1	5.04E-02	1	1.33E-03	2.6893E+02	+4.40E-01	0.79	2:14:11:03	98	01:31:09	11:30:35
1.52161E+02	54589	2.31E-03	2.31E-03/cy	1	4.28E-01	0	1.33E-03	2.6896E+02	+4.40E-01	0.79	2:14:21:04	97	01:41:10	11:24:17
1.52466E+02	54746	1.55E-03	1.55E-03/cy	1	6.99E-02	0	1.33E-03	2.6897E+02	+4.39E-01	0.79	2:14:31:07	99	01:51:13	11:17:15
1.52714E+02	54902	1.97E-03	1.97E-03/cy	1	2.60E-01	0	1.33E-03	2.6899E+02	+4.39E-01	0.79	2:14:41:07	99	02:01:13	11:11:50
1.53042E+02	55060	1.67E-03	1.67E-03/cy	1	1.05E-01	0	1.33E-03	2.6901E+02	+4.39E-01	0.79	2:14:51:08	99	02:11:14	11:04:07

1.53284E+02	55217	1.67E-03	1.67E-03/cy	1	2.93E-02	0	1.33E-03	2.6902E+02	+4.38E-01	0.79	2:15:01:10	96	02:21:16	10:58:52
1.53611E+02	55374	1.87E-03	1.87E-03/cy	1	4.08E-02	0	1.32E-03	2.6903E+02	+4.38E-01	0.79	2:15:11:13	98	02:31:19	10:51:09
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
1.53857E+02	55531	1.52E-03	1.52E-03/cy	1	6.33E-02	1	1.32E-03	2.6903E+02	+4.38E-01	0.79	2:15:21:13	99	02:41:20	10:45:44
1.54169E+02	55688	2.12E-03	2.12E-03/cy	1	2.95E-02	0	1.32E-03	2.6905E+02	+4.37E-01	0.79	2:15:31:14	98	02:51:20	10:38:24
1.54432E+02	55845	1.47E-03	1.47E-03/cy	1	6.88E-03	0	1.32E-03	2.6907E+02	+4.37E-01	0.79	2:15:41:17	99	03:01:23	10:32:30
1.54718E+02	56002	2.32E-03	2.32E-03/cy	1	1.13E-01	0	1.32E-03	2.6908E+02	+4.37E-01	0.79	2:15:51:18	100	03:11:24	10:25:55
1.55005E+02	56159	1.49E-03	1.49E-03/cy	1	1.11E-01	0	1.32E-03	2.6907E+02	+4.36E-01	0.79	2:16:01:19	96	03:21:25	10:19:16
1.55265E+02	56316	2.21E-03	2.21E-03/cy	1	9.34E-02	0	1.32E-03	2.6907E+02	+4.36E-01	0.79	2:16:11:21	96	03:31:27	10:13:24
1.55575E+02	56473	1.56E-03	1.56E-03/cy	1	2.64E-02	0	1.32E-03	2.6908E+02	+4.36E-01	0.79	2:16:21:23	96	03:41:29	10:06:05
1.55820E+02	56631	1.87E-03	1.87E-03/cy	1	2.89E-02	1	1.32E-03	2.6909E+02	+4.36E-01	0.79	2:16:31:28	99	03:51:34	10:00:38
1.56143E+02	56788	1.68E-03	1.68E-03/cy	1	1.54E-01	0	1.32E-03	2.6910E+02	+4.35E-01	0.79	2:16:41:29	97	04:01:35	09:52:54
1.56382E+02	56945	1.62E-03	1.62E-03/cy	1	4.04E-02	0	1.31E-03	2.6910E+02	+4.35E-01	0.79	2:16:51:29	99	04:11:35	09:47:35
1.56689E+02	57101	1.93E-03	1.93E-03/cy	1	1.70E-01	1	1.31E-03	2.6911E+02	+4.35E-01	0.79	2:17:01:31	99	04:21:38	09:40:17
1.56938E+02	57260	1.48E-03	1.48E-03/cy	1	1.21E-01	0	1.31E-03	2.6912E+02	+4.35E-01	0.79	2:17:11:34	98	04:31:40	09:34:40
1.57231E+02	57415	1.74E-03	2.20E-03/cy	1	3.45E-01	0	1.31E-03	2.6913E+02	+4.34E-01	0.79	2:17:21:34	99	04:41:40	09:27:45
1.57497E+02	57572	1.46E-03	1.46E-03/cy	1	3.70E-02	0	1.31E-03	2.6914E+02	+4.34E-01	0.79	2:17:31:38	97	04:51:44	09:21:37
1.57775E+02	57731	2.32E-03	2.32E-03/cy	1	8.83E-02	1	1.31E-03	2.6915E+02	+4.34E-01	0.79	2:17:41:46	99	05:01:52	09:15:07
1.58069E+02	57889	1.49E-03	1.49E-03/cy	1	5.83E-02	0	1.31E-03	2.6917E+02	+4.34E-01	0.79	2:17:51:49	98	05:11:55	09:08:10
1.58319E+02	58045	2.09E-03	2.09E-03/cy	1	5.71E-02	0	1.31E-03	2.6918E+02	+4.34E-01	0.79	2:18:01:49	100	05:21:55	09:02:26
1.58632E+02	58202	1.57E-03	1.57E-03/cy	1	5.51E-02	0	1.30E-03	2.6919E+02	+4.33E-01	0.79	2:18:11:51	99	05:31:57	08:54:54
1.58872E+02	58361	1.80E-03	1.80E-03/cy	1	4.06E-02	1	1.30E-03	2.6919E+02	+4.33E-01	0.79	2:18:21:59	98	05:42:05	08:49:25
1.59193E+02	58518	1.70E-03	1.70E-03/cy	1	5.87E-02	0	1.30E-03	2.6919E+02	+4.33E-01	0.79	2:18:31:60	98	05:52:06	08:41:39
1.59430E+02	58675	1.58E-03	1.58E-03/cy	1	2.69E-02	0	1.30E-03	2.6919E+02	+4.33E-01	0.79	2:18:42:02	98	06:02:08	08:36:13
1.59750E+02	58832	1.89E-03	1.89E-03/cy	1	5.70E-02	0	1.30E-03	2.6919E+02	+4.33E-01	0.79	2:18:52:04	100	06:12:10	08:28:28
1.59998E+02	58991	1.49E-03	1.49E-03/cy	1	1.09E-02	1	1.30E-03	2.6920E+02	+4.32E-01	0.79	2:19:02:12	98	06:22:18	08:22:44
***														
restart and spatial data available at t= 1.60001E+02														
***														
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid #1			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
1.60001E+02	58993	1.49E-03	1.49E-03/cy	1	3.03E-02	0	1.30E-03	2.6920E+02	+4.32E-01	0.79	2:19:02:19	99	06:22:25	08:22:39
1.60277E+02	59140	2.21E-03	2.21E-03/cy	1	4.45E-02	0	1.30E-03	2.6921E+02	+4.32E-01	0.79	2:19:12:13	100	06:32:19	08:16:05
1.60545E+02	59297	1.45E-03	1.45E-03/cy	1	4.62E-02	0	1.30E-03	2.6922E+02	+4.32E-01	0.79	2:19:22:14	100	06:42:20	08:09:44

1.60815E+02	59453	2.31E-03	2.31E-03/cy	1	1.40E-01	0	1.29E-03	2.6924E+02	+4.32E-01	0.79	2:19:32:16	100	06:52:22	08:03:19
1.61106E+02	59610	1.49E-03	1.49E-03/cy	1	6.78E-02	0	1.29E-03	2.6925E+02	+4.32E-01	0.79	2:19:42:19	99	07:02:25	07:56:18
1.61353E+02	59767	2.07E-03	2.07E-03/cy	1	1.17E-01	0	1.29E-03	2.6925E+02	+4.31E-01	0.79	2:19:52:20	100	07:12:26	07:50:32
1.61665E+02	59923	1.57E-03	1.57E-03/cy	1	6.98E-02	0	1.29E-03	2.6928E+02	+4.31E-01	0.79	2:20:02:21	100	07:22:27	07:42:53
1.61905E+02	60081	1.77E-03	1.77E-03/cy	1	2.06E-02	1	1.29E-03	2.6929E+02	+4.31E-01	0.79	2:20:12:26	98	07:32:33	07:37:17
1.62229E+02	60239	1.70E-03	1.70E-03/cy	1	3.61E-02	0	1.29E-03	2.6931E+02	+4.31E-01	0.79	2:20:22:29	97	07:42:35	07:29:18
1.62464E+02	60396	1.58E-03	1.58E-03/cy	1	2.95E-02	0	1.29E-03	2.6933E+02	+4.31E-01	0.79	2:20:32:32	98	07:52:38	07:23:48
1.62775E+02	60553	1.91E-03	1.91E-03/cy	1	4.09E-02	0	1.29E-03	2.6935E+02	+4.31E-01	0.79	2:20:42:34	96	08:02:40	07:16:09
1.63022E+02	60710	1.48E-03	1.48E-03/cy	1	3.30E-02	0	1.29E-03	2.6936E+02	+4.30E-01	0.79	2:20:52:35	100	08:12:41	07:10:17
1.63308E+02	60866	2.19E-03	2.19E-03/cy	1	7.62E-02	0	1.29E-03	2.6936E+02	+4.30E-01	0.79	2:21:02:37	99	08:22:43	07:03:20
1.63577E+02	61023	1.47E-03	1.47E-03/cy	1	1.26E-01	0	1.29E-03	2.6937E+02	+4.30E-01	0.79	2:21:12:40	99	08:32:46	06:56:50
1.63835E+02	61181	2.17E-03	2.17E-03/cy	1	3.33E-02	1	1.28E-03	2.6938E+02	+4.30E-01	0.79	2:21:22:45	99	08:42:51	06:50:38
1.64132E+02	61338	1.53E-03	1.53E-03/cy	1	4.43E-02	0	1.28E-03	2.6939E+02	+4.30E-01	0.79	2:21:32:47	99	08:52:53	06:43:20
1.64375E+02	61495	1.88E-03	1.88E-03/cy	1	6.13E-02	0	1.28E-03	2.6940E+02	+4.30E-01	0.79	2:21:42:49	100	09:02:55	06:37:31
1.64687E+02	61652	1.66E-03	1.66E-03/cy	1	1.48E-02	0	1.28E-03	2.6941E+02	+4.29E-01	0.79	2:21:52:52	100	09:12:58	06:29:47
1.64930E+02	61811	1.65E-03	1.65E-03/cy	1	9.54E-03	1	1.28E-03	2.6941E+02	+4.29E-01	0.79	2:22:03:01	99	09:23:07	06:23:57
1.65243E+02	61968	1.82E-03	1.82E-03/cy	1	1.34E-01	0	1.28E-03	2.6942E+02	+4.29E-01	0.79	2:22:13:02	97	09:33:08	06:16:09
1.65489E+02	62125	1.54E-03	1.54E-03/cy	1	2.96E-02	0	1.28E-03	2.6943E+02	+4.29E-01	0.79	2:22:23:03	100	09:43:09	06:10:13
1.65784E+02	62281	2.01E-03	2.01E-03/cy	1	2.17E-01	1	1.28E-03	2.6944E+02	+4.29E-01	0.79	2:22:33:05	99	09:53:11	06:02:54
1.66048E+02	62439	1.52E-03	1.52E-03/cy	1	1.84E-02	0	1.28E-03	2.6944E+02	+4.29E-01	0.79	2:22:43:08	93	10:03:14	05:56:27
-----														
progress		time step		pressure		FEA		fluid 			performance			
sim_time	cycle	delt	dt_stbl/code	iter	res/epsi	iter	res/epsi	volume	%loss	frac	el_time	%PE	clk_time	est_rem_time
-----														
1.66330E+02	62596	2.09E-03	2.09E-03/cy	1	4.21E-02	0	1.28E-03	2.6945E+02	+4.29E-01	0.79	2:22:53:11	99	10:13:17	05:49:28
1.66582E+02	62736	1.56E-03	1.56E-03/cy	1	8.22E-02	0	1.28E-03	2.6945E+02	+4.28E-01	0.79	2:23:03:14	74	10:23:20	05:43:20
1.66814E+02	62879	1.89E-03	1.89E-03/cy	1	7.48E-03	0	1.27E-03	2.6945E+02	+4.28E-01	0.79	2:23:13:16	97	10:33:22	05:37:42
1.67100E+02	63027	1.71E-03	1.71E-03/cy	1	1.28E-01	0	1.27E-03	2.6947E+02	+4.28E-01	0.79	2:23:23:18	94	10:43:24	05:30:36
1.67317E+02	63163	1.62E-03	1.62E-03/cy	1	4.13E-02	0	1.27E-03	2.6948E+02	+4.28E-01	0.79	2:23:32:49	94	10:52:55	05:25:20
1.67589E+02	63307	1.96E-03	1.96E-03/cy	1	9.01E-02	0	1.27E-03	2.6948E+02	+4.28E-01	0.79	2:23:42:50	97	11:02:56	05:18:35
1.67849E+02	63459	1.58E-03	1.58E-03/cy	1	4.84E-02	0	1.27E-03	2.6949E+02	+4.28E-01	0.79	2:23:52:53	94	11:12:59	05:12:10
1.68118E+02	63611	2.01E-03	2.01E-03/cy	1	1.88E-01	1	1.27E-03	2.6950E+02	+4.27E-01	0.79	3:00:03:03	96	11:23:09	05:05:29
1.68395E+02	63765	1.61E-03	1.61E-03/cy	1	4.98E-02	0	1.27E-03	2.6951E+02	+4.27E-01	0.79	3:00:13:04	97	11:33:10	04:58:33
1.68641E+02	63911	1.89E-03	1.89E-03/cy	1	1.99E-01	1	1.27E-03	2.6953E+02	+4.27E-01	0.79	3:00:23:05	88	11:43:11	04:52:29
1.68922E+02	64060	1.70E-03	1.70E-03/cy	1	3.72E-02	0	1.27E-03	2.6954E+02	+4.27E-01	0.79	3:00:33:07	95	11:53:13	04:45:26
1.69153E+02	64201	1.71E-03	1.71E-03/cy	1	4.39E-02	1	1.27E-03	2.6956E+02	+4.27E-01	0.79	3:00:43:06	90	12:03:12	04:39:44
1.69194E+02	64225	1.78E-03	1.78E-03/cy	1	2.79E-02	0	1.27E-03	2.6956E+02	+4.27E-01	0.79	3:00:44:42	92	12:04:48	04:38:43
-----														
***														
solver options updated at t= 1.69196E+02, cycle= 64226														

```

***
-----
      progress              time step              pressure              FEA              fluid #1              performance
      sim_time  cycle      delt  dt_stbl/code      iter  res/epsi      iter  res/epsi      volume  %loss  frac      el_time  %PE  clk_time  est_rem_time
-----
1.69201E+02  64229  1.80E-03  1.80E-03/cy      1  4.34E-02      0  1.27E-03  2.6956E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:44:56  96  12:05:02  00:20:37
1.69241E+02  64251  1.88E-03  1.88E-03/cy      1  3.07E-02      1  1.27E-03  2.6956E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:46:36  91  12:06:42  00:19:34
1.69350E+02  64307  1.95E-03  1.95E-03/cy      1  2.40E-02      0  1.27E-03  2.6957E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:50:27  92  12:10:33  00:16:47
1.69414E+02  64341  1.88E-03  1.88E-03/cy      1  1.67E-01      1  1.27E-03  2.6957E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:52:59  91  12:13:05  00:15:07
1.69451E+02  64361  1.82E-03  1.82E-03/cy      1  8.00E-02      1  1.27E-03  2.6957E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:54:28  80  12:14:34  00:14:09
1.69498E+02  64387  1.75E-03  1.75E-03/cy      1  4.93E-02      0  1.27E-03  2.6957E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:56:15  92  12:16:21  00:12:58
1.69532E+02  64407  1.70E-03  1.70E-03/cy      1  7.69E-02      0  1.27E-03  2.6957E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:57:38  92  12:17:44  00:12:04
1.69566E+02  64427  1.66E-03  1.66E-03/cy      1  5.76E-02      0  1.27E-03  2.6957E+02  +4.27E-01  0.79  3:00:59:13  87  12:19:19  00:11:13
1.69615E+02  64457  1.63E-03  1.63E-03/cy      1  1.75E-02      0  1.27E-03  2.6957E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:01:21  88  12:21:27  00:09:56
1.69622E+02  64461  1.63E-03  1.63E-03/cy      1  4.19E-02      1  1.27E-03  2.6957E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:01:44  83  12:21:50  00:09:46
1.69664E+02  64487  1.63E-03  1.63E-03/cy      1  2.76E-02      0  1.27E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:03:36  92  12:23:42  00:08:41
1.69677E+02  64495  1.64E-03  1.64E-03/cy      1  3.73E-02      0  1.27E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:04:13  91  12:24:19  00:08:20
1.69703E+02  64511  1.65E-03  1.65E-03/cy      1  3.82E-02      1  1.26E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:05:27  80  12:25:33  00:07:40
1.69737E+02  64531  1.69E-03  1.69E-03/cy      1  1.41E-02      1  1.26E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:06:53  81  12:26:59  00:06:48
1.69754E+02  64541  1.71E-03  1.71E-03/cy      1  2.21E-02      1  1.27E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:07:41  72  12:27:47  00:06:22
1.69810E+02  64573  1.81E-03  1.81E-03/cy      1  3.28E-02      0  1.27E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:10:01  76  12:30:07  00:04:54
1.69881E+02  64611  1.91E-03  1.91E-03/cy      1  4.75E-02      1  1.26E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:12:49  84  12:32:55  00:03:04
1.69900E+02  64621  1.93E-03  1.93E-03/cy      1  4.04E-02      1  1.26E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:13:34  88  12:33:40  00:02:35
1.69958E+02  64651  1.93E-03  1.93E-03/cy      1  3.88E-02      1  1.26E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:15:46  88  12:35:52  00:01:05
1.69997E+02  64671  1.89E-03  1.89E-03/cy      1  4.68E-02      1  1.26E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:17:12  82  12:37:18  00:00:05

***

restart and spatial data available at t= 1.70000E+02

***

1.70000E+02  64673  1.89E-03  1.89E-03/cy      1  8.51E-02      0  1.26E-03  2.6958E+02  +4.26E-01  0.79  3:01:17:25  90  12:37:31  00:00:00

end of calculation      at t=      1.70000E+02      cycle =      64673

normal completion

elapsed time =      2.63877E+05 seconds, or
63 days :  1 hours : 17 minutes : 57 seconds

cpu =      3.91468E+06 seconds

```



date of completion = 08/23/2025
time = 12:38:03

**Nota:** En la siguiente tabla se puede ver de forma detallada el proceso de la simulación numérica, en los últimos pasos de tiempo se puede ver cómo se estabiliza el volumen del fluido

## 8.6. Memoria de cálculo estructural

Figura 285

Memoria de cálculo estructural

### Análisis y Verificación Normativa de Pernos de Anclaje sometidos a Cargas Hidrodinámicas mediante CFD-FSI

#### 1.0 Datos del perno M12 - Grado 4.6

$d := 14 \text{ mm}$  Diametro del perno

$f_u := 400 \text{ MPa}$  Resistencia ultima

$A_b := \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 153.94 \text{ mm}^2$  Area bruta del perno

$A_{res} := 0.75 \cdot A_b = 115.45 \text{ mm}^2$  Area resistente del perno (75%)  
reduccion por rosca

#### 2.0 Resistencias nominales segun norma E-090 (Diseño de estructuras metalicas)

Resistencia nominal a corte  
 $R_{n,V} := 0.6 \cdot f_u \cdot A_{res} = 27.71 \text{ kN}$

Resistencia nominal a traccion  
 $R_{n,T} := 0.75 \cdot f_u \cdot A_{res} = 34.64 \text{ kN}$

#### 3.0 Esfuerzos del modelo FSI

Esfuerzo normal (análisis CFD-FSI)  
 $\sigma_{max} := 279566 \text{ Pa}$

Esfuerzo cortante (analisis CFD-FSI)  
 $\tau_{max} := 655348 \text{ Pa}$

#### 4.0 Area de las placa de floculacion

Area de una placa de floculacion  
 $A_r := 1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$

Area efectiva de influencia (Area donde se concentran los esfuerzos)  
 $A_{ef} := 0.4 \cdot A_r = 0.4 \text{ m}^2$

#### 5.0 Fuerzas resultantes sobre los carriles

Fuerza normal inducida por el flujo  
 $F_N := \sigma_{max} \cdot A_{ef} = 111.83 \text{ kN}$

Fuerza cortante inducida por el flujo  
 $F_V := \tau_{max} \cdot A_{ef} = 262.14 \text{ kN}$

#### 6.0 Transferencia a pernos

$\alpha := 0.50$  Coeficiente de transferencia de carga

Fuerza normal en el perno  
 $F_{N,P} := \alpha \cdot F_N = 55.91 \text{ kN}$

Fuerza cortante en el perno  
 $F_{V,P} := \alpha \cdot F_V = 131.07 \text{ kN}$

#### 7.0 Distribucion de cargas entre pernos

$n := 6$  Numero de pernos en el carril

Fuerza normal maxima en perno  
 $N_{max} := \frac{F_{N,P}}{n} = 9.32 \text{ kN}$

Fuerza cortante maxima en perno  
 $V_{max} := \frac{F_{V,P}}{n} = 21.84 \text{ kN}$

#### 8.0 Verificacion segun criterio de interaccion Normativa - E90

Relacion de traccion  
 $\frac{N_{max}}{R_{n,T}} = 0.27$

Relacion cortante  
 $\frac{V_{max}}{R_{n,V}} = 0.79$

Indice de interaccion  

$\frac{N_{max}}{R_{n,T}} + \frac{V_{max}}{R_{n,V}} = 1.06$

**Nota:** El calculo estructural empleo la Norma E.090 y criterios del Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8:2005) y ANSI/AISC 360-22, y fue realizado en SMATH Studio con licencia de uso académico