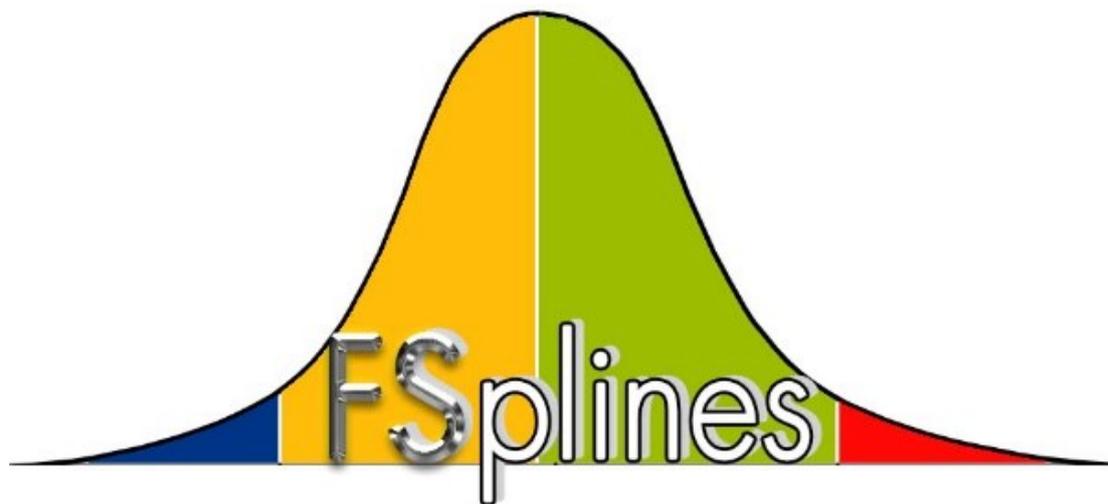


# MANUAL DE USUARIO DE FSplines 2.0



Autor: Ing. Mg. Ángel Chicaiza (Docente de la Universidad Regional Amazónica Ikiam)

Revisado por: PhD. Luis Prola (Docente del Instituto Politécnico de Leiria)

26 Mayo 2020

FSplines 2.0 es un software que realiza análisis (geoméricamente) lineales de estabilidad, permitiendo obtener las tensiones de bifurcación (cargas críticas, momentos críticos) y los correspondientes modos de inestabilidad, mediante el Método de las Fajas Finitas Semi – Analítico (*MFFSA*) y con funciones Splines (*MFFS*) de perfiles con sección abierta de pared fina, basados en las rutinas proporcionadas por Luis Prola (Prola, 2001).

En el presente documento se detalla paso a paso el uso del programa FSplines 2.0 y los aspectos a tener en cuenta antes de ejecutar el programa. La mayor parte de los ejemplos fueron obtenidos del capítulo 3 del proyecto de disertación (tesis) de la maestría en Construcciones Civiles del Ing. Ángel Chicaiza (Chicaiza, 2018) (Máster en ingeniería civil – construcciones civiles del Instituto Politécnico de Leiria).

Al utilizar los resultados de FSplines 2.0, se solicita citar los proyectos de disertación de:

**Prola, L. “Estabilidade Local e Global de Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio”. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2001.**

y

**Chicaiza, A. “FSplines: una aplicación informática para análisis lineal de estabilidad de perfiles abiertos de pared fina”. Tesis de maestría, Escuela de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria, 2018.**

# Índice

<b>1. ASPECTOS A TENER EN CUENTA ANTES DE LA EJECUCIÓN DE FSplines 2.0</b>	<b>1</b>
<b>2. UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE FSplines 2.0</b>	<b>3</b>
<b>3. EJEMPLO DE USO DEL PROGRAMA.</b>	<b>4</b>
3.1. Ejemplo de cálculo con el MFF Semi-Analítico de una columna sometida a compresión axial	4
3.2. Ejemplo con el MFF Semi-Analítico de una viga sometida a flexión pura	13
3.3. Ejemplo MFF con funciones Splines de una columna a compresión axial.	17
3.4. Ejemplo con el MFF Semi-Analítico y con funciones Splines de una columna sometida a compresión variable.	20
3.5. Ejemplo con el MFF Semi-Analítico de una columna sometida a compresión uniforme (con varias semi-longitudes de onda).	23
<b>4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>25</b>

# 1. ASPECTOS A TENER EN CUENTA

## ANTES DE LA EJECUCIÓN DE FSplines

### 2.0

En las pruebas realizadas se han detectados cuatro posibles “inconvenientes” que se pueden presentar al momento de ejecutar el software FSplines 2.0; a continuación, se detalla el proceso para solucionarlos:

#### (a) Consideración 1

La resolución recomendada de la pantalla es de 1366 x 768; para otros valores de resolución de pantalla pueden generarse problemas de visualización de la información.

#### (b) Consideración 2

En primer lugar, antes de ejecutar el programa es necesario verificar en el computador, que el símbolo decimal debe ser el punto (.); para verificar o cambiar la configuración del símbolo decimal en el computador (con un sistema operativo Windows 10) es necesario realizar el siguiente procedimiento (Ver Fig. 1):

1. Ingresar al “Panel de Control”.
2. Ingresar en el ícono de “Región”.
3. Accionar el botón “Configuración Adicional”
4. En la parte de “Símbolo decimal” si se tiene coma (,) se lo cambia por punto (.) como se muestra en la Fig. 1.
5. Finalmente se debe accionar el botón “Aceptar” las dos ventanas abiertas anteriormente.

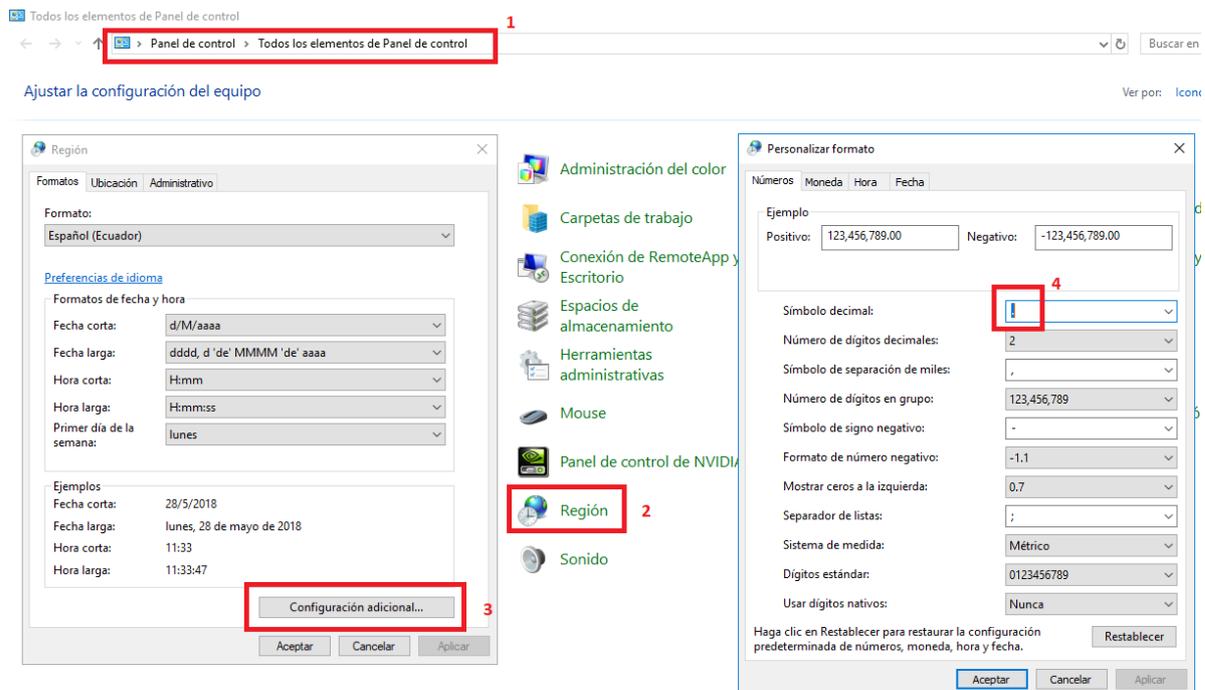


Figura 1. Procedimiento a seguir, para la configuración del Símbolo decimal (Windows 10).

**(c) Consideración 3**

Una vez configurado el símbolo decimal se procede a “Ejecutar como administrador” la aplicación informática “FSplines 2.0.exe”; en algunos computadores el Antivirus puede emitir un mensaje de alerta, en este caso se hace caso omiso y se le otorga los permisos necesarios para que la aplicación pueda ejecutarse.

**(d) Consideración 4**

Al momento de terminar de realizar un análisis lineal de estabilidad y en caso de requerir un nuevo análisis se recomienda cerrar y volver abrir nuevamente el programa (en todas las validaciones realizadas y presentadas en los diferentes trabajos no se presentó ningún problema, solamente es una recomendación preventiva). Con la finalidad de facilitar esta acción la versión 2.0 cuenta con la opción de “Guardar” (se almacenan los últimos datos) y “Abrir” (permite cargar los últimos datos almacenados).

## 2. UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE

### FSplines 2.0

---

A continuación, se explica la forma correcta de introducir los datos en la aplicación informática FSplines 2.0, procesarlos y visualizar los resultados.

El esquema de uso del programa inicia con la introducción de los siguientes datos:

- (i) En primer lugar, se selecciona el elemento que se desea analizar (carga crítica o momento crítico, en todos los escenarios se calculan las tensiones críticas);
- (ii) Se ingresa los datos relacionados a las propiedades del material y las dimensiones de la geometría del perfil;
- (iii) Se ingresa el valor inicial y final de carga linealmente distribuida en cada una de las placas (cada una de las láminas o paredes que conforman el perfil);
- (iv) Se selecciona el tipo de método de cálculo (Análisis Lineal de Estabilidad por el Método de las Fajas Finitas Semi-Analítica o con Funciones Splines);
- (v) Se ingresan los parámetros de cálculo y discretización del perfil estructural; adicionalmente si se ha seleccionado el MFFS se debe elegir el tipo de apoyo al inicio y al final de la estructura (puede ser: empotrado, simplemente apoyado, borde libre); por otro lado, es necesario aclarar que en el *MFFSA* el programa solamente permite modelar condiciones simples.

Luego de enviarle al programa a calcular los resultados obtenidos son:

- (i) La curva de carga crítica o momento crítico VS  $a/b_1$
- (ii) La estructura deformada en 2D y 3D dimensiones (modos de inestabilidad);
- (iii) Adicional a ello, se muestran las tablas con los valores de  $a/b_1$ , los correspondientes valores de tensión de bifurcación y carga (para columnas) o momento crítico (para vigas), permitiendo al usuario exportar estos resultados a Excel. Y tensiones críticas para vigas – columnas (flexión compuesta)

En el apartado 3 se presentan una serie de ejemplos de cálculo, para esquematizar paso a paso la forma correcta de utilizar el programa.

### 3. EJEMPLO DE USO DEL PROGRAMA.

---

#### 3.1. Ejemplo de cálculo con el MFF Semi-Analítico de una columna sometida a compresión axial

---

Se presenta en este primer ejemplo el procedimiento a seguir para el cálculo de cargas críticas y los correspondientes modos de inestabilidad de una columna tipo G (Conocidas internacionalmente como C) de dimensiones 101 x 51 x 5.5 x 1 mm (distancias medidas a la pared externa de las placas, ver Fig. 2), simplemente apoyada en los dos extremos, sometida a compresión axial y analizada mediante el MFFSA.

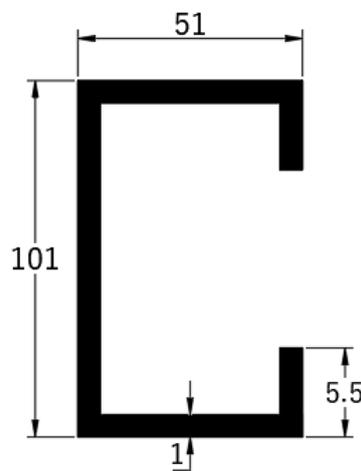


Figura 2. Sección transversal con medidas exteriores

Procedimiento a seguir:

##### (i) Ingreso de datos

1. Selección del elemento a analizar (Fig. 3 a). Se puede escoger entre las opciones: (i) Perfiles a compresión ( $P_{cr}$ ) donde todas las paredes del perfil están sometidas a esfuerzos de compresión uniforme, (ii) Perfiles a compresión variable ( $\sigma_{cr}$ ), (iii) Perfiles a compresión y tracción ( $\sigma_{cr}$ ), donde la sección transversal del perfil puede estar sometida a esfuerzos de compresión y tracción de forma simultánea (iii) viga que representa un elemento sometido a flexión pura ( $M_{cr}$ ). En el caso de este primer ejemplo se selecciona el elemento “Perfil a compresión uniforme o variable ( $P_{cr}$ )”.

2. Ingreso de propiedades del material (Fig. 3 b). Pueden ser escogidos los casos de materiales ortotrópicos con dos módulos de elasticidad, un ( $E_1$ ) en la dirección longitudinal del eje del perfil y otro ( $E_2$ ) en la dirección transversal al eje del perfil y sus respectivos coeficientes de Poisson ( $\nu_1$  e  $\nu_2$ ). Para el material isotrópico (caso de acero):  $E_1=E_2$  e  $\nu_1=\nu_2$ .

En este ejemplo, un perfil de acero conformado a frío, se ingresa con “ $E_1=210000$ ;  $E_2=210000$ ” (módulo de elasticidad en MPa); “ $\nu_1=0.3$ ;  $\nu_2=0.3$ ” (coeficiente de Poisson) y se acciona el botón “Añadir”. En la Fig. 3 b se indica cuando un material fue ingresado correctamente. En lo

relacionado al módulo de cizalladura el programa lo calcula automáticamente en base al módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson ingresados.

**1. Elemento a Analizar**

Perfil a compresión uniforme (Pcr)  
 Perfil a compresión variable ( $\sigma$  cr)  
 Perfil a compresión y tracción ( $\sigma$  cr)  
 Viga (Mcr)

(a)

**2. Propiedades del Material**

Nombre E1 [MPa] E2 [MPa] v1 v2

2 210000 210000 0.3 0.3

Nombre	E1	E2	v1	v2
1	210000	210000	0.3	0.3
*				

Añadir + Remove -

(b)

Figura 3. (a) Selección del elemento a analizar e (b) Ingreso de las propiedades del material.

### 3. Definición de la geometría del perfil estructural (Fig. 4).

En primer lugar, se explica cada uno de los elementos que contiene el programa FSplines 2.0:

En la Fig. 4, se cuenta con las siguientes opciones: (i) “Perfil” permite seleccionar la geometría de la sección transversal (FSplines cuenta con un menú desplegable que contiene geometrías tipo U, G (C), Ángulo (Angle), Z sin refuerzo (sin labio), Z, Rack y Arbitrario (sección definida mediante coordenadas del punto medio), (ii) “A”, “B” y “C” son las dimensiones del perfil (acorde a lo mostrado en la Fig. 4 a), frente a cada una de estas dimensiones se debe ingresar los correspondientes valores del número de fajas finitas en los cuales se va a discretizar cada una de estas placas, “e” representa el espesor del perfil, (iii) la tabla con las columnas “#Nodo”, “X” y “Y” representa el número de nodo, la correspondiente coordenada en X y la correspondiente coordenada en Y que se ingresan de forma automática al accionar el botón “Aceptar” y definen por coordenadas la geometría de la sección abierta, y (iv) la tabla con las columnas “#Placa”, “Mat” y “e” representan el número identificar de placa, el número identificador del material, y el espesor respectivamente de cada una de las láminas que conforman el perfil (al ser secciones abiertas, el número de placas es igual número de puntos menos uno).

Del menú desplegable se elige el perfil tipo G, se ingresa las dimensiones (en milímetros [mm]) de las placas (distancia medida entre las caras exteriores) 101 x 51 x 5.5 x 1 mm, se define el número de fajas finitas en cada una de las placas (3, 6, 8, 6, 3) y se acciona el botón “Añadir”. En la Fig. 4 b, se muestra cuando un material fue ingresado correctamente.

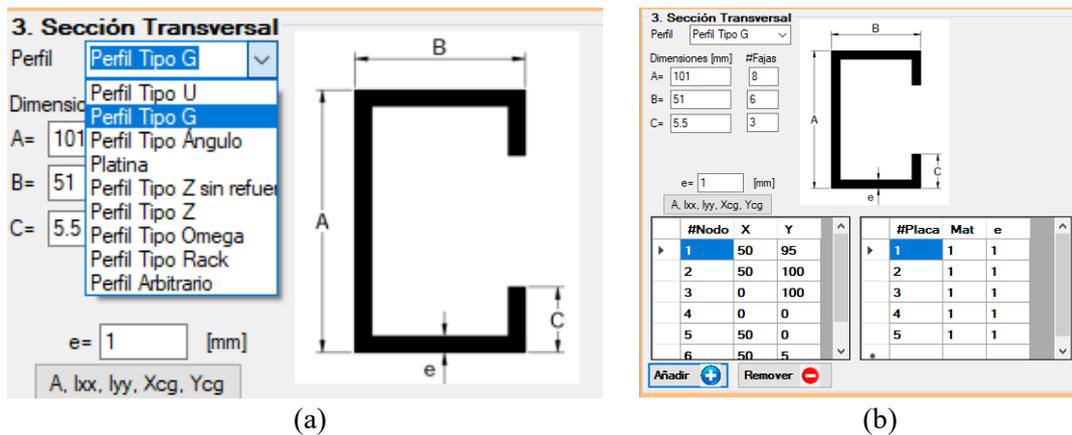


Figura 4. Espacio destinado a la selección del tipo de perfil e ingreso de las dimensiones.

Nota: Se puede apreciar que, al accionar el botón “Añadir”, automáticamente se ingresan las coordenadas (con respecto punto medio donde se intersectan las paredes que conforman el perfil) que dan la forma al perfil, el cual se dibujará de forma proporcional en base a las dimensiones ingresadas en el bloque 3 correspondiente a la sección transversal (Ver Fig. 8).

#### 4. Asignación de cargas (compresión axial) (Ver Fig. 5).

En el presente caso se tiene una columna sometida a compresión axial que el programa FSplines 2.0 asigna automáticamente (para todos los casos de compresión axial, el programa asigna de forma automática una carga unitaria de compresión, por unidad de ancho de las placas que constituyen la sección). Adicional a las cargas de compresión uniforme FSplines permite ingresar cargas de compresión y tracción que varían a lo largo de la sección transversal (este ejemplo se lo ilustra en el apartado 3.2 de presente manual).

**4. Cargas**

#Placa	Sigma1	Sigma2	Sigmay	Sigmaxy
1	1	1	0	0
2	1	1	0	0
3	1	1	0	0
4	1	1	0	0
5	1	1	0	0

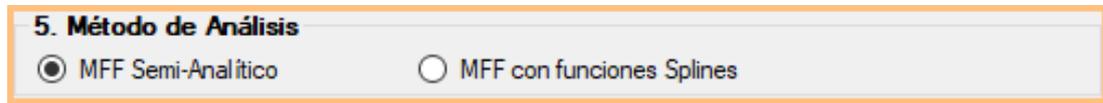
**Dibujar Cargas Aplicadas**

Figura 5. Espacio destinado al ingreso de cargas

Es importante mencionar que FSplines permite el ingreso de las cargas al inicio y final de cada una de las láminas. Los elementos de la tabla mostrados en la Fig. 5, se detallan a continuación “#Placa” representa el número identificador de la placa, “Sigma1” y “Sigma2” representa los valores de tensiones normales multiplicadas por el espesor, que resultan en cargas distribuidas a lo largo de la línea media de las paredes de la sección, al inicio y final de cada una de las placas (aplicadas a lo largo del eje X), “Sigmay” representa la tensión normal aplicada a lo largo del eje Y y “Sigmaxy” representa las tensiones tangenciales.

5. Selección del método de análisis (Fig. 6).

FSplines cuenta con dos métodos de análisis el MFFSA (este método únicamente analiza estructuras con apoyos simples) y el MFFS (modela estructuras con diferentes condiciones de contorno). En este ejercicio se selecciona el MFFSA.



5. Método de Análisis

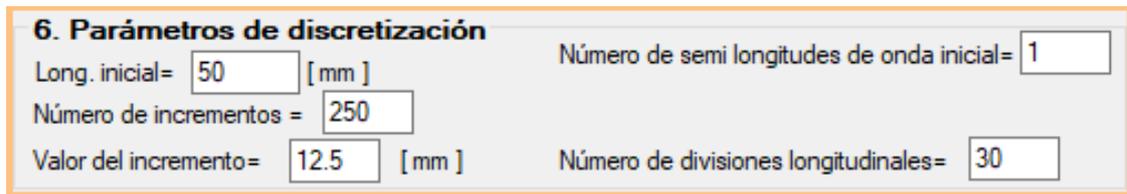
MFF Semi-Analítico       MFF con funciones Splines

Figura 6. Espacio destinado a la selección del método de análisis.

6. Definición de los parámetros de cálculo y discretización.

Se ingresan los parámetros de cálculo y de discretización longitudinal de acuerdo a lo indicado en la Fig. 7.

Dónde: (i) “Longitud inicial” representa la longitud (en mm) de la estructura con la cual el programa empieza a realizar los cálculos, (ii) “Número de incrementos” representa el número de veces que el programa va a realizar los cálculos, (iii) “Valor del incremento” representa el valor de longitud (en mm) que el programa va a ir sumando en cada uno de los cálculos, (iv) “Número de semi longitudes de onda inicial” representa el número de semi longitudes que el usuario desea considerar, y (v) “Número de divisiones longitudinales” es el parámetro de discretizaciones en el eje longitudinal de la estructura para el cálculo de los desplazamientos a partir de los desplazamientos generalizados del método de las fajas finitas.



6. Parámetros de discretización

Long. inicial= 50 [mm]      Número de semi longitudes de onda inicial= 1

Número de incrementos = 250

Valor del incremento= 12.5 [mm]      Número de divisiones longitudinales= 30

Figura 7. Espacio destinado al ingreso de parámetros de cálculo y discretización de la estructura.

Nota: En este caso no es necesario seleccionar el tipo de apoyo, debido a que el *MFFSA* solo puede modelar estructuras con apoyos simples. Por otro lado, el programa *FSplines 2.0* también admite realizar análisis con el *MFFS*, el cual permite modelar estructuras con los siguientes tipos de apoyos: (i) simplemente apoyado – simplemente apoyado, (ii) empotrado - simplemente apoyado, (iii) empotrado – empotrado y (iv) empotrado – libre.

En la Fig. 8, se muestra una visión general de la interfaz gráfica con los datos ingresados.

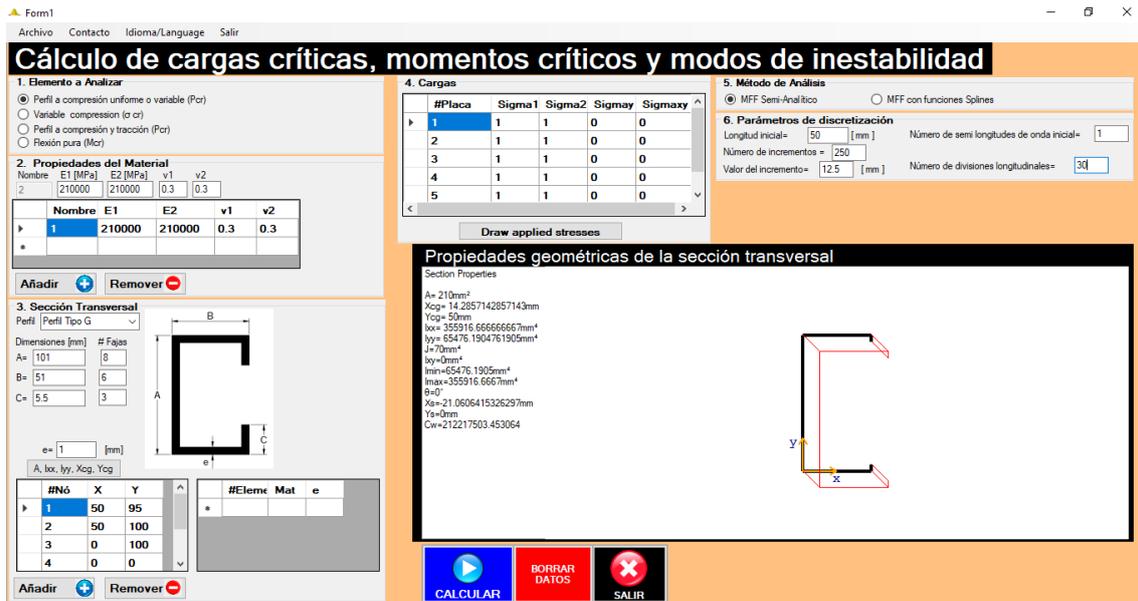


Figura 8. Interfaz gráfica inicial e ingreso de datos completo.

Una vez ingresados los datos (como se muestra en la Fig. 8), se procede a accionar el botón “Calcular” (Ver Fig. 9) y la aplicación informática empieza a procesar los datos.



Figura 9. Botón calcular.

Al finalizar de realizar los cálculos el programa presenta la ventana de resultados, cuya lectura y utilización se explica a continuación.

## (ii) Visualización de resultados.

La aplicación informática cuenta con las siguientes botones (Ver Fig. 10) para la visualización de resultados:

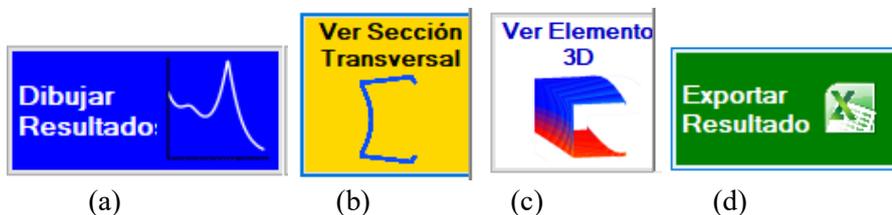


Figura 10. Botones para la visualización de resultados.

“Dibujar resultado” (Fig. 10 a): Permite dibujar la curva de pandeo crítico ( $P. \text{crit. } VS a/b1$ ), donde  $a$  representa la longitud de la faja finita, en escala logarítmica, y  $b1$  representa la altura del alma, mostrada en la Fig. 11. Los casilleros de opciones de visualización permiten modificar la escala de curva antes mencionada tanto en la dirección X como en Y, para ello se debe variar el factor

de escala y accionar el botón “Dibujar resultados”. En este caso no ponto em que  $a/b1=2.0$  a carga crítica é 21.17 kN

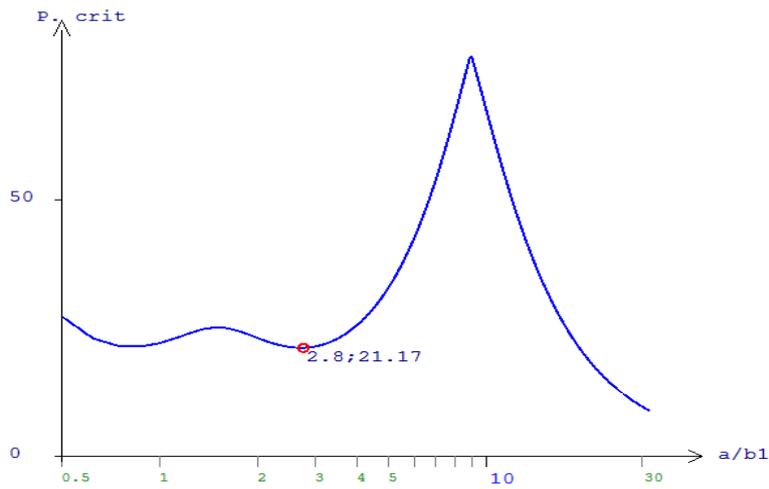


Figura 11. Curva de pandeio crítica obtida com a aplicação informática.

“Ver Sección Transversal” (Ver Fig. 10 b): Al accionar este botón, FSplines 2.0 permite dibujar la deformada de la sección transversal del punto ingresado en el recuadro “Punto de análisis” (en este caso el punto 19) de acuerdo a lo mostrado en Fig. 12, adicional a ello se obtiene en la curva de pandeio crítica el valor correspondiente de P. crít. (en este caso del punto 19 – Ver Fig. 11).

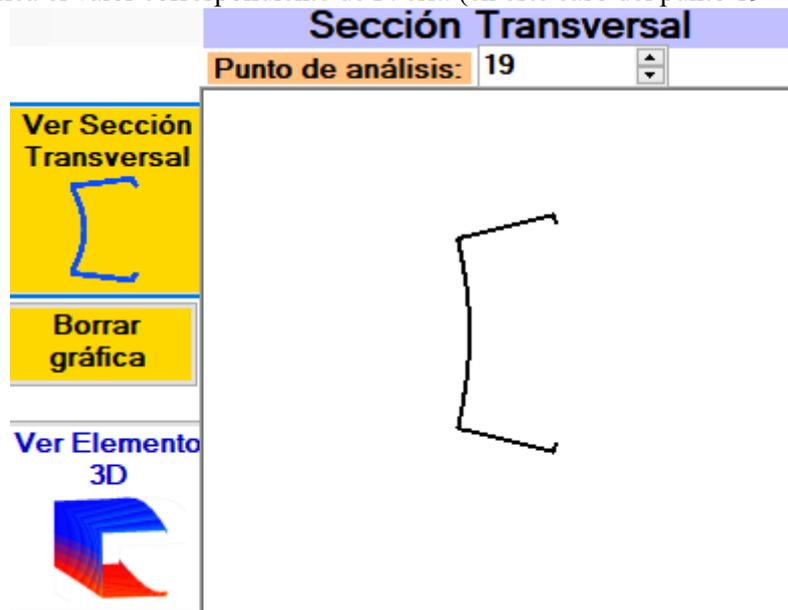


Figura 12. Deformada en 2D obtenida con la aplicación informática.

“Ver Elemento 3D” (Ver Fig. 10 c): Este botón permite dibujar la deformada del mismo ponto seleccionado en la curva del perfil (se abre una nueva ventana con elemento en 3D, de acuerdo a lo mostrado en la Fig. 13).

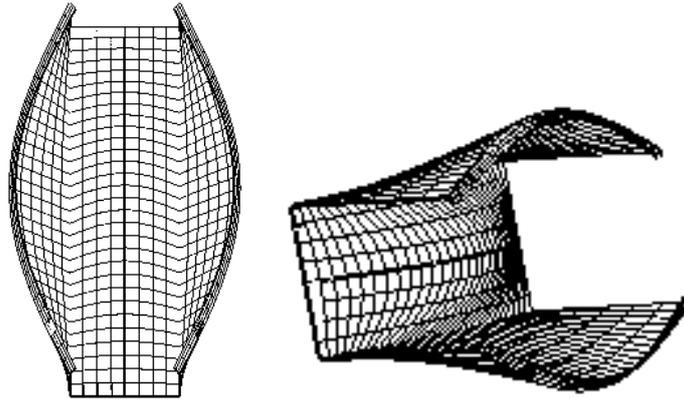


Figura 13. Deformada en 3D obtenida con la aplicación informática

La deformada de la Fig. 13, puede ser rotada, o afectada por factores de longitudinales y transversales, de acuerdo a las necesidades del usuario. Este proceso se detalla a continuación.

En la parte inferior izquierda la aplicación informática FSplines 2.0 tiene una sección (Ver Fig. 14) con 3 pulsadores, que permiten rotar la estructura (con respecto al eje X, Y y Z), para ello se debe accionar los pulsadores (flechas).

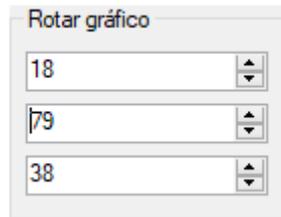


Figura 14. Pulsadores para rotar al elemento 3D deformado.

En la parte superior izquierda la aplicación informática cuenta con un espacio (Ver Fig. 15) para ingresar los factores de escala de la estructura sin deformar. Para modificar la estructura con los factores de escala es necesario accionar los pulsadores (flechas) de la Fig. 14.

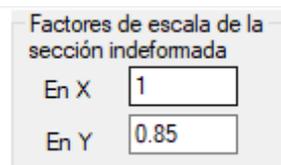


Figura 15. Espacio destinado a los factores de escala (de visualización) del elemento estructural sin deformar.

Adicionalmente la parte superior izquierda de la ventana de resultado también cuenta con un espacio (Ver Fig. 16) para ingresar los factores de escala para amplificar o reducir las deformaciones de acuerdo con los requerimientos del utilizador. Para amplificar o reducir gráficamente las deformaciones en X y Y, se necesita ingresar los factores de escala y accionar los pulsadores (flechas) de la Fig. 14.

Factores de escala de las deformaciones

En X	<input type="text" value="40"/>
En Y	<input type="text" value="40"/>

Figura 16. Espacio destinado a los factores de escala (de visualización) de las deformaciones

“Exportar Resultado” (Ver Fig. 10 d): Permite exportar a Excel los resultados de Longitud crítica/Longitud del alma; carga crítica, para perfiles sometidos a compresión uniforme o variable; y también para perfiles sometidos a compresión y tracción (para perfiles sometidos a flexión pura permite exportar los valores de momentos críticos) y adicionalmente los correspondientes valores de tensiones de bifurcación (Fig. 17).

Los valores de la primera columna de la tabla (contenida en la Fig. 17) representan las relaciones longitud de la estructura con respecto a la longitud del alma ( $a/b_l$ ), en este caso son valores adimensionales, para obtener los valores en función de la longitud de la estructura, únicamente se adicionar una columna en Excel y multiplicarlos por la altura del alma del perfil ( $b_l$ ); en la segunda columna (de la Fig. 17) se encuentran los valores de carga crítica (en KN) y en la tercera columna los valores de tensiones de críticas en MPa.

	A	B	C	D	E
1	0.5	27.3059452	130.02831		
2	0.625	22.9829648	109.44269		
3	0.75	21.4956711	102.360339		
4	0.875	21.4165016	101.983341		
5	1	22.0877479	105.179752		
6	1.125	23.1036746	110.017498		
7	1.25	24.1326535	114.917397		
8	1.375	24.8793082	118.472896		
9	1.5	25.1498457	119.76117		
10	1.625	24.9388261	118.756315		
11	1.75	24.3993337	116.187303		
12	1.875	23.7184803	112.945144		
13	2	23.0346896	109.688998		
14	2.125	22.4267158	106.793885		
15	2.25	21.9311888	104.434233		
16	2.375	21.5605005	102.66905		
17	2.5	21.3145552	101.497882		

Figura 17. Resultados obtenidos con la aplicación informática exportados a Excel.

“Salir” (Ver Fig. 18): Permite cerrar totalmente el programa (sin guardar la información).



Figura 18. Botón Salir.

### (iii) Consideraciones adicionales al uso de la aplicación informática

Para poder visualizar las propiedades geométricas de la sección transversal, se debe presionar el botón (A, Xcg, Ycg, Ixx, Iyy, J, Imin, Imax,  $\theta$ , Xs, Ys y Cw) mostrado en la Fig. 19, los resultados se muestran en la ventana de “Propiedades geométricas de la sección transversal” (Ver Fig. 20), básicamente FSplines permite calcular y mostrar el área de la sección “A”, la inercia con respecto al eje vertical y horizontal respetivamente “Ixx” y “Iyy” y las distancias donde se encuentra

ubicado el centro de gravedad (con respecto al punto inferior izquierdo más alejado de la sección transversal, en este caso sería la esquina inferior izquierda del perfil mostrado en la Fig. 20)

A, Ixx, Iyy, Xcg, Ycg

Figura 19. Botón para visualizar las Propiedades de la sección transversal (seleccionada y añadida).

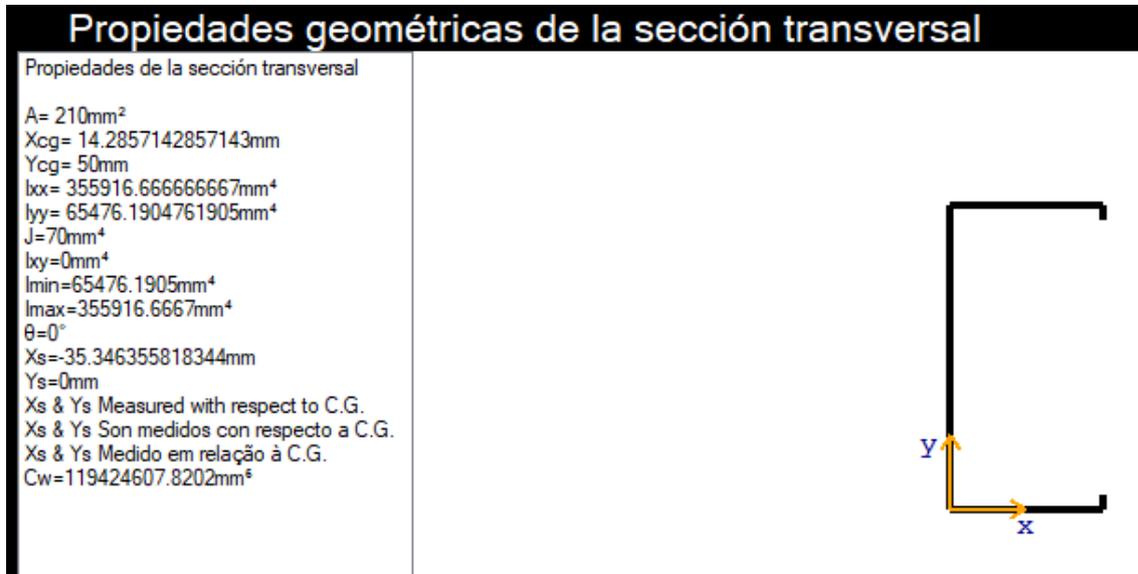


Figura 20. Geometría y Propiedades de la sección transversal analizada.

### 3.2. Ejemplo con el *MFF* Semi-Analítico de una viga sometida a flexión pura

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para el cálculo de momentos críticos y los correspondientes modos de inestabilidad de una viga tipo G de dimensiones 120 x 75 x 10.2 x 0.85 mm (dimensiones medidas con respecto a las caras externas) sometida a flexión pura analizada por el *MFFSA*.

#### (i) Ingreso de datos

1. Selección del elemento a analizar

Se elige el elemento “Flexión pura (Mcr)”, de acuerdo con lo indicado en la Fig. 21.

**1. Elemento a Analizar**

Perfil a compresión uniforme (Pcr)

Perfil a compresión variable ( $\sigma_{cr}$ )

Perfil a compresión y tracción ( $\sigma_{cr}$ )

Viga (Mcr)

Figura 21. Selección del elemento Viga.

## 2. Ingreso de propiedades del material

En este ejemplo se ingresa las siguientes propiedades de material “ $E1=210000$ ;  $E2=210000$ ;  $\nu1=0.3$ ;  $\nu2=0.3$ ” y se acciona el botón “Añadir”. En la Fig. 22, se muestra la forma cuando un material se ingresó correctamente.

Nombre	E1 [MPa]	E2 [MPa]	v1	v2
2	210000	210000	0.3	0.3

Nombre	E1	E2	v1	v2
1	210000	210000	0.3	0.3

Figura 22. Ingreso de las propiedades del material.

## 3. Selección del tipo de perfil (forma de la sección transversal) e ingreso de dimensiones en milímetros [mm].

Se elige el “Perfil Tipo G” (Ver Fig.23 a), se ingresa las dimensiones de las placas (distancia medida entre las paredes exteriores), se define el número de fajas finitas en cada una de las placas y acciona el botón “Añadir”. En la Fig. 23 b se muestra la forma, cuando un perfil ingresado correctamente.

(a)

(b)

Figura 23. Espacio destinado a la selección del tipo de perfil e ingreso de las dimensiones.

Nota: Se puede apreciar que, al accionar el botón “Añadir”, automáticamente se ingresan las coordenadas (con respecto al punto medio de la lámina) que dan la forma al perfil. Dichas coordenadas se muestran en la Fig. 23 b.

## 4. Asignación de cargas (Flexión pura).

Este el presente caso donde se desea analizar una viga sometida a flexión pura, se ingresa una carga que varía proporcionalmente desde 1 (en la parte superior de la sección transversal) a -1 (en la parte inferior de la sección transversal). Donde el signo negativo representa un esfuerzo de tracción.

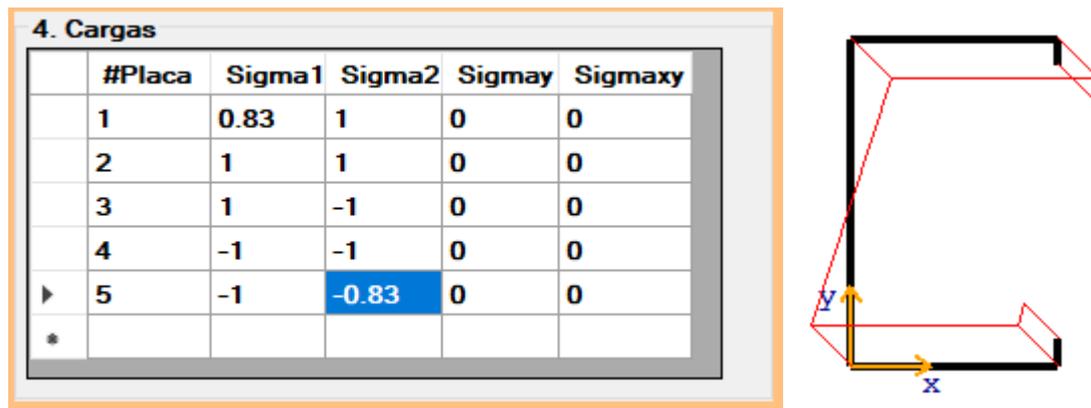


Figura 24. Ingreso de esfuerzos de flexión pura y distribución de esfuerzos.

Para este ejemplo, la forma correcta de para ingresar un esfuerzo de flexión pura a un elemento estructural se muestra en la Fig. 24.

Nota: para obtener el valor inicial de carga (Sigma1) de la placa 1, se realiza una regla de tres simples donde 120/2 es a 1 como 49.8 (120/2-10.2) es a X, en este caso el valor de X es igual a 0.83.

#### 5. Selección del método de análisis

En este ejercicio se selecciona el *MFF* Semi-Analítico, de acuerdo con lo indicado en la Fig. 25.

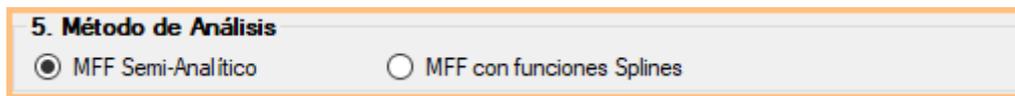


Figura 25. Selección del método de análisis *MFF* Semi-analítico.

#### 6. Definición de los parámetros de carga y discretización.

Se ingresan los parámetros de cálculo y de discretización longitudinal de acuerdo con lo mostrado en la Fig. 26.

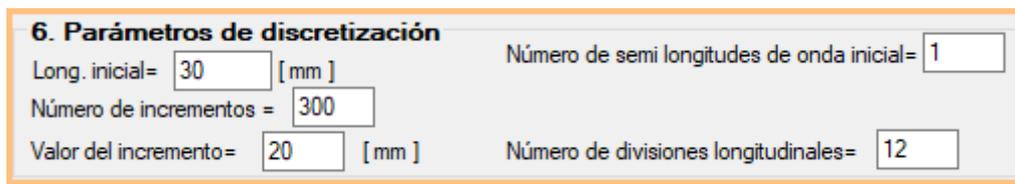


Figura 26. Ingreso de parámetros de cálculo y discretización de la estructura.

Nota: En este caso no es necesario seleccionar el tipo de apoyo, debido a que el Método de Fajas Finitas Semi-Analítico solo puede modelar estructuras con apoyos móviles y fijadas en un punto medio.

Finalmente se acciona el botón “Calcular”; con lo cual se despliega la ventana de resultados.

#### (iii) Visualización de resultados.

“Dibujar resultados” (Ver Fig. 27), donde para un valor de  $a/b_1=4.9$ , se tiene un  $M_{crit}=115.11$  kN\*cm (Unidades de medida utilizadas por FSplines para los valores de  $M_{cr}$ ):

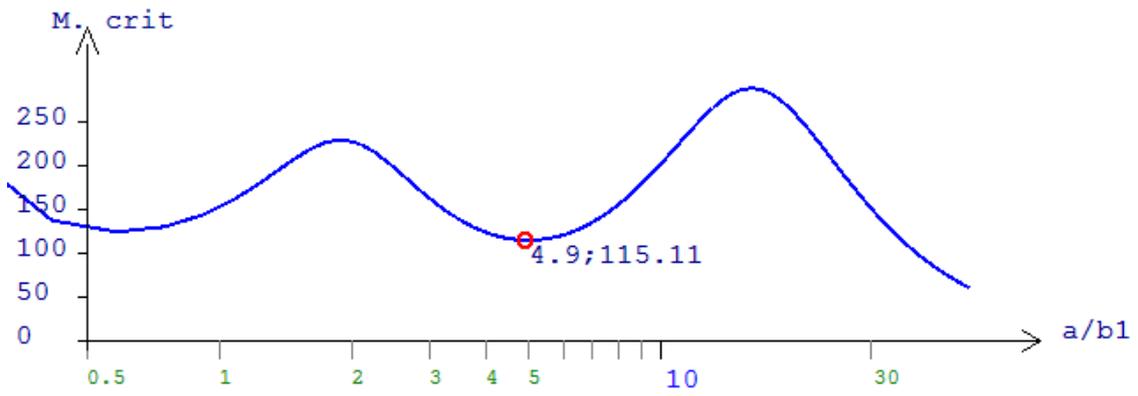


Figura 27. Curva de Mcrit. VS L.

“Ver Sección Transversal” (Ver Fig. 28):



Figura 28. Sección transversal deformada.

“Ver Elemento 3D” (Ver Fig. 29):

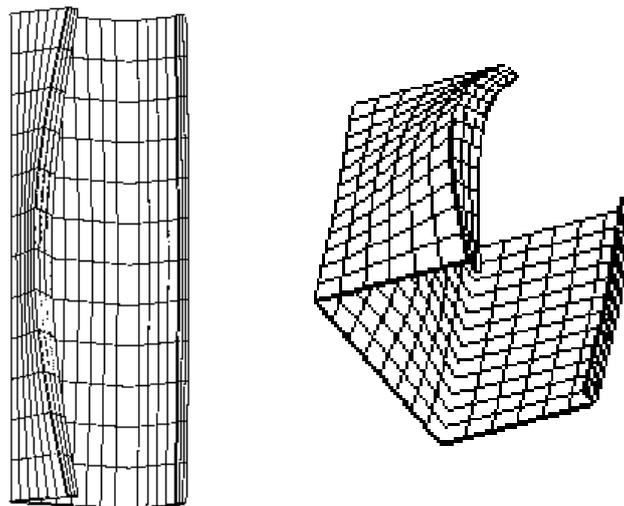


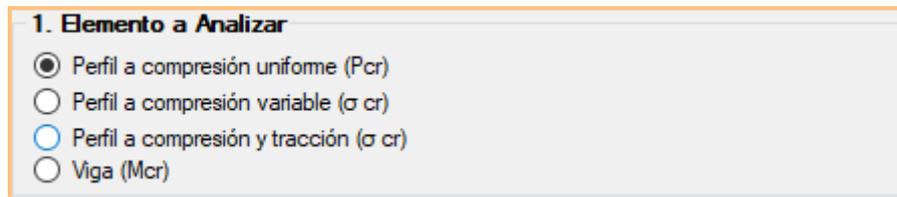
Figura 29. Elemento estructural deformado 3D (modos de inestabilidad).

### 3.3. Ejemplo *MFF* con funciones Splines de una columna a compresión axial.

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para el cálculo de cargas críticas y los correspondientes modos de inestabilidad de una columna tipo G de dimensiones 100 x 50 x 5 x 1 mm (dimensiones medidas a la cara media de la lámina que conforma el perfil) sometida a compresión axial mediante el *MFFSA*, con condiciones de apoyo simple.

#### 1. Selección del elemento a analizar

Se selecciona el elemento “Perfil a compresión uniforme o variable (Pcr)”, de acuerdo con lo indicado en la Fig. 30.



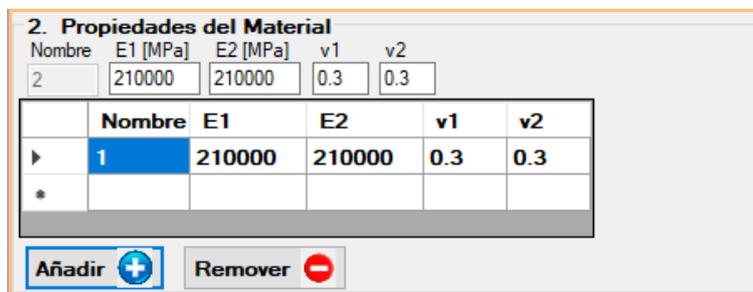
1. Elemento a Analizar

- Perfil a compresión uniforme (Pcr)
- Perfil a compresión variable ( $\sigma$  cr)
- Perfil a compresión y tracción ( $\sigma$  cr)
- Viga (Mcr)

Figura 30. Selección de un perfil sometido a compresión uniforme (Pcr).

#### 2. Ingreso de propiedades del material

En este ejemplo se ingresa las siguientes propiedades del material “ $E_1=210000$ ;  $E_2=210000$ ;  $\nu_1=0.3$ ;  $\nu_2=0.3$ ” y se acciona el botón “Añadir”. En la Fig. 31, se muestra la forma cuando un material se ingresó correctamente.



2. Propiedades del Material

Nombre	E1 [MPa]	E2 [MPa]	v1	v2
2	210000	210000	0.3	0.3

Nombre	E1	E2	v1	v2
▶ 1	210000	210000	0.3	0.3
*				

Añadir  Remove 

Figura 31. Ingreso de propiedades del material.

#### 3. Selección del tipo de perfil e ingreso de geometría.

En este ejemplo se elige un “Perfil Tipo G”, se ingresa las dimensiones 101 x 51 x 5.5 x 1 mm, que representan las dimensiones medidas a las caras externas del perfil y se acciona el botón “Añadir”, automáticamente se ingresan las coordenadas al punto medio de la lámina que forman el perfil como se puede ver en la Fig. 33.

#### 4. Asignación de cargas.

Cuando se tiene cargas axiales de compresión el programa realiza el ingreso automático de una carga axial unitaria (Ver Fig. 33).

5. Seleccionar el método de análisis.

Se selecciona el *MFF* con funciones Splines, de acuerdo con lo indicado en la Fig. 32.

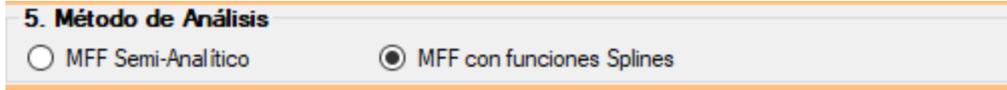


Figura 32. Selección del *MFF* con funciones Splines.

6. Ingresar los parámetros de cálculo y discretización longitudinal

En este caso se ingresan los valores que se tienen en la Fig. 33. En este ejemplo fueron seleccionados 24 puntos longitudinales que definen el número de funciones splines a usar.

7. Selección del tipo de apoyos inicial y final

Para este ejemplo se selecciona un apoyo simple al inicio y fin de la estructura (ver Fig. 33).

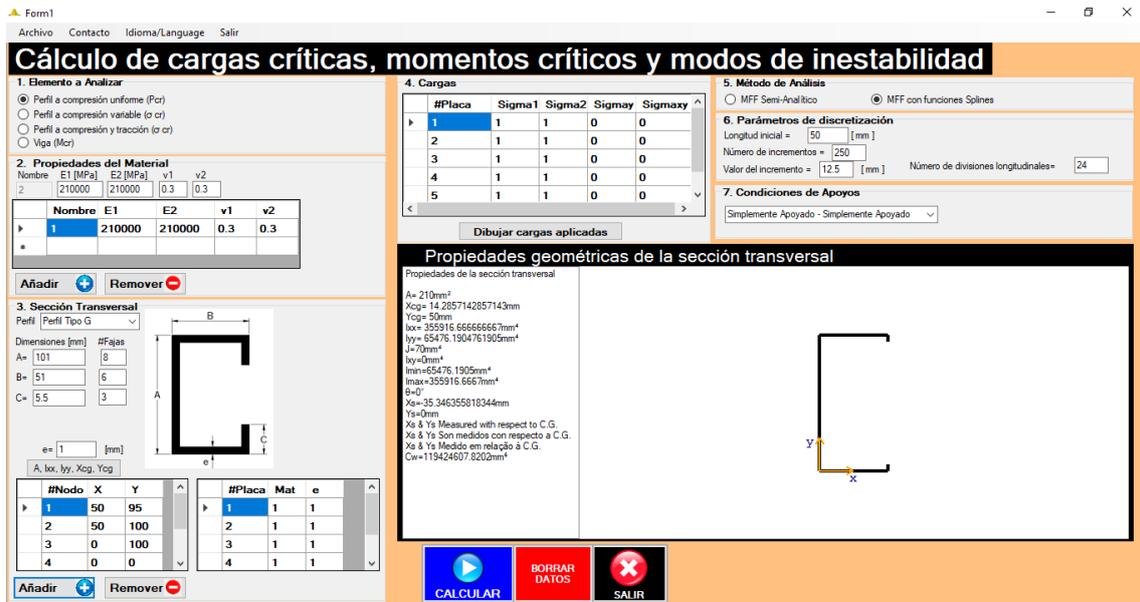


Figura 33. Interfaz gráfica con todos los datos listos para ejecutar la aplicación informática.

Finalmente se acciona el botón “Calcular” y el programa procede a ejecutar todas las operaciones. Aparecerán dos ventanas con una interfaz de fondo negro (ver Fig. 34) y una ventana en color gris (con una barra de progreso) que indican que se debe esperar mientras se procesan los datos, luego de que se ha terminado el proceso de cálculo estas tres ventanas se cerraran automáticamente, y se procede a accionar el botón “Aceptar” en la ventana de diálogo mostrada en la Fig. 35.

Por favor espere mientras se procesan los datos, esta ventana se cerrará automáticamente.

Please wait while the data is processed, this window will close automatically.

Faz favor aguarde enquanto processam-se os dados, esta janela será fechada automaticamente.

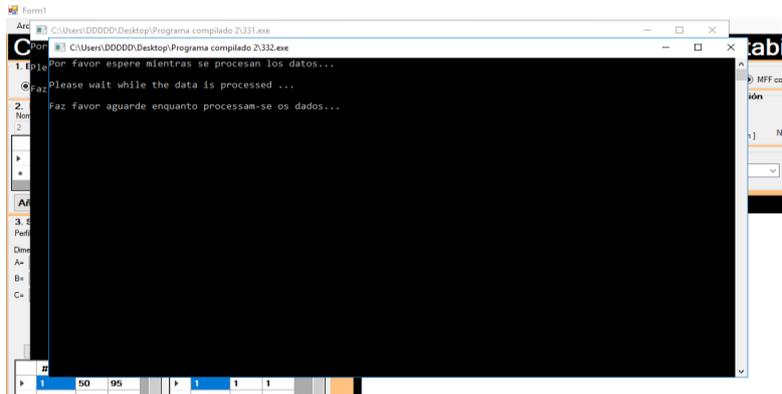


Figura 34. Interfaz gráfica mientras se ejecutan los cálculos con funciones Splines.

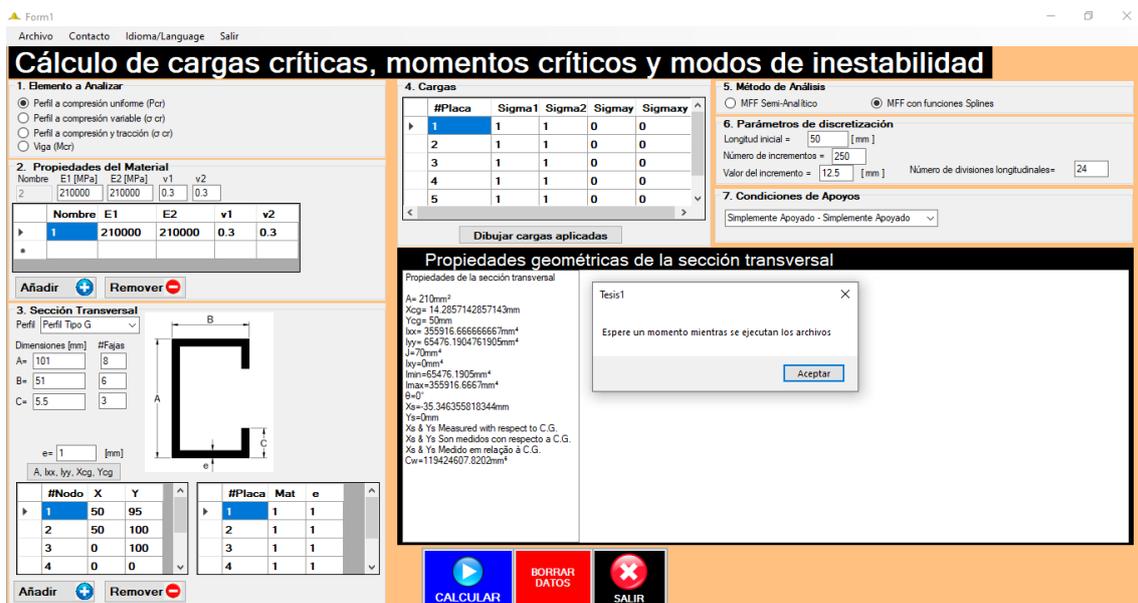


Figura 35. Boton aceptar, que permite visualizar la ventana de resultados.

Luego de accionar el botón “Aceptar” aparecerá la ventana de resultados (Ver Fig. 36), mediante los botones: “Ver Sección transversal”, “Ver Elemento 3D” y “Dibujar Resultados”.

En la Fig. 36, se muestra la Interfaz gráfica de los siguientes resultados: la Curva de carga crítica VS a/b1 (relación longitud del elemento con respecto a la longitud del alma), la deformada en 2D y tabla de resultados; además aparece el botón “Ver elemento 3D” el cual permite visualizar la deformada en 3D.

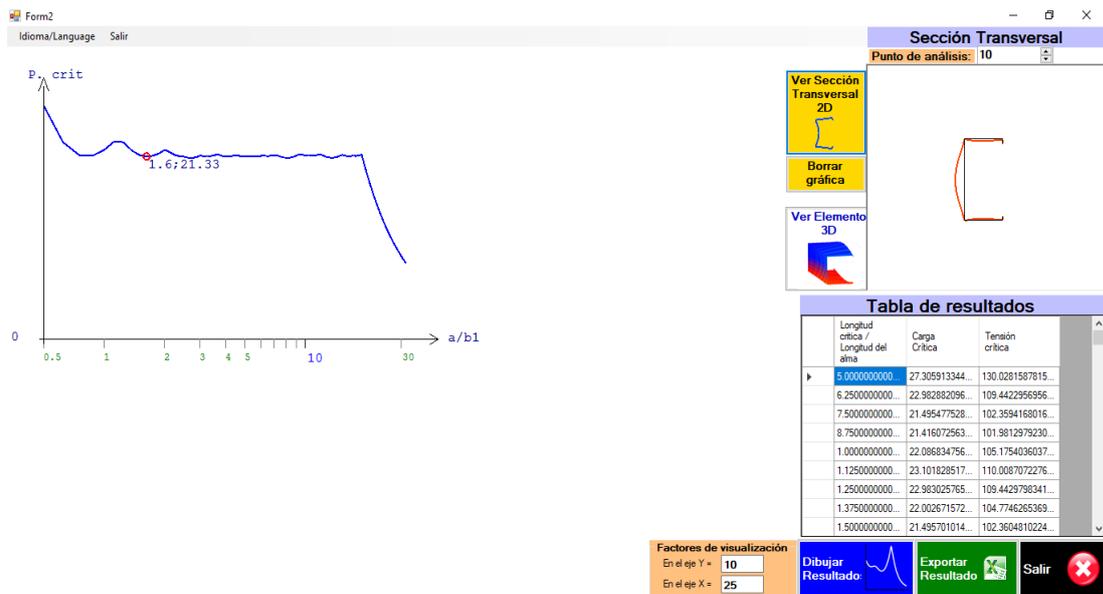


Figura 36. Resultados obtenidos con la aplicación informática FSplines 2.0.

En la Fig. 37, se muestra la deformada en 3D, luego de haber accionado el botón “Ver Elemento 3D”.

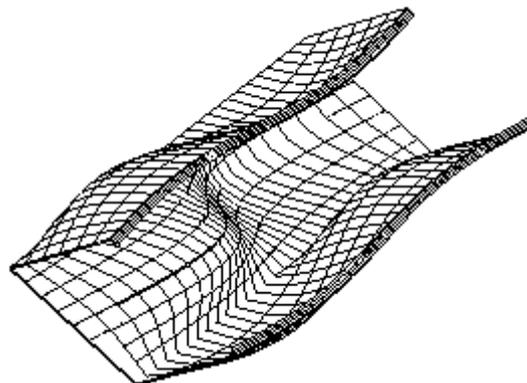


Figura 37. Estructura deformada en 3D.

### 3.4. Ejemplo con el *MFF* Semi-Analítico y con funciones Splines de una columna sometida a compresión variable.

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para el cálculo de cargas críticas y los correspondientes modos de inestabilidad de una columna tipo U de dimensiones 100 x 50 x 1 mm (dimensiones medidas a la cara media de la lámina que conforma el perfil) sometida a compresión

variable que varía desde 1 en el patín superior a 0.5 en el patín inferior; el análisis lineal de estabilidad fue realizado mediante el *MFFSA* y *MFFS*.

En la Fig. 38, se detalla de forma consolidada como ingresar los datos de forma resumida para realizar el análisis lineal de estabilidad mediante el *MFFSA*.

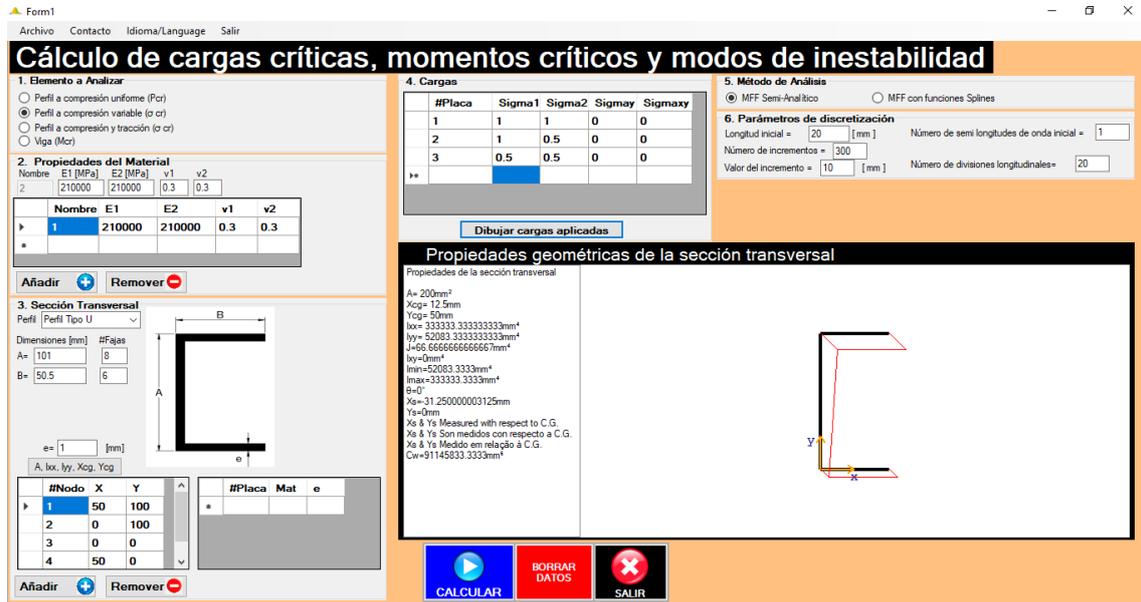


Figura 38. Ingreso de datos consolidado, para análisis lineal de estabilidad mediante el *MFFSA*

En la Fig. 39, se detalla de forma consolidada como ingresar los datos de forma resumida para realizar el análisis lineal de estabilidad mediante el *MFFSA*. Adicionalmente en este caso del *MFFS* se debe definir el tipo de apoyo, en este caso simplemente apoyado al inicio y final, para poder realizar un análisis comparativo entre los dos métodos de análisis.

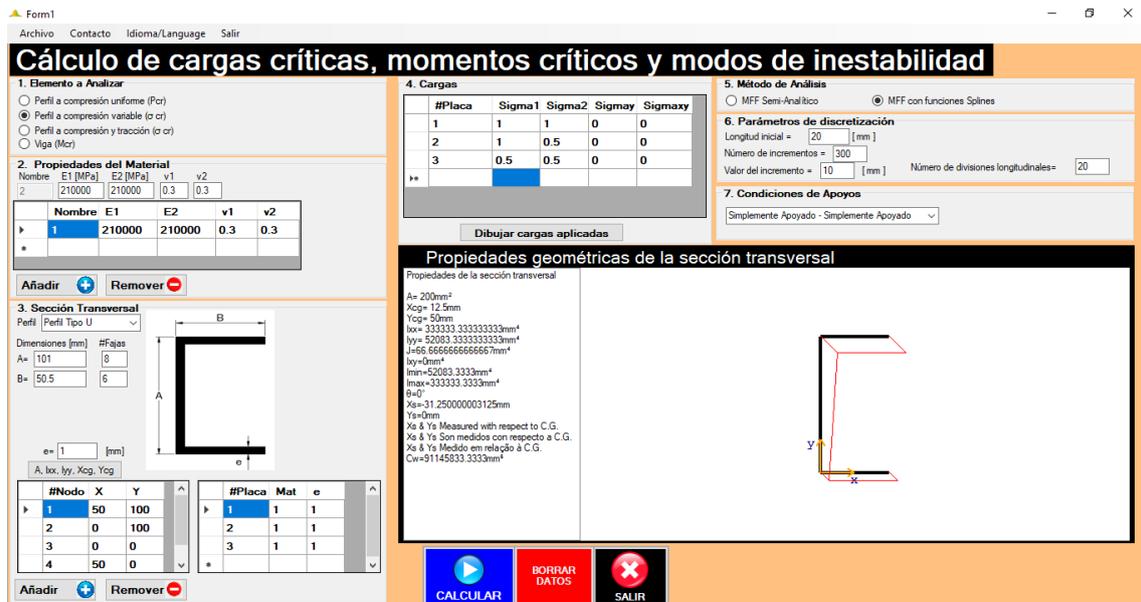


Figura 39. Ingreso de datos consolidado, para análisis lineal de estabilidad mediante el *MFFS*.

En la Fig. 40 se muestra la curva de pandeo crítica y la deformada en 2D obtenidas con FSplines 2.0

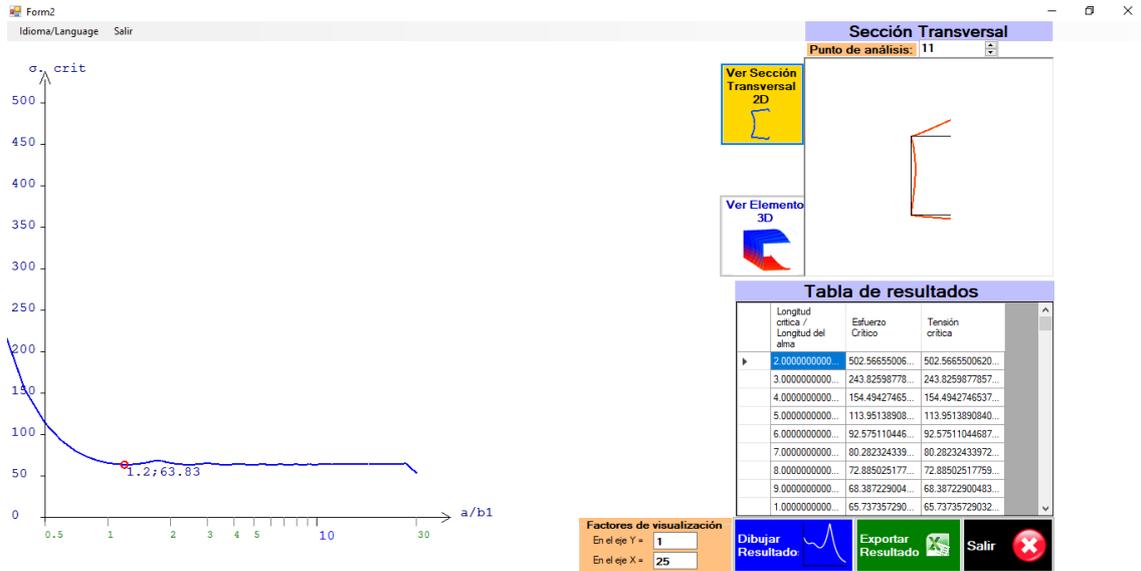


Figura 40. Curva de pandeo crítica y deformada en 2D, obtenidas con FSplines 2.0, mediante el *MFSS*.

En este caso se exportó los resultados a Excel y se los combinó en la Tabla 1 (en esta Tabla únicamente se tomaron los primeros 24 puntos, para evitar llenar este documento de información) y gráficamente estos resultados se muestran en la Fig. 41. Se puede apreciar que todos los valores del eje  $a/b1$  (Eje X), fueron multiplicados por el valor de  $b1$  (En este caso el valor de  $b1=100\text{mm}$ , donde  $b1$  representa la altura del alma del perfil)

Tabla 1. Valores de  $a/b1$ ,  $a$  (mm), cargas críticas y tensiones críticas

$a/b1$	Longitud $a$ (mm)	<i>MFSSA</i>	<i>MFSS</i>
		Tensión de bifurcación ( $\text{N/mm}^2$ )	Tensión de bifurcación ( $\text{N/mm}^2$ )
0.2	20	502.566	502.567
0.3	30	243.826	243.826
0.4	40	154.494	154.494
0.5	50	113.951	113.951
0.6	60	92.575	92.575
0.7	70	80.282	80.282
0.8	80	72.885	72.885
0.9	90	68.387	68.387
1	100	65.737	65.737
1.1	110	64.338	64.338
1.2	120	63.831	63.831
1.3	130	63.989	63.989
1.4	140	64.666	64.666
1.5	150	65.762	65.762
1.6	160	67.208	67.208
1.7	170	68.957	68.957
1.8	180	70.973	68.388

1.9	190	73.231	66.876
2	200	75.71	65.738
2.1	210	78.398	64.908
2.2	220	81.282	64.339
2.3	230	84.353	63.99
2.4	240	87.605	63.831
2.5	250	91.031	63.838

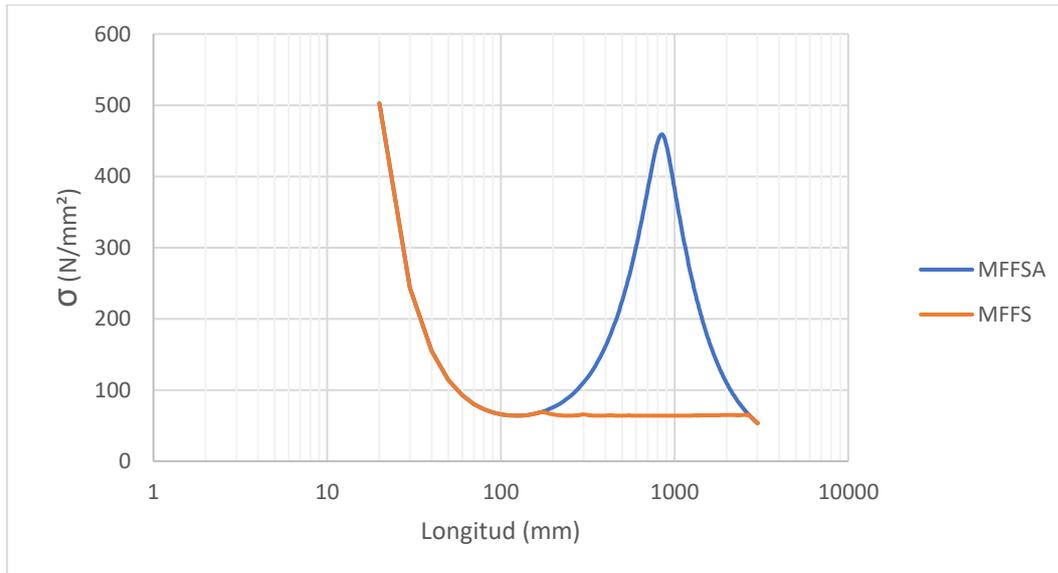


Figura 41. Curvas de pandeo críticas, exportadas a Excel y obtenidas mediante *MFFSA* y *MFFS*

### 3.5. Ejemplo con el *MFF* Semi-Analítico de una columna sometida a compresión uniforme (con varias semi-longitudes de onda).

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para el cálculo de cargas críticas y los correspondientes modos de inestabilidad de una columna tipo Z de dimensiones 100 x 50 x 5 x 1 mm (dimensiones medidas a la cara media de la lámina que conforma el perfil) sometida a compresión axial; el análisis lineal de estabilidad fue realizado mediante el *MFFSA*; haciendo variar los valores de semi-longitud de onda desde 1 hasta 4.

En la Figura 42, se muestra de forma consolidada el ingreso de datos para un valor de semi-longitud de onda igual a 1.

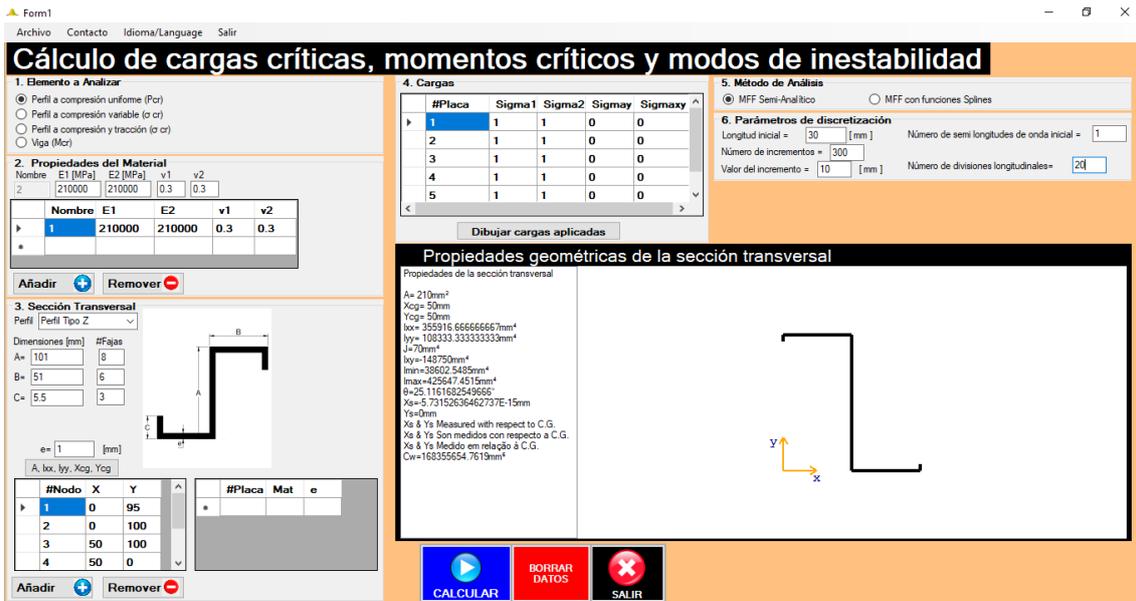


Figura 42. Datos consolidados, para una semi-longitud de onda igual a 1.

En la Figura 43, se muestra de forma consolidada el ingreso de datos para un valor de semi-longitud de onda igual a 2.

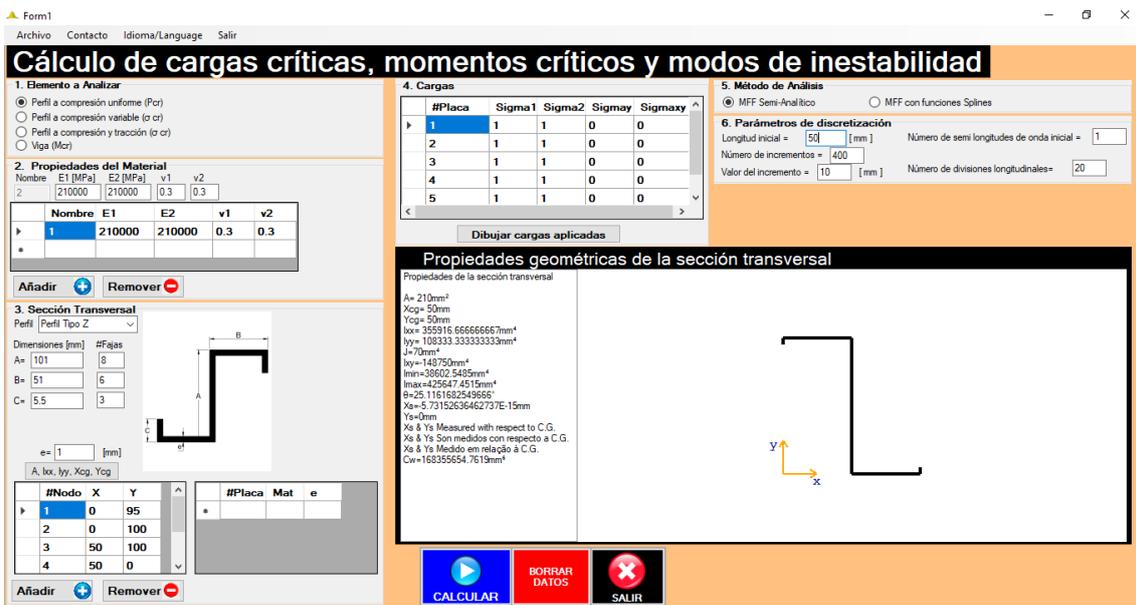


Figura 43. Datos consolidados, para una semi-longitud de onda igual a 2.

En la Fig. 44 a, se muestra el análisis de una columna para 3 semi-longitudes de onda; y en la Fig. 44 b para 4 semi-longitudes de onda.

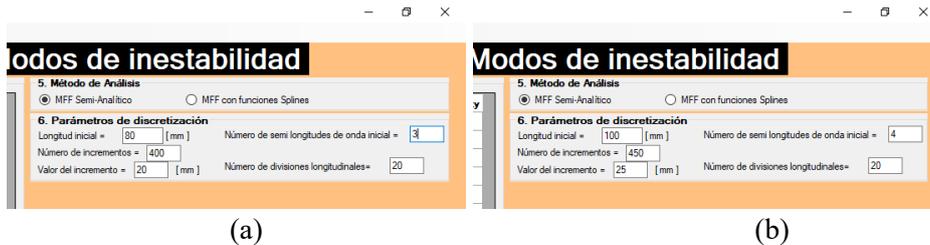


Figura 44. Datos consolidados, para una semi-longitud de onda igual a 3 y a 4.

En este ejemplo los resultados fueron exportados a Excel y se muestran consolidados en la Fig. 45 las curvas de pandeo críticas para semi-longitudes de onda igual a 1, 2, 3 y 4.

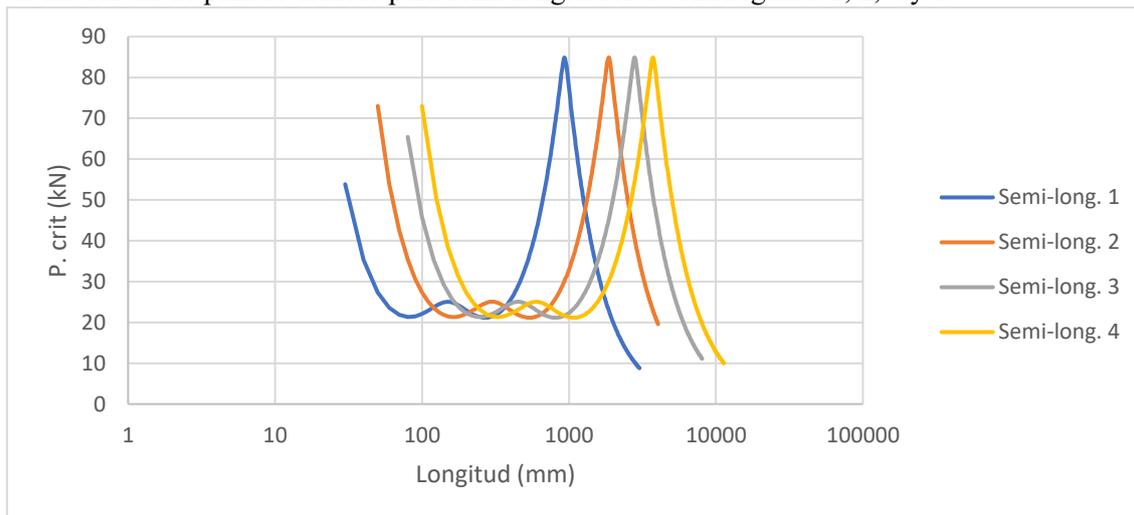


Figura 45. Curvas de pandeos críticas, para semi-longitudes de onda 1, 2, 3 y 4.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chicaiza, Á. (2018). *FSplines: una aplicación informática para análisis lineal de estabilidad de perfiles abiertos de pared fina*. Leiria, Portugal: Tesis de Maestría, Instituto Politécnico de Leiria.
- Prola, L. (2001). *Estabilidade Local e Global de Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio*. Lisboa: Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.