

Artículo original

APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA TEÓRICA- APLICATIVA CONJUNTA PARA MEJORAR EL APRENDIZAJE DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN ALUMNOS DE PRE Y POSGRADO

APPLICATION OF THE JOINT THEORETICAL-APPLICABLE
STRATEGY TO IMPROVE THE LEARNING OF THE FINITE
ELEMENTS METHOD IN UNDERGRADUATE AND
POSTGRADUATE STUDENTS

JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ RUFFRÁN¹

 <https://orcid.org/0000-0002-5321-8500>

JOSÉ ALBERTO ACERO MARTINEZ²

 <https://orcid.org/0000-0003-4154-9510>

Recibido: 25/09/2021

Aceptado: 01/10/2021

Publicado: 19/11/2021

¹Sección de Ingeniería, Instituto Isuccap, Tacna, Perú

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Lima, Perú

E-mail: ¹tecsaco.corp@gmail.com, ²jacero@puccp.pe



Resumen

Predecir el comportamiento exacto de elementos ante solicitaciones ha sido y sigue siendo materia de estudio en diversas ramas profesionales, siendo en un largo transcurso de tiempo el método de los elementos finitos (MEF) una alternativa de solución a dicha premisa. Sin embargo, en contraste a su relevancia, dicha metodología presenta alguna falencia en su aprendizaje, lo cual crea muchas veces una falsa complejidad de aplicación en estudiantes dispuestos a comprender la metodología. Debido a la complejidad que presenta el aprendizaje teórico-aplicativo del MEF, la presente investigación tiene como objetivo brindar una estrategia de aprendizaje sencilla de comprender, relacionando directamente la parte teórica y aplicativa del método. Se realizó una investigación a diversas publicaciones de autores destacados en la metodología, recopilando sus diversas formas de enseñanza. A partir de dicha investigación se establecieron los posibles elementos que puedan dificultar el aprendizaje del MEF en estudiantes pre-profesionales. Teniendo en cuentas las dificultades, las bases del método y las herramientas para una relación teórica-aplicativa conjunta, se estableció una estrategia de enseñanza sencilla de comprender para el estudiante. Las pruebas aplicadas a la metodología teórica-aplicativa conjunta demuestran una mayor aceptación de la misma en los estudiantes, adicionalmente mostraron una mayor dificultad de aprendizaje en la parte teórica en comparación a la aplicativa. El enfoque típicamente dado a la enseñanza aplicativa del MEF muestra tener una complejidad y dificultad en su comprensión, en contramedida a esto la estrategia de aprendizaje presentada resulta ser una alternativa de solución con resultados positivos respecto a una mayor comprensión para el estudiante.

Palabras clave: Aprendizaje; Elementos Finitos; Metodologías; Programación, Teoría.

Abstract

Predicting the exact behavior of elements under stress has been and continues to be a matter of study in various professional branches, with the finite element method (FEM) being an alternative solution to this premise over a long period of time. However, in contrast to its relevance, this methodology presents some flaws in its learning, which often creates a false complexity of application in students willing to understand this methodology. Due to the complexity presented by the theoretical-applicative learning of the MEF, the present research aims to provide a learning strategy that is easy to understand, directly relating the theoretical and applicative part of the method. An investigation was carried out on various publications of prominent authors in the methodology, compiling their various forms of teaching. From this research, the possible elements that may hinder the learning of the MEF in pre-professional students were established. Taking into account the difficulties, the bases of the method and the tools for a joint theoretical-applicative relationship, a teaching strategy that was easy for the student to understand was established. The tests applied to the joint theoretical-applicative methodology show a greater acceptance of it in the students, additionally they showed a greater learning difficulty in the theoretical part compared to the applicative part. The approach typically given to the application teaching of the MEF, shows to have a complexity and difficulty in its understanding. In countermeasure to this, the learning strategy presented turns out to be an alternative solution with positive results regarding a greater understanding for the student.

Keywords: Learning; Finite Elements; Methodologies; Programming; Theory.

1. Introducción

El método de los elementos finitos (MEF) es una herramienta que nos ayuda a comprender el comportamiento de sistemas ante solicitaciones, siendo usada en diversas carreras profesionales desde hace mucho tiempo atrás. El extenso desarrollo de la metodología dio nacimiento, solamente en 2008, a más de 25,000 publicaciones relacionadas al tema (Oñate, 2009), teniendo la metodología un gran alcance por las características que presenta en comparación de otros métodos numéricos como el método de diferencias finitas, el método de volumen finito, etc. (Rao, 2019). Bajo lo cual se puede entender su amplio estudio y la importancia profesional que conlleva el MEF, sin embargo, a pesar de las numerosas investigaciones realizadas, la metodología presenta comúnmente dificultades en su aprendizaje básico en los estudiantes. Dicha dificultad es debida a diversos factores, en los cuales resalta el enfoque de aprendizaje y la complejidad/extensión que presenta la propia metodología especialmente en elementos heterogéneos (Farmaga, Shmigelskyi, Spiewak, y Ciupinski, 2011).

La investigación busca encontrar una alternativa de solución ante dicha problemática, realizando un estudio a las dificultades que presenta el aprendizaje del MEF. Conociendo las bases de dichas dificultades y las características fundamentales de la metodología, se presenta una nueva estrategia/metodología de aprendizaje que mezcla directamente la parte teórica con la aplicada. A lo largo de la investigación se detalla dicha estrategia, el grado de aceptación por parte de los estudiantes, entre otras características.

Bases del MEF

Para realizar un aprendizaje integro de cualquier metodología se inicia conociendo sus fundamentos teóricos, posterior a esto se procede a relacionar/incorporar dichos conocimientos en la aplicación de la metodología. Este concepto es general y el método de los elementos finitos no es excepción.

El aprendizaje de las bases teóricas del MEF abarca diversos temas que conllevan varias formulaciones demostradas comúnmente por docentes del curso o investigadores del tema. Respecto a esto último se cuentan con diversas publicaciones de autores con relevancia en el tema, como "Structural Analysis with the Finite Element Method" (Oñate, 2013), "The finite element method: its basis and fundamentals" (Zienkiewicz, Taylor, y Zhu, 2005), entre otros. Dichos autores abordan detalladamente la parte teórica, expandiéndose de forma breve a diversos campos de aplicación. Por todo lo anterior, se puede inferir que la parte teórica no presenta un gran problema siempre y cuando se aplique una metodología de aprendizaje fundamentada (el estudiante cuente con bases y comprenda la dirección de su aprendizaje).

La pregunta que surge al comprender el contexto del aprendizaje teórico de la metodología es ¿Qué sucede con su aprendizaje aplicativo?

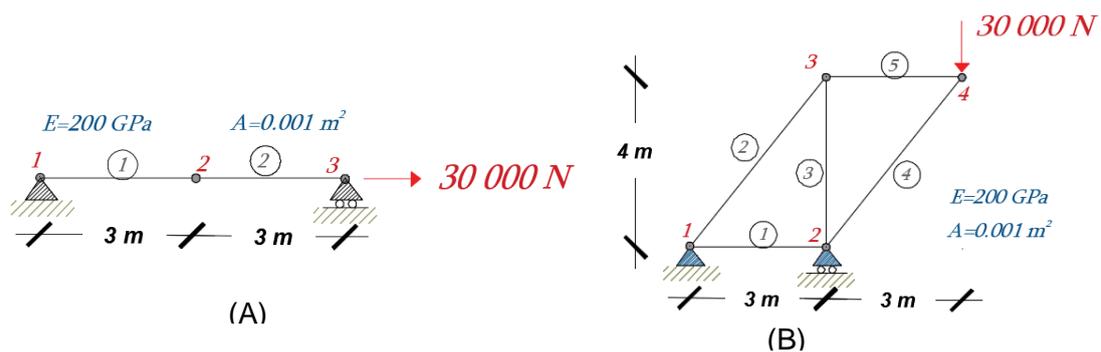
La complejidad en la aplicación del MEF

La aplicación propia del MEF comprende el cálculo de diversas variables, las cuales varían en función del enfoque dado a la propia metodología. El cálculo de dichas variables presenta un grado de dificultad en acorde al sistema que se esté analizando, a manera de ejemplificar dicha dificultad evaluemos casos de obtención de la matriz de rigidez local/global del sistema (matriz calculada generalmente en la aplicación del MEF). Los ejemplos mostrados se basaron en la publicación “Análisis aplicativo del método de los elementos finitos en un campo estático-lineal e introducción a la no linealidad” (Alvarez Ruffrán, 2019).

Es posible iniciar con casos sencillos como son los sistemas unidimensionales, comúnmente enseñados en las primeras etapas de aprendizaje. Dichos elementos se muestran en la figura 1 y pueden ser abordados mediante cálculos manuales de una forma sencilla, mencionando que sus matrices de rigidez global tienen dimensiones de 3x3 (a) y 8x8 (b), todo lo anterior respecto a un caso de análisis sencillo.

Figura 1

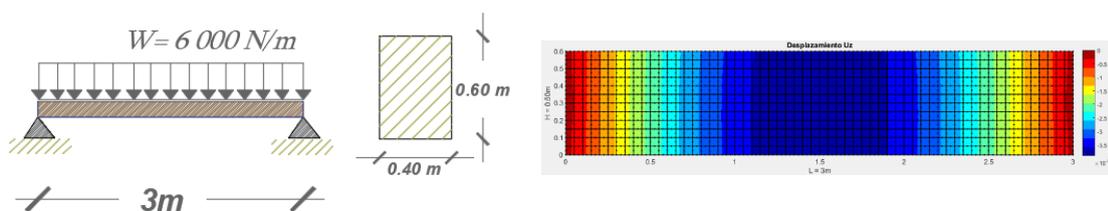
Sistemas unidimensionales sencillos



Al pasar a realizar un análisis de mayor nivel, tomaremos como ejemplo a los elementos bidimensionales. El caso de análisis se muestra en la figura 2 y comprende un elemento tipo viga simplemente apoyada, llegando a tomar su matriz de rigidez dimensiones de 4610x4610.

Figura 2

Sistema bidimensional – Viga simplemente apoyada

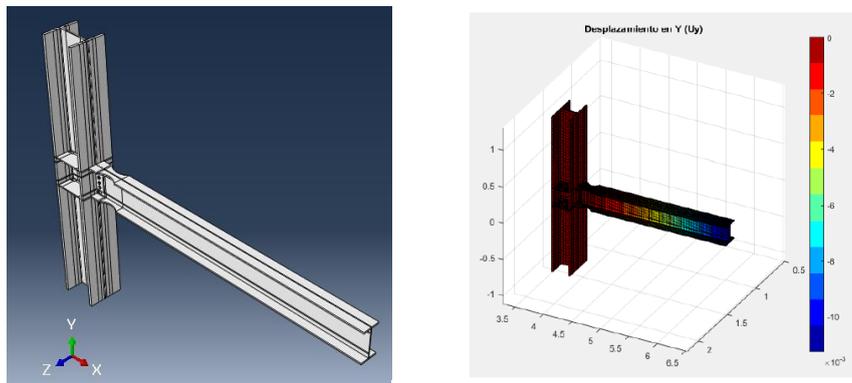


Pasando a elementos con mayor relevancia, los cuales son objeto común de análisis en carreras de ingeniería civil y mecánica, se puede dar como ejemplo una conexión de viga - columna empotrada, mostrada en la Figura 3.a. La conexión mostrada desarrolla una matriz de rigidez global con dimensiones de 61662x61662 bajo el análisis de un sistema tridimensional sencillo.

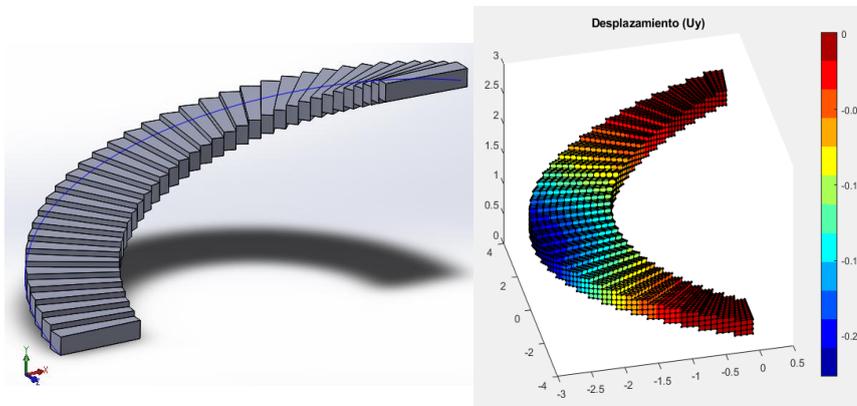
Finalmente, se da como ejemplo un sistema de escalera helicoidal (Figura 3.b). Dicho sistema es de análisis común para diseños estructurales y comprende una matriz de rigidez global con dimensiones de 18369x18369 elementos.

Figura 3

Ejemplos de aplicación del MEF



(a)



(b)

Teniendo en cuenta los casos analizados se puede comprender el escalamiento en la dificultad que presenta el análisis del MEF. Como se puede apreciar, únicamente los elementos unidimensionales son los capaces de realizarse mediante cálculos manuales (siempre y cuando el sistema sea sencillo). De igual manera, se debe tener en cuenta que tan solo se ha hecho referencia a la obtención de la matriz de rigidez, el cual es uno de uno de los diversos elementos necesarios para la aplicación la metodología.

Analizando todo lo anterior se puede comprender en cierta medida que la metodología requiere necesariamente herramientas de programación básica y en algunos casos medianamente avanzadas para su correcta aplicación. Ante la necesidad de dichas bases de

programación surgen algunas problemáticas en su enseñanza para estudiantes universitarios de carreras profesionales de ingeniería civil o mecánica, en donde la malla curricular comúnmente no otorga dichas bases en su programación. Los estudiantes de post-grado no comparten las mismas bases respecto al lenguaje de programación con el que han trabajado. Todo esto crea una dificultad en la enseñanza por parte del docente encargado del curso.

Cómo es usualmente definida la aplicación del MEF

La metodología de elementos finitos cuenta con diversos enfoques en función al público que se desea llegar, de esta forma se han desarrollado publicaciones abarcando temas de estudio específico o los propios fundamentos de la metodología. Con respecto a esto último, se comprende el enfoque dado para el estudio general del MEF por autores con relevancia en el medio.

La publicación titulada “The finite element method for solid and structural mechanics” (Zienkiewicz y Taylor, 2005) define el MEF en un caso lineal/no-lineal mediante diversos elementos y demostrando detalladamente distintas formulaciones en la metodología. Con respecto a la parte aplicativa, en el capítulo 19 se contempla netamente la aplicación de la metodología mediante el anexo del software FEAPpv sin mostrar en la propia publicación ejemplos de su uso.

Analizando la publicación “The finite element method using MATLAB” (Bang y Kwon, 2000), los autores trabajan la aplicación del MEF mediante la inserción de códigos los cuales son explicados y ejemplificados a lo largo de su publicación. Sin embargo, el autor no se centra en la parte teórica del método, brindando en gran medida expresiones simplificadas a usar de forma directa y sistemática en los códigos.

En una publicación más antigua, pero de mayor de mayor nivel crítico se evidencia la falencia en el aprendizaje aplicativo del MEF; la publicación “An introduction to the finite element method” (Reddy, 1993), en la cual se trata la aplicación de la metodología en el Cap. 13 “Computer Implementation” brinda una serie de códigos difíciles de entender desde el punto de vista de un estudiante pre-profesional (Figura 4).

Bajo estos casos de ejemplo y muchas otras implementaciones de códigos enlistados en la publicación de Horst Werkle (Werkle, 2008), se puede percibir que la aplicación del MEF se basa netamente en la incorporación de códigos o programas en las diversas publicaciones, no se genera ninguna relación directa entre la parte teórica y aplicativa. Dicho enfoque de enseñanza dificulta el entendimiento aplicativo del método, ya que el estudiante tendrá que dedicar gran parte del tiempo en comprender el funcionamiento de dichos elementos en lugar de comprender el proceso de aplicación de la metodología. Sin embargo, se debe resaltar que no se está criticando las diversas publicaciones existentes, ya que están dirigidas a un público general, centrándose específicamente en el desarrollo de la propia metodología.

Teniendo en cuenta la dificultad en la comprensión de la aplicación del método por el enfoque dado, se puede inferir que la dificultad en su aprendizaje surge cuando el estudiante opta por un aprendizaje autodidacta sin ninguna guía respecto a las publicaciones óptimas para su estudio. El estudiante tiene a las publicaciones como único medio de referencia para la aplicación de la metodología. El docente del curso opta como enfoque de enseñanza el abordado por las publicaciones mencionadas, esto referido a la división en la forma

desvinculada la enseñanza teórica y aplicada del método. Por ende, la currícula de la universidad opta por una enseñanza enfocada en la parte teórica, aplicando en muy poca medida la implementación del software estructural (Milton-Benoit, Grosse, Poli, y Woolf, 1998). Todo esto crea un estereotipo de complejidad en el aprendizaje de la metodología, por lo que tiende a ser difícil y tediosa.

Figura 4

Código anexo

```

C
C
C      REARRANGING THE ELEMENT EQUATIONS OF MULTIVARIABLE PROBLEMS
C      (Illustrated using the plane elasticity FE model)
C      NDF..... = Number of degrees of freedom per node
C      NPE..... = Number of nodes per element
C      CMAT(I,J).. = Matrix of elastic coefficients
C      ELK(I,J)... = Element stiffness matrix coefficients
C
C
C      Dimension the arrays. For example (NN = NPE*NDF):
C      ELK(NN,NN),CMAT(3,3)
C      Compute the coefficients ELK11(I,J), ELK12(I,J), ELK21(I,J)
and
C      ELK22(I,J) of Eqn. (10.29) using numerical integration. We
have
C      (the following statements go inside the loops on Gauss
quadrature;
C      see the fortran statements for the evaluation of sij):
      DO 140 I=1,NPE
        DO 120 J=1,NPE
          ELK11(I,J) = ELK11(I,J) + CMAT(1,1)*S11 + CMAT(3,3)*S22
          ELK12(I,J) = ELK12(I,J) + CMAT(1,2)*S12 + CMAT(3,3)*S21
          ELK21(I,J) = ELK21(I,J) + CMAT(1,2)*S21 + CMAT(3,3)*S12
          ELK22(I,J) = ELK22(I,J) + CMAT(3,3)*S11 + CMAT(2,2)*S22
        CONTINUE
      CONTINUE
C      We are now ready to rearrange the coefficients
      II=1
      DO 180 I=1,NN
        JJ=1
        DO 160 J=1,NN
          ELK(II,JJ)      = ELK11(I,J)
          ELK(II,JJ+1)    = ELK12(I,J)
          ELK(II+1,JJ)    = ELK21(I,J)
          ELK(II+1,JJ+1)  = ELK22(I,J)
          JJ = NDF*J+1
        II = NDF*I+1
      CONTINUE
C

```

Resolución de un problema en programación

Se ha mostrado a lo largo de este manuscrito la complejidad en cálculos que presenta la aplicación del MEF y, por ende, el uso necesario de herramientas de programación. Con respecto a este último se debe tener claro que la metodología es enseñada en carreras no dedicadas netamente al campo de desarrollo del software (ingeniería informática/sistemas),

por lo que surge una dificultad en la comprensión/elaboración de códigos por parte del estudiante. Dicha dificultad no es tratada en las publicaciones mencionadas por el enfoque y el tipo de público al cual están dirigidas. En el caso de un aprendizaje guiado por un educador, la dificultad es comúnmente tratada como una sobrecarga en los conceptos que el alumno debe conocer o estudiar a lo largo de todo el curso, concentrándose en mayor medida en la comprensión de códigos que en el desarrollo de la propia metodología, la cual es objetivo principal del curso.

La dificultad en la comprensión y elaboración de códigos en estudiantes inexpertos no es un tema nuevo, siendo abordada comúnmente en ciclos iniciales de las carreras de informática o sistemas. Para facilitar la comprensión y elaboración de códigos en dichos ciclos se introduce una metodología de desarrollo de aplicaciones, la cual se agrupa de forma genérica en 3 fases o puntos (Joyanes Aguilar, 2003) mostrados en la figura 5.

Figura 5

Resolución de un problema en informática



Nota. Adaptada de Joyanes Aguilar (2003).

El primer punto de dicha metodología corresponde al estudio del problema, entendiendo las bases que comprende el mismo. El segundo punto corresponde a la elaboración de algoritmos que representa el procedimiento de solución del problema a través del código/programa. El tercero y último punto corresponde a la elaboración del código con base en lo trazado en el algoritmo.

Bajo el desarrollo de dicha metodología se logra una comprensión directa en estudiantes que aún no han interactuado profundamente con códigos externos, dando solución a diversas problemáticas a través de la relación directa de las bases y el proceso de solución del código. El entendimiento del código sin interactuar con el tipo lenguaje de programación trabajado (a través del algoritmo) genera una comprensión intuitiva en el ingreso-tratamiento-exportación de data estipulado sin tener que haberlo desarrollado.

La estrategia mencionada cumple los requisitos de solución de la problemática presente en la comprensión aplicativa del MEF, por tal motivo sirvió como base para el establecimiento de la metodología conjunta enseñada en la presente investigación.

2. Objetivo

El objetivo de la investigación es brindar una estrategia de mejora en el aprendizaje del MEF,

relacionando directamente la parte teórica con la aplicada.

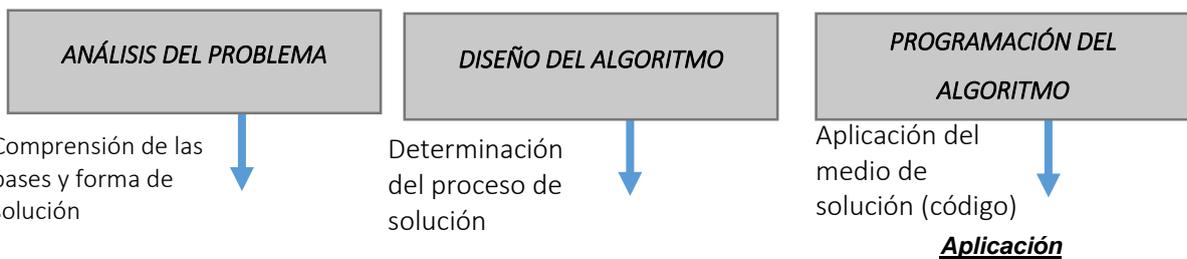
3. Metodología

Para alcanzar el objetivo, se adaptó la metodología de desarrollo de códigos en programación (Figura 5), ya que sirve como medio de comprensión y aprendizaje de códigos en personas inexpertas. En la Figura 6, se puede visualizar la adaptación de la metodología para el proceso de aplicación del MEF, envolviendo los siguientes pasos:

- (1) *Bases del MEF*. Conceptos fundamentales (Análisis del problema)
- (2) *Procedimiento de aplicación del MEF*. Algoritmo (Diseño del algoritmo)
- (3) *Aplicación sistemática del MEF*. Código (Programación del algoritmo)

Figura 6

Desarrollo conjunto del MEF



Teoría orientada a conceptos de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 2:

2.1 Conceptos Básicos del Método

Principio de los trabajos virtuales, relación esfuerzo-deformación, entre otros.

CAPÍTULO 3: Tipos de Elementos

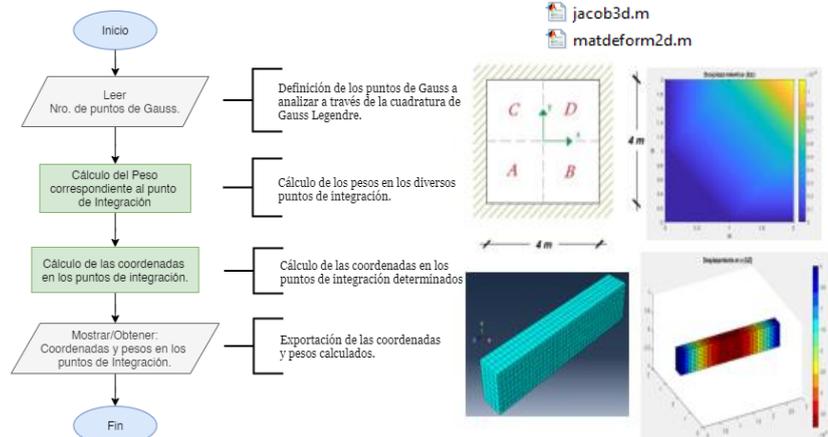
3.1 Propiedades en los elementos

Hipótesis fundamental, campo de desplazamientos, campo de deformación-tensiones, entre otros.

CAPÍTULO 4: Desarrollo del MEF

Matriz de rigidez, matriz constitutiva, entre otros.

Integración Teórica- Aplicativa



- Deriv3DGlobal.m
- Elem2D_4nodos.m
- Elem2D_8nodos.m
- Elem3D_8nodos.m
- Elem3D_20nodos.m
- jacob3d.m
- matdeform2d.m

Bases del MEF

El planteamiento de los conceptos fundamentales del MEF corresponde a las primeras etapas de aprendizaje del método. Como se apreció anteriormente, dicha etapa no presenta

mayores dificultades en su comprensión, ya que existe un gran número de publicaciones orientadas a la parte teórica, esto para un caso de estudio autodidacta. En caso de seguir un aprendizaje guiado por un educador, se recomienda orientar los fundamentos al estudiante desde un punto de vista enfocado a la carrera profesional que se esté educando.

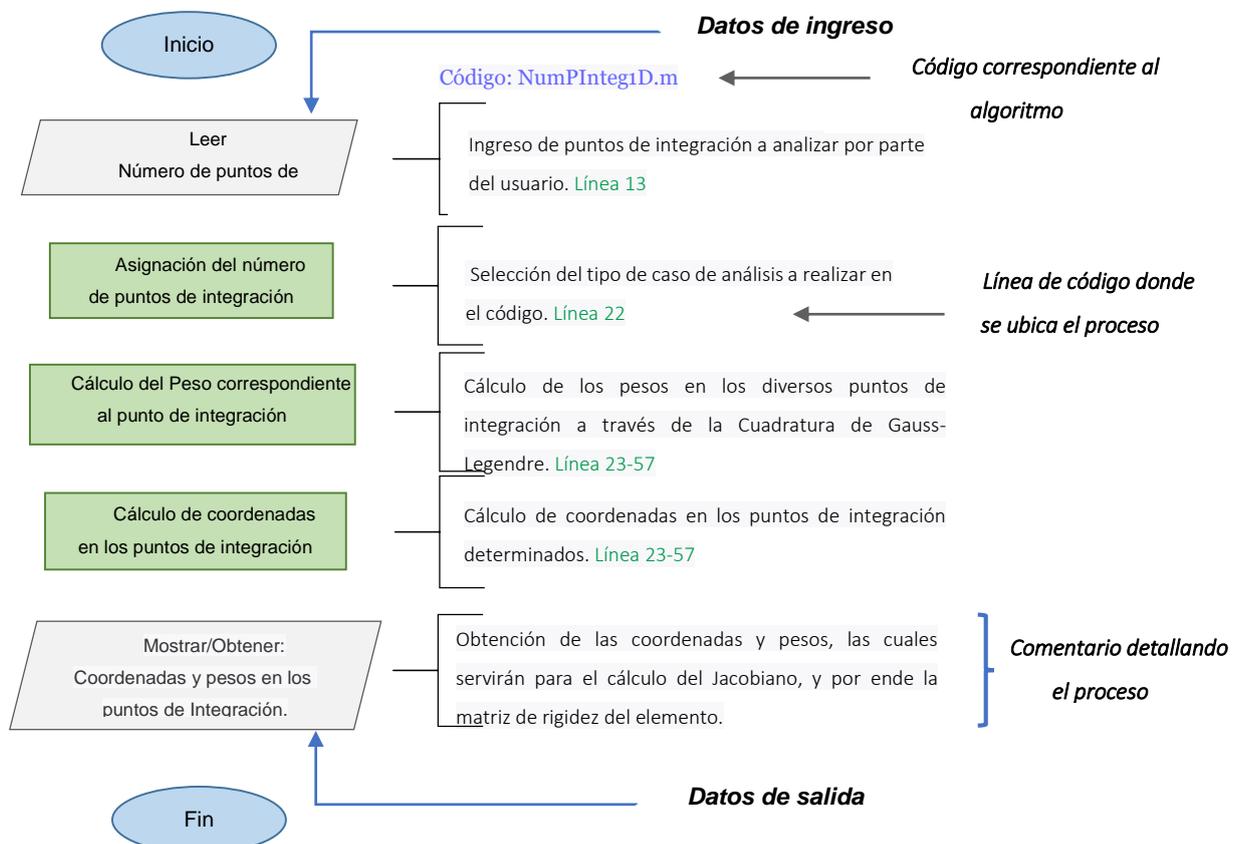
Procedimiento de aplicación del MEF

El procedimiento de aplicación del MEF es el medio de integración entre la parte teórica y la aplicativa, siendo básicamente la fase no considerada por muchos autores en el aprendizaje de la metodología. Haciendo uso de algoritmos de programación en forma de diagramas de flujo se puede ayudar visualmente al desarrollo del código en programadores novatos (Hooshyar et al., 2015), comprendiendo de forma sencilla la secuencia de aplicación y el desarrollo de diversos procesos desarrollados en el método.

En la Figura 7, se muestra un ejemplo de sub-proceso sencillo que corresponde a la obtención de coordenadas y pesos en los puntos de integración, resaltando que mediante el algoritmo se indican las respectivas líneas de códigos donde se realiza cada procedimiento, el ingreso y salida de la data necesaria/resultante en el código correspondientes al algoritmo trabajado, los comentarios donde se mencionan las bases teóricas utilizadas para la ejecución de los diversos procesos y los bloques de decisión que hacen énfasis a cuando se deberá realizar un procedimiento sistemático.

Figura 7

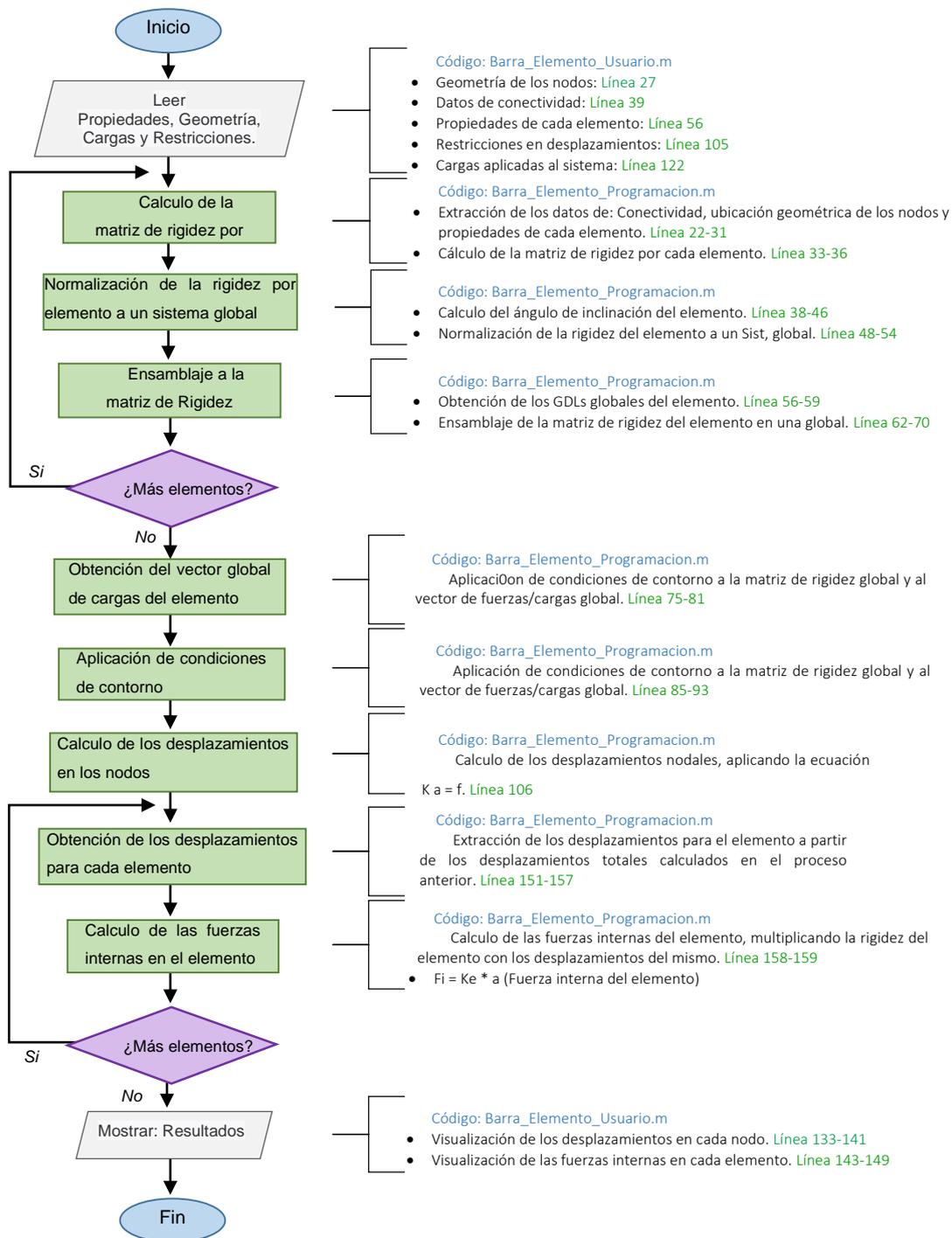
Algoritmo para sub-proceso sencillo



Todas estas indicaciones sirven como un medio de apoyo en favor de una comprensión más sencilla para el estudiante, ya que podrá comprender el procedimiento de aplicación sin necesidad de entrar a la propia programación.

Paralelamente se pueden desarrollar otros algoritmos que especifiquen procesos más complejos o generales como el que se visualiza en la Figura 8, en donde se muestra el proceso general para la aplicación del MEF en barras. En dicho algoritmo se incluye el bloque de toma de decisión, el cual será de gran ayuda para especificar procesos sistemáticos.

Figura 8
Algoritmo para proceso general



Aplicación del MEF

La incorporación de códigos para la ejemplificación de diversos casos de análisis serán solamente un medio para corroborar la correcta aplicación del MEF, debido a que el entendimiento del proceso se basará en la comprensión de los algoritmos. De igual manera, la comprensión de la estructura presente en los códigos podrá ser realizado mediante los algoritmos.

Desarrollo de la integración teórica-aplicativa

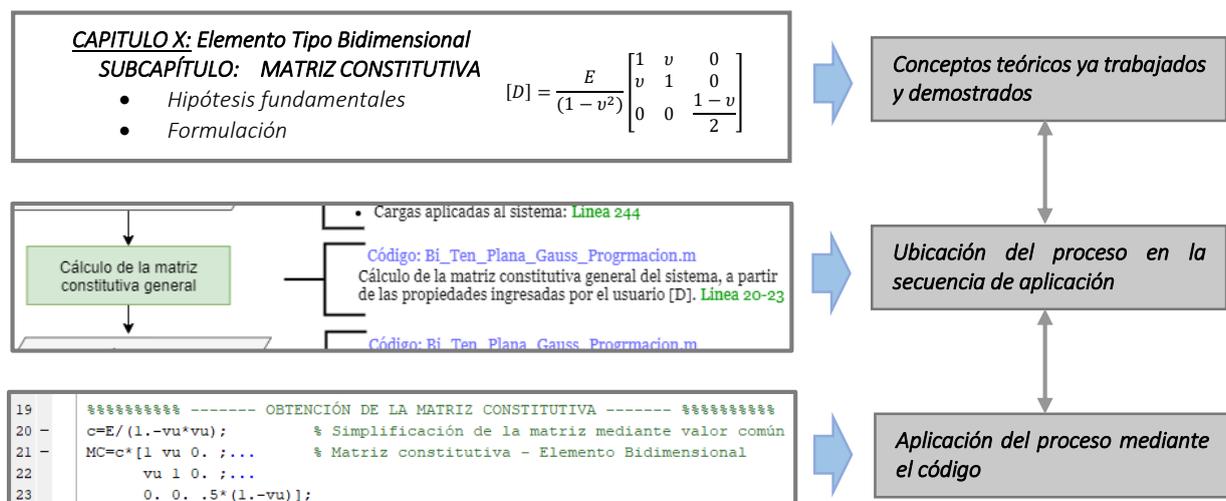
A lo largo de la publicación se ha mostrado la dependencia de los algoritmos para una integración eficaz entre la parte teórica y aplicativa (Figura 6), siendo estos el medio donde se traza el proceso de aplicación para cada proceso o subproceso del MEF. Se debe tener en claro que los algoritmos están basados netamente en los fundamentos teóricos ya trabajados y trazan la forma que tendrán los distintos códigos de aplicación.

Para demostrar la representación de las distintas fases de un subproceso sencillo, se tomó como ejemplo la obtención de la matriz constitutiva (elemento del MEF que representa las propiedades del material – Figura 9) en la cual se aprecia que en primera instancia se demostró y formuló la matriz, posteriormente se interpretó dicha matriz como un subproceso en una etapa del algoritmo y finalmente se ejecutó el proceso mediante su programación en el código correspondiente.

A través del ejemplo se aprecia que los fundamentos teóricos sirven como base para la aplicación de la metodología y son representados mediante procesos integrados en los algoritmos. Los comentarios en los diversos bloques sirven para apoyar los fundamentos de la metodología o mostrar el tipo de data de ingreso o salida en el proceso

Figura 9

Relación entre la teoría y aplicación

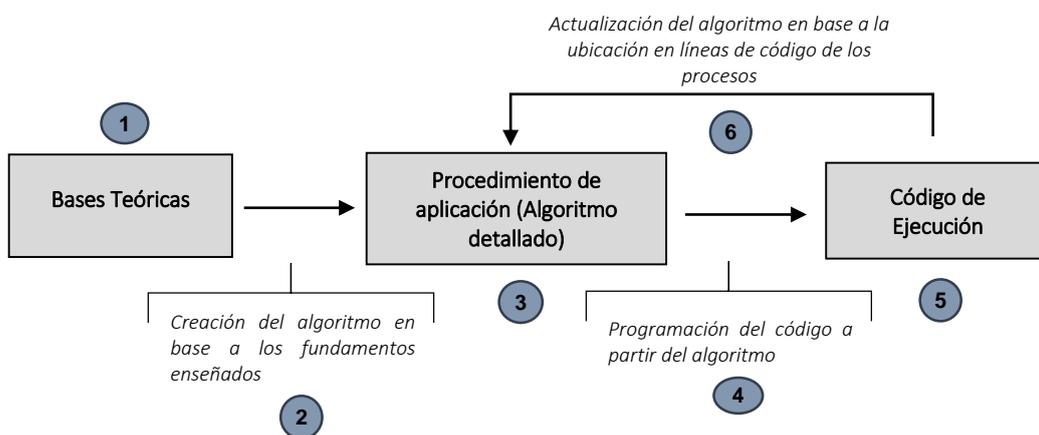


Respecto a la realización de los algoritmos para temas específicos, se recomienda seguir una secuencia de ejecución para una integración completa entre ambas partes. La secuencia esta mostrada en la figura 10, y se detalla a continuación:

1. Comprensión de las bases teóricas necesarias para realizar la aplicación de la metodología.
2. Creación del algoritmo en función de las bases teóricas y en forma de secuencia de procesos.
3. Incorporación de detalles en el algoritmo mediante comentarios.
4. Programación del código mediante el algoritmo realizado.
5. Verificación del código de ejecución e incorporación de comentarios.
6. Actualización del algoritmo en base a la ubicación en líneas de código de los procesos.

Figura 10

Proceso de preparación de la estrategia



Beneficios en la integración teórica-aplicativa

La implementación de algoritmos como medio de integración entre la teoría y aplicación del MEF aporta diversos beneficios para una mejora en la comprensión por parte del estudiante. En forma conjunta, también favorece al educador disminuyendo la dificultad en la comprensión de los diversos temas a tratar. A continuación, se enlistará algunos de los beneficios de mayor impacto en el uso de la estrategia conjunta:

- Evitar el aprendizaje/enseñanza de conceptos correspondientes al tipo de lenguaje de programación a trabajar. Dicha omisión es debida a que el estudiante podrá comprender el funcionamiento del código a partir del algoritmo, usando el tipo del lenguaje que conozca para su representación.
- Comprensión directa de lo detallado en los algoritmos al ser basados en los fundamentos teóricos trabajados.
- Ubicación y comprensión sencilla de los diversos procesos/subprocesos trabajados en los códigos mediante el uso de los algoritmos y sus comentarios bajo los cuales estos se

relacionan.

Ensayo de la estrategia teórica-aplicativa conjunta

Para probar la aceptación de la estrategia por parte del estudiante, se desarrolló un ensayo que consistió en simular una clase orientada al MEF bajo una estrategia de enseñanza “tradicional” y otra con base en lo sustentado en esta investigación. La simulación se realizó en una clase de pos-grado de ingeniería civil en la Pontificia Universidad Católica del Perú, dicha clase está dedicada al estudio fundamental del MEF. La cantidad de estudiantes que se sometieron a la simulación fueron 20.

En la simulación, se procedió a dividir el salón en dos grupos mostrándoles una “clase” (simulación de clase, ya que no se pretendía abarcarla en su totalidad) de aplicación del MEF bajo dos estrategias de enseñanza distintas, posterior a esto los estudiantes llenaron un formulario respondiendo preguntas específicas.

La primera estrategia simularía una enseñanza tradicional con base en el enfoque de diversas publicaciones mencionadas anteriormente. Se mostró al principio los fundamentos teóricos para posteriormente desarrollar la parte aplicativa a través del uso de códigos, se debe tener en cuenta que lo aplicado en los códigos se basó en lo desarrollado en los fundamentos.

La segunda estrategia simularía lo desarrollado en esta investigación. Inicialmente como el caso anterior se inició enseñando la misma base teórica, posteriormente se desarrolló la aplicación del MEF en forma secuencial, mediante los diagramas de flujo. Finalmente, y solo como un acto complementario se enseñó el código de aplicación enlazándolo directamente al diagrama ya trabajado.

Cabe resaltar que los dos grupos recibieron una simulación bajo las mismas condiciones, respecto al mismo tema a desarrollar, bases teóricas, resultado objetivo en la aplicación, una duración de tiempo muy similar y una expresión de enseñanza neutral para ambos casos.

De esta forma no se benefició a ninguna estrategia de enseñanza en particular.

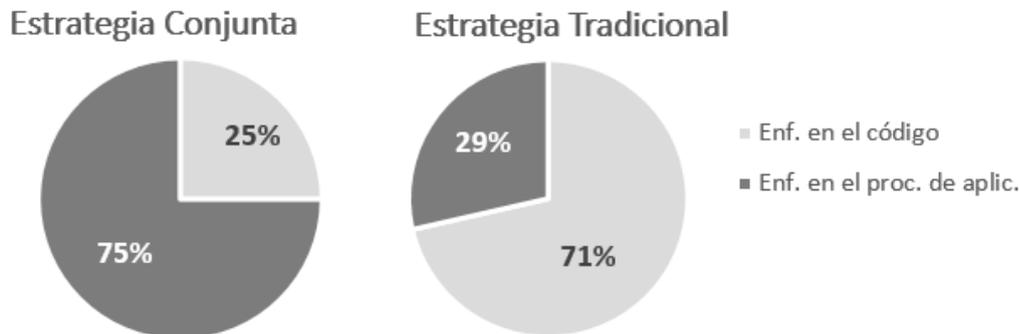
4. Resultados

El primer enfoque que se deseó abordar fue respecto a la inclinación que percibieron durante la clase. La respuesta de los estudiantes fue variada, siendo agrupada en dos enfoques mostrados en la figura 11.

Es fácil notar la gran diferencia en el enfoque que presenta la estrategia de aprendizaje mostrada en esta investigación a comparación de la “tradicional”. Para el primer caso, se nota que un 75 % de los estudiantes mostraron una asimilación de la información con un mayor enfoque en la aplicación del MEF; en cambio para el segundo, la situación prácticamente se invirtió con un 71 % de los estudiantes mostrando que el enfoque planteado está más dirigido a comprender el código.

Figura 11

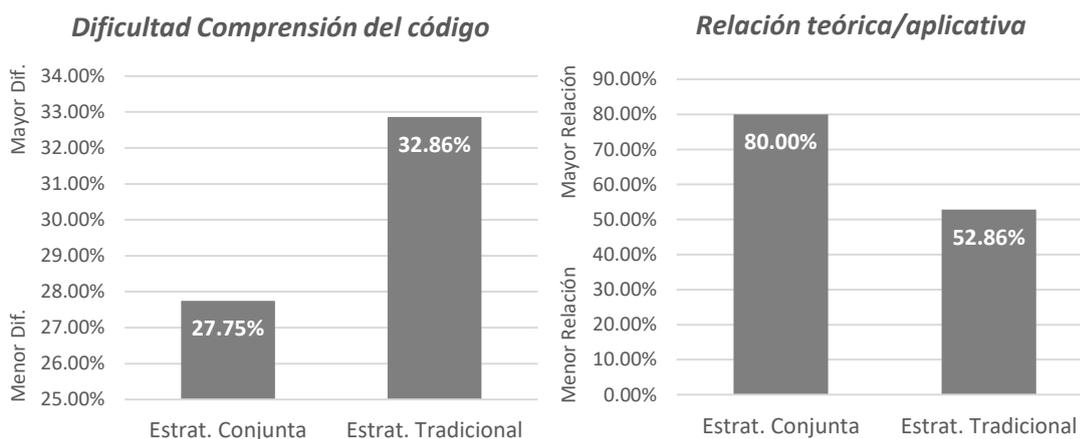
Enfoque de las metodologías



Simultáneamente se hizo el estudio de la dificultad en la comprensión del código bajo las dos metodologías, el cual se muestra en la primera gráfica de la figura 12. En dicha gráfica se aprecia que los estudiantes perciben una menor dificultad en la comprensión del código con la metodología presentada. Este resultado es de gran relevancia ya que la presentación del código para la metodología conjunta se aplica como una inclusión adicional para la comprobación de resultados. Lo anterior se diferencia en gran medida a la estrategia tradicional dedicando gran parte del tiempo en la comprensión/comprobación del código y aun así presentando una mayor dificultad en el entendimiento por parte de los estudiantes.

Figura 12

Dificultad del código – Relación teórica/aplicativa

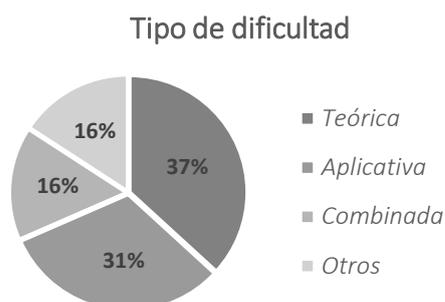


Otro enfoque a comprobar en los resultados fue la relación teórica/aplicativa percibida por los estudiantes para ambas metodologías (Gráfica 2. Figura 12). En los resultados se muestra que la estrategia conjunta relaciona en mayor medida la parte teórica con la aplicativa. Este resultado demuestra el cumplimiento del enfoque abordado por la estrategia desarrollada.

Finalmente, y de forma adicional, se cuestionó a los estudiantes acerca de la mayor dificultad presente en la comprensión del MEF desde su punto de vista, se obtuvieron resultados diversos, los cuales se pueden agrupar en categorías concretas mostradas en la figura a continuación.

Figura 13

Dificultad del código – Relación teórica/aplicativa



5. Conclusiones

La aplicación del MEF ha demostrado tener una complejidad en su comprensión, esto debido no solo al tema de cálculos que lo envuelven si no al enfoque con el que se aborda dicho tema. Como respuesta a la problemática se presentó una estrategia conjunta de aprendizaje, involucrando tanto la parte teórica como aplicativa, con resultados positivos en favor de una mayor aceptación del estudiante. Dichos resultados concluyen que la estrategia implementada en esta investigación estimula más y favorece a la comprensión de los estudiantes. De igual manera, disminuye la dificultad en la comprensión del código para estudiantes con diversos grados y tipos de conocimiento en lenguajes de programación

En caso de implementar la metodología en cursos o publicaciones se especificaron los pasos a seguir para una correcta aplicación, todo esto con base en una secuencia de procesos cuyo fin es lograr la mayor correlación entre las bases teóricas y aplicativas del MEF.

Adicionalmente, el estudio realizado respecto a las dificultades que presenta el estudiante mostró una mayor área de dificultad en la parte teórica, lo cual puede deberse a factores como la metodología de enseñanza del docente. Para una mayor evaluación de esta respuesta, se necesitaría un estudio más detallado que comprenda una mayor área de muestreo, algo que se espera en un futuro.

Finalmente, con base en el estudio realizado se comparte la premisa abordada en diversas publicaciones, respecto a la poca importancia pre-profesional que se le otorga al aprendizaje de un método usado profesionalmente en casi todo el software computacional de análisis estructural/sólidos.

6. Referencias Bibliográficas

Alvarez Ruffrán, J. E. (2019). Análisis aplicativo del método de los elementos finitos en un campo

estático-lineal e introducción a la no linealidad.

Bang, H., y Kwon, Y. W. (2000). *The finite element method using MATLAB*. CRC press.

Farmaga, I., Shmigelskyi, P., Spiewak, P., y Ciupinski, L. (2011). Evaluation of computational complexity of finite element analysis.

Hooshyar, D., Ahmad, R. B., Md Nasir, M. H. N., Shamshirband, S., y Horng, S. J. (2015). Flowchart-based programming environments for improving comprehension and problem-solving skill of novice programmers: A survey. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 7(1), 24–56. <https://doi.org/10.1504/IJAIP.2015.070343>

Joyanes Aguilar, L. (2003). Fundamentos de programación: algoritmos y estructura de datos y objetos.

Milton-Benoit, J., Grosse, I. R., Poli, C., y Woolf, B. P. (1998). The multimedia finite element modeling and analysis tutor. *Journal of Engineering Education*, 87(S5), 511–517.

Oñate, E. (2009). *Structural Analysis with the Finite Element Method*. Linear Statics. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8733-2>

Oñate, E. (2013). *Structural analysis with the finite element method*. Linear statics. Springer Science y Business Media.

Rao, A. M. (2019). Applications of finite elements method (FEM) -An Overview Abstract (December 2012). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36294.42565>

Reddy, J. N. (1993). *An introduction to the finite element method*. New York, 27.

Werkle, H. (2008). *Finite Elemente in der Baustatik: Statik und Dynamik der Stab-und Flächentragwerke*. Springer-Verlag.

Zienkiewicz, O. C., y Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., y Zhu, J. Z. (2005). *The finite element method: its basis and fundamentals*. Elsevier.