

# Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling of the local scour effect on circular bridge piers

Abel Carmona-Arteaga<sup>1</sup>, Magister Scientiae en Recursos Hídricos, George Anthony Trigueros-Cervantes<sup>2</sup>, Neicer Campos-Vasquez<sup>3</sup>, Maestro en Ciencias Económicas

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, [abel.carmona@upn.edu.pe](mailto:abel.carmona@upn.edu.pe)

<sup>2</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, [george.trigueros@unmsm.edu.pe](mailto:george.trigueros@unmsm.edu.pe)

<sup>3</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, [neicer.campos@upn.edu.pe](mailto:neicer.campos@upn.edu.pe)

*Abstract- Local scour in piers is one of the main causes of failure in bridges. The current procedures carried out to study this phenomenon, such as the implementation of physical models and formulas, show precision difficulties; therefore, it is a matter of great interest for engineers and bridge design. In this work, a numerical modeling and a graphical analysis were performed using the Ansys Fluent software, to analyze the interaction of a flow through a pier. The geometry of the channel and the pier were extracted from a published article, in which an experimental study was carried out consisting on the analysis of the effect of placing a ring around a circular pier as a device to control the depth of scour; Therefore, the scenario in which the flow hits the pier with a ring was modeled and the scenario in which the pier did not have the ring included was also modeled. From the modeling, it was possible to conclude that the use of a ring around a pier reduces the effect of local erosion and it was possible to contrast the results of the experimental physical model, coinciding that the scour depths of their study with the contour and vectors graph obtained from numerical modeling, thus successfully concluding an alternative that would support studies carried out with physical and conceptual models, which is the use of a numerical model and software that allows this type of modeling.*

**Keywords—** scour, erosion, circular piers, bridges, anti-scour collar

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.202>  
ISBN: 978-628-95207-3-6 ISSN: 2414-6390

# Modelación de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del efecto de socavación local en pilares circulares de puentes

Abel Carmona-Arteaga<sup>1</sup>, Magister Scientiae en Recursos Hídricos, George Anthony Trigueros-Cervantes<sup>2</sup>, Neicer Campos-Vasquez<sup>3</sup>, Maestro en Ciencias Económicas

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, abel.carmona@upn.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, george.trigueros@unmsm.edu.pe

<sup>3</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, neicer.campos@upn.edu.pe

**Resumen—** La socavación local en pilares es una de las principales causas de fallo en los puentes. Los procedimientos actuales que se realizan para el estudio de este fenómeno, como la implementación de modelos físicos y fórmulas, presentan dificultades de precisión; por lo cual es un tema de gran interés para la ingeniería y para el diseño. En este trabajo se realizó una modelación numérica y un análisis gráfico mediante el software Ansys Fluent, para analizar la interacción del flujo de un canal con un pilar. La geometría del canal y del pilar fueron extraídas de un artículo publicado, en el cual se hizo un estudio experimental que consistía en analizar el efecto que tiene la colocación de un aro alrededor de una pila circular como dispositivo para controlar la profundidad de socavación; por lo cual se modeló un escenario en el que el flujo impacta con el pilar con aro y también se modeló otro escenario en el que el pilar no tenía incluido el aro. A partir de la modelación realizada, se pudo concluir que el uso de un aro alrededor de un pilar disminuye el efecto de erosión local y se pudo contrastar los resultados del modelo físico experimental, coincidiendo las profundidades de socavación de su estudio realizado con las gráficas de contorno y vectores obtenidas de la modelación numérica, concluyendo así satisfactoriamente una alternativa que apoyaría a los estudios realizados con modelos físicos y conceptuales, que es el uso de un modelo numérico y de los softwares que permiten este tipo de modelación.

**Palabras clave—**socavación, erosión, pilares circulares, puentes, collar anti-socavación

**Abstract—** Local scour in piers is one of the main causes of failure in bridges. The current procedures carried out to study this phenomenon, such as the implementation of physical models and formulas, show precision difficulties; therefore, it is a matter of great interest for engineers and bridge design. In this work, a numerical modeling and a graphical analysis were performed using the Ansys Fluent software, to analyze the interaction of a flow through a pier. The geometry of the channel and the pier were extracted from a published article, in which an experimental study was carried out consisting on the analysis of the effect of placing a ring around a circular pier as a device to control the depth of scour; Therefore, the scenario in which the flow hits the pier with a ring was modeled and the scenario in which the pier did not have the ring included was also modeled. From the modeling, it was possible to conclude that the use of a ring around a pier reduces the effect of local erosion and it was possible to contrast the results of the experimental physical model, coinciding that the scour depths of their study with the contour and vectors graph obtained from numerical modeling, thus successfully concluding an alternative that would support studies carried out with physical and conceptual

*models, which is the use of a numerical model and software that allows this type of modeling.*

**Keywords—** scour, erosion, circular piers, bridges, anti-scour collar

## I. INTRODUCCIÓN

El conectar dos lugares que se encuentran distanciados por un accidente geográfico, es una finalidad primordial que cumple un puente; y una de las subestructuras más importantes que lo compone es el pilar, cuya importancia radica en ser el soporte de la superestructura transmitiendo las cargas de compresión al suelo [1].

Un tema de gran interés, en relación a la estabilidad de los puentes y su diseño, es el comportamiento del flujo de un río alrededor de un pilar circular. Cuando el flujo viaja a altas velocidades e impacta contra estos pilares, produce corrientes turbulentas que ocasionan una disminución en la elevación del fondo alrededor de los pilares; acción que se da por la separación o desprendimiento de la capa límite, ya que esta aumenta su espesor y se mueve por efecto del gradiente de presión, desde una presión mayor que se da aguas arriba hasta una menor presión que se da aguas abajo, por lo que debido a la forma del pilar que es circular, la presión vuelve a aumentar a los lados de éste, desacelerando al fluido en la capa límite y generando una contracorriente que combinada con la dirección del flujo ocasiona una erosión debido a un alto nivel de turbulencia y de vórtices alrededor de la subestructura [2]. Existen dos tipos de vórtices que se generan alrededor del pilar, los llamados vórtices de estela o horseshoe vortex, que se dan por la geometría del pilar circular y la estela que se genera aguas abajo; y los vórtices que se dan verticalmente, llamados wake vortex, que se da a causa de que la capa límite no puede mantenerse adherida al cuerpo del pilar. Estos vórtices son muy inestables y actúan como pequeños tornados que erosionan y levantan el sedimento del fondo, como se puede observar en la Fig. 1. Estos vórtices que se forman alrededor de los soportes de los puentes tienen consecuencias graves, ya que esto hace que el lecho del río baje, de modo que los cimientos del puente quedan expuestos, lo cual puede provocar fallas estructurales [3]. Esta erosión local o también llamada socavación local, es la principal causa de fallo de pilares en puentes, lo cual puede ocasionar grandes tragedias causando un gran impacto social y económico.

Desafortunadamente, existen muchos estudios de puentes colapsados a causa de la socavación local. Las estadísticas en los EE. UU. muestran que el 40% de los casos de fallas de los puentes se debe a la erosión por inundaciones, mientras que, en Nueva Zelanda, este porcentaje alcanza el 62% [3].

Otros estudios realizados en 1973 por la Federal Highway Administration USA; investigación en la cual se mostró que el 24% de fallas eran provenientes de la socavación local en pilares y el 72% eran por los estribos; y la investigación en 1978, en la cual se demostró que tanto la socavación en pilares como en estribos, eran problemas que tenían la misma importancia y magnitud. También hay otros eventos que sucedieron a causa de la falla de pilares, como la inundación de 1993 en Mississippi y la tormenta de 1994 en Georgia, dejando grandes pérdidas económicas con daños estimados de más 130 millones de dólares entre ambos eventos [4].

Actualmente, los procedimientos clásicos en ingeniería que estudian la variedad de complicaciones que se presentan en relación al diseño del pilar y a las soluciones que se dan a los problemas de socavación local, no resultan muy perfeccionados [2]. Muchos de éstos se estudian a través de la implementación de modelos físicos y métodos de cálculo [1], pero las soluciones obtenidas no son muy exactas, debido a las limitaciones que se presentan por la escala del modelo o por ajustes en las ecuaciones realizadas [5]. La mayoría de las fórmulas empíricas muestran una representación relativamente inexacta del proceso de socavación y la estimación de la profundidad de socavación cuando se aplican a condiciones complejas de flujo de agua y los modelos físicos funcionan estimando la socavación usando un prototipo de la estructura y del río. Estas simulaciones no son muy recurrentes a nivel de ingeniería debido a la dificultad para representar con precisión el caso real, además de su alto costo [3].

Por estas razones es que algunos autores recomiendan realizar estudios complementando los modelos numéricos [5], y con más prioridad en configuraciones hidrodinámicas complejas [3], esto podría facilitar un conocimiento más detallado de la interacción del fluido con el pilar. El enfoque de modelado numérico, es intentar calcular la socavación a través de simulaciones; aunque tampoco se usa ampliamente en la ingeniería, debido a la naturaleza compleja de los procesos de hidrodinámica y transporte de sedimentos [3], la idea es simplificar estos procesos a través de un modelo eficiente. Uno de estos modelos es el CFD (Computational Fluid Dynamics), este es un enfoque atractivo, especialmente en casos de cimientos de puentes complejos donde no hay fórmulas empíricas confiables [3], este modelo permite simular y comprender el comportamiento del fluido en ciertas condiciones, como la interacción que tiene éste con un sólido o una estructura. El CFD tiene la ventaja de poder simular una situación a gran escala y pueden modificar fácilmente la geometría según sea necesario [6].

El CFD se utiliza para una amplia gama de cálculos de fluidos; determinando sus características y teniendo en cuenta las condiciones de contorno del fluido. Este tipo de simulación se puede utilizar para una amplia gama de problemas

hidráulicos, incluida la evaluación de la fuerza de arrastre para pilares de puentes, para la optimización de la forma y para la evaluación de contramedidas activas o pasivas para la mitigación de daños [7].

Sobre la base de lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar gráficamente, utilizando el software Ansys Fluent, versión académica, la recreación por CFD de un estudio experimental de la socavación local en pilares circulares, considerando dos escenarios: (1) la interacción del flujo de agua de un canal con un pilar circular y (2) la interacción del flujo de agua del mismo canal, pero con un aro alrededor en la base del pilar circular.

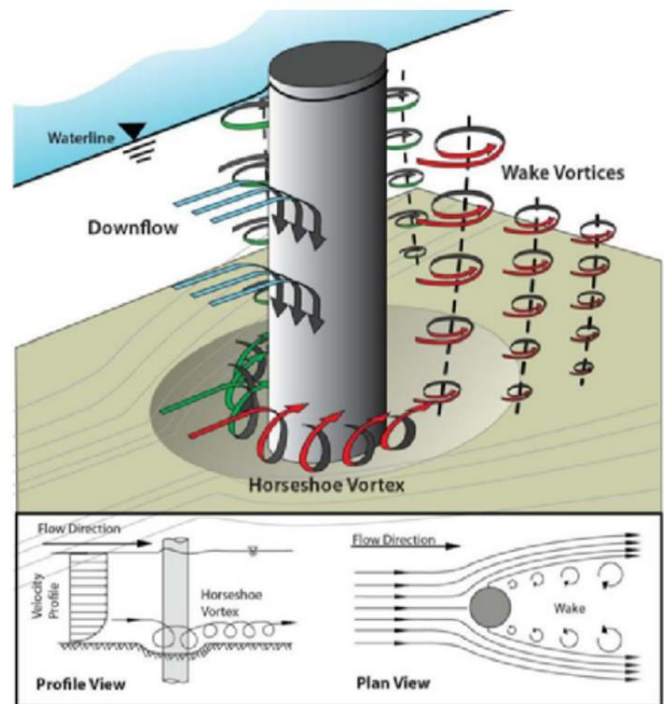


Fig. 1 Vórtices generados alrededor de un pilar [8].

#### A. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD); es el área dentro de la mecánica de fluidos en la cual se puede estudiar al flujo del fluido, a través de un computador, prediciendo su comportamiento en un medio mediante las soluciones aproximadas de las ecuaciones matemáticas que gobiernan a los fluidos [9], lo cual la convierte en una herramienta útil en el análisis de sistemas en donde se involucren a los fenómenos de transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía. El CFD tiene muchas aplicaciones dentro del mundo del diseño y la ingeniería, como el diseño aerodinámico de vehículos de transporte como automóviles, aviones y navíos; así como también para el diseño de sistemas de refrigeración, convección de sustancias, dispersión de gases, etc. El CFD, también se aplica en la ingeniería hidráulica, analizando las estructuras y los parámetros que involucran su interacción con el fluido; como las velocidades, la temperatura, las presiones, la

turbulencia, la dirección de flujo, etc.; permitiendo una visualización detallada en tiempo real en 2D y 3D, lo cual reduce en costos a experimentos de simulación física, así como también ahorra tiempo en la ejecución de estos mismos [10].

Para modelar en CFD, se requiere cumplir tres pasos importantes que son:

1) *El Preprocesamiento*: en la cual se crea la geometría para luego ser descompuesta en un mallado el cual define los puntos que requieran ser resueltos por el software y seguido se definen las condiciones de borde.

2) *La Solución*: en este paso, se solicita al programa el cálculo y la solución de lo planteado a través de un proceso iterativo hasta que llegue a su convergencia.

3) *El Postprocesamiento*: en esta etapa final, es donde se podrá observar los resultados del flujo gráficamente con líneas de corriente, vectores, contornos y sobre todo a color, lo cual permite la interpretación del movimiento del fluido; así como también se podrá revisar los reportes de simulación.

#### B. Ecuaciones de Navier–Stokes (NS)

En la dinámica de fluidos computacional, las ecuaciones utilizadas para determinar el comportamiento de los fluidos se las conoce como ecuaciones de Navier Stokes. Estas ecuaciones son compuestas por ecuaciones diferenciales ordinarias y ecuaciones diferenciales parciales, las cuales tienen variables dependientes como la velocidad y la presión, que son diferenciadas a más de una variable independiente. Estas derivadas parciales lineales expresan el movimiento de un fluido y por su complejidad, la forma más factible para la resolución de estas ecuaciones es la simplificación de esta ecuación, la cual es la ecuación de Navier Stokes para fluidos incompresibles, en donde se asume como constante a la densidad del fluido y se separa a la ecuación de la energía de la ecuación de continuidad y del momento [9].

#### C. Método de los Volúmenes Finitos (FVM)

Existe una gran complejidad en la resolución de las ecuaciones diferenciales parciales que estudian el campo de los fluidos, debido a que las variables como la velocidad y la presión de un fluido varía respecto al espacio y el tiempo; se deben proponer distintas soluciones. Una solución analítica es muy difícil, y muchas veces incluso imposible de resolver, por lo cual se pueden usar soluciones numéricas, las cuales requieren de la generación de un mallado para discretizar el problema. Una de las técnicas involucradas en la resolución de estos problemas y que ofrece la dinámica de fluidos computacional (CFD), es el método de los volúmenes finitos.

El método de los volúmenes finitos divide el dominio en varios volúmenes de control sobrepuestos, con el nodo de control en el centro o en los vértices, teniendo las ecuaciones diferenciales en cada volumen de control y las soluciones en los nodos de los vértices; obteniendo los resultados a través de iteraciones de las ecuaciones algebraicas [9].

#### D. Cálculos de Flujos Turbulentos

En un flujo turbulento, la turbulencia ocasiona la aparición de vórtices que reaccionan de una manera muy compleja, por lo cual se necesita de métodos numéricos para estudiar y analizar lo que ocasiona esta turbulencia y sus vorticidades. Los métodos numéricos de turbulencia pueden ser divididos en tres alternativas principalmente:

1) *Modelos de turbulencia RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations)*: la cual es usada mayormente por su practicidad y porque no necesita grandes recursos computacionales para obtener resultados aproximados en sus cálculos. Esta simulación considera que el análisis de turbulencia sea estacionario, manteniendo sus propiedades respecto al tiempo constantes. Las ecuaciones no son cerradas, por lo que requiere de modelos de turbulencia para cerrar el sistema, estos modelos de turbulencia son cuatro: (1) Mixing length, (2) Modelo  $k-\epsilon$ , (3) Reynolds Stress equation y (4) Advanced Turbulence.

2) *Simulación de grandes escalas LES (Large eddy simulation)*: en esta simulación se considera principalmente a las vorticidades mayores, filtrando y omitiendo a las vorticidades de menor escala. Requiere de mayores recursos computacionales debido al tiempo exigente de cálculo tridimensional y es más usada en flujos en conductos y en sus cambios de dirección.

3) *Simulación numérica directa DNS (Direct numerical simulation)*: esta simulación calcula directamente las ecuaciones del flujo. Generalmente esta simulación debe limitarse a flujos de Reynolds bajos y configuraciones sencillas debido a que tiene un elevado costo computacional, por lo cual no es muy usado en la ingeniería.

#### E. Modelo de Turbulencia $k-\epsilon$

La turbulencia es uno de los factores más influyentes en distintos diseños de transporte de masa, momento y calor, por lo cual, se necesitan de modelos que ayuden a predecir el comportamiento de transporte de partículas de un flujo, permitiendo así, la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes [10]. Estos modelos son llamados Modelos de Turbulencia, siendo el Modelo de Turbulencia  $k-\epsilon$ , uno de los modelos más utilizados, en sectores de hidráulica como oleoductos, turbinas, etc. [9].

El modelo  $k-\epsilon$ , representa por sus siglas la energía cinética de turbulencia ( $k$ ) y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ( $\epsilon$ ); éste es un modelo de viscosidad de vórtices isotrópicos (isotropic eddy viscosity models), el cual está basado en una relación lineal de la tensión de Reynolds (4) y el tensor de velocidad de deformación [11]. Este modelo permite obtener escalas de longitud y velocidad de turbulencia y una de las ventajas del modelo  $k-\epsilon$  es efectuar para distintos regímenes de flujos, resultados coherentes con cálculos que convergen, aunque no resulta tan preciso para flujos en rotación como fluidos en tubos circulares [12].

#### F. Ansys Fluent

Ansys Fluent es un Sistema de simulación CFD que se encuentra presente en el software de simulación de ingeniería ANSYS. Este Sistema de simulación CFD, permite modelar especialmente el comportamiento de flujo de fluidos y la transferencia de calor, consiguiendo simular distintos procesos en fluidos, así como también las interacciones de éste con estructuras. Ansys Fluent tiene algunos componentes que son importantes para llevar correctamente una simulación, éstos son:

- 1) *Geometry*: el cual es el espacio de trabajo en donde se pueden crear las geometrías de los modelos 2D o 3D.
- 2) *Ansys Meshing TM*: en este espacio es donde se crea el mallado, permitiendo dividir la geometría en polígonos pequeños, los cuales generaran los resultados.
- 3) *Setup and Solution*: en setup se establece la configuración previa en donde se permite seleccionar las dimensiones y las opciones de procesamiento. Seguidamente de configurar las variables, en solution, se procesan las iteraciones respectivas de las formulaciones para que puedan converger, solucionando ecuaciones complejas para que los resultados sean precisos.
- 4) *Results*: es un postproceso CFD, en donde se pueden observar y analizar los resultados de la simulación, teniendo las opciones de utilizar líneas de velocidades, contornos de presiones, vectores, seguimiento de partículas, etc.; lo cual permite ver el comportamiento del fluido en condiciones reales.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Modelo físico experimental

Las características geométricas del pilar que se dio a modelar, se tomaron de un estudio experimental donde se analizó el efecto que tiene un aro alrededor de una pila circular como dispositivo de control de la profundidad de socavación [2]. En este estudio se llevaron a cabo varios experimentos en un canal de 8.5 m de longitud, 0.50 m de ancho y 0.50 m de profundidad. En uno de estos experimentos, utilizaron una pila de sección circular de 7.3 cm de diámetro, 40 cm de alto y un aro de 14.6 cm de diámetro. En los experimentos, la pila se ubicaba en la parte central del canal y se colocaba un material no cohesivo. En un principio se llevó a cabo 8 experimentos sin aros y terminado esto, se colocó un aro de 14.6 cm alrededor de la pila, también se varió la posición del aro para cada profundidad de flujo ensayada. El aro se ubicó en posiciones - 6, - 3, 0, 3, 6 y 9 cm respecto al fondo, realizándose un total de 29 experimentos. Dentro del estudio realizado se obtuvo que para el aro de diámetro de 14.6 cm, ubicado a 0 cm respecto al fondo (al nivel del lecho), se logra reducir la profundidad de socavación entre 55.24 % y 96.54 %

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LEIRD).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LEIRD).  
**DO NOT REMOVE**

dependiendo de la profundidad de flujo. Concluyendo así que ésta era la posición óptima.

TABLA I  
RESULTADOS DE SOCAVACIÓN LOCAL DEL MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL

Tipo de Pilar	Velocidad (m/s)	Profundidad de socavación aguas arriba (cm)	Profundidad de socavación aguas abajo (cm)
Pilar sin aro	0.4038	7.81	7.74
Pilar con aro	0.40036	2.23	0.88



Fig. 2 Pilar con el aro colocado a nivel del fondo [2].

### B. Modelo numérico

Para el modelamiento por CFD en Ansys Fluent, se utilizó el Método de Volúmenes Finitos (FVM), el cual resuelve la ecuación de Navier Stokes (NS) utilizando un modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  en un modelo tridimensional O-Grid, acoplando todas las celdas excepto las más cercanas a la superficie, permitiendo así un diseño de superficie de agua libre. Así mismo Ansys Fluent emplea la ecuación de NS para la resolución de las ecuaciones de continuidad, Momentum y flujo turbulento [13]. Las propiedades constantes del fluido se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\text{Continuidad: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

X-Momentum:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(vu) = \frac{-\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Y-Momentum:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) = \frac{-\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Donde  $u$ ,  $v$  son los componentes adimensionales de la velocidad a lo largo de las direcciones  $x$  y  $y$  de un sistema de coordenadas cartesianas, respectivamente. El modelo turbulento  $k-\epsilon$  se utiliza para determinar el esfuerzo cortante turbulento para las simulaciones tridimensionales. El concepto de viscosidad de remolino con el modelo turbulento  $k-\epsilon$  se utiliza para calcular el término de tensión de Reynolds del modelo.[13]

$$\overline{u_i u_j} = \nu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

Se modeló las mismas medidas del canal de 8.5 m de longitud, 0.5 m de ancho y 0.5 m de profundidad. Se aproximó la velocidad máxima a 0.4 m/s al ser esta la más perjudicial para la subestructura de prueba dentro del ensayo. Así mismo se tomaron las medidas del pilar de prueba, 7.3 cm de diámetro, 40 cm de alto y para el aro de 14.6 cm de diámetro se le consideró un espesor de 1 mm. También fueron utilizadas las profundidades de flujo aproximándose al máximo, en este caso de 0.2 m. Se realizaron 4 modelamientos: un modelamiento 2D y uno 3D para el pilar sin aro y un modelamiento 2D y uno 3D para el pilar con aro.

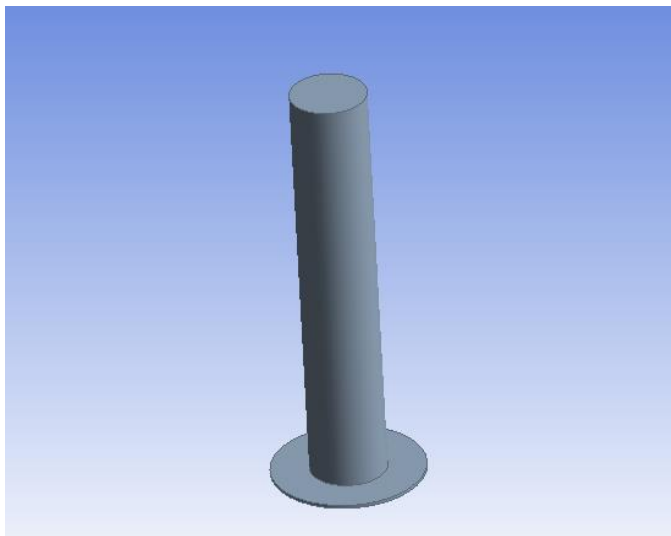


Fig. 3 Pilar y aro creado en Design Modeler.

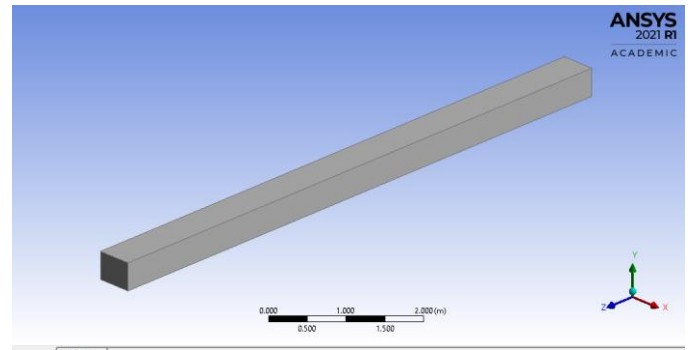


Fig. 4 Canal creado en Design Modeler.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se analizó el modelamiento a través del parámetro de la velocidad al ser ésta un factor importante en la erosión local. Por lo que se decidió utilizar la gráfica de Contorno para visualizar el comportamiento de la velocidad y su magnitud alrededor del pilar, también se utilizó la gráfica de Contorno de Presiones para poder determinar alguna relación con respecto a la socavación y la gráfica de Vectores para visualizar la dirección de la velocidad respecto a la subestructura e identificar los vórtices respectivos en cercanía del pilar. Por último, se utilizó la gráfica de Línea de Corriente de velocidad para poder identificar a través del contorno del cuerpo, la capa límite.

#### A. Modelamiento del pilar sin aro

En la Fig. 5, se observa la incidencia de la velocidad alrededor del cuerpo del pilar. Se observa en el sentido de aguas arriba como el flujo comienza a perder velocidad de forma uniforme cuando está próximo al cuerpo (punto de estancamiento), y así como es que recupera esta velocidad en el sentido de aguas abajo, lo cual es algo que se ve también en el artículo de CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar, en donde indica que la velocidad disminuye porque el flujo choca contra el pilar; y que por la presencia de vórtices en herradura, las partículas de sedimento comienzan a moverse y transferirse aguas abajo [14]. También se puede observar donde empieza el desprendimiento de la capa límite, siendo éste a los lados del pilar. En la Fig. 6, se observa como varían las presiones sobre el lecho y también como la zona de presiones mayores coincide con las zonas donde se da la socavación con mayor profundidad del lecho según la Tabla 1. Así mismo también queda claro que la presión máxima se da en el punto de estancamiento y disminuye gradualmente a lo largo de la mitad delantera del cilindro. Sin embargo, cuando la presión comienza a aumentar en la mitad del cilindro, se ve como las partículas de fluido tienden a moverse contra la fuerza de presión creciente. Por lo tanto, las partículas de fluido no podían detenerse ni invertirse, lo que provocaba que las partículas vecinas se alejaran de la superficie. Este fenómeno se conoce como separación de la capa límite [15].



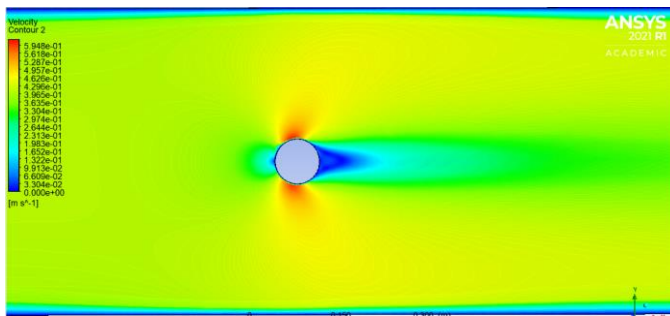


Fig. 5 Gráfica de Contorno de Velocidades del pilar sin aro.

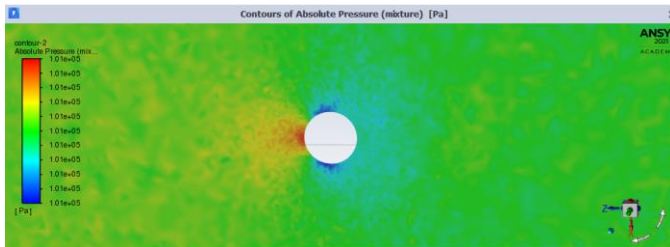


Fig. 6 Gráfica de Contorno de Presiones del pilar sin aro.

Con respecto a la Fig. 7, se puede observar mejor la dirección de la corriente del canal, siendo esta de izquierda a derecha. En la Fig.8, a diferencia de la gráfica de contornos, gracias a los vectores y su dirección, podemos observar con mayor detenimiento cómo es que aguas arribas del pilar las líneas del fluido impactan con la cara del pilar, ocasionando una pequeña zona de vorticalidad y a su vez generando un flujo ascendente hacia la superficie que rodea a la subestructura. Al no poder en esta simulación recrear la erosión del cauce en el tiempo, podría también deducirse teóricamente que, así como el flujo asciende, éste también descende al impactar con el pilar, ocasionando vórtices verticales. En la Fig.9, también se observa aguas abajo del pilar como es que las líneas de velocidad tienden a retornar al cuerpo, ocasionando vórtices de estela, debido también a la separación del flujo, siendo estos vórtices factores importantes, ya que son éstos los que ocasionan el levantamiento del sedimento del fondo y el arrastre de la estela.

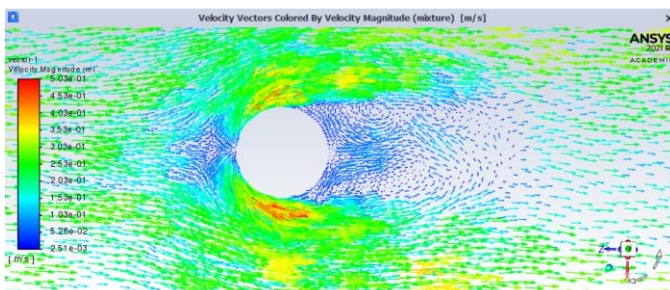


Fig. 7 Gráfica de Vectores de Velocidad del pilar sin aro.

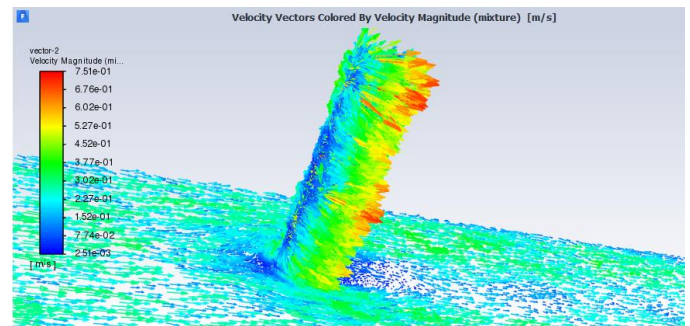


Fig. 8 Gráfica de Vectores de Velocidad aguas arriba del pilar sin aro.

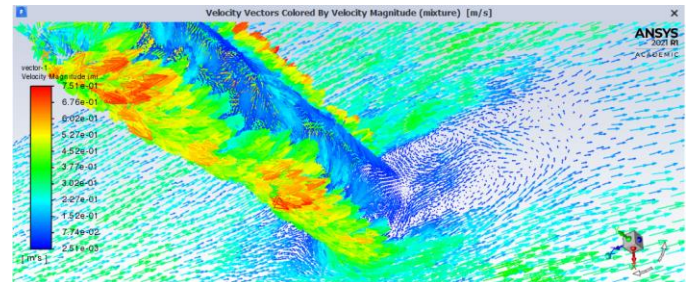


Fig. 9 Gráfica de Vectores de Velocidad aguas abajo del pilar sin aro.

En la Fig. 10, se puede observar a mayor detalle la capa límite y como las líneas de velocidad bordean el cuerpo dejando un espesor muy ligero. Se puede observar también cómo se va desprendiendo la capa límite del cuerpo, generando una estela atrás de la subestructura, y en la Fig.11 se observa como aparece una región aguas abajo en la que se encuentran remolinos estacionarios, lo cual se comprueba también con la Fig.9.

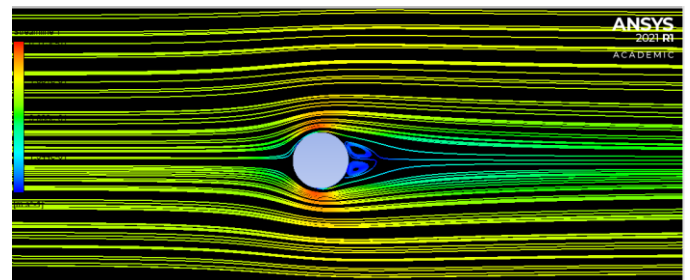


Fig. 10 Gráfica de Líneas de Corriente del pilar sin aro.

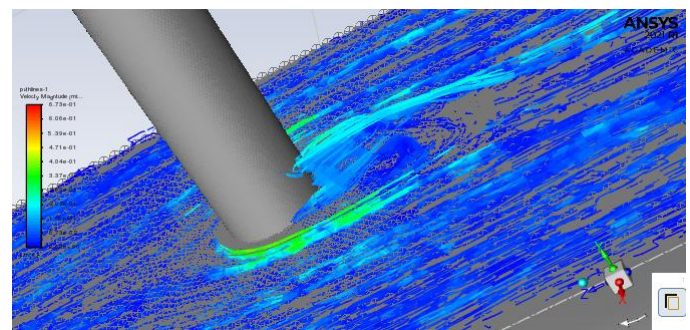


Fig. 11 Vórtices generados aguas abajo del pilar sin aro.

### B. Modelamiento del pilar con aro

La Fig.12 muestra, a comparación del pilar que no contaba con aro, un cambio respecto a la gráfica de contorno de velocidades, viéndose como empieza más retrasado que en la Fig.5, el desprendimiento de la capa límite causando esto una disminución en la estela formada aguas abajo. En la Fig.13, se puede seguir viendo el área de presiones mayores frente a la pila, pero con una menor magnitud, mientras que en aguas abajo del pilar, se encuentran las presiones menores, que a comparación de la Fig.6, se observa una gran disminución del área de presión en esta zona.

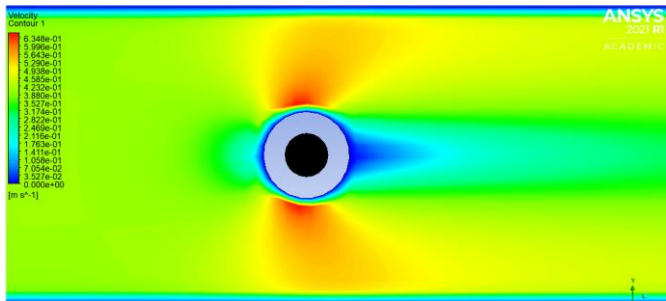


Fig. 12 Gráfica de Contorno de Velocidades del pilar con aro.

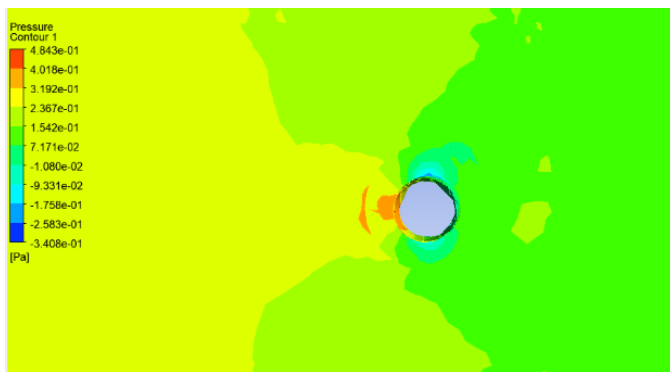


Fig. 13 Gráfica de Contorno de Presiones del pilar con aro.

Con respecto a la Fig.14, se logra notar también un gran cambio. Observándose una disminución respecto a la vorticidad mostrada en la Fig.7. Esto se comprobaría con la gráfica de contorno de velocidades, Fig.12, y al tener menos vorticidad tanto aguas arriba como aguas abajo del pilar se produciría menos erosión local en la subestructura, viéndose reflejado en las gráficas mostradas.

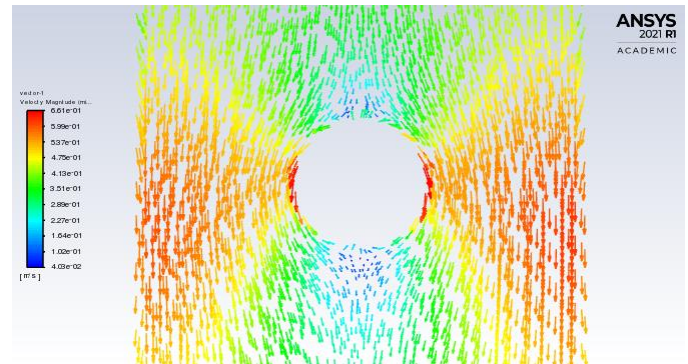


Fig. 14 Gráfica de Vectores de Velocidad del pilar con aro.  
Nota: El flujo esta direccionado de arriba hacia abajo.

La Fig.15 muestra que la presencia de la forma hidrodinámica del aro, debilita la presencia de los vórtices de herradura al tener el flujo la capacidad de seguir la forma de su geometría, observando una disminución en su divergencia.

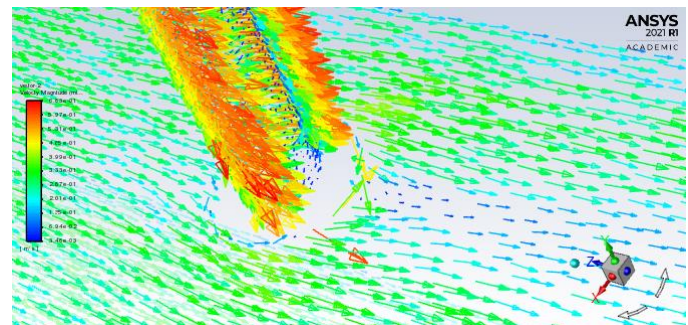


Fig. 15 Gráfica de Vectores de Velocidad aguas abajo del pilar con aro.

En las líneas de corriente, Fig.16, se ha podido observar la interacción de la capa límite con la geometría hidrodinámica, en lo que se observa, que el pilar con el aro opone menos resistencia al flujo, por lo que el desprendimiento de la capa límite es retrasado y tal como se visualiza, los vórtices, en la Fig.10, que se encontraban aguas abajo de la subestructura desaparecen, indicando que el retraso de la aparición de la estela llevaría a los vórtices en dirección a la corriente del flujo.

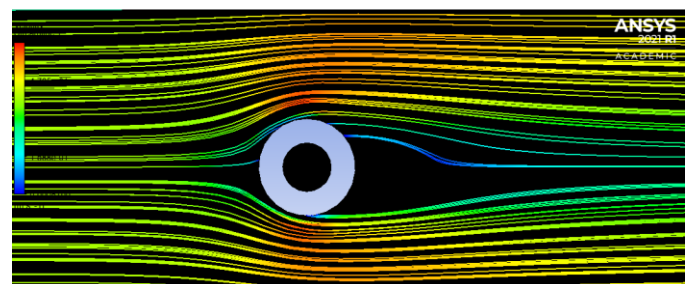


Fig. 16 Gráfica de Líneas de Corriente del pilar con aro.

Observándose así que la aplicación de un aro alrededor del pilar alivia el efecto de la socavación local, lo cual también lo



indican en el artículo Experimental Investigation of Local Scour Protection for Cylindrical Bridge Piers Using Anti-Scour Collars [16].

#### IV. CONCLUSIONES

Se puede concluir que el aro de diámetro de 14.6 cm, ubicado a 0 cm respecto al nivel del lecho, si logra reducir la profundidad de socavación; al observarse en las gráficas mostradas, una reducción en las zonas de vórtices de herradura y de estela, las cuales son áreas donde predomina el fenómeno de socavación local. Siendo la utilización de aros alrededor de pilares una alternativa contra la erosión local que se da en las subestructuras de puentes.

Se puede reforzar la interpretación gráfica de los resultados obtenidos con los datos de la tabla del modelo físico experimental, al coincidir la disminución en las profundidades de socavación con los gráficos mostrados de contorno y vectores de velocidad, al contrastar las diferencias cuando no se usa un aro alrededor del pilar y luego al usarse.

El software Ansys Fluent, permitió visualizar la dinámica del flujo alrededor del pilar y su análisis gráfico, ayudando a la comprensión del efecto de la erosión local, producido por la separación de la capa límite y la formación de vórtices. Así mismo, se deduce que los softwares de modelamiento numérico son una gran alternativa para poder complementar a los estudios que se realizan con modelos físicos y amplia el campo de investigación de socavación local en pilares.

#### REFERENCES

- [1] Jaramillo, P. (2017). Evaluación del efecto de la geometría de pilares en la socavación del cauce (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- [2] Flores, Edgar, & Bolívar, Juan, & Moncada, Alix, & Aguirre-Pe, Julián, 2007. Efecto de un aro sobre la socavación en pilas circulares. Ciencia e Ingeniería, 28(3),165-174. ISSN: 1316-7081.
- [3] S. Abdelalim, M. Samy, M. Gad, 3D-Modeling of scour around bridge supports using computational fluid dynamics, Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM), vol. 43, no. 1, 2021
- [4] Juárez A., Ruiz R., Flor Z., Tovar E., Catana E. (2009). Resolución de la socavación al pie de pilas de puentes. (No. de Registro SIP: 20082519)
- [5] Campa-Rodriguez, A., F.R. Astorga-Bustillos. 2015. Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. TECNOCENCIA Chihuahua 9(1): 36-48.
- [6] M. Zaid, Z. Yazdanfar, H. Chowdhury, F. Alam, A review on the methods used to reduce the scouring effect of bridge pier, Energy Procedia, 160:45-50, 2019.
- [7] M. Nasim, S. Setunge, S. Zhou & H. Mohseni, An investigation of water-flow pressure distribution on bridge piers under flood loading Structure and Infrastructure Engineering, 15: 2, 219-229, 2019.
- [8] Thunyaphun, T., Kositgittiwong, D., Ekkawatpanit, C., & Sukjan, R. (2020). Scour Protection Around Bridge Pier Using Based Ramp.
- [9] Aulestia, C. (2017). Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del proyecto Toachi - Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD). 200 hojas. Quito: EPN.
- [10] Díaz Pinilla, L. I., Meneses-Prado, L. P., & González-Silva, G. (2019). Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos. Revista UIS Ingenierías, 18(2), 237–244.
- [11] M P van der Laan and S J Andersen 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1037 072001
- [12] L. F. Toapanta-Ramos, J. A. Zapata-Cautillo, A. I. Cholango-Gavilanes, W. Quitiaquez, C. Nieto-Londoño, and Z. Zapata-Benabithé, “Estudio numérico y comparativo del efecto de turbulencia en codos y dobleces para distribución de agua sanitaria,” Revista Facultad de Ingeniería, vol. 28 (53), pp. 101-118, Oct. 2019.
- [13] M. Zaid, Z. Yazdanfar, H. Chowdhury, F. Alam, Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed, Energy Procedia, 160:51-59, 2019
- [14] GHADERI, A., ABBASI, S. GHADERI, A., ABBASI, S. CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar. Sādhanā 44, 216., 2019.
- [15] S V S N D L and Suresh Kumar, N "Simulation of Flow Behaviour around Bridge Piers Using ANSYS – CFD "International Journal of Engineering Science Invention (IJESI), vol. 07, no. 09, 2018, pp 13-2
- [16] Wang S, Wei K, Shen Z, Xiang Q. Experimental Investigation of Local Scour Protection for Cylindrical Bridge Piers Using Anti-Scour Collars. Water. 2019; 11(7):1515.