

# Diseño de un canal hidráulico abierto didáctico de pruebas con pendiente graduable

## Design of an open hydraulic test channel with adjustable slope

Meneses Fontecha, Yassed Daniel<sup>1</sup> y Jara Mora, Fredy Alexander<sup>2</sup>  
Fundación Universitaria de San Gil, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería  
Programa Ingeniería de Mantenimiento  
San Gil, Colombia

yassedmeneses@unisangil.edu.co  
fjara@unisangil.edu.co

Fecha de Recepción: 25 de julio de 2022  
Fecha de Aceptación: 02 de septiembre de 2022

**Resumen** — Un dispositivo hidráulico para canales abiertos permite la realización de prácticas como: determinación de caudales, análisis de flujo, medición de características de los fluidos, entre otros; mediante software CAD-CAE es posible modelar, simular y validar el funcionamiento de dispositivos hidráulicos para procesos productivos, con el fin de verificar la correcta operación del producto en un entorno de exigencia. Con base en esto, se elaboró el diseño de un canal hidráulico abierto didáctico de pruebas con pendiente graduable. Para lo cual, se empleó una metodología de corte mixto, de carácter descriptivo, ya que su propósito ha sido identificar, medir y evaluar las características, propiedades, dimensiones y regularidades del fenómeno de estudio. En esa misma línea, se aplicó el método de observación directa, realizando visitas a un laboratorio de fluidos con el fin de tomar datos relevantes. Para efectos de la simulación del comportamiento del canal de pruebas, se utilizó un modelo simplificado a través del análisis por elementos finitos. Se logró un ahorro del 50% en tiempo de ejecución y en recursos computacionales. En consecuencia, se obtuvo la comprobación de los rangos de valores de las variables hídricas relevantes de una práctica de vertederos y su funcionalidad. El diseño realizado del dispositivo hidráulico para el laboratorio de fluidos de Unisangil se ajusta a las características del banco hidráulico existente de acuerdo con los resultados obtenidos de la validación de diseño.

**Palabras clave**— CAD-CAE, diseño de detalle, dispositivo hidráulico, elementos finitos, laboratorio de fluidos.

**Abstract** - A hydraulic device for open channels allows the realization of practices such as: determination of flows, flow analysis, measurement of fluid characteristics, among others; through CAD-CAE software it is possible to model, simulate and validate the operation of hydraulic devices for production processes, to verify the correct operation of the product in a demanding environment. Based on this, it was elaborated the design of an open hydraulic test channel with adjustable slope. For which, a mixed court methodology was used, of a descriptive nature, since its purpose has been to identify, measure and evaluate the characteristics, properties, dimensions, and regularities of the phenomenon under study. In that same line, the direct observation method was applied, making visits to the fluids laboratory to take relevant data. For purposes of the simulating the behavior of the test channel, a simplified model was used through of the finite element analysis. Execution time savings of 50% and computational resources were achieved. In consequence, the verification of the ranges of values of the relevant water variables of a landfills practice and its functionality was obtained. The design accomplished of the hydraulic device for the fluid's laboratory of UNISANGIL it is adjusted to the feature of the existing hydraulic bench, according to the result obtained by the desing validation.

**Keywords** - CAD-CAE, detail design, hydraulic device, finite elements, fluid laboratory.

<sup>1</sup> Ingeniero de Mantenimiento, Unisangil.

<sup>2</sup> Docente, Unisangil. Ingeniero Mecánico UIS, Especialista en evaluación y gerencia de proyectos, UIS.

## I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento del flujo en canales abiertos es diferente del presentado en tuberías a presión. Al entender el comportamiento dinámico del flujo a lo largo del perfil hidráulico de un canal, se facilita la elección de sus características geométricas. Cuando se diseña se debe realizar que analizar físicamente cualquier fenómeno que intervenga [1]. Además de eso, según [2] un canal abierto es aquella estructura hidráulica, por la cual fluye el agua en una condición de superficie libre, clasificándose de acuerdo a su origen en canales abiertos o canales naturales. En la actualidad, gracias a los avances de la informática, el software CAD se encuentra en diversos campos aplicables de las actividades humanas, por lo que resulta necesario que se reúnan ciertos criterios de calidad para satisfacer en gran medida las necesidades de los usuarios; por ende, es de gran apoyo para el diseño y simulación que se pretende realizar.

El estudio realizado por [3] logró la codificación de un software para el cálculo de canales abiertos de flujo uniforme, el cual permite obtener de forma rápida y segura el tirante normal, tirante crítico, elementos geométricos, caudal, sección hidráulica óptima, número de Froude, tipo de flujo y energía específica de secciones rectangulares, trapezoidales, triangulares, entre otras. Aparte de ello, en el trabajo reportado por [4], se presenta el proceso de diseño hidráulico y mecánico de un canal de flujo libre con pendiente variable, que tiene como valor agregado la posibilidad de ser utilizado como herramienta pedagógica y didáctica para el aprendizaje de la hidráulica de canales. Del mismo modo, en el estudio realizado por [5] se presenta el diseño, construcción y calibración de un canal hidráulico de pendiente variable para posteriormente ser validado a través de prácticas experimentales. Como innovación tiene un sistema hidráulico acoplado a un sensor de presión para registrar los cambios de presión en diferentes zonas del canal con mayor grado de precisión. Más aún, en [6] se construye un equipo que tenga una forma de canal y que en medio de sus extremos tenga una plantilla con abertura, esta puede tener una forma o geometría específica, a esta abertura se le denomina vertedero y se puede clasificar según su forma de la cresta o espesor.

En la Fundación Universitaria de San Gil, Unisangil, se ha realizado el estudio de diversas variables y restricciones para la realización de un diseño conceptual de un canal abierto de pendiente graduable debido a que este elemento es una herramienta principal de aprendizaje en la mecánica de fluidos, dispersión de energía hidráulica y medición de caudales. Estos aspectos dan origen al presente trabajo de grado, al permitir la realización del diseño de detalle de un canal hidráulico abierto de pruebas con pendiente graduable, fortaleciendo de esta manera las diferentes teorías a desarrollar, convirtiéndolo en una importante herramienta didáctica para los estudiantes.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realiza la recopilación de requerimientos con características de uso, función y estructurales para determinar variables cualitativas y cuantitativas como: geometría del canal, características de flujo, pérdidas hidráulicas, atributos mecánicos y atributos de instrumentación para el diseño del canal hidráulico abierto.

Para el caso específico de este estudio se utiliza el software CAD-CAE [7] [8] SolidWorks [9][10][11] y la hoja de cálculo Excel. Por consiguiente, se requiere de un equipo con: sistema operativo Windows 10 en adelante, procesador de 3.3 GHz o superior, 16 GB de RAM o más, tarjeta gráfica dedicada y unidad de SSD para un mejor rendimiento.

Un canal didáctico de pruebas empleado para fines investigativos genera conocimiento de importancia sobre canales naturales y artificiales, aunque pueda tener un número limitado de parámetros que participan en el fenómeno, tiene que ver con la dificultad que han tenido los investigadores para desarrollar una teoría universal [2]. Por consiguiente, se plantea una metodología por fases:

Fase 1: Consiste en la recolección de la información y datos; su propósito es determinar las variables de diseño hidráulico del canal abierto a través, de la revisión bibliográfica y la construcción del marco de referencia.

Fase 2: Se trata del trabajo de campo; esta fase tiene como finalidad, establecer los atributos mecánicos y de instrumentación, con base en, la determinación de variables de la fase 1. Por medio del análisis, procesamiento y tabulación de los resultados, se realizan los cálculos analíticos para posteriormente desarrollar el diseño del canal abierto de pruebas.

Fase 3: Validación de la funcionabilidad; se realiza la simulación del comportamiento hidráulico en el canal abierto de una práctica de laboratorio mediante la herramienta CAD-CAE, para comprobar los rangos de valores de las variables hídricas relevantes.

## III. RESULTADOS

### A. Determinación de variables para diseño hidráulico del canal

En la presente sección se determinan los parámetros de diseño del canal hidráulico abierto. Para lo cual, se tomaron en cuenta las características geométricas del canal hidráulico de la Fig 1.



Fig. 1 De izquierda a derecha, banco hidráulico y canal hidráulico abierto fabricado por la empresa ARMFELD [4].

TABLA 1. VARIABLES DE DISEÑO HIDRÁULICO

Requerimiento	Valor	Unidad
Ancho del canal (b)	0.10	m
Altura del canal (h)	0.20	m
Longitud del canal (L)	2.4	m

Para establecer las características de flujo, se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$S = \frac{HT}{L} \quad (1)$$

$$Q = V * A \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$P = b + (2 * y) \quad (4)$$

$$R = \frac{b*y}{b+(2*y)} \quad (5)$$

En la Tabla 2, se determinan variables hidráulicas como las dimensiones de área; borde libre, el cual resulta de la multiplicación de la altura total por el 30% afirma [2]; profundidad de flujo, la cual se determina restándole a la altura total el borde libre; perímetro mojado, el cual se determina con (4) donde: *b* es el ancho del canal, *y* es la profundidad de flujo; radio hidráulico, el cual se determina basándose en la ecuación (5) donde: *b* es el ancho del canal, *y* es la profundidad de flujo; el factor de sección se determina como resultado de la multiplicación del ancho del canal por la profundidad de flujo con una potencia de 1.5; el valor de la pendiente se determina a través de la ecuación (1) donde se divide el valor HT equivalente a la multiplicación de la longitud del canal por la tangente de los grados de inclinación, que para este caso es 1 grado, entre la longitud del canal L; caudal de operación, su valor resulta de la aplicación de la ecuación (3) donde: Q es el caudal, A es el área del canal, R es el radio hidráulico, S es la pendiente del canal y n es el coeficiente de rugosidad del material que lo compone; velocidad de flujo, se determina por medio de la ecuación (2) donde: Q es el caudal de operación, V es la

velocidad y A es el área del canal; además, se establecen los diferentes tipos de flujo que se presentan en el canal.

TABLA 2. DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE FLUJO

Características de flujo	Valor	Unidad
Borde libre	0.060	m
Profundidad de flujo	0.140	m
Área del canal	0.014	m <sup>2</sup>
Perímetro mojado	0.380	m
Radio hidráulico	0.030	m
Factor de sección	0.005	m <sup>2</sup>
Pendiente máxima	0.017	
Pendiente mínima	0.000	
Coefficiente de fricción	0.009	
Caudal máximo	0.019	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Caudal mínimo	0.005	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Velocidad operacional	1.600	ms <sup>-1</sup>

Para la determinación de las condiciones de operación del flujo en la tubería expresadas en la Tabla 3, se consideró la ecuación (6).

$$h_f = f * \frac{L*V^2}{D*2*g} \quad (6)$$

Donde: *h<sub>f</sub>* es la pérdida de carga debido a la fricción; *f* es el coeficiente de fricción del material; *L* es la longitud de la tubería; *V*<sup>2</sup> es la velocidad media del fluido; *D* es el diámetro interior de la tubería y *g* es la aceleración de la gravedad, para lo cual, los valores se ajustaron teniendo en cuenta los requerimientos planteados en la Tabla 1 y Tabla 2. El coeficiente de fricción se determinó a partir del diagrama de Moddy [4]; previamente se deduce, el número de Reynolds y se determina el uso de tubería de PVC de un diámetro de 3".

TABLA 3. DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS HIDRÁULICAS EN EL PROCESO DE RECIRCULACIÓN

Condiciones de operación	Valor	Unidad
Temperatura de operación	25	°C
Peso específico del agua	9780	Nm <sup>-3</sup>
Viscosidad cinemática	0.897x10 <sup>-6</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Longitud de la tubería	11.037	m
Aceleración de la gravedad	9.800	ms <sup>-2</sup>
Diámetro interno tubería	0.076	m
Caudal operacional	0.019	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Área del canal	0.004	m <sup>2</sup>
Velocidad	4.166	ms <sup>-1</sup>
Numero de Reynolds	353928.127	
Coefficiente	0.001	
Rugosidad relativa	1.968 <sup>-5</sup>	
Coefficiente de fricción	0.008	
Pérdida de carga debido a la fricción	1.224	m

### B. Establecimiento de atributos mecánicos y de instrumentación

Un factor relevante, es la determinación de la capacidad de resistencia a las cargas estáticas que influyen en la estructura metálica del canal, cuando se encuentra en operación, además de seleccionar los elementos mecánicos auxiliares,

asegurando el óptimo funcionamiento del equipo en condiciones de operación. Por lo tanto, se tuvo en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$V_T = Alto * Largo * Ancho \quad (7)$$

$$w_{agua} = (\rho_{agua} * V_{agua} * g) \quad (8)$$

Para la realización del diseño del tanque de captación, el cual tiene como función acumular el agua que viene desde la bomba centrífuga, para posteriormente circularla por el canal de pruebas, se emplearon láminas de acero inoxidable calibre 16. Se consideró la ecuación (7) en donde:  $V_T$  es el volumen total; *Alto* es la altura del tanque; *Largo* es el largo del tanque y *Ancho* es el ancho del tanque, dando como resultado un volumen de 0.045 m<sup>3</sup>, los valores se ajustaron teniendo en cuenta los parámetros de las Tablas 1-3.

Para la determinación del peso del material que compone el tanque de captación, se toma en cuenta el peso de la lámina de acero inoxidable calibre 16 [12], ya que se debe multiplicar por el área del fondo del tanque de captación y por el área de las paredes del mismo; para esto se consideró la ecuación (8) donde:  $w_{agua}$  es el peso del agua;  $\rho_{agua}$  es la densidad del agua;  $V_{agua}$  es el volumen del agua y  $g$  es la aceleración de la gravedad, dando como resultado un peso de 8.643N.

Así mismo, se determinó el peso del agua en el tanque de captación y en el canal suponiendo que se encuentra en su punto máximo, para lo cual se consideró la ecuación (8), dando como resultado un peso total del agua en la estructura de 724.727N, donde los valores se ajustaron según los requerimientos planteados.

Para el diseño del canal de pruebas, se utilizaron láminas de acrílico de 8 mm de espesor. Teniendo en cuenta los requerimientos geométricos establecidos en la Tabla 1, se calculó el área de las paredes del canal multiplicando la base por la altura por dos, ya que el canal de pruebas requiere de dos paredes y el área del fondo del canal de la misma forma “base por altura”, posteriormente considerando el peso de la lámina de acrílico [13] se obtuvo como resultado un peso de 148.548N.

Para el diseño de la estructura metálica que va a soportar el peso del agua y el peso de las láminas de acrílico que componen el canal de pruebas, se utilizó un ángulo de 1”x1”x1/8” el cual tiene un peso de 1.2 kg/m [14], y un perfil cuadrado de 1”x1”x1.2mm calibre 18 que tiene un peso de 0.94 kg/m [15]. Por lo tanto, para la realización del cálculo del peso metálico de la estructura se multiplicó la longitud del material por el peso por metro equivalente, posteriormente, se suman los resultados de estos perfiles metálicos y se multiplican por la gravedad para obtener el valor de la fuerza, luego se suma este valor con el peso total

de acrílico empleado para obtener como resultado el peso del canal vacío, el cual fue de 263.603N.

Además, se añadió un medidor de caudal en el trayecto de la tubería por su importancia como instrumento que permite la medición de flujos. Por otra parte, se eligió la bomba superficial centrífuga HF 6A de 3HP a 220/440V [16] debido a que sus características técnicas, y la curva de rendimiento coinciden con el caudal máximo calculado en la Tabla 2.

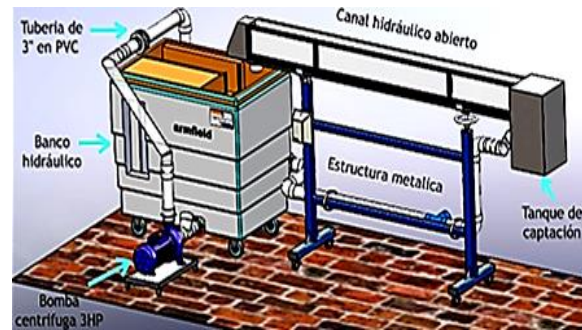


Fig. 2 Identificación de las secciones que componen el canal hidráulico abierto

*C. Simulación de una práctica de laboratorio mediante una herramienta CAD-CAE*

Se realizó la simulación del comportamiento hidráulico en el canal abierto mediante herramientas computacionales CFD, por este motivo, se establecieron las condiciones iniciales indicadas en la Tabla 4, para la ejecución del análisis de elementos finitos.

TABLA 4. CONDICIONES INICIALES

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen de fluido	251.3200	l
Área del canal	0.0045	m <sup>2</sup>
Diámetro de la tubería	0.0762	m
Caudal	0.0150	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>
Velocidad	3.2800	ms <sup>-1</sup>

Se utilizó un modelo simplificado del canal de pruebas Fig. 3, para la aplicación del método de elementos finitos. Con el fin de obtener la comprobación de los rangos de valores de las variables hídricas relevantes de una práctica de vertederos y su funcionalidad.

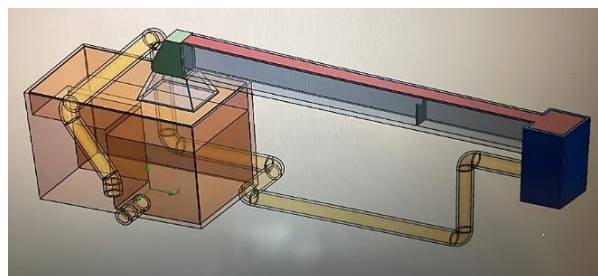


Fig. 3 Modelo simplificado del canal de pruebas.

La simulación empleando herramientas computacionales CFD, contribuyó en la realización de un análisis de diseño durante el proceso de validación, mediante el cual se generó una mejora continua en factores como: seguridad, calidad, costos y tiempos de fabricación. También, se observó el comportamiento del fluido Fig. 4, en contraste con los valores expresados a través de la determinación de características de flujo de la Tabla 2, demostrando que los resultados obtenidos son el equivalente aproximado de los cálculos teóricos estimados. Por otra parte, al experimentar la intervención de una práctica de laboratorio, para lo cual en este caso se tomó como referencia una práctica de vertederos Fig. 5, se logró como resultado la observación de la funcionalidad que tiene el sistema de recirculación del fluido.



Fig. 4 Gráfico de corte de sección de la velocidad de operación del flujo (agua) en la trayectoria del canal hidráulico abierto.

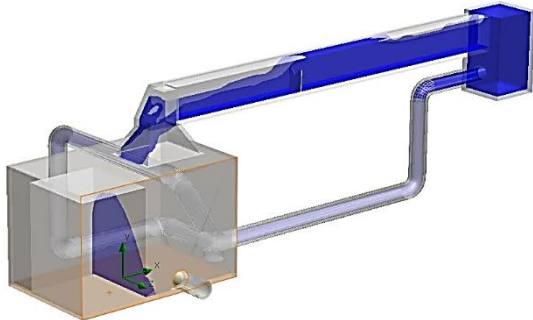


Fig. 5 Gráfico de superficie de la trayectoria que recorre la masa de fracción de agua en operación.

#### IV. CONCLUSIONES

Se elaboró el diseño de detalle de un canal hidráulico abierto didáctico de pruebas con pendiente graduable. Se resalta la importancia de partir del análisis realizado en el estado del arte y la aplicación del método científico de “ensayo y error”, por lo cual, se determinó el establecimiento de los valores de la geometría del canal (variables de diseño hidráulico) presentados en la Tabla 1, de esta forma se logró cumplir con los requerimientos y las restricciones establecidas.

Por medio de la investigación de campo (visita a proveedores, almacenes, distribuidores, contratistas), se logró la elección de los componentes mecánicos y de instrumentación del canal de pruebas, el cual cuenta con una estructura metálica compuesta por perfiles cuadrados y perfiles rectangulares de acero HR, permitiendo de esta

forma el cumplimiento de los requerimientos de seguridad, calidad y costos establecidos, con lo cual se generaron las condiciones para el uso operacional del mismo.

Con los resultados de la simulación del modelo simplificado del canal de pruebas reflejados en las Fig 4-5, se evidencia que efectivamente el dato de la velocidad de flujo operacional de la Tabla 2 y la velocidad del flujo en la tubería de la Tabla 3, son coherentes, por este motivo, se afirma que los datos obtenidos en la simulación son congruentes con los cálculos analíticos realizados. Cabe resaltar que con la inclusión del “Bypass” se logró regular el flujo de caudal para adecuarlo a las necesidades pedagógicas y de investigación que se requieran.

#### REFERENCIAS

- [1] B. A. Baca, “Estudio de la fuerza específica, energía específica y flujo crítico en canales abiertos,” Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019.
- [2] V. Chow, *hidráulica de canales abiertos*. 2004.
- [3] C. S. Naranjo Bustos, “Desarrollo de un software para el cálculo de canales abiertos de flujo uniforme,” Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2016.
- [4] Ó. D. García Castillo, “Diseño de un canal para experimentos hidráulicos de flujo libre,” Universidad de Ibagué, Ibagué, 2019.
- [5] H. E. Castellanos, C. A. Collazos, J. C. Farfan, and F. Meléndez-Pertuz, “Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable,” *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 6, pp. 103–114, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000600012.
- [6] D. D. Gutiérrez Rodríguez and F. J. Alarcón Morales, “Diseño y construcción de un banco de prueba para realización del ensayo de vertederos y de resalto hidráulico, para el laboratorio de hidráulica de la universidad piloto de Colombia-seccional alto magdalena,” Universidad Piloto de Colombia, Girardot, 2018.
- [7] P. Kuna, A. Hašková, M. Palaj, M. Skaan, and J. Záhorec, “How to teach CAD/CAE systems,” *Int. J. Eng. Pedag.*, vol. 8, no. 1, pp. 148–162, 2018, doi: 10.3991/ijep.v8i1.8185.
- [8] J. Bermúdez, “Pasos preliminares para un manual de diseño de moldes de inyección de plásticos con herramientas CAD/CAE/CAM.,” Universidad central “Marte Abreu” de las Villas, 2019.
- [9] A. Jonuskaite, “Flow Simulation with SolidWorks,” Arcada University of Applied Sciences, 2017.
- [10] R. Damián, “Estudio del estado tensional en uniones atornilladas mediante solidworks,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2018.
- [11] E. E. Bardales Gamboa and E. E. Egusquiza Colchado Trixy del Pilar, “Influencia del paso variable de los alabes, en la regulación de potencia de un aerogenerador tripala mediante solidworks flow simulation,” Universidad Nacional del Santa, Chimbote, 2019.
- [12] Scribd, “Pesos de Lámina de Acero Inoxidable | PDF.” <https://es.scribd.com/doc/256696233/Pesos-de-Lamina-de-Acero-Inoxidable> (accessed Jul. 27, 2022).
- [13] Ray Chung, “Lámina acrílica opaca | Ray Chung: un fabricante profesional de láminas acrílicas fundidas con más de 30 años de experiencia, ubicado en Taiwán y Shanghai.” [https://www.raychung-acrylic.com/es/product/opaque\\_acrylic\\_sheet.html](https://www.raychung-acrylic.com/es/product/opaque_acrylic_sheet.html) (accessed Jul. 27, 2022).
- [14] Yumpu, “1 free Magazines from bul.mak.com.ar.” <https://www.yumpu.com/user/bul.mak.com.ar> (accessed Jul. 27, 2022).
- [15] Homecenter, “Tubo Cuadrado 1 x 1pg x 1.2mm C18 x 6m - Homecenter.com.co.” <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/24436/tubo-cuadrado-1-x-1pg-x-12mm-c18-x-6m/24436/> (accessed Jul. 27, 2022).
- [16] Pedrollo, “Catálogo Pedrollo by Edarvico S.A. - Issuu.” [https://issuu.com/edarvico.info/docs/curvas\\_pedrollo\\_general\\_2010](https://issuu.com/edarvico.info/docs/curvas_pedrollo_general_2010) (accessed Jul. 27, 2022).