

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Evaluación del viento sobre el monumento histórico
del Obelisco de la Pampa de Quinoa, Ayacucho 2024**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:
Bach. Angel IRCAÑAUPA HUAMANI

ASESOR:
MSc. Ing. Edwin Carlos GARCÍA SAEZ

AYACUCHO - PERÚ

2026

Dedicatoria

A mi madre Primitiva, por su amor, fortaleza y apoyo inquebrantable en cada etapa de mi vida, a la memoria de mi padre Amadeo, cuya guía, ejemplo y sabiduría permanecen como una inspiración constante en mi camino, este logro es un homenaje a ambos.

A mis hermanos, por su cariño, comprensión y aliento en los momentos más difíciles; y a mis amigos, por acompañarme con su amistad sincera, motivación y alegría durante esta etapa. A todos ustedes, les dedico este logro con profundo agradecimiento y amor.

A mi familia, con todo mi amor. Este logro es nuestro.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, institución que me brindó una formación académica sólida e integral y me permitió descubrir mi vocación dentro del campo de la Ingeniería Civil. Mi alma mater no solo me otorgó conocimientos técnicos, sino también valores y competencias que serán esenciales para mi crecimiento profesional. Agradezco profundamente haber desarrollado en sus aulas la pasión por construir, no solo estructuras, sino también un porvenir más prometedor.

Agradezco profundamente al Mg. Ing. Edwin Carlos García Saez, mi asesor, por su guía, compromiso y constante apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Su orientación y confianza fueron fundamentales para la culminación de este trabajo y para mi crecimiento académico y profesional.

Expreso mi más sincero agradecimiento a los docentes, por su dedicación, compromiso y paciencia a lo largo de mi formación. Cada lección impartida, cada proyecto guiado y cada consejo brindado han sido pilares fundamentales en mi desarrollo como futura ingeniera. Su entrega y pasión por la enseñanza, así como por la Ingeniería Civil, han constituido una fuente permanente de motivación e inspiración para continuar aprendiendo y superándome.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
AYACUCHO - PERÚ , DICIEMBRE 2025

Angel Ircañaupa Huamani

Resumen

La presente investigación evalúa el comportamiento aerodinámico y estructural del Monumento Histórico Obelisco de la Pampa de Quinua, con el objetivo principal de determinar las causas mecánicas del desprendimiento progresivo de sus revestimientos pétreos frente a cargas eólicas extremas. Se empleó un enfoque cuantitativo de diseño no experimental transversal, apoyado en simulación computacional multifísica de interacción fluido-estructura (One-Way FSI). El análisis de la dinámica de fluidos (CFD) se desarrolló en el software ANSYS Fluent, aplicando el modelo de turbulencia $k - \omega$ SST para simular velocidades de viento de 60, 120 y 180 km/h. Posteriormente, el campo de presiones obtenido fue exportado al módulo Static Structural (MEF) para cuantificar los esfuerzos en el núcleo de concreto.

Los resultados numéricos fueron contrastados con el cálculo analítico estático de la Norma Técnica Peruana E.020. Mientras la normativa asume exclusivamente un empuje frontal, la simulación reveló que la geometría escalonada induce una fuerte separación del flujo, generando fuerzas críticas de tracción (succión aerodinámica) en las aristas y caras de sotavento. A nivel estructural, bajo el escenario extremo de 180 km/h, se registró un esfuerzo equivalente de Von Mises máximo en la base de 7,028.5 Pa (0.007 MPa) y una deformación máxima de 1.3074×10^{-6} m. Se concluye que los esfuerzos eólicos representan menos del 0.1 % de la capacidad elástica del material ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$), garantizando la estabilidad global del monumento. El daño en el revestimiento se justifica físicamente por fatiga mecánica debida a la succión aerodinámica local, un fenómeno subestimado por los métodos de diseño tradicionales.

Estos resultados fueron validados mediante la comparación de las líneas de corriente obtenidas experimentalmente, evidenciando una concordancia adecuada entre la simulación numérica y el comportamiento real del flujo. En conclusión, el empleo de ANSYS permitió realizar un análisis multifísico integral, combinando la dinámica de fluidos computacional con el análisis estructural, demostrando su eficacia para evaluar el desempeño estructural frente a la acción del viento.

Palabras clave : Aerodinámica estructural, CFD, Método de Elementos Finitos, Interacción fluido-estructura, Succión eólica, Conservación patrimonial.

Abstract

The present research evaluates the aerodynamic and structural behavior of the historical monument Obelisco de la Pampa de Quinoa, with the main objective of determining the mechanical causes of the progressive detachment of its stone cladding under extreme wind loads. A quantitative, non-experimental, cross-sectional design approach was employed, supported by multiphysics computational fluid-structure interaction (One-Way FSI) simulation. The computational fluid dynamics (CFD) analysis was developed in ANSYS Fluent software, applying the $k - \omega$ SST turbulence model to simulate wind velocities of 60, 120, and 180 km/h. Subsequently, the obtained pressure field was exported to the Static Structural module (FEM) to quantify the stresses in the concrete core.

The numerical results were compared with the static analytical calculation of the Peruvian Technical Standard E.020. While the standard exclusively assumes a frontal thrust, the simulation revealed that the stepped geometry induces a strong flow separation, generating critical tensile forces (aerodynamic suction) on the edges and leeward faces. Structurally, under the extreme scenario of 180 km/h, a maximum equivalent Von Mises stress at the base of 7,028.5 Pa (0.007 MPa) and a maximum deformation of 1.3074×10^{-6} m were recorded. It is concluded that the wind stresses represent less than 0.1 % of the elastic capacity of the material ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$), guaranteeing the global stability of the monument. The damage to the cladding is physically justified by mechanical fatigue due to local aerodynamic suction, a phenomenon underestimated by traditional design methods.

These results were validated through the comparison of streamlines developed experimentally, showing good agreement between numerical simulation and real flow behavior. In conclusion, the use of ANSYS enabled a comprehensive multiphysics analysis, combining computational fluid dynamics with structural analysis, demonstrating its effectiveness in evaluating structural performance under wind action.

Keywords : Structural aerodynamics, CFD, Finite Element Method, Fluid-structure interaction, Wind suction, Heritage conservation.

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Índice general	VI
Índice de figuras	X
I: Introducción	1
1.1. Antecedentes.	1
1.1.1. Investigaciones internacionales.	1
1.1.2. Investigaciones nacionales.	2
1.2. Descripción del problema.	3
1.3. Delimitación del problema.	4
1.3.1. Espacial (geográfica).	4
1.3.2. Temporal.	4
1.3.3. Temática y unidad de análisis.	4
1.4. Formulación del problema.	5
1.4.1. Problema general.	5
1.4.2. Problemas específicos.	5
1.5. Justificación e importancia.	6
1.5.1. Justificación Técnica	6
1.5.2. Justificación Social y Cultural	6
1.5.3. Justificación Económica y Práctica	6
1.5.4. Importancia Metodológica	7
1.6. Limitaciones de la investigación.	7
1.6.1. Limitaciones de Acceso y Ensayos Destructivos	7
1.6.2. Limitaciones de Información Meteorológica In Situ	7
1.6.3. Limitaciones de Geometría y Simplificación del Modelo	7
1.6.4. Limitaciones Temporales y Operativas	8
1.7. Objetivos.	8
1.7.1. Objetivo general.	8
1.7.2. Objetivos específicos.	8
II: Marco Teórico	9

2.1.	Bases teóricas de la Mecánica de Fluidos y Aerodinámica	9
2.1.1.	El viento como un fluido	9
2.1.1.1.	Ecuación de Bernoulli	9
2.1.1.2.	Tipos de vientos	10
2.1.1.3.	Vientos locales especiales y locales sostenidos	11
2.1.1.4.	Fuerzas sobre estructura debido al viento	12
2.1.1.5.	Efectos del viento sobre estructuras	12
2.1.2.	Parámetros aerodinámicos	13
2.1.2.1.	Numero de Reynolds	13
2.1.2.2.	Número de Strouhal	14
2.1.3.	Tiempo que dura la velocidad promedio del viento	14
2.1.4.	Modelos matemáticos para definir la función del viento	14
2.1.5.	Velocidad promedio del viento	15
2.1.6.	Presión generada por el Viento	15
2.1.7.	Turbulencia en vientos	16
2.1.7.1.	Simulación de la turbulencia	16
2.1.8.	Ansys CFD fluido	17
2.1.8.1.	Túnel de viento	17
2.1.8.2.	Aplicación del túnel de viento en la ingeniería civil	18
2.1.8.3.	Definición y modelado geométrico del dominio compu- tacional	19
2.2.	Marco conceptual	20
2.2.1.	Viento en la atmosfera	20
2.2.1.1.	Fuerza de gradiente en de presión	20
2.2.1.2.	Fuerza de coriolisis	21
2.2.1.3.	Viento geostrofico	21
2.2.1.4.	Fuerza centrifuga	22
2.2.1.5.	Viento gradiente	22
2.2.1.6.	Viento ciclostrofico	23
2.2.1.7.	Viento inercial	23
2.2.1.8.	Fuerza de fricción	24
2.2.2.	El viento y sus características en el Perú	24
2.2.3.	Diferencia entre ráfagas y vientos	25
2.2.4.	Movimiento del viento	26
2.2.4.1.	Brisas marinas	26
2.2.4.2.	Vientos en valles y montañas	27
2.3.	Conservación estructural de monumentos frente a cargas eólicas	28
2.3.1.	Vulnerabilidad aerodinámica en el patrimonio histórico esbelto	28
2.3.2.	Efectos de la succión y fatiga en revestimientos pétreos	29
2.4.	Fundamentación matemática del modelo computacional	29
2.4.1.	Ecuaciones gobernantes en la Dinámica de Fluidos Computacio- nal (CFD)	30
2.4.1.1.	Ecuaciones de Navier-Stokes	30
2.4.1.2.	Modelo de turbulencia $k - \omega$ SST	30
2.4.1.3.	Método de Volúmenes Finitos (FVM)	31
2.4.2.	Teoría del Método de Elementos Finitos (MEF) en el análisis es- tructural	31

2.4.2.1.	Discretización y ecuaciones de rigidez	31
2.4.2.2.	Criterio de falla elástica de Von Mises	32
2.4.3.	Definición de términos básicos	32
III:	Materiales y métodos	34
3.1.	Enfoque.	34
3.2.	Alcance de la investigación.	35
3.2.1.	Propósito de la investigación	35
3.2.1.1.	Investigación Aplicada	35
3.2.2.	Profundidad de la investigación:	35
3.2.2.1.	Investigación explicativa	35
3.2.3.	Duración del tiempo de investigación:	35
3.2.3.1.	Investigación transversal	35
3.2.4.	Tipo de Inferencia en Metodología	36
3.2.4.1.	Investigación inductiva	36
3.2.5.	Grado de control y manipulación:	36
3.2.5.1.	Investigación no experimental o de simulación	36
3.3.	Diseño de investigación	36
3.3.1.	Diseño cuantitativo	36
3.3.2.	Diseño de investigación no experimental transversal	36
3.4.	Población y muestra.	37
3.4.1.	Población	37
3.4.2.	Muestra	37
3.5.	Hipótesis.	37
3.5.1.	Hipótesis general.	38
3.5.2.	Hipótesis específicas.	38
3.6.	Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.	38
3.7.	Técnicas e instrumentos.	38
3.8.	Técnicas para el procesamiento de la información.	40
3.9.	Desarrollo del trabajo de tesis	41
3.9.1.	Obelisco de la Pampa de Ayacucho	41
3.9.2.	Velocidad de viento para simulación	42
3.9.3.	Dominio Computacional y Condiciones de Contorno	44
3.9.3.1.	Condiciones de Contorno	44
3.9.4.	Cálculo del Número de Reynolds (Re):	45
3.9.5.	Malla y Convergencia	45
3.9.5.1.	Discretización Espacial (Malla):	45
3.9.5.2.	Independencia de Malla y Convergencia:	45
3.9.6.	Ejecutar el análisis	45
IV:	Resultados y discusiones	56
4.1.	Descripción de la zona de estudio	56
4.2.	Análisis Analítico Estático según Norma Técnica Peruana E.020	58
4.2.1.	Idealización de la Estructura para el Modelo Matemático	58
4.2.2.	Clasificación frente al Viento y Velocidad de Diseño	59
4.2.3.	Presión y Carga Lineal de Viento	59
4.2.4.	Resultados Analíticos para $V = 120$ km/h	60
4.3.	Resultados de la primera simulación $V=60$ km/h	62

4.3.1.	Campo de Velocidades obtenidas	62
4.3.2.	Campo de presiones obtenidas	63
4.3.3.	Trayectoria de las líneas de corriente	65
4.4.	Resultados de la primera simulación V=120km/h	66
4.4.1.	Campo de Velocidades obtenidas	66
4.4.2.	Campo de presiones obtenidas	68
4.4.3.	Trayectoria de las líneas de corriente	70
4.5.	Resultados de la primera simulación V=180km/h	71
4.5.1.	Campo de Velocidades obtenidas	71
4.5.2.	Campo de presiones obtenidas	72
4.5.3.	Trayectoria de las líneas de corriente	73
4.6.	Importación de las presión de viento desde Fluent a Static Structural	74
4.7.	Evaluación para vientos con V=60km/h	77
4.8.	Evaluación para vientos con V=120km/h	80
4.9.	Evaluación para vientos con V=180km/h	83
4.10.	Validación de los resultados	86
4.10.1.	Procedimiento	86
4.10.2.	Lineas de corriente para Vientos de 60km/hr	87
4.10.3.	Lineas de corriente para Vientos de 120km/hr	89
4.10.4.	Lineas de corriente para Vientos de 180km/hr	91
4.11.	Discusión de los resultados	93
V:	Conclusiones	96
VI:	Recomendaciones	98

Índice de figuras

2.1. Principio de Bernoulli	10
2.2. Tipos de vientos	11
2.3. Vientos locales	11
2.4. Fuerzas sobre estructura debido al viento	12
2.5. Parámetros aerodinámicos	13
2.6. Velocidad promedio del viento en la costa del Perú	15
2.7. Turbulencia	16
2.8. Formas de ondas de choque para diferentes modelos de turbulencia	17
2.9. Túnel de viento	17
2.10. Presiones en las fachadas	18
2.11. Fuerzas que ejerce el viento en un puente	18
2.12. Fuerzas que ejerce el viento en una torre de comunicación.	19
2.13. CFD aplicado a vehículos para diseño aerodinámico	19
2.14. CFD aplicado a vehículos para diseño aerodinámico	20
2.15. Efecto Coriolis en la franja ecuatorial	21
2.16. Representación del viento geostrofico	22
2.17. Representación de la fuerza centrífuga	22
2.18. Representación el viento gradiente en los sistemas de alta y baja presión	23
2.19. Representación Viento Ciclostrófico en el Hemisferio Norte	23
2.20. Representación del viento inercial en el Hemisferio Norte	24
2.21. Representación de cizalladura horizontal del viento por diferencias de velocidad.	24
2.22. Mapa de velocidad promedio del viento en Perú. Velocidad del viento a 100 metros sobre el nivel del suelo	25
2.23. Brisa de mar	26
2.24. Viento Anabático	27
2.25. Representación del viento catabático.	28
3.26. Representación de la población	37
3.27. Técnicas para el procesamiento de la información	40
3.28. Diagrama de trabajo Ansys Fluent	41
3.29. Diagrama de trabajo Ansys Static Structural	41
3.30. El Obelisco Modelo Solido 3D	42
3.31. Velocidad de viento identificado	43
3.32. Rosa de vientos Pampa de Quinua	43
3.33. Dirección de viento	44
3.34. Secuencia de análisis Obelisco de la Pampa de Quinua	46
3.35. Modelo 3D Obelisco de la Pampa de Quinua	47

3.36. Modelo 3D del campo de flujo	48
3.37. Enmallado del campo de flujo	49
3.38. Definición de las caras del modelo	50
3.39. Configuración de los condiciones iniciales	51
3.40. Configuración del análisis estructural estático	52
3.41. Incorporación de la presión del viento hacia al Obelisco	53
3.42. Configuración de condiciones de apoyo empotrado	54
3.43. Configuración de condiciones de apoyo empotrado	55
4.44. Vista panorámica de la identificación de la geometría del modelo a simular	57
4.45. Modelo representativo del Obelisco	58
4.46. Cálculo de centro de aplicación de la fuerza resultante	61
4.47. Velocidades obtenidas con la simulación de viento de 60Km/h	62
4.48. Presiones obtenidas con la simulación de viento de 60Km/h	63
4.49. Presiones obtenidas, Modelo 3D, viento de 60Km/h	64
4.50. Trayectorias de las líneas de corriente, viento de 60Km/h	65
4.51. Velocidades obtenidas con la simulación de viento de 120Km/h	67
4.52. Presiones obtenidas con la simulación de viento de 120Km/h	68
4.53. Presiones obtenidas, Modelo 3D, viento de 120Km/h	69
4.54. Trayectorias de las líneas de corriente, viento de 120Km/h	70
4.55. Velocidades obtenidas con la simulación de viento de 180Km/h	71
4.56. Presiones obtenidas con la simulación de viento de 180Km/h	72
4.57. Presiones obtenidas, Modelo 3D, viento de 180Km/h	73
4.58. Trayectorias de las líneas de corriente, viento de 180Km/h	74
4.59. Interacción Ansys Fluent y Ansys Structure Static	75
4.60. Nuevo enmallado en Ansys Structure Static	76
4.61. Deformaciones totales para vientos con V=60km/h	77
4.62. Esfuerzos totales para vientos con V=60km/h	78
4.63. Deformaciones en X para vientos con V=60km/h	79
4.64. Deformaciones totales para vientos con V=120km/h	80
4.65. Esfuerzos totales para vientos con V=120km/h	81
4.66. Deformaciones en X para vientos con V=120km/h	82
4.67. Deformaciones totales para vientos con V=180km/h	83
4.68. Esfuerzos totales para vientos con V=180km/h	84
4.69. Deformaciones en X para vientos con V=180km/h	85
4.70. Experimento a escala para evaluar las líneas de corriente	86
4.71. Experimento: Perfil líneas de corriente V=60km/h	87
4.72. Simulación: Perfil Líneas de corriente V=60km/h	88
4.73. Experimento: Planta Líneas de corriente V=60km/h	89
4.74. Simulación: Planta Líneas de corriente V=60km/h	89
4.75. Experimento: Perfil Líneas de corriente V=120km/h	90
4.76. Simulación: Planta Líneas de corriente V=120km/h	90
4.77. Experimento: Planta Líneas de corriente V=120km/h	91
4.78. Simulación: Planta Líneas de corriente V=120km/h	91
4.79. Experimento: Perfil Líneas de corriente V=180km/h	92
4.80. Simulación: Planta Líneas de corriente V=180km/h	92
4.81. Experimento: Planta Líneas de corriente V=180km/h	93
4.82. Simulación: Planta Líneas de corriente V=180km/h	93

I: Introducción

1.1. Antecedentes.

1.1.1. Investigaciones internacionales.

El estudio de la interacción del viento con las estructuras civiles ha sido una preocupación constante en la ingeniería, evolucionando desde aproximaciones normativas estáticas hacia análisis dinámicos complejos. En las primeras décadas del siglo XXI, Comarazamy, 2005 y del mismo modo Fleming, 2015 sentaron las bases teóricas al identificar que la presencia de edificaciones en el entorno urbano altera el flujo del aire (efecto Venturi) y provoca turbulencias que afectan tanto las caras a barlovento como a sotavento. Estos autores coincidieron en que el aumento inusual de las turbulencias en la parte posterior de las edificaciones es causado por factores geométricos, lo que resulta crítico para estructuras esbeltas, incrementando significativamente las fuerzas de succión localizadas.

Históricamente, la falta de data meteorológica local ha representado una limitante en la región sudamericana. Yugcha, 2009 advirtió en su investigación en Ecuador que, ante la ausencia de registros reales de velocidades de viento, los ingenieros solían asumir erróneamente datos extranjeros, derivando en fallas estructurales por no considerar la presión eólica o por diseños ciegos ante los efectos aerodinámicos reales. Esta problemática se extiende al análisis de infraestructuras mayores, como lo señaló Petersson, 2014 en su estudio comparativo para el Puente del Abra del Yumurí, donde demostró que las metodologías de cálculo estático varían drásticamente en los resultados de solicitaciones según el código empleado. En esa misma línea, de León, 2014 propuso que la validación aerodinámica, contrastada con normativas civiles, es la vía indispensable para optimizar tanto la seguridad como los costos.

Recientemente, la tendencia mundial ha migrado hacia la digitalización mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Investigaciones actuales, como las de Thuminda Wijesooriya, 2024, han validado el uso de modelos de turbulencia avanzados (híbridos RANS-LES) para predecir presiones en estructuras súper altas, demostrando que las simulaciones CFD superan las limitaciones de los ensayos físicos al proporcionar un mapeo detallado de presiones en todas las caras de la estructura. Asimismo, Zhou, 2024 y diversos estudios sobre patrimonio histórico en Estados Unidos y Europa han comenzado a aplicar herramientas CFD para analizar el impacto microclimático y eólico en monumentos protegidos por la UNESCO. Estas investigaciones destacan que las geometrías complejas e irregulares (tales como obeliscos o templos antiguos) generan patrones de vorticidad que las normas estáticas convencionales son incapaces de

predecir con exactitud.

Esta evolución internacional evidencia un claro vacío metodológico en el contexto peruano. Mientras que a nivel global la preservación de monumentos históricos ya emplea simulaciones multifísicas para diagnosticar el deterioro por cargas aerodinámicas, en el Perú el análisis de estructuras patrimoniales singulares —como el Obelisco de la Pampa de Quinua— sigue dependiendo mayoritariamente de métodos estáticos simplificados que no contemplan la complejidad aerodinámica de la forma, la separación del flujo, ni las presiones negativas que afectan los revestimientos superficiales.

1.1.2. Investigaciones nacionales.

En el ámbito de la ingeniería estructural peruana, la evaluación de cargas ambientales ha transitado progresivamente desde métodos estáticos simplificados hacia análisis dinámicos computacionales. Esta tendencia responde a la necesidad de predecir con mayor exactitud el comportamiento de las estructuras ante ráfagas y eventos climáticos extremos, los cuales no siempre son cubiertos adecuadamente por los coeficientes globales estáticos de la Norma Técnica Peruana E.020. Al respecto, Ruiz, 2023, en su investigación sobre el comportamiento dinámico de estructuras de 14 niveles en la ciudad de Trujillo, demostraron que la aplicación de normativas internacionales (ASCE 7-22) y análisis dinámicos revelan solicitaciones de presión localizadas y desplazamientos que los métodos convencionales peruanos suelen subestimar.

En la misma línea, Espino, 2023 realizaron un análisis comparativo entre la norma E.020, la norma americana ASCE/SEI 7-16 y simulaciones en túnel de viento virtual (CFD) para edificios altos en Lima. Sus resultados determinaron que, si bien el sismo sigue siendo la fuerza dominante en el diseño global, la incidencia del viento genera momentos torsores y presiones críticas en direcciones oblicuas (45° y 135°) que incrementan las solicitaciones hasta un 20 %, superando incluso las excentricidades sísmicas reglamentarias. Este hallazgo es fundamental para la presente investigación, pues evidencia empíricamente que, en estructuras esbeltas, el flujo del viento es capaz de generar fallas locales y vibraciones severas en las superficies exteriores, fenómenos no contemplados por el diseño sísmico tradicional.

Sin embargo, al intentar trasladar este rigor aerodinámico al patrimonio histórico edificado, se evidencia un profundo vacío en la literatura nacional. Si bien existen esfuerzos institucionales recientes, como el "Plan de Acción ante Riesgos por Sismos en el Patrimonio Histórico 2024-2025" del Ministerio de Cultura, e investigaciones como la de Villar, 2024 enfocadas en la vulnerabilidad ante inundaciones pluviales, la amenaza eólica ha sido relegada sistemáticamente a un segundo plano.

Históricamente, la mayoría de las intervenciones de conservación en monumentos se centran en el refuerzo sísmico o la protección contra la humedad estática. En consecuencia, se ignora que estructuras singulares, altamente esbeltas y carentes de protección topográfica, como el Obelisco de la Pampa de Quinua, enfrentan una constante y agresiva interacción fluido-estructura. Su geometría irregular genera campos de succión aerodinámica que exigen un mapeo especializado de presiones (CFD) para diagnosticar patologías en el revestimiento, requiriendo la misma rigurosidad científica y tecnológica que hoy en día se aplica a los modernos edificios de gran altura.

1.2. Descripción del problema.

La conservación de estructuras monumentales esbeltas enfrenta un desafío crítico frente a la acción de cargas ambientales dinámicas. A diferencia de las edificaciones convencionales, los monumentos históricos poseen geometrías singulares y materiales que responden de manera compleja ante fenómenos como el viento. Si bien la normativa peruana E.020 Cargas^{es} establece parámetros estáticos para el diseño eólico, estos resultan insuficientes para predecir el comportamiento aerodinámico en estructuras de gran altura y forma irregular, donde la turbulencia y los efectos de vorticidad pueden acelerar procesos patológicos no previstos en un análisis lineal simplificado.

En el contexto específico de la región Ayacucho, el Monumento Conmemorativo de la Batalla de Ayacucho (Obelisco) se sitúa en el Santuario Histórico de la Pampa de la Quinua, una planicie abierta a 3,396 m.s.n.m., caracterizada por su exposición directa a corrientes de aire sin obstrucciones naturales que mitiguen su impacto. Estudios técnicos recientes realizados in situ para el expediente técnico de la IOARR (CUI 2456689) han registrado que, en las zonas despejadas del santuario, se presentan vientos secos y fríos con velocidades que oscilan entre los 20 y 30 m/s, los cuales actúan de manera constante sobre las superficies del monumento.

Esta carga eólica constante ha generado una problemática de deterioro progresivo claramente identificada. El diseño del obelisco, definido como una escultura geométrica con planos de distinta pendiente, escalonamientos y aristas vivas, altera significativamente el flujo del viento. Esta interacción fluido-estructura genera turbulencias locales severas y zonas de alta presión negativa (succión aerodinámica) en las caras de sotavento.

La evidencia física del problema se manifiesta en las patologías documentadas. Se ha reportado el desprendimiento de hasta un 12 % de las piezas de revestimiento de mármol travertino, meteorización del material pétreo y oxidación de elementos metálicos en los anclajes superiores (a 44 metros de altura). Estas lesiones sugieren fuertemente que las cargas de viento no solo actúan como un empuje frontal estático, sino que las presiones de succión y las vibraciones inducidas crean un ambiente mecánicamente hostil que fatiga los elementos de fijación no estructurales.

A pesar de que el Estado, a través del Ministerio de Cultura, ha ejecutado intervenciones de reparación y mantenimiento (IOARR 2023-2024), estas acciones han sido históricamente correctivas y no preventivas, enfocándose en reponer el material caído sin abordar la causa aerodinámica subyacente. Actualmente, existe una carencia absoluta de estudios especializados que modelen el comportamiento del viento sobre la geometría específica de este monumento. No se cuenta con mapas de presión que identifiquen los focos de succión extrema, ni análisis que verifiquen si los esfuerzos mecánicos inducidos por estas ráfagas comprometen la estabilidad global del núcleo de concreto armado.

La necesidad de esta investigación se hace aún más urgente ante el escenario climático actual. Reportes locales recientes han alertado sobre el incremento de "vientos huracanados"^{en} la provincia de Huamanga, lo que sugiere que las solicitaciones eólicas podrían estar intensificándose. Por tanto, la falta de una evaluación aerodinámica y estructural precisa mediante herramientas avanzadas (CFD y MEF) deja al Obelisco de

la Pampa de Quinua en una situación de vulnerabilidad técnica, donde el origen mecánico del desprendimiento de sus revestimientos seguirá siendo incomprendido y las reparaciones resultarán ineficaces a largo plazo.

1.3. Delimitación del problema.

La presente investigación se circunscribe al análisis del comportamiento aerodinámico y estructural de una edificación patrimonial de geometría singular, sometida a cargas de viento en un entorno de alta exposición. A diferencia de los estudios convencionales en edificios regulares, este trabajo aborda la interacción fluido-estructura en un monumento histórico donde la preservación de la materialidad y la estabilidad de elementos ornamentales son prioritarios. El estudio se delimita en los siguientes ámbitos:

1.3.1. Espacial (geográfica).

El área de estudio corresponde al Santuario Histórico de la Pampa de Ayacucho, ubicado específicamente en el distrito de Quinua, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, en las coordenadas geográficas 13°02'56" S y 74°08'22" O. El objeto de análisis es el Monumento Conmemorativo de la Batalla de Ayacucho (Obelisco), una estructura de mármol travertino de 44 metros de altura total, emplazada sobre una base de 19 x 14 metros a una altitud aproximada de 3,396 m.s.n.m.. Esta ubicación, al pie del Cerro Condorcunca y en una planicie abierta, expone al monumento a corrientes de viento directas y constantes, características de la geografía local que no cuenta con barreras naturales de protección inmediata.

1.3.2. Temporal.

El estudio abarca el periodo 2024-2025, lapso durante el cual se desarrollarán los modelos de simulación. Este marco temporal es crítico debido al registro reciente de fenómenos climáticos extremos en la región, como los vientos huracanados reportados en agosto y noviembre de 2024, que han evidenciado la vulnerabilidad de la infraestructura patrimonial en Ayacucho. Asimismo, se toma como línea base el estado de conservación documentado en el Expediente Técnico de la IOARR aprobado en 2023, que identifica lesiones activas por erosión e infiltración pluvial asociadas al viento.

1.3.3. Temática y unidad de análisis.

La investigación se centra en la ingeniería eólica computacional aplicada al patrimonio. Temáticamente, se limita a la evaluación de las presiones de viento y su impacto en la estabilidad del revestimiento de mármol y los anclajes de elementos metálicos (escudos y relieves de bronce) del Obelisco. Para ello, se empleará la metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando el software ANSYS Fluent, una herramienta que permite modelar flujos turbulentos alrededor de geometrías complejas con mayor precisión que los métodos estáticos tradicionales normados. Esta aproximación tecnológica se alinea con las tendencias internacionales recientes para la evaluación no

destruccion de estructuras históricas, donde la simulación digital permite predecir zonas de succión y fatiga sin intervenir físicamente el monumento.

1.4. Formulación del problema.

El Monumento Conmemorativo de la Batalla de Ayacucho, con una altura total de 44.00 metros y una geometría irregular compuesta por una base troncopiramidal y un obelisco escalonado, se encuentra emplazado en una zona geográfica caracterizada por ráfagas de viento que alcanzan velocidades de entre 20 y 30 m/s. La evidencia técnica recabada en el expediente de la IOARR (CUI 2456689) indica que el revestimiento de mármol travertino presenta un desprendimiento del 12 % y meteorización activa, patologías que sugieren que las cargas de viento no solo actúan como fuerzas de empuje lateral, sino que generan presiones de succión y vibraciones que el diseño estático original no logra mitigar eficientemente.

Considerando que la normativa E.020 simplifica el análisis a cargas estáticas y que la geometría del monumento genera turbulencias complejas no lineales, resulta imperativo determinar mediante simulación computacional cómo se distribuyen realmente estas presiones sobre las placas de revestimiento para prevenir el colapso de los elementos ornamentales.

1.4.1. Problema general.

¿De qué manera influye la acción del viento, modelada mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), en el comportamiento aerodinámico y la respuesta estructural del Monumento Histórico del Obelisco de la Pampa de Quinua, y cuál es su incidencia en la estabilidad aerodinámica y estructural de la edificación principal bajo las condiciones climáticas registradas en 2024?

1.4.2. Problemas específicos.

- ¿Cómo se distribuyen los coeficientes de presión y las zonas de vorticidad alrededor de la geometría escalonada del obelisco al someterlo a velocidades de viento críticas, y en qué medida difieren estos resultados de los parámetros estáticos establecidos en la Norma Técnica E.020?
- ¿Cuál es la magnitud de los esfuerzos equivalentes y las deformaciones máximas generadas en la edificación principal debido a las cargas dinámicas del viento extremo?
- ¿En qué medida la simulación multifísica permite identificar las zonas críticas de succión aerodinámica que explican físicamente las patologías superficiales documentadas en el diagnóstico del monumento?

1.5. Justificación e importancia.

La presente investigación se justifica en la necesidad imperativa de comprender el comportamiento aerodinámico y estructural del patrimonio edificado frente a cargas ambientales extremas, desglosándose en los siguientes ámbitos:

1.5.1. Justificación Técnica

La presente investigación se justifica en la necesidad de superar las limitaciones de los métodos estáticos convencionales (Norma E.020) para la evaluación de estructuras de geometría singular. El Obelisco de la Pampa de Quinoa, con una altura de 44.00 metros y una configuración escalonada irregular, se encuentra expuesto a vientos secos y fríos con velocidades de 20 a 30 m/s. Estas condiciones generan fenómenos aerodinámicos complejos, como turbulencia y desprendimiento de vórtices, que no pueden ser cuantificados con precisión mediante cálculos manuales. El uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitirá modelar la interacción real del viento sobre las placas de mármol travertino, identificando las zonas de succión crítica que actualmente contribuyen al desprendimiento del 12% del revestimiento y a la erosión mecánica reportada en el diagnóstico técnico.

1.5.2. Justificación Social y Cultural

El monumento posee un valor incalculable como símbolo de identidad nacional, declarado Patrimonio Cultural de la Nación mediante la Resolución Viceministerial N°092-2018-VMPCIC-MC, al conmemorar la batalla que selló la independencia de Sudamérica. Sin embargo, el deterioro actual compromete no solo la estética del bien, sino la seguridad de los visitantes. El desprendimiento de piezas de mármol y la inestabilidad de elementos ornamentales de bronce, como los escudos y altos relieves, representan un riesgo latente para el turismo en el Santuario Histórico. Esta investigación aporta una base científica para garantizar la estabilidad estructural del monumento, asegurando su preservación para las futuras generaciones en el marco de las celebraciones del Bicentenario y cumpliendo con el deber estatal de protección del patrimonio.

1.5.3. Justificación Económica y Práctica

Desde una perspectiva económica, la gestión del monumento ha dependido históricamente de intervenciones correctivas costosas y recurrentes, como la IOARR con CUI 2456689 ejecutada entre 2023 y 2024. Estas reparaciones suelen atacar los síntomas (resane de grietas, pintura de elementos oxidados) y no las causas estructurales. Al determinar con exactitud cómo las cargas de viento aceleran el ingreso de humedad y la fatiga de los materiales, este estudio permitirá transitar hacia un modelo de mantenimiento predictivo. Esto optimizará la inversión pública al enfocar los recursos en el refuerzo de las zonas aerodinámicamente vulnerables, reduciendo la frecuencia de las reparaciones mayores y prolongando la vida útil de los materiales de revestimiento.

1.5.4. Importancia Metodológica

Este trabajo constituirá un precedente académico en la región Ayacucho sobre la aplicación de tecnologías de simulación digital (ANSYS Fluent) en la conservación del patrimonio edificado. Al validar un modelo computacional con datos reales del entorno de Quinua, se generará una metodología replicable para el análisis de otros monumentos históricos expuestos a condiciones climáticas severas, cerrando la brecha existente entre la ingeniería estructural moderna y la conservación restaurativa.

1.6. Limitaciones de la investigación.

1.6.1. Limitaciones de Acceso y Ensayos Destructivos

Dado que el Obelisco de la Pampa de la Quinua está declarado como Patrimonio Cultural de la Nación mediante la Resolución Viceministerial N°092-2018-VMPCIC-MC, la investigación se encuentra restringida en cuanto a la ejecución de ensayos de campo invasivos. No es factible realizar extracciones de núcleos en el revestimiento de mármol travertino o en la estructura de concreto armado para determinar sus propiedades mecánicas actuales, ya que esto contraviene los principios de conservación y la normativa de protección del Ministerio de Cultura. Por consiguiente, los parámetros de los materiales para la simulación se basarán en las especificaciones del expediente técnico IOARR CUI 2456689 y en tablas normativas referenciales para materiales de esa antigüedad, asumiendo una homogeneidad que podría variar en la realidad debido a las patologías existentes.

1.6.2. Limitaciones de Información Meteorológica In Situ

Si bien la Memoria Descriptiva de Arquitectura del monumento registra velocidades de viento secos y fríos de entre 20 y 30 m/s en las zonas despejadas del Santuario Histórico, no existe una estación meteorológica instalada permanentemente sobre la estructura del obelisco a su altura máxima de 44.00 metros. La investigación utilizará datos meteorológicos regionales y mediciones puntuales del periodo 2024-2025 para alimentar el modelo computacional. Por tanto, las micro variaciones de turbulencia generadas por la topografía específica del Cerro Condorcunca serán aproximadas mediante los modelos de turbulencia del software ANSYS Fluent, asumiendo un perfil de viento logarítmico estándar.

1.6.3. Limitaciones de Geometría y Simplificación del Modelo

El monumento presenta una complejidad artística elevada, incluyendo elementos escultóricos de bulto redondo y altorrelieves de bronce (como las estatuas de los generales y la alegoría de la fama). Para efectos de la simulación CFD, estos elementos ornamentales irregulares serán simplificados volumétricamente dentro del modelo digital. Esta simplificación es necesaria para garantizar la convergencia de la malla computacional y la viabilidad del cálculo numérico, asumiendo que el impacto aerodinámico de los detalles artísticos menores es despreciable frente al comportamiento global de los volúmenes principales (basamento, pedestal y obelisco).

1.6.4. Limitaciones Temporales y Operativas

El estudio se limita a evaluar la interacción del viento en la condición actual del monumento (2024-2025), considerando las lesiones identificadas en el diagnóstico reciente, como el desprendimiento de placas y erosión de juntas. No se realizará un análisis histórico de la degradación acumulada desde su construcción en 1974, ni se proyectarán escenarios de cambio climático a largo plazo (50 o 100 años). Asimismo, el análisis se centra exclusivamente en las cargas de viento, excluyendo la interacción simultánea con cargas sísmicas, aunque se reconoce que el sismo es un factor de diseño predominante en la zona.

1.7. Objetivos.

1.7.1. Objetivo general.

El objetivo principal de la investigación esta en relación directa al problema identificado:

- Evaluar la influencia de la acción del viento en el comportamiento aerodinámico y estructural del Monumento Histórico del Obelisco de la Pampa de Quinoa, mediante modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y análisis por Elementos Finitos (FEA), para determinar la distribución de presiones aerodinámicas y verificar la estabilidad global de la estructura principal bajo las condiciones climáticas de 2024.

1.7.2. Objetivos específicos.

- Analizar la distribución de los coeficientes de presión y los patrones de vorticidad alrededor de la geometría escalonada del obelisco sometido a velocidades críticas, contrastando estos resultados dinámicos con los parámetros estáticos establecidos en la Norma Técnica E.020 para identificar discrepancias en las cargas de diseño.
- Determinar la magnitud de los esfuerzos de tracción y las deformaciones máximas inducidas en la edificación principal mediante la transferencia de cargas aerodinámicas al modelo estructural (interacción fluido-estructura), verificando si estas sollicitaciones superan la capacidad resistente del material actual.
- Identificar las zonas críticas de succión aerodinámica (presión negativa) en las caras a sotavento del modelo computacional y correlacionarlas con el mapeo de lesiones del diagnóstico actual, para explicar el mecanismo físico que origina el desprendimiento de las piezas de revestimiento.

II: Marco Teórico

2.1. Bases teóricas de la Mecánica de Fluidos y Aerodinámica

2.1.1. El viento como un fluido

En el ámbito de la ingeniería estructural y la aerodinámica, el viento se conceptualiza y analiza bajo los principios fundamentales de la mecánica de fluidos. Al considerar el aire en movimiento como un medio continuo (fluido incompresible a las velocidades habituales del viento natural), es posible aplicar las ecuaciones que gobiernan el flujo de los fluidos para predecir su comportamiento dinámico. Esta aproximación metodológica es crucial para evaluar la interacción entre las corrientes de aire y las geometrías estructurales, permitiendo determinar con precisión las presiones, succiones y fuerzas aerodinámicas que actúan sobre estructuras esbeltas. De este modo, se trasciende la simple observación meteorológica para aplicar modelos matemáticos que garantizan la seguridad y estabilidad de las edificaciones.

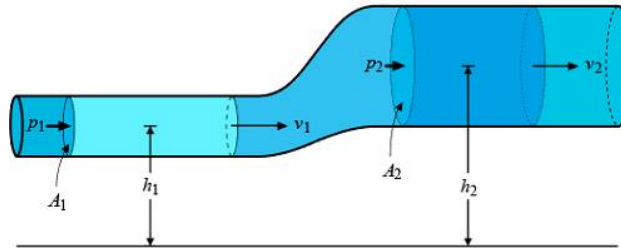
En esta misma línea, Cengel y Cimbala, 2013 sustentan que la teoría del viento como fluido es esencial en la ingeniería civil. Los autores indican que abordar el viento no solo como un fenómeno atmosférico, sino como un flujo de aire sujeto a las leyes de la mecánica de fluidos, permite una evaluación precisa de las cargas eólicas sobre las estructuras, facilitando así un diseño robusto y resistente frente a las exigencias ambientales.

2.1.1.1. Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es consecuencia del principio de conservación de la energía mecánica en un flujo ideal, el cual se supone incompresible, irrotacional, no viscoso y estacionario. Esta ecuación, como se conoce hoy en día, fue derivada por Leonhard Euler, quien determinó matemáticamente que la presión es un campo escalar variable en el espacio y el tiempo Anderson y Eberhardt, 2001. Una de las dificultades en la enseñanza y comprensión de esta ecuación es, por ejemplo, que no se identifica cómo se determinan las presiones que conforman cada término de ella, así como su significado físico Anderson y Eberhardt, 2001. Por ello, brevemente se referirán estos aspectos que deberían considerarse en el estudio de la ecuación de Bernoulli (Ecuación 2.1 y la figura 2.1).

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \quad (2.1)$$

Figura 2.1: Principio de Bernoulli



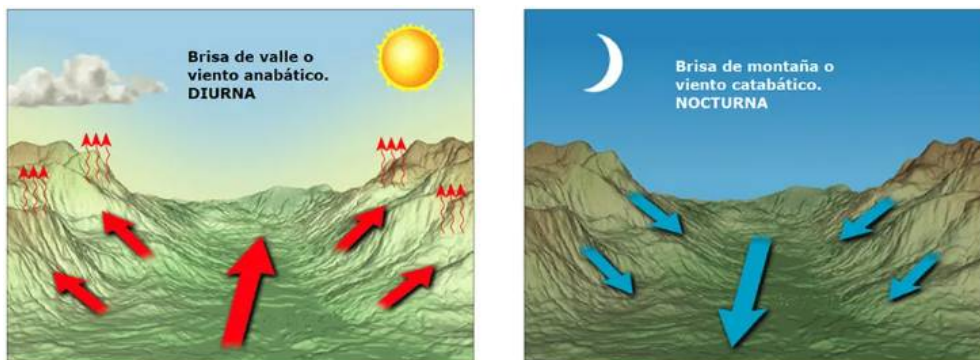
Fuente: <https://www.principiode.com/principio-de-bernoulli/>

2.1.1.2. Tipos de vientos

En ingeniería estructural, los vientos se clasifican en varios tipos según su velocidad y dirección, siendo esenciales para el diseño y la seguridad de estructuras. Las categorías comunes incluyen:

- **Viento Normal o Constante:** Se refiere al viento promedio que se experimenta regularmente en una ubicación específica. Es fundamental para el diseño estructural a largo plazo.
- **Viento Ráfaga:** Caracterizado por ráfagas intermitentes de alta velocidad. Puede tener un impacto significativo en el diseño de estructuras, ya que las ráfagas pueden ejercer fuerzas adicionales.
- **Viento de Frente:** Proviene de la dirección frontal de la estructura y puede ejercer fuerzas considerables en la fachada de un edificio. Es crítico en el diseño de edificios altos.
- **Viento de Flanco:** Impacta lateralmente en la estructura y puede causar vibraciones o movimientos laterales. Debe considerarse en el diseño de puentes y torres.
- **Viento de Cola:** Proviene de la parte trasera de la estructura y puede tener efectos significativos en la estabilidad. Se tiene en cuenta en el diseño de estructuras altas y esbeltas.

Figura 2.2: Tipos de vientos



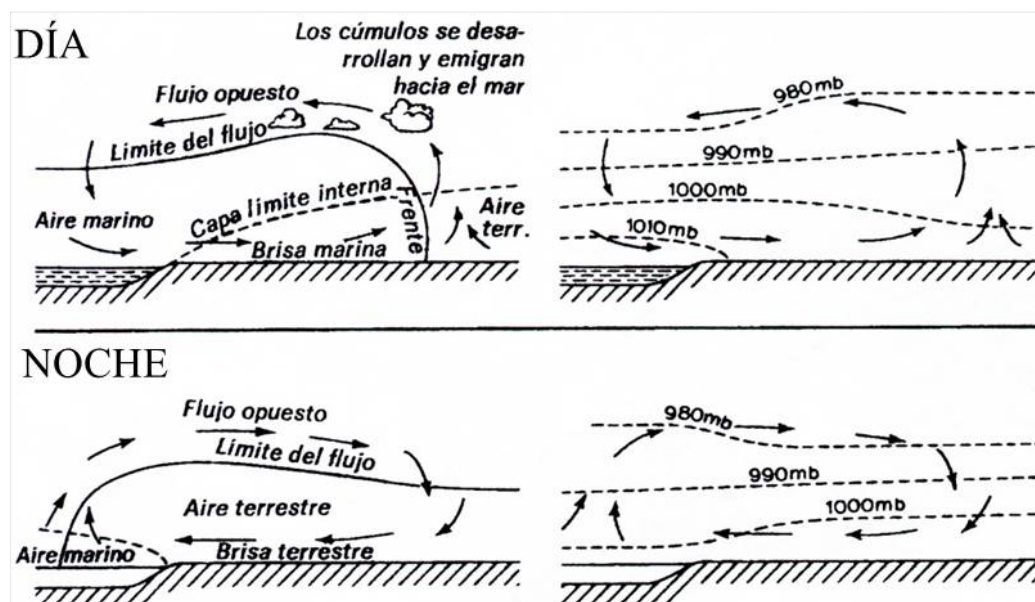
Fuente: <https://www.tiempo.com/noticias/divulgacion/brisas-los-vientos-que-te-refrescan.html>

2.1.1.3. Vientos locales especiales y locales sostenidos

En ingeniería estructural, además de los vientos comunes, se deben tener en cuenta los **vientos locales especiales** y los **vientos locales sostenidos**. Estos fenómenos pueden presentar características únicas y desafíos específicos para el diseño y la seguridad de las estructuras.

- **Vientos Locales Especiales:** Se refiere a patrones de viento particulares en una ubicación específica que pueden estar asociados con condiciones topográficas o fenómenos climáticos locales. Estos vientos pueden requerir consideraciones especiales en el diseño para garantizar la estabilidad de las estructuras.

Figura 2.3: Vientos locales



Fuente: https://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/4_vientos_locales.html

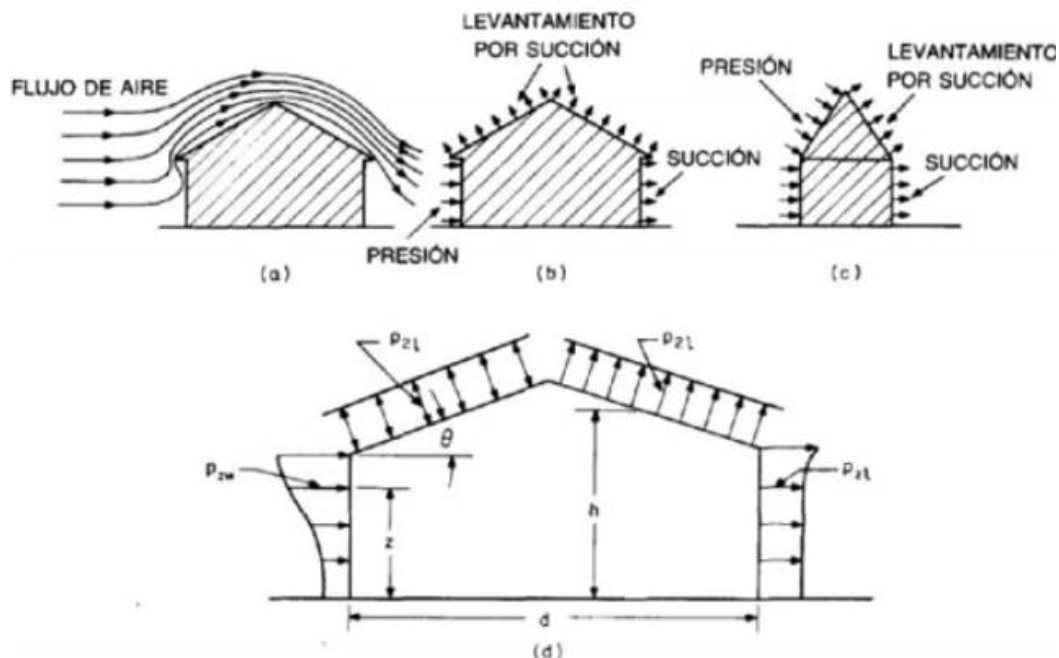
- **Vientos Locales Sostenidos:** Son vientos que persisten durante períodos prolongados y pueden tener un impacto significativo en la resistencia de las estructuras.

Pueden estar relacionados con patrones climáticos regionales o características geográficas locales. El diseño estructural debe tener en cuenta la duración y la intensidad de estos vientos para garantizar la seguridad a largo plazo.

2.1.1.4. Fuerzas sobre estructura debido al viento

Segun Llerena et al., 2021 Las estructuras altas y esbeltas poseen un comportamiento dinámico complejo ante la acción de la carga de viento. Las fuerzas ejercidas sobre una estructura debido al viento se centra en entender cómo el viento puede afectar los edificios y otras construcciones. Cuando el viento sopla, ejerce presión sobre las superficies de los edificios, como las paredes y los techos. Esta presión puede ser fuerte y debe ser tenida en cuenta al diseñar edificios para asegurar que sean lo suficientemente fuertes y seguros.

Figura 2.4: Fuerzas sobre estructura debido al viento



Fuente: <https://ingcivil.org/proteccion-contra-el-viento/>

2.1.1.5. Efectos del viento sobre estructuras

Los ingenieros estudian cómo el viento interactúa con diferentes formas y tamaños de edificaciones. Imagina un edificio como un barco en el océano del viento: el viento puede empujar, tirar o crear turbulencias alrededor de la estructura. Entender estos efectos es crucial para asegurar que los edificios sean lo suficientemente fuertes y estables.

Para abordar esto, se utilizan modelos matemáticos y pruebas prácticas para simular y medir cómo el viento afectará una estructura específica. Los ingenieros consideran factores como la velocidad y dirección del viento, así como la forma y altura del edificio. Estos cálculos son fundamentales para garantizar que una estructura pueda re-

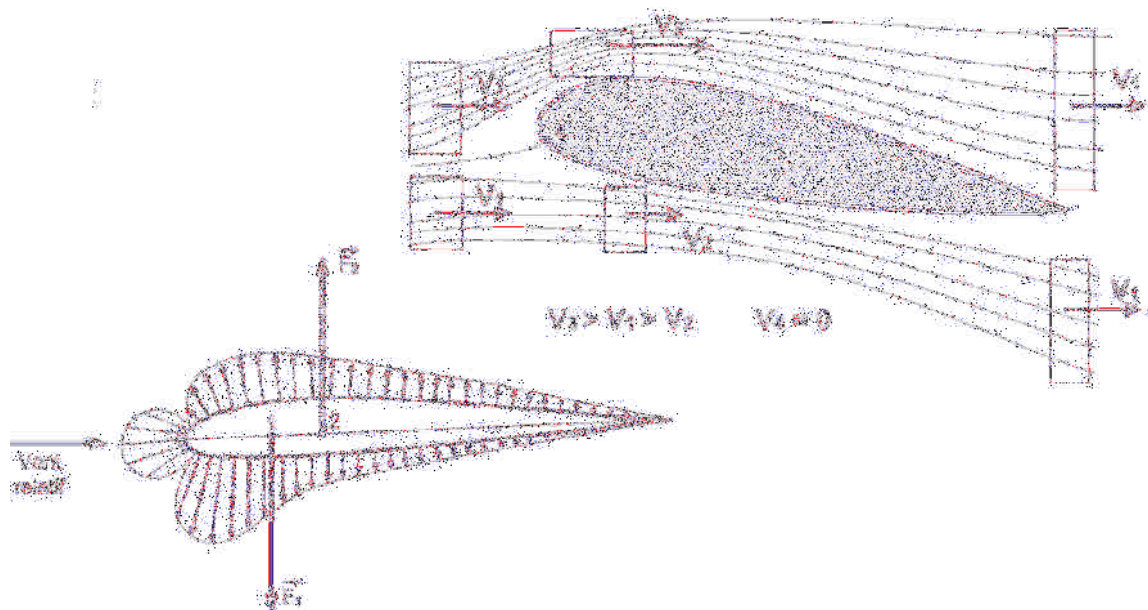
sistir el viento sin sufrir daños o poner en peligro la seguridad de las personas que la utilizan.

Segun Clement, 2002 al evaluar las acciones del viento sobre las edificaciones, deben considerarse el grado de seguridad que requiere la estructura y su vida útil. Aunque la velocidad de viento que se adopta para propósitos de diseño es la más alta esperada dentro de ciertos límites, existe la posibilidad de que ésta sea excedida en una tormenta de violencia excepcional; en la medida en que el período de años durante el cual la edificación esté expuesta a la acción del viento sea mayor, mayor es tal probabilidad

2.1.2. Parámetros aerodinámicos

Los parámetros aerodinámicos son como "etiquetas" que describen cómo un objeto responde al aire que lo rodea. Imagina un avión o un automóvil: estos parámetros nos dicen cómo se comportarán cuando el viento sopla o cuando se mueven a través del aire. Son fundamentales en áreas como la aerodinámica (el estudio del comportamiento del aire), la ingeniería aeroespacial (diseño de aeronaves y naves espaciales) y la simulación de vuelo. A continuación, te contaré sobre algunos de estos parámetros comunes que nos ayudan a entender cómo interactúan los objetos con el aire.

Figura 2.5: Parámetros aerodinámicos



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia

2.1.2.1. Numero de Reynolds

Segun Diaz y Bañol, 2015 es un numero adimensional utilizado en la mecánica de fluidos y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido; como todo número adimensional es uncociente, una comparación. La importancia de este radica en que nos habla del régimen con quefluye un fluido, lo que es fundamental para el estudio del mismo Diaz y Bañol, 2015. A continuación conoceremos brevemente los

tipos de régimen con unas respectivas imágenes de apoyo para su identificación, se verán también los comportamientos del líquido en cuanto varía la velocidad al llevar a cabo el ensayo.

2.1.2.2. Número de Strouhal

El número de Strouhal (también conocido como "St") es una dimensión adimensional utilizado en mecánica de fluidos para describir el comportamiento de un objeto en un flujo Pinhata, 2006, se define como:

$$St = \frac{f \cdot D}{V},$$

donde:

- f es la frecuencia del movimiento del objeto,
- D es el tamaño característico del objeto (como su diámetro),
- V es la velocidad del flujo.

El número de Strouhal es útil para predecir y analizar fenómenos de vórtices y flujo alrededor de objetos en un fluido. Se utiliza comúnmente en aerodinámica y en el estudio de la interacción fluido-estructura.

2.1.3. Tiempo que dura la velocidad promedio del viento

La duración de la velocidad promedio del viento cambia según la región y el clima. Por lo general, se mide en intervalos como horas, días o meses. Para obtener esa información específica, puedes consultar informes meteorológicos locales o recursos en línea que ofrezcan datos históricos para la ubicación que te interesa.

2.1.4. Modelos matemáticos para definir la función del viento

Un modelo estocástico adecuado para la velocidad del viento a pequeña escala asume que en cada instante de tiempo, la velocidad del viento $v_w(t)$ está constituida por la suma de cuatro componentes, como se muestra (Burton, Jenkins y Bossanyi) Burton T, 2001:

$$v_t = v_{wa} + v_{wr}(t) + v_{wg}(t) + v_{wt}(t) \quad (2.2)$$

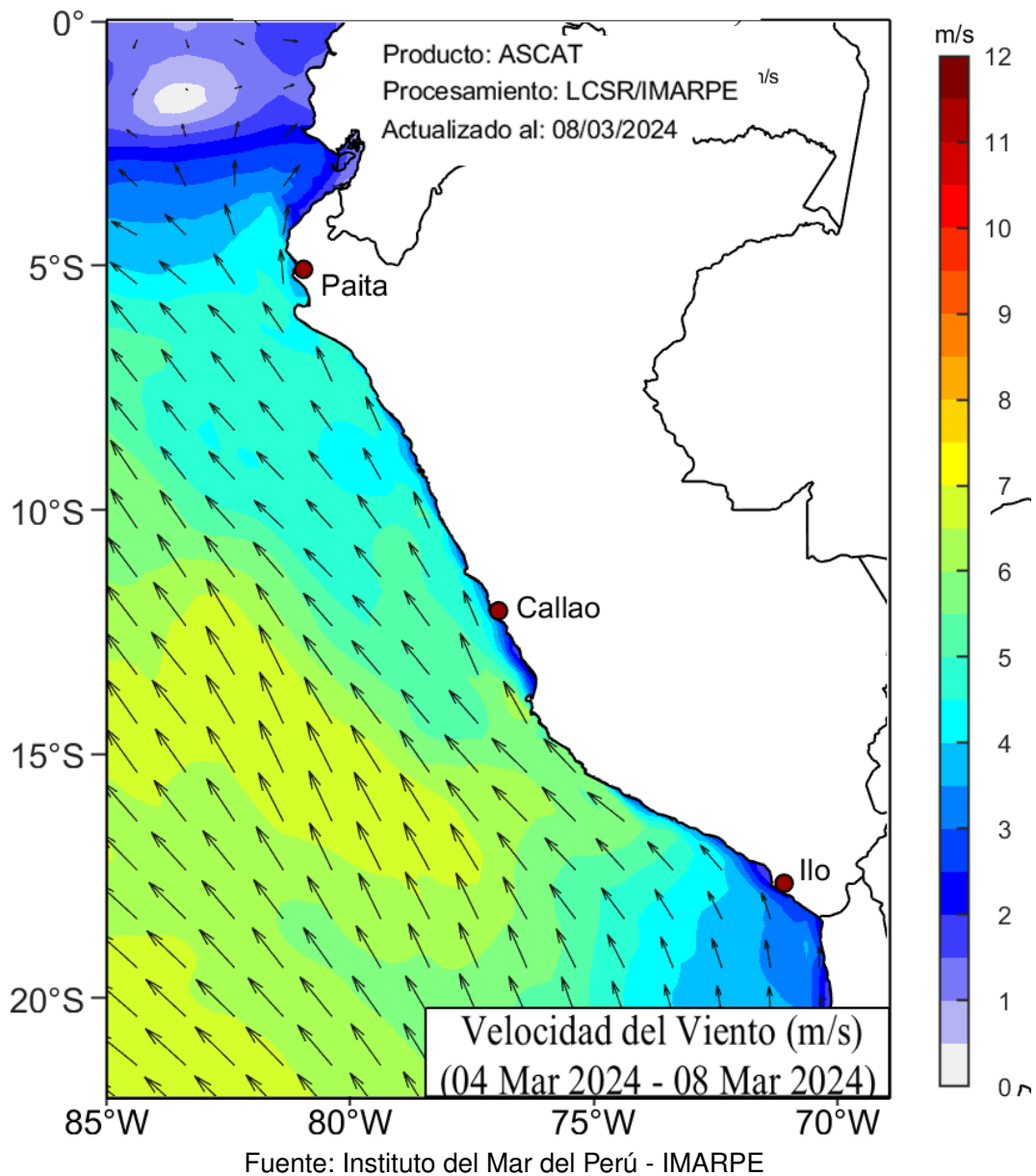
Siendo:

- v_{wa} : valor promedio,
- $v_{wr}(t)$: componente rampa, representar un incremento continuo en la velocidad del viento,
- $v_{wg}(t)$: componente de ráfaga, representando una ráfaga en el viento,
- $v_{wt}(t)$: componente que representa la turbulencia.

2.1.5. Velocidad promedio del viento

El valor promedio de la velocidad del viento ν_{wa} corresponde al promedio aritmético de la velocidad del viento registrada durante un cierto período de tiempo considerado. Por lo general, esta información es fácilmente extraíble de una serie de datos de velocidad del viento mediante un simple tratamiento estadístico (Burton, Jenkins y Bossanyi) Burton T, 2001.

Figura 2.6: Velocidad promedio del viento en la costa del Perú



2.1.6. Presión generada por el Viento

La presión generada por el viento en un objeto se puede calcular mediante la ecuación dinámica de la presión del viento:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^2 \quad (2.3)$$

Donde

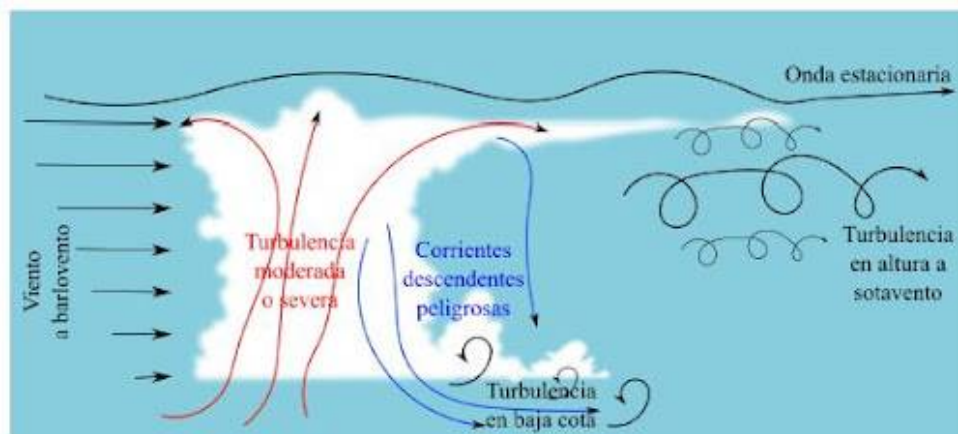
- P es la presión generada por el viento
- C_p es el coeficiente de presión
- ρ es la densidad del aire
- V es la velocidad del viento.

Esta ecuación muestra que la presión generada es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del viento. El coeficiente de presión (C_p) es específico para la forma y orientación del objeto.

2.1.7. Turbulencia en vientos

Según Clement, 2002 la turbulencia en vientos se refiere a las fluctuaciones irregulares y caóticas en la velocidad del viento en la atmósfera, puede ser causada por una variedad de factores, como la topografía del terreno, obstáculos en la superficie, cambios en la temperatura, y la interacción entre capas de aire con diferentes velocidades y direcciones. La turbulencia del viento es un fenómeno importante en la ingeniería del viento, la aviación y la energía eólica, ya que puede afectar la estabilidad de estructuras, vuelos de aeronaves y rendimiento de turbinas eólicas.

Figura 2.7: Turbulencia

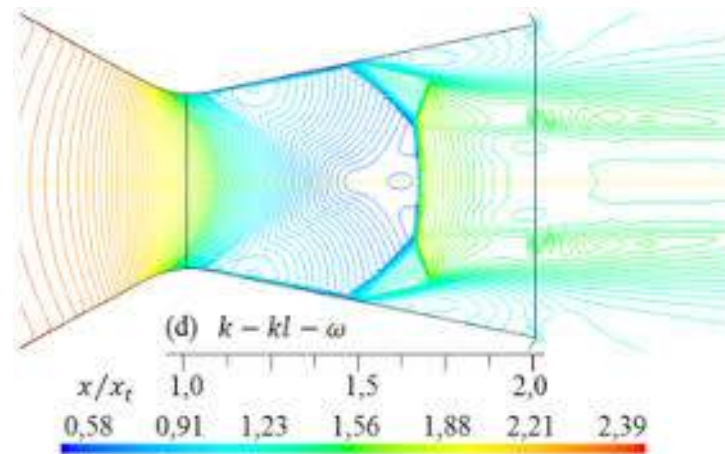


Fuente: Ingenius, 2019, núm. 22, Julio-Diciembre

2.1.7.1. Simulación de la turbulencia

La simulación de la turbulencia del viento es un área importante en la investigación y desarrollo en campos como la aerodinámica, la ingeniería eólica y la climatología. Hay varias técnicas y modelos utilizados para simular la turbulencia del viento, y las simulaciones pueden realizarse mediante métodos numéricos y experimentales. A continuación, proporciono una breve descripción del enfoque numérico.

Figura 2.8: Formas de ondas de choque para diferentes modelos de turbulencia



Líneas de contorno de densidad (kg/m³) para $rp = 3, 413$.

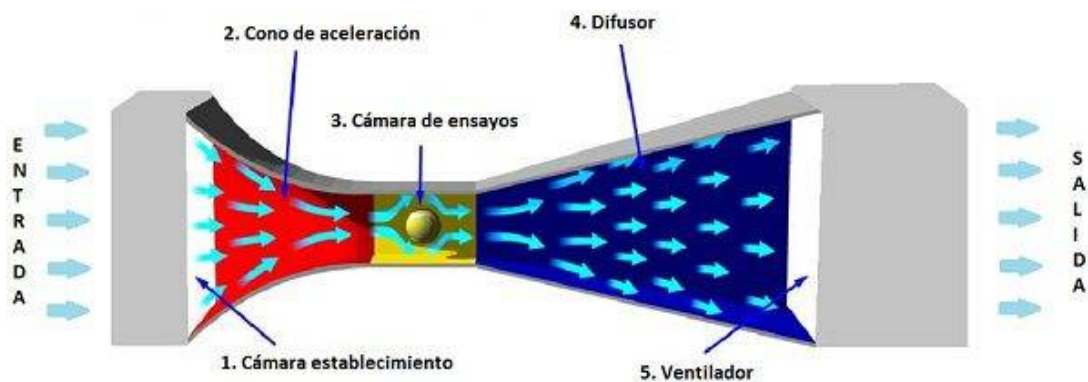
Fuente: Ingenius, 2019, núm. 22, Julio-Diciembre

2.1.8. Ansys CFD fluido

2.1.8.1. Túnel de viento

Según Gapper J. G. M., 2006 el túnel de viento es una herramienta que, con el tiempo, no sólo se ha vuelto más confiable, sino que ha encontrado amplia gama de aplicaciones, sin requerir excesiva especialización de sus características constructivas. Por lo general, se lo asocia a la aviación; no es aventurado que la tecnología de los túneles de viento sea simultánea de la aviación. El túnel empleado por los hermanos Wright es uno de los más conocidos porque se llevaban a cabo experimentos para evaluar las características de diferentes perfiles de ala. En lo fundamental, el objetivo general del túnel no ha cambiado. Ante la inexistencia o inconveniencia de modelos matemáticos apropiados para conocer el comportamiento de un objeto con velocidad relativa a un fluido, lo mejor es llevar a cabo una experimentación directa, de manera que se puedan tomar mediciones con la precisión y adecuación propias de un laboratorio.

Figura 2.9: Túnel de viento



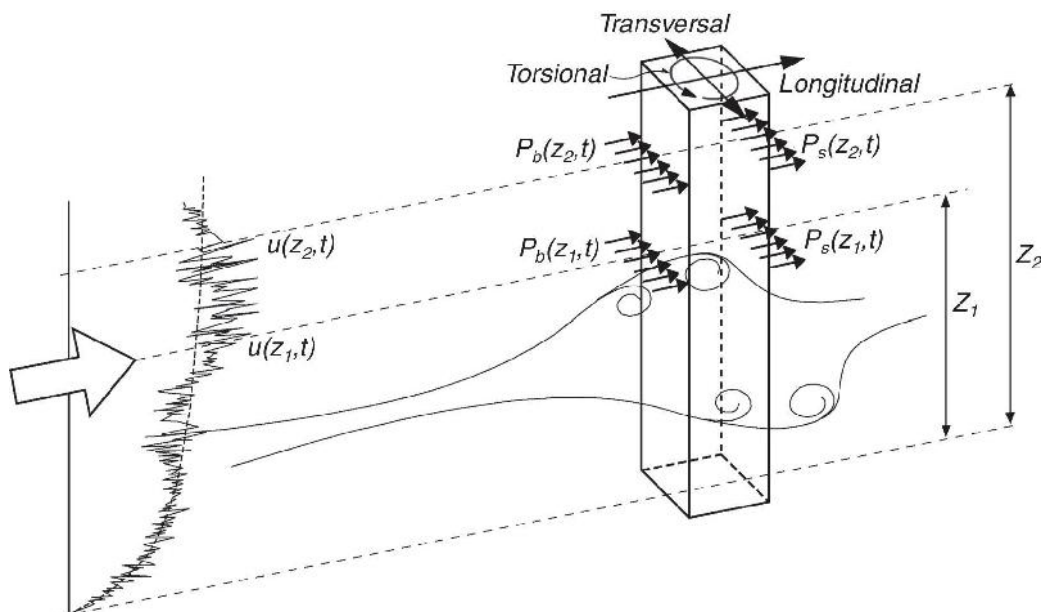
Fuente: <https://www.imarpe.gob.pe/imarpe/>

2.1.8.2. Aplicación del túnel de viento en la ingeniería civil

El túnel de viento es una herramienta clave en la ingeniería civil para evaluar cómo el viento afecta a estructuras como edificios, puentes y torres. Algunas aplicaciones incluyen:

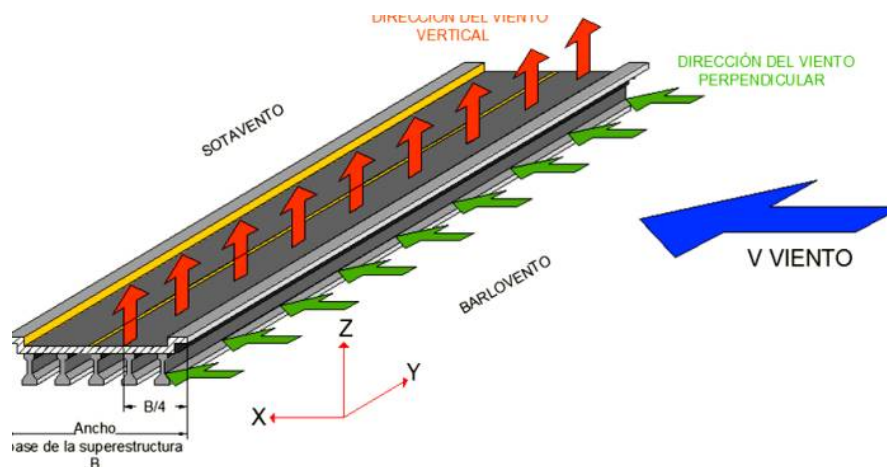
Evaluar la carga de viento en edificios y así mismo calcular las presiones en las fachadas como muestra la figura 2.10. Los vientos también tienen una incidencia considerable en el diseño de puentes como indica la figura 2.11, también en estructuras irregulares como torres de comunicación (figura 2.12) y así mismo para vehículos (figura 2.13).

Figura 2.10: Presiones en las fachadas



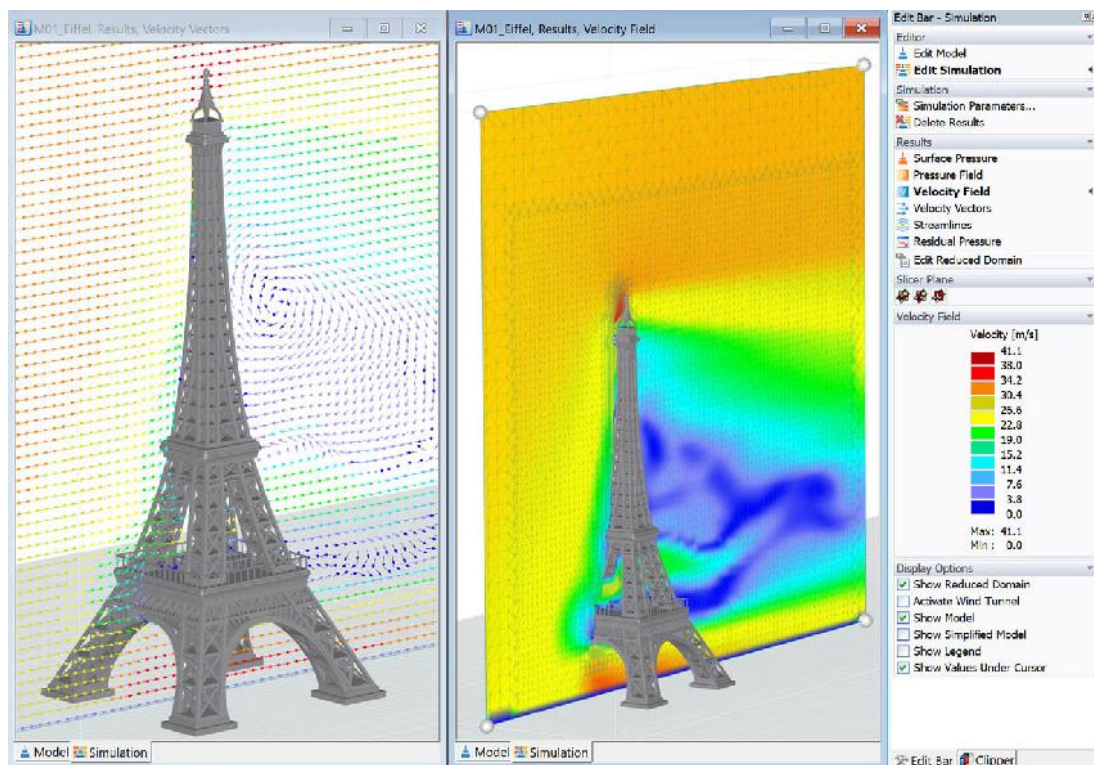
Fuente: Wind-induced vibrations.
Comput. Struct., 89 (2001), pp. 341-364

Figura 2.11: Fuerzas que ejerce el viento en un puente



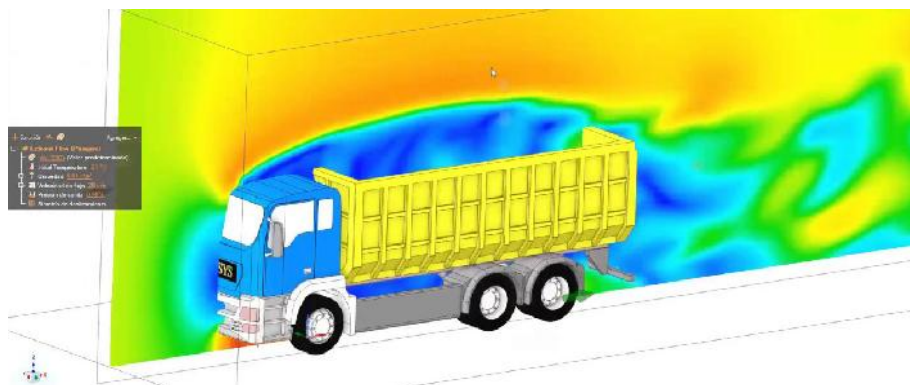
Fuente: Wind-induced vibrations.
Comput. Struct., 89 (2001), pp. 341-364

Figura 2.12: Fuerzas que ejerce el viento en una torre de comunicación.



Fuente: Wind-induced vibrations.
Comput. Struct., 89 (2001), pp. 341-364

Figura 2.13: CFD aplicado a vehículos para diseño aerodinámico



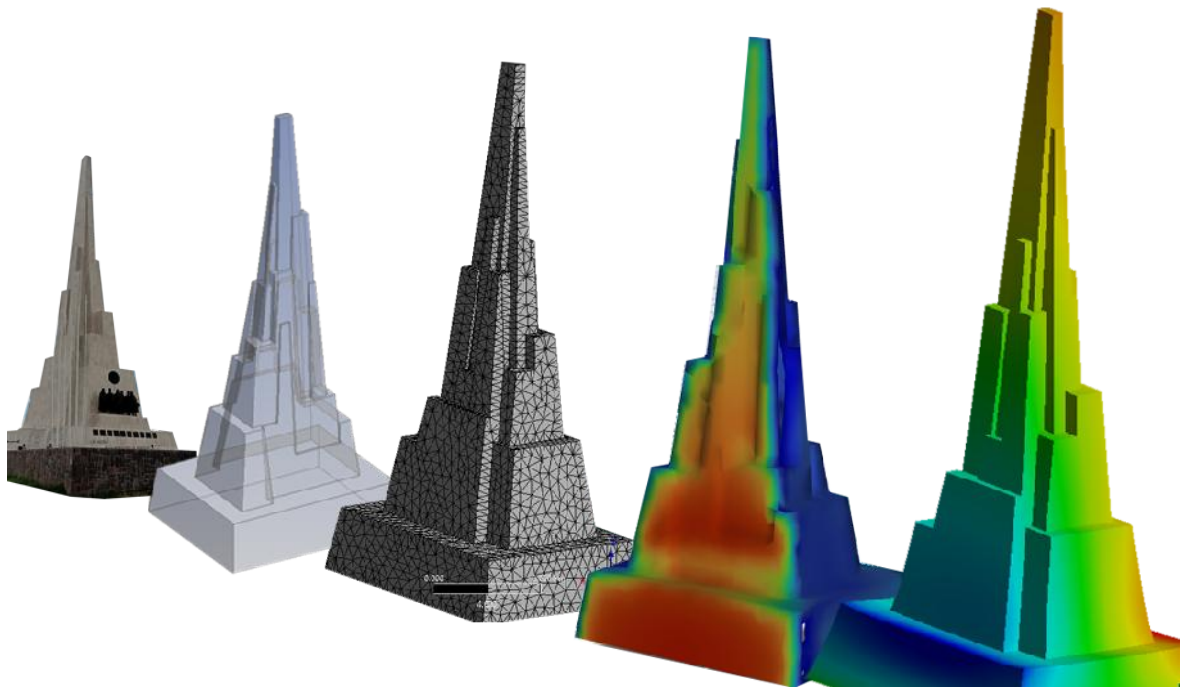
Fuente: <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/9026/un-mes-operando-exitosamente-cumple-el-tunel-de-la-linea/>

2.1.8.3. Definición y modelado geométrico del dominio computacional

Según Lopez, 2018 además de propiciar el origen de los métodos numéricos, los modelos computacionales de predicción meteorológica son quizás los más populares actualmente. Sin embargo, los códigos numéricos también juegan un rol muy importante en el análisis de problemas asociados a la Ingeniería del Viento, siendo capaces de resolver explícitamente el flujo en torno a obstáculos y permitiendo capturar la topografía específica de las regiones de estudio. Estos códigos presentan varias ventajas

que les permiten establecerse sólidamente como herramientas complementarias a las empleadas tradicionalmente.

Figura 2.14: CFD aplicado a vehículos para diseño aerodinámico



Fuente: Elaboración propia

Como muestra la figura 2.14 inicia en identificar el modelo, generar un modelo representativo, crear el enmallado, definir las condiciones de borde y una vez verificado la calidad se inicia con la simulación del viento y obtener las presiones y posteriormente se realiza el calculo estructural.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Viento en la atmosfera

2.2.1.1. Fuerza de gradiente en de presión

Según Martín León, 2014 "La fuerza del gradiente de presión no es una fuerza propiamente dicha, ya que en realidad es una aceleración provocada por las diferencias de presión que existen en el interior de una masa fluida. La fuerza del gradiente de presión, que se expresa como una fuerza por unidad de masa, se dirige desde las altas hacia las bajas presiones. Si bien la fuerza del gradiente de presión tiene componentes vertical y horizontal, en la atmósfera la componente vertical está aproximadamente en equilibrio con la fuerza de gravedad. En la horizontal, la fuerza del gradiente de presión es perpendicular a las isobaras sobre una superficie horizontal. La aceleración relacionada con la presión produce el viento, el transporte de masa fluida en la atmósfera. Puesto que la fuerza de la aceleración es proporcional al gradiente de presión (es decir,

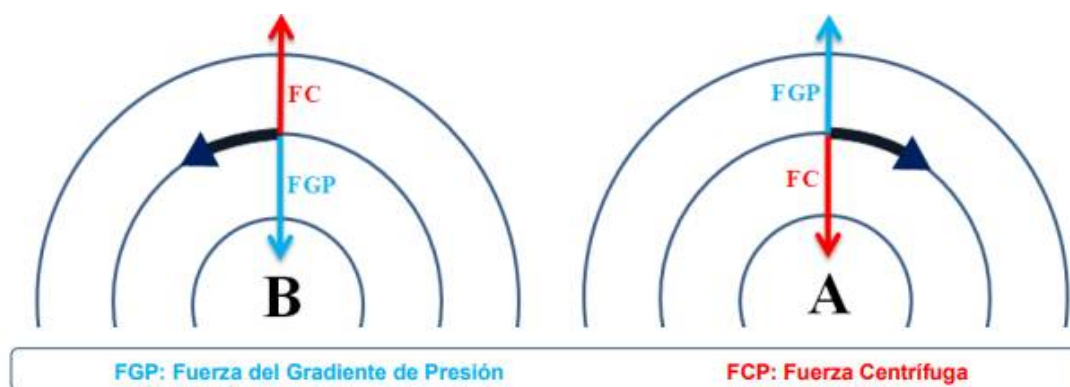
a la diferencia de presión sobre una distancia dada), cuanto mayor sea el gradiente de presión, tanto más fuertes serán la aceleración y el viento que esta puede producir."

2.2.1.2. Fuerza de coriolis

Para Delmas et al., 2014 la fuerza de coriolis se define como: La fuerza, o más propiamente, la aceleración de Coriolis debe su nombre al ingeniero y matemático francés Gaspard G. de Coriolis (1792-1843), y es el efecto que un observador en movimiento de rotación aprecia sobre cualquier cuerpo que se mueve con respecto a él, y que se traduce en una desviación lateral de su trayectoria.

Los cuerpos en movimiento sobre la Tierra se ven afectados por la rotación terrestre, lo que genera desviaciones conocidas como efecto Coriolis. En el hemisferio norte se desvían hacia la derecha, y en el sur, hacia la izquierda, influyendo en fenómenos como los vientos alisios y los ciclones. Además, los cuerpos que se desplazan horizontalmente a lo largo de un paralelo experimentan variaciones aparentes de peso según su dirección, y los movimientos verticales presentan desviaciones laterales hacia el este o el oeste, dependiendo del sentido del desplazamiento.

Figura 2.15: Efecto Coriolis en la franja ecuatorial

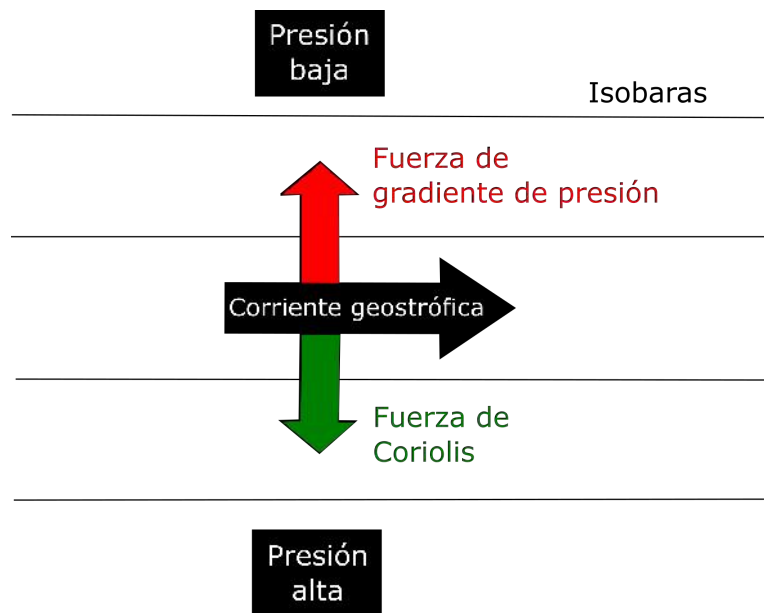


Fuente: Adaptado (Strahler & Strahler, 1999; citado por, <http://www.lateinamerika-studien.at>)

2.2.1.3. Viento geostrofico

Para Frades, 2017 viene a ser: Este concepto fue introducido por el célebre meteorólogo inglés Sir Napier Shaw (1854-1945). Procede del griego y está compuesto por las siguientes partes: Geo: Tierra; strophe: girar, dar vueltas y el sufijo ico: relativo a. Así, su significado etimológico podría ser el de «giro provocado por la Tierra». Esa acción terrestre que ya nos insinúa la etimología de esta palabra, contiene implícitamente una manifestación mecánica observada y bien conocida: la fuerza de Coriolis.

El calificativo geostrofico ya aparece en los textos meteorológicos más básicos, cuando tratan de dar a conocer el modelo conceptual del viento geostrofico, que surgió a mediados del siglo XIX con la eclosión de la meteorología sinóptica.

Figura 2.16: Representación del viento geostrofico

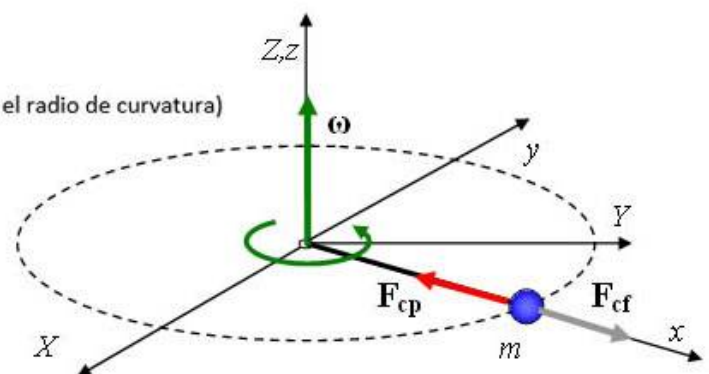
Fuente: <https://www.altocumulo.com/el-viento-del-sureste/>

2.2.1.4. Fuerza centrífuga

Según Jeremy, 2017 plantea que la fuerza centrífuga solo adquiere sentido cuando se considera un marco de referencia giratorio respecto a un universo externo. Desde un enfoque pragmático, se acepta la existencia de fuerzas inerciales aparentes, como la centrífuga y la de Coriolis, para describir de forma precisa el comportamiento de los sistemas mecánicos sin cuestionar su naturaleza real, sino utilizándolas como herramientas útiles dentro de la mecánica rotacional.

Figura 2.17: Representación de la fuerza centrífuga

m	masa
F_{cp}	Fuerza centrípeta
r	Radio de la trayectoria circular (en general, el radio de curvatura)
\mathbf{r}	Vector de posición
F_{cf}	Fuerza centrífuga
ω	Velocidad angular



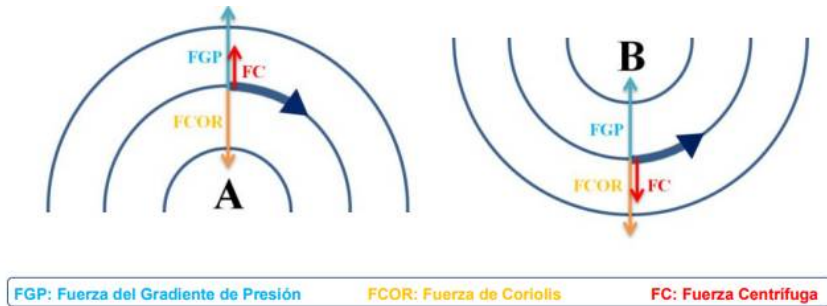
Fuente: <https://www.todoargentina.net/fisica/movimiento/centrifuga>

2.2.1.5. Viento gradiente

Según Diez, 1993 define el viento gradiente surge cuando las isobaras presentan curvatura en lugar de ser completamente rectilíneas, como se muestra la figura 2.18

donde ocurre en el viento geostrófico. En este fenómeno interviene la fuerza centrífuga, que provoca el desplazamiento del aire a lo largo de trayectorias curvas. Así, el viento gradiente resulta del equilibrio entre la fuerza centrífuga, la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de Coriolis, describiendo el comportamiento real del flujo atmosférico alrededor de sistemas de alta y baja presión.

Figura 2.18: Representación el viento gradiente en los sistemas de alta y baja presión

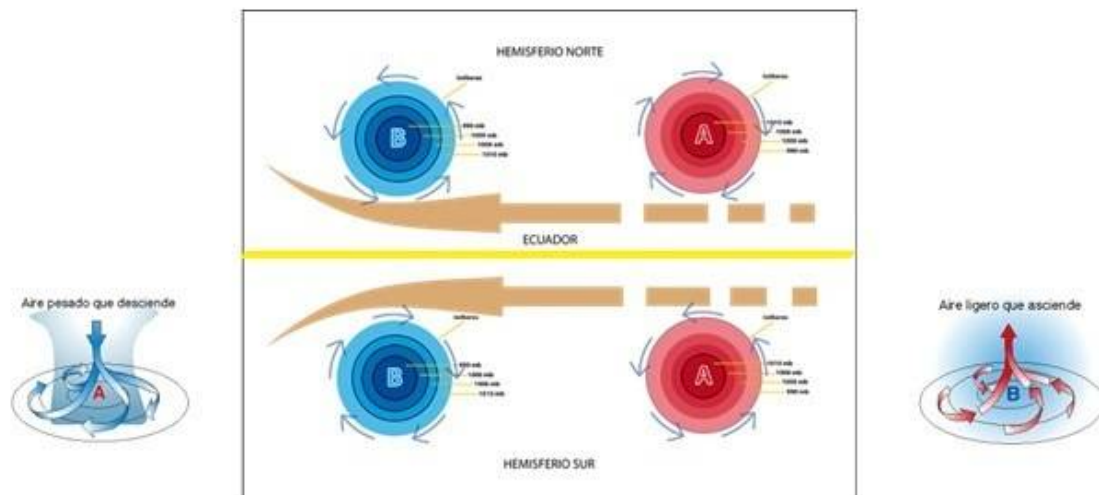


Fuente: www.google.com

2.2.1.6. Viento ciclostrófico

Según Diez, 1993: En sistemas atmosféricos de menor escala, como el caso de los tornados (decenas o centenas de metros), el radio de curvatura es tan pequeño que el efecto de Coriolis es despreciable. En estas condiciones, se presenta un equilibrio entre la fuerza del gradiente de presión y la fuerza centrífuga (Figura 1.11), que se conoce con el nombre de balance ciclostrófico.

Figura 2.19: Representación Viento Ciclostrófico en el Hemisferio Norte



Fuente: <https://www.todoargentina.net/fisica/movimiento/centrifuga>

2.2.1.7. Viento inercial

Según Diez, 1993 indica que el viento inercial es un flujo poco común que no requiere gradiente de presión y presenta trayectorias circulares por efecto de la fuerza

de Coriolis. Se mantiene en sistemas anticiclónicos por el equilibrio entre las fuerzas centrífuga y de Coriolis, aunque cerca del ecuador no forma trayectorias cerradas.

Figura 2.20: Representación del viento inercial en el Hemisferio Norte



Fuente: www.google.com

2.2.1.8. Fuerza de fricción

Según Diez, 1993 indica que la fuerza de fricción se origina por el rozamiento del aire con la superficie terrestre, provocando una disminución de la velocidad y variaciones en la dirección del flujo dentro de la Capa Límite Planetaria, que se extiende aproximadamente hasta los 500–1.000 metros de altura. Su intensidad depende de la rugosidad del terreno, las propiedades del fluido y el gradiente de temperatura, y se cuantifica mediante el coeficiente de viscosidad por torbellino, evaluado a distintas escalas.

Figura 2.21: Representación de cizalladura horizontal del viento por diferencias de velocidad.



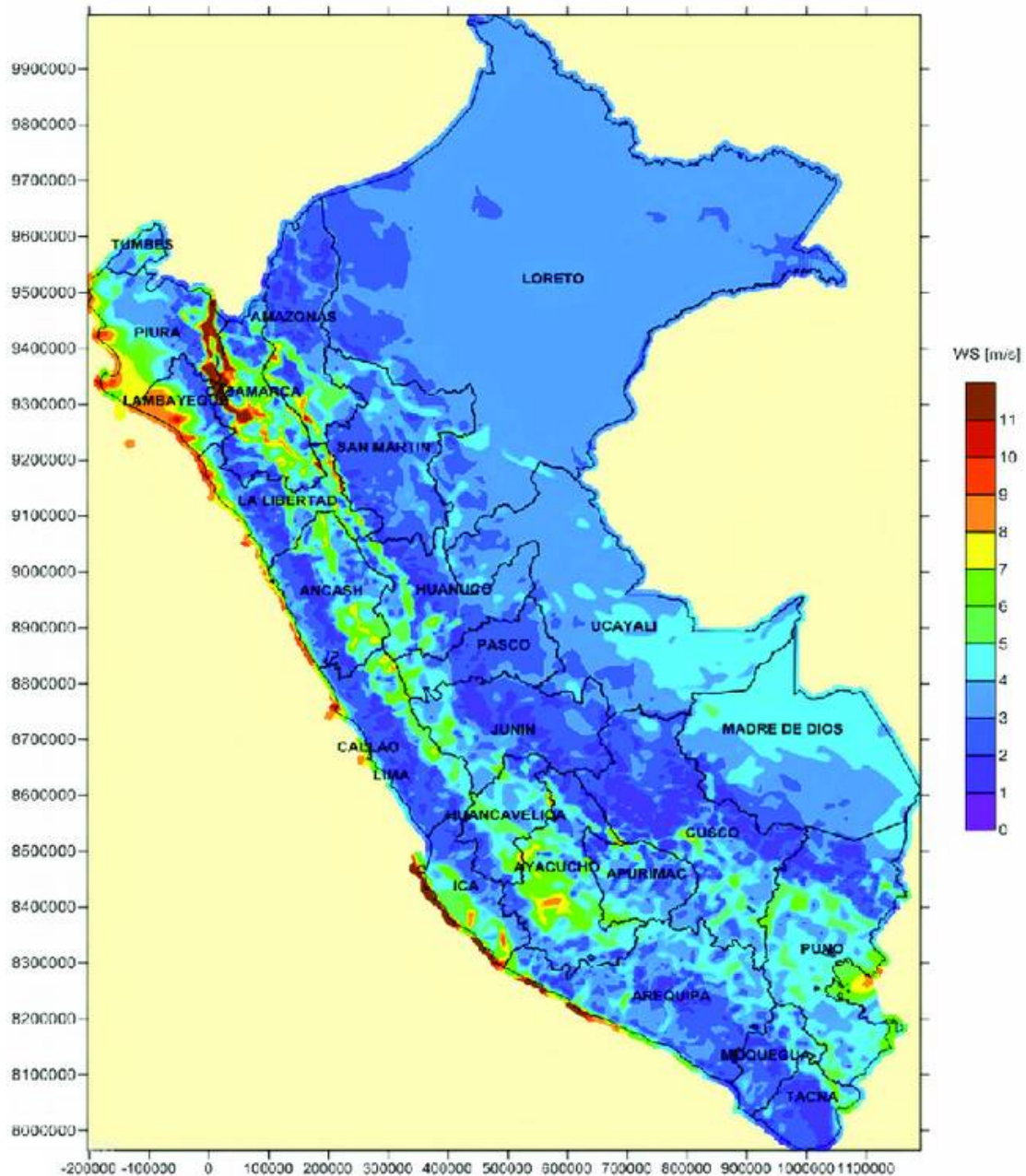
Fuente: www.google.com

2.2.2. El viento y sus características en el Perú

Según David et al., 2005 la variabilidad del viento frente y dentro de los 100 km de la costa peruana, muestran diferencias entre la zona norte (Paita y Chicama), con

menor variabilidad de viento, respecto la zona centro sur (Callao, San Juan de Marcona e Ilo), que presenta una mayor variabilidad. Esta diferencia se debería a que la zona centro-sur de la costa peruana tendría mayor influencia del forzamiento remoto regional asociado al Anticiclón del Pacífico Sur.

Figura 2.22: Mapa de velocidad promedio del viento en Perú. Velocidad del viento a 100 metros sobre el nivel del suelo



Fuente: <https://www.researchgate.net/>

2.2.3. Diferencia entre ráfagas y vientos

La variabilidad del viento (fuerza y dirección) en un lugar dado puede ser fuerte en cortos periodos de tiempo, o no. Esta es la razón por la cual los meteorólogos miden

el viento instantáneo o el viento "promedio".

El viento instantáneo se mide en un período muy corto de tiempo, 1- 3 segundos, mientras que el viento promedio se mide en un período de 10 minutos.

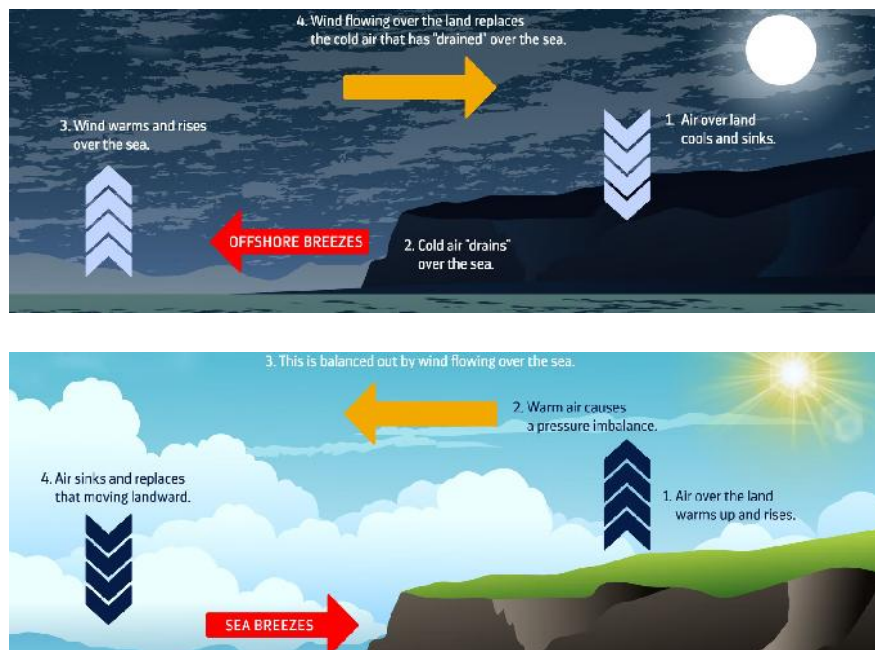
Una ráfaga/racha/ ramalazo es un aumento repentino en el viento instantáneo, que excede el viento promedio en más de 10 nudos (18 km / h).

2.2.4. Movimiento del viento

2.2.4.1. Brisas marinas

Según Ideam-UPME, 2006: .En el día, como la superficie terrestre se calienta más rápido que el agua de mar, fluye una brisa desde el mar en dirección a la tierra (Figura 2.5). Al calentarse las partículas de aire localizadas sobre la superficie (tierra), su densidad se modifica y se genera un sistema de baja presión que interactúa con el sistema de alta presión que se desarrolla sobre el mar.

Figura 2.23: Brisa de mar



Fuente: Ideam-UPME, 2006

Es importante mencionar, que el calentamiento en el océano es más lento en comparación a la superficie terrestre, debido a la gran cantidad de masa con que interactúa la radiación, adicionalmente, la energía requerida para elevar la temperatura de una masa de agua en términos de 1°C es mayor en comparación a la que se necesita para elevar esa misma temperatura a la superficie de suelo.

En este sistema de circulación, el movimiento del viento en superficie fluye desde el mar hacia la tierra, y en altura se presenta una corriente de retorno (de la tierra al mar). Según la intensidad del gradiente térmico entre la superficie del mar y la tierra,

aumentará la velocidad del viento y la profundidad del flujo, y se extenderá más al interior de la región."

2.2.4.2. Vientos en valles y montañas

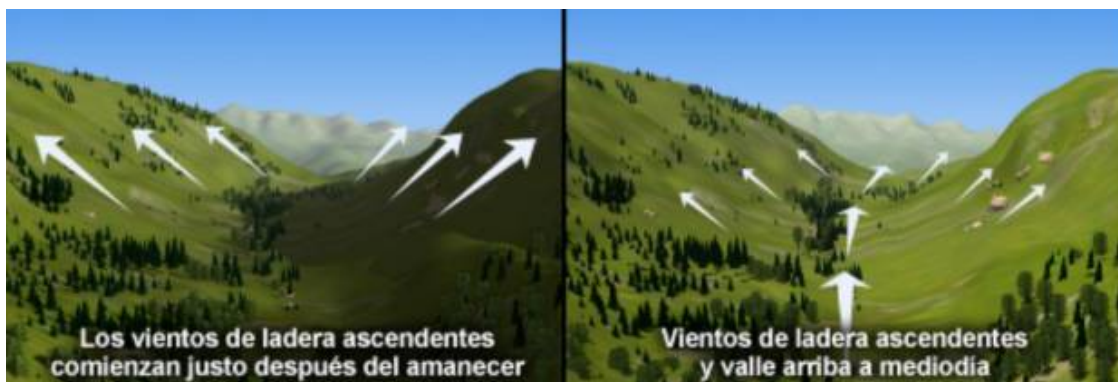
Según Ideam-UPME, 2006:

"Genera los vientos catabáticos (brisa de montaña) y anabáticos (brisa de valle). Se origina por las diferencias en el calentamiento de la superficie terrestre caracterizada por un complejo de particularidades topográficas (rugosidad del terreno).

La intensidad del flujo depende de las variaciones térmicas entre el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno de la superficie del suelo, la orientación del complejo montañoso con respecto a la incidencia de la radiación solar y las condiciones sinópticas predominantes en un intervalo de tiempo determinado.

Este tipo de circulación determina un flujo que sopla desde el valle en el día, por efecto del calentamiento radiativo sobre la superficie. Se presenta cuando las parcelas de aire próximas a las laderas y los valles está calientes, por lo tanto, la densidad del aire disminuye y va ascendiendo hasta la cima, siguiendo el recorrido de la superficie topográfica en que se encuentre (Figura 2.7). Este aire ascendente cálido se denomina viento anabático y es compensado por subsidencia en el Valle.

Figura 2.24: Viento Anabático



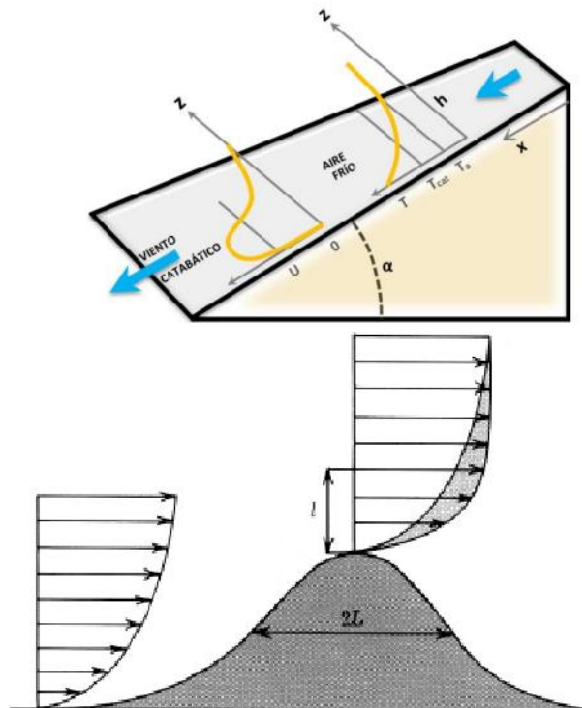
Fuente: Comet Program.

El viento de Montaña es el Flujo de viento generalmente débil (se desprecia el efecto Coriolis), que sopla desde la cima de las montañas o altiplanicies con dirección al valle. El viento catabático se caracteriza por ser recurrente en el día, y modulado o interrumpido por la presencia de flujo convectivo y/o ascenso por el calentamiento del valle (anabático). Se desarrolla con más intensidad en días despejados al atardecer, durante la noche y la madrugada, producto del enfriamiento del suelo por radiación. El proceso se intensifica si en el valle se desarrollan focos térmicos provocados por el uso de suelo enfocado al desarrollo de actividades urbanas e industriales, impulsando a la circulación de la alta presión (cima de la montaña) hacia el valle (baja presión).

En este proceso, el aire que entra en contacto con la superficie fría (por la emisión de la radiación por la superficie terrestre), se enfría y aumenta su densidad con respecto al aire circundante, por efecto de la gravedad desciende ladera abajo. En su descenso se genera un calentamiento adiabático, pero teniendo en cuenta que su temperatura en

origen era más baja, se considera generalmente como viento frío. Es importante mencionar que, aunque este viento podría alcanzar velocidades importantes por la dirección de desplazamiento y características térmicas de las parcelas de aire, el efecto de la fricción retrasa el movimiento."

Figura 2.25: Representación del viento catabático.



Fuente: Adaptado (Stull, 2000)

2.3. Conservación estructural de monumentos frente a cargas eólicas

La conservación del patrimonio histórico edificado tradicionalmente ha centrado sus esfuerzos en la mitigación de daños por sismos, humedad o asentamientos diferenciales. Sin embargo, la acción del viento representa una amenaza constante y progresiva que exige un análisis especializado, especialmente en estructuras que, por su tipología, superan la altura de la capa límite urbana o rural circundante. A diferencia de las edificaciones modernas, los monumentos históricos no fueron concebidos bajo normativas de diseño eólico dinámico, lo que hace imperativa la revisión teórica de su comportamiento aerodinámico para garantizar su preservación.

2.3.1. Vulnerabilidad aerodinámica en el patrimonio histórico esbelto

Las estructuras patrimoniales esbeltas, como obeliscos, torres, entre otras, presentan una vulnerabilidad aerodinámica particular debido a su alta relación de esbeltez

(altura versus base) y a su exposición directa a las corrientes de aire. Desde la perspectiva de la mecánica de fluidos, estos monumentos actúan como "cuerpos romos". Cuando el flujo de aire impacta contra un cuerpo romo, este no logra seguir el contorno de la superficie de manera suave (flujo laminar), produciéndose un fenómeno conocido como "separación de la capa límite".

Esta separación geométrica inducida por las aristas vivas y los escalonamientos de la estructura genera una estela turbulenta en la región posterior (sotavento). En geometrías complejas como la de un obelisco, el flujo separado suele formar vórtices alternados. Esta vorticidad no solo altera el campo de presiones, sino que induce vibraciones transversales a la dirección del viento. Por lo tanto, la vulnerabilidad del monumento no radica únicamente en la fuerza de empuje frontal estática, sino en la compleja dinámica de estos vórtices que "tiran" de la estructura en múltiples direcciones, un fenómeno que los códigos de diseño estático tradicionales subestiman sistemáticamente.

2.3.2. Efectos de la succión y fatiga en revestimientos pétreos

Uno de los efectos patológicos más severos de la interacción fluido-estructura en monumentos históricos es el daño a los elementos no estructurales, específicamente los revestimientos superficiales (placas de mármol, cantería, morteros ornamentales). La teoría aerodinámica establece que, mientras la cara de barlovento experimenta presiones positivas (compresión contra la estructura), las caras laterales y la cara de sotavento están sometidas a presiones negativas, es decir, succión aerodinámica.

Esta succión genera esfuerzos de tracción directa sobre el revestimiento pétreo y sus anclajes. El problema se agrava por la naturaleza cíclica del viento; las ráfagas no aplican una fuerza constante, sino que someten a las placas a ciclos continuos de carga y descarga. En el ámbito de la ciencia de materiales, este proceso induce "fatiga mecánica" en los morteros de fijación y en los anclajes metálicos antiguos.

Con el paso del tiempo, la fatiga micro-agrieta el material aglomerante, reduciendo drásticamente su capacidad de adherencia (resistencia a la tracción). Cuando la fuerza de succión local producida por una ráfaga extrema supera esta resistencia residual, se produce el desprendimiento súbito de la placa pétreo. Comprender este mecanismo teórico es vital, ya que demuestra que el fallo no se debe al peso propio del mármol ni a una deficiencia del concreto interno, sino a un vector de fuerza aerodinámica hacia el exterior que actúa de forma microscópica pero implacable.

2.4. Fundamentación matemática del modelo computacional

Para superar las limitaciones de los cálculos aerodinámicos estáticos convencionales, la presente investigación emplea una metodología numérica avanzada dividida en dos dominios acoplados: la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para obtener el campo de presiones, y el Método de Elementos Finitos (MEF) para determinar la respuesta estructural.

2.4.1. Ecuaciones gobernantes en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

El software ANSYS Fluent resuelve numéricamente las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, las cuales se basan en las leyes de conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Para un flujo de aire incompresible (velocidades inferiores a Mach 0.3, aplicable a vientos de 180 km/h) e isotérmico, las ecuaciones gobernantes son las Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS).

2.4.1.1. Ecuaciones de Navier-Stokes

La conservación de la masa o ecuación de continuidad se expresa cinemáticamente como:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.4)$$

Donde

- \vec{V} es el vector velocidad del flujo

Por otro lado, la conservación de la cantidad de movimiento (Navier-Stokes) describe cómo actúan las fuerzas sobre el fluido:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (2.5)$$

Donde

- ρ es la densidad del aire
- P es la presión estática
- μ es la viscosidad dinámica
- \vec{g} es la aceleración de la gravedad

La solución iterativa de este sistema de ecuaciones diferenciales parciales permite obtener el campo de presiones y velocidades alrededor de la geometría del obelisco.

2.4.1.2. Modelo de turbulencia $k - \omega$ SST

La resolución directa de las turbulencias en las ecuaciones de Navier-Stokes exige un costo computacional inalcanzable (DNS). Por ello, se introducen modelos de cierre para el término de los esfuerzos de Reynolds. En esta investigación se justifica críticamente el uso del modelo $k - \omega$ SST (desarrollado por Menter), el cual es el estándar industrial más avanzado para el análisis aerodinámico de estructuras.

El modelo SST es una formulación híbrida que combina lo mejor de dos modelos tradicionales:

- Utiliza el modelo $k - \omega$ en la región cercana a las paredes (capa límite), lo cual es excepcionalmente preciso para predecir gradientes de presión adversos y la separación del flujo (fenómeno que ocurre exactamente en las aristas y caras de sotavento del obelisco).
- Transiciona suavemente hacia el modelo $k - \epsilon$ en la región de flujo libre (lejos de las paredes), evitando la alta sensibilidad del modelo $k - \omega$ original a las condiciones de entrada turbulenta.

El modelo resuelve dos ecuaciones de transporte adicionales: una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa específica de disipación (ω). Matemáticamente, el comportamiento superior del modelo SST radica en su limitador de la viscosidad turbulenta o esfuerzo cortante de Reynolds, lo que evita la sobreestimación de la turbulencia en zonas de estancamiento (como la cara frontal del monumento), garantizando que los coeficientes de presión (C_p) calculados sean físicamente realistas.

2.4.1.3. Método de Volúmenes Finitos (FVM)

El software ANSYS Fluent utiliza el Método de Volúmenes Finitos para discretizar las ecuaciones gobernantes. Este método divide el dominio computacional (el aire alrededor del obelisco) en un número finito de volúmenes de control (malla). Las ecuaciones integrales de conservación se aplican a cada volumen, garantizando que la masa y el momento se conserven a nivel local y global, lo cual es crítico para obtener campos de presión realistas sobre las caras del monumento.

2.4.2. Teoría del Método de Elementos Finitos (MEF) en el análisis estructural

Una vez que ANSYS Fluent determina el campo de presiones aerodinámicas en las fronteras del fluido, estas fuerzas superficiales se importan como condiciones de contorno mecánicas al módulo ANSYS Static Structural mediante un acoplamiento unidireccional.

2.4.2.1. Discretización y ecuaciones de rigidez

El Método de Elementos Finitos (MEF) discretiza el volumen continuo del obelisco (concreto y revestimientos) en un número finito de elementos volumétricos interconectados por nodos. La ecuación matricial fundamental que el software resuelve para el régimen estático lineal es:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2.6)$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez global del sistema (dependiente de la geometría y de las propiedades mecánicas del material como el Módulo de Young E y el coeficiente de Poisson ν), $\{u\}$ es el vector de desplazamientos nodales desconocidos, y $\{F\}$ es el vector de fuerzas externas, en este caso, dominado por el empuje y la succión del viento extraídos del CFD.

2.4.2.2. Criterio de falla elástica de Von Mises

Para evaluar el estado tensional de la estructura tridimensional, se utiliza la teoría de la máxima energía de distorsión, cuantificada mediante el esfuerzo equivalente de Von Mises (σ_v). Esta métrica escalar combina los esfuerzos principales del tensor de tensiones ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) para obtener un único valor representativo:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2.7)$$

Si bien el concreto armado y los materiales pétreos poseen comportamientos de falla más complejos (como Rankine o Mohr-Coulomb), el esfuerzo equivalente de Von Mises se emplea en este estudio como un indicador macroscópico conservador. Al comparar el σ_v máximo generado por las cargas de viento contra el límite elástico y de resistencia a la tracción del material, se establece cuantitativamente si el monumento opera en un rango seguro o si es susceptible a fallas mecánicas por fatiga y desprendimiento.

2.4.3. Definición de términos básicos

Para una mejor comprensión de los fenómenos aerodinámicos y estructurales evaluados en la presente investigación, se definen los siguientes términos técnicos:

- Barlovento: Lado o cara de una estructura que se encuentra expuesta directamente a la dirección de procedencia del flujo del viento. Aerodinámicamente, es la zona de impacto donde el fluido se frena (punto de estancamiento), generando presiones positivas sobre la superficie.
- Capa límite atmosférica: Región inferior de la troposfera donde el flujo del viento se ve fuertemente influenciado y frenado por la fricción aerodinámica con la superficie terrestre y los obstáculos topográficos o urbanos.
- Dinámica de Fluidos Computacional (CFD): Rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos, algoritmos y software especializado para resolver y analizar problemas complejos que involucran el flujo de fluidos, la transferencia de calor y fenómenos asociados.
- Estela turbulenta: Región de flujo caótico, recirculación y baja presión que se forma en la parte posterior de un obstáculo sólido (cuerpo romo) cuando el viento lo atraviesa. Es responsable de inducir vibraciones estructurales.
- Método de Elementos Finitos (MEF): Técnica matemática y computacional utilizada en la ingeniería para encontrar soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales parciales. Discretiza un modelo continuo en pequeñas partes (elementos) para calcular esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en una estructura.
- Presión dinámica: Es la energía cinética por unidad de volumen de un fluido en movimiento. Representa el incremento de presión que el viento ejerce sobre una superficie al chocar contra ella y detener su velocidad.

- Sotavento: Lado o cara de una estructura opuesta a la dirección de procedencia del viento (la zona de "sombra" aerodinámica). Es el sector crítico donde ocurre la separación del flujo y se desarrollan las mayores presiones negativas o de succión.
- Succión aerodinámica: Fuerza de tracción generada sobre una superficie sólida debido a una presión local que es inferior a la presión atmosférica de referencia (presión estática negativa). Es el principal agente mecánico causal del desprendimiento de revestimientos superficiales.
- Vorticidad: Medida macroscópica de la rotación local de un fluido. En estructuras esbeltas, se manifiesta a través del desprendimiento alternado de vórtices que alteran constantemente el campo de presiones locales.

III: Materiales y métodos

3.1. Enfoque.

El efecto del viento sobre las edificaciones representa un aspecto esencial en el análisis y diseño estructural, especialmente en construcciones de gran altura, infraestructuras estratégicas y edificaciones de valor patrimonial. Una evaluación adecuada de esta acción permite garantizar la estabilidad, el desempeño y la seguridad de las estructuras frente a fenómenos eólicos severos.

En este sentido, numerosos investigadores han propuesto métodos y procedimientos orientados a determinar la incidencia del viento en diferentes tipos de estructuras y bajo diversas condiciones de exposición. Estos aportes han generado una amplia variedad de enfoques y metodologías que permiten estimar la respuesta estructural con distintos niveles de detalle, favoreciendo su aplicación en múltiples contextos técnicos y normativos a escala internacional.

No obstante, en diversos países en desarrollo, donde la fiscalización técnica y el marco regulatorio resultan insuficientes para predecir el comportamiento aerodinámico en geometrías complejas, no se ha conseguido mitigar de manera efectiva la vulnerabilidad de las edificaciones patrimoniales ante las acciones dinámicas del viento. Esta situación incrementa la probabilidad de que ráfagas severas ocasionen el deterioro progresivo de los revestimientos y fatiga de materiales, derivando en pérdidas culturales y económicas significativas.

Según Hernandez Sampieri et al., 2014, debido a la relevancia de analizar la influencia de estos fenómenos sobre las estructuras, las metodologías de evaluación pueden clasificarse, de manera general, en enfoques cualitativos y cuantitativos. En estricta concordancia con esta premisa, la presente investigación adopta un enfoque cuantitativo. Esta elección se fundamenta en que el comportamiento aerodinámico y estructural del Obelisco de la Pampa de Quinoa será medido y evaluado de manera objetiva a través de la recolección de datos numéricos exactos (coeficientes de presión, velocidades de flujo y esfuerzos). La utilización de este enfoque, apoyado en simulación computacional, garantiza la obtención de resultados precisos, verificables y replicables dentro del rigor de la ingeniería estructural.

3.2. Alcance de la investigación.

El alcance de la presente investigación define la extensión, profundidad y los límites metodológicos bajo los cuales se evaluará el comportamiento aerodinámico y estructural del Obelisco de la Pampa de Quinua. A continuación, se detallan los parámetros metodológicos adoptados:

3.2.1. Propósito de la investigación

En este contexto, el propósito fundamental consiste en desarrollar estrategias orientadas a la solución de un problema específico. La investigación aplicada se sustenta en los fundamentos teóricos existentes para generar conocimiento práctico y operativo, permitiendo su implementación en situaciones reales. Este enfoque es ampliamente empleado en disciplinas como la ingeniería, donde la aplicación de la teoría a problemas concretos resulta esencial para la innovación y el avance tecnológico.

3.2.1.1. Investigación Aplicada

El propósito fundamental de este estudio consiste en desarrollar estrategias orientadas a la solución de un problema ingenieril y de conservación específico. La investigación es de tipo aplicada porque se sustenta en teorías puras y preexistentes (como las leyes de la mecánica de fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes y la teoría de la elasticidad) para generar conocimiento práctico. Este enfoque permite diagnosticar las causas mecánicas del deterioro del monumento y ofrece datos concretos (mapas de presión aerodinámica) que el Ministerio de Cultura o ingenieros conservadores podrán utilizar para optimizar futuras rehabilitaciones.

3.2.2. Profundidad de la investigación:

3.2.2.1. Investigación explicativa

Por su nivel de profundidad, esta investigación trasciende la simple descripción de los daños para centrarse en un enfoque explicativo. Su objetivo es identificar y comprobar las relaciones de causa y efecto. En este contexto, busca explicar de qué manera la geometría irregular y esbelta del monumento (causa) altera el flujo del viento generando turbulencias y fuerzas de succión extremas, las cuales se traducen en esfuerzos mecánicos y fatiga en los materiales (efecto), justificando físicamente el desprendimiento de los revestimientos pétreos.

3.2.3. Duración del tiempo de investigación:

3.2.3.1. Investigación transversal

A diferencia de los estudios longitudinales, que requieren el monitoreo de un fenómeno a lo largo de meses o años, esta investigación es de corte transversal (o sincrónico). La recolección de datos y la evaluación del comportamiento estructural se realizan en un único momento virtual, simulando escenarios eólicos críticos predefinidos (velocidades de 60 km/h, 120 km/h y 180 km/h). Este método es ideal para evaluar

la respuesta límite de una estructura ante eventos extremos sin depender del tiempo geológico o meteorológico real.

3.2.4. Tipo de Inferencia en Metodología

3.2.4.1. Investigación inductiva

El proceso de inferencia empleado es el método deductivo, el cual es característico de los enfoques cuantitativos en ingeniería. La investigación parte de premisas y leyes universales generales (la Dinámica de Fluidos Computacional - CFD, el Método de Elementos Finitos - MEF y la normativa peruana E.020) para aplicarlas y deducir conclusiones sobre un caso de estudio particular y específico: el Monumento Histórico de la Pampa de Quinua.

3.2.5. Grado de control y manipulación:

3.2.5.1. Investigación no experimental o de simulación

El diseño metodológico es estrictamente no experimental. Debido a la naturaleza patrimonial, histórica e intangible del obelisco, resulta inviable e inaceptable someter la estructura real a ensayos físicos destructivos o manipulaciones mecánicas directas. Por lo tanto, el grado de control se ejerce en un entorno de simulación computacional (in silico). Se utiliza un modelo físico-matemático virtual donde el investigador puede controlar rigurosamente las variables independientes (velocidad y dirección del viento, propiedades del material) para observar las variables dependientes (presión, deformación y esfuerzos) sin alterar el estado físico original del monumento.

3.3. Diseño de investigación

Para el presente estudio se ha optado por el enfoque de investigación cuantitativo, por ser el que mejor se adapta a los objetivos y características del proyecto. Este método permite medir, analizar y evaluar variables de manera objetiva, garantizando así resultados confiables, verificables y replicables dentro del ámbito de la ingeniería.

3.3.1. Diseño cuantitativo

En el enfoque cuantitativo, los fenómenos se consideran eventos medibles. Este tipo de investigación se aplica cuando resulta fundamental obtener resultados verificables (como presiones y desplazamientos) que faciliten la toma de decisiones técnicas.

3.3.2. Diseño de investigación no experimental transversal

Se ha seleccionado este diseño ya que permite evaluar la influencia del viento sobre la estructura del monumento en un entorno virtual (software), manipulando las variables de velocidad en la simulación sin alterar la edificación real. Se analiza el impacto de la variable independiente (velocidad del viento) sobre las variables dependientes (presión y esfuerzo) en escenarios estáticos predefinidos.

3.4. Población y muestra.

Según Hernandez Sampieri et al., 2014 indica que la delimitación de población esta compuesto de un conjunto con casos de características similares, y la muestra es un elementos del conjunto identificado.

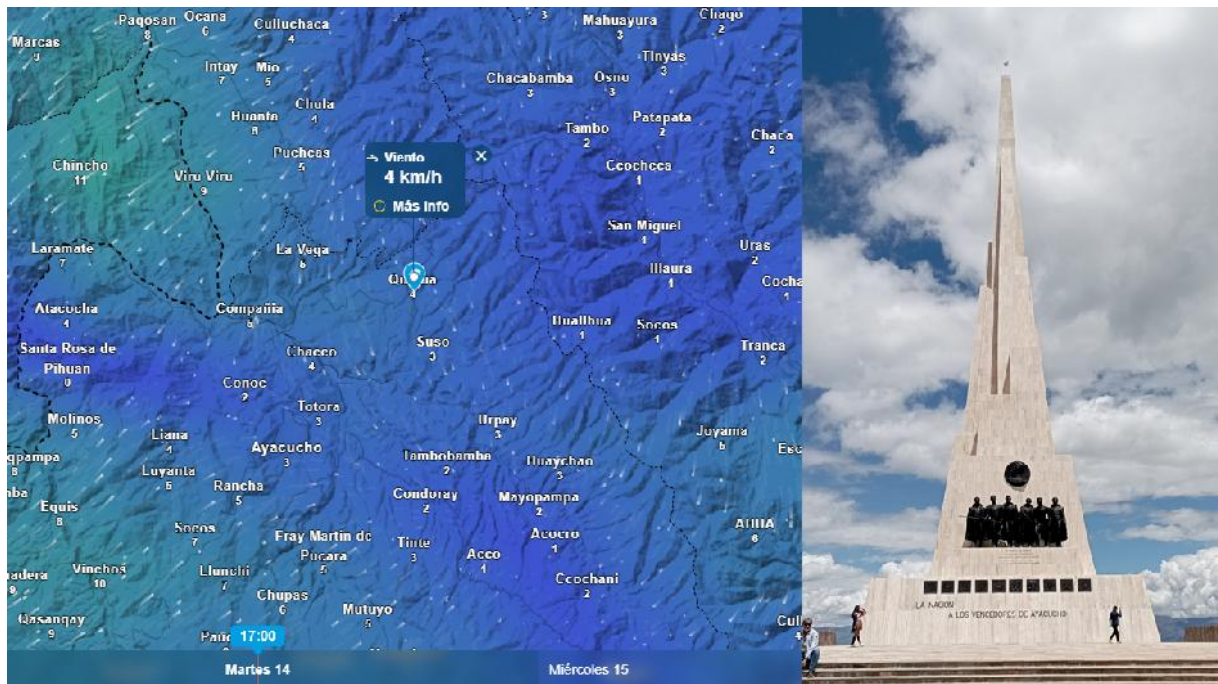
3.4.1. Población

La población está constituida por las estructuras monumentales de carácter histórico y tipología esbelta (obeliscos) situadas en la región andina del Perú, expuestas a condiciones de cargas eólicas dinámicas y factores ambientales propios de altitudes superiores a los 3000 m.s.n.m.

3.4.2. Muestra

Se ha seleccionado una muestra no probabilística intencional (estudio de caso único), conformada específicamente por el Monumento Histórico de la Pampa de Quinua (Obelisco). Esta selección se justifica por su relevancia patrimonial, su geometría singular de 44 metros de altura y su ubicación en una planicie abierta expuesta a altas velocidades de viento.

Figura 3.26: Representación de la población



Fuente: <https://www.meteored.pe/mapas-meteorologicos/viento-br.html>

3.5. Hipótesis.

Según Hernandez Sampieri et al., 2014 define hipótesis como lo que se pretende probar y define como una explicación exiguo.

3.5.1. Hipótesis general.

- La geometría escalonada e irregular del Obelisco altera significativamente el flujo del viento, generando zonas de alta presión en barlovento y severas fuerzas de succión en sotavento; sin embargo, los esfuerzos mecánicos y deformaciones inducidas no comprometen la estabilidad global de la estructura principal de concreto armado.

3.5.2. Hipótesis específicas.

- La simulación dinámica en CFD revela presiones de succión locales mucho más severas que las estimadas por el cálculo analítico estático de la Norma Técnica Peruana E.020.
- Los esfuerzos equivalentes y las deformaciones máximas generadas por vientos extremos se mantienen con un alto margen de seguridad por debajo del límite de falla elástica de la estructura.
- La simulación permite identificar las zonas críticas de succión aerodinámica, justificando físicamente el mecanismo de desgaste y desprendimiento no estructural de los revestimientos pétreos.

3.6. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.

La Operacionalización de las variables se indica en la tabla 3.1, donde muestra la relación de las variables, indicadores y su medición:

3.7. Técnicas e instrumentos.

Las técnicas de recolección de datos en esta investigación se basan en el análisis documental (planimetría y expedientes técnicos) y en la simulación numérica computacional. No se emplean instrumentos de campo tradicionales (como anemómetros físicos en el monumento) debido a la naturaleza virtual del ensayo.

Los instrumentos principales empleados son:

- Autodesk Revit: Software BIM utilizado para el modelado geométrico tridimensional riguroso de la arquitectura del obelisco.
- ANSYS Workbench 2024 R1: Suite de ingeniería multifísica que actúa como el instrumento central de medición virtual. Se divide en dos módulos:
- ANSYS Fluent: Instrumento para resolver la dinámica de fluidos (CFD) y cuantificar la presión aerodinámica y la velocidad del viento.
- ANSYS Static Structural: Instrumento para el análisis por elementos finitos (MEF), encargado de medir las deformaciones y el esfuerzo equivalente de Von Mises.

Tabla 3.1: Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

Variable de estudio	Definición conceptual	Dimensión	Indicador	unidad	Instrumentos / Técnicas
Variable Independiente (V.I.): Velocidad del viento extremo		Cinética del flujo de aire	Velocidad de flujo libre (V_{∞}) simulada (60, 120 y 180).	km/h (m/s)	Análisis documental (Rosa de vientos).
	Flujo de aire en movimiento que actúa como una carga dinámica externa sobre la geometría del monumento, cuya intensidad y características definen las condiciones de frontera del entorno virtual.	Dirección de incidencia crítica.		Grados sexagesimales ($^{\circ}$)	Configuración de condición de entrada (Inlet) en ANSYS Fluent.
Variable Dependiente (V.D.): Respuesta aerodinámica y estructural del Obelisco		Comportamiento Aerodinámico (CFD)	Presión superficial aerodinámica (Zonas de empuje y succión extrema).	Pascales (Pa)	Simulación CFD mediante ANSYS Fluent.
			Coefficiente de Presión (C_p).	Adimensional	Solver RANS con modelo de turbulencia $k-\omega$ SST.
	Reacción física del monumento frente a la carga eólica, manifestada a través de la alteración del campo de presiones en su superficie y la consecuente generación de esfuerzos y deformaciones internas en el material.	Comportamiento Estructural (MEF)	Esfuerzo equivalente de falla elástica (Von Mises, σ_v).	Megapascales (MPa)	Simulación MEF mediante ANSYS Static Structural.
			Deformación direccional y total máxima.	Milímetros (mm)	Acoplamiento One-Way FSI.

3.8. Técnicas para el procesamiento de la información.

En la presente investigación se evaluará la influencia del viento sobre el Monumento Histórico de la Pampa de Quinua – Ayacucho, con el propósito de analizar la distribución de presiones generadas en diferentes puntos de la estructura, considerando las variaciones de altura y las velocidades características del viento en la zona de estudio.

Como se muestra en la figura 3.27, para el desarrollo del análisis computacional se emplearán los software ANSYS Fluent y Autodesk Revit, herramientas que permiten la integración del modelo geométrico tridimensional con el entorno de simulación fluido–estructura. Dado que el estudio se basa en simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD), no se aplicarán técnicas estadísticas tradicionales, ya que los resultados derivan del modelado físico y matemático del flujo de viento.

Figura 3.27: Técnicas para el procesamiento de la información



Fuente: Elaboración propia

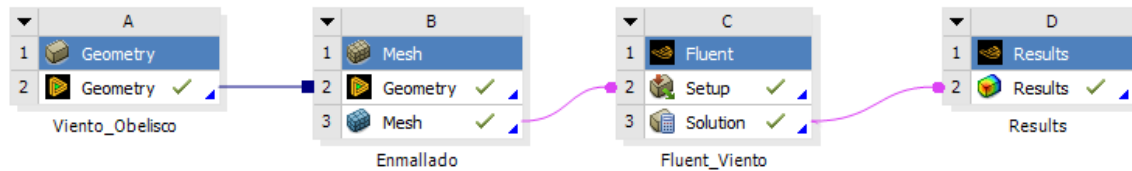
La simulación del flujo de aire se realizará mediante el software ANSYS Fluent, el cual posibilita describir de manera detallada el comportamiento del viento al incidir sobre cuerpos sólidos ubicados en su trayectoria. Debido a la complejidad de las ecuaciones gobernantes de Navier–Stokes, que describen los fenómenos de transporte y turbulencia, se utilizará el método de los volúmenes finitos para discretizar el dominio y resolver numéricamente las variables de interés, tales como presión, velocidad y formación de vórtices alrededor del monumento.

- **Procesamiento Aerodinámico (CFD):** Los resultados de ANSYS Fluent se visualizarán generando líneas de corriente y vectores de velocidad para identificar zonas de separación de flujo y vórtices. Asimismo, las presiones estáticas (P) se adimensionalizarán para calcular los Coeficientes de Presión (C_p) utilizando la presión atmosférica de referencia y la velocidad de entrada.
- **Procesamiento Estructural (MEF):** Mediante el acople One-Way FSI, las presiones se importarán al módulo Static Structural para identificar las zonas de concentración de Esfuerzos Equivalentes de Von Mises y evaluar la Deformación Total en la cúspide (44 m).
- **Análisis Comparativo con Normativa:** Los resultados de presión dinámica obtenidos por simulación se compararán con las cargas estáticas calculadas manualmente según la Norma Técnica Peruana E.020 Cargas", determinando si la normativa subestima las solicitaciones en geometrías complejas.

3.9. Desarrollo del trabajo de tesis

Para el desarrollo de la investigación, el objetivo es el análisis del Monumento Histórico de la Pampa de Quinua – Ayacucho mediante la interacción multifísico, se siguió una metodología sistemática resumida en el siguiente diagrama (figura 3.28).

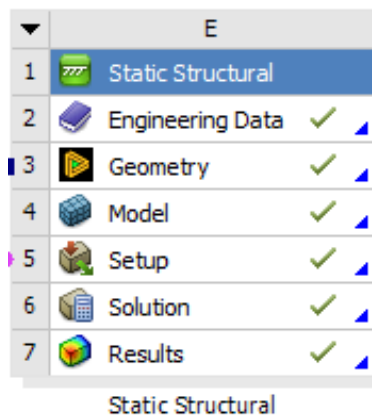
Figura 3.28: Diagrama de trabajo Ansys Fluent



Fuente: Simulación Ansys Fluent

Siguiendo estos pasos, el desarrollo del trabajo de tesis se llevó a cabo de manera sistemática y eficiente. A continuación, se describen de forma detallada las etapas principales del estudio, desde la definición del problema hasta la interpretación de los resultados, asegurando un análisis estructural riguroso del Obelisco de la Pampa de Quinua frente a la acción del viento.

Figura 3.29: Diagrama de trabajo Ansys Static Structural



Fuente: Ansys Static Structural

3.9.1. Obelisco de la Pampa de Ayacucho

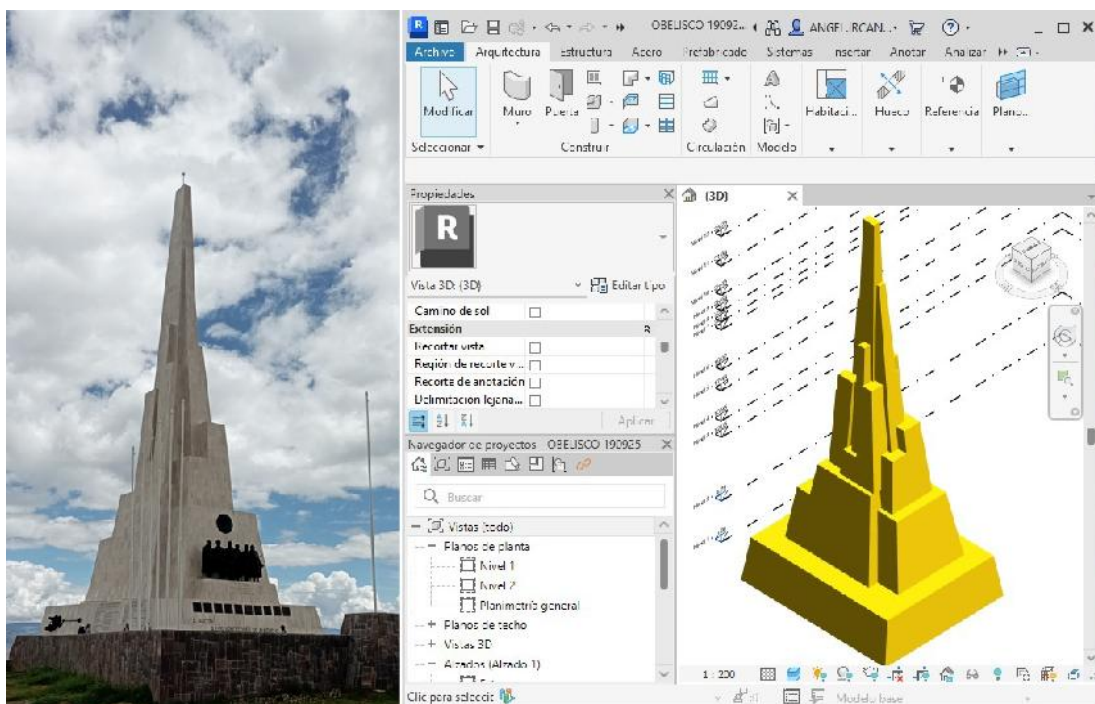
La preservación estructural de los bienes patrimoniales requiere un análisis detallado de su estado y de los factores que comprometen su estabilidad. Entre ellos, la acción del viento constituye una de las principales amenazas, ya que las presiones y esfuerzos generados sobre las superficies expuestas pueden provocar deformaciones y deterioros progresivos. Por ello, comprender el comportamiento estructural frente a cargas eólicas resulta fundamental para garantizar la seguridad y conservación de estas edificaciones.

El modelo tridimensional (3D) de la estructura fue elaborado en el software Autodesk Revit como se muestra en la figura 3.30, tomando como base los planos en formato

CAD, de los cuales se extrajeron las dimensiones, configuraciones geométricas y trazos correspondientes a plantas, cortes y perfiles. Para la generación del modelo tridimensional se aplicaron los principios de la geometría descriptiva, permitiendo transformar la información bidimensional de los planos CAD en una representación volumétrica coherente y precisa.

Finalmente, el modelo tridimensional fue exportado a un formato compatible con el software ANSYS Workbench con el propósito de realizar el análisis computacional del comportamiento del viento sobre la estructura. El proceso de conversión consistió en transformar el archivo nativo de Revit (.rvt) al formato .sat (ACIS solid model), el cual permite la interoperabilidad entre plataformas de modelado BIM y entornos de simulación por elementos finitos.

Figura 3.30: El Obelisco Modelo Solido 3D

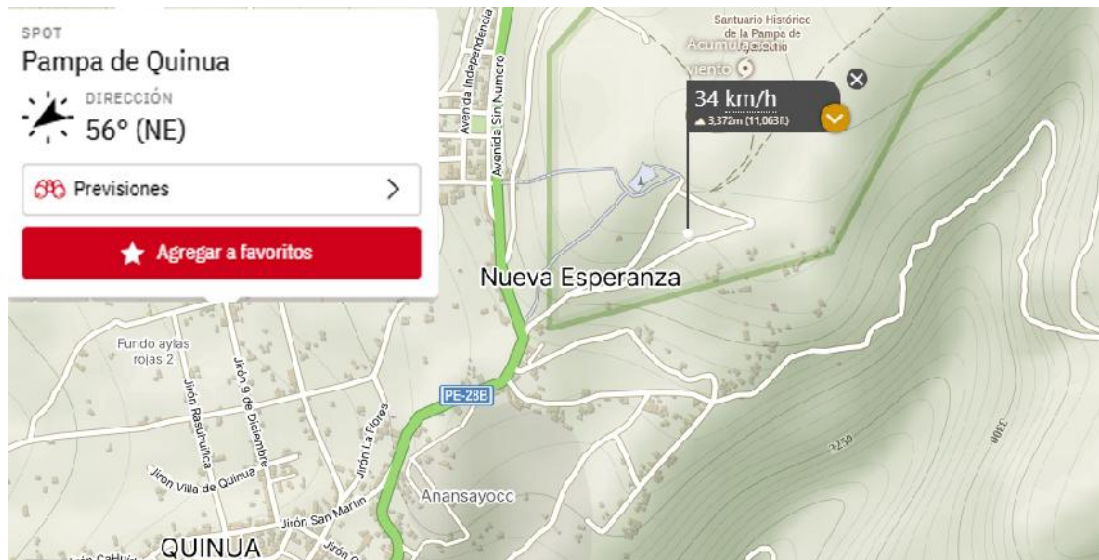


Fuente: Elaboración propia Revit

3.9.2. Velocidad de viento para simulación

La rosa de los vientos es un diagrama gráfico que representa la distribución de la velocidad y dirección del viento, para el distrito de Quinua a partir de la figura 3.31 representado por una cuña indicando la dirección predominante y la frecuencia con que el viento sopla desde una dirección dada.

Figura 3.31: Velocidad de viento identificado

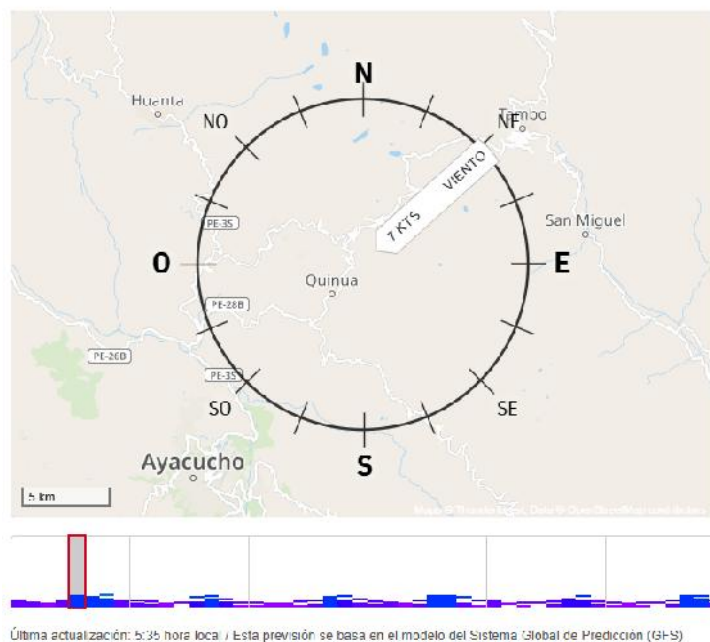


Fuente: <https://www.windy.com/>

A partir de la figura 3.31, se observa que la velocidad promedio del viento registrada en el distrito de Quinua es de aproximadamente 34 km/h. Sin embargo, para fines de simulación y análisis estructural, se asumirá una velocidad base de 60 km/h, considerando además la evaluación de ráfagas de viento con intensidades de 120 km/h y 180 km/h, con el objetivo de analizar el comportamiento de la estructura ante diferentes condiciones eólicas.

Figura 3.32: Rosa de vientos Pampa de Quinua

Vista de pájaro del viento para Pampa de Quinua



Fuente: https://www.windfinder.com/forecast/pampa_de_quinua

Figura 3.33: Direccion de viento

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.33 se observa que la dirección predominante del viento proviene del noreste (NE), impactando al vértice principal del obelisco (representado por los vectores de color azul). Esta orientación, sin embargo, no genera una influencia significativa sobre la estructura, ya que el flujo incide de forma más aerodinámica, reduciendo el impacto directo de la presión del viento. En base a este análisis, se selecciona para la simulación la dirección más crítica del viento, correspondiente al flujo que impacta frontalmente sobre la mayor superficie del obelisco (vectores de color rojo), con el fin de evaluar la condición estructural más desfavorable.

3.9.3. Dominio Computacional y Condiciones de Contorno

El dominio computacional se definió como un túnel de viento virtual rectangular. Para evitar efectos de bloqueo artificial y permitir el desarrollo completo de la estela turbulenta, se siguieron las recomendaciones de Franke et al. (2007) para flujos externos:

- Distancia a barlovento (entrada): $5H$ (donde H es la altura del obelisco).
- Distancia a sotavento (salida): $15H$ para capturar la estela.
- Altura y laterales del dominio: $5H$ para evitar la aceleración artificial del flujo por constricción de paredess.

3.9.3.1. Condiciones de Contorno

- Inlet (Entrada): Se configuró como Velocity-Inlet con un perfil logarítmico de velocidad de viento según la rugosidad del terreno tipo III (campo abierto), con una velocidad base de referencia de 60 km/h y ráfagas de hasta 120 km/h y 180 km/h .
- Outlet (Salida): Se definió como Pressure-Outlet con presión manométrica de 0 Pa .
- Paredes del Obelisco: Condición de No-Slip Wall (sin deslizamiento).

- Paredes del Túnel: Condición de Symmetry o pared con deslizamiento libre para no afectar el flujo.

3.9.4. Cálculo del Número de Reynolds (Re):

Para caracterizar el régimen de flujo y validar el modelo matemático, se calculó el Número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}$$

Donde la densidad del aire a 3300 m.s.n.m. es aproximadamente $\rho = 0.85 \text{ kg/m}^3$, la velocidad es $V = 16.67 \text{ m/s}$ (60 km/h), la longitud característica de la base es $L \approx 10 \text{ m}$, y la viscosidad dinámica es $\mu = 1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$. El resultado arroja un Re en el orden de 10^6 a 10^7 , lo que confirma un régimen altamente turbulento, validando la necesidad ineludible de utilizar modelos avanzados RANS en la etapa CFD.

3.9.5. Malla y Convergencia

3.9.5.1. Discretización Espacial (Malla):

Para el análisis CFD, se utilizó una malla no estructurada con elementos tetraédricos, aplicando una técnica de Inflation (capas de prisma) en las superficies del obelisco para capturar la capa límite ($y^+ < 5$).

Para el análisis estructural (FEM), se emplearon elementos sólidos de alto orden tipo SOLID187 (tetraedros de 10 nodos), los cuales son ideales para geometrías irregulares, permitiendo una interpolación cuadrática de los desplazamientos

3.9.5.2. Independencia de Malla y Convergencia:

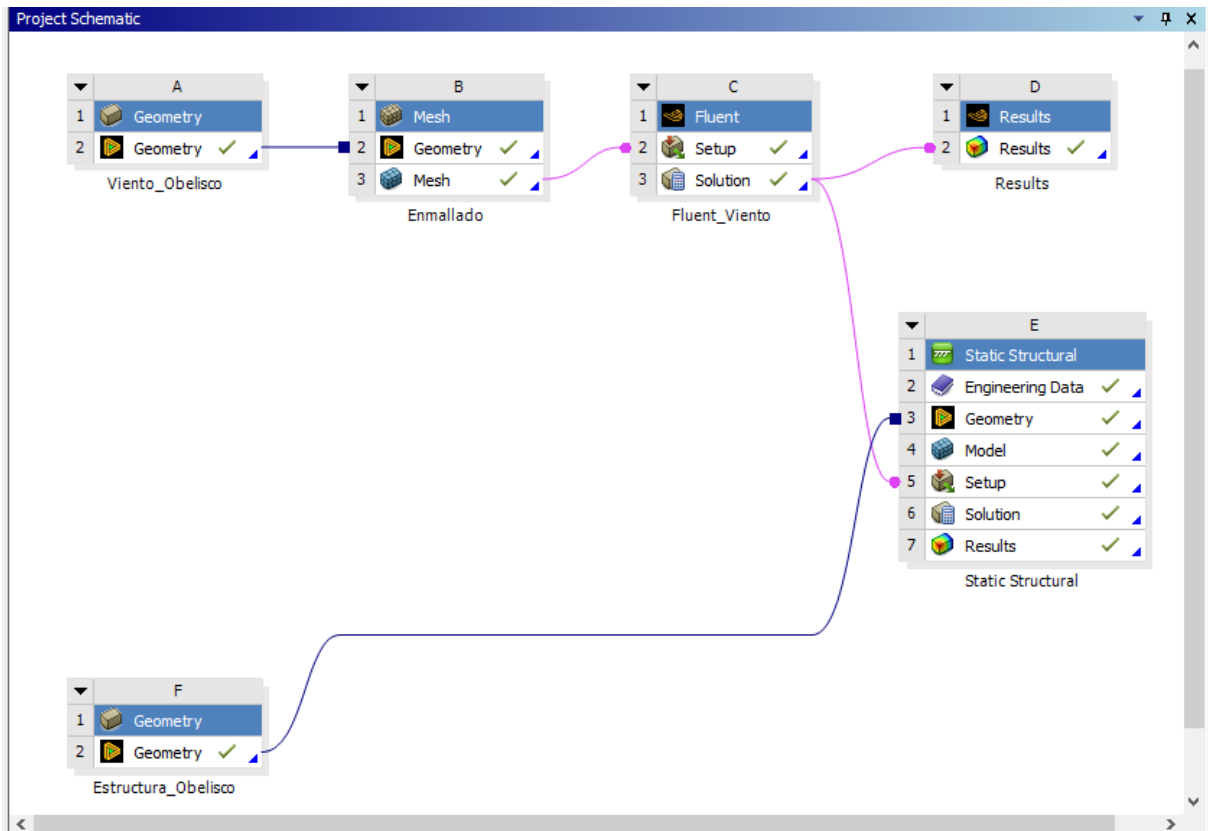
Se realizó un estudio de sensibilidad de malla con tres densidades (gruesa, media, fina). Se seleccionó la malla media (aprox. 500,000 elementos) al observar que la variación en los coeficientes de presión era menor al 5 % respecto a la malla fina.

El criterio de convergencia para la solución numérica se estableció cuando los residuales de la ecuación de continuidad, momento y turbulencia descendieron por debajo de 1×10^{-4} , asegurando la estabilidad de la solución.

3.9.6. Ejecutar el analisis

En la presente sección se expone, de manera general, la metodología aplicada en la simulación aerodinámica, la cual comprendió las etapas de importación del modelo tridimensional, definición del dominio de flujo, generación de la malla volumétrica en 3D, asignación de las propiedades del fluido (aire), aplicación de las condiciones de contorno y la simulación de la acción del viento sobre la superficie del obelisco. Finalmente, se efectuó la post-procesación de resultados, obteniendo la distribución de presiones, esfuerzos y deformaciones generadas por la interacción del flujo con la estructura.

Figura 3.34: Secuencia de análisis Obelisco de la Pampa de Quinua

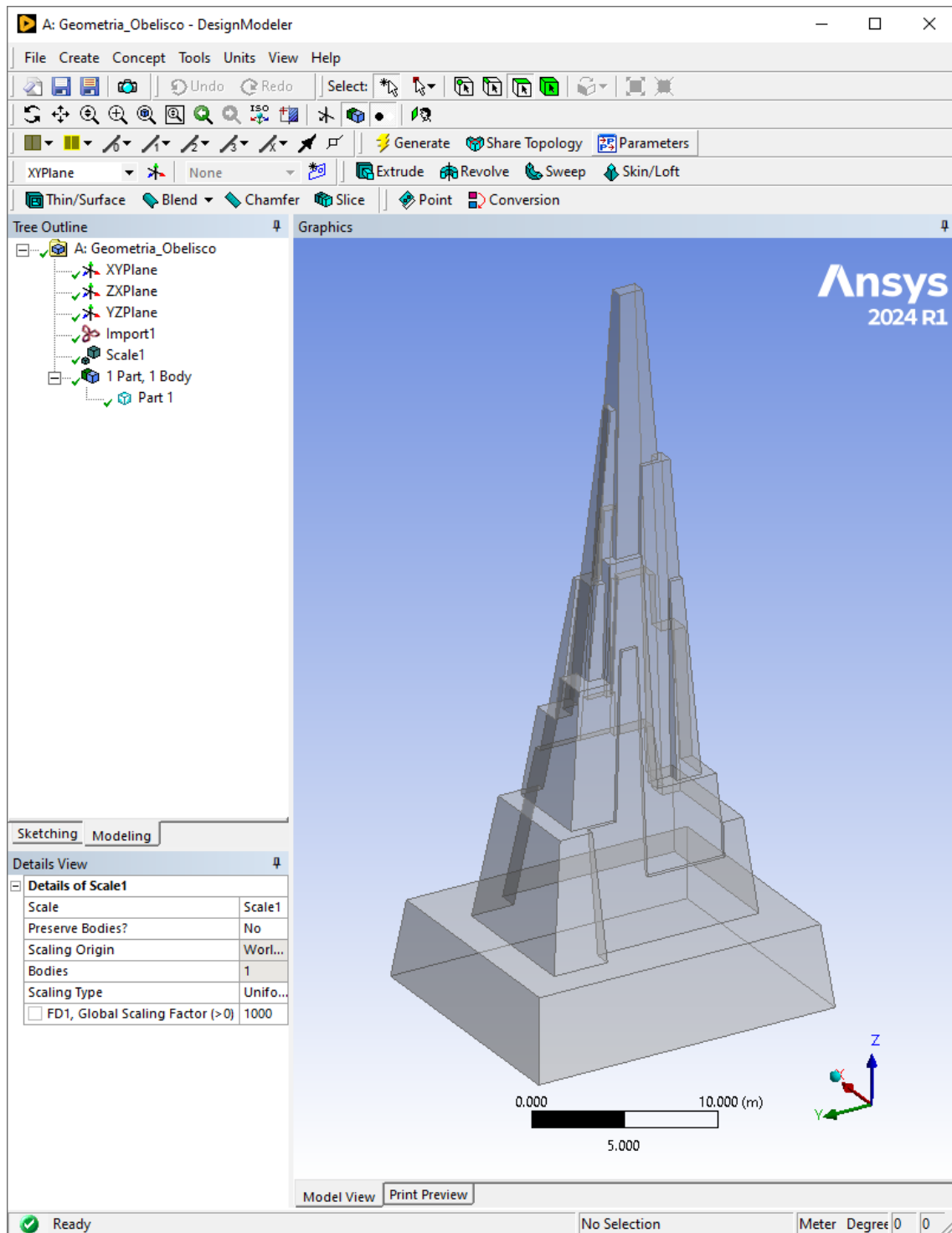


Fuente: Elaboración propia - Ansys Workbench 2024 R1

El modelo tridimensional elaborado en Autodesk Revit 2025 fue exportado en formato .SAT con el nombre "Obelisco3D.sat", debido a su compatibilidad con ANSYS Workbench 2024 R1. A partir de este archivo se efectuó el análisis del flujo de viento en ANSYS Fluent, aplicando el método de volúmenes finitos para evaluar los efectos aerodinámicos sobre la estructura del obelisco.

- **Dominio Computacional:** Se definió el volumen de control (túnel de viento) mediante la herramienta "Boolean", sustrayendo el sólido del obelisco. Para evitar efectos de bloqueo artificial y permitir el desarrollo de la estela turbulenta, se aplicaron las directrices de **Franke** (2007): la entrada (Inlet) se situó a 5H (siendo H la altura del obelisco), la salida (Outlet) a 15H hacia sotavento, y el techo/laterales a 5H.

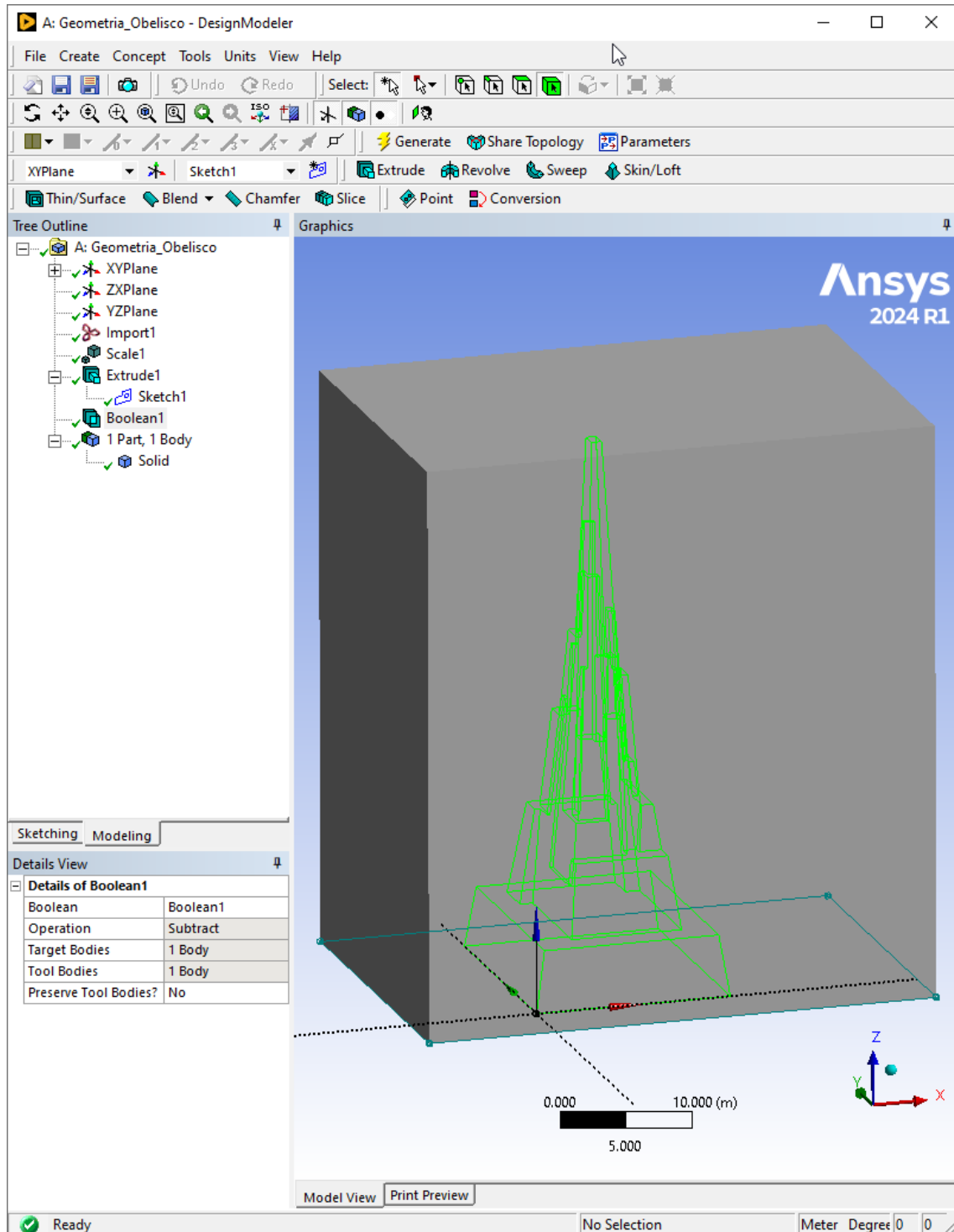
Figura 3.35: Modelo 3D Obelisco de la Pampa de Quinua



Fuente: Elaboracion propia - Ansys Workbench 2024 R1

Se define el volumen de control del flujo de viento mediante la herramienta “Boolean” del módulo de geometría, la cual permite crear o sustraer sólidos para obtener el dominio de aire. En este caso, se extrajo el volumen del obelisco, generando el espacio por donde circula el viento, incorporando además parámetros como velocidad, dirección, presión de entrada y condiciones de contorno.

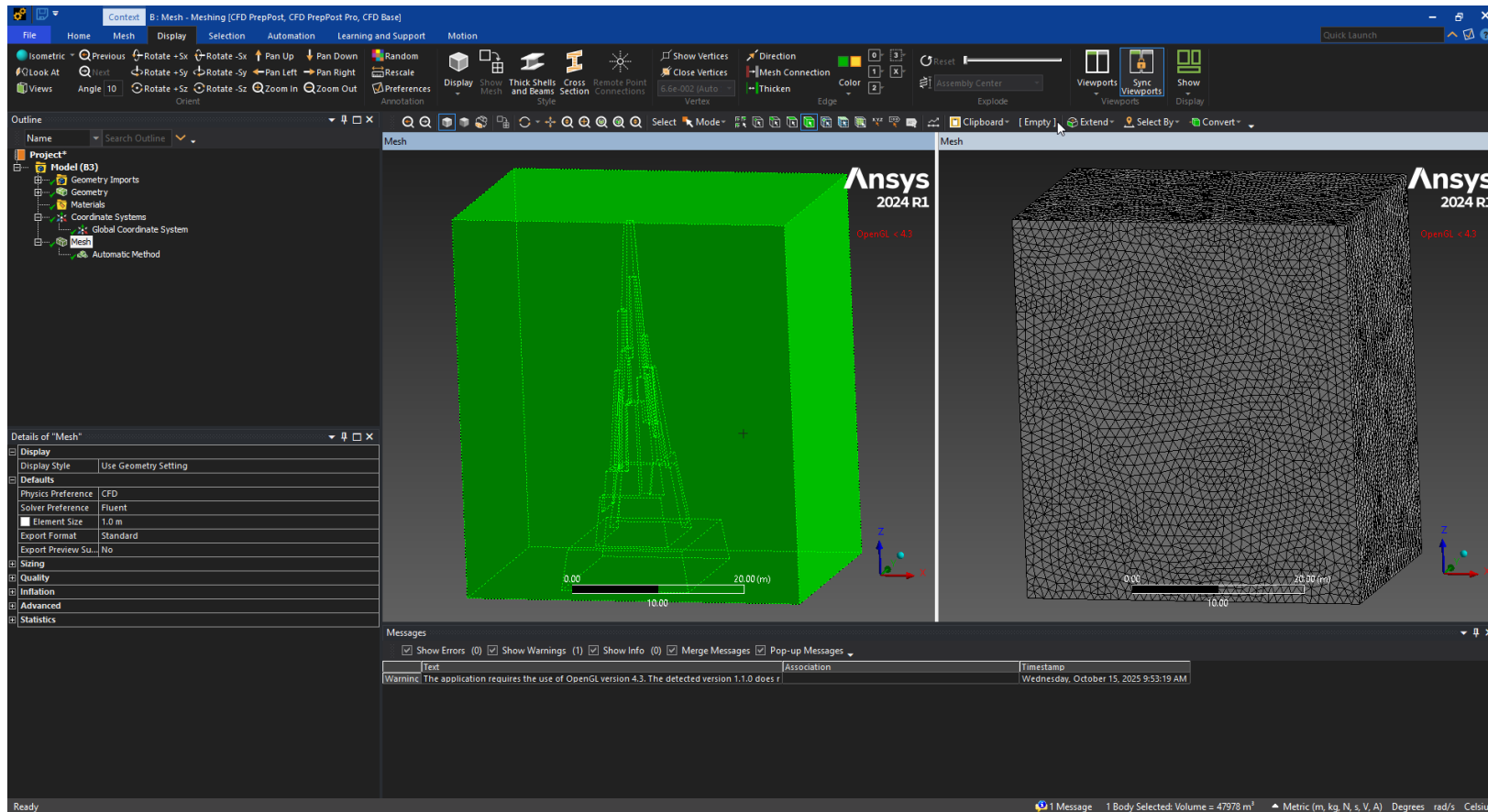
Figura 3.36: Modelo 3D del campo de flujo



Fuente: Elaboracion propia - Ansys Workbench 2024 R1

- Enmallado (Meshing): Se procedió a discretizar el dominio tridimensional. Se utilizó una malla no estructurada con elementos tetraédricos (tamaño base 0.1 m). Se aplicó una técnica de Inflation (capas de prisma) en las superficies del obelisco para capturar correctamente la capa límite ($y^+ < 5$). Se realizó un estudio de sensibilidad, seleccionando una malla de aproximadamente 500,000 elementos, al observar que la variación de resultados era menor al 5% respecto a mallas más densas.

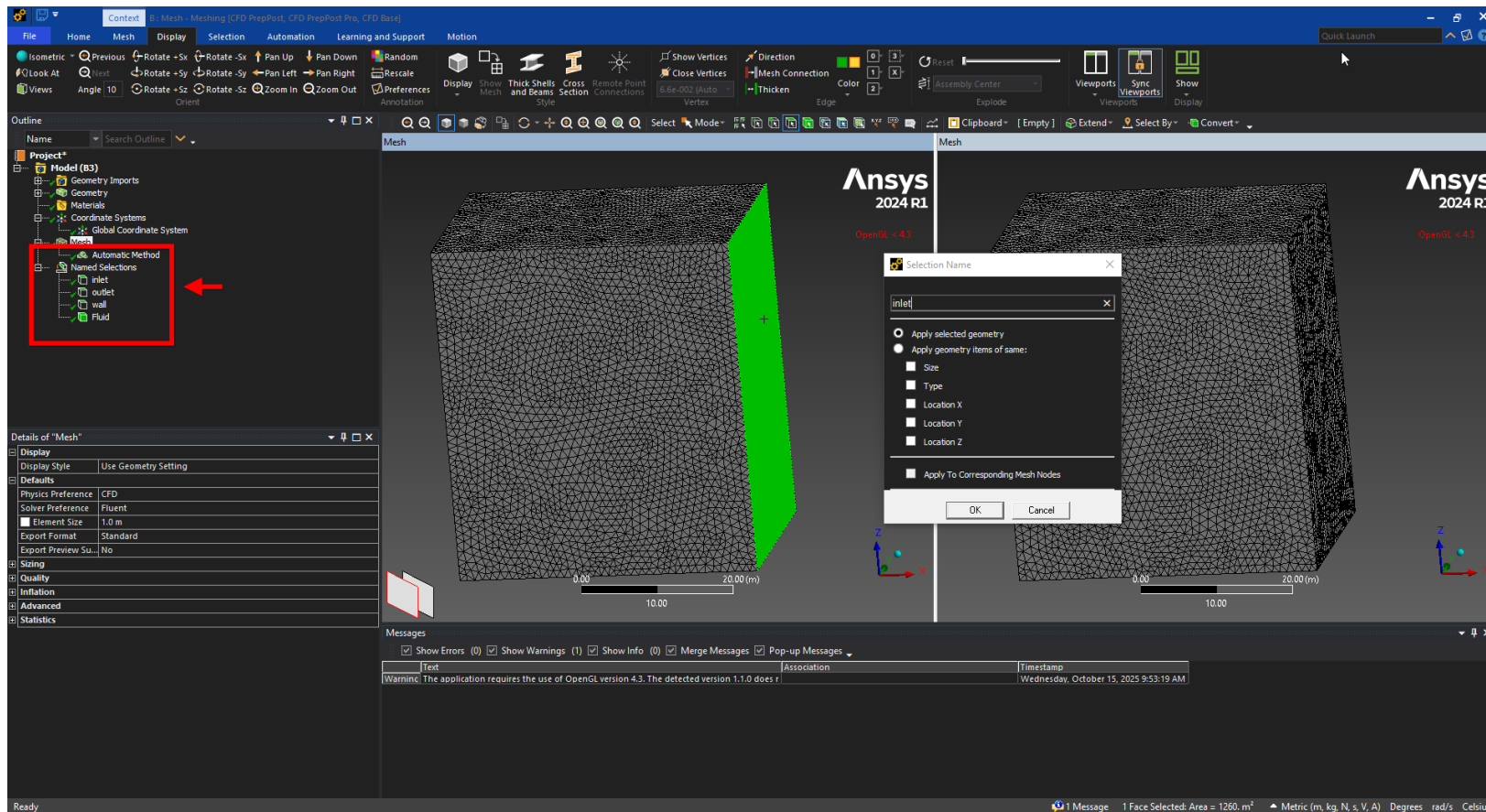
Figura 3.37: Enmallado del campo de flujo



Fuente: Elaboracion propia - Ansys Workbench 2024 R1

Configuración Física (Setup): Se asignaron las zonas correspondientes (Inlet, Outlet, Wall, Fluid). El Inlet se configuró como entrada de velocidad y el Outlet como presión manométrica cero. Después del enmallado, se procede a la definición de las áreas del modelo, asignando las zonas correspondientes a wall, inlet, outlet y fluid, según su función en el dominio de simulación. En esta etapa se establecen las condiciones de frontera e información de entrada (inputs), como velocidad, presión y dirección del flujo.

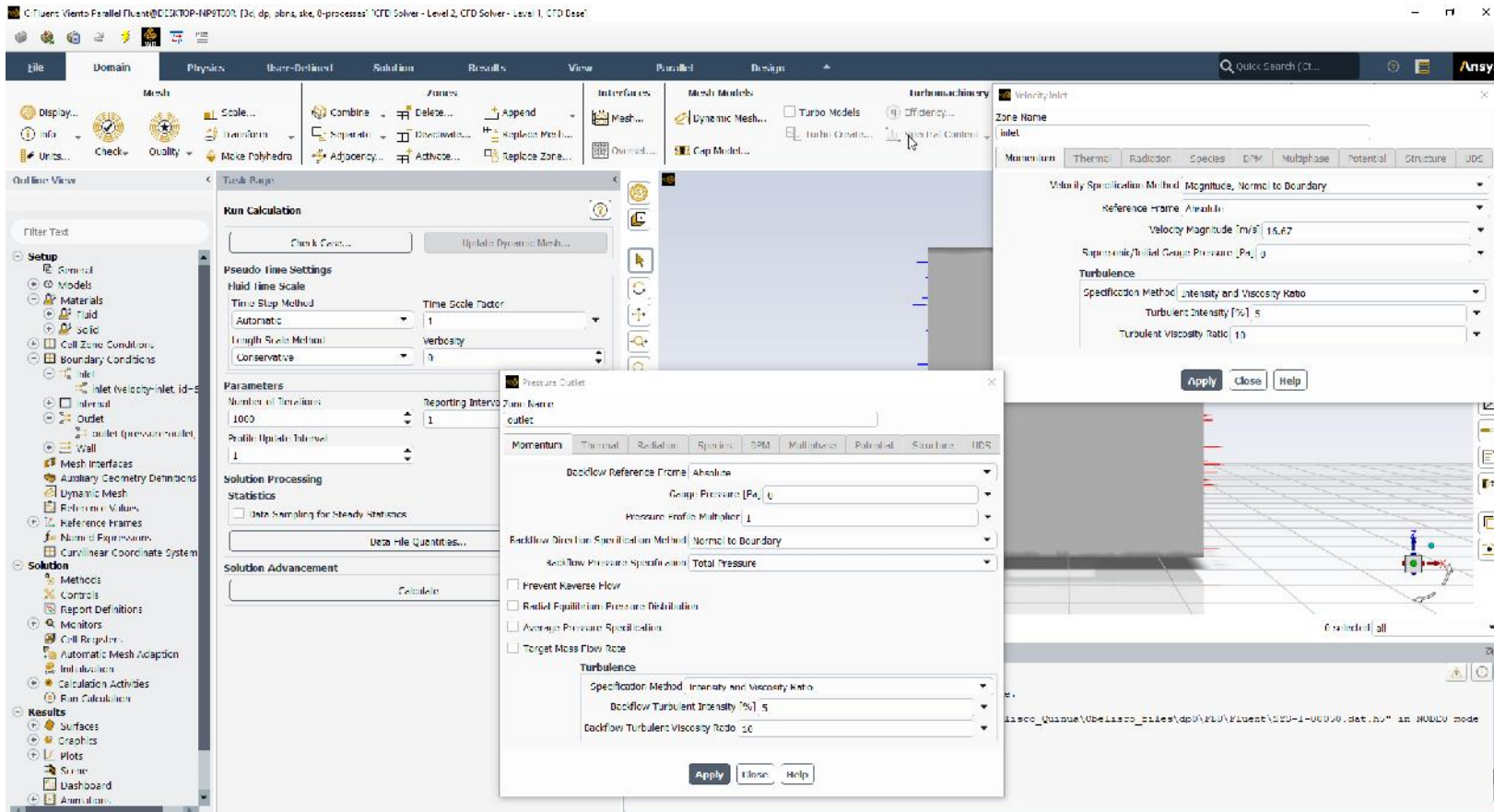
Figura 3.38: Definición de las caras del modelo



Fuente: Elaboracion propia - Ansys Workbench 2024 R1

Para simular la turbulencia y la separación del flujo en las aristas del obelisco, se seleccionó el modelo híbrido $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport). Este modelo es superior ya que utiliza $k - \omega$ cerca de las paredes (capturando succión y gradientes adversos) y transiciona a $k - \epsilon$ en el flujo libre. El criterio de convergencia numérica se alcanzó cuando los residuales descendieron por debajo de 10^{-4} .

Figura 3.39: Configuración de los condiciones iniciales

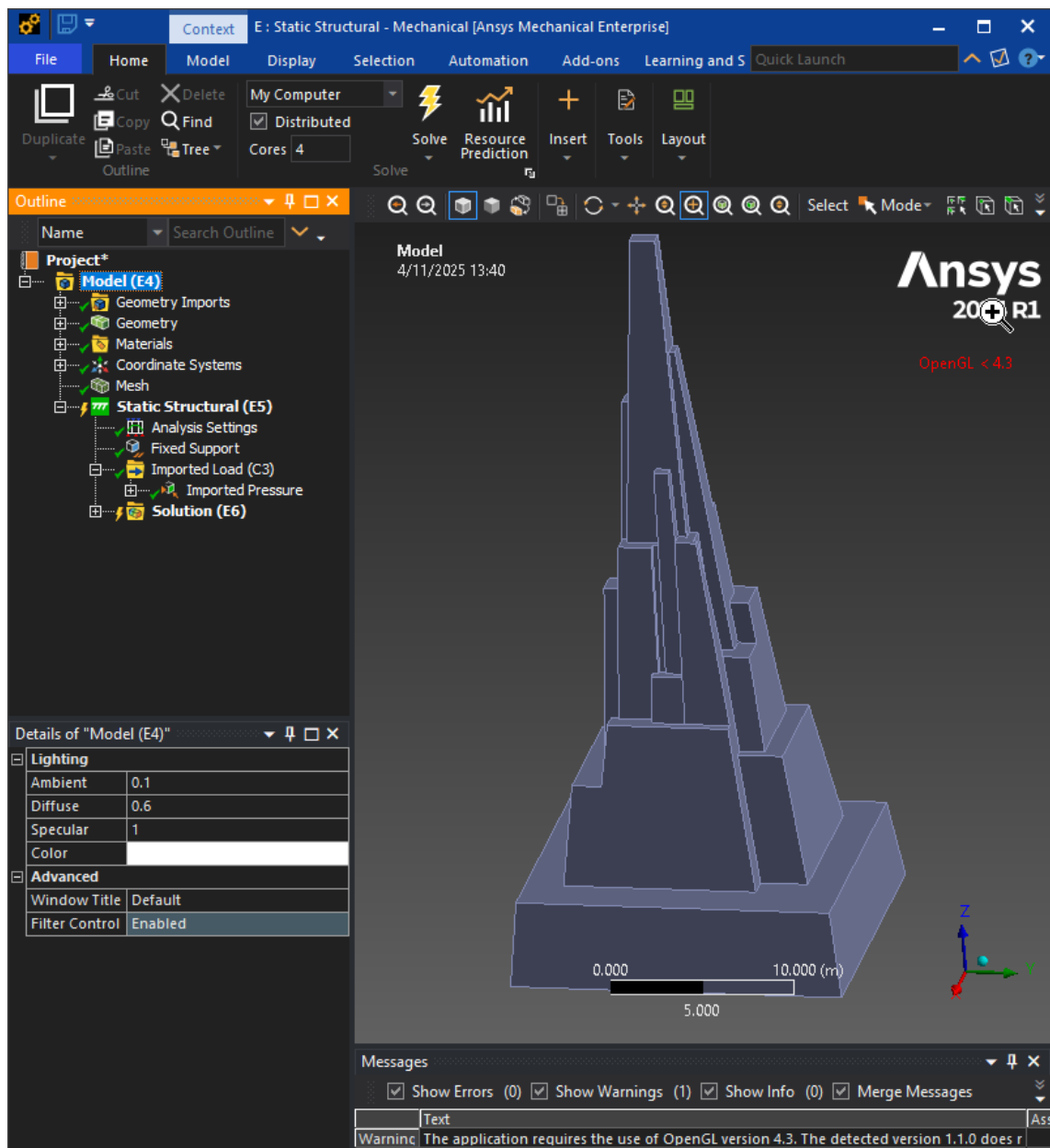


Fuente: Elaboración propia - Ansys Workbench 2024 R1

Análisis Estructural (Static Structural): Una vez finalizada la simulación CFD, el campo de presiones superficiales se exportó mediante Imported Pressure al modelo estructural 3D del obelisco. Se emplearon elementos sólidos de alto orden tipo SOLID187, ideales para geometrías irregulares.

Después de ingresar los datos o inputs, se procede a configurar la sección de análisis estructural estático, identificada en el entorno de ANSYS Workbench como "Static Structural". En esta etapa se definen las propiedades mecánicas del material, las condiciones de apoyo, las cargas importadas del análisis de viento y los parámetros necesarios para evaluar la respuesta estructural del obelisco.

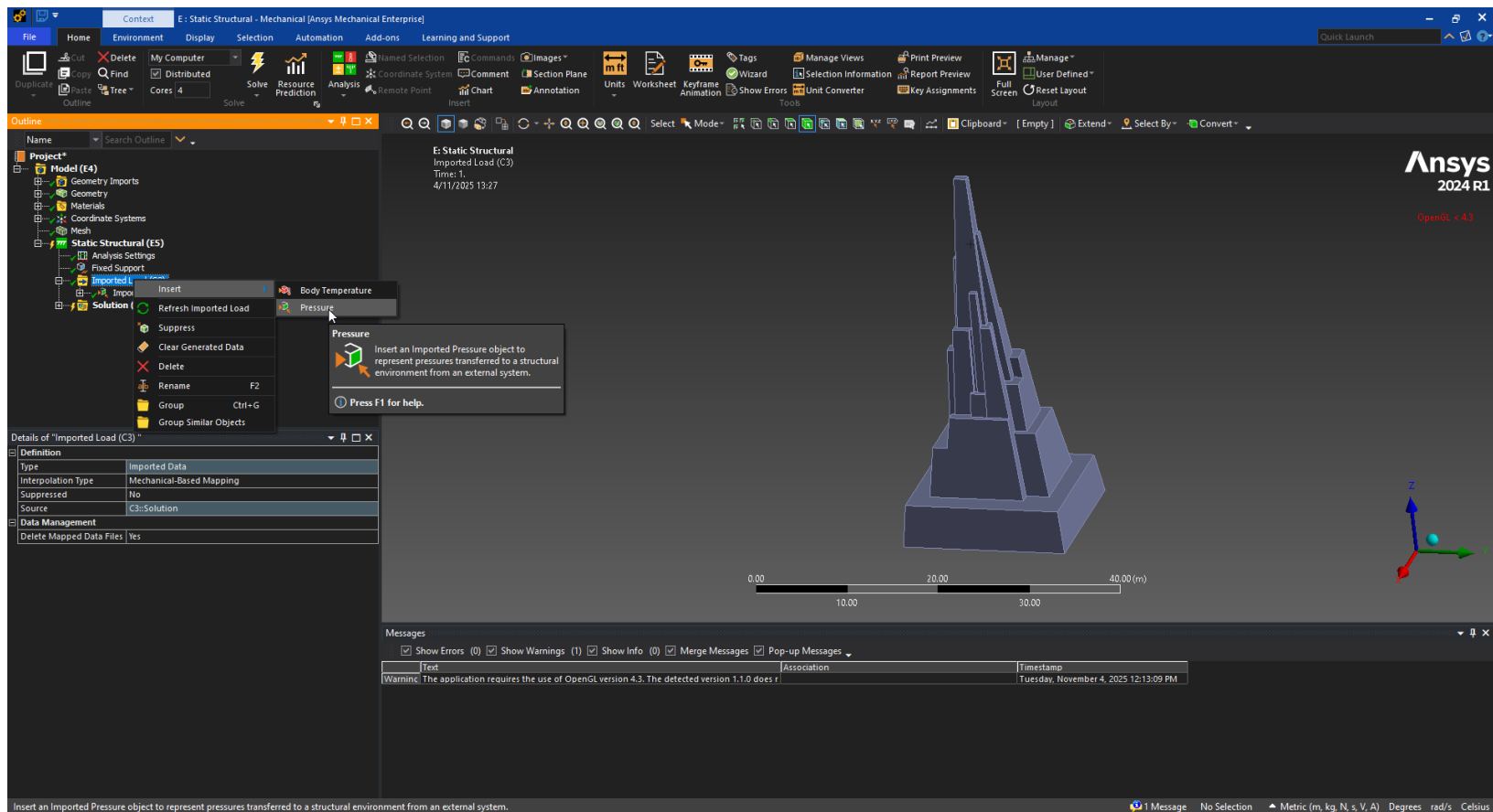
Figura 3.40: Configuración del análisis estructural estático



Fuente: Elaboración propia - Ansys Workbench 2024 R1/Static Structural - Mechanical

Posteriormente, una vez finalizada la simulación, se exportan los resultados de presión obtenidos sobre la superficie del modelo hacia el modelo estructural 3D del obelisco, con el fin de realizar el análisis estático correspondiente. Este procedimiento permite evaluar la distribución de esfuerzos y las deformaciones generadas por la acción del viento sobre la estructura.

Figura 3.41: Incorporación de la presión del viento hacia al Obelisco

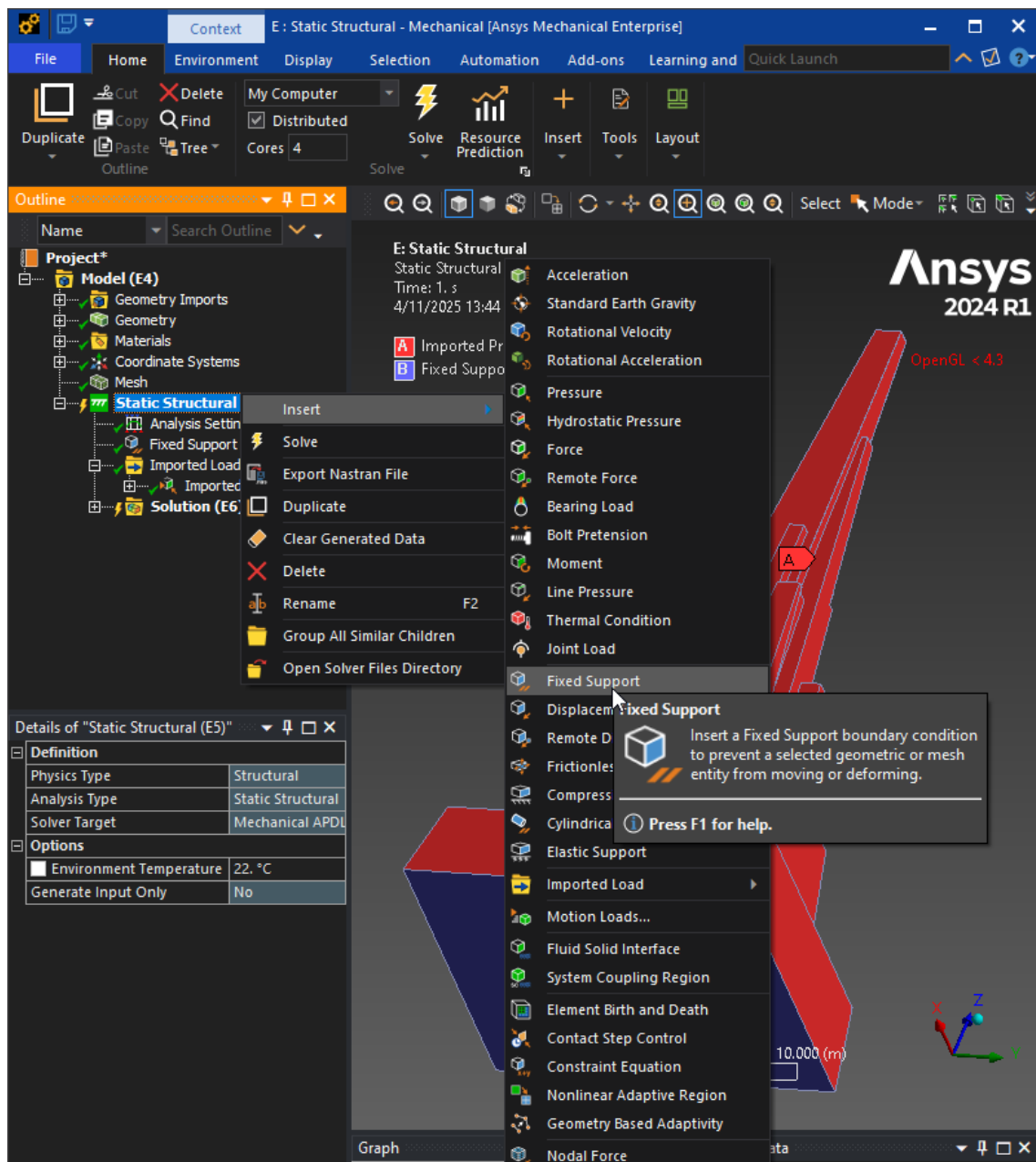


Fuente: Elaboración propia - Ansys Workbench 2024 R1/Static Structural - Mechanical

Se definió la condición de soporte fijo (Fixed Support) en la base de la estructura, impidiendo desplazamientos y rotaciones para representar el empotramiento real con la cimentación.

Seguidamente, en el mismo módulo, se definen las condiciones de soporte fijo (empotramiento) en la base de la estructura. Estas restricciones impiden los desplazamientos y rotaciones en los puntos de apoyo, garantizando la estabilidad del modelo estructural durante el análisis y permitiendo una correcta transmisión de los esfuerzos hacia el terreno.

Figura 3.42: Configuración de condiciones de apoyo empotrado



Fuente: Elaboración propia - Ansys Workbench 2024 R1/Static Structural - Mechanical

Finalmente, se definieron las propiedades del material. Se seleccionó Concreto, asignando un esfuerzo a la compresión de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (aprox. 20.6 MPa), con su respectivo módulo de elasticidad y densidad de 2300 kg/m^3 . Con estos parámetros, se ejecutó la solución matemática para obtener las deformaciones y esfuerzos internos.

Dentro del mismo módulo de Ansys Structure Mechanical, se procede a definir las propiedades del material que se empleará en el modelo. En este caso, se selecciona concreto, especificando sus características mecánicas como el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, densidad y demás parámetros necesarios para representar adecuadamente su comportamiento estructural dentro del análisis.

Figura 3.43: Configuración de condiciones de apoyo empotrado

The screenshot displays the Ansys Workbench interface for configuring material properties. The central panel, titled 'Engineering Data: Material View', shows the 'Concrete' material selected. The properties are organized into sections: 'Density' (2300 kg/m³), 'Structural' (Isotropic Elasticity), and 'Thermal'. The 'Structural' section includes properties like Young's Modulus (3e+10 Pa), Poisson's Ratio (0.18), and various strength values. The 'Thermal' section includes Isotropic Thermal Conductivity (0.72 W/m°C) and Specific Heat Constant Pressure (780 J/kg°C). A 'Details of "Concrete"' panel at the bottom left provides a summary of these properties. The bottom of the interface shows a 'Messages' panel with a warning about OpenGL version 4.3 and an error about an invalid assignment.

Engineering Data: Material View	
Concrete	
Density	2300 kg/m³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	3e+10 Pa
Poisson's Ratio	0.18
Bulk Modulus	1.5625e+10 Pa
Shear Modulus	1.2712e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1.4e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	4.1e+07 Pa
Compressive Yield Strength	0 Pa
Tensile Ultimate Strength	5e+06 Pa
Tensile Yield Strength	0 Pa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0.72 W/m°C
Specific Heat Constant Pressure	780 J/kg°C

Details of "Concrete"	
Common Material Properties	
Density	2300 kg/m³
Young's Modulus	3e+10 Pa
Thermal Conductivity	0.72 W/m°C
Specific Heat	780 J/kg°C
Tensile Yield Strength	0 Pa
Tensile Ultimate Strength	5e+06 Pa
Nonlinear Behavior	False
Full Details	Click To Expand
Statistics	
Assigned Bodies	0

Fuente: Elaboración propia - Ansys Workbench 2024 R1/Static Structural - Mechanical

IV: Resultados y discusiones

El desarrollo de esta investigación delimitado por la interacción del viento sobre el monumento histórico de la Pampa de Quinua, este análisis se desarrolla a través del modelo computacional Ansys Fluent y Ansys Structure, que involucra un análisis multifísico donde se analiza el viento y los esfuerzos generados.

4.1. Descripción de la zona de estudio

Como se observa en la figura 4.44 la zona de estudio se ubica en la Pampa de Quinua, en el distrito de Quinua, provincia de Huamanga, región Ayacucho. Este lugar se encuentra a una altitud aproximada de 3,300 metros sobre el nivel del mar, caracterizándose por un clima frío y seco, con temperaturas que varían entre los 6 y 8 grados centígrados a lo largo del año. La región presenta una topografía mayormente plana y abierta, lo que favorece la libre circulación de las corrientes de aire.

En esta zona se erige el Obelisco de la Pampa de Quinua, monumento histórico que conmemora la Batalla de Ayacucho de 1824, evento decisivo para la independencia del Perú. La estructura, de gran altura y forma esbelta, se encuentra expuesta directamente a la acción de los vientos predominantes, que suelen alcanzar velocidades considerables especialmente en horas de la tarde.

La dirección y velocidad del viento son factores determinantes para el análisis estructural del obelisco, ya que las presiones dinámicas generadas por el flujo del aire pueden inducir esfuerzos y vibraciones en su superficie. Comprender esta interacción permite evaluar la estabilidad y resistencia del monumento, garantizando su conservación frente a las condiciones climáticas propias de la zona.

A partir del modelo desarrollado, se realizaron tres simulaciones considerando velocidades de viento de 60 km/h, 120 km/h y 180 km/h, todas aplicadas en la misma dirección Norte-Oeste. Para el análisis en Ansys Fluent, se definió el Obelisco de la Pampa de Quinua como un sólido, con el objetivo de obtener la distribución de presiones ejercidas por el flujo del viento sobre su superficie.

Figura 4.44: Vista panorámica de la identificación de la geometría del modelo a simular



Fuente: Trabajo de campo.

Posteriormente, los valores de presión obtenidos fueron transferidos al módulo Ansys Structure Mechanical, donde se evaluaron los esfuerzos y deformaciones generados en la estructura. Este procedimiento permitió analizar el comportamiento estructural del monumento frente a distintas intensidades de viento, asegurando una evaluación integral de su resistencia y estabilidad bajo condiciones ambientales representativas de la zona.

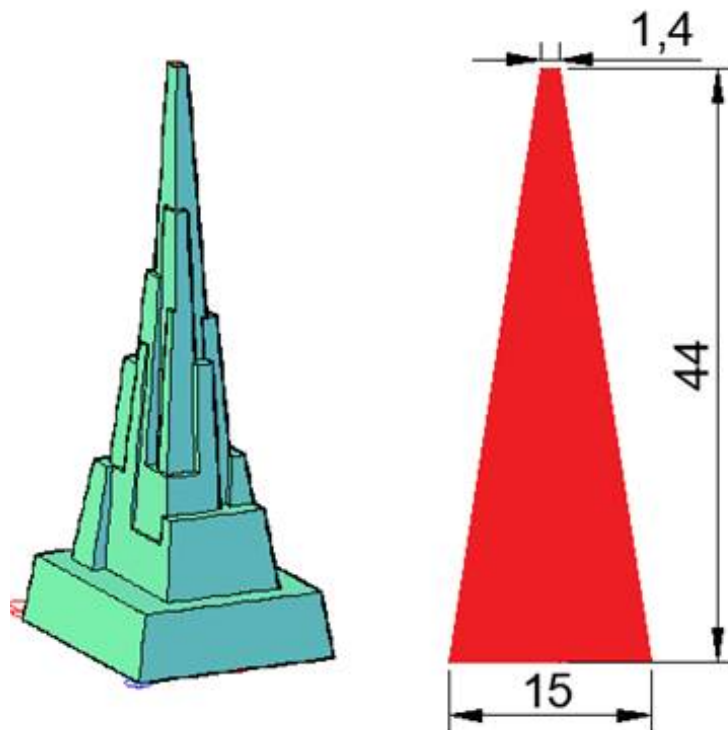
4.2. Análisis Analítico Estático según Norma Técnica Peruana E.020

4.2.1. Idealización de la Estructura para el Modelo Matemático

Para el análisis, se idealiza el obelisco como un sólido de revolución “piramidal” que se estrecha con la altura. Las características geométricas base son:

- Altura total: $H = 44$ m.
- Ancho proyectado en la dirección considerada en la base (eje XX): $b_0 = 15$ m.
- Ancho proyectado en la parte más alta (eje XX): $b_t = 1.4$ m.

Figura 4.45: Modelo representativo del Obelisco



Fuente: Elaboración propia

Suponiendo una variación lineal del ancho con respecto a la altura, donde z es la altura medida desde la base ($z = 0$ en la base, $z = H$ en la punta), el ancho proyectado se expresa mediante la Ecuación 01:

$$b(z) = b_0 - \left(\frac{b_0 - b_t}{H} \right) z \quad (4.8)$$

A efectos del análisis, el monumento se comporta como un elemento en voladizo (tipo mástil o torre) que se encuentra empotrado en su cimentación. Este modelo cuenta con un eje vertical (eje Z) y dos direcciones ortogonales horizontales (eje X y eje Y).

El empuje del viento se considera actuando en:

- **Dirección X:** Presión perpendicular a una de las caras principales.
- **Dirección Y:** El mismo procedimiento, asumiendo el mismo modelo geométrico en ambas direcciones a falta de datos detallados de planta.

4.2.2. Clasificación frente al Viento y Velocidad de Diseño

El obelisco se comporta como una estructura esbelta tipo torre, por lo que la normativa la clasifica como “Edificación Tipo 2”. Esto significa que su esbeltez la hace sensible a las ráfagas y la carga exterior debe ser multiplicada por un factor de ampliación de 1.2 para considerar los efectos dinámicos simplificados. (La norma también define edificaciones Tipo 1, poco sensibles, y Tipo 3, con problemas aerodinámicos especiales, pero no aplican a este caso).

Para este trabajo, se analizan dos escenarios de velocidad básica de viento V a 10 m sobre el terreno:

- **Caso A:** $V = 120$ km/h.
- **Caso B:** $V = 180$ km/h.

La variación de la velocidad con la altura z (en metros) se modela según la Ecuación 02:

$$V(z) = V \left(\frac{z}{10} \right)^{0.22} \quad (4.9)$$

Donde $V(z)$ es la velocidad de diseño a la altura z , y V es la velocidad básica, ambas en km/h.

4.2.3. Presión y Carga Lineal de Viento

La presión de viento básica a una altura z , expresada en kgf/m^2 , se obtiene con la Ecuación 03:

$$P_{\text{base}}(z) = 0.005C(V(z))^2 \quad (4.10)$$

Donde C es el coeficiente de forma adimensional. Para superficies verticales de edificios en barlovento, se toma típicamente $C = 0.8$.

Al ser una edificación Tipo 2, la presión se amplifica en un 20 %:

$$P_{\text{base}}(z) = 1.2 \times 0.005C(V(z))^2 \quad (4.11)$$

Sustituyendo la Ecuación 02 en la expresión amplificada, obtenemos:

$$P_{\text{base}}(z) = 1.2 \times 0.005CV^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.44} \quad (4.12)$$

Conversión a Carga Lineal

Considerando una franja horizontal infinitesimal de altura dz a la altura z , el área expuesta es $dA = b(z)dz$. La fuerza elemental dF de la presión $P(z)$ sobre esta franja

es:

$$dF = P(z)b(z)dz \quad (4.13)$$

Definimos entonces la carga lineal de viento $q(z)$ en kgf/m como:

$$q(z) = \frac{dF}{dz} = P(z)b(z) \quad (4.14)$$

Reduciendo la Ecuación 01 con los datos geométricos:

$$b(z) = 15 - 13.6 \left(\frac{z}{44} \right) \quad (4.15)$$

Reduciendo la Ecuación 03 con $C = 0.8$:

$$P_{\text{base}}(z) = 0.0048V^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.44} \quad (4.16)$$

Multiplicando ambas expresiones, la carga lineal general $q(z)$ queda definida como:

$$q(z) = \left[15 - 13.6 \left(\frac{z}{44} \right) \right] \left[0.0048V^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.44} \right] \quad (4.17)$$

4.2.4. Resultados Analíticos para $V = 120$ km/h

Aplicando la formulación para una velocidad de 120 km/h, se obtienen los siguientes valores a distintas cotas:

Tabla 4.2: Resultados analíticos de presión y carga lineal para $V = 120$ km/h

z (m)	$b(z)$ [m]	$P_{120}(z)$ [kgf/m ²]	$q_{120}(z)$ [kgf/m]
0	15.00	0.00	0.00
10	11.91	69.12	823.16
20	8.82	93.77	826.87
30	5.73	112.08	641.93
40	2.64	127.21	335.36
44	1.40	132.65	185.72

Nota: Datos extraídos del análisis analítico.

Se observa que mientras la presión $P(z)$ aumenta con la altura y el ancho $b(z)$ disminuye, la carga lineal $q(z)$ presenta un máximo alrededor de $z \approx 15 - 20$ m y luego decae hacia la cúspide.

Fuerza Total y Centro de Aplicación

La fuerza cortante basal total se obtiene integrando la carga lineal a lo largo de toda la altura:

$$F_{W-120} = \int_0^{44} q_{120}(z) dz \quad (4.18)$$

$$F_{W-120} = \int_0^{44} \left[15 - 13.6 \left(\frac{z}{44} \right) \right] \left[0.0048V^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.44} \right] dz \quad (4.19)$$

$$F_{W-120} = 28267 \text{ kgf} \quad (4.20)$$

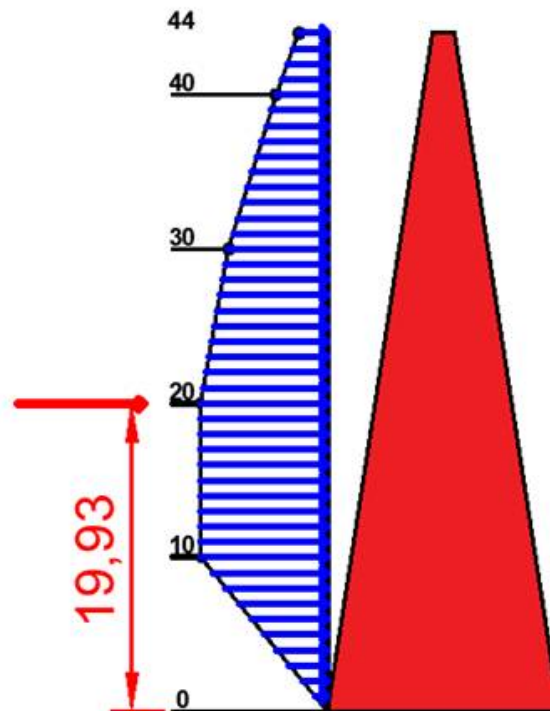
La altura del centro de presiones (punto de aplicación de la resultante) se calcula determinando el momento respecto a la base:

$$Z_{120} = \frac{1}{F_{W-120}} \int_0^{44} z \cdot q_{120}(z) dz \quad (4.21)$$

$$Z_{120} = \frac{1}{28267} \int_0^{44} z \left[15 - 13.6 \left(\frac{z}{44} \right) \right] \left[0.0048V^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.44} \right] dz \quad (4.22)$$

$$Z_{120} = 19.93 \text{ m} \quad (4.23)$$

Figura 4.46: Cálculo de centro de aplicación de la fuerza resultante



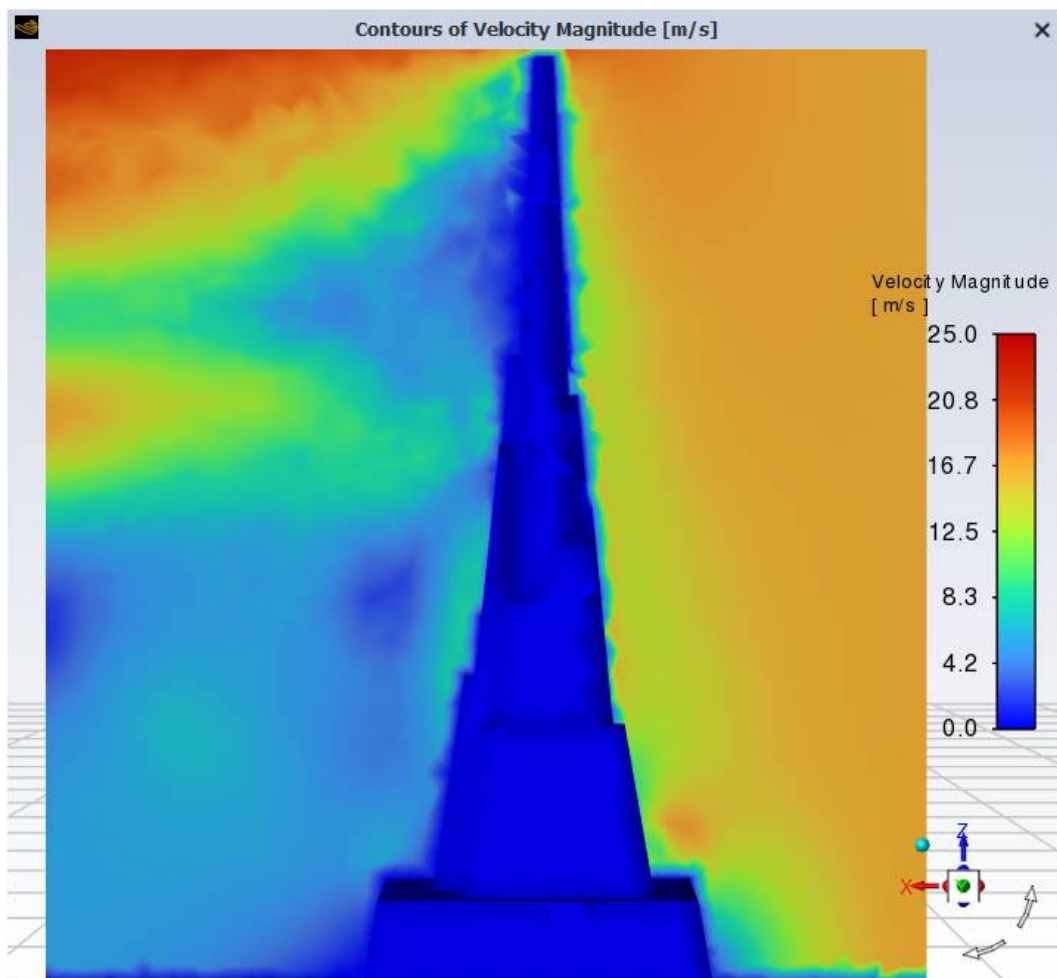
Fuente: Elaboración propia

4.3. Resultados de la primera simulación $V=60\text{km/h}$

4.3.1. Campo de Velocidades obtenidas

La figura 4.47 muestra el campo de velocidades del viento obtenido en la simulación a 60 km/h (equivalente a aproximadamente 16.7 m/s) sobre el Obelisco de la Pampa de Quinoa. Así mismo se observan los contornos de magnitud de velocidad expresados en m/s , donde los colores representan las diferentes intensidades del flujo de aire:

Figura 4.47: Velocidades obtenidas con la simulación de viento de 60Km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

En la figura se muestra la creación de un área de turbulencias bien definida, resultado del flujo de aire que se desprende al chocar y rodear la estructura.

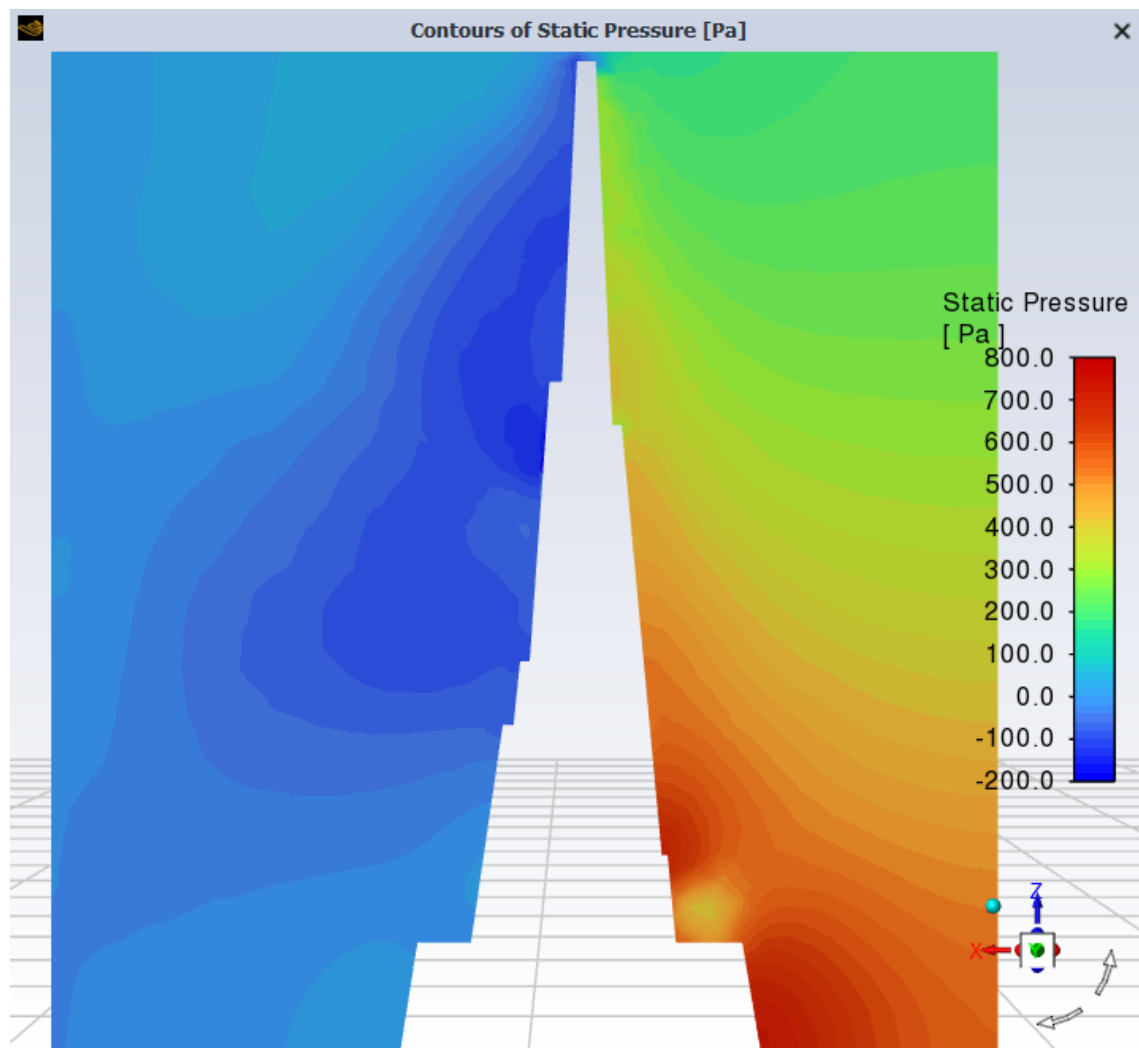
La imagen revela que el viento, al colisionar con la cara delantera del obelisco, reduce drásticamente su velocidad (zona azul oscura), lo que provoca una presión estática elevada en esa área. Después, el flujo se divide y sube por los costados y la parte alta del monumento. Cuando se supera la geometría, el aire deja de estar adherido a la superficie, lo que provoca el desprendimiento del flujo (flow separation).

Esta separación, situada detrás del obelisco, da lugar a una zona de recirculación o estela turbulenta, la cual se distingue por: Dirección del flujo variable y velocidades disminuidas, lo que produce vórtices que cambian de un lado a otro, presiones negativas o de succión que, por lo general, buscan atraer el flujo de vuelta a la estructura, un incremento de la turbulencia como resultado de la interacción entre el flujo principal y las corrientes que se recirculan y la una zona de sombra aerodinámica que se expande varios metros más allá del monumento y presenta un flujo inestable y caótico.

4.3.2. Campo de presiones obtenidas

La figura 4.48 muestra los contornos de presión estática (Static Pressure) en torno al Obelisco de la Pampa de Quinua, correspondiente a la simulación del viento con una velocidad de 60 km/h. Este análisis permite visualizar cómo la distribución de presiones varía al interactuar el flujo de aire con la geometría del monumento.

Figura 4.48: Presiones obtenidas con la simulación de viento de 60Km/h

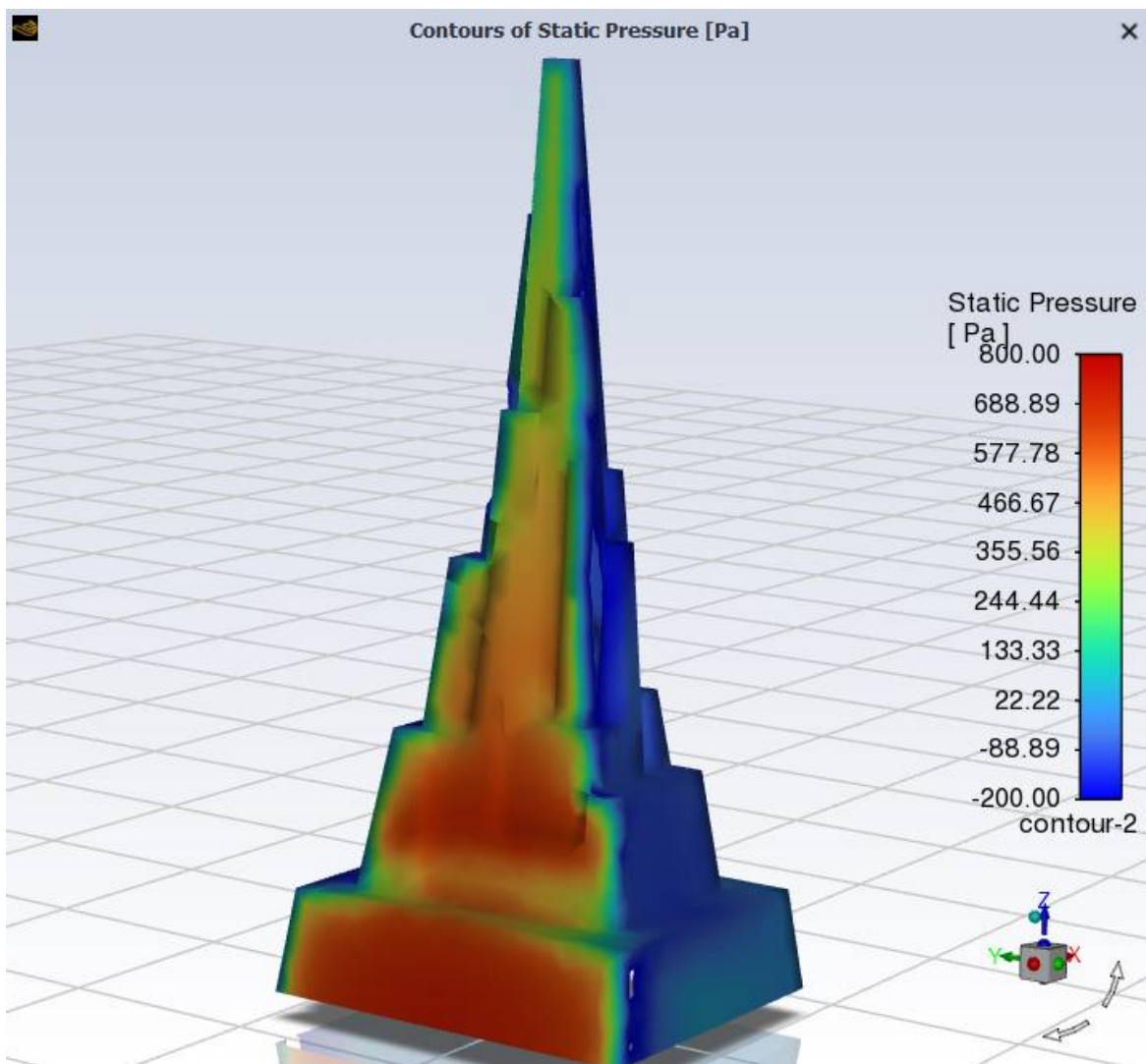


Fuente: Resultados Ansys Fluent

En la figura 4.49 se aprecian las siguientes características principales:

- En la zona frontal derecha del obelisco, representada con tonos rojos y anaranjados, se registran las mayores presiones positivas, con valores que alcanzan hasta 800 Pa. Esta región corresponde al punto de impacto directo del viento, donde la energía cinética del flujo se transforma en presión estática al reducirse su velocidad.
- En la parte posterior e izquierda de la estructura, se observan tonos azules y celestes, que indican presiones negativas o de succión, llegando hasta aproximadamente -200 Pa. Estas zonas corresponden al efecto de desprendimiento del flujo y a la formación de la estela turbulenta, donde el aire se separa de la superficie del obelisco y genera un vacío parcial.
- El gradiente de presión entre las caras opuestas del monumento evidencia una fuerte diferencia de cargas aerodinámicas, lo que origina esfuerzos laterales que deben considerarse en el análisis estructural.

Figura 4.49: Presiones obtenidas, Modelo 3D, viento de 60Km/h



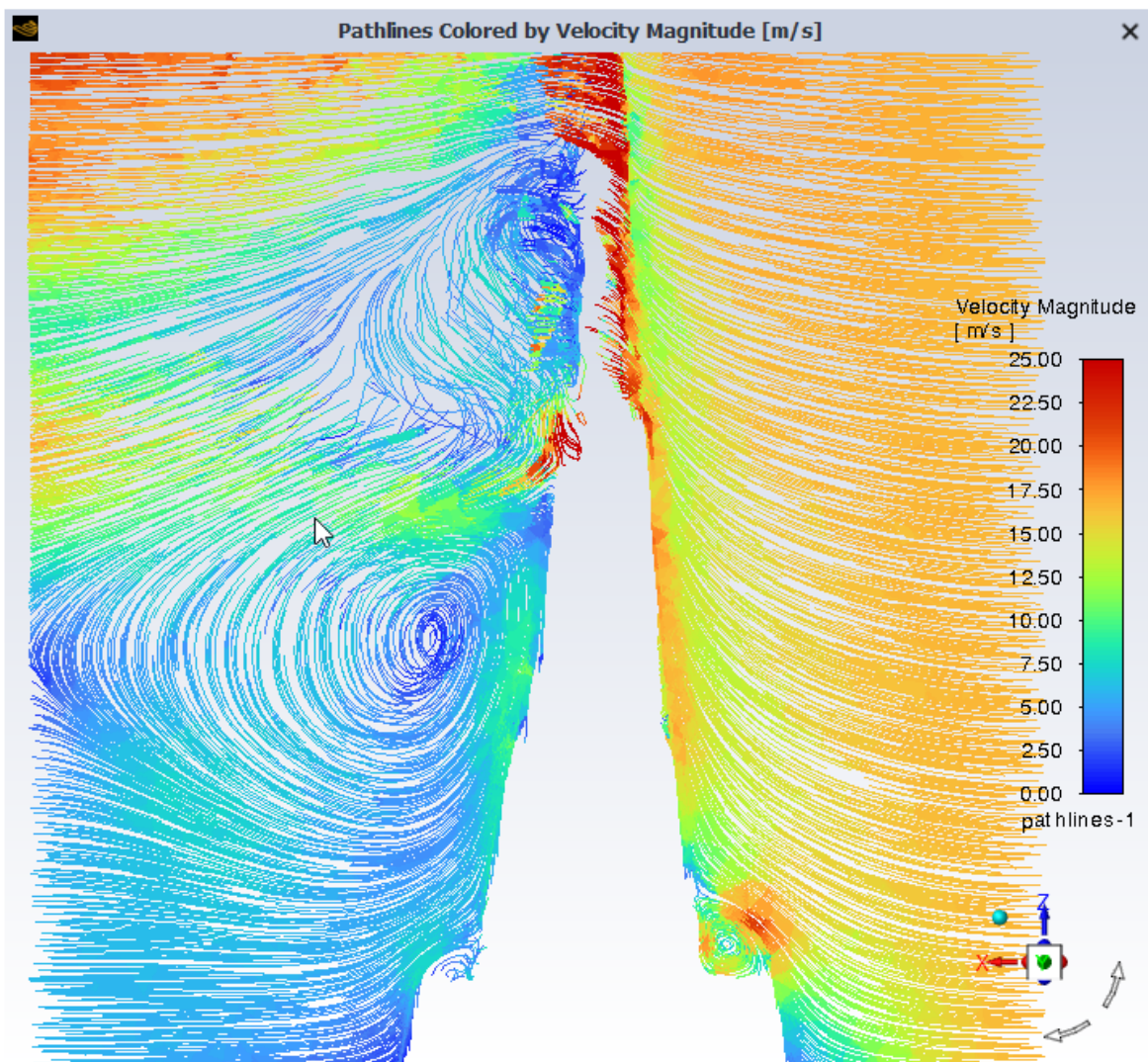
Fuente: Resultados Ansys Fluent

Entonces de la simulación de viento con una velocidad de 60 km/h, produce un nivel de presión en la cara frontal al viento (barlovento) y presiones de succión en la cara del lado contrario al viento (sotavento), rasgos comunes del comportamiento aerodinámico de estructuras altas y estrechas como el obelisco.

4.3.3. Trayectoria de las líneas de corriente

La imagen 4.50 muestra las trayectorias de las líneas de corriente (pathlines) coloreadas según la magnitud de la velocidad del viento (m/s), correspondientes a la simulación realizada sobre el Obelisco de la Pampa de Quinua con una velocidad de viento de 60 km/h. Este tipo de visualización permite comprender el comportamiento del flujo de aire al interactuar con la estructura, mostrando con claridad los patrones de circulación, aceleración y turbulencia que se generan.

Figura 4.50: Trayectorias de las líneas de corriente, viento de 60Km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

De la imagen anterior se puede observar que se muestran zonas donde el viento

tiene un comportamiento diferente:

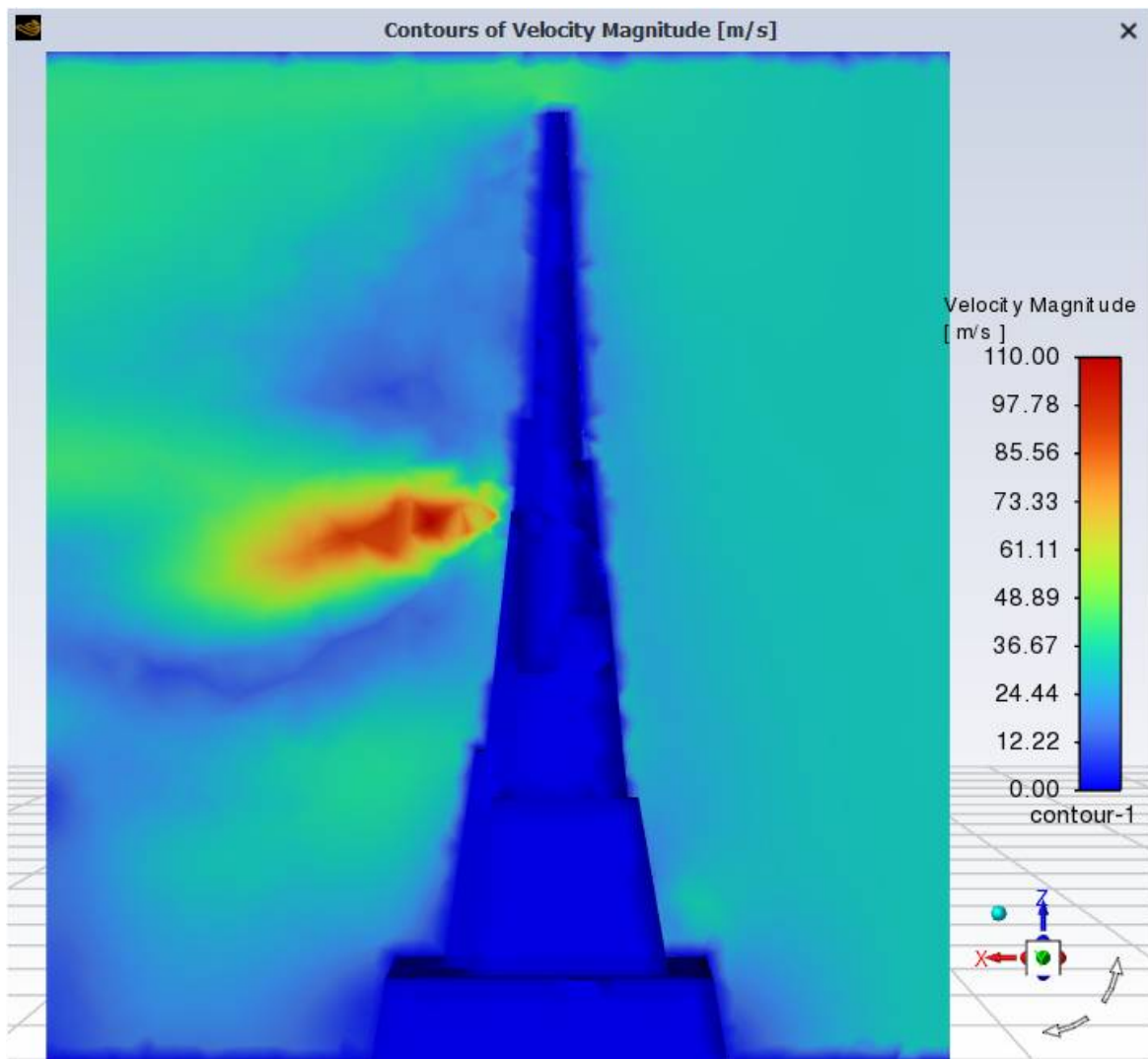
1. Zona de aproximación del viento, donde el flujo de aire se aproxima al obelisco con una velocidad considerablemente alta y uniforme, alcanzando valores entre 20 y 25 m/s, lo que se representa mediante los tonos amarillos y naranjas en la simulación. Al llegar a la cara frontal del obelisco, el flujo se ve interrumpido y desacelera de forma abrupta debido al impacto directo contra la superficie. Esta disminución de velocidad se refleja con el cambio de color hacia tonos verdes y azules, indicando zonas donde la energía cinética del aire disminuye y, en consecuencia, se produce un incremento de la presión estática. Este fenómeno es característico de la región de estancamiento que se forma justo frente al cuerpo, donde el aire pierde velocidad casi por completo antes de desviarse hacia los costados.
2. Región de impacto y desviación del flujo, el viento al colisionar con la cara frontal del monumento, el aire se divide: una parte asciende por la superficie del obelisco, mientras otra se desvía lateralmente. Este comportamiento provoca una zona de alta presión en el punto de impacto y un flujo acelerado alrededor de los bordes, donde las líneas se densifican.
3. Zona posterior o de estela, ubicado detrás del obelisco se genera una amplia región de recirculación turbulenta, evidenciada por las trayectorias curvas y la presencia de vórtices formados a causa de la separación del flujo al superar el obstáculo. En esta zona se distingue un vórtice principal de gran tamaño en la parte inferior y un vórtice secundario más pequeño hacia la zona media-superior. Ambos se representan con tonos azules y verdes, indicando velocidades reducidas y direcciones del flujo variables e inestables. Esta región corresponde al fenómeno conocido como sombra aerodinámica, donde el aire pierde coherencia debido a la disminución de la energía cinética, generando una compleja interacción de flujos ascendentes y descendentes que caracterizan el comportamiento turbulento posterior al obstáculo.
4. Reaceleración del flujo aguas abajo, donde a medida que el aire se aleja del obelisco, las líneas de corriente comienzan a reorganizarse y recuperar velocidad, regresando a valores cercanos a los 20–25 m/s, evidenciado por el cambio a tonos amarillos y anaranjados.

4.4. Resultados de la primera simulación $V=120\text{km/h}$

4.4.1. Campo de Velocidades obtenidas

La Figura 4.51 presenta la distribución del campo de velocidades del viento obtenida a partir de la simulación correspondiente a una velocidad de 120 km/h, equivalente aproximadamente a 33.33 m/s, aplicada sobre el Obelisco de la Pampa de Quinua, en esta simulación se aprecian los contornos de magnitud de velocidad expresados en metros por segundo (m/s).

Figura 4.51: Velocidades obtenidas con la simulación de viento de 120Km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

En la figura se aprecia la formación de una zona de turbulencia bien delimitada, producto del flujo de aire que impacta y rodea la estructura.

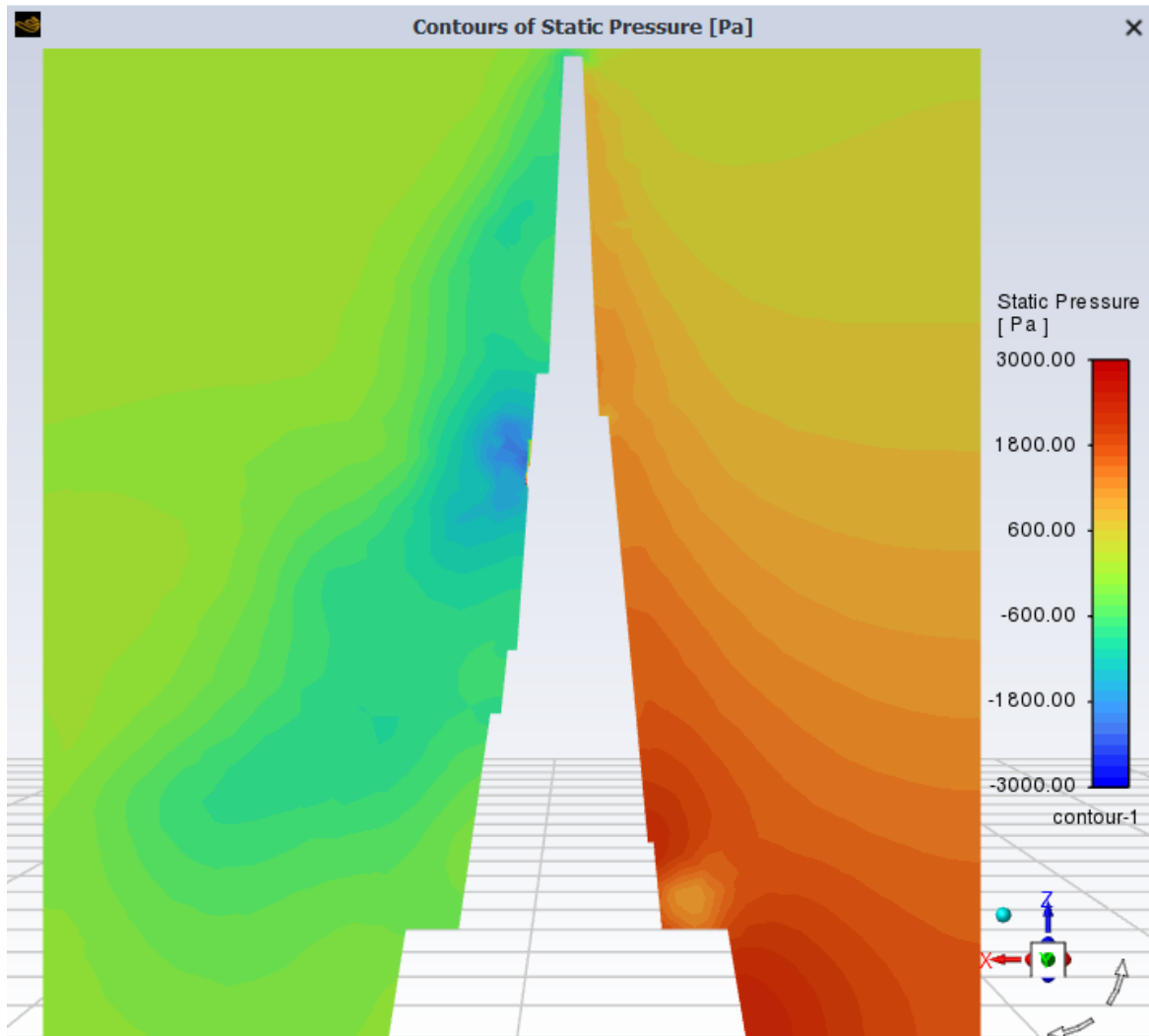
El análisis evidencia que, al incidir el viento sobre la cara frontal del obelisco, se produce una disminución significativa de la velocidad (representada por la zona azul oscura), lo que genera una presión estática elevada en esa región. Posteriormente, el flujo se divide y asciende por los laterales y la parte superior del monumento. Al superar la geometría del mismo, el aire pierde adherencia con la superficie, originándose así el fenómeno de separación del flujo (flow separation).

Dicha separación, ubicada en la parte posterior del obelisco, da origen a una región de recirculación o estela turbulenta donde varía la dirección del flujo variable y velocidades reducidas, que propician la formación de vórtices alternantes, así mismo la aparición de presiones negativas o de succión, las cuales tienden a atraer el flujo nuevamente hacia la estructura aumentando la turbulencia, producto de la interacción entre el flujo principal y las corrientes recirculantes.

4.4.2. Campo de presiones obtenidas

La figura 4.52 presenta la distribución de la presión estática (Static Pressure) alrededor del Obelisco de la Pampa de Quinua, obtenida a partir de la simulación del flujo de viento a una velocidad de 120 km/h. Este análisis permite identificar las variaciones en la presión que se generan debido a la interacción del flujo de aire con la forma y superficie del monumento, evidenciando las zonas de mayor y menor presión inducidas por su geometría.

Figura 4.52: Presiones obtenidas con la simulación de viento de 120Km/h



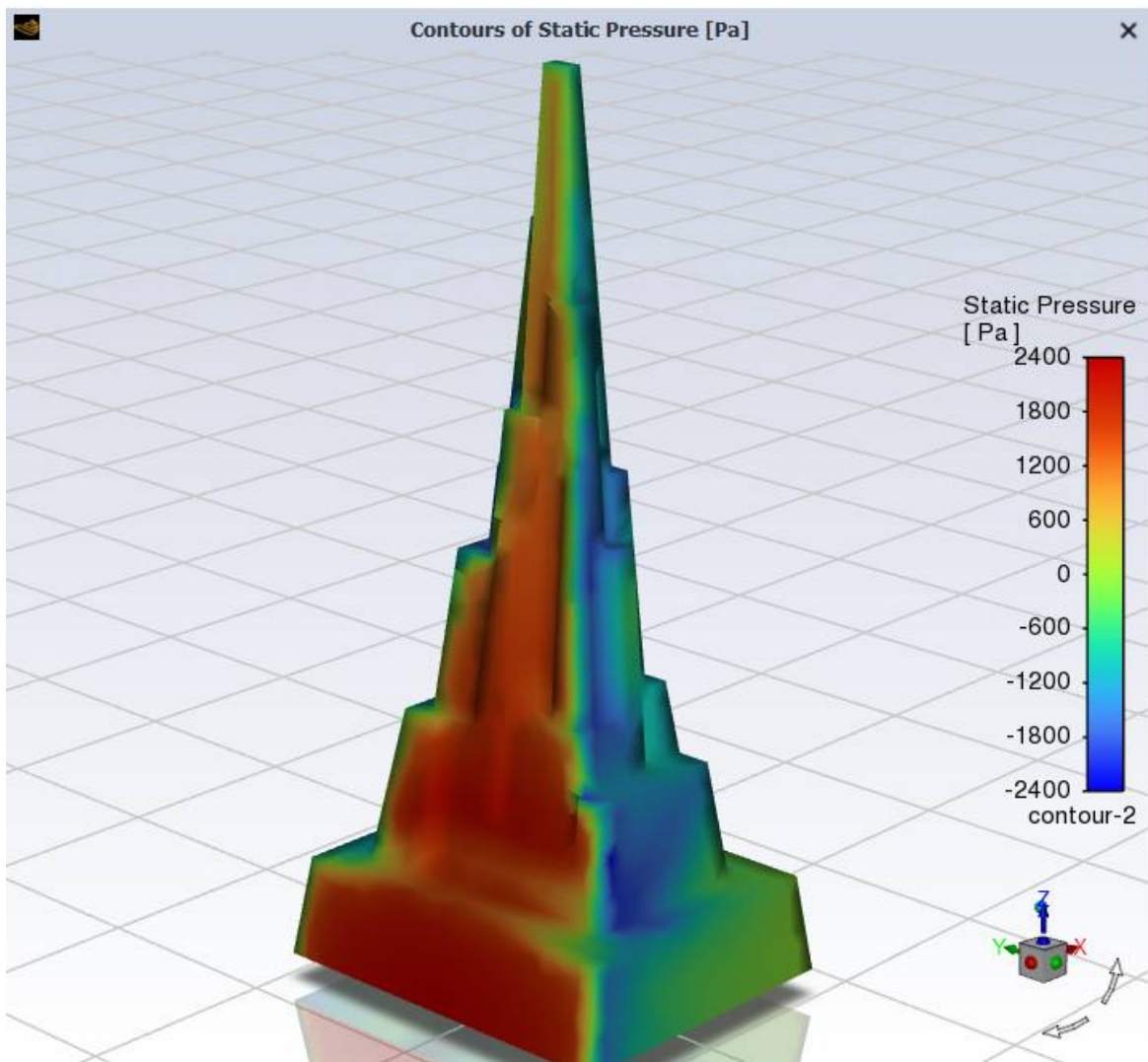
Fuente: Resultados Ansys Fluent

En la figura 4.53 se aprecian las siguientes características principales:

- En la zona frontal derecha del obelisco, se registran las mayores presiones positivas, con valores que alcanzan hasta 3000 Pa. Esta área coincide con el punto de impacto directo del viento, donde la energía cinética del flujo se transforma en presión estática debido a la disminución de la velocidad del aire al chocar contra la superficie.

- Por otro lado, en la parte posterior e izquierda de la estructura, representada por tonos azules y celestes, se registran presiones negativas o de succión, con valores cercanos a -3000 Pa. Estas regiones se asocian al desprendimiento del flujo y la formación de la estela turbulenta, fenómeno que ocurre cuando el aire se separa de la superficie del monumento y genera una zona de vacío parcial.
- Finalmente, el gradiente de presión entre las caras opuestas del obelisco pone en evidencia una marcada diferencia de cargas aerodinámicas, responsable de esfuerzos laterales significativos que deben considerarse dentro del análisis estructural de la edificación.

Figura 4.53: Presiones obtenidas, Modelo 3D, viento de 120Km/h



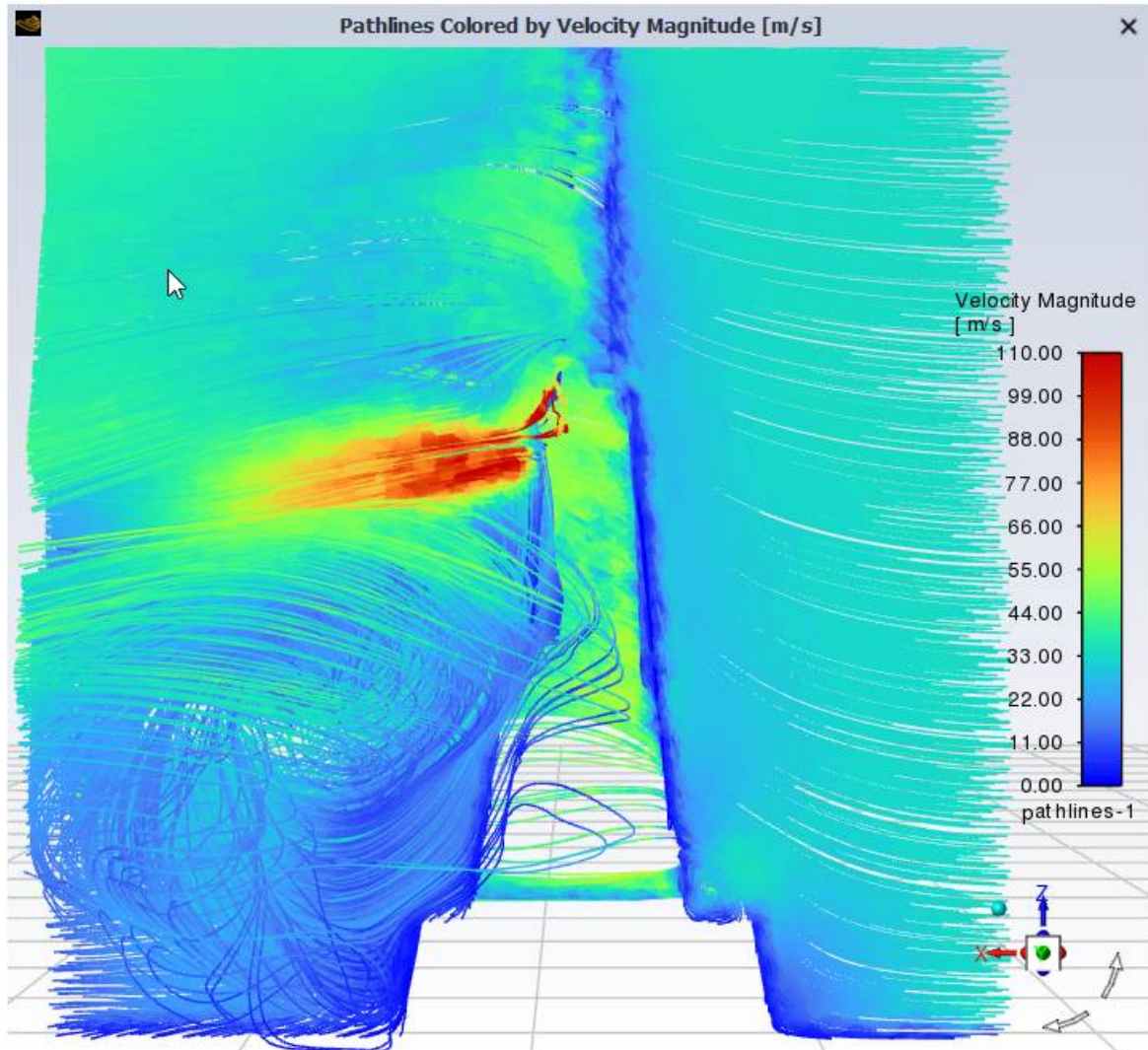
Fuente: Resultados Ansys Fluent

En la simulación correspondiente a una velocidad de viento de 120 km/h, se observa un aumento significativo de la presión en la cara frontal expuesta al viento (barlovento), mientras que en la cara opuesta (sotavento) se generan presiones negativas o de succión. Este comportamiento es característico de las estructuras altas y esbeltas, como el Obelisco de la Pampa de Quinua.

4.4.3. Trayectoria de las líneas de corriente

La Figura 4.54 presenta las trayectorias de las líneas de corriente (pathlines), coloreadas en función de la magnitud de la velocidad del viento (m/s), obtenidas a partir de la simulación realizada sobre el Obelisco de la Pampa de Quinoa bajo una velocidad de viento de 60 km/h. Esta representación permite analizar de manera visual la interacción del flujo de aire con la estructura, destacando los patrones de movimiento, zonas de aceleración y formación de turbulencias que se originan alrededor del monumento.

Figura 4.54: Trayectorias de las líneas de corriente, viento de 120Km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

De la imagen anterior se puede observar que se muestran zonas donde el viento tiene un comportamiento diferente: En la zona de aproximación, el viento llega al obelisco con alta velocidad (110-120 m/s) y, al impactar la cara frontal, se desacelera bruscamente, generando una región de estancamiento con aumento de presión estática y desviación del flujo hacia los costados. El viento choca contra la cara frontal del obelisco y se divide: una parte asciende y otra se desvía lateralmente, generando alta presión en el punto de impacto y aceleración del flujo alrededor de los bordes, detrás

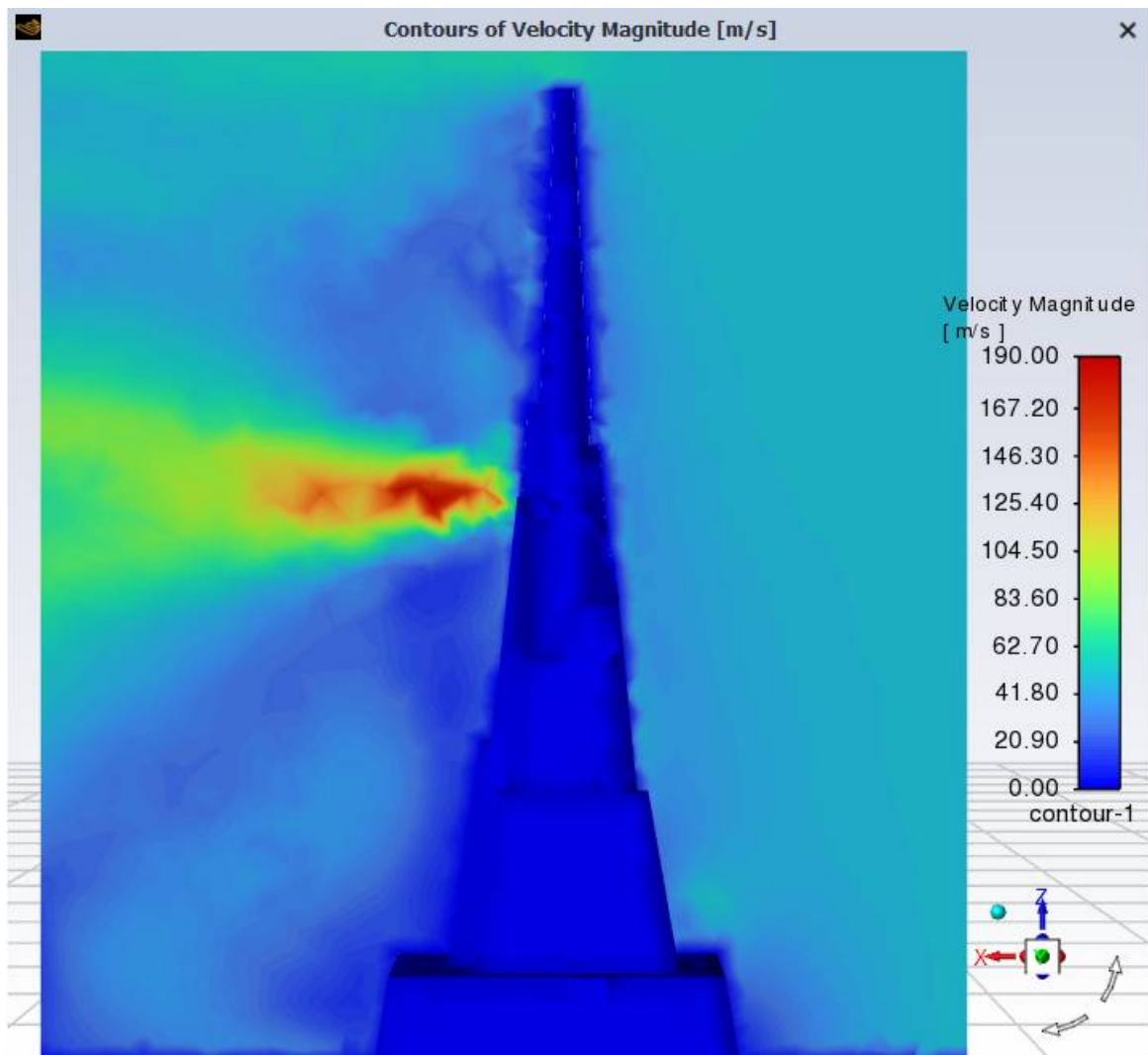
del obelisco se genera una zona turbulenta de recirculación, con vórtices y flujo separado y luego el flujo comienza a reorganizarse y aumentar nuevamente su velocidad, alcanzando valores cercanos a 110–120 m/s.

4.5. Resultados de la primera simulación $V=180\text{km/h}$

4.5.1. Campo de Velocidades obtenidas

La figura 4.55 muestra el campo de velocidades del viento obtenido en la simulación a 180 km/h (50 m/s) sobre el Obelisco de la Pampa de Quinua.

Figura 4.55: Velocidades obtenidas con la simulación de viento de 180Km/h



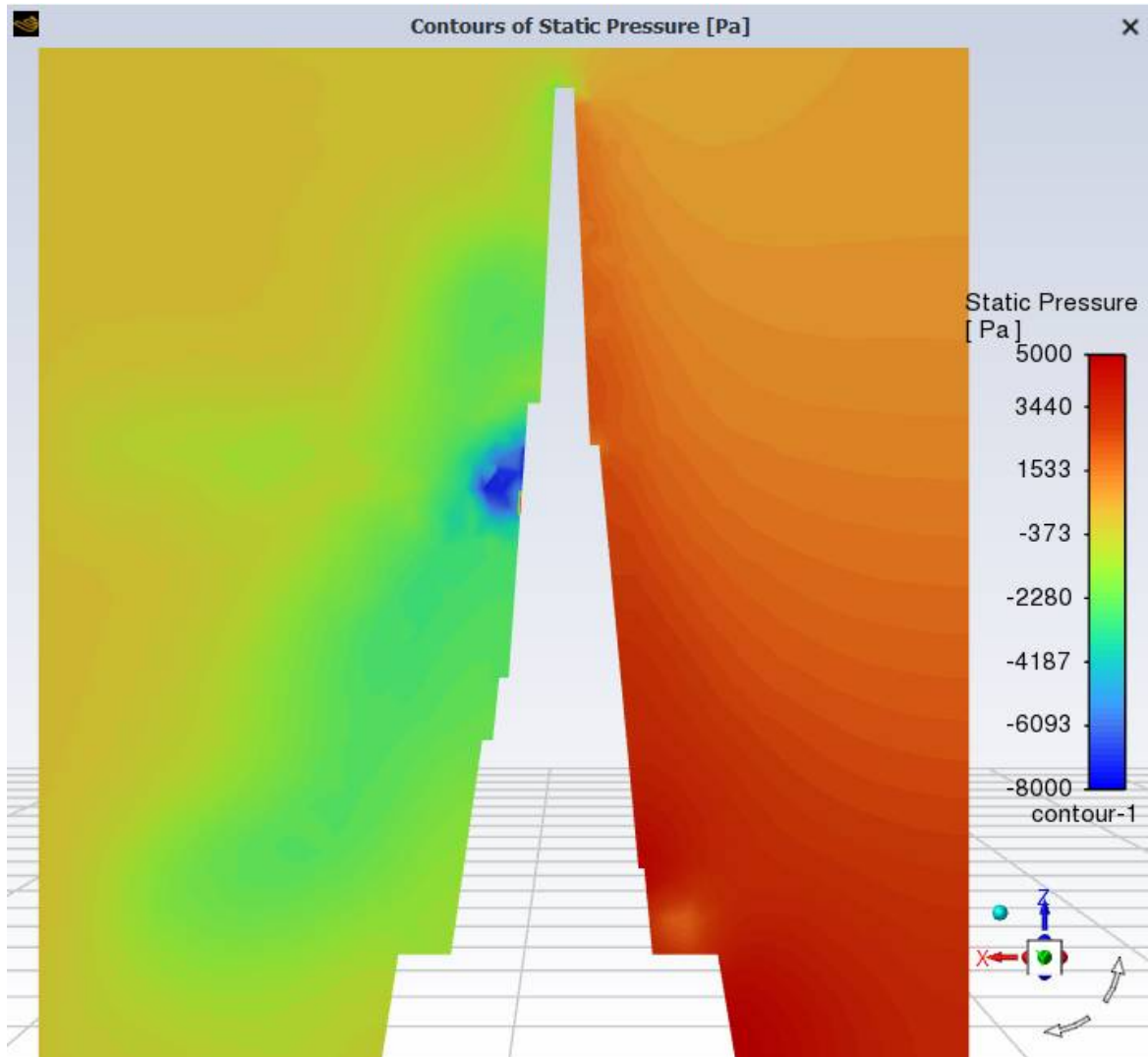
Fuente: Resultados Ansys Fluent

La figura muestra la formación de una zona de turbulencia causada por el impacto y desprendimiento del flujo de aire alrededor del obelisco. El viento reduce su velocidad al colisionar, generando alta presión frontal, mientras que detrás se produce una estela turbulenta con vórtices, succión e inestabilidad aerodinámica.

4.5.2. Campo de presiones obtenidas

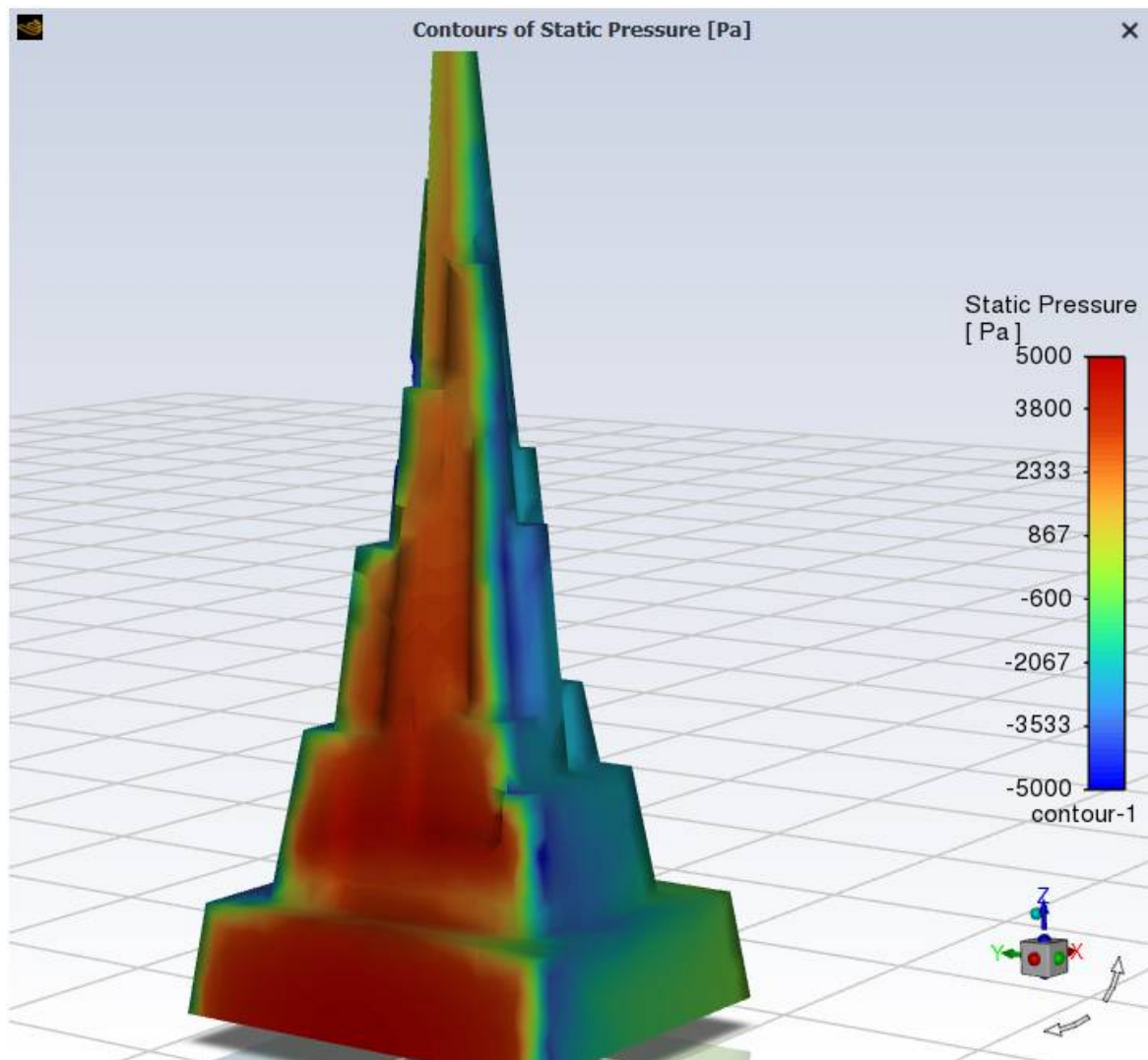
La figura muestra la distribución de presión estática alrededor del Obelisco de la Pampa de Quinoa bajo un viento de 180 km/h, evidenciando cómo el flujo de aire modifica las presiones al interactuar con su geometría.

Figura 4.56: Presiones obtenidas con la simulación de viento de 180Km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

En la figura 4.57 se aprecian en la parte frontal del obelisco se registran altas presiones de hasta 5000Pa por el impacto del viento, mientras que en la zona posterior aparecen presiones negativas de hasta -8000 Pa por la separación del flujo. Este gradiente de presión genera esfuerzos laterales relevantes para el análisis estructural. La simulación con viento de 180 km/h evidencia presiones elevadas en la cara de barlovento y presiones de succión en sotavento, características típicas del comportamiento aerodinámico de estructuras altas y esbeltas como el obelisco.

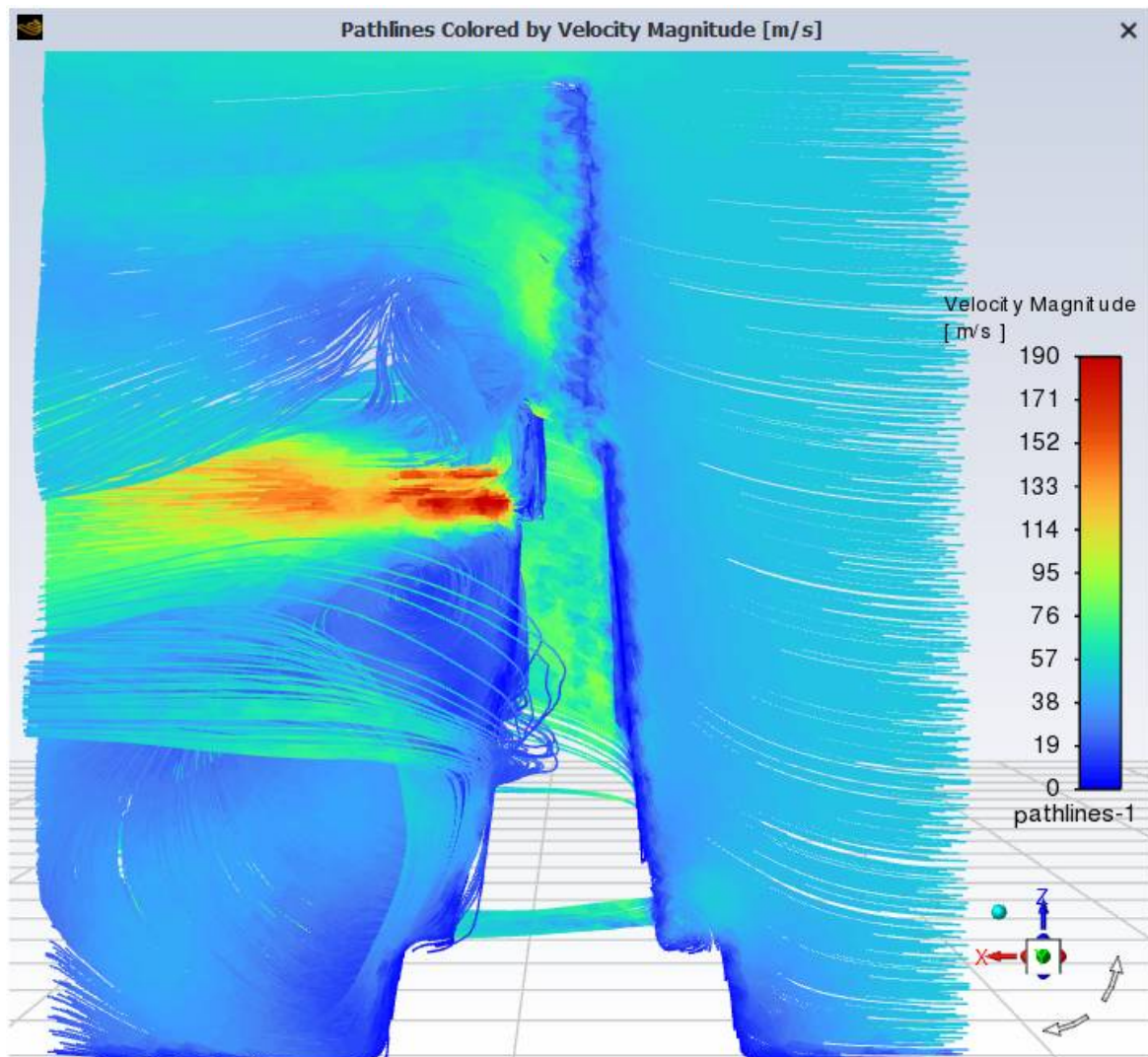
Figura 4.57: Presiones obtenidas, Modelo 3D, viento de 180Km/h

Fuente: Resultados Ansys Fluent

4.5.3. Trayectoria de las líneas de corriente

La figura 4.58 presenta las trayectorias de las líneas de corriente (pathlines), coloreadas de acuerdo con la magnitud de la velocidad del viento (m/s), obtenidas en la simulación sobre el Obelisco de la Pampa de Quinoa con una velocidad de 60 km/h. Esta representación permite analizar la interacción del flujo de aire con la estructura, destacando los patrones de circulación, aceleración y turbulencia generados.

Figura 4.58: Trayectorias de las líneas de corriente, viento de 180Km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

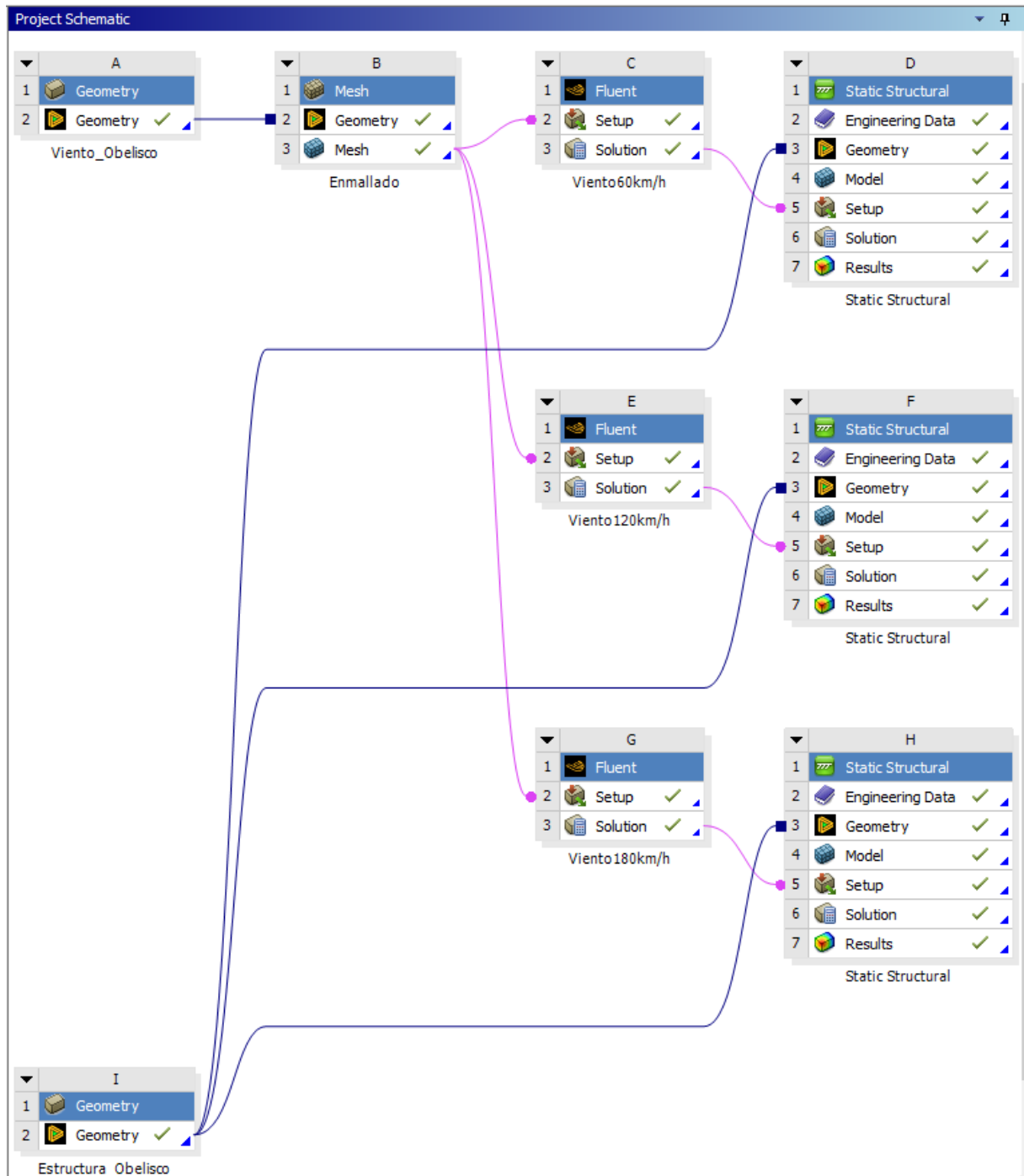
De la imagen anterior se puede observar que se muestran zonas donde el viento de 1800 km/h sobre el obelisco presenta cuatro zonas principales: una región de aproximación con velocidades altas (180–190 m/s) que se desaceleran al impactar la cara frontal; una zona de impacto y desviación, donde el aire se divide y acelera alrededor de los bordes; una zona posterior o de estela, caracterizada por recirculación turbulenta y formación de vórtices por la separación del flujo; y finalmente, una zona de reaceleración aguas abajo, donde el viento recupera gradualmente su velocidad original.

4.6. Importación de las presión de viento desde Fluent a Static Structural

Con los resultados de la sección 4.3, 4.4 y 4.5 se procede a exportar los resultados a Ansys Static Structural, como se muestra en la figura 4.60. Los resultados de

presión obtenidos en el análisis de viento realizado con Ansys Fluent sobre el Obelisco de la Pampa de Quinoa se transfieren al módulo Ansys Static Structural mediante un acoplamiento unidireccional (One-Way FSI) dentro de Workbench. En este proceso, las presiones calculadas sobre la superficie del obelisco se importan automáticamente como cargas distribuidas en el modelo estructural. Una vez aplicadas, se definen las condiciones de soporte y propiedades del material, permitiendo evaluar las deformaciones, tensiones y esfuerzos generados por la acción del viento sobre la estructura.

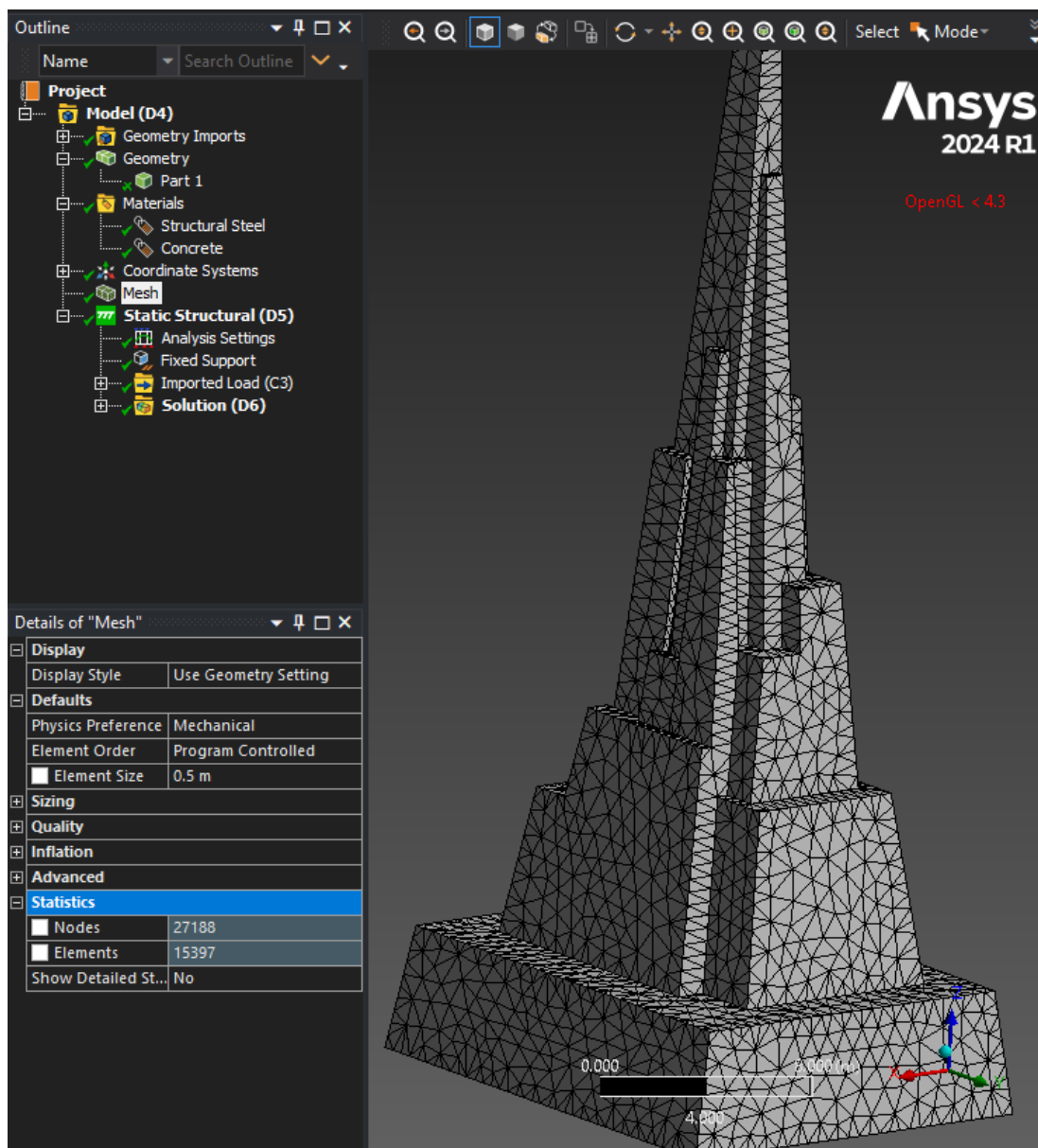
Figura 4.59: Interacción Ansys Fluent y Ansys Structure Static



Fuente: Resultados Ansys Fluent

De la figura 4.59 se observa como se puede interactuar en una análisis multifísico donde se transfieren los resultados obtenidos en las simulaciones de viento a 60, 120 y 180 km/h realizadas en Ansys Fluent, para encontrar los esfuerzos de presión generados sobre la superficie del Obelisco de la Pampa de Quinua. Estos valores se transfieren al módulo Ansys Static Structural para analizar las tensiones y deformaciones producidas en la estructura. Este procedimiento evidencia la importancia del análisis multifísico, ya que permite integrar el comportamiento del flujo de aire con la respuesta estructural del material, ofreciendo una visión más completa y precisa del desempeño real ante condiciones ambientales extremas. La principal ventaja de Ansys radica en su capacidad para acoplar distintos dominios físicos (fluido, estructura, temperatura, etc.) dentro de una misma plataforma, optimizando el proceso de simulación y mejorando la confiabilidad de los resultados.

Figura 4.60: Nuevo enmallado en Ansys Structure Static

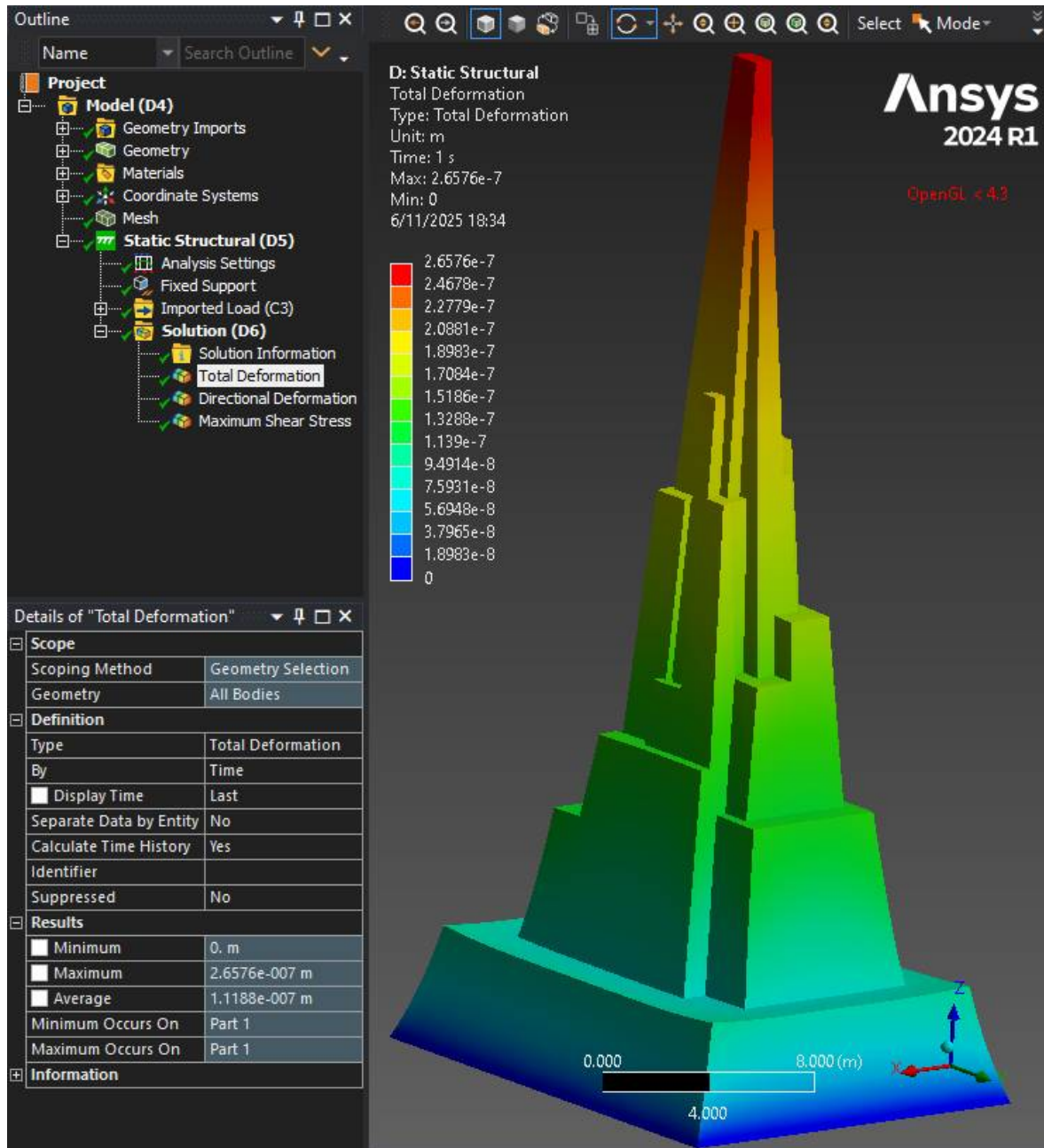


Fuente: Resultados Ansys Static Structure

4.7. Evaluación para vientos con V=60km/h

Se realizó una simulación estructural en ANSYS Static Structural para analizar la deformación total ocasionada por la presión del viento sobre la estructura propuesta, utilizando un modelo que reproduce el comportamiento del Obelisco para esfuerzo por el viento.

Figura 4.61: Deformaciones totales para vientos con V=60km/h



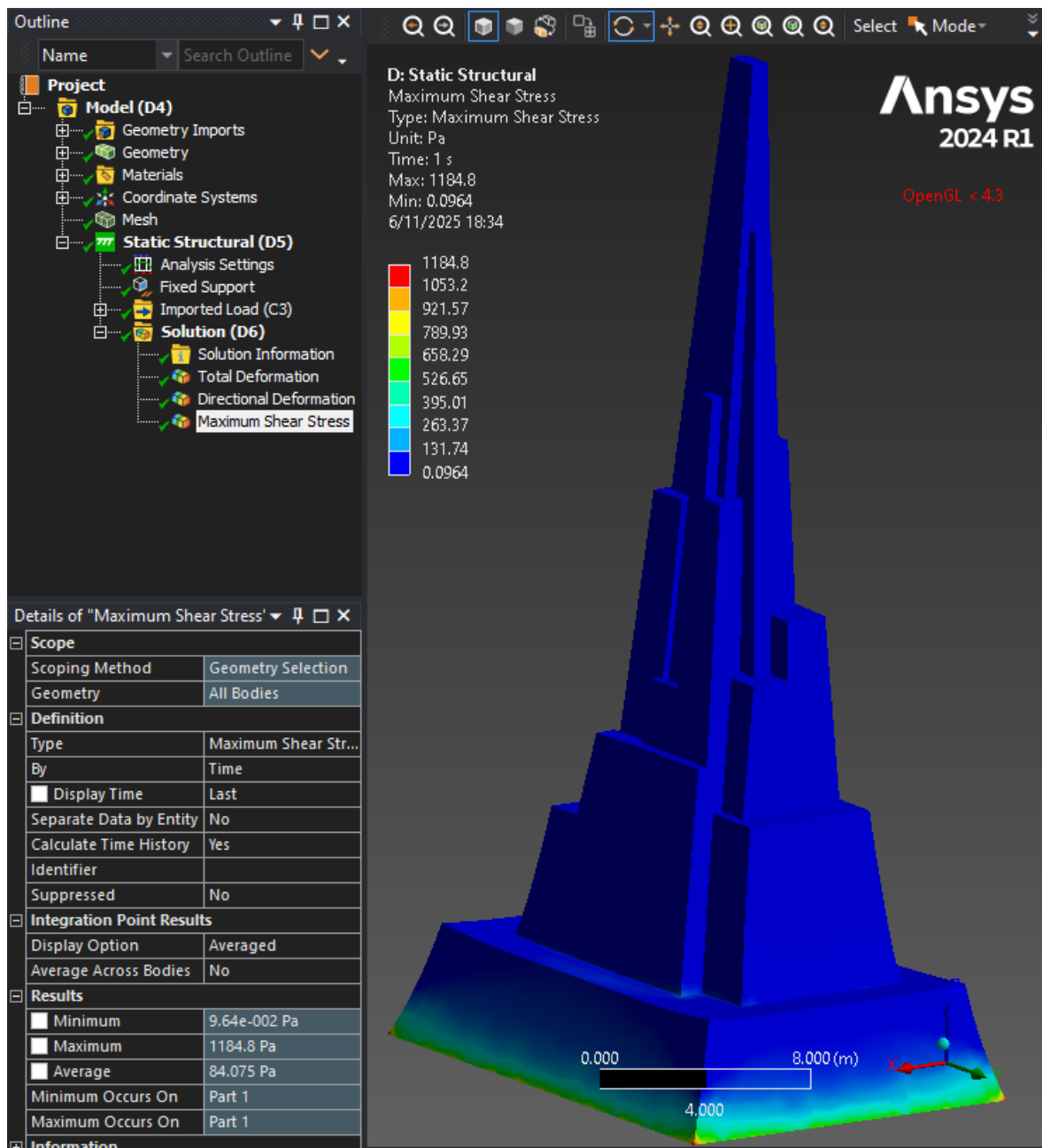
Fuente: Resultados Ansys Fluent

Para el desarrollo del análisis, se modeló la geometría del obelisco, se definió la condición de apoyo fijo en la base, garantizando la estabilidad del sistema. La presión del viento fue aplicada sobre las superficies expuestas de acuerdo con la dirección

predominante del flujo, permitiendo evaluar la respuesta estructural para velocidades de 60km/h.

En la figura 4.61 se observa la distribución de deformaciones obtenida del análisis estático. Los resultados muestran que las deformaciones máximas alcanzan un valor de 2.6576×10^{-7} metros, localizadas en la parte superior de la estructura, mientras que en la base se mantienen prácticamente nulas (0 m). Esto indica que la estructura conserva una adecuada rigidez ante la acción del viento, concentrando las mayores deflexiones en las zonas más elevadas, donde el efecto del viento es más significativo.

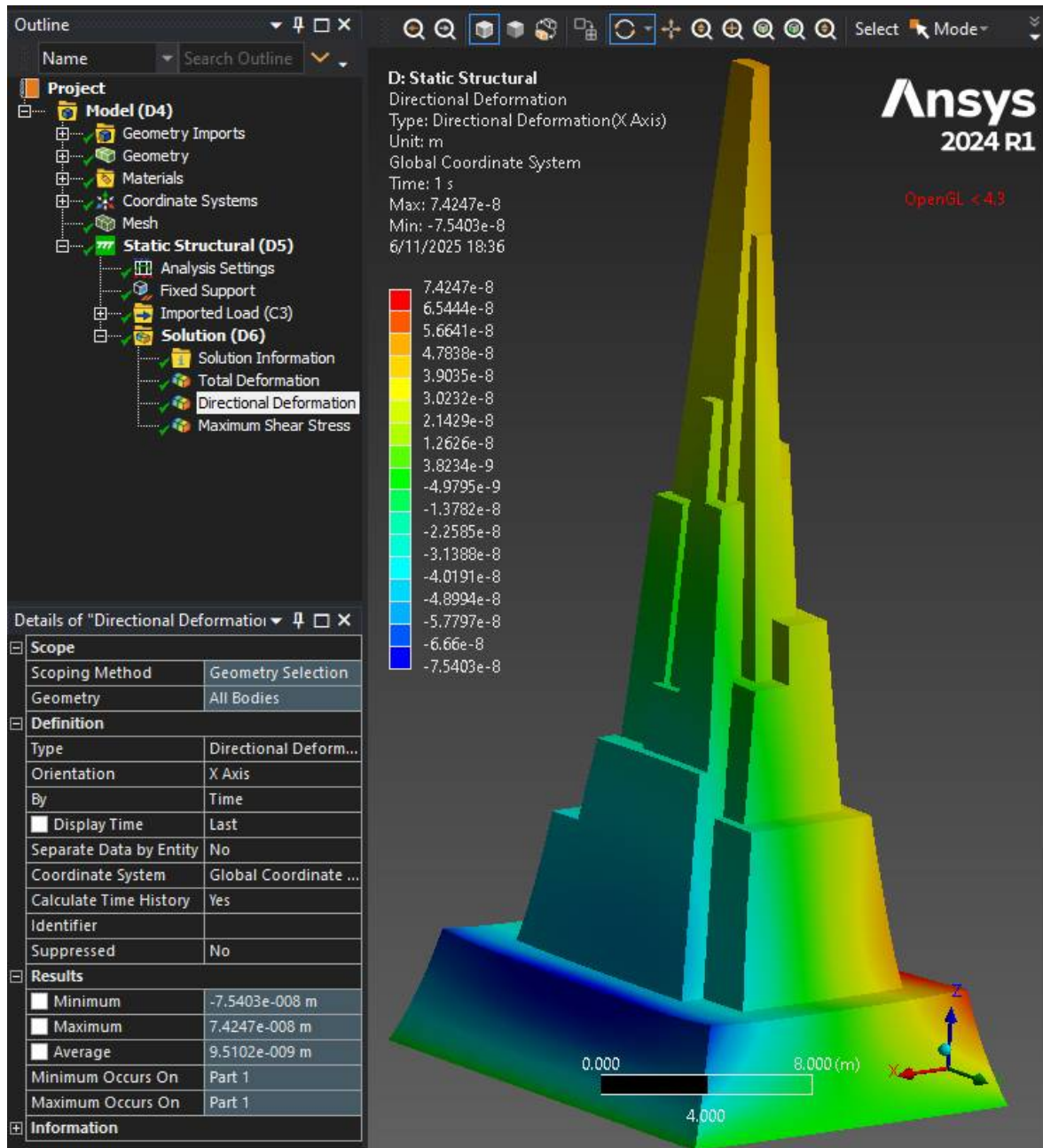
Figura 4.62: Esfuerzos totales para vientos con V=60km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

La figura 4.62 muestra el análisis del esfuerzo cortante del obelisco bajo la presión del viento, con base fija y carga variable. Los mayores esfuerzos se concentran cerca del empotramiento, mientras que en la parte superior son menores. El esfuerzo máximo registrado fue de 1184.8 Pa y el mínimo de 0.17038 Pa, reflejando una distribución coherente con la rigidez estructural.

Figura 4.63: Deformaciones en X para vientos con $V=60\text{km/h}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

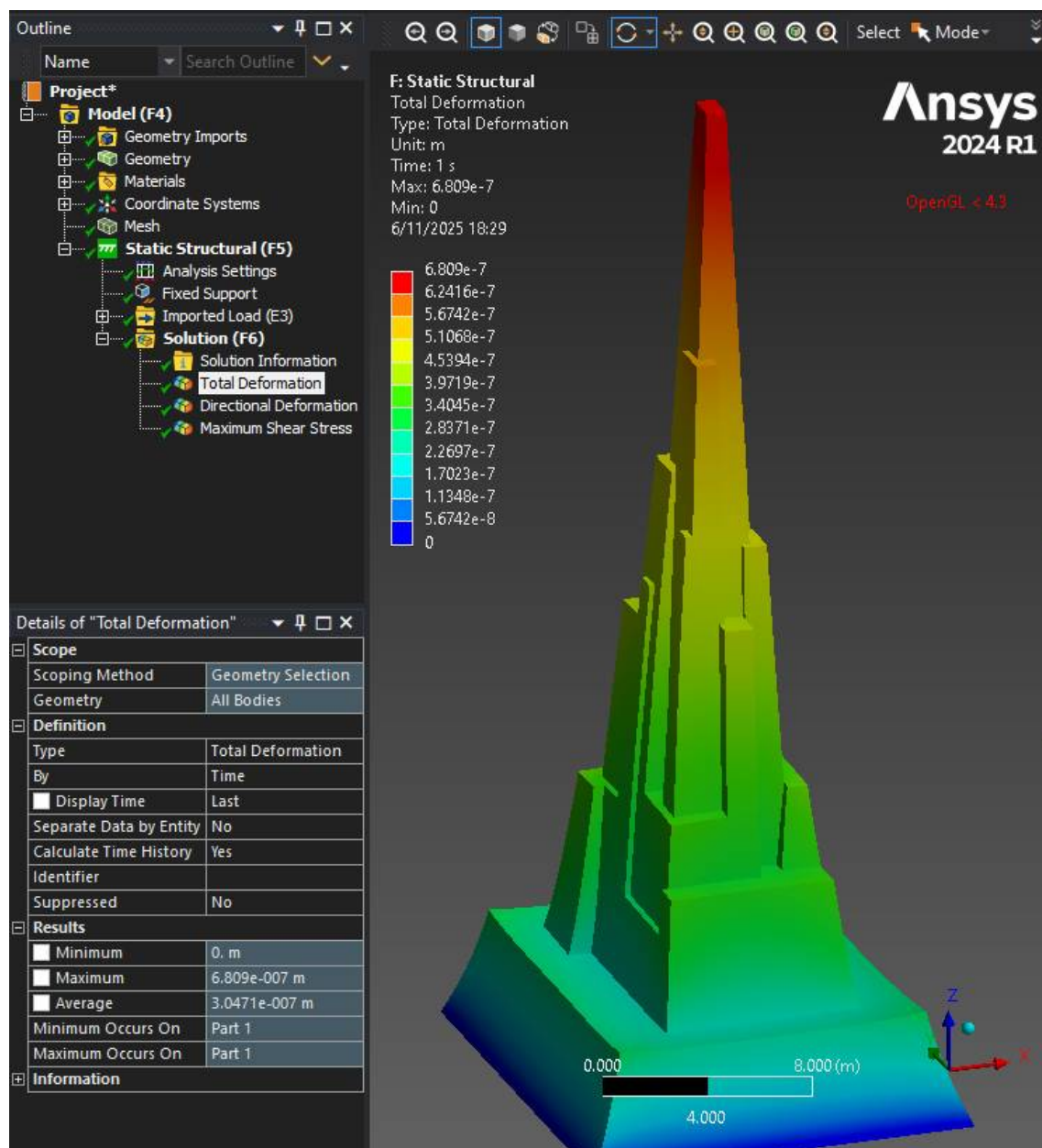
En la figura 4.63 muestra la deformación direccional en el eje X de la estructura sometida a la presión del viento. Este resultado complementa los resultados obtenidos en los análisis de deformación total y esfuerzo equivalente, permitiendo comprender con mayor detalle el comportamiento estructural bajo la acción del viento, obteniendo la

deformación direccional máxima alcanza un valor de 7.4247×10^{-8} metros, mientras que la deformación mínima es de -7.5430×10^{-8} metros, lo cual indica desplazamientos en sentidos opuestos a lo largo del eje X.

4.8. Evaluación para vientos con V=120km/h

A partir de los resultados de la simulación en el ítem 4.4, se procedió a analizar la deformación total ocasionada por la presión del viento, utilizando un modelo que reproduce el comportamiento del Obelisco para esfuerzo por el vientos de 120km/h.

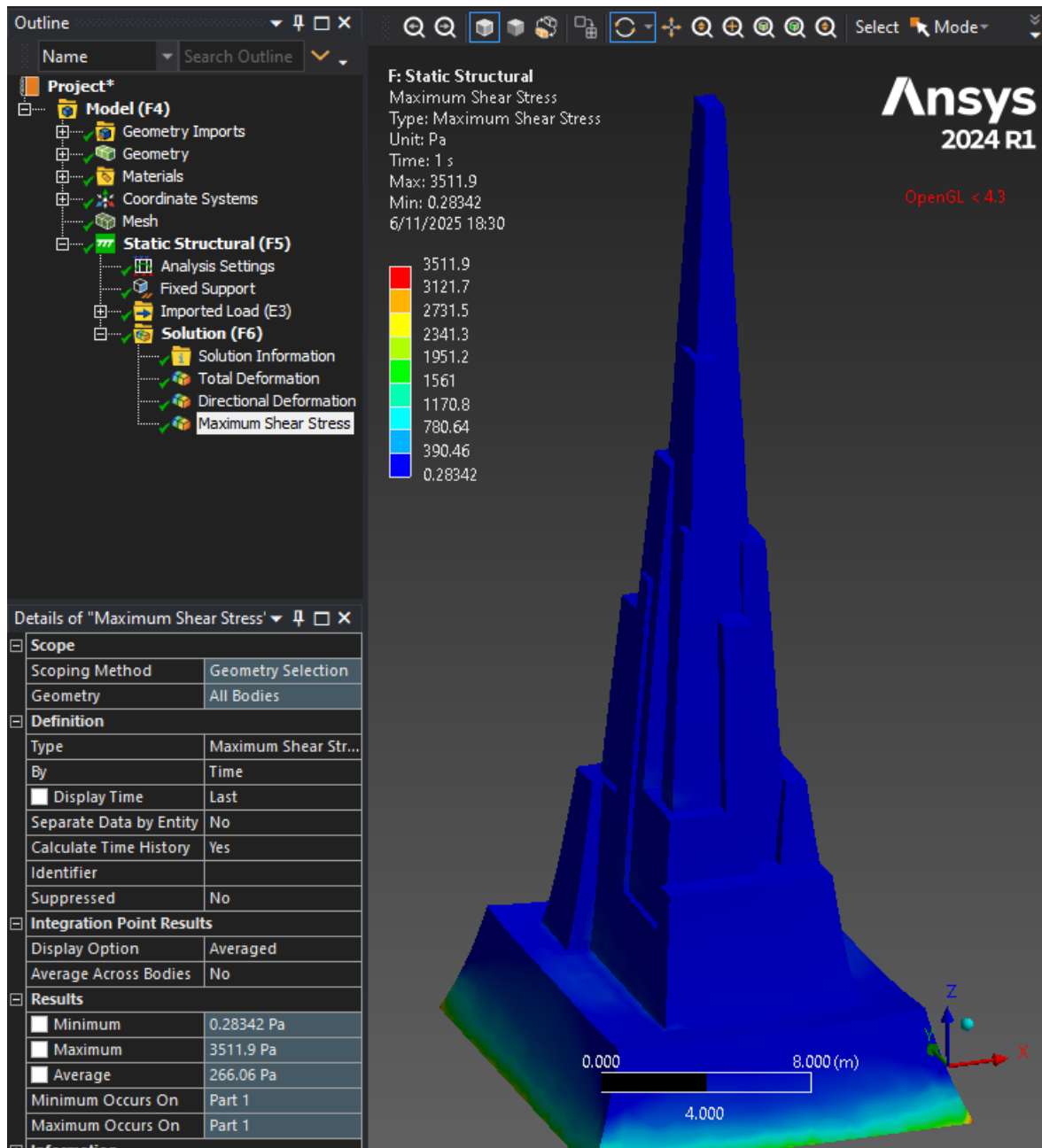
Figura 4.64: Deformaciones totales para vientos con V=120km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

Se modeló la geometría del obelisco con apoyo fijo en la base y se aplicó la presión del viento de 120 km/h sobre las superficies expuestas. Los resultados muestran deformaciones máximas de 6.809×10^{-7} m en la parte superior, mientras la base permanece estable, evidenciando buena rigidez estructural.

Figura 4.65: Esfuerzos totales para vientos con $V=120\text{km/h}$

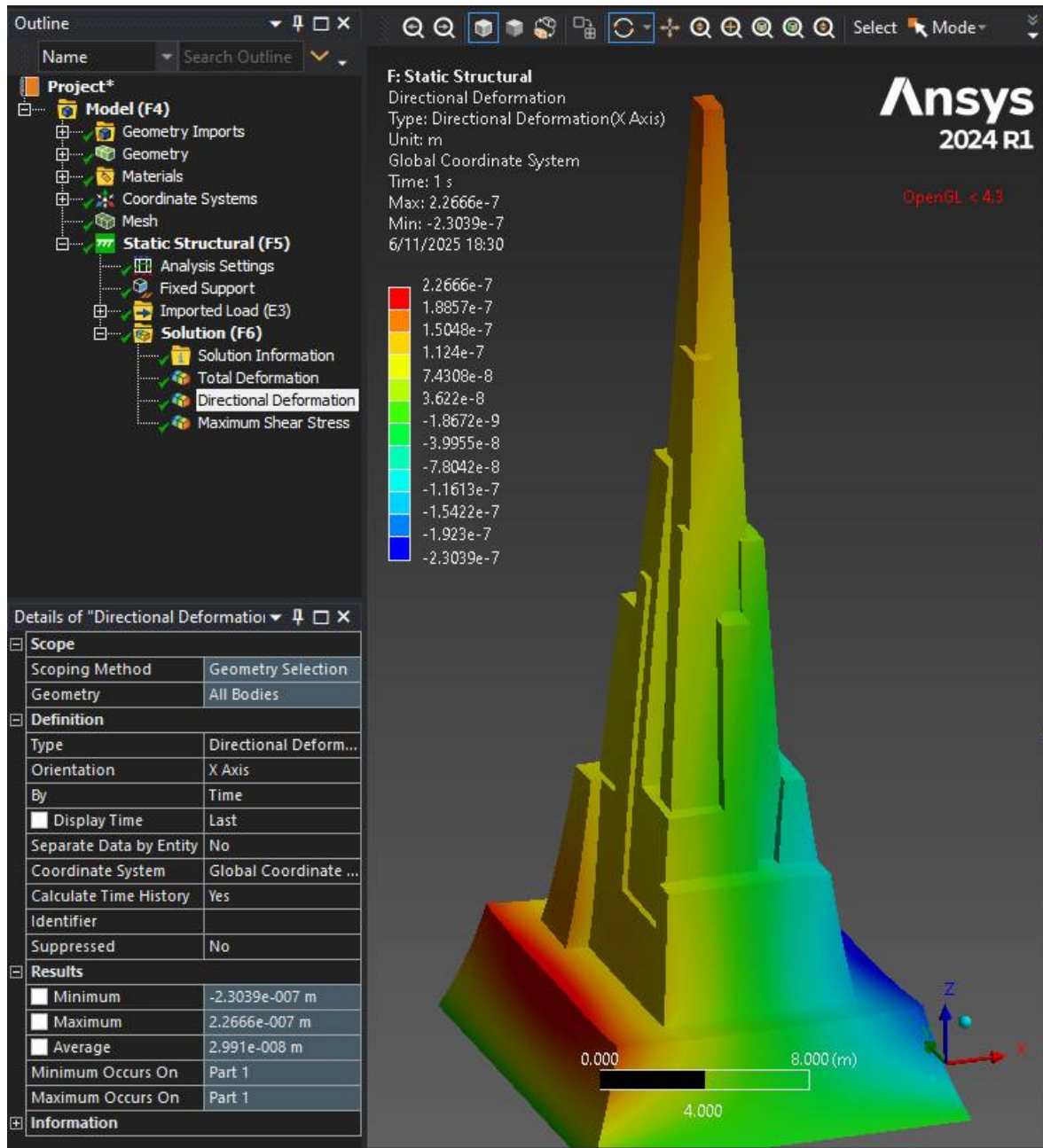


Fuente: Resultados Ansys Fluent

La figura 4.65 muestra el análisis del esfuerzo cortante en la estructura del obelisco bajo la acción del viento. El objetivo fue evaluar la distribución de los esfuerzos internos generados por las cargas aplicadas, considerando un apoyo fijo en la base y una presión variable sobre la superficie. Los resultados indican que las mayores concentraciones de esfuerzo se presentan cerca del empotramiento, mientras que las zonas

superiores registran valores mucho menores. El esfuerzo equivalente máximo alcanzó 23511.9 Pa, y el mínimo fue de 0.28342 Pa, reflejando una respuesta estructural estable y coherente con la forma y rigidez del modelo.

Figura 4.66: Deformaciones en X para vientos con $V=120\text{km/h}$



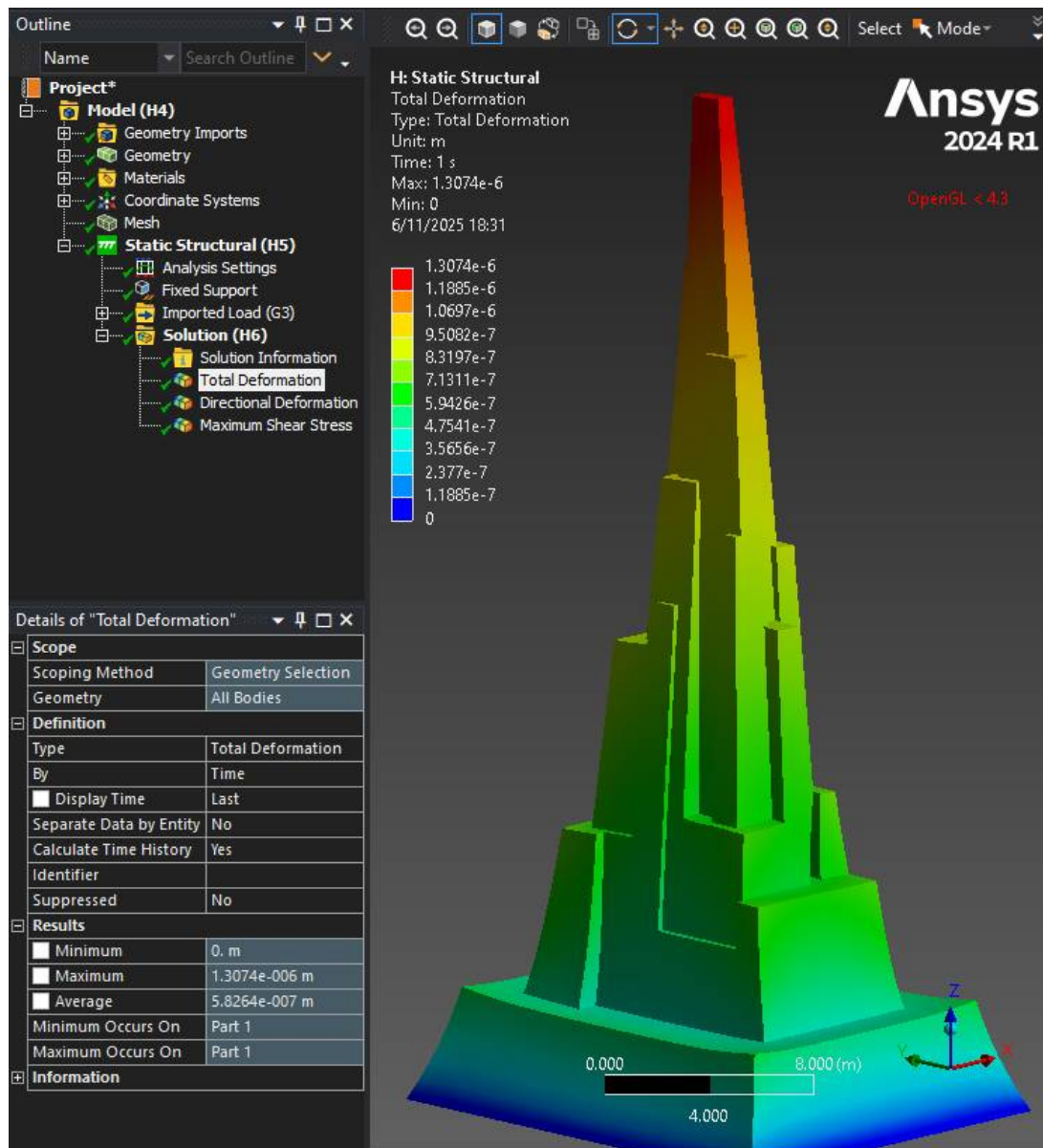
Fuente: Resultados Ansys Fluent

La figura 4.66 muestra la deformación direccional en el eje X de la estructura bajo la acción del viento. La deformación máxima es de 2.2666×10^{-7} m y la mínima de -2.3039×10^{-7} m, evidenciando desplazamientos opuestos a lo largo del eje.

4.9. Evaluación para vientos con V=180km/h

A partir de los resultados de la simulación en el ítem 4.4, se procedió a analizar la deformación total ocasionada por la presión del viento, utilizando un modelo que reproduce el comportamiento del Obelisco para esfuerzo por el vientos de 180km/h.

Figura 4.67: Deformaciones totales para vientos con V=180km/h

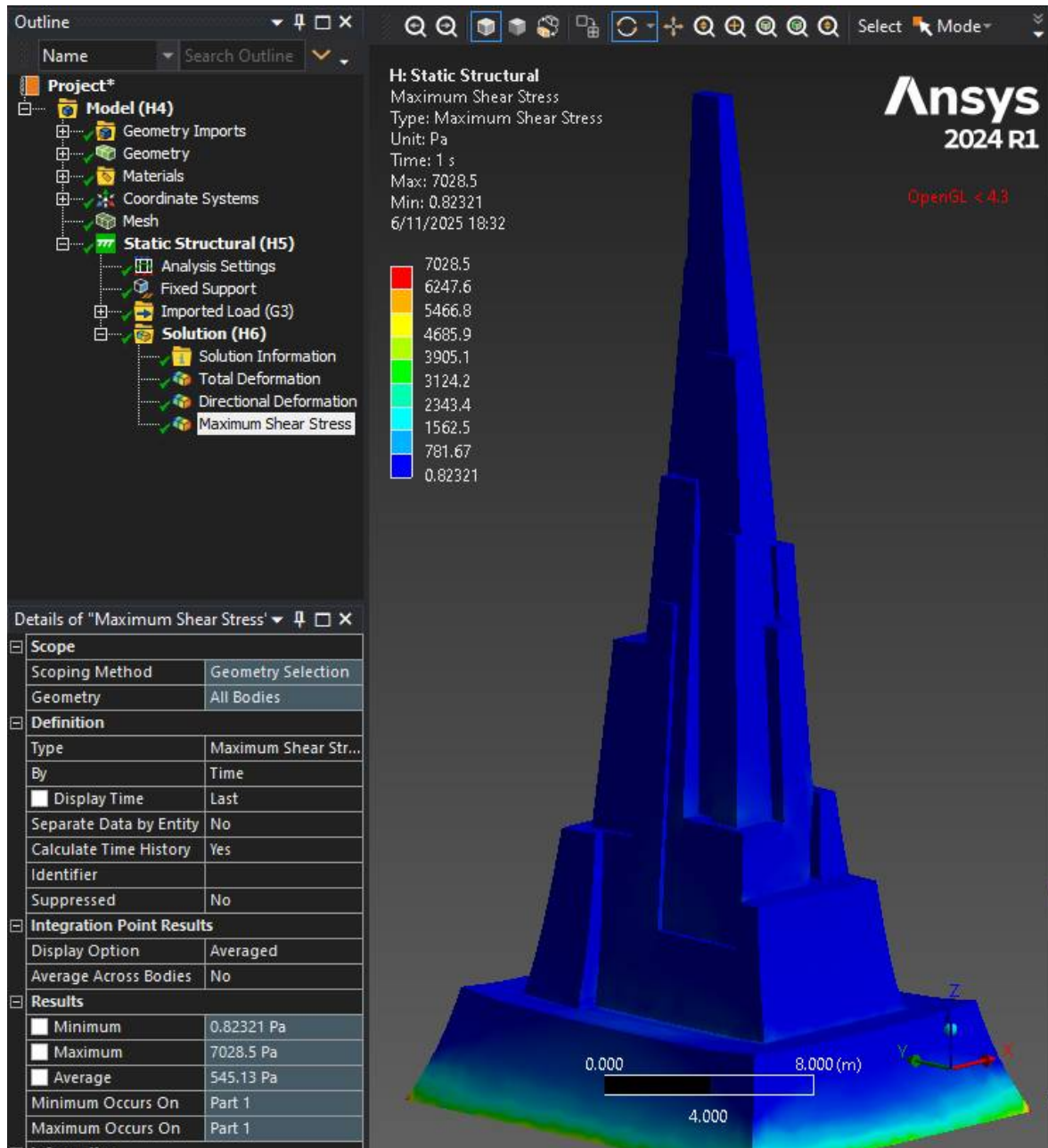


Fuente: Resultados Ansys Fluent

Los resultados del análisis estático de la figura 4.67 muestran que la deformación máxima registrada es de 1.3074×10^{-6} metros, mientras que la deformación mínima es de 0 metros, correspondiente a la zona inferior del modelo, donde se encuentra la restricción total de movimiento. En la figura se observa claramente la distribución de deformaciones donde la mayor deformación se localiza en la parte superior de la estructura, lo cual es coherente con la dirección de la carga del viento, ya que las zonas

más elevadas presentan mayor exposición al flujo. Este comportamiento demuestra una respuesta estructural estable, con desplazamientos pequeños que no comprometen la rigidez global del modelo.

Figura 4.68: Esfuerzos totales para vientos con $V=180\text{km/h}$

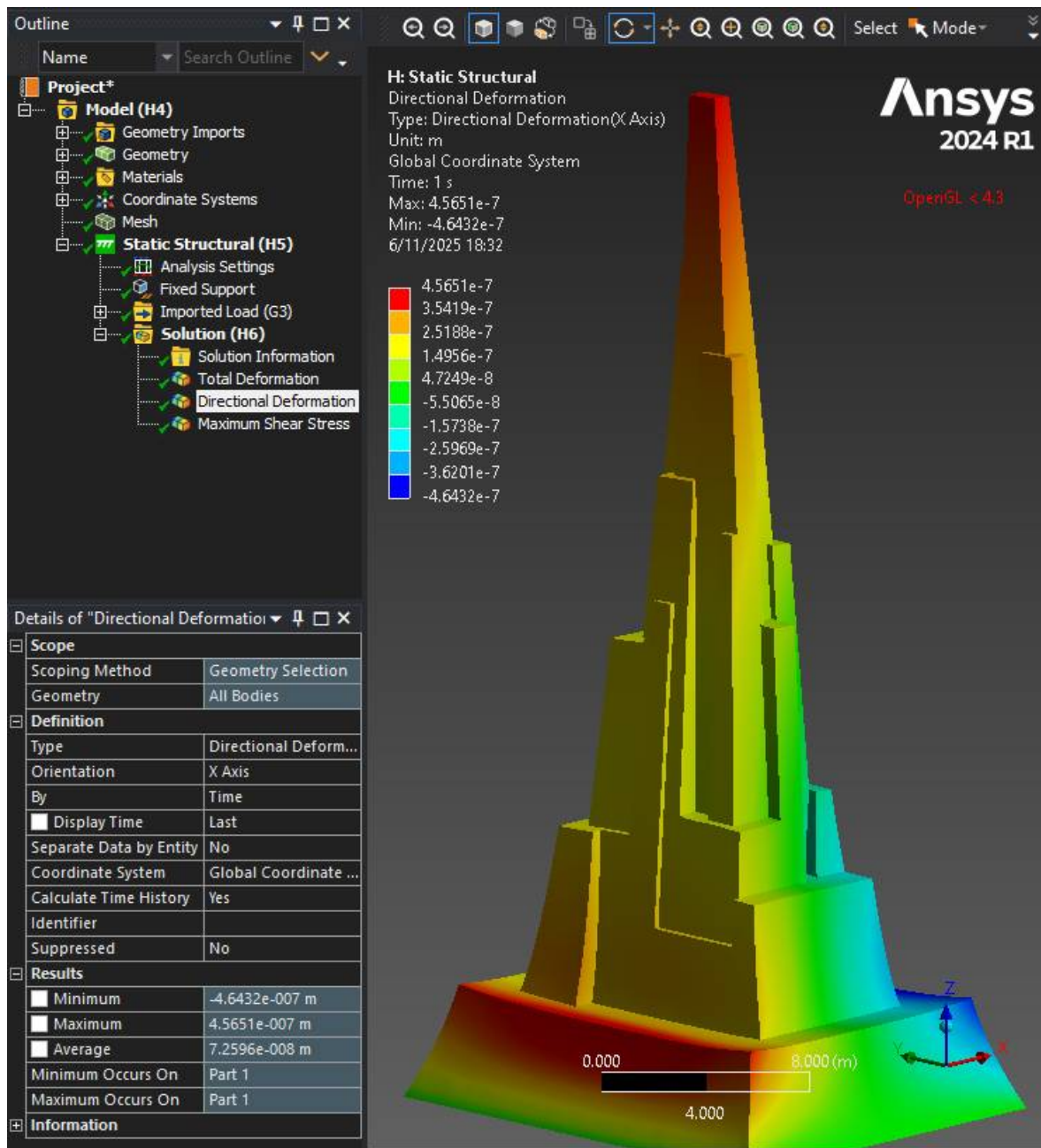


Fuente: Resultados Ansys Fluent

La figura 4.68 presenta el análisis del esfuerzo cortante en la estructura del obelisco sometida a la presión del viento. Los resultados muestran que las mayores concentraciones de esfuerzo se ubican en la zona de empotramiento, debido a las reacciones generadas por la carga del viento, mientras que en la parte superior los valores disminuyen notablemente. Esta distribución refleja un comportamiento estructural estable y coherente con la rigidez del modelo. El valor máximo del esfuerzo cortante alcanza

7028.5 Pa, y el mínimo 0.82321 Pa, manteniéndose ambos dentro de los límites admisibles para garantizar la seguridad estructural frente a la acción del viento.

Figura 4.69: Deformaciones en X para vientos con V=180km/h



Fuente: Resultados Ansys Fluent

En la figura 4.69 presenta el resultado del análisis estructural estático, correspondiente a la deformación direccional en el eje X del modelo evaluado. Obteniendo la distribución del desplazamiento en toda la geometría. Los valores obtenidos muestran una deformación máxima de 4.5651×10^{-7} m y una mínima de -4.6432×10^{-7} m, evidenciando un comportamiento estructural.

4.10. Validación de los resultados

El procedimiento para la validación tiene como propósito comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica del comportamiento del viento sobre el obelisco de la Pampa de Quinua. Esta validación busca asegurar que los resultados obtenidos en ANSYS FLUENT representen adecuadamente el acción del viento sobre la estructura. Como se muestra en la figura 4.70 se construyó una representación a escala de la estructura y del viento para comparar las líneas de corriente.

Figura 4.70: Experimento a escala para evaluar las líneas de corriente



Fuente: Experimento modelo a escala 1/150

4.10.1. Procedimiento

1. Se definió la geometría del obelisco y se asignaron las propiedades mecánicas del concreto, considerando su módulo de elasticidad, densidad y resistencia a compresión.
2. Se aplicó una velocidad de viento para tres simulaciones sobre la superficie del modelo, en función de la dirección predominante del flujo.
3. El modelo se resolvió en ANSYS FLUENT obteniendo las líneas de corriente, para después exportarlo los resultados al módulo ANSYS Static Structural para obtener deformaciones y esfuerzos cortantes.
4. Se realizó una comparación cualitativa entre las líneas de corriente identificadas en el modelo numérico según la orientación del viento y la geometría del obelisco.
5. Finalmente, se analizó la consistencia de las líneas de corriente con el patrón esperado del flujo alrededor de cuerpos prismáticos: aumento de presión en la cara de barlovento, reducción en la zona lateral y succión en la cara de sotavento

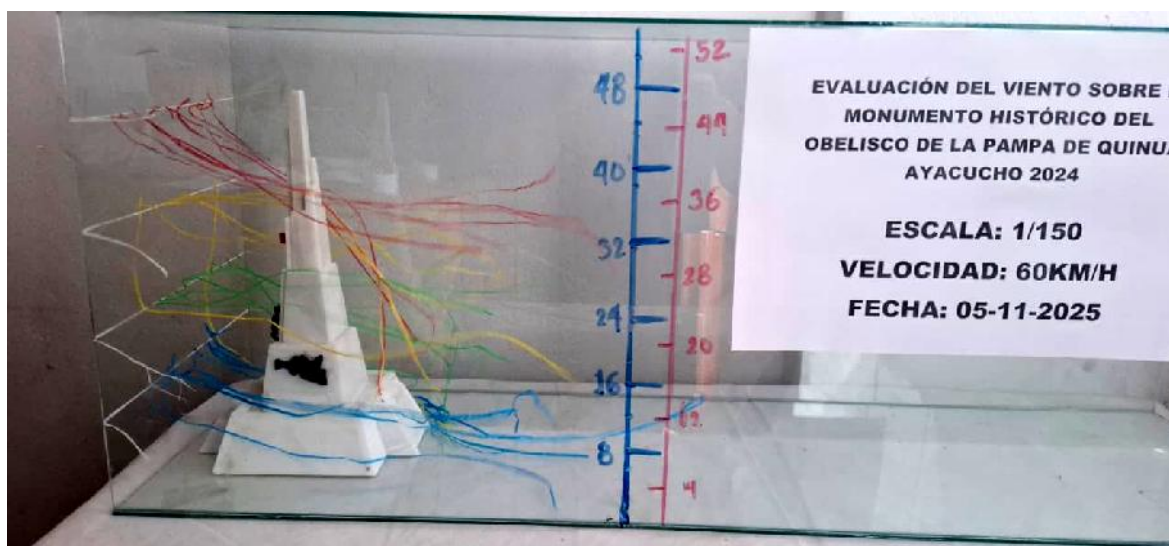
En la figura 4.70 también se observa el montaje experimental utilizado para la evaluación del viento sobre el monumento histórico del Obelisco de la Pampa de Quinua, desarrollado con el propósito de analizar el comportamiento aerodinámico de la estructura a escala reducida. El modelo físico del obelisco se encuentra dispuesto dentro de una cámara de ensayo transparente, que permite visualizar el flujo de aire mediante hilos de colores que representan las líneas de corriente del viento.

El ensayo se realizó con una escala geométrica de 1:150, aplicando una velocidad de viento equivalente a 60 km/h, 120 km/h y 180 km/h. El flujo de aire fue generado mediante un soplador eléctrico portátil, el cual permitió dirigir el viento de manera controlada hacia la estructura, simulando la acción del viento predominante sobre el monumento real.

4.10.2. Líneas de corriente para Vientos de 60km/hr

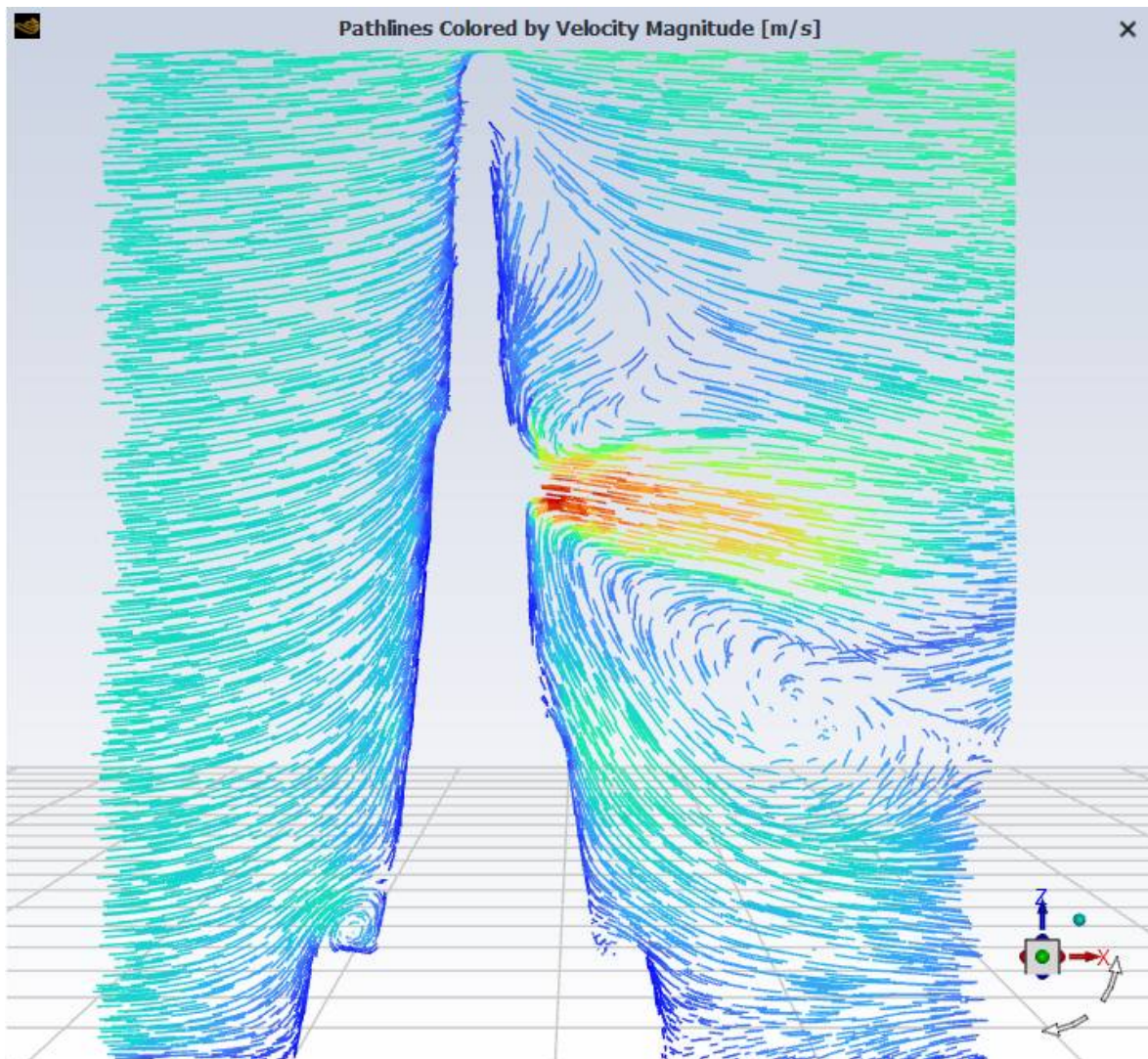
La figura 4.71 muestra las líneas de corriente, destacando el impacto del viento en barlovento y las zonas de recirculación en sotavento, utilizadas para validar la coherencia entre los resultados físicos y los simulados en ANSYS.

Figura 4.71: Experimento: Perfil líneas de corriente $V=60\text{km/h}$



Fuente: Experimento, modelo a escala 1/150

La comparación entre las líneas de corriente obtenidas experimentalmente en el montaje a escala (1:150, 60 km/h) (imagen 4.71) y las trazadas mediante la simulación numérica en ANSYS FLUENT (imagen 4.72), muestra una buena concordancia cualitativa. Ambos resultados indican un punto de estancamiento pronunciado en la cara de barlovento y una región de succión y recirculación en la cara de sotavento. Las principales discrepancias se observan en la posición exacta del punto de separación y en la longitud del wake, atribuidas a diferencias en el número de Reynolds entre el modelo físico y la situación de referencia, a la no uniformidad del flujo generado por el soplador y a la naturaleza promedio de la solución RANS empleada en la simulación.

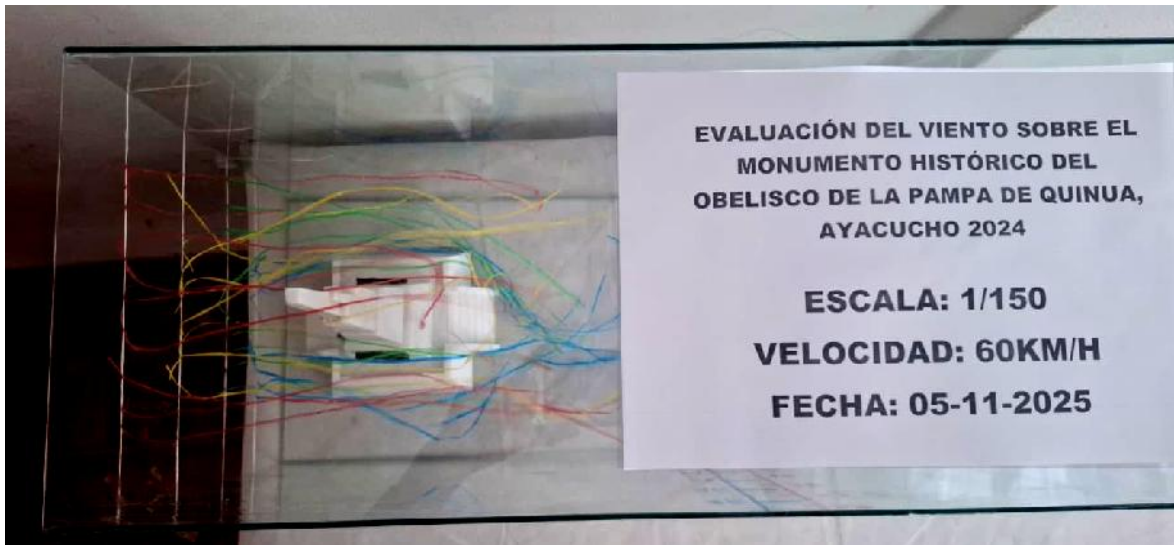
Figura 4.72: Simulación: Perfil Líneas de corriente V=60km/h

Fuente: Simulación Ansys Fluent

Así mismo en las imágenes 4.73 y 4.74 muestran la distribución del flujo de aire obtenida mediante la simulación CFD, donde las líneas de corriente representan la dirección y el comportamiento del viento al interactuar con la geometría analizada. Este resultado permite observar el patrón de circulación del aire y las regiones donde se generan vórtices o recirculaciones significativas.

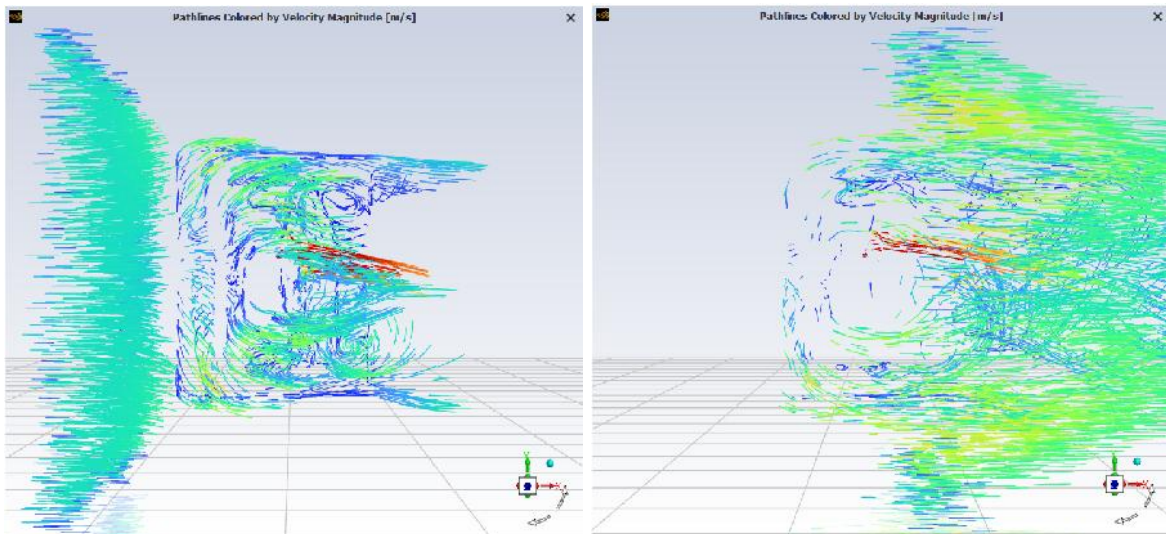
En la imagen 4.74 muestra que el flujo tiende a concentrarse y acelerar en determinadas zonas, producto de la interacción entre el viento incidente y la forma del obelisco. Las áreas con menor velocidad evidencian pérdidas de energía cinética asociadas a la resistencia aerodinámica y a la formación de turbulencias.

Figura 4.73: Experimento: Planta Líneas de corriente $V=60\text{km/h}$



Fuente: Experimento, modelo a escala 1/150

Figura 4.74: Simulación: Planta Líneas de corriente $V=60\text{km/h}$

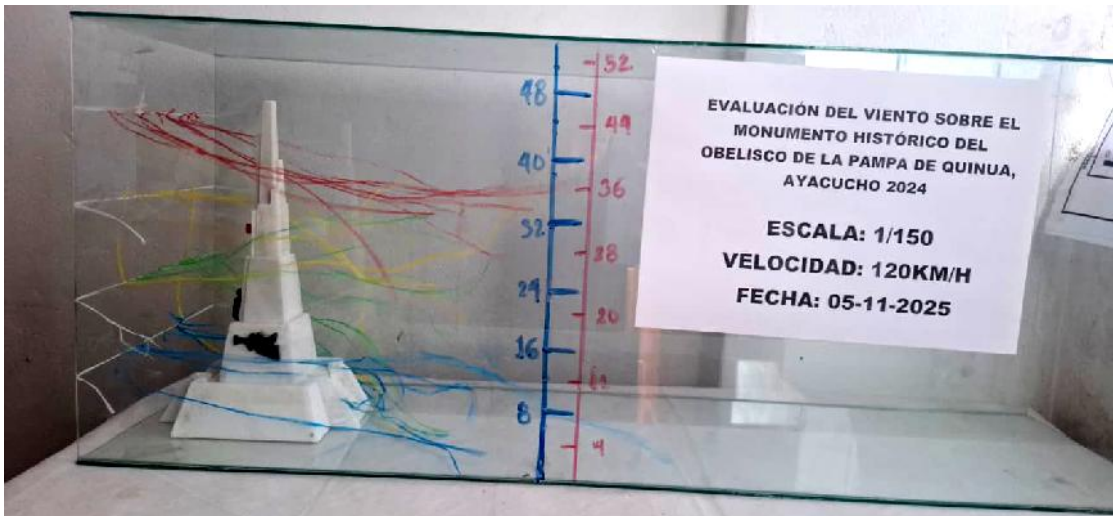


Fuente: Simulación Ansys Fluent

4.10.3. Líneas de corriente para Vientos de 120km/hr

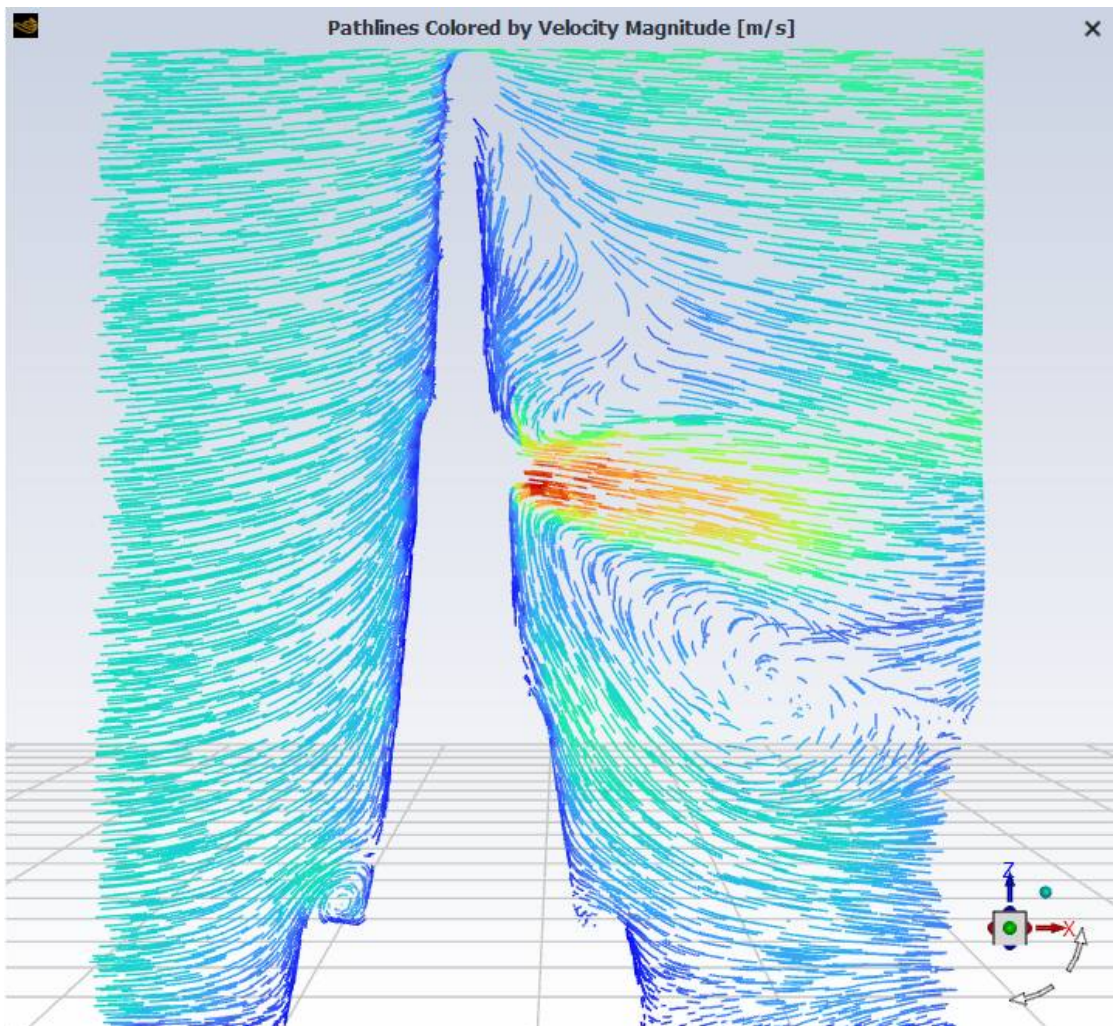
De la misma forma se han evaluado las corrientes de viento para velocidades de viento de 120km/h , y se han tenido los siguientes resultados, la figura 4.75 y 4.76 muestra las líneas de corriente en perfil, mostrados experimental y a través CFD.

Figura 4.75: Experimento: Perfil Líneas de corriente $V=120\text{km/h}$



Fuente: Experimento, modelo a escala 1/150

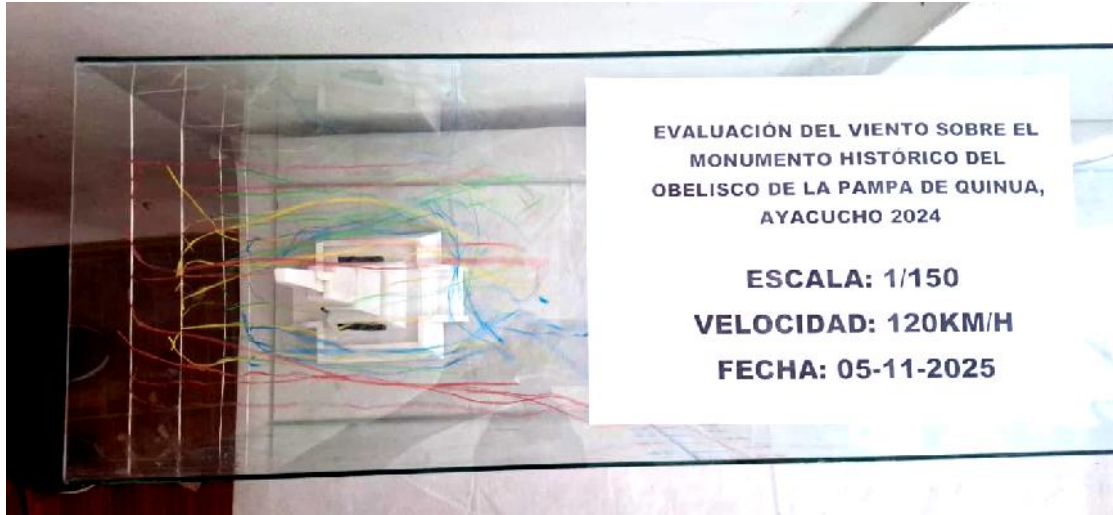
Figura 4.76: Simulación: Planta Líneas de corriente $V=120\text{km/h}$



Fuente: Simulación Ansys Fluent

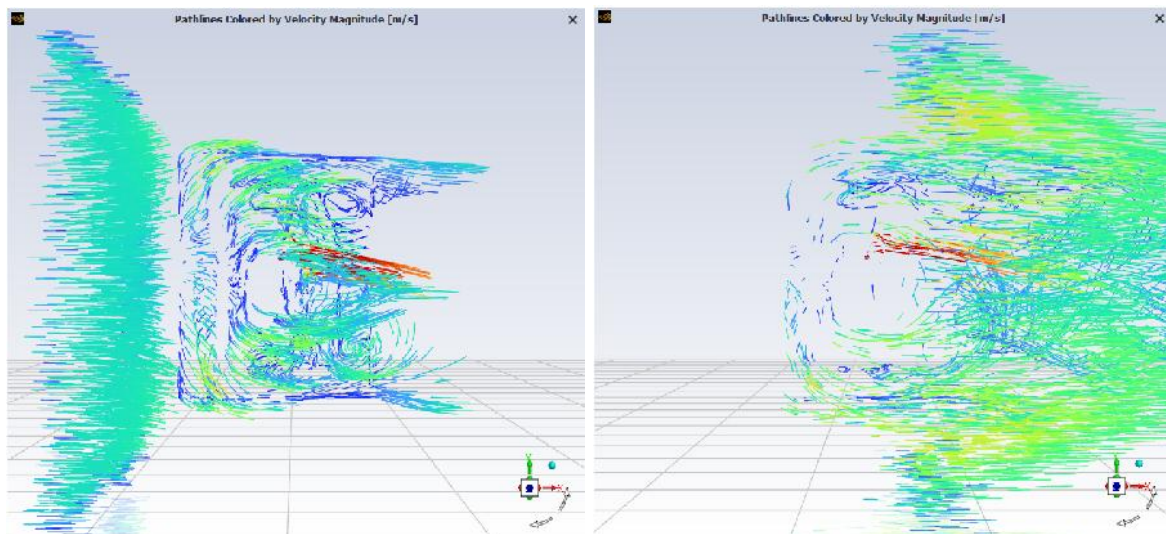
Así mismo en la figura 4.77 y 4.78 se muestra los resultados en planta para las mismas velocidades de viento, donde se demuestra que las líneas de corriente tienen el mismo comportamiento de flujo.

Figura 4.77: Experimento: Planta Líneas de corriente V=120km/h



Fuente: Experimento, modelo a escala 1/150

Figura 4.78: Simulación: Planta Líneas de corriente V=120km/h

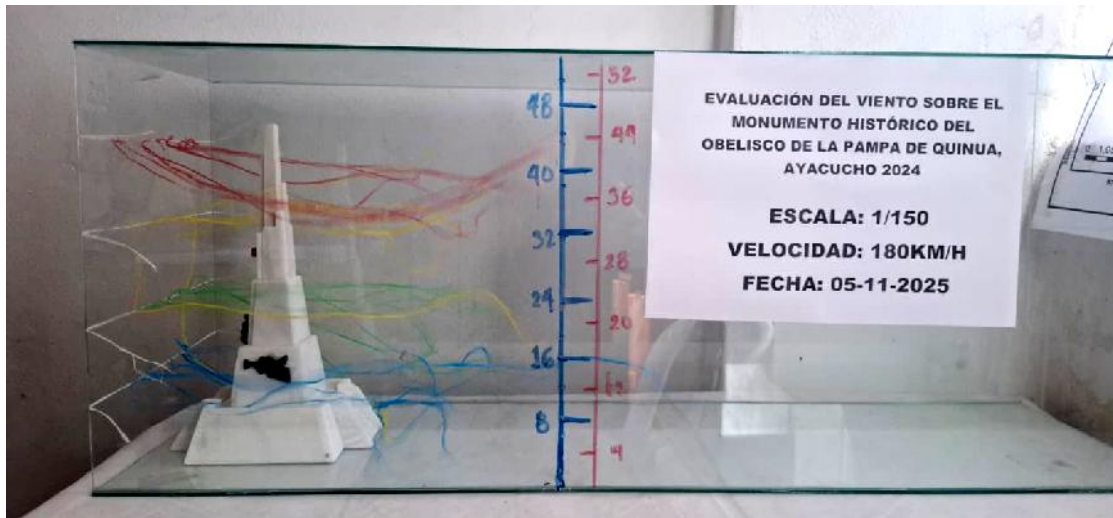


Fuente: Simulación Ansys Fluent

4.10.4. Líneas de corriente para Vientos de 180km/hr

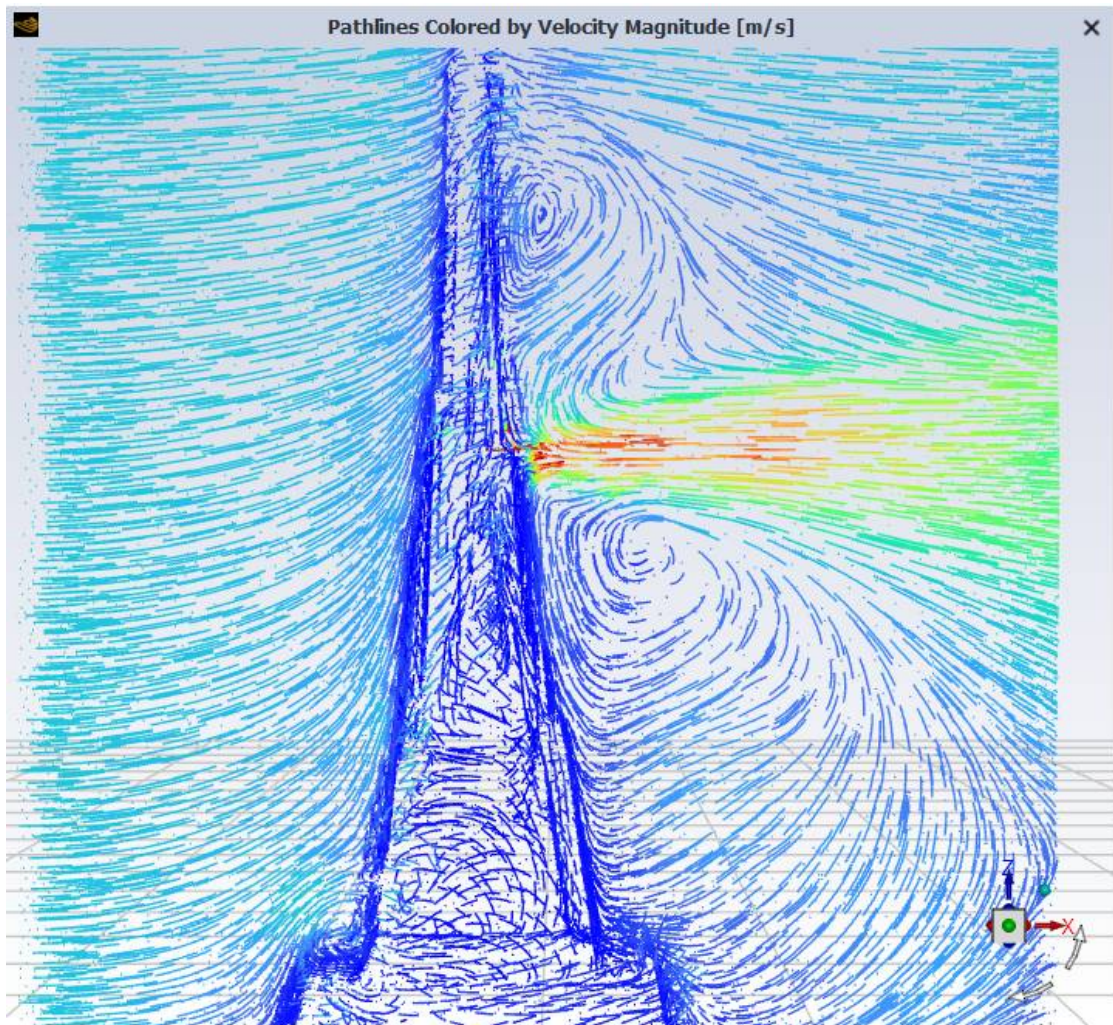
De la misma forma se han evaluado las corrientes de viento para velocidades de viento de 180km/h, y se han tenido los siguientes resultados, la figura 4.79 y 4.80 muestra las líneas de corriente en perfil, mostrados experimental y a través CFD.

Figura 4.79: Experimento: Perfil Líneas de corriente $V=180\text{km/h}$



Fuente: Experimento, modelo a escala 1/150

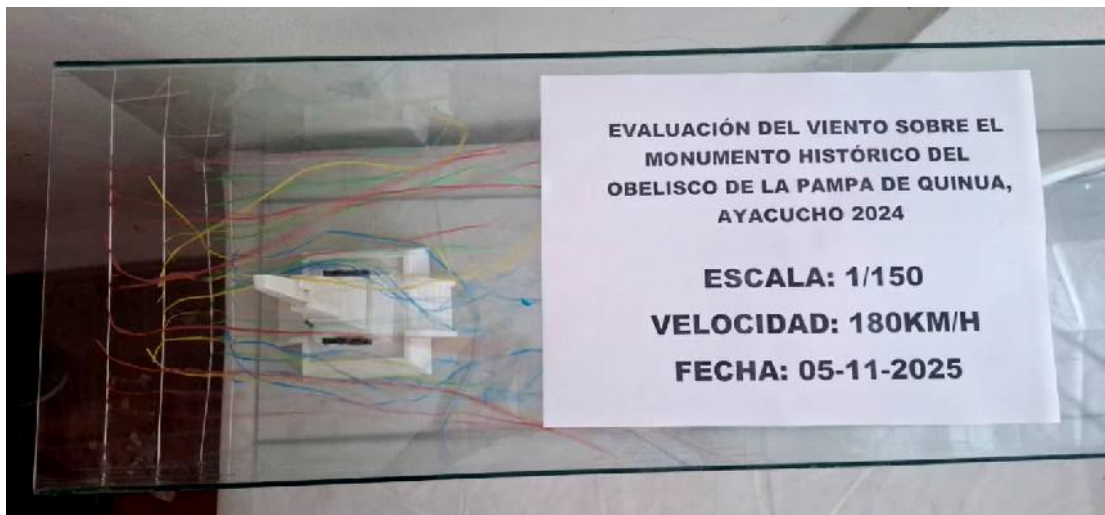
Figura 4.80: Simulación: Planta Líneas de corriente $V=180\text{km/h}$



Fuente: Simulación Ansys Fluent

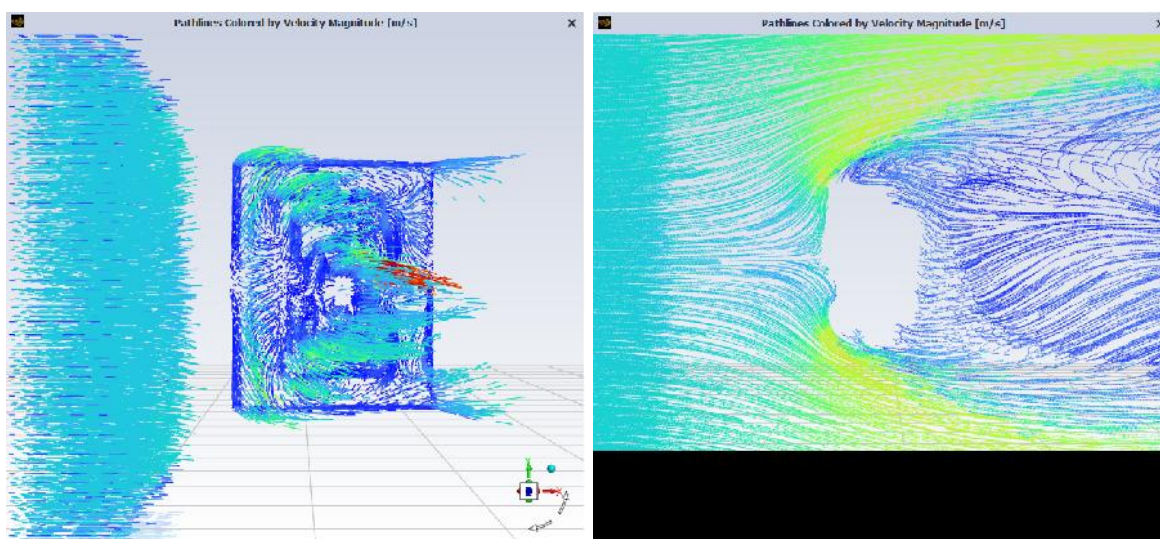
Así mismo en la figura 4.81 y 4.82 se muestra los resultados en planta para las mismas velocidades de viento, donde se demuestra que las líneas de corriente tienen el mismo comportamiento de flujo.

Figura 4.81: Experimento: Planta Líneas de corriente $V=180\text{km/h}$



Fuente: Experimento, modelo a escala 1/150

Figura 4.82: Simulación: Planta Líneas de corriente $V=180\text{km/h}$



Fuente: Simulación Ansys Fluent

4.11. Discusión de los resultados

Hipótesis general

Los resultados obtenidos confirman plenamente la hipótesis general. El procesamiento aerodinámico evidenció que el monumento actúa como un cuerpo romo, interrumpiendo abruptamente el flujo de aire y generando un campo de presiones fuer-

temente asimétrico. A pesar de la severidad de este fenómeno y del incremento exponencial de las fuerzas dinámicas bajo ráfagas de 180 km/h, el análisis de elementos finitos (MEF) demostró que la geometría piramidal truncada y la rigidez de la base de 15 metros de ancho disipan eficientemente las cargas. Por lo tanto, se corrobora que la estabilidad intrínseca del núcleo de concreto armado no corre riesgo de colapso, vuelco o falla por flexión bajo las condiciones climáticas actuales.

Como se observó los resultados en los ítem 4.3, 4.4 y 4.5, se valida el primer hipótesis, Los resultados obtenidos en las simulaciones multifísicas realizadas en ANSYS confirman la validez de la hipótesis general planteada. El acoplamiento entre los módulos Fluent y Static Structural permitió representar con precisión la interacción entre el flujo de aire y el obelisco, evidenciando una distribución de presiones coherente con la teoría aerodinámica. Las zonas de alta presión se concentraron en la cara frontal, mientras que en la parte posterior se formaron áreas de baja presión y recirculación del flujo, reproduciendo con fidelidad el comportamiento esperado.

Así mismo los resultados obtenidos en los ítem 4.7, 4.8 y 4.9, se encontraron las deformaciones en el análisis estructural mostraron un aumento proporcional con la velocidad del viento, registrando valores máximos de $2.6576 \times 10^{-7} \text{m}$, $6.809 \times 10^{-7} \text{m}$ y $1.3074 \times 10^{-6} \text{m}$ para 60, 120 y 180 km/h, respectivamente. Estos resultados evidencian la capacidad del modelo para predecir el comportamiento estructural ante diferentes intensidades del viento, manteniéndose dentro del rango elástico del material. En conjunto, la concordancia entre los resultados simulados y el comportamiento físico observado valida la eficacia de ANSYS como herramienta confiable para el análisis aerodinámico y estructural de edificaciones expuestas a cargas eólicas.

Hipótesis específico 1

El cálculo analítico lineal basado en la Norma Técnica E.020 (Tabla de carga lineal $q(z)$) arrojó resultados que asumen el viento exclusivamente como un empuje frontal unidireccional estático. En contraste, el modelo CFD con el solver $k - \omega$ SST evidenció que la separación de la capa límite en las aristas genera presiones negativas (succión) de magnitudes críticas en las caras laterales y posteriores. Esto demuestra que la norma subestima las sollicitaciones locales por tracción aerodinámica en geometrías patrimoniales complejas.

Hipótesis específico 2

Esta hipótesis se comprobó de manera contundente y cuantitativa. Bajo el escenario más desfavorable simulado (180 km/h), el módulo Static Structural determinó un Esfuerzo Equivalente de Von Mises máximo en el empotramiento basal de apenas 7,028.5 Pa (0.007 MPa). Al comparar este valor con el esfuerzo a la compresión característico del concreto ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2 \approx 20.6 \text{ MPa}$), se evidencia que la sollicitación representa menos del 0.1 % de la capacidad elástica resistente del material. Esto ratifica un sobredimensionamiento estructural inherente que garantiza un altísimo margen de seguridad mecánica.

Hipótesis específico 3

Queda demostrada la relación causal entre el comportamiento del viento y la patología del monumento. Los contornos de presión negativa cartografiados en el modelo CFD coinciden topológicamente con las áreas donde históricamente se ha reportado el mayor desprendimiento de placas de mármol travertino (12 % de pérdida). Se concluye que el daño no es producto de una falla estructural interna, sino de la "fatiga mecánica" de los morteros y anclajes superficiales. Estos elementos de fijación, diseñados originalmente solo para soportar peso gravitacional, terminan cediendo por tracción directa ante los ciclos continuos de succión extrema generados por las estelas turbulentas del viento.

V: Conclusiones

De acuerdo con los objetivos establecidos en el primer capítulo y las variables de diseño analizadas en el tercer capítulo, la investigación llevada a cabo y el posterior análisis de resultados se concluye lo siguiente:

1. Se demostró que la geometría escalonada e irregular del Monumento Histórico del Obelisco de la Pampa de Quinoa altera significativamente el comportamiento del flujo de viento, generando zonas críticas de presión negativa (succión) en sota-viento. Sin embargo, la simulación multifísica verificó que estas cargas dinámicas extremas no comprometen en absoluto la estabilidad aerodinámica ni la integridad estructural global de la edificación principal de concreto.
2. Se determinó que la distribución de los coeficientes de presión dinámica difiere sustancialmente de las estimaciones estáticas de la Norma Técnica E.020. Mientras la normativa subestima las cargas locales asumiendo un empuje frontal uniforme, el modelo CFD (utilizando el solver $k-\omega$ SST) reveló que la separación del flujo en las aristas genera fuerzas de tracción aerodinámica severas que los métodos analíticos tradicionales son incapaces de predecir en el diseño patrimonial.
3. Los resultados obtenidos en las simulaciones multifísicas realizadas en ANSYS permitieron validar la hipótesis general planteada, evidenciando que la integración entre los módulos Fluent y Static Structural constituye una herramienta confiable para analizar la interacción entre el viento y estructuras sólidas. La coherencia observada entre la distribución de presiones, las líneas de corriente y las deformaciones estructurales demuestra la precisión del modelo numérico empleado y su capacidad para predecir el comportamiento aerodinámico y estructural del obelisco ante diferentes intensidades de viento, garantizando así una evaluación realista y efectiva del desempeño de la estructura frente a cargas eólicas.

Tabla 5.3: Resultados finales de las simulaciones

	Simulación 01	Simulación 02	Simulación 03
Velocidad de Viento (km/h)	60	120	180
Max. velocidades obtenidas (m/s)	25	130	190
Max. presiones obtenidas (Pa)	800	3000	5000
Min. presiones obtenidas (Pa)	-200	-3000	-8000
Max. deformaciones totales (mm)	0.000266	0.000681	0.001307
Max. deformaciones en X (mm)	7.4247E-05	0.000227	0.000457
Max. Esfuerzo cortante (Pa)	1184.8	3511.9	7028.5

Fuente: Resultados de ANSYS

Se verificó cuantitativamente que la magnitud de los esfuerzos equivalentes inducidos por vientos extremos (180 km/h) es mínima en comparación con la capacidad del material. El esfuerzo máximo de Von Mises registrado fue de 7,028.5 Pa (0.007 MPa), valor que representa menos del 0.1 % del límite elástico del concreto base de la estructura (20.6 MPa). En consecuencia, se descarta cualquier riesgo de falla por corte o flexión en el núcleo central del monumento.

4. La simulación permitió cartografiar e identificar con precisión que las zonas con mayor índice de desprendimiento de revestimiento pétreo (mármol) documentadas en el diagnóstico real coinciden topológicamente con las zonas de máxima succión y turbulencia del modelo CFD. Físicamente, esto concluye que la patología del obelisco es un fallo por tracción y fatiga en los elementos de fijación superficial debido a presiones negativas, y no un problema de inestabilidad estructural interna.

VI: Recomendaciones

De la investigación realizada podemos recomendar lo siguiente:

1. Se recomienda continuar aplicando metodologías de simulación multifísica que integren la dinámica de fluidos y el análisis estructural, como las desarrolladas en ANSYS, para garantizar un diseño estructural más seguro, eficiente y realista frente a la acción del viento. Este enfoque permite comprender con mayor precisión la interacción entre el flujo de aire y las estructuras, contribuyendo al desarrollo de edificaciones más resistentes y optimizadas.
2. Se recomienda al Ministerio de Cultura y entidades encargadas del patrimonio actualizar sus planes de conservación, transitando de un diseño puramente sísmico hacia uno aerodinámico. Las futuras reposiciones de las placas de mármol del obelisco deben emplear sistemas de anclaje mecánico diseñados específicamente para resistir fuerzas de tracción por succión eólica cíclica, y no solo para soportar su propio peso.
3. A nivel académico y normativo, se sugiere emplear el flujo de trabajo metodológico validado en esta tesis (Acoplamiento ANSYS CFD - MEF) como protocolo obligatorio de evaluación no destructiva antes de intervenir estructuras monumentales esbeltas a nivel nacional, superando las limitaciones de la Norma E.020.
4. Se recomienda realizar estudios complementarios de túnel de viento virtual evaluando el comportamiento del viento bajo diferentes ángulos de ataque o incidencia oblicua (45°), así como evaluar la resistencia a la fatiga específica del mortero de fijación expuesto a las condiciones climáticas fluctuantes de la altitud altoandina (3,396 m.s.n.m.).

Referencia Bibliográfica

- Anderson, D., & Eberhardt, S. (2001). *Understanding Flight*. McGraw-Hill
- Burton T, J. N. y. B. E., Sharpe D. (2001). *Wind Energy Handbook*. John%20Wiley%20%5C%20Sons,%20Ltd,%20Chichester
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2013). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill
- Clement, G. V. (2002). *Acción del viento sobre las estructuras*. Universidad %20Nacional%20de%20Colombia
- Comarazamy, D. (2005). *Mitigación de desastres en Instalaciones de Salud: Efectos del viento - Aspectos estructurales*. Oficina%20regional%20de%20laOrganizacion%20Mundial%20de%20la%20Salud
- David, C., Adolfo, C., & Jorge, T. (2005). *Clasificación pentadal de vientos frente a la costa Peruana*. Revista%20virtual
- de León, J. M. V. (2014). *Optimización de costos en diseño eólico de obras civiles* [Tesis de postgrado]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Delmas, V., M., A., Martinez, G., & Perez, S. J. (2014). *La fuerza de coriolis Mitos y Leyendas*. Revista%20virtual
- Diaz, J., & Bañol, C. (2015). *Numero de Reynolds*.
- Diez. (1993). *Energía eólica. Universidad de cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería*. Revista%20virtual
- Espino, P. M. M. (2023). *Influencia de las fuerzas de viento basado en un análisis virtual CFD de túnel de viento y su análisis comparativo según la norma E020 y ASCE/SEI7-16 en la respuesta estructural de edificios altos en la ciudad de Lima*. [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Fleming, S. (2015). *BUILDINGS AND WIND* [Tesis pregrado]. University of Waterloo.
- Frades, M. (2017). *La meteorología a través de la etimología de sus palabras*. Revista%20virtual
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. P. (2014). *Metodología de la investigación*. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Methodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Ideam-UPME. (2006). *Atlas de viento y energía eólica en Colombia*. Revista%20virtual
- Jeremy, T. (2017). *Fuerzas centrifugas y coriolis*. Revista%20virtual
- Llerena, R. D. L. C., Rodríguez, P. M., & E., P. V. B. (2021). *Determinación analítica de las fuerzas de viento en una chimenea*. Revista%20Ciencia%20y%20Construcci%C3%B3n
- Lopez, B. (2018). *Desarrollo de un túnel de viento numérico*.

- Martín León, F. (2014). *Temas de meteorología dinámica: la fuerza del gradiente de presión*. *Revista virtual*
- Petersson, C. F. T. (2014). *Análisis comparativo de cargas de viento en puentes según normativas internacionales* [Trabajo de suficiencia profesional]. Universidad de Matanzas.
- Pinhata, G. M., G. M. Piñata. (2006). *Estudio del número de Strouhal en función del número de Reynolds en una pantalla triangular mediante la técnica de análisis tiempo-frecuencia* [Tesis doctoral]. Universidad de São Paulo.
- Ruiz, C. A. S. (2023). *Análisis del comportamiento dinámico por cargas de viento en una estructura de 14 niveles con sistema dual, Trujillo 2023* [Tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/149679>
- Thuminda Wijesooriya, N. S. C. y. P. M., Damith Mohotti. (2024). Predicting wind-induced pressure on slender tall structures using steady and unsteady RANS CFD analysis. *Journal of Wind Engineering and <industrial Aerodynamics*. <https://awes.org/wp-content/uploads/2024/10/AWES19paper-30-Wijesooriya.pdf?hl=es-US>
- Villar, M. L. S. (2024). *Evaluación de riesgos de daños del patrimonio cultural inmueble por inundación por lluvias intensas en Centro Histórico de Trujillo* [Tesis de pregrado]. Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/167282>
- Yugcha, A. B. H. (2009). *Normativa de diseño por viento para prevenir daños en pórticos y estructuras esbeltas en Ecuador* [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Zhou, Y. (2024). Standardization of wind-induced load effects on tall buildings based on high-frequency force balance measurements. *Journal of Structural Engineering*. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/AJRUA6.RUENG-1177>



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 22-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 073-2026-FIMGC-D**, a los **doce días del mes de mayo de 2026**, siendo las **10:00 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS**, y los miembros: **MSc. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO**, **Ing. Edwin Carlos GARCÍA SAEZ** y **Ing. Main Graciela TENORIO PALOMINO**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero de Civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Civil:

ANGEL IRCAÑAUPA HUAMANI

Quien presentó la tesis denominada:

Evaluación del viento sobre el monumento histórico del Obelisco de la Pampa de Quinua, Ayacucho 2024

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 17 (diecisiete)

Siendo las **11:45 a.m** del día **12 de mayo del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

MSc. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro

Ing. Main Graciela TENORIO PALOMINO
Miembro

Ing. Edwin Carlos GARCÍA SAEZ
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana "

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 12-2026-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Angel IRCAÑAUPA HUAMANI
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Evaluación del viento sobre el monumento histórico del Obelisco de la Pampa de Quinoa, Ayacucho 2024
Evaluación de la Originalidad : 13 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2966407369

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 21 de mayo del 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Atex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Evaluación del viento sobre el monumento histórico del Obelisco de la Pampa de Quinua, Ayacucho 2024

por Angel IRCAÑAUPA HUAMANI

Fecha de entrega: 21-may-2026 09:29a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2966407369

Nombre del archivo: Te_Angel_Irca_aupa_Huamani.pdf (4.89M)

Total de palabras: 24791

Total de caracteres: 137706

Evaluación del viento sobre el monumento histórico del Obelisco de la Pampa de Quinua, Ayacucho 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	13%	2%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	doczz.es Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	2%
3	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	www.tiempo.com Fuente de Internet	1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
6	rodin.uca.es Fuente de Internet	<1%
7	www.colibri.udelar.edu.uy Fuente de Internet	<1%
8	pub.ame-web.org Fuente de Internet	<1%
9	repository.udistrital.edu.co Fuente de Internet	<1%
10	nuestroclima.com Fuente de Internet	<1%

11	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
12	revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.upct.es Fuente de Internet	<1 %
14	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
15	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
16	de.wikipedia.org Fuente de Internet	<1 %
17	www.andi.com.co Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Central de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
19	ingenius.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
20	Juan Deini Carrasco Díaz. "Potencial Eólico en la provincia de Santa Cruz de Succhabamba - departamento Cajamarca 2023", Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 2023 Publicación	<1 %
21	www.elsevier.es Fuente de Internet	<1 %
22	upcommons.upc.edu Fuente de Internet	<1 %

23

pt.scribd.com

Fuente de Internet

<1%

24

www.congreso.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

25

es.scribd.com

Fuente de Internet

<1%

26

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo