

LA HIDRÁULICA COMPUTACIONAL APLICADA A LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN LA PLANTA GENERAL SAVIO DE TERNIUM. PARTE II

COMPUTATIONAL HYDRAULICS APPLIED IN THE GENERAL SAVIO TERNIUM FACILITIES. PART II

Santiago Márquez Damián^{a,b}, Marina C. Rifai^c, Gastón Rodríguez Araya^c, G. Sebastián Osmetti^c, Daniel E. Parodi^c y Norberto M. Nigro^{a,d}

^a*Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), CONICET/UNL, Predio CONICET Santa Fe - Colectora Ruta Nac Nro 168, Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina
santiagomarquezd@gmail.com, <http://www.cimec.org.ar>*

^b*Universidad Tecnológica Nacional, FRSF, Lavaise 610, Santa Fe, Argentina
<http://www.frsf.utn.edu.ar/>*

^c*Ternium - Centro Industrial San Nicolás, Av. Savio s/n, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina
<https://ar.ternium.com/>*

^d*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Ciudad Universitaria. Ruta Nacional Nro 168 Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina <http://www.fich.unl.edu.ar/>*

Palabras clave: Hidráulica computacional, vertedero, sedimentador

Resumen. El presente trabajo describe la aplicación de técnicas de Hidráulica Computacional para el diseño de estructuras en la planta General Savio de Ternium. Los casos corresponden al manejo de aguas de proceso y lluvias antes de su devolución al río Paraná. Se presenta la modelización de las cuencas en análisis por medio del código hidrológico Storm Water Management Model (SWMM) para la obtención de hidrogramas de diseño y su posterior uso para el dimensionamiento de un vertedero y canal de descarga y un sedimentador para la separación de sólidos e hidrocarburos. Estas estructuras hidráulicas se predimensionan siguiendo las reglas del arte para luego ser verificadas y ajustadas mediante el uso de Mecánica de Fluidos Computacional a través de la herramienta OpenFOAM®. En esta segunda parte se presenta el diseño del sedimentador.

Keywords: Computational hydraulics, weir, settling pond.

Abstract. This work describes the application of Computational Hydraulic techniques in the design of structures at the Ternium General Savio plant. The cases correspond to the management of process and rainfall waters before returning to Parana river. The basin modeling is presented using the Storm Water Management Model (SWMM) code in order to obtain the design hydrographs and their subsequent use in a weir and a water/solid/oil settling pond dimensioning. These hydraulic structures are dimensioned using classical formulas and then verified and improved by the use of Computational Fluid Mechanics with the OpenFOAM® tool. In this second part the settling pond design is presented.

1. INTRODUCCIÓN

La Hidráulica Computacional es uno de los muchos campos de la ciencia en el cual la aplicación de computadoras dio lugar a una nueva manera de trabajar, que es intermedia entre un enfoque puramente teórico y la experimentación. Esta rama de la ciencia está relacionada con la simulación del flujo de agua en sistemas naturales o creados por el hombre así como sus consecuencias mediante el uso de métodos numéricos en computadoras (Findikakis *et al.*, 1994). Aun cuando no hay muchas diferencias entre la Hidráulica Computacional y la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) autores como Vreugdenhil (Vreugdenhil, 2012) resaltan el hecho que en la primera los problemas no suelen estar enfocados en el flujo en sí mismo sino en sus consecuencias: fuerzas sobre obstáculos en el flujo, transporte de calor, sedimentación o el decaimiento de contaminantes. Otra característica particular de la Hidráulica Computacional es el hecho de lidiar con problemas caracterizados por poseer escasos datos o poco fiables o bien con situaciones donde los procesos involucrados no están claros (Bates *et al.*, 2005).

La modelación del flujo y el transporte en Hidráulica Computacional se vale de herramientas computacionales accesorias tales como sistemas de adquisición automática de datos, computación gráfica, métodos de análisis estadístico y bases de datos para almacenamiento y manipulación de datos. La Hidráulica Computacional ha tomado además muchas técnicas de la Mecánica de Fluidos Computacional la cual involucra la simulación de un amplio rango de problemas de flujo tanto compresibles como incompresibles. El desarrollo del CFD además fue posible gracias a las contribuciones y el desarrollo en campos como la matemática y física aplicadas, aerodinámica, hidrología, ciencias de la atmósfera, oceanografía e ingeniería mecánica, métodos numéricos y ciencias de la computación y de la información (Findikakis *et al.*, 1994; Popescu, 2014).

La Hidráulica Computacional ha extendido el rango de acción de la hidráulica al hacer posible aplicar los primeros principios de la mecánica de fluidos a problemas de flujo con geometrías complejas, ambientes con características heterogéneas y fuerzas no uniformes. Así pues, para lograr este objetivo es necesario resolver numéricamente las ecuaciones de balance de momento, masa y energía mediante métodos como el del Elementos o Volúmenes Finitos, entre otros. Aun cuando la Hidráulica Computacional en general busca resolver los problemas desde los primeros principios expresados en ecuaciones en derivadas parciales algunos otros problemas simplificados pueden expresarse en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias. Tal es el caso de la determinación de la superficie libre de canales en régimen estacionario o bien el flujo en redes de distribución de agua o alcantarillado. De igual manera es posible resolver problemas de captación de aguas de lluvia y su transformación en escorrentía, los cuales suelen dar información para el diseño de obras hidráulicas (Findikakis *et al.*, 1994; Olsen, 1999). El uso de este tipo modelos junto con la simulación por CFD lleva a esquemas híbridos (Ali, 2014).

En este trabajo se aplicó la Hidráulica Computacional mediante un esquema híbrido, utilizando OpenFOAM® como herramienta de CFD y Storm Water Management Model (SWMM) para el cálculo hidrológico, para soluciones de ingeniería en la planta General Savio de Ternium. Las obras diseñadas permiten dar continuidad al manejo de aguas de proceso y lluvias a través del mejoramiento de estructuras actuales y la generación de nuevas soluciones. En este caso se dimensionó un vertedero y canal de descarga para una laguna ecológica existente y una nueva laguna ecológica que finalmente reemplazará a la primera. El interés en el uso de técnicas de Hidráulica Computacional reside en la dificultad que presenta la interacción entre las obras calculadas, en el caso del vertedero y el canal de descarga, y la optimización geométrica más

allá de los técnicas usuales en el caso de la laguna ecológica. En este último caso se buscó un diseño óptimo en cuanto a la distribución del agua en el ingreso.

2. DISEÑO Y CÁLCULO DE OBRAS HIDRÁULICAS

Dentro de las obras previstas para el manejo de aguas provenientes del predio de la planta se encuentran la construcción de un vertedero alternativo para la laguna en funcionamiento y una nueva laguna ecológica complementaria a la actual. El diseño de la primera de estas obras fue cubierto en la primera parte de este trabajo.

2.1. Nueva laguna ecológica

La empresa encomendó un trabajo que consistía en el diseño de una nueva pileta de decantación de material particulado y flotación de hidrocarburos previo vuelco al río Paraná. Para este trabajo se empleó un modelo CFD a dos fases separadas por una superficie libre (*interFoam*) y para el material a separar se empleó una metodología propia de postproceso la cual equivale a un seguimiento lagrangiano de partículas con el fin de determinar si estas decantarán o flotarán en el tiempo de residencia que la dinámica de fluidos proporciona. Además, y en base a una distribución granulométrica proporcionada por la empresa, se representó el funcionamiento de un cono de Imhoff como herramienta de verificación de concentración de sólidos para aceptar o desechar propuestas de diseño producto de un proceso de mejoramiento continuo.

2.1.1. Diseño

El diseño de la nueva laguna ecológica que complementa el servicio prestado por una ya existente motivó un estudio del cual originalmente solo se disponía de una superficie ubicada en una zona próxima a la laguna actual por lo que el estudio tenía la libertad de proponer diferentes tamaños y formas de acometida tanto en el ingreso como en el egreso. El análisis de propuestas comenzó con una pileta de forma rectangular en planta con dimensiones aproximadas de 130 m \times 70 m y un ingreso por uno de sus vértices con un pleno conteniendo una serie de ventanas que lo comunicaban con la pileta propiamente dicha. Luego del tránsito por la pileta las aguas pasaban a la zona de salida separada de la pileta por un vertedero que ocupaba todo el ancho de la pileta y un canal descendente con vuelco final al río. Este diseño de partida, así como varios otros (casi cuatro decenas) propuestos en forma conjunta con la empresa mostraban siempre la formación de grandes vórtices que además de generar depósitos muy concentrados en la zona del ojo del vórtice (formando islotes) generaba canalizaciones de alta velocidad que no garantizaban el cumplimiento de la normativa ambiental. Finalmente se convergió junto con la empresa al diseño presentado en la próxima sección el cual optimiza para el volumen disponible la separación del material indeseado en el vuelco final. Para ello se desarrolló una técnica de postproceso que emula el uso de un cono de Imhoff, elemento que se usa en la práctica para cuantitativamente establecer si se cumple o no con la normativa. Este criterio denominado “Cono de Imhoff Virtual” toma una muestra con la composición de arriba a la pileta propuesta por la empresa y luego del tránsito de las partículas por las líneas de corriente determina la composición que habrá a la salida al río y de esta forma con los tiempos propios de sedimentación permite evaluar la concentración de material particulado aún presente en la muestra virtual. La Fig. 1 muestra un esquema de la técnica de postproceso empleada.

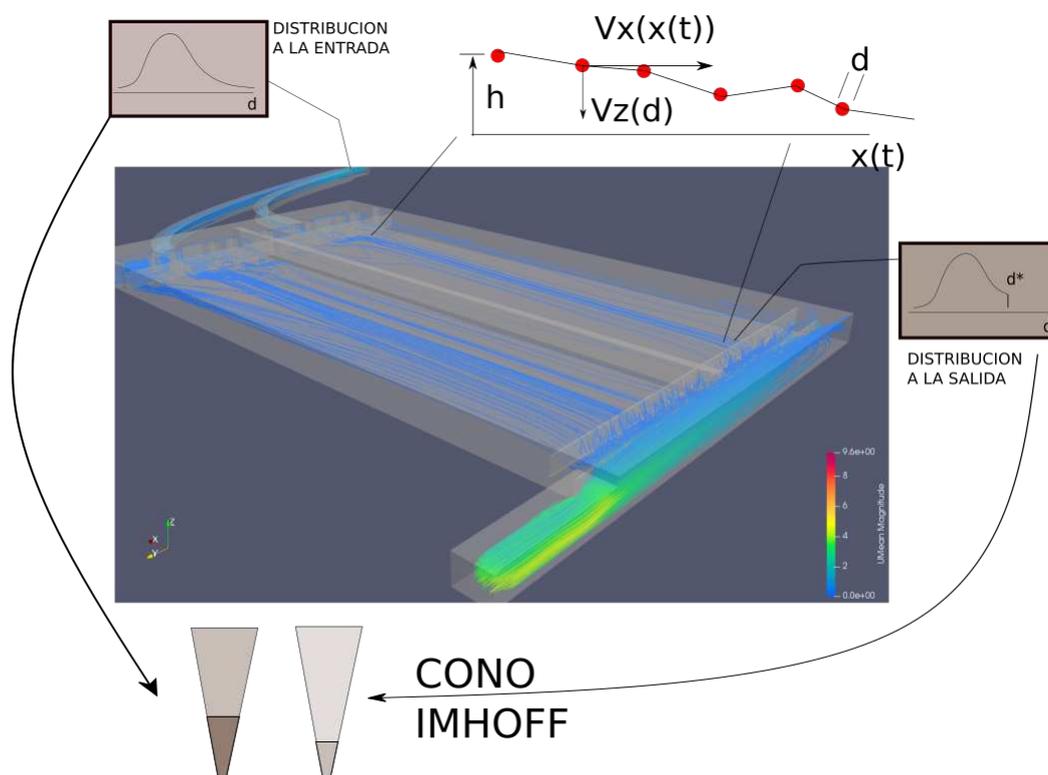


Figura 1: Esquema de interpretación de la metodología de Cono Imhoff Virtual.

2.1.2. Evolución del diseño

A continuación se muestran para una serie de seis caudales proporcionados por el estudio hidrométrico los resultados que arroja la simulación computacional en cuanto a diámetros de material particulado que la pileta puede hacer sedimentar así como de hidrocarburo que puede hacer flotar. Estos seis caudales responden a diferentes condiciones en que opera la planta, en diversas estaciones del año y bajo diferentes regímenes de lluvias. Se tomaron desde el caso mínimo de $25.000 \text{ m}^3/\text{h}$, otros de $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$ y $41.000 \text{ m}^3/\text{h}$ y finalmente tres caudales más que surgieron de interpolar el caudal máximo que se puede obtener por lluvias que es de $123.000 \text{ m}^3/\text{h}$, con caudales intermedios de $86.000 \text{ m}^3/\text{h}$ y $95.000 \text{ m}^3/\text{h}$. De esta forma es posible advertir el impacto que produce agregar aguas pluviales sobre el agua de proceso, ya que por un lado el aumento de caudal hace disminuir los tiempos de residencia y por otro ese aporte de agua pluviales disminuye la concentración de elementos a tratar que ingresan a la pileta.

El estudio llevó alrededor de tres meses de pruebas de más de treinta diferentes propuestas buscando que la dispersión de tiempos de residencia dentro de la pileta sea lo más pequeña posible alrededor de la media que viene signada por el valor ideal de $\frac{V}{Q}$, siendo V el volumen de la pileta y Q el caudal tratado. En ese camino y después de evaluar un gran conjunto de opciones se llegó al modelo que se muestra en la Fig. 2.A el cual posee una distribución de líneas de corriente uniforme en el ancho y casi en toda la longitud de la pileta, siendo estas dos de las características buscadas. Esta condición visual muchas veces es una señal de la capacidad que tiene la pileta de utilizar todo su ancho separar al máximo los sedimentos. En la Fig. 2.B, por otra parte, se observan las líneas de corriente de una de las propuestas iniciales.

Si se compara la propuesta finalmente seleccionada con alguna de las propuestas iniciales, se aprecia en esta última que el flujo genera un vórtice central provocando una desviación muy

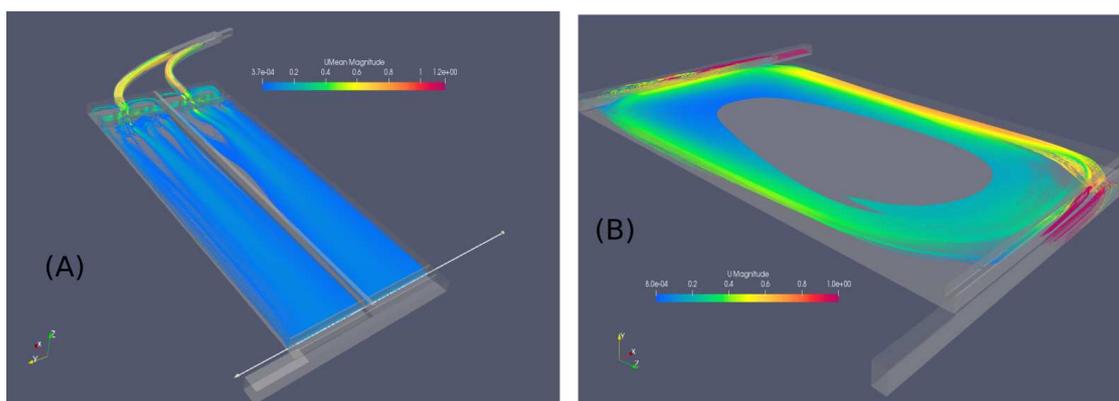


Figura 2: Líneas de corriente con valores de velocidad de avance en la pileta nueva. (A) Versión Final, (B) flujo tipo para las propuestas iniciales.

marcada de tiempos de residencia lo que provocará canalizaciones por donde el sedimento o el hidrocarburo fluirán muy rápidamente sin tener tiempo a sedimentar o flotar respectivamente.

Como se muestra en las Tablas 2 y 3 a continuación esta justificación cualitativa puede cuantificarse de manera directa mediante,

- la determinación de los diámetros más pequeños que la pileta logra sedimentar;
- la respuesta ante un ensayo del cono Imhoff realizado virtualmente.

Mientras que para el primero de los indicadores se emplea el flujo resuelto en el modelo CFD y la expresión ampliamente usada de la ley de Stokes para establecer la velocidad de sedimentación del material particulado, el ensayo del cono Imhoff virtual precisa de una distribución de tamaños confiable. Dado que se disponía de poca información en este sentido el resultado del cono Imhoff debe ser tomado como relativo, es decir la propuesta es justificar el diseño finalmente alcanzado frente al diseño de la laguna ecológica actual también simulada con el fin de confirmar la justificación en forma cuantitativa. En la Fig. 3 se ve el comportamiento de la laguna actual, la cual funcionó durante muchos años de manera aceptable.

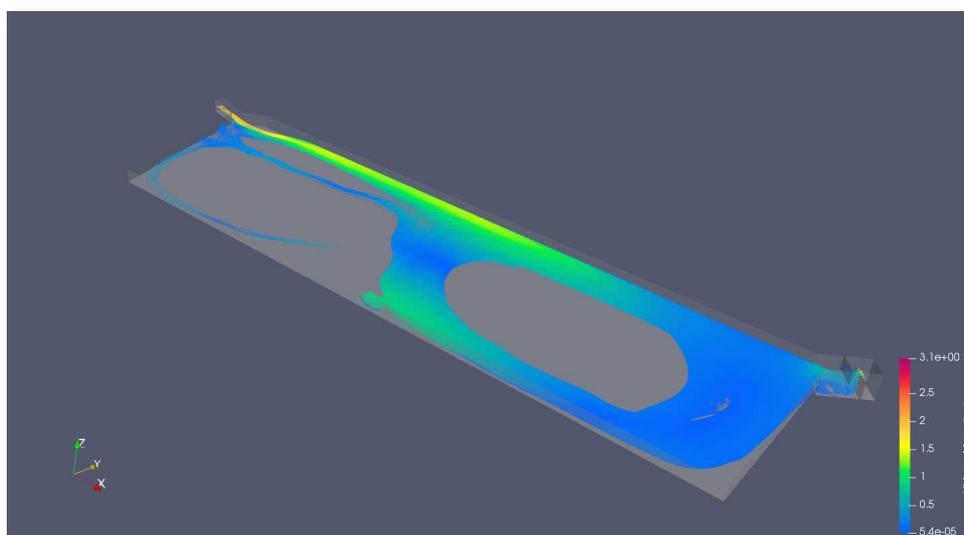


Figura 3: Líneas de corriente con valores de velocidad de avance. Laguna ecológica actual.

Se ve nuevamente el defecto que poseen estas piletas de sedimentación de generar vórtices de recirculación produciendo un ensanchamiento en la distribución de tiempos de residencia y por ende un mal aprovechamiento de su volumen.

2.1.3. Distribuciones granulométricas utilizadas

De todos los componentes sólidos presentes en las aguas volcadas al río se destacan el hierro (Fe), el silicio (Si) y el hidrocarburo que tiende a flotar. El cono Imhoff está orientado al material particulado por lo que el hidrocarburo no juega ningún rol. Para este último solamente se calcularon los tamaños de blobs mínimos que la pileta puede hacer flotar, los restantes alcanzan la salida y se vuelcan al río. Como se indicó de las dos cuantificaciones utilizadas solo la del cono Imhoff requiere información sobre las distribuciones. Las densidades utilizadas son de 5.000 kg/m^3 para el Fe y 2.300 kg/m^3 para el Si.

La distribución de Fe fue provista por la empresa y cuenta con un grado de confianza suficiente para este estudio. En cuanto a la distribución de Si, se utilizó una primera aproximación a partir de datos de la bibliografía. Finalmente se adoptó la obtenida de un análisis de cono Imhoff experimental que se realizó en la planta durante días donde no hubo producción de acero, asumiendo que lo analizado correspondía mayormente a Si. Los valores de las distribuciones granulométricas se presentan en la Tabla 1.

D(Fe) (μm)	C(Fe) (%)	D(Si) (μm)	C(Si) (%)
0	0	0	0
20	1	5	70
40	40	10	75
200	100	20	80
		30	85
		40	90
		200	100

Tabla 1: Distribución del Fe y Si usadas

Según la empresa la proporción de Fe y Si en la mezcla detectada a lo largo del tiempo fue identificada como de 30 % para el primero y 70 % para el segundo, y esta proporción fue la utilizada en este trabajo.

2.1.4. Resultados de separación de sedimentos

A continuación se presentan para cada uno de los seis caudales ensayados una tabla de diámetros separados tanto de Fe, Si como de hidrocarburo y en una columna adicional la eficiencia, η , ordenados por conjunto de líneas de corriente en altura. Se tomaron seis conjuntos de alturas distintas, los cuales recolectan información que llega a la salida de la pileta previo vuelco al río. De esta forma se puede hacer un promedio suficientemente representativo de las aguas volcadas al río evaluando los mínimos diámetros que la pileta es capaz de sedimentar o flotar. Se observa un aumento de los diámetros con el caudal de lluvia motivo por el cual el aumento del caudal parece producir un aumento del arrastre que se traduce en una merma en la separación.

Q	Z	$D(\text{Fe})$	$D(\text{Si})$	$D(\text{oil})$	η
25.000	5,100	$1,2046679 \times 10^{-5}$	$2,1131273 \times 10^{-5}$	$1,5957264 \times 10^{-4}$	$4,6498774 \times 10^{-1}$
	5,250	$1,7910448 \times 10^{-5}$	$3,1417004 \times 10^{-5}$	$1,5217151 \times 10^{-4}$	$4,3088353 \times 10^{-1}$
	5,500	$2,3523306 \times 10^{-5}$	$4,1262608 \times 10^{-5}$	$1,3628690 \times 10^{-4}$	$4,0053941 \times 10^{-1}$
	5,750	$2,7284004 \times 10^{-5}$	$4,7859310 \times 10^{-5}$	$1,1970473 \times 10^{-4}$	$3,8424575 \times 10^{-1}$
	6,000	$2,9161078 \times 10^{-5}$	$5,1151914 \times 10^{-5}$	$9,8819672 \times 10^{-5}$	$3,7684219 \times 10^{-1}$
	6,250	$3,0495101 \times 10^{-5}$	$5,3491946 \times 10^{-5}$	$7,9851341 \times 10^{-5}$	$3,6057015 \times 10^{-1}$
32.000	5,100	$1,3808628 \times 10^{-5}$	$2,4221937 \times 10^{-5}$	$1,8506653 \times 10^{-4}$	$4,5199515 \times 10^{-1}$
	5,250	$2,1352397 \times 10^{-5}$	$3,7454582 \times 10^{-5}$	$1,7648987 \times 10^{-4}$	$4,2198509 \times 10^{-1}$
	5,500	$2,7812710 \times 10^{-5}$	$4,8786721 \times 10^{-5}$	$1,5747566 \times 10^{-4}$	$3,8535145 \times 10^{-1}$
	5,750	$3,1087872 \times 10^{-5}$	$5,4531735 \times 10^{-5}$	$1,2934880 \times 10^{-4}$	$3,6170365 \times 10^{-1}$
	6,000	$3,3974399 \times 10^{-5}$	$5,9595039 \times 10^{-5}$	$1,0874051 \times 10^{-4}$	$3,5079862 \times 10^{-1}$
	6,250	$3,5257765 \times 10^{-5}$	$6,1846211 \times 10^{-5}$	$8,6949658 \times 10^{-5}$	$3,4114255 \times 10^{-1}$
41.000	5,100	$1,2842491 \times 10^{-5}$	$2,2527219 \times 10^{-5}$	$1,9282847 \times 10^{-4}$	$4,4875988 \times 10^{-1}$
	5,250	$1,9793139 \times 10^{-5}$	$3,4719462 \times 10^{-5}$	$1,8439914 \times 10^{-4}$	$4,1378834 \times 10^{-1}$
	5,500	$2,7125829 \times 10^{-5}$	$4,7581852 \times 10^{-5}$	$1,6530773 \times 10^{-4}$	$3,7047233 \times 10^{-1}$
	5,750	$3,1330600 \times 10^{-5}$	$5,4957508 \times 10^{-5}$	$1,3264313 \times 10^{-4}$	$3,4942860 \times 10^{-1}$
	6,000	$3,4596836 \times 10^{-5}$	$6,0686864 \times 10^{-5}$	$1,1751940 \times 10^{-4}$	$3,2816230 \times 10^{-1}$
	6,250	$3,7308604 \times 10^{-5}$	$6,5443620 \times 10^{-5}$	$9,7843047 \times 10^{-5}$	$3,2195888 \times 10^{-1}$
68.000	5,100	$1,8760186 \times 10^{-5}$	$3,2907542 \times 10^{-5}$	$2,3638719 \times 10^{-4}$	$4,2730411 \times 10^{-1}$
	5,250	$2,5010752 \times 10^{-5}$	$4,3871762 \times 10^{-5}$	$2,2399223 \times 10^{-4}$	$3,7563570 \times 10^{-1}$
	5,500	$3,4064541 \times 10^{-5}$	$5,9753158 \times 10^{-5}$	$1,9428659 \times 10^{-4}$	$3,2232370 \times 10^{-1}$
	5,750	$3,9902949 \times 10^{-5}$	$6,9994404 \times 10^{-5}$	$1,6838948 \times 10^{-4}$	$2,8701293 \times 10^{-1}$
	6,000	$4,4726229 \times 10^{-5}$	$7,8454995 \times 10^{-5}$	$1,4217834 \times 10^{-4}$	$2,6050212 \times 10^{-1}$
	6,250	$4,7259909 \times 10^{-5}$	$8,2899364 \times 10^{-5}$	$1,1029681 \times 10^{-4}$	$2,5309586 \times 10^{-1}$
95.000	5,100	$2,2281566 \times 10^{-5}$	$3,9084452 \times 10^{-5}$	$2,7998695 \times 10^{-4}$	$4,0707886 \times 10^{-1}$
	5,250	$3,0733874 \times 10^{-5}$	$5,3910781 \times 10^{-5}$	$2,6333730 \times 10^{-4}$	$3,3670101 \times 10^{-1}$
	5,500	$4,1171369 \times 10^{-5}$	$7,2219358 \times 10^{-5}$	$2,2827431 \times 10^{-4}$	$2,8133756 \times 10^{-1}$
	5,750	$4,9471055 \times 10^{-5}$	$8,6777970 \times 10^{-5}$	$1,9436987 \times 10^{-4}$	$2,5759579 \times 10^{-1}$
	6,000	$5,5152896 \times 10^{-5}$	$9,6744580 \times 10^{-5}$	$1,8126235 \times 10^{-4}$	$2,3561210 \times 10^{-1}$
	6,250	$5,8073686 \times 10^{-5}$	$1,0186798 \times 10^{-4}$	$1,6538928 \times 10^{-4}$	$2,3759808 \times 10^{-1}$
123.000	5,100	$2,3407093 \times 10^{-5}$	$4,1058757 \times 10^{-5}$	$3,1734535 \times 10^{-4}$	$3,9118971 \times 10^{-1}$
	5,250	$3,5877900 \times 10^{-5}$	$6,2934000 \times 10^{-5}$	$2,9720715 \times 10^{-4}$	$3,1085965 \times 10^{-1}$
	5,500	$4,6768425 \times 10^{-5}$	$8,2037244 \times 10^{-5}$	$2,5921753 \times 10^{-4}$	$2,5390210 \times 10^{-1}$
	5,750	$5,5697532 \times 10^{-5}$	$9,7699934 \times 10^{-5}$	$2,4453969 \times 10^{-4}$	$2,3354667 \times 10^{-1}$
	6,000	$6,2238159 \times 10^{-5}$	$1,0917295 \times 10^{-4}$	$2,2548440 \times 10^{-4}$	$2,1574494 \times 10^{-1}$
	6,250	$6,7703807 \times 10^{-5}$	$1,1876033 \times 10^{-4}$	$2,0133513 \times 10^{-4}$	$2,2507460 \times 10^{-1}$

Tabla 2: Diámetros, D , separados para todos los caudales seleccionados de estudio. Q , caudal que ingresa a la pileta; Z , cota de la superficie libre.

Por otro lado se incluye una segunda tabla (Tabla 3) que emula los resultados obtenidos por la Autoridad del Agua al emplear el cono Imhoff con la salvedad de las incertezas propias de las distribuciones usadas. En esta segunda tabla también se incluye cual es la altura máxima de la superficie libre de agua para evaluar posibles desbordes de la pileta al crecer el caudal de lluvias. Los resultados obtenidos siguen la tendencia de los diámetros mínimos separados por la pileta, es decir, un aumento de la concentración en la decantación de 10 minutos con el caudal de lluvia, en especial a caudales más bajos siendo menos notorio a caudales altos. Estos valores fueron considerados aceptables a pesar que la norma menciona un criterio cualitativo como es la no observabilidad de material particulado depositado en el fondo del cono al cabo de este tiempo. Si bien no se incluye en el trabajo estos niveles de separación superan aquellos obtenidos con las restantes propuestas analizadas, incluso con la de la pileta actual en funcionamiento.

Q	25.000	Altura máxima(m)	7,9711
Duración (min)	Cono 1 (ml/lit)	Cono 2 (ml/lit)	Eficiencia (%)
10	0,27501	0,0085873	96,8774
120	0,34716	0,054332	84,3497
Q	32.000	Altura máxima(m)	7,9963
Duración (min)	Cono 1 (ml/lit)	Cono 2 (ml/lit)	Eficiencia (%)
10	0,21485	0,011655	94,5755
120	0,27122	0,051286	81,0907
Q	41.000	Altura máxima(m)	8,0303
Duración (min)	Cono 1 (ml/lit)	Cono 2 (ml/lit)	Eficiencia (%)
10	0,16769	0,012727	92,4105
120	0,21169	0,046009	78,2653
Q	68.000	Altura máxima(m)	8,1248
Duración (min)	Cono 1 (ml/lit)	Cono 2 (ml/lit)	Eficiencia (%)
10	0,10111	0,018125	82,0731
120	0,12763	0,041448	67,5261
Q	95.000	Altura máxima(m)	8,2067
Duración (min)	Cono 1 (ml/lit)	Cono 2 (ml/lit)	Eficiencia (%)
10	0,072371	0,01736	76,0131
120	0,091359	0,035108	61,5712
Q	123.000	Altura máxima (m)	8,2926
Duración (min)	Cono 1 (ml/lit)	Cono 2 (ml/lit)	Eficiencia (%)
10	0,055896	0,016267	70,8975
120	0,070562	0,030222	57,1693

Tabla 3: Cono Imhoff para todos los caudales analizados. Cono 1: agua sin tratar. Cono 2: agua tratada

3. CONCLUSIONES

Durante el estudio de funcionamiento de pileta propuesta resultó claro que es imperioso precisar mejor la distribución del material particulado a la entrada a la pileta, tanto en caudal de particulado como en distribución de tamaños, en particular para la sílice para poder dar mejores apreciaciones sobre la capacidad de superar el ensayo del cono Imhoff ante distintos eventos en los que opera la planta, sea invierno o verano, sea durante una lluvia o no y dependiendo de las características de esta. Sin estos datos los cálculos simulando el ensayo Imhoff son muy imprecisos. Hasta tanto no se tengan esos datos el único parámetro de comparación será el diámetro que la pileta es capaz de separar.

Aun así este trabajo aportó una estimación de comportamientos de cono Imhoff relativos frente a una situación como la que ofrece la pileta o laguna ecológica actual. Es de destacar que además de compararse con la laguna ecológica actual también se la comparó con una de las primeras propuestas con las que se inició este trabajo dando resultados similares.

El uso de CFD aportó una gran capacidad predictiva mostrando cómo se relacionan las estructuras de vórtices formadas en la pileta con los tiempos de residencia y en definitiva con los diámetros mínimos que la pileta es capaz de filtrar o separar de la corriente que se vuelca al río. Después de más de 30 modelos diferentes se pudo alcanzar uno que presenta:

- Diámetros de separación tanto para el Fe, para el Si como para el hidrocarburo que son significativamente más pequeños que los que actualmente la laguna ecológica podría separar aun en el caso de considerarla libre de islotes y material sedimentado, es decir en una condición de obra nueva.
- Una comparativa entre el ensayo de cono Imhoff de la pileta nueva propuesta contra la actual arroja con valores de concentración de particulado sedimentado en el fondo del cono (detectable) mucho menores tanto para el ensayo a 10 minutos como para 2 horas. Las distribuciones de tiempo de residencia justifican lo dicho.
- Patrones de líneas de corriente cubriendo el ancho de la pileta con una mínima formación de recirculación.

En cuanto al manejo de los hidrocarburos la pileta actual generaría blobs de petróleo en el vuelco al río de tamaño aproximado entre 240 y 320 μm mientras que la nueva pileta reduce estos a entre 60 y 170 μm micrones, pudiendo asegurar que en promedio no va a superar los 150 μm , cosa que no es posible garantizar con la pileta actual salvo que se controle durante días en los que se procesa poco caudal.

En cuanto al caudal de proceso la situación se torna más comprometida cuando aumenta el caudal ya que los diámetros mínimos separados aumentan de tamaño y tienden a precipitar más en el ensayo Imhoff. De todos modos la pileta actual, si estuviera nueva, no estaría comprometida, menos aún la diseñada. Obviamente que esto sí depende de la distribución empleada así que si bien la tendencia relativa está más firme la absoluta no. Si se desea precisar el resultado absoluto es necesario definir una granulometría del material que participa en la sedimentación de mayor confianza.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a CONICET, la Universidad Nacional del Litoral (UNL) (CAI+D 2020 N° 50620190100132LI) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

(ANPCyT) (PICT-2018-03106, PICT-2016-2908), así como a la empresa Ternium SIDERAR (SAT REC-1038930-20) por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

- Ali M. *Fundamentals of Computational Hydraulics*. Department of Water Resources Engineering BUET, Dhaka, Bangladesh, 2014.
- Bates P., Lane S., y Ferguson R. *Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*. John Wiley & Sons, 2005.
- Findikakis A., Blumberg A., Schmalz R., y Bedford K. What is computational hydraulics? En *Hydraulic Engineering*, páginas 482–486. ASCE, 1994.
- Olsen N. Computational fluid dynamics in hydraulic and sedimentation engineering. *The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim*, 1999.
- Popescu I. *Computational Hydraulics. Numerical Methods and Modelling*. IWA Publishing, 2014.
- Vreugdenhil C. *Computational Hydraulics: An Introduction*. Springer Science & Business Media, 2012.