

Universidad Nacional Autónoma de México



Facultad de Ingeniería

“Métodos para Interconectar Mallas de Elementos Finitos
empleadas en Análisis Estructurales”

Tesis

Para obtener el Título de
Maestro
(Área Mecánica)

Presenta

Alejandro Pons Juárez

Director de Tesis

Dr. Álvaro Ayala Ruiz



Ciudad Universitaria, México D.F. Junio de 2010

A mi Corazón Gigante:

Mi Hija Jimena

...

“Y en mis Sueños un Ángel me viene a Platicar
Que el Corazón Gigante logró llegar”

...

Autor: Reyli/Raúl Ornelas

A mi Compañera de Vida:

Mi Esposa Selvy

Contigo he aprendido a disfrutar y afrontar nuestra vida de una manera e intensidad que nunca imaginé. Tu amor, sensibilidad y compromiso me han ayudado a afrontar la lección de vida que implica la discapacidad de Nuestro “Corazón Gigante”.

Contenido

Introducción	1
Antecedentes	1
Definición del Problema	2
Hipótesis	2
Objetivos	3
Alcances	3
Organización del Trabajo	3
Capítulo I	
Análisis por Elementos Finitos (FEA)	4
I.1. Introducción	4
I.2. Descripción del Análisis por Elementos Finitos	4
I.3. Proceso General de un FEA Estructural	5
I.4. Establecimiento de los Objetivos del FEA	6
I.5. Información del Diseño a Evaluar	8
I.6. Pre-proceso	9
I.6.1. Tipos de Modelos de Elementos Finitos	10
I.6.1.1. MEF Unidimensionales (1D)	11
I.6.1.2. MEF Bidimensionales (2D)	12
I.6.1.3. MEF Tridimensionales (3D)	13
I.6.2. Discretización (mallar) de Geometría con EF	15
I.6.3. Asignación de Propiedades al EF	15
I.6.4. Interacción entre Mallas	15
I.6.4.1. Interconexión de Mallas con EF	16
I.6.4.2. Condiciones de Frontera de Contacto (CFC)	16
I.6.4.3. Interacciones con EF y CFC	17
I.6.5. Materiales	18
I.6.6. Condiciones de Frontera	19
I.6.6.1. Restricciones de Movimiento	19
I.6.6.2. Cargas	20
I.6.7. Tipo de Solución a Ejecutar	21
I.6.8. Variables a Calcular	21
I.7. Procesamiento	22
I.8. Post-proceso	22

Capítulo II	
Métodos Propuestos para Interconectar Mallas de FEA Estructurales	23
II.1. Introducción	23
II.2. Métodos Propuestos para Interconectar Mallas conformadas por EF shells de FEA Estructurales	23
II.2.1. Método de Interconexión usando EFUI	23
II.2.2. Método de Interconexión usando EFBI	24
Capítulo III	
Caso de Estudio	27
III.1. Introducción	27
III.2. Descripción del Caso de Estudio	27
III.2.1. Definición de Parámetros de Evaluación	29
III.3. Interconexión Unidimensional	33
III.3.1. Proceso Manual Sin Modificar Malla Azul	33
III.3.2. Proceso Manual Modificando Malla Azul	33
III.3.3. Proceso Semiautomático	34
III.3.4. Proceso Propuesto	34
III.4. Interconexión Bidimensional	35
III.4.1. Proceso Manual Modificando Malla Azul	35
III.4.2. Proceso Propuesto	35
Capítulo IV	
Resultados del Caso de Estudio	37
IV.1. Introducción	37
IV.2. Resultados de los Procesos de Interconexión Unidimensional	37
IV.2.1. Proceso Manual Sin Modificar Malla Azul	37
IV.2.2. Proceso Manual Modificando Malla Azul	40
IV.2.3. Proceso Semiautomático	43
IV.2.4. Proceso Propuesto	46
IV.2.5. Comparativo de Resultados	49
IV.3. Resultados de los Procesos de Interconexión Bidimensional	50
IV.3.1. Proceso Manual	50
IV.3.2. Proceso Propuesto	53
IV.3.3. Comparativo de Resultados	56
Conclusiones	57
Referencias	58

Introducción

I. Antecedentes

Las evaluaciones estructurales mediante el uso del método numérico de elementos finitos son ampliamente realizadas en el contexto de la industria dentro del ciclo de diseño de nuevos productos o rediseño de los ya existentes. En el ámbito de la ingeniería asistida por computadora, **CAE** por sus siglas en inglés, los estudios hechos con este método numérico se les conoce simplemente como análisis por elementos finitos, **FEA** en adelante.

Los modelos de elementos finitos (**MEF**) deben representar fielmente la geometría del producto a evaluar, el cual puede contener varias piezas, en cuyo caso se considera que conforma un ensamble. Por lo general, esto implica que dichos modelos sean complejos de elaborar desde el punto de vista del modelado geométrico, y demanden la mayor parte del tiempo hombre-máquina de un **FEA**.

Los programas comerciales de pre-procesamiento de **MEF** cuentan con algoritmos de mallado que el analista puede usar en forma automática y semiautomática para crear múltiples mallas simultáneamente a partir de geometrías, tales como volúmenes, superficies y líneas, o bien, usando nodos o elementos. Incluso, algunos de ellos ofrecen algoritmos de mallado topológicos y adaptativos. En el caso del primero, escala las mallas sin modificar la geometría utilizada para crearlas. El segundo, lleva a cabo una actualización automática de las mallas cuando las entidades geométricas son modificadas desde el programa **CAD**.

No obstante la gran oferta de programas comerciales de pre-procesamiento, y en particular del pre-procesador *HYPERMESH*, persiste la tediosa y lenta tarea de interconectar las mallas de un **MEF**, las cuales se pueden llevar a cabo por medio de elementos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. Estas uniones de mallas, tienen la finalidad de crear interacciones entre ellas. En el caso de los estudios estructurales, dichas interacciones consisten, por lo general, en la transferencia de cargas mecánicas a través de juntas atornilladas, uniones soldadas, uniones con pegamentos, etc.

El pre-procesador comercial *HYPERMESH* cuenta con procesos semiautomáticos de interconexión de mallas mediante el uso de elementos finitos unidimensionales, pero ninguno para el caso de elementos bidimensionales o *shells*.

Algunos de los procesos de interconexión que actualmente ofrece *HYPERMESH* generan hasta tres elementos unidimensionales de interconexión entre los dos nodos más próximos de las mallas a unir, siendo solamente uno de éstos perpendicular a una de las mallas. Los elementos no perpendiculares abarcan un área mayor que no es representativa de la unión real, lo cual impacta

negativamente la distribución de esfuerzos en torno a la unión. Adicionalmente, estos procesos requieren la selección de múltiples opciones antes de crear los elementos de interconexión, lo cual hace poco factible la estandarización de este proceso. Por ejemplo, las interconexiones podrán ser normales o no a una de las mallas a unir, el parámetro de búsqueda de los nodos a interconectar se define manualmente, se deben seleccionar nodos en ambas mallas a conectar, la selección de la configuración del elemento finito de interconexión es manual.

Algunos trabajos independientes han sido desarrollados recientemente para abordar las tareas de interconexión de mallas y estandarización de las mismas. Por ejemplo, Lou [12] abordó el trabajo de interconexión de mallas conformadas por elementos bidimensionales triangulares, Kang [13] desarrolló la metodología para mallar, modificar y conectar mallas de elementos triangulares con formas cilíndricas, Baptista [16] parametrizó el proceso de corte y remallado local de mallas conformadas por elementos tridimensionales de ocho nodos.

Si bien, los procesos de interconexión de mallas ofrecidos por *HYPERMESH* ayudan a agilizar estas tareas, los mismos distan mucho de estandarizarlas. En el mismo tenor se encuentran los procesos de interconexión manual, los cuales suelen ser lentos, laboriosos y con la variabilidad intrínseca de las técnicas, habilidades y juicios empleados por el ingeniero analista que lleva a cabo la elaboración del modelo de elemento finito. Por otra parte, los trabajos publicados no atienden el proceso de interconexión de mallas *shells* mediante el uso de elementos finitos unidimensionales ni tampoco bidimensionales cuadriláteros que sean perpendiculares a una de las mallas a interconectar.

II. Definición del Problema

Reducir la variabilidad de los actuales procesos de interconexión de mallas llevadas a cabo mediante elementos finitos unidimensionales y bidimensionales cuadriláteros (**EFUI**, **EFBI**). Mejorar la calidad de los **EF** en torno a las uniones de mallas, utilizando dos nuevos métodos para crearlas, que eliminen la definición manual de los parámetros de búsqueda de los nodos empleados para definir los elementos de interconexión, creando siempre un sólo **EFUI** o **EFBI** perpendicular a las mallas a unir, logrando con ello, una representación y distribución de esfuerzos más acordes a la parte física.

III. Hipótesis

Es posible crear dos nuevos métodos para generar automáticamente **EFUI** y **EFBI** perpendiculares a las mallas conformadas exclusivamente por elementos *shells*, utilizando la aplicación comercial *HYPERMESH*, brindando un proceso adicional para el caso de las interconexiones con elementos bidimensionales cuadriláteros, y otro con menor variabilidad, más robusto, y sencillo para el caso de las

interconexiones unidimensionales. Dichas mallas son comúnmente empleadas en evaluaciones estructurales de componentes mecánicos mediante **FEA**.

IV. Objetivos

Establecer las metodologías para automatizar la creación de **EFUI** y **EFBI** perpendiculares a las mallas de elementos *shells* empleadas en **FEA** estructurales. Reducir la variabilidad de los actuales procesos de interconexión. Mejorar la calidad de malla en torno a los elementos de interconexión.

V. Alcances

Desarrollar las metodologías para la creación de **EFUI** y **EFBI**.

Desarrollar la interface gráfica del usuario (**GUI**) para cada uno de los métodos propuestos, las cuales serán ejecutadas en el programa de pre-procesamiento *HYPERMESH*.

Resolver un caso de estudio.

Establecer propuesta de mejoras.

La teoría del método de elementos finitos y metodología de diseño de nuevos productos son tópicos que están fuera del alcance de este proyecto.

VI. Organización del trabajo

Para cumplir con los objetivos antes mencionados, el proyecto se organizó de la siguiente manera:

En la Introducción se enuncian los antecedentes, definición del problema, hipótesis, objetivos y alcances del este proyecto. En el capítulo I se describe el proceso general de un **FEA** aplicado a problemas del campo de mecánica de sólidos y estructurales. Los métodos propuestos para crear interconexiones de mallas con elementos finitos unidimensionales y bidimensionales (**EFUI**, **EFBI**) son expuestos en el capítulo II, en tanto que el caso de estudio empleado para mostrar la funcionalidad de las metodología de interconexión propuestas, es presentado en el capítulo III. En el capítulo IV se revisan los resultados obtenidos de los procesos de interconexión realizados en el caso de estudio. Se detallan las conclusiones y propuestas de mejoras del proyecto. Finalmente, la bibliografía y referencias consultadas para llevar a cabo este trabajo, se dan en la sección de referencias al final del documento.

CAPÍTULO I

Análisis por Elementos Finitos (FEA)

I.1. Introducción

El capítulo describe el proceso general de un **FEA** aplicado a problemas de campo de mecánica de sólidos y estructurales.

I.2. Descripción del Análisis de Elemento Finito

El análisis por elementos finitos (**FEA**) es una herramienta empleada para resolver diversos problemas de ingeniería, tales como electromagnéticos, termodinámicos, mecánica de fluidos y mecánica de sólidos, entre otros. Todos ellos, denominados problemas de campo, cuyo comportamiento está gobernado por ecuaciones diferenciales parciales.

Cuando no es posible obtener la solución exacta de ecuaciones diferenciales parciales, se recurren a métodos numéricos para hallar su solución aproximada, siendo el método numérico de elementos finitos el más comercializado y usado en la ingeniería.

En general, el **FEA** de cualquier problema de campo se divide en tres etapas:

- Pre-proceso: Creación del Modelo de Elementos Finitos (**MEF**).
- Procesamiento: Hallar la solución aproximada al problema de campo.
- Post-proceso: Revisión de los resultados

En el ámbito de la ingeniería asistida por computadora, **CAE** por sus siglas en inglés, los estudios hechos con el método numérico de elementos finitos se les conoce simplemente como **FEA**. Existe una gran cantidad de referencias bibliográficas [6, 7] que dan cuenta de la teoría del método de elementos finitos, la cual está fuera del alcance de este proyecto.

Los ingenieros analistas, también conocidos en el sector industrial como ingenieros **CAE**, manejan una serie de modismos y tecnicismos que son convenientes introducirlos en este momento con el fin de hacer más fluidas las siguientes secciones, éstos son:

Elemento finito (EF): Es una sección del medio continuo que resulta de subdividirlo en un número finito de regiones.

Nodo: Punto en el cual los diferentes **EF** se unen y en dónde las variables de interés son desconocidas (usualmente desplazamientos para los problemas de campo estructurales). Su ubicación espacial está determinada mediante pares o triadas de coordenadas.

Elemento lineal: **EF** que utiliza funciones de interpolación lineal. Se caracteriza por tener solamente dos nodos a lo largo de la orilla de los elementos.

Elemento cuadrático: **EF** que utiliza funciones de interpolación cuadrática. Se caracteriza por tener tres nodos a lo largo de la orilla del **EF**.

Grados de libertad: Son todos los posibles desplazamientos y translaciones que un nodo puede experimentar. Un nodo puede tener seis grados de libertad: tres traslaciones y tres rotaciones.

Malla: Conjunto de **EF** interconectados mediante sus nodos.

Mallar: Proceso de creación de mallas.

Modelo de Elementos Finitos (MEF): Conjunto de mallas, materiales y condiciones de frontera que representan el problema de campo a evaluar.

Modelado: Proceso de creación del **MEF**. Para el caso de problemas estructurales, este incluye todas las tareas pre-procesamiento de la figura 1.3.

Modelo: Abreviación de **MEF**.

Tipo de material: Término que se emplea para referirse a materiales con determinado comportamiento mecánico: elástico, elasto-plástico, etc.

Contacto: Condición de frontera que define la interacción entre dos mallas.

Restricciones: Condición de frontera que restringe el movimiento del modelo.

Cargas: En análisis estructurales representan condiciones de frontera que especifican fuerzas puntuales o uniformemente distribuidas sobre el **MEF**.

Tipo de solución: Término empleado para especificar la solución al problema de campo. Por ejemplo, modal, cuasi estática, estática no lineal, dinámica, etc.

Corrida: Término empleado para referirse a la etapa de procesamiento del **MEF**, la cual consiste en encontrar la solución aproximada al problema de campo.

El ingeniero analista puede llegar a requerir información de una o más fuentes para llevar a cabo un análisis. Para el caso específico de los **FEA** estructurales, el ingeniero **CAE** requiere de la intervención del ingeniero del producto, quien es propietario del diseño a evaluar. Sin embargo, es frecuente que ingenieros de otras especialidades y/o departamentos, como el ingeniero del departamento de materiales o de manufactura o incluso otros diseñadores, tengan que proveer información al ingeniero responsable del estudio.

I.3. Proceso General de un FEA Estructural

El proceso general de un **FEA** aplicado a problemas de campo de mecánica de sólidos y estructurales se presenta esquemáticamente en la figura 1.3. No obstante, la mayor parte del proceso aquí expuesto puede ser aplicado a otros problemas de campo.

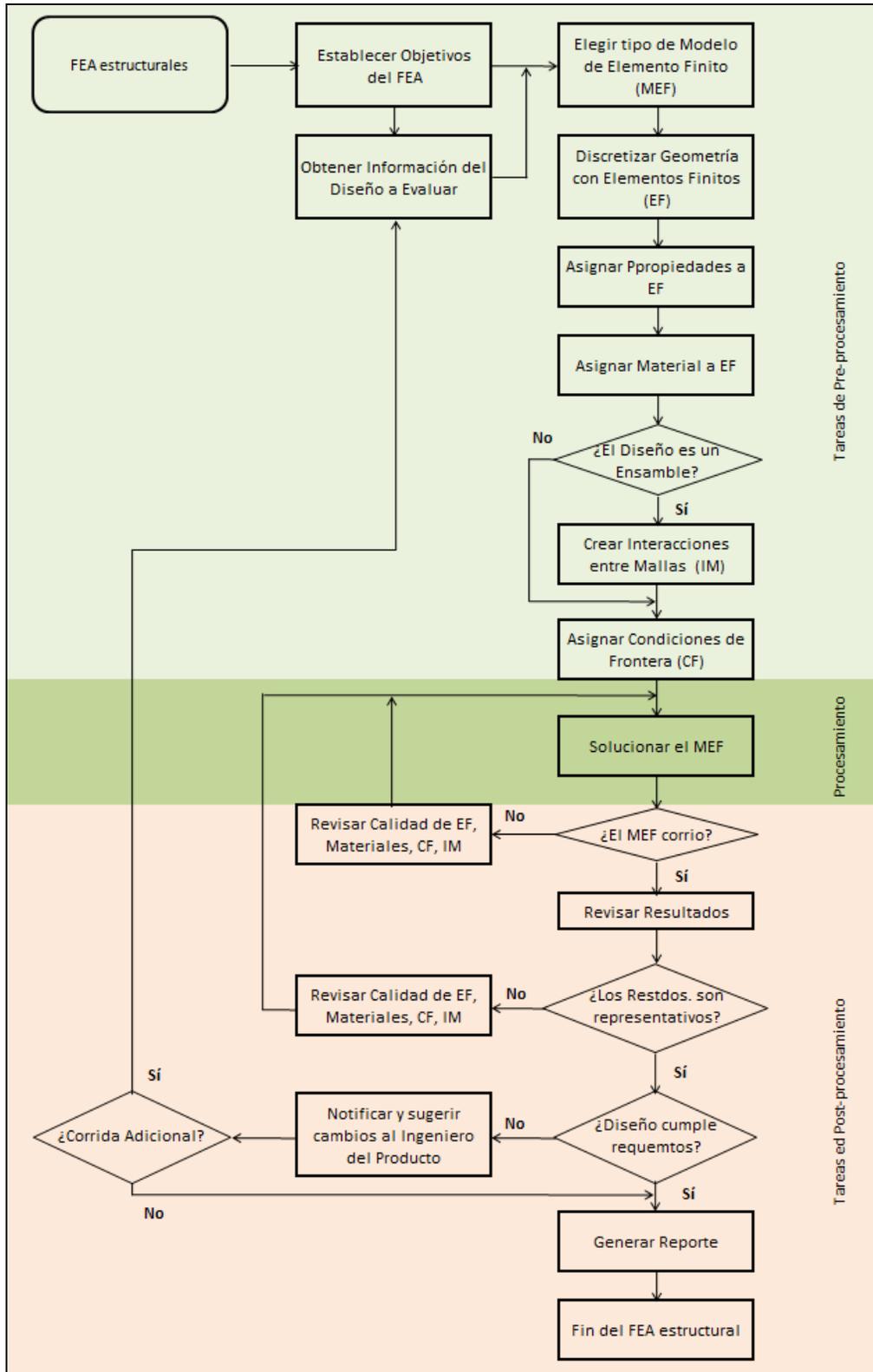


Figura 1.3. Proceso general de un FEA estructural.

Los análisis estructurales por elementos finitos son ampliamente realizados en la industria dentro del ciclo de diseño de nuevos productos o rediseño de los ya existentes. Con ellos, los ingenieros tienen la gran ventaja de poder evaluar diseños conceptuales sin necesidad de fabricarlos, y predecir posibles modos de fallas de los mismos.

El método numérico de elementos finitos y su aplicación práctica materializada en los **FEA** estructurales mediante uso de programas comerciales, son tan flexibles y poderosos, que es posible estudiar diseños con geometrías y condiciones de frontera complejas con múltiples componentes y materiales. En contraste con los métodos exactos, cuya aplicación se limita a geometrías y condiciones de frontera sencillas.

La predicción del comportamiento estructural de un nuevo producto se hace en las etapas tempranas del diseño. Sin embargo, la aplicación de los **FEA** no se limita a las fases conceptuales del mismo, y es comúnmente utilizado en las tareas de rediseño y remediaciones de productos existentes, a los que se les requiere adecuar su desempeño estructural.

Los **FEA** son generalmente realizados por ingenieros especializados en la materia, quienes brindan soporte al equipo de ingeniería del producto. Por lo tanto, el ingeniero diseñador y el ingeniero **CAE** deben trabajar conjuntamente para que este último obtenga la información necesaria del diseño a evaluar, y el primero, materialice las modificaciones al diseño que el analista le sugiera para que el producto cumpla con las especificaciones técnicas del mismo, en caso de que el primer intento de diseño no las cumpliera.

I.4. Establecimiento de los Objetivos del FEA

En las etapas iniciales de un estudio estructural usando el **FEA**, se determinarán las variables a evaluar, y al mismo tiempo, le permitirán al ingeniero analista empezar a determinar el nivel de detalle que el **MEF** tendrá para ese estudio en particular.

En esta parte del proceso del **FEA**, el ingeniero **CAE** debe entender el comportamiento físico del problema para establecer acertadamente los objetivos del estudio en ejecución.

Invariablemente, los objetivos del **FEA** estarán determinados por las especificaciones técnicas de desempeño del producto, pero también por las limitantes de los programas comerciales de elemento finito empleados y de la información disponible del diseño. Ejemplos de éstas limitantes, se darán a continuación.

Por ejemplo, las especificaciones técnicas de desempeño estructural que deben cumplir los soportes del tren motriz de un vehículo son desplazamientos verticales máximos permitidos bajo la condición más severa de operación, rigidez mínima de los soportes en direcciones específicas, frecuencia natural mínima de cada soporte y tiempo de vida útil de los mismos en términos de kilometraje recorrido por el vehículo.

Ejemplos de limitantes atribuidas a los programas comerciales de elementos finitos son la predicción de esfuerzos empleando exclusivamente las propiedades elásticas del material o la imposibilidad de representar condiciones de frontera de contacto entre las mallas del modelo.

Las tolerancias geométricas de un nuevo diseño, las propiedades mecánicas y/o térmicas de los materiales elegidos para un diseño en particular, el valor y dirección de las cargas mecánicas a las que será sometido el producto, son ejemplos de la información del diseño, cuya disponibilidad afectará la definición de los objetivos del **FEA** estructural.

En general, las variables de campo que pueden ser calculadas en un estudio estructural son: esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, reacciones y frecuencias modales. En algunos otros casos, denominados de campos acoplados, es posible calcular adicionalmente a lo anterior gradientes de temperatura.

I.5. Información del Diseño a Evaluar

El ingeniero diseñador deberá proporcionar la información referente al producto al ingeniero **CAE** para que éste pueda efectuar el análisis por elementos finitos del mismo. Por lo general, esta información consiste en lo siguiente:

- Planos de fabricación del diseño.
- Geometría del diseño en dimensiones nominales, que incluya la geometría de las piezas con las cuales se va a ensamblar el mismo.
- Material o materiales del que está compuesto el diseño.
- Condiciones de operación.
- Información de análisis previos o de pruebas o fallas en campo del diseño, si es que éstas existiesen.
- Requerimientos técnicos de desempeño estructural no especificados en dibujos o en las condiciones de operación del producto, tales como esfuerzo o deformación máxima, frecuencia natural mínima, etc.

Los planos de fabricación del diseño aglutinan todas las especificaciones técnicas de fabricación de éste. Proporcionan las dimensiones nominales del producto (**NMC**), así como sus tolerancias geométricas. Especifica también los materiales con los que se fabricará el diseño, y tratándose de diseños viejos, brinda la historia

sobre cambios al mismo. Desafortunadamente, en las etapas tempranas de nuevos diseños, es común no contar con esta información, por lo que el ingeniero de producto deberá entregar dicha información al ingeniero analista conforme la va generando.

La geometría del diseño debe reflejar fielmente la forma y dimensiones del mismo para garantizar que ensamble correctamente con todos los elementos con los que interactúa. Generalmente, la geometría utilizada por el ingeniero **CAE** está en **NMC**. En productos complejos tales como aviones, electrodomésticos o automóviles, los diseños suelen subdividirse por sub-ensambles, a los cuales típicamente se les denomina sub-sistemas. Así, por ejemplo, un vehículo, puede subdividirse en subsistemas tales como carrocería, tren motriz, suspensión, dirección, etc.

Los materiales a utilizar en el **FEA** estructural serán los especificados en los planos de fabricación. En caso de que no se cuente con la información necesaria, el diseñador deberá indicarle al ingeniero analista qué material o materiales preliminares debe usar.

Las condiciones de operación del diseño darán al ingeniero **CAE** la información necesaria para determinar parcial o totalmente las condiciones de frontera (**CF**) a definir en el modelo de elementos finitos. Estas últimas se subdividen en restricciones de movimiento y cargas.

Contar con Información de análisis previos o de pruebas o fallas en campo del diseño, si es que éstas existiesen, ayudarán al ingeniero analista a definir más puntualmente el **MEF**, o a entender el mecanismo de falla no previsto en el diseño.

Toda la información previamente descrita en este apartado, conjuntamente con los requerimientos técnicos de desempeño estructural no especificados en dibujos o en las condiciones de operación del producto, tales como esfuerzo o deformación máxima, etc., conforman las especificaciones técnicas del diseño que el ingeniero analista deberá solicitar, manejar y entender para ejecutar eficaz y eficientemente un **FEA** estructural.

I.6. Pre-proceso

Las tareas de pre-procesamiento de los **FEA** se llevan a cabo, generalmente, con la ayuda de programas comerciales, los cuales pueden estar o no integrados al solucionador y al post-procesador. Ejemplos de programas totalmente integrados son ANSYS, ABAQUS, NX NASTRAN y HYPERWORKS.

Los **MEF** deben ser creados conforme al formato de un programa de procesamiento (solucionador) en particular. En el caso de que los programas de pre y procesamiento estén integrados, el ingeniero **CAE** no tiene que hacer

ninguna tarea adicional al completar el modelo. Pero, cuando el pre-procesador y el solucionador no están integrados, es decir, que el desarrollador de ambos programas no es el mismo, el ingeniero analista tiene que asegurarse de que el modelo cumpla con todos los requerimientos que establece el solucionador, para que la corrida pueda llevarse a cabo. De lo contrario, el proceso de solución se detendrá durante la fase de revisión de sintaxis del modelo.

Al completar las tareas de pre-procesamiento de un **FEA**, el modelo estará listo para procesarse o “correrse”, como comúnmente los ingenieros **CAE** se refieren a la etapa del **FEA** en la que se encuentra la solución aproximada al problema de campo.

Es altamente recomendable hacer una revisión del **MEF** antes de hacer la corrida del mismo. Esto con la finalidad de verificar que el modelo esté libre de problemas, tales como mala calidad de los elementos, tipo de elemento incorrecto, falta de conectividad entre elementos (grietas en las mallas), materiales incorrectamente definidos o asignados, incompatibilidad en los grados de libertad entre nodos de diferentes tipos de elementos, definición incorrecta de condiciones de frontera o incorrecta elección del tipo de solución, entre muchos otros.

Para considerar que un modelo de elementos finitos está completo y listo para correrse, éste deberá tener lo siguiente:

- Elementos, cuyo conjunto formarán la malla o mallas que deberán representar fielmente la geometría del diseño (medio continuo).
- Propiedades de los **EF** empleados en cada una de las mallas.
- Interacción entre mallas, si hubiese más de una malla en el **MEF**.
- Condiciones de Fronteras.
- Tipo de solución a ejecutar.
- Variables a calcular.

I.6.1. Tipos de Modelos de Elementos Finitos

Los diferentes tipos de modelos de elementos finitos (**MEF**) que se utilizan en un análisis estructural se pueden agrupar en tres categorías:

- **MEF** Unidimensionales (**1D**)
- **MEF** Bidimensionales (**2D**)
- **MEF** Tridimensionales (**3D**)

El uso de uno u otro tipo de modelo está estrechamente ligado con la geometría del diseño, la física del problema de campo, de las simplificaciones factibles a la geometría y condiciones de frontera, así como también de los objetivos del **FEA**.

Sin embargo, actualmente es común encontrar **MEF** híbridos que incluyen modelos **1D** y **3D** con la finalidad de simplificar o detallar el medio continuo en secciones específicas. Por ejemplo, en la industria automotriz es común la creación de **MEF** que tienen una mezcla de modelos unidimensionales y tridimensionales para representar juntas atornilladas entre componentes laminados y de fundición.

La flexibilidad de combinar diferentes tipos de modelos puede originar incompatibilidades numéricas entre los **EF** usados, acarreando como consecuencia, resultados incorrectos o que simplemente el modelo genere errores por no pasar las revisiones de sintaxis durante la ejecución del solucionador del mismo.

Las figuras 1.6.1.2 y 1.6.1.4, muestran ejemplos de los **MEF 2D** e híbrido, respectivamente.

A continuación se describen las principales características de los diferentes **MEF**.

I.6.1.1. MEF Unidimensionales (1D)

Los **MEF** unidimensionales (**1D**) están conformados por elementos que tienen solamente dos nodos. Gráficamente lucen como una línea recta, pero numéricamente poseen, por lo general, valores que hacen referencia a su sección transversal, momentos de inercia de la misma y material con el que está fabricado el sólido. Al conjunto de todos estos valores se les denomina propiedades del elemento finito.

Los componentes mecánicos estructurales con geometrías simples y uniformes, tales como resortes, vigas con sección transversal circular o cuadrada, sólidas o tubos, en "C", "L" o en "I", pueden representarse fácil, económica y rápidamente usando **EF 1D**. Ellos pueden tener como propiedades, rigidez para el caso de resortes, o bien, dimensiones y propiedades geométricas de la sección transversal, tales como alto, ancho, radio, área, momentos de inercia, etc.

Los nodos pertenecientes a **MEF 1D** pueden tener de uno a seis grados de libertad, siendo estas traslaciones y rotaciones.

La desventaja de este tipo de modelos radica en la falta de resolución en las áreas donde se esperan grandes cambios en los gradientes de deformación debido a factores geométricos (concentradores de esfuerzos). Estas deficiencias pueden subsanarse usando **MEF** bidimensionales, tridimensionales o híbridos.

I.6.1.2. MEF Bidimensionales (2D)

Los **MEF** bidimensionales (**2D**) están conformados por elementos triangulares y cuadriláteros, con tres y cuatro nodos respectivamente para los elementos con ecuaciones de interpolación lineales. Estos modelos trabajan exclusivamente en el plano. Los **MEF 2D** pueden subdividirse en tres categorías:

- Modelos 2D axis-simétricos.
- Modelos 2D de deformaciones planas.
- Modelos 2D de esfuerzos planos.

Los nodos pertenecientes a los modelos axis-simétricos tienen tres grados de libertad (dos traslaciones y una rotación), mientras los dos modelos restantes poseen solamente dos grados de libertad (traslaciones). En la referencia [4] es posible estudiar y conocer las características de los problemas planos desde el punto de vista de la teoría de elasticidad que dieron origen a este tipo de **MEF**.

La figura 1.6.1.2 muestra el caso de un sello o-ring en una flecha así como la caja del mismo. Este tipo de geometrías tridimensionales al contar con un eje de giro, que es de hecho también el de simetría, pueden simplificarse usando un **MEF 2D** axis-simétrico. En este modelo, la malla en color azul representa la sección transversal del sello, mientras que los elementos **1D**, simulan la flecha y caja, respectivamente. A todos estos elementos se les deberá asignar propiedades axis-simétricas para que el modelo se resuelva apropiadamente.

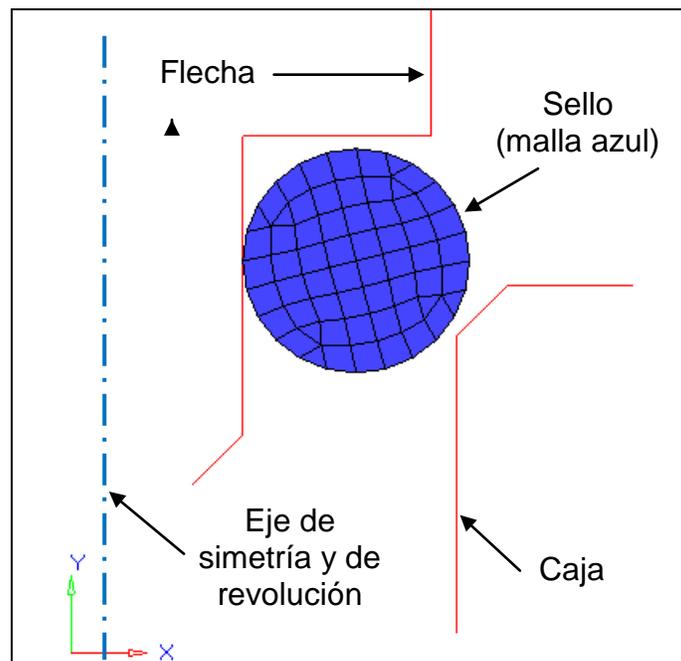


Figura 1.6.1.2. Ejemplo de **MEF 2D** axis-simétrico: O-ring con flecha y caja.

I.6.1.3. MEF Tridimensionales (3D)

Los **MEF** tridimensionales (**3D**) están conformados por elementos llamados *shells* y elementos sólidos. La geometría de los elementos *shells* son triángulos y cuadriláteros, con tres y cuatro nodos respectivamente para elementos con ecuaciones lineales de interpolación. Mientras que las geometrías de los elementos sólidos pueden ser tetraedros y prismas con cuatro, seis y ocho nodos para los elementos lineales.

Los modelos tridimensionales son utilizados para evaluar problemas complejos desde el punto de vista geométrico y operacional. Generalmente, este tipo de geometrías solamente llegan a tener simetría cíclica (axis-simétrica), por lo que el modelo más simple seguirá siendo tridimensional. La figura 1.6.1.3 muestra un ejemplo de geometría cíclica (axis-simétrica). Usando estos modelos, es posible crear mallas que capturen detalles geométricos de zonas que son concentradores naturales de esfuerzos, tales como radios, barrenos, soldaduras, etc.

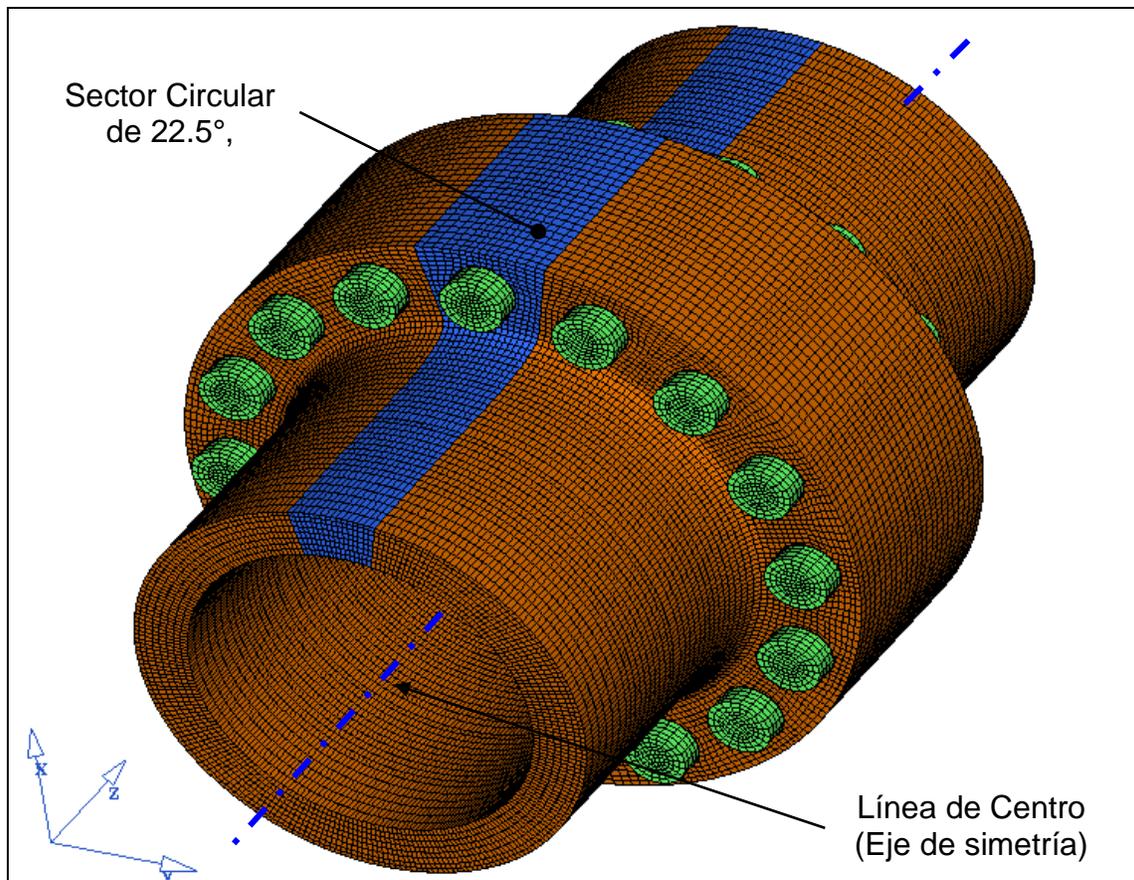


Figura 1.6.1.3. **MEF 3D** con geometría cíclica: brida conformada por 16 sectores circulares de 22.5° cada uno.

En el capítulo 3 del libro “Advanced Strength and Applied Elasticity” [4], el autor describe las características de los problemas de geometría simétrica con respecto a un eje desde el punto de vista de la teoría de elasticidad que dieron origen a este tipo de **MEF**.

Dependiendo del tipo de elementos que tenga el **MEF 3D**, sus nodos pueden llegar a tener seis grados de libertad cuando ellos pertenezcan a elementos unidimensionales o *shells* (tres traslaciones y tres rotaciones) y tres solamente cuando se tratan de elementos sólidos (traslaciones), respectivamente.

El **MEF 3D** híbrido mostrado en la figura 1.6.1.4 contiene elementos finitos unidimensionales (formados por dos nodos), bidimensionales (formados por cuatro nodos) y tridimensionales (formados por ocho nodos). En este ejemplo, la interacción entre las mallas que conforman dicho modelo se llevan a cabo con elementos de interconexión unidimensionales y tridimensionales.

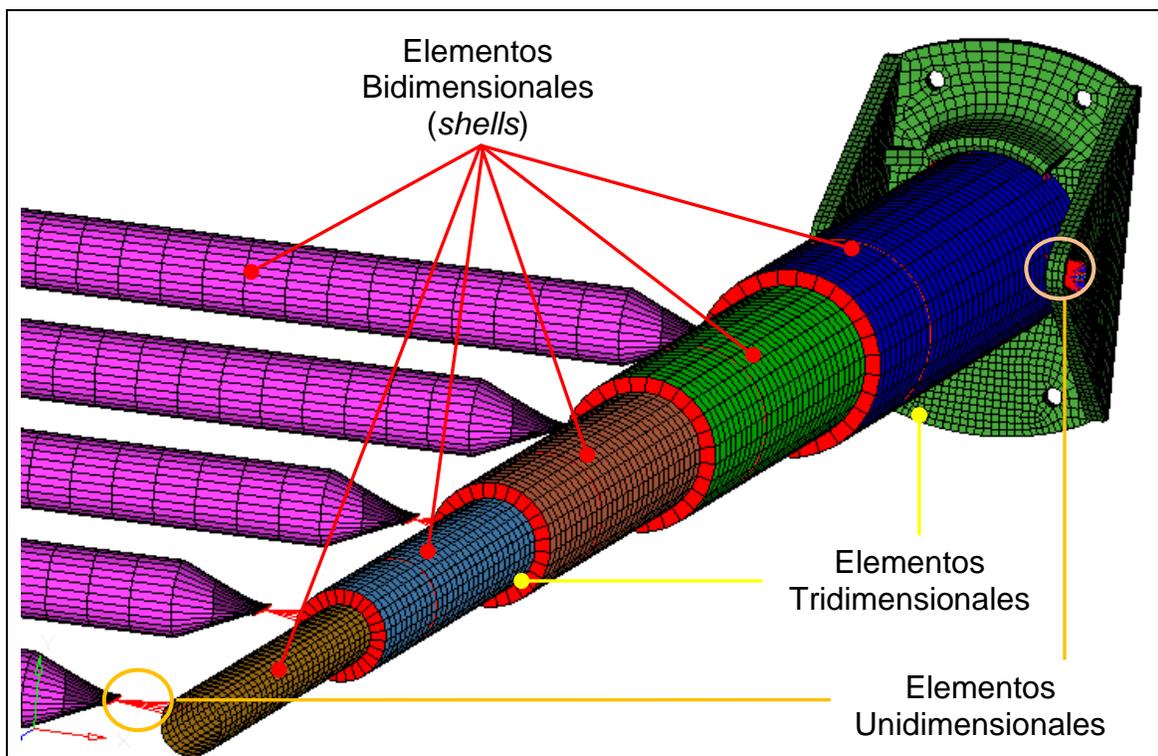


Figura 1.6.1.4. **MEF 3D** híbrido.

I.6.2. Discretización (mallar) de Geometría con EF

Al proceso de dividir la geometría del diseño a evaluar con elementos finitos, se le conoce como discretización del medio continuo. Al conjunto de **EF** interconectados que conforman una sola región se les denomina simplemente malla.

Las mallas de **EF 1D**, **2D** y **3D** se pueden crear semiautomática o automáticamente utilizando líneas, superficies y volúmenes, respectivamente. Pero también, manualmente, usando nodos previamente definidos.

I.6.3. Asignación de Propiedades al EF

Cada **EF** tiene asignada una propiedad en particular en función del tipo de modelo de elemento finito. Con ellas, los solucionadores identifican y manipulan correctamente los diferentes tipos de elementos sin riesgo de confundirlos. Por ejemplo, un elemento cuadrilátero puede ser utilizado en un **MEF** bidimensional (esfuerzos planos, deformaciones planas o axis-simétrico) o tridimensional. Sin embargo, la propiedad que se le asigne determinará el tipo de **MEF** a emplearse en el **FEA** estructural.

I.6.4. Interacción entre Mallas

Cuando un modelo de elementos finitos (**MEF**) tiene dos o más mallas, el ingeniero analista debe definir las reglas de cómo esas mallas tienen que interactuar entre ellas para que el **FEA** reproduzca lo más fielmente posible el comportamiento mecánico del diseño objeto de estudio. Su definición representa una de las etapas más demandantes en términos de tiempo de modelado, ya que es un proceso con un alto porcentaje de trabajo manual.

Las interacciones entre mallas se usan para transmitir fuerzas y reacciones, las cuales suceden en situaciones tales como contacto entre cuerpos, uniones soldadas, uniones de tornillos, uniones remachadas, uniones con pegamentos etc.

Existen tres formas de definir las interacciones entre mallas: Interconectándolas con **EF**, definiendo condiciones de frontera de contacto, y una combinación de las dos anteriores. La selección de una u otra dependerán de factores tales como objetivos del **FEA**, funcionalidades del procesador o solucionador empleado, capacidades del equipo de cómputo, tiempo para efectuar el estudio, disponibilidad de propiedades de materiales, entre otros.

I.6.4.1. Interconexión de Mallas con EF

El uso de **EF** unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales para interconectar mallas, es una de las técnicas más comunes para generar interacciones entre ellas. Esta opción es la más fácil y económica en términos de tiempo de solución. Pero también, es uno de los procesos más demandantes para el ingeniero en términos de modelado, ya que todas estas tareas suelen hacerse manualmente.

Los elementos finitos unidimensionales de interconexión (**EFUI**) se pueden usar para representar un tornillo, mientras que los tridimensionales son utilizados, por ejemplo, para modelar detalladamente la geometría de un cordón de soldadura.

La interconexión de mallas en un **FEA** estructural se lleva a cabo para transmitir fuerzas a través de ellas. El uso de uno u otro elemento de interconexión tendrá su impacto local en los valores de esfuerzos y deformaciones, y muy probablemente también en el comportamiento del sistema completo. Por lo tanto, el ingeniero **CAE** tendrá que ponderar los costos beneficios de seleccionar el tipo de elemento de interconexión para un problema dado. La figura 1.6.1.4 muestra el uso de **EF** unidimensionales y tridimensionales para interconectar mallas.

I.6.4.2. Condiciones de Frontera de Contacto (CFC)

Estas condiciones se definen sobre orillas, áreas o superficies de mallas. En un **FEA** estructural, ellas representarán una barrera física entre las subregiones seleccionadas, y su utilización hará que se produzca la transmisión de fuerzas y reacciones entre las mallas que representan la geometría del problema de campo.

Las interacciones consisten básicamente en definir las reglas del tipo de problema de contacto entre las superficies involucradas. Estas reglas pueden resumirse con los siguientes puntos:

- Tipo de contacto:
 - Deslizante o sin deslizamiento.
 - Con separación o sin separación de superficies.
 - Para aplicar precarga de tornillo.
 - De nodo a nodo.
 - De nodo a superficie.
 - De superficie a superficie.
 - Con o sin penetración de alguna de las superficies.
 - Pequeños o grandes desplazamientos tangenciales.
 - Con superficie de contacto indeformable.
- Fricción.
 - Con o sin fricción.
 - Tipo de fricción.

La definición de las condiciones de frontera de contacto entre mallas es un proceso con un alto porcentaje de trabajo manual.

I.6.4.3. Interacciones con EF y CFC

Otra técnica para generar la transferencia de fuerzas y reacciones entre mallas es usando una combinación de **EF** y **CFC** en los lugares más apropiados para ello.

En la figura 1.6.4.3 se muestra el **MEF** que representa el diseño mecánico compuesto por un par de tubos de acero soldados entre ellos, y un buje de nylon que debe ser deslizado dentro de uno de los tubos durante el proceso de ensamble del mismo.

La interacción entre las mallas del tubo 1 y del tubo 2, la cual es físicamente un cordón de soldadura, es modelada usando elementos finitos unidimensionales de interconexión. La interacción entre la malla del tubo 1 y la malla del buje se lleva a cabo mediante el uso de condiciones de frontera de contacto (CFC), ya que esta es la zona donde se pretende conocer el comportamiento estructural a detalle cuando el buje se desliza dentro del tubo, durante el proceso de ensamble de estos componentes mecánicos.

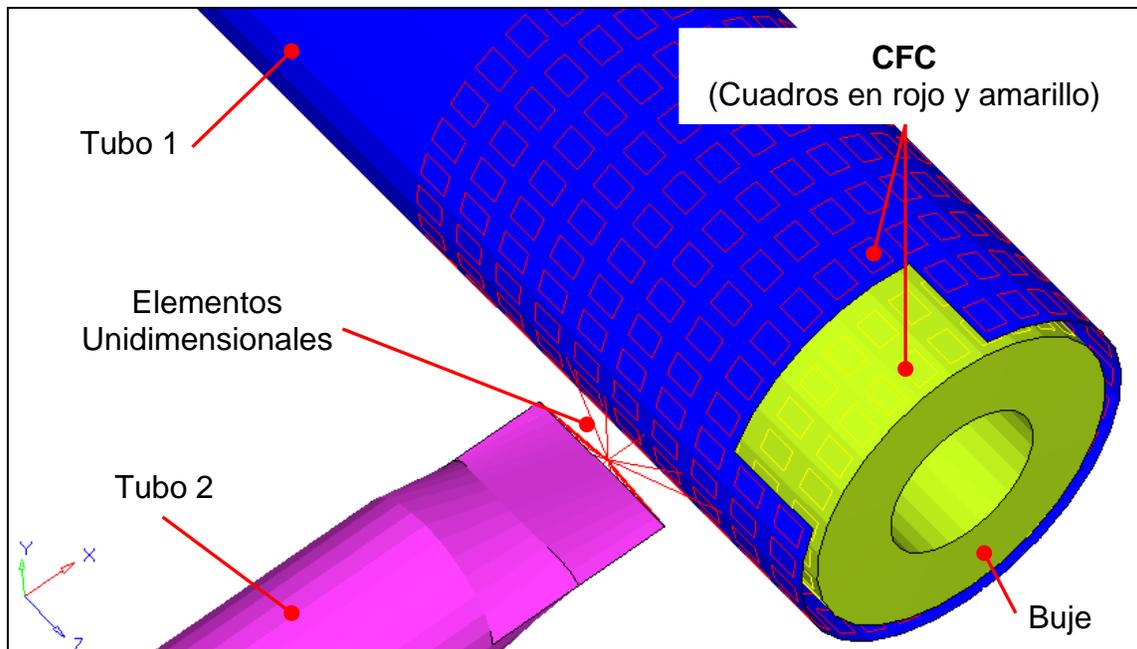


Figura 1.6.4.3. Ejemplo de interacción entre mallas usando elementos finitos (EF) y condiciones de frontera de contacto (CFC).

I.6.5. Materiales

Si bien, el ingeniero del producto es quien determina las características del diseño, frecuentemente sucede que él no tiene las propiedades mecánicas del mismo. Por lo tanto, el ingeniero **CAE** o del producto deben conseguir dichas propiedades con el ingeniero de materiales o bien directamente con el proveedor del mismo.

Desde el punto de vista de la mecánica de sólidos, el comportamiento mecánico de un material bajo una carga estática a tensión puede clasificarse en:

- Elástico lineal
- Elasto-plástico
- Híper-elásticos

La selección del tipo de material a usar en un **FEA** estructural está directamente ligada con la naturaleza del problema de campo y con los objetivos del análisis. La descripción de los siguientes tres casos ejemplifican la selección del tipo de material a usar en función del problema de campo objeto de estudio.

Ejemplo del uso de material elástico lineal: Diversas estructuras metálicas, tales como carcasas de turbinas de avión, requieren operar con cargas mecánicas y térmicas que no les generen deformaciones permanentes. Debido a esta especificación técnica de desempeño estructural, el uso de las propiedades elástico lineales del material serán adecuadas para evaluar el comportamiento estructural de problemas de campo con estas características.

Ejemplo del uso de material elasto-plástico: Cuando el ingeniero **CAE** pretende encontrar el esfuerzo máximo que puede soportar un diseño al fracturarse bajo una carga estática o cuasi estática, entonces, el ingeniero analista deberá de usar las propiedades mecánicas elásticas y plásticas del material.

Ejemplo del uso de material híper-elástico: Los sellos elastoméricos usados en las juntas de bombas de aceite, agua, motores a gasolina o diesel, son ejemplos de problemas de campo donde el material de dichas partes exhibe un comportamiento híper-elástico. Este tipo de material se caracteriza por experimentar grandes deformaciones y por recuperar su condición original después de retirar la carga que lo deformaba.

El comportamiento mecánico de los materiales elásticos lineales y elasto-plásticos es obtenido directamente de las pruebas de tensión. La caracterización mecánica de los materiales híper-elásticos es más elaborada, ya que la información obtenida de la prueba de tensión axial es procesada utilizando conceptos de densidad de energía de deformación para generar las propiedades correspondientes. Algunos de los modelos de materiales híper-elásticos disponibles en el solucionador ABAQUS son Mooney, Ogden y Mooney-Rivlin.

Un material con comportamiento elástico lineal está caracterizado mecánicamente si se conoce su módulo de elasticidad, también conocido como Módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (μ), y esfuerzo de cedencia a tensión (YTS), en tanto los materiales elasto-plásticos están caracterizados cuando se conoce su comportamiento en el rango elástico lineal y en el rango plástico, este último conformado por puntos coordenados extraídos de la curva esfuerzo-deformación en el rango plástico.

Instituciones como la “American Society for Testing and Materials” (ASTM) y la “International Organization for Standardization” (ISO) norman las pruebas para caracterizar mecánicamente el comportamiento de los materiales.

I.6.6. Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera típicas de un análisis estructural con solución estática o cuasi estática son restricciones de movimiento y cargas mecánicas. Sin embargo, en algunas ocasiones, se requiere incluir adicionalmente cargas térmicas. A los análisis estructurales que incluyen cargas mecánicas y térmicas se les conoce como problemas de campos acoplados.

I.6.6.1. Restricciones de Movimiento

Las restricciones de movimiento son utilizadas para evitar que el **MEF** tenga movimiento de cuerpo rígido, o en su defecto para delimitarlo, durante la etapa de procesamiento del modelo.

En la preparación de un **MEF** con un pre-procesador comercial, las restricciones de movimiento son definidas sobre nodos, en los cuales se restringen los desplazamientos y/o rotaciones (grados de libertad). El máximo número de grados de libertad que pueden restringirse en un nodo son seis: tres traslaciones y tres rotaciones. Dependiendo del tipo de **EF** al que pertenece el nodo, los grados de libertad cambiarán. Por ejemplo, en el caso de los elementos *shells*, estos tendrán seis grados de libertad, en tanto que los nodos de los elementos de un **MEF 2D** de deformaciones planas tendrá solamente dos grados de libertad, siendo estos traslaciones.

La figura 1.6.6.1 muestra las restricciones de movimiento sobre los cuatro barrenos del soporte de un **MEF 3D** híbrido. En este ejemplo, las restricciones se definieron sobre los nodos de elementos sólidos, los cuales tienen solamente tres grados de libertad: traslaciones en las direcciones **X**, **Y** y **Z**.

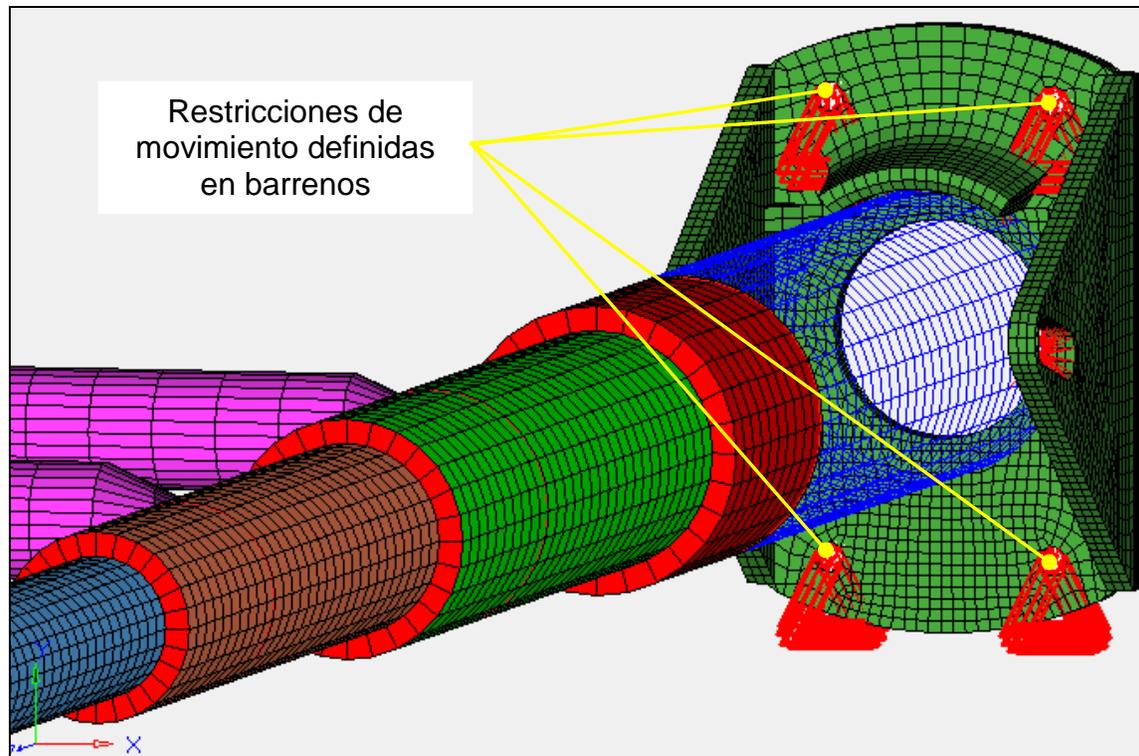


Figura 1.6.6.1 Restricciones de movimiento definidas sobre nodos de elementos tridimensionales.

1.6.6.2. Cargas

Para el caso de los **FEA** estructurales con solución estática, las cargas son fuerzas puntuales o uniformemente distribuidas sobre superficies. Cuando el análisis es de campos acoplados, entonces, además de las fuerzas puntuales y distribuidas, también pueden definirse cargas térmicas.

La figura 1.6.6.2 muestra la carga puntual en la dirección **Y** aplicada sobre el nodo del elemento unidimensional que interconecta cinco mallas de elementos *shells*.

En los **FEA** estructurales con solución dinámica, las cargas mecánicas se limitan a las fuerzas inerciales para problemas modales y fuerzas inerciales más cargas unitarias para problemas de estudios de respuesta forzada a la frecuencia.

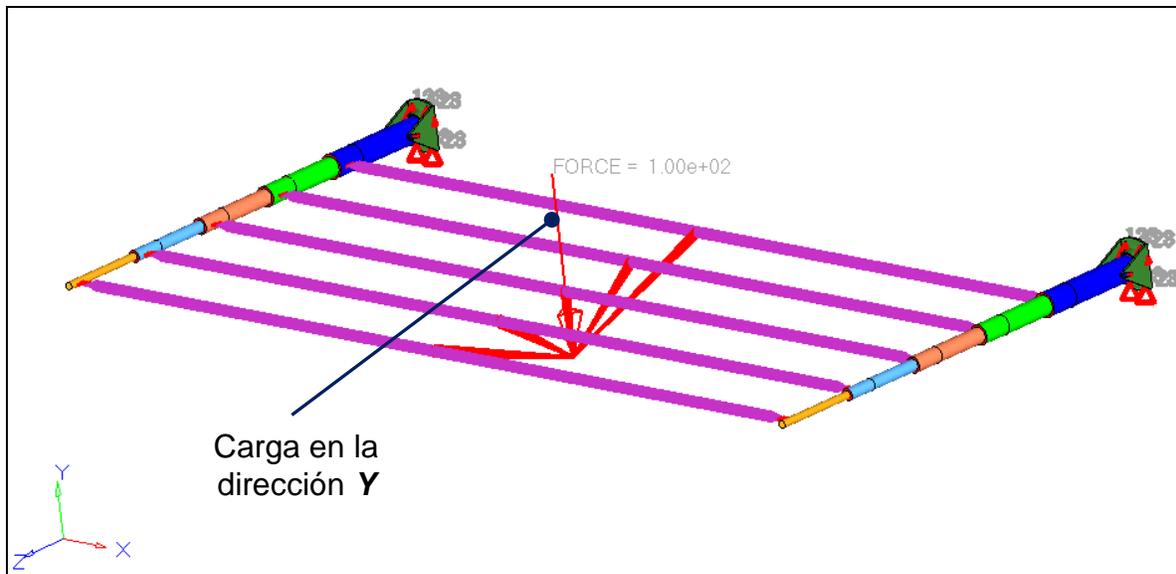


Figura 1.6.6.2 Carga en la dirección **Y** aplicada sobre nodo de elemento **EFUI**.

I.6.7. Tipo de Solución a Ejecutar

Los tipos de solución que se pueden obtener en un análisis estructural por elementos finitos son:

- Estático lineal.
- Estático no lineal.
- Cuasi estático.
- Modos Normales (dinámico).
- Respuesta dinámica forzada.
- Dinámica transitoria no lineal explícita.
- Mecánico y térmico (campos acoplados).

I.6.8. Variables a Calcular

Por lo general, las variables a calcular en un **FEA** estructural son: esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, reacciones, frecuencias modales y sus modos de vibración. En los problemas de campos acoplados, es posible calcular, adicionalmente, gradientes de temperatura.

I.7. Procesamiento

Existen comercialmente diversos procesadores que se usan para encontrar la solución aproximada a los problemas de campo estructurales. Algunos de ellos son:

ANSYS.
OPTISTRUCT.
NASTRAN.
ABAQUS.
LS-DYNA.
IDEAS.

La elección del solucionador está estrechamente ligada a costos y a los tipos de problemas de campo a estudiar. Por ejemplo, si los estudios estructurales a efectuarse no conllevan no linealidades del material ni geométricas ni de condiciones de frontera, entonces el procesador NASTRAN u OPTISTRUCT serían los más convenientes de usarse desde el punto de vista económico, ya que los costos de éstos son comparativamente menores a aquellos solucionadores que pueden hallar soluciones no lineales,

I.8. Post-proceso

La revisión de resultados se lleva a cabo, generalmente, con la ayuda de programas comerciales de post-procesamiento, tales como *ABAQUS*, *ANSYS* y *HYPERMESH*, entre otros.

En esta parte del **FEA**, se determinará si la solución del problema de campo es acorde con la física del problema, y si el desempeño estructural del diseño cumple o no con ciertos valores de referencia, tales como las especificaciones técnicas del desempeño estructural del producto.

Entender el comportamiento físico del problema de campo es la parte medular de todo proceso **FEA**. Con este antecedente, será más fácil para el ingeniero analista determinar si el resultado del estudio será útil para seguir con las subsiguientes tareas de post-procesamiento.

Una vez que se ha confirmado que los resultados del estudio son acordes con la física del problema, la siguiente tarea es contrastarlos con valores de referencia, tales como pruebas físicas, reportes de fallas en campo, estudios previos y especificaciones técnicas de desempeño estructural. Estos valores de referencia juegan un papel importante para concluir si el diseño cumplirá con sus especificaciones de desempeño estructural.

CAPÍTULO II

Métodos Propuestos para Interconectar Mallas de FEA Estructurales

II.1. Introducción

Los métodos propuestos para crear elementos finitos unidimensionales y bidimensionales cuadriláteros de interconexión (**EFUI**, **EFBI**) de mallas conformadas exclusivamente de elementos *shells*, son presentados esquemáticamente en esta sección.

II.2. Métodos Propuestos para Interconectar Mallas conformadas por EF *shells* de FEA Estructurales

Como se mencionó en la sección 6.1 capítulo 1, el uso de diversos **MEF** pueden provocar incompatibilidades numéricas entre los **EF** usados, por lo que es conveniente llevar a cabo actividades de edición entre los **EF** para evitar dichos problemas. Lo anterior se debe realizar de manera manual o en caso excepcional el pre-procesador lo podrá realizar.

Automatizando los métodos de interconexión aquí propuestos, el ingeniero **CAE** requerirá solamente seleccionar los nodos que definirán la ruta y longitud de las conexiones, así como las dos mallas a unir. Ningún parámetro ni selección adicional de nodos o elementos tendrá que hacer el analista para proceder a crear automáticamente las interconexiones, eliminando con esto, la definición manual de parámetros de búsqueda y pasos adicionales, reduciendo con ello la variabilidad de los procesos manuales y semiautomáticos actuales de interconexión de mallas con **EFUI**, y ofrece adicionalmente, el proceso de interconexión con **EFBI**.

Una de las opciones para lograr la transmisión de cargas y reacciones a través de las diferentes mallas que conforman un **MEF** es el uso de **EF** de interconexión, tal y como se dio cuenta en el capítulo I, sección I.6.4.

Los métodos aquí propuestos para interconectar mallas usando **EFUI** y **EFBI** son ideales para representar los efectos mecánicos de cordones de soldaduras, juntas metálicas-elastoméricas o de cualquier otro tipo de uniones en las que se requieran utilizar elementos finitos de interconexión para transferir fuerzas y reacciones entre mallas. A continuación se describen esquemáticamente ambos métodos.

II.2.1. Método de Interconexión usando EFUI

El método consiste básicamente en modificar localmente una de las mallas a interconectar para lograr que los elementos finitos unidimensionales de interconexión (**EFUI**) sean perpendiculares a una o ambas mallas. Dicha modificación se hace solamente en la zona en torno a los nodos de interconexión. La metodología propuesta en el presente trabajo se limita a la interconexión de mallas conformadas exclusivamente por elementos *shells*. El diagrama de flujo del método propuesto es proporcionado en la figura 2.2.1.

El proceso se inicia con la selección manual de las mallas a interconectar y de la ruta de nodos que definirán las interconexiones. Estos nodos deberán estar, preferentemente, en la orilla de una de las mallas seleccionadas. A los nodos que definan la ruta de interconexión, serán llamados Nodos de Interconexión (**NI**), en adelante. Ellos definirán la ruta y longitud de las interconexiones entre mallas. El resto del proceso, que será automático, consiste en recolectar información para posteriormente evaluarla y calcular con ella parámetros de selección de **EF** de la malla 2 (ver figura 2.2.1).

La información a recolectar, evaluar y calcular automáticamente con la metodología de interconexión propuesta se enlista a continuación:

- Verificar **NI** y mallas seleccionadas por el ingeniero **CAE**.
- Identificar número de nodo, número de malla y nombre de las mismas.
- Obtener coordenadas de los **NI**.
- Verificar las propiedades de las mallas seleccionadas manualmente.
- Calcular la Distancia entre Mallas (**DeM**) y Radio de Búsqueda (**RB**) para seleccionar los **EF** y nodos pertenecientes a la malla 2.
- Seleccionar nodos y **EF** pertenecientes a la malla 1 (**NSM1**, **EFSM1**) usando conectividad con **NI**.
- Seleccionar nodos y **EF** de la malla 2 (**NSM2**, **EFSM2**) usando **RB**.
- Verificar que los **EFSM2** sean solamente *shells*.

II.2.2. Método de Interconexión usando EFBI

El método de interconexión de mallas que usa elementos finitos bidimensionales cuadriláteros de interconexión (**EFBI**) se basa totalmente en el método descrito en la sección anterior (II.2.1 Método de Interconexión usando **EFUI**). En la figura 2.2.2 se muestra el método propuesto para interconectar dos mallas con **EFBI**.

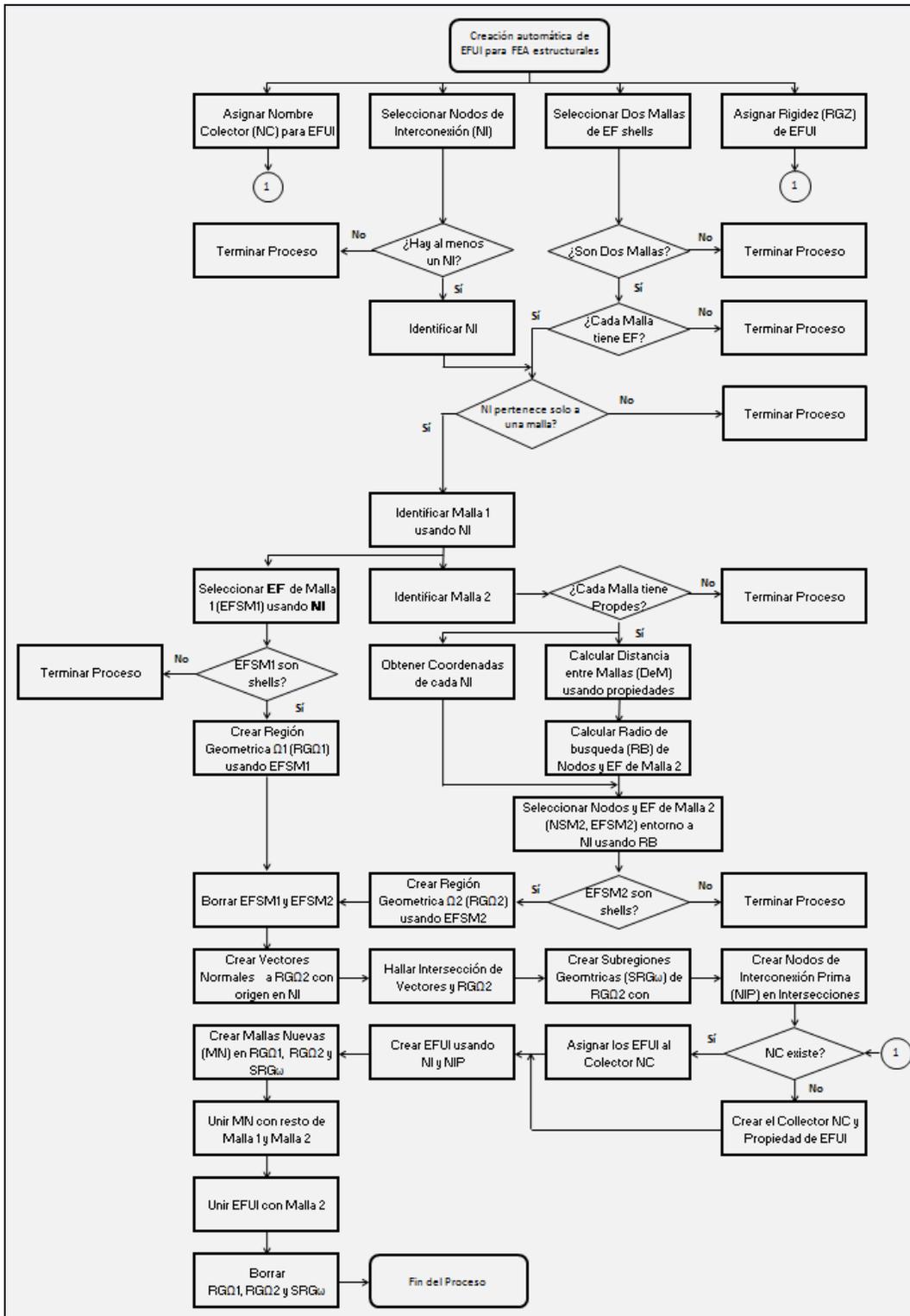


Figura 2.2.1. Método propuesto para interconectar mallas de **FEA** estructurales usando elementos finitos unidimensionales de interconexión (**EFUI**).

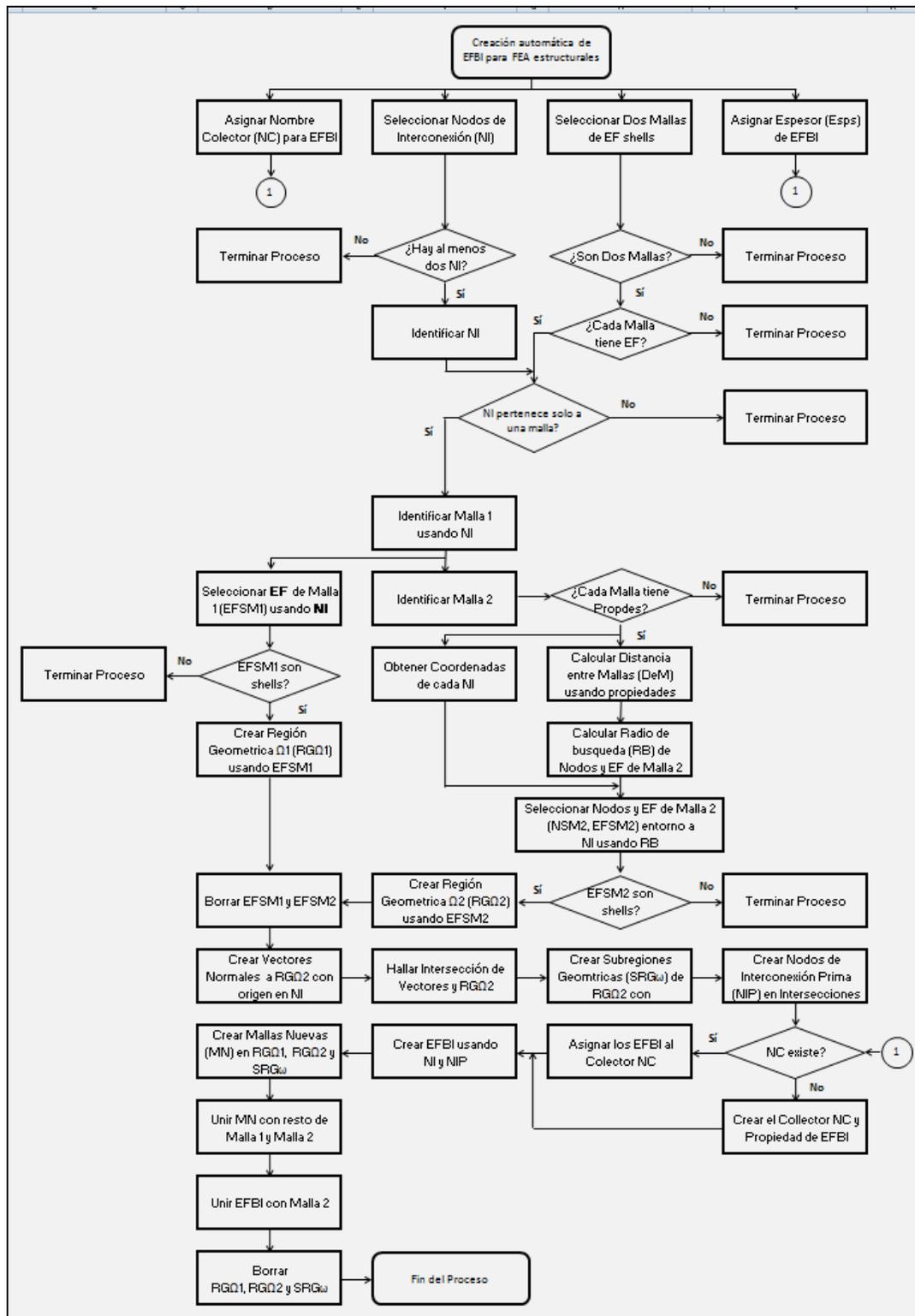


Figura 2.2.2. Método propuesto para interconectar mallas de **FEA** estructurales usando elementos finitos bidimensionales cuadriláteros de interconexión (**EFBI**).

CAPÍTULO III

Caso de Estudio

III.1. Introducción

Con la idea de mostrar la funcionalidad de las metodologías propuestas en el capítulo II, secciones II.2.1 y II.2.2, se realizará la interconexión de dos mallas con **EFUI** y **EFBI**. En total, tres procesos serán ejecutados para interconectar mallas con **EFUI**: manual, semiautomático y propuesto. En contraste, solamente dos se llevarán a cabo con **EFBI**: manual y propuesto, debido a que *HYPERMESH* no cuenta con ningún proceso de este tipo. Los resultados obtenidos serán abordados en el capítulo IV.

En los procesos de interconexión que abajo se describen, se enuncian los términos *CBUSH*, *PBUSH*, *spotweld* y *PSHELL*, los cuales son nombres de variables del procesador en el cual se correría el **MEF** del caso de estudio. De ellos, no se aportarán más datos por carecer de trascendencia al proyecto.

En las secciones III.3.4 y III.4.2 de este capítulo, se muestran las interfaces gráficas del usuario (**GUI**) creadas para automatizar los procesos de interconexión propuestos, mismas que podrán ser ejecutadas solamente dentro del ambiente de trabajo del programa comercial *HYPERMESH*. No obstante, la metodología propuesta puede ser utilizada para crear la **GUI** en cualquier otro programa comercial de pre-procesamiento.

III.2. Descripción del Caso de Estudio

Las figuras 3.2.1 y 3.2.2 muestran el modelo de elementos finitos a usar como caso de estudio. El **MEF** tiene solamente dos mallas, las cuales están conformadas exclusivamente por **EF shells**. La malla verde, perpendicular a la azul, permitirá crear la representación de un cordón de soldadura a tope. En la imagen, los nodos que conforman la ruta de interconexión pertenecen a la malla verde y han sido resaltados para identificarlos fácilmente.

El **MEF** fue creado exprofeso para este proyecto, y los **EF** que lo conforman son los típicamente utilizados en los **FEA** estructurales con solución estática lineal del solucionador *NASTRAN* y *OPTISTRUCT*.

El programa comercial de pre-procesamiento con el que fue creado el modelo es *HYPERMESH*.

El **MEF** representa una viga con perfil en “U” (malla azul con 4284 **EF**, tamaño promedio de **EF** igual a 3.17 mm), y una lámina con múltiples curvas (malla verde con 420 **EF**, tamaño promedio de **EF** igual a 5.84 mm). Las dimensiones de la viga son 120 mm x 200 mm x 50 mm de peralte. La malla verde tiene una altura de 60 mm x 239 mm de longitud total. El modelo cuenta con 4889 nodos y 4704 elementos *shells*. El espesor de la malla en color verde es de 2.00 mm, en tanto que el de la azul es de 3.00 mm. La separación entre ellas es igual a la mitad del espesor de la malla azul, lo cual significa que fue creada usando la superficie media, en este caso, el eje neutro del perfil en “U”.

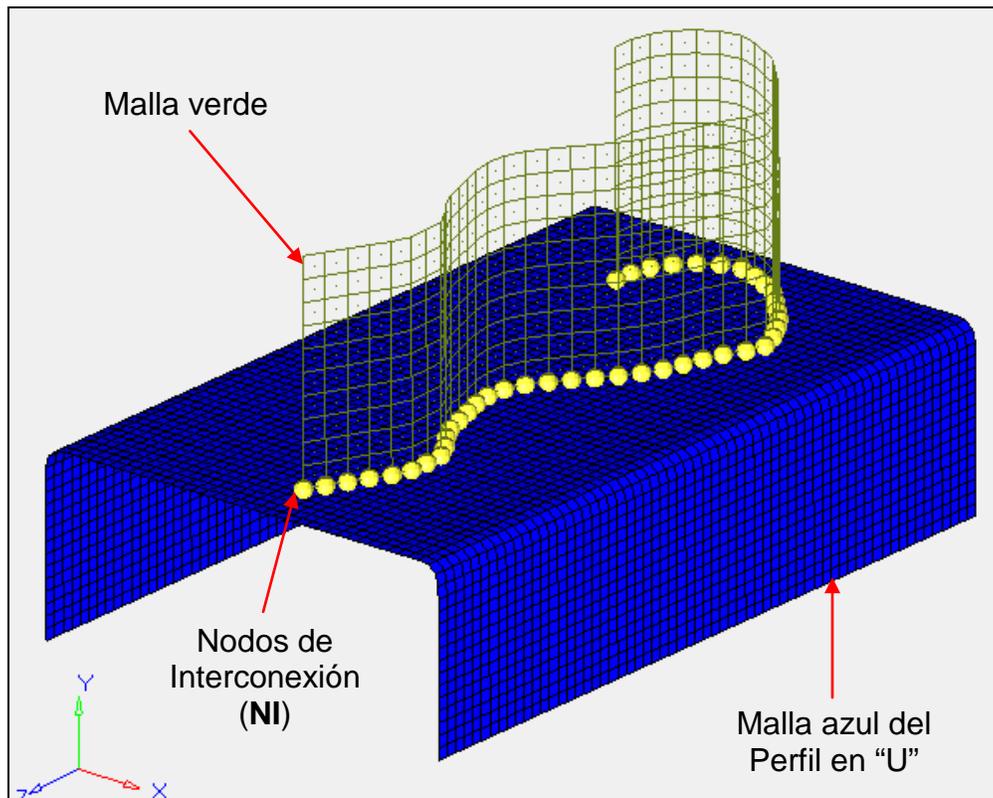


Figura 3.2.1. **MEF** del caso de estudio para interconecta dos mallas con **EFUI** y **EFBI**.

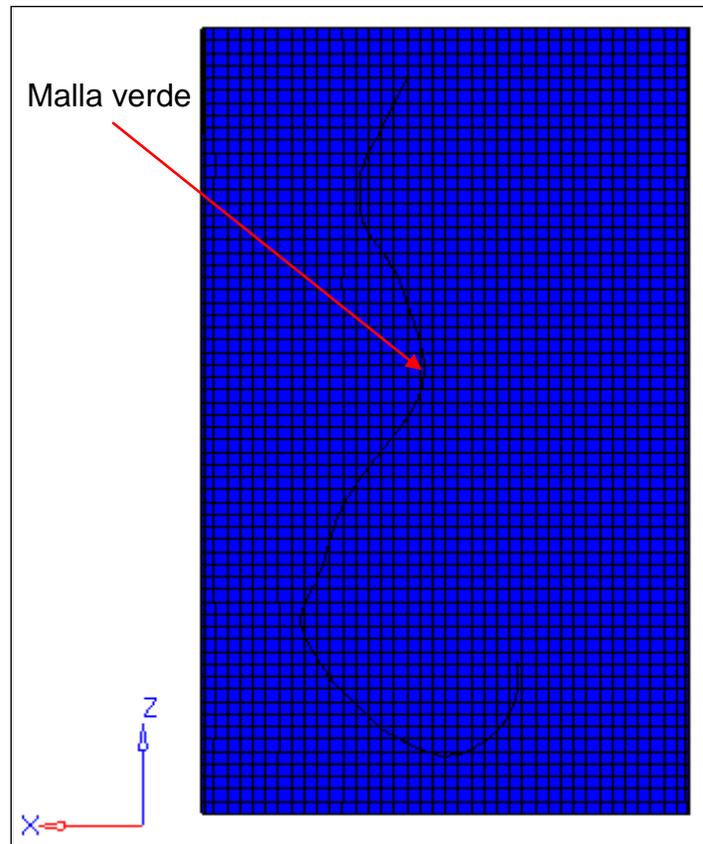


Figura 3.2.2. Vista en la dirección **Y** del **MEF** caso de estudio.

III.2.1. Definición de Parámetros de Evaluación

Con objeto de determinar la calidad, variabilidad y tiempos de ejecución de las interconexiones creadas con los procesos existentes y propuestos, se evaluarán cualitativa y cuantitativamente las mismas.

En la evaluación cualitativa se considerará el flujo, uniformidad y transición de malla, así como también la perpendicularidad de los **EFUI** y **EFBI**. La tabla 3.2.1 muestra los parámetros cualitativos a evaluar. En ella, el calificativo malo recibirá una escala entre 1 y 5. El regular entre 6 y 7 y la evaluación buena tendrá valores entre 8 y 10. Las figuras 3.2.3a a la 3.2.3d muestran las mallas de la misma sección trapezoidal, pero cada una de ellas con modificaciones que evidencian la calidad del flujo, uniformidad y transición de cada una de esas mallas.

La figura 3.2.3a muestra el ejemplo de una malla con buena calidad de flujo, uniformidad y transición. A continuación se detallarán estos tres conceptos de calidad con sus respectivos ejemplos.

Tabla 3.2.1. Parámetros cualitativos a evaluar en proceso de interconexión de mallas con **EFUI** y **EFBI**.

Evaluación Cualitativa			
Variable	Malo	Regular	Bueno
Flujo de malla			
Uniformidad de la malla			
Transiciones de malla			
Perpendicularidad de los EFUI y EFBI			

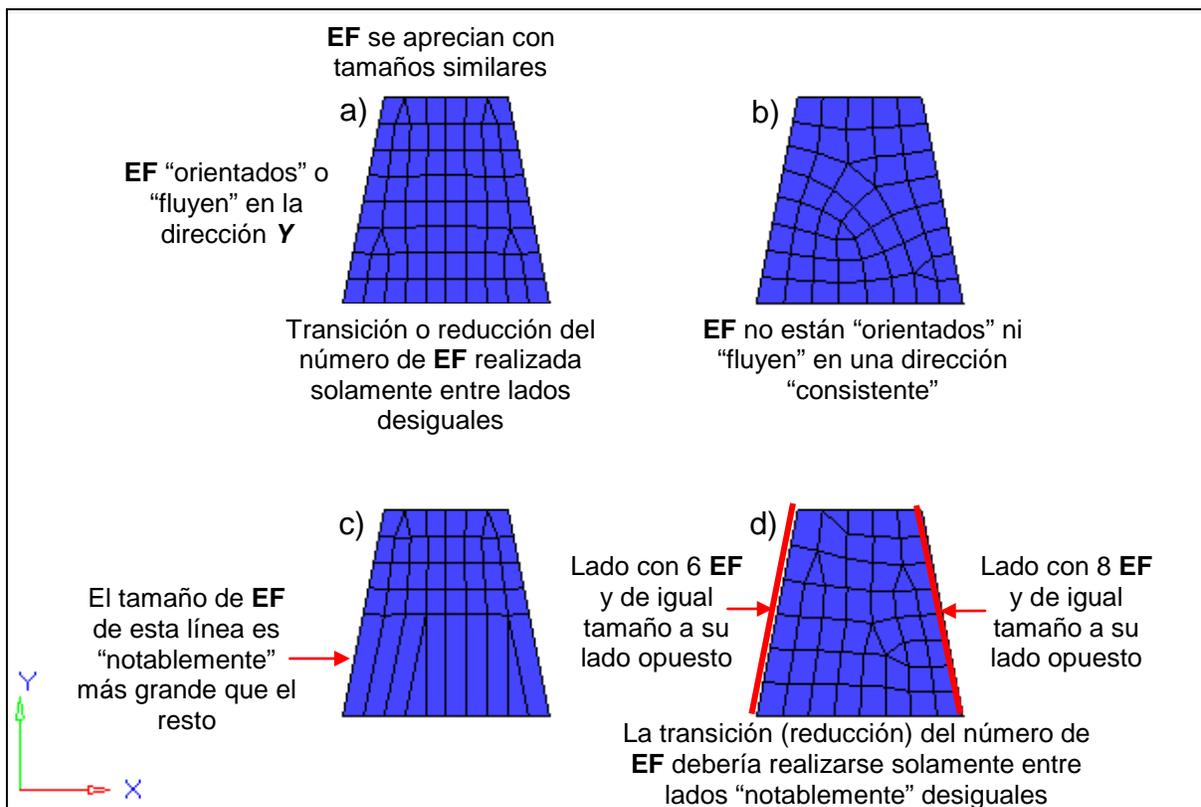


Figura 3.2.3. Ejemplos de flujo, uniformidad y transición de mallas: **a)** malla con buen flujo, uniformidad y transición, **b)** malla con mal flujo, **c)** malla con mala uniformidad y **d)** malla con mala transición.

Un buen flujo de malla se caracteriza por tener una "orientación" clara de hacia dónde "apuntan" los elementos que la conforman, y frecuentemente está determinada por la forma exterior de la parte y/o por alguna otra característica geométrica del diseño, tal como barrenos, ranuras, uniones soldadas, etc. La figura 3.2.3b muestra el ejemplo de un mal flujo de malla. En ella, la "orientación"

de los elementos no sigue la forma exterior del trapecoide, y es errática si la comparamos con la malla de la figura 3.2.3a y con la forma de la misma.

El concepto de uniformidad de malla involucra la similitud del tamaño de los elementos finitos que la conforman. Considerando esta simple definición, es posible aseverar que la uniformidad de la malla mostrada en la figura 3.2.3c es mala, ya que el tamaño de los elementos de una de sus hileras es notablemente mayor que el resto que los conforman.

La figura 3.2.3d muestra el ejemplo de una mala transición de malla. Las transiciones se refieren a la reducción del número de elementos sobre uno de los lados que conforman el perímetro de la malla, cuando este es “notablemente” más pequeño que su lado opuesto, y se utilizan para evitar la creación de **EF** extremadamente pequeños, lo cual, frecuentemente, no contribuye a mejorar la calidad de los resultados. En la imagen de la figura citada, se puede apreciar que solamente uno de los lados de la malla es más pequeño que su contraparte, por lo que la transición de ésta debiera hacerse solamente entre dos lados y no entre los cuatro que definen el perímetro de la malla.

El examen cuantitativo contrastará tamaño promedio, número de elementos cuadriláteros, número de elementos triangulares y valor mínimo de jacobiano de aquellos **EF** que comparten nodos con los de interconexión, y que además pertenezcan exclusivamente a la malla del perfil en “U”. La tabla 3.2.2 muestra las variables cuantitativas a evaluar. Las justificaciones técnicas de incluir los **EF** arriba indicados, así como los parámetros de la evaluación cuantitativa se dan a continuación.

Tabla 3.2.2. Parámetros cuantitativos a evaluar en proceso de interconexión de mallas con **EFUI** y **EFBI**.

Evaluación Cuantitativa	
Variable	Valor Medido
Tamaño promedio de los elementos	
Número de elementos triangulares	
Número de elementos cuadriláteros	
Jacobiano Mínimo	
Tiempo de ejecución	
Número de clics	

Los **EF** pertenecientes a la malla azul que comparten nodos con los de interconexión fueron seleccionados debido a que la modificación de la malla en esta zona es crucial para poder generar los elementos de interconexión

perpendiculares a las mallas a unir, y porque además, es la más complicada de efectuar desde el punto de vista de pre-procesamiento (modelado).

El tamaño promedio de los **EF** proporcionará información sobre las diferencias en el tamaño de los elementos de las mallas a interconectar, las cuales impactarán el flujo, uniformidad y transición de la malla en torno a los elementos finitos de interconexión. A mayor diferencia en el tamaño promedio de los elementos a interconectar, menor calidad en flujo, uniformidad y transición de las mallas.

El valor del jacobiano de un elemento mide la desviación de la forma de un elemento con respecto a la forma ideal del mismo. El valor máximo que el jacobiano de un elemento puede tomar es de 1.00, el cual representa un elemento con forma perfecta. Para mayores detalles sobre este concepto, ver Kaliakin [7].

Si bien, los elementos finitos triangulares (**EFT**) lineales son comúnmente usados en los **FEA** estructurales, su uso debe de ser limitado y preferentemente evitado en zonas donde haya altas concentraciones de deformaciones (esfuerzos), ya que el comportamiento de estas variables de campo en las citadas zonas están caracterizadas por ecuaciones diferenciales parciales con gradientes no lineales. En contraste, los **EFT** poseen ecuaciones de interpolación lineales, por lo que su uso en las zonas con altas concentraciones de esfuerzos, produciría errores de interpolación significativos al hallar la solución aproximada al problema de campo. Para mayores detalles sobre estos conceptos básicos del método numérico de elementos finitos, ver Segerlind [6].

Finalmente, la evaluación cuantitativa también contabilizará el tiempo de ejecución y el trabajo hombre-máquina invertidos durante el proceso de interconexión. Éste último punto, se calificará mediante el conteo de clics realizados con el ratón. El seguimiento de estos parámetros tiene como finalidad determinar los potenciales ahorros que las metodologías propuestas pudieran brindarle al ingeniero analista durante el proceso de interconexión de mallas.

III.3. Interconexión Unidimensional

La interconexión de mallas con **EFUI** se hará con tres procesos. Los dos primeros (manual y semiautomático) competen a los ya existentes, mismos que requieren seleccionar manualmente dos nodos, uno en cada una de las mallas a unir, para crear las interconexiones. En contraste, el método propuesto solamente requiere seleccionar los Nodos de Interconexión (**NI**) y las mallas a interconectar. La figura 3.2.1 muestra las dos mallas a interconectar.

III.3.1. Proceso Manual Sin Modificar Malla Azul

El proceso a seguir será el siguiente:

- Crear la propiedad de resorte para los **EFUI**.
- Crear colector en donde se agruparán los **EFUI**.
- Seleccionar elemento con configuración *CBUSH* para los **EFUI**.
- Crear propiedad *PBUSH* del elemento **EFUI**.
- Seleccionar elemento tipo resorte y propiedad para los **EFUI**.
- Seleccionar un **NI** de la malla azul y el nodo más cercano perteneciente a la malla azul (ver figura 3.2.1) para crear el **EFUI**.

III.3.2. Proceso Manual Modificando Malla Azul

El proceso a seguir será el siguiente:

- Crear la propiedad de resorte para los **EFUI**.
- Crear colector en donde se agruparán los **EFUI**.
- Seleccionar elemento con configuración *CBUSH* para los **EFUI**.
- Crear propiedad *PBUSH* del elemento **EFUI**.
- Seleccionar elemento tipo resorte y propiedad para los **EFUI**.
- Copiar y proyectar los **NI** al plano de la malla azul que sea perpendicular a la verde (ver figura 3.2.1).
- Crear una línea continua a lo largo de los nodos recientemente creados.
- Crear superficie usando los elementos que están alrededor de la línea nueva.
- Borrar los **EF** utilizados para crear la superficie del paso anterior.
- Dividir la superficie nueva en dos partes empleando la línea recientemente creada.
- Mallar las superficies obtenidas en el paso anterior.
- Asegurar conectividad entre los **EF** nuevos y preexistentes de la malla azul.

- Seleccionar un **NI** de la malla azul y el nodo más cercano perteneciente a la malla azul (ver figura 3.2.1) para crear el **EFUI**.

III.3.3. Proceso Semiautomático

El proceso a seguir será el siguiente:

- Crear la propiedad de resorte para los **EFUI**.
- Crear colector en donde se agruparán los **EFUI**.
- Seleccionar elemento con configuración *CBUSH* para los **EFUI**.
- Crear propiedad *PBUSH* del elemento **EFUI**.
- Seleccionar elemento tipo resorte y propiedad para los **EFUI**.
- Seleccionar método “*spotweld*” (*HYPERMESH* tiene nueve diferentes).
- Seleccionar elemento tipo resorte para los **EFUI**.
- Seleccionar los **NI** (ver figura 3.2.1).
- Seleccionar nodos de la malla azul más cercanos a los **NI**.
- Elegir el parámetro de búsqueda para interconectar los dos grupos de nodos seleccionados igual al espesor de la malla azul (3.00 mm).
- Elegir la opción de mover nodos (de malla azul) para crear los **EFUI**.
- Crear interconexiones.

III.3.4. Proceso Propuesto

La interconexión de mallas se hará automáticamente mediante el uso de la **GUI** desarrollada para tal propósito. Véase figura 3.3.4. Las siguientes instrucciones deben completarse para ejecutar la interface gráfica del usuario:

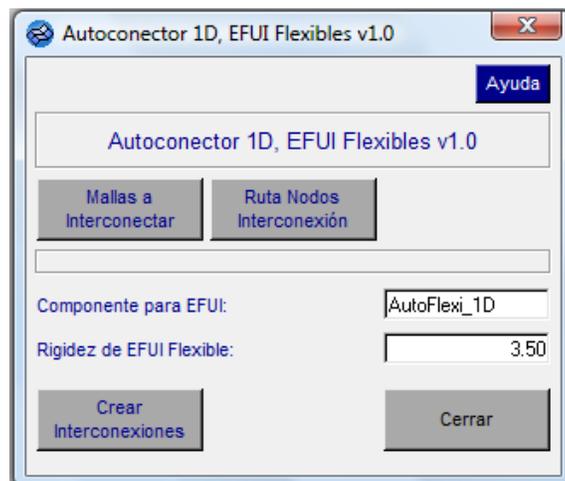


Figura 3.3.4. **GUI** para automatizar la creación de **EFUI**.

- Seleccionar botón “Mallas a Interconectar” para seleccionar las dos mallas a interconectar: verde y azul (ver figura 3.2.1 y 3.3.4).
- Elegir botón “Ruta Nodos Interconexión” para seleccionar los **NI**.
- Usar nombre y valor predeterminados para el componente y rigidez.
- Crear los **EFUI** seleccionando el botón “Crear interconexiones”.

III.4. Interconexión Bidimensional

La interconexión de mallas con **EFBI** se efectuará con dos métodos: manual y el propuesto en el capítulo II, sección II.2. Este último, es novel, ya que comercialmente no hay ningún programa de pre-procesamiento que ofrezca un proceso como este para interconectar automáticamente dos mallas.

III.4.1. Proceso Manual Modificando Malla Azul

El proceso a seguir será el siguiente:

- Copiar y proyectar los **NI** al plano de la malla azul que sea perpendicular a la verde (ver figura 3.2.1).
- Crear una línea continua a lo largo de los nuevos nodos.
- Crear una superficie empleando los **EF** en torno a la nueva línea.
- Cortar la nueva superficie en dos usando la línea recientemente creada.
- Borrar los **EF** usados para crear la superficie anterior.
- Mallar las superficies obtenidas en el paso anterior.
- Asegurar conectividad entre los **EF** nuevos y preexistentes de la malla azul.
- Crear un nuevo colector llamado **EFBI**.
- Crear propiedad *PSHELL* para el **EFBI** y asignársela.
- Crear el **EFBI** usando cuatro nodos: dos **NI** y los dos nodos copiados más cercanos a éstos últimos.
- Asegurar la conectividad entre las tres mallas: verde, azul y **EFBI**.
- Borrar las superficies y línea creadas.

III.4.2. Proceso Propuesto

El método propuesto le ofrece al ingeniero **CAE** la posibilidad interconectar dos mallas usando elementos *shells*, como elementos finitos bidimensionales cuadriláteros de interconexión (**EFBI**). Ellos podrán ser parte de una de las mallas preexistentes o bien, ser dispuestos en una nueva, a la cual, podrá asignársele el

valor deseado de espesor, así como también algún otro material, si el estudio así lo requiriese.

En la figura 3.4.2 se muestra la **GUI** creada para automatizar la creación de **EFBI**, cuyas instrucciones para ejecutarla son las siguientes:

- Seleccionar el botón “Mallas a Interconectar” para elegir las dos mallas a interconectar: verde y azul (ver figuras 3.2.1 y 3.4.2).
- Seleccionar el botón “Ruta Nodos Interconexión” para escoger los **NI**.
- Usar nombre predeterminado para el componente.
- Para ejecutar la **GUI** y crear automáticamente los **EFBI**, seleccione el botón “Crear interconexiones”



Figura 3.4.2. **GUI** para automatizar la creación de **EFBI**.

CAPÍTULO IV

Resultados del Caso de Estudio

IV.1. Introducción

Los resultados obtenidos al aplicar los diferentes procesos de interconexión especificados en el capítulo III, secciones III.3 y III.4, se detallan a continuación. Los **EF** empleados para hacer las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de dichos procesos, son los de interconexión y aquellos de la malla azul que comparten al menos un nodo con los **EF** de interconexión. A efecto de establecer una referencia tangible sobre las calidades de mallas (evaluación cualitativa), se emplea una malla “muestra” que representa la condición “ideal” para compararla con aquellas generadas en los procesos contrastados.

IV.2. Resultados de los Procesos de Interconexión Unidimensional

IV.2.1. Proceso Manual Sin Modificar Malla Azul

Las figuras 4.2.1.1, 4.2.1.2 y 4.2.1.3 muestran las vistas isométrica, en la dirección **Y** y **Z** del **MEF**, respectivamente, así como los **EFUI** creados en conformidad con el procedimiento manual descrito en el capítulo III, sección III.3.1. En ellas, se puede apreciar que las interconexiones no son perpendiculares a la malla azul, además de que esta última no fue modificada. En tanto que la tabla 4.2.1 contiene las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de las interconexiones.

Este proceso de interconexión es frecuentemente utilizado por el ingeniero analista cuando hay poco tiempo para completar el estudio, por lo que el tiempo disponible para pre-procesamiento es muy corto para modificar o crear mallas con la finalidad de generar interconexiones perpendiculares. No obstante, este proceso permite obtener resultados rápidamente a costa de la calidad de los mismos.

Las figuras 4.2.1.4a, 4.2.1.4b y 4.2.1.4c muestran los elementos *shells* empleados para evaluar y comparar el proceso de interconexión. Los **EF** pertenecen exclusivamente a la malla del perfil en “U” y comparten al menos un nodo con los **EFUI** creados. La malla mostrada en la figura 4.2.1.4a se utilizará para establecer valores de referencia para el tamaño promedio y jacobiano mínimo de los elementos previos a la unión de mallas, en tanto que los **EF** de la figura 4.2.1.4b se utilizarán como muestra para establecer una referencia tangible sobre las evaluaciones cualitativas de éste y los subsiguientes procesos de interconexión.

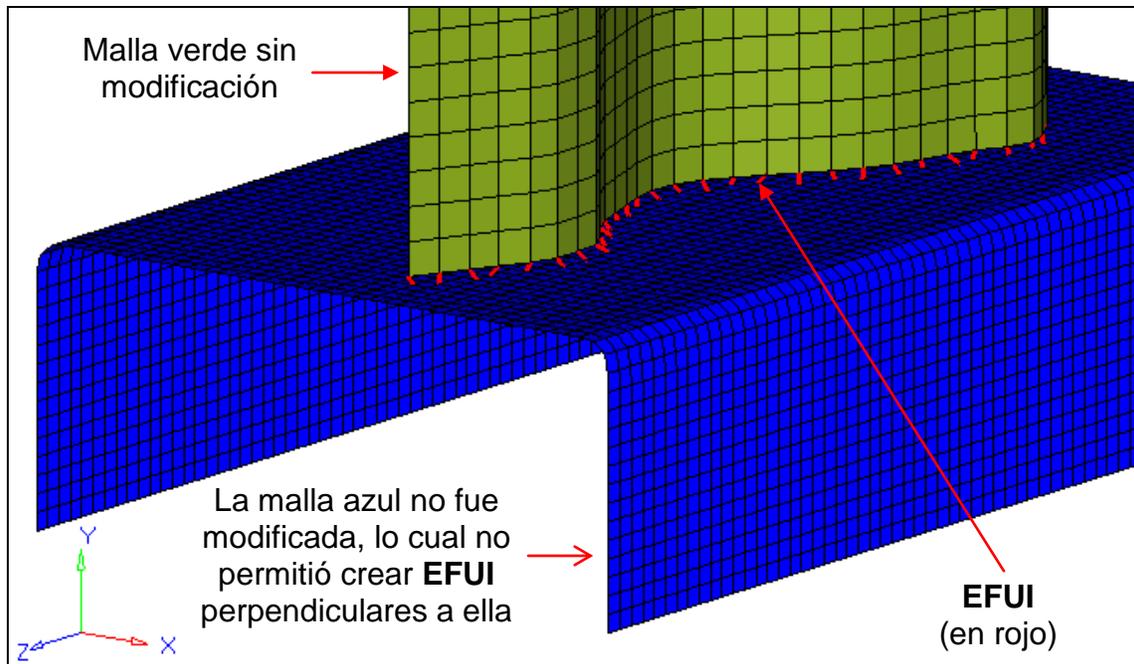


Figura 4.2.1.1. Interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento manual (Vista Isométrica del **MEF**).

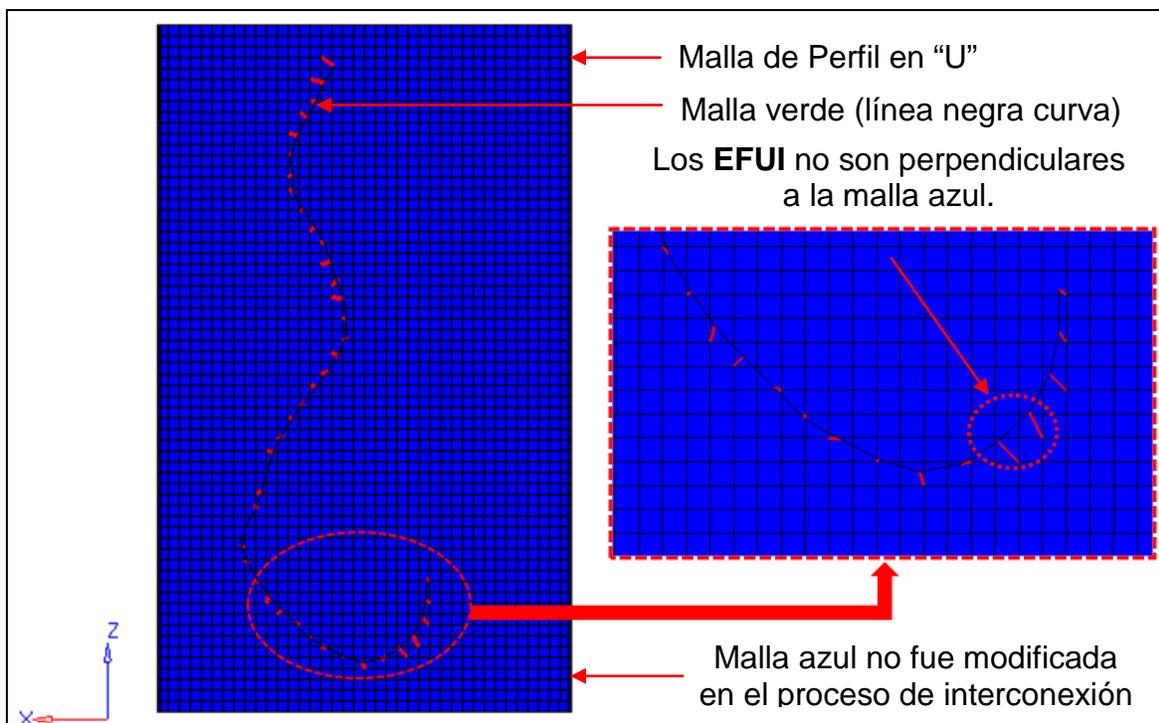


Figura 4.2.1.2. Mallas interconectadas manualmente con **EFUI**. (Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

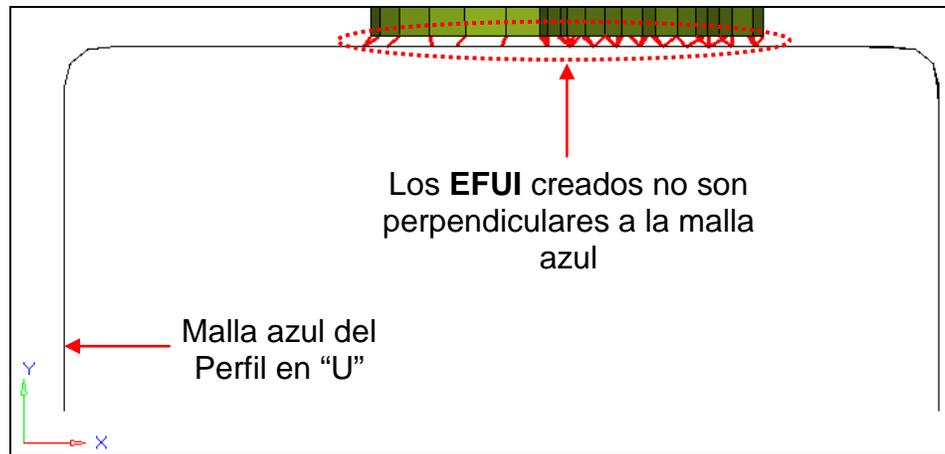
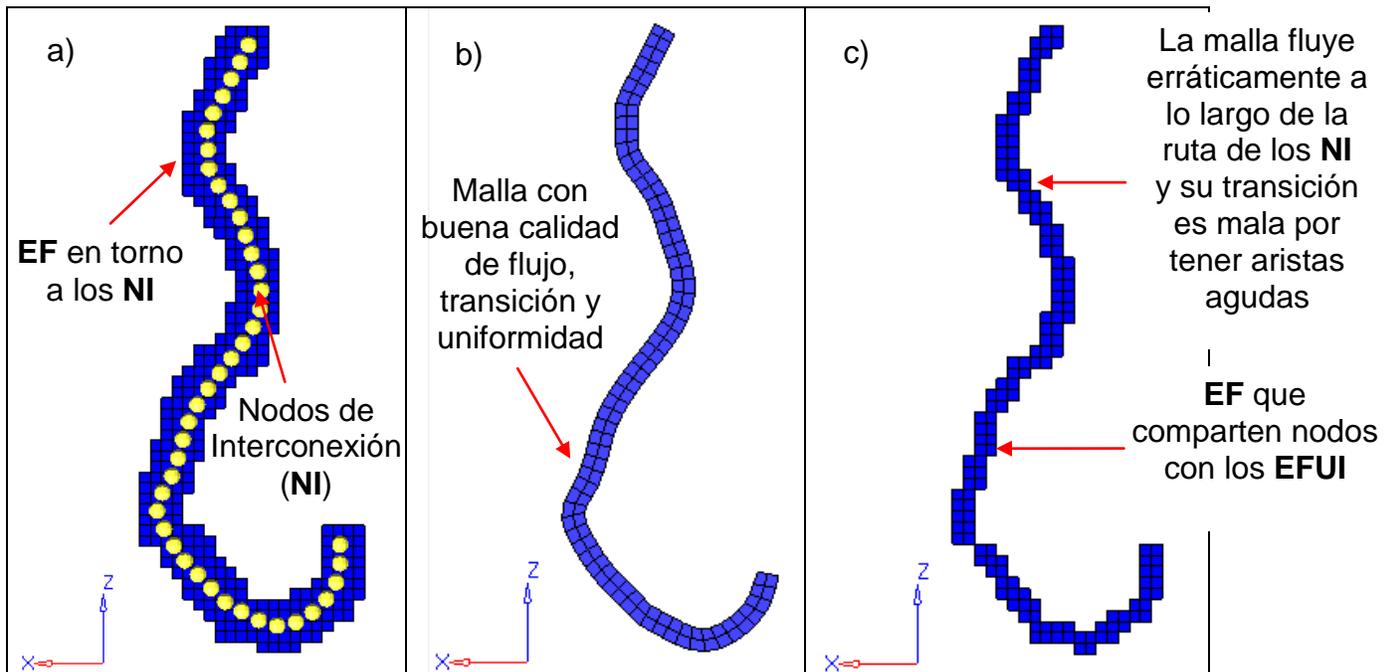


Figura 4.2.1.3. Resultados de la interconexión manual de mallas con **EFUI**.
(Vista en la dirección **Z** del **MEF**).



Figuras 4.2.1.4. Elementos *shells* seleccionados para evaluar el proceso de interconexión: a) antes, b) muestra y c) después de crear los **EFUI**.
(Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

La elección de los **EF** de la malla azul obedece a que el remallado de ésta, es la más compleja de las dos a efectuar, ya que su nueva configuración deberá seguir la ruta de los nodos de interconexión (**NI**), lo cual implica, generalmente, cambios en el flujo, tamaño de elemento y creación de múltiples transiciones de malla.

La calificación cualitativa de cada una de las variables evaluadas es asignada a criterio del autor en conformidad con las escalas especificadas en el capítulo III, sección III.2 descripción del caso de estudio.

La evaluación cuantitativa considera los valores de tamaño promedio de elementos y valor mínimo de jacobiano, en tanto que el tiempo empleado para completar el proceso de interconexión y el conteo de los clics realizados en dicho proceso, fueron calculados utilizando la aplicación de uso libre llamada "MouseCount by Michel Dean".

Tabla 4.2.1. Evaluaciones cualitativas y cuantitativas de la interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento manual.

Procedimiento Manual	Evaluación Cualitativa de EFUI				
	Variable	Malo	Regular	Bueno	
	Flujo de malla	5			
	Uniformidad de la malla			10	
	Transiciones de malla	5			
	Perpendicularidad de los EFUI	1			
	Evaluación Cuantitativa de EFUI				
	Variable	Valor Medido			
	Tamaño promedio de los elementos	3.17			
	Número de elementos triangulares	0			
Número de elementos cuadriláteros	149				
Jacobiano Mínimo	1.00				
Tiempo de ejecución	00:05:15				
Número de clics	250				

IV.2.2. Proceso Manual Modificando Malla Azul

Las figuras 4.2.2.1 y 4.2.2.2 muestran las imágenes de las interconexiones creadas con **EFUI** perpendiculares a la malla azul, así como las modificaciones efectuadas a esta última en conformidad con el procedimiento descrito en el capítulo III, sección III.3.2. La figura 4.2.2.3 exhibe la vista en la dirección **Z** del **MEF** y las interconexiones creadas. La tabla 4.2.2 aglutina los resultados de las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de dichas interconexiones.

En la figura 4.2.2.4 se presentan los elementos *shells* empleados para evaluar el proceso de interconexión manual con modificación de malla azul. En esta imagen, el **MEF** es visto en la dirección **Y**. Véase la figura 4.2.1.4b para comparar la malla creada en este proceso contra la malla muestra para establecer una referencia tangible sobre las evaluaciones cualitativas.

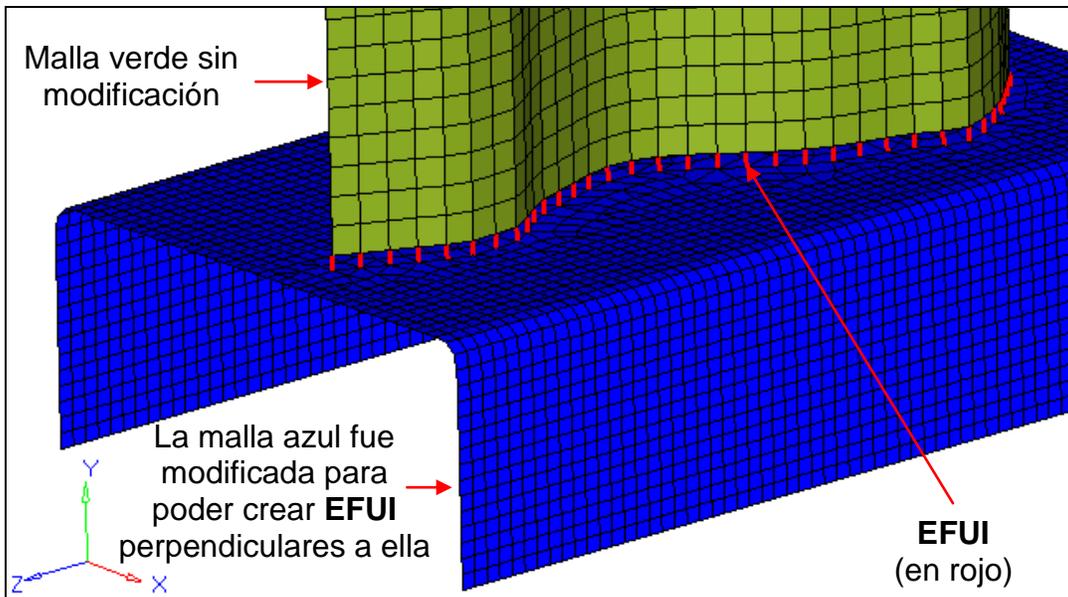


Figura 4.2.2.1. Interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento manual malla azul modificada (Vista Isométrica del **MEF**).

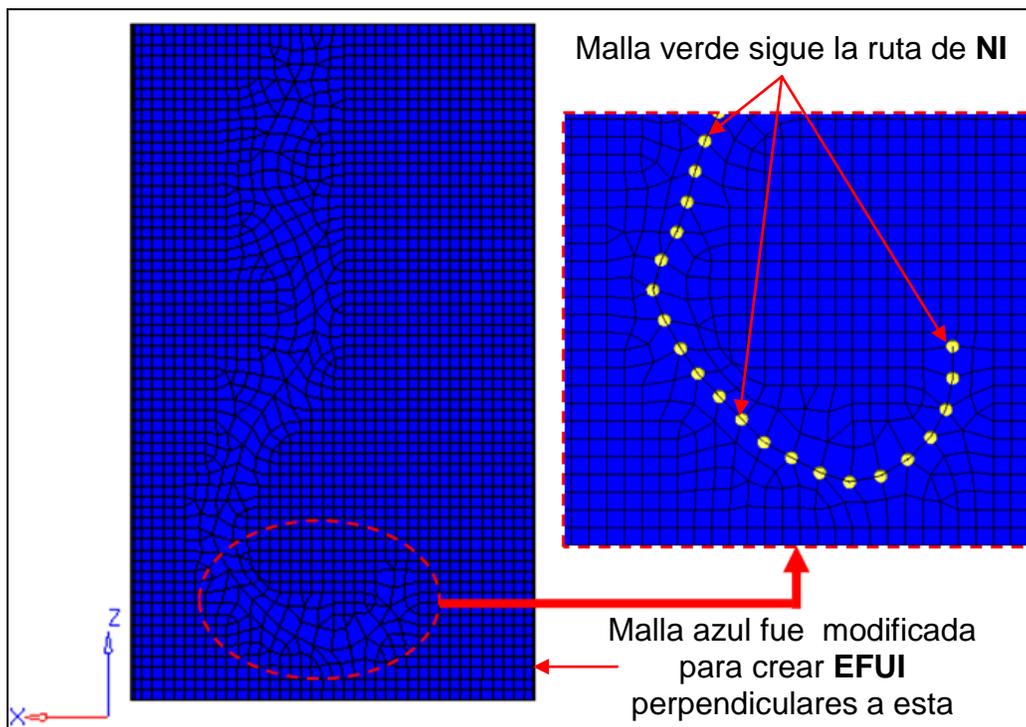


Figura 4.2.2.2. Mallas interconectadas manualmente con **EFUI**, malla azul modificada (Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

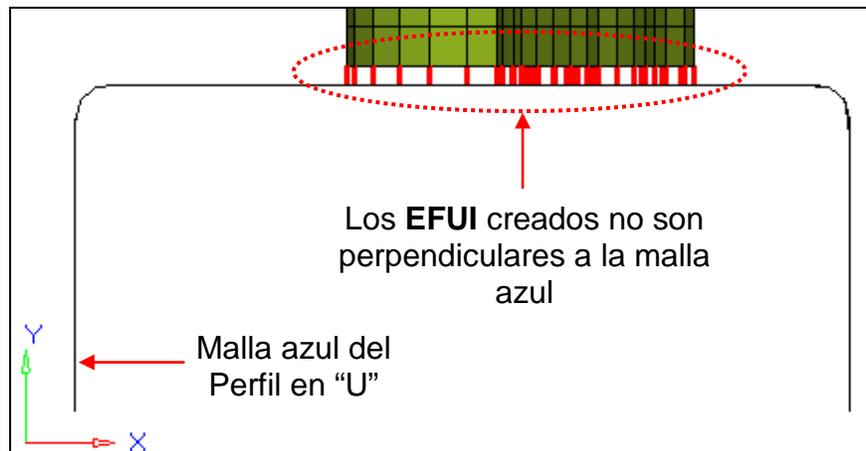


Figura 4.2.2.3. Resultados de la interconexión manual de mallas con **EFUI**, malla azul modificada.
(Vista en la dirección **Z** del **MEF**).

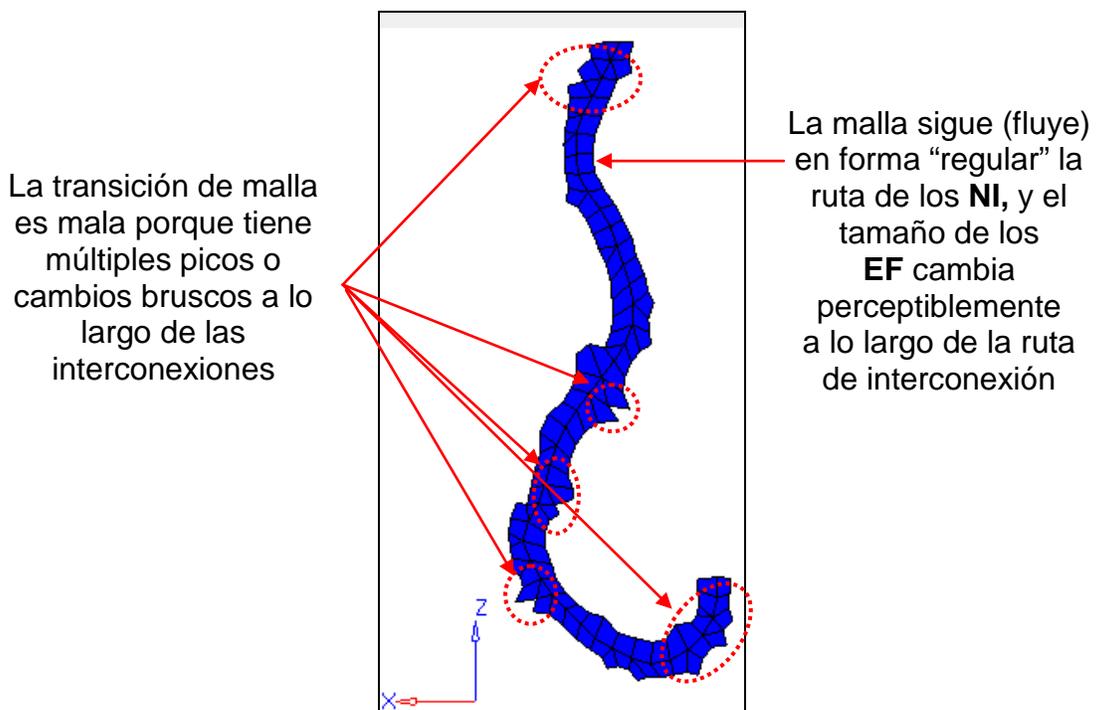


Figura 4.2.2.4. Elementos *shells* empleados para evaluar el proceso de interconexión manual, malla azul modificada
(Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

Tabla 4.2.2. Evaluaciones cualitativas y cuantitativas de la interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento manual malla azul modificada.

Procedimiento Manual Malla Azul Modificada	Evaluación Cualitativa de EFUI				
	Variable	Malo	Regular	Bueno	
	Flujo de malla		6		
	Uniformidad de la malla		7		
	Transiciones de malla	5			
	Perpendicularidad de los EFUI			10	
	Evaluación Cuantitativa de EFUI				
	Variable	Valor Medido			
	Tamaño promedio de los elementos	4.62			
	Número de elementos triangulares	16			
Número de elementos cuadriláteros	95				
Jacobiano Mínimo	0.47				
Tiempo de ejecución	00:29:27				
Número de clics	1657				

IV.2.3. Proceso Semiautomático

Las figuras 4.2.3.1 y 4.2.3.2 muestran las interconexiones creadas con **EFUI** perpendiculares a la malla azul, así como las modificaciones efectuadas a esta última mediante el uso del proceso de interconexión semiautomático con el cual ya cuenta *HYPERMESH*. Las opciones que se escogieron para crear estas interconexiones son detalladas en el capítulo III, sección III.3.3.

La figura 4.2.3.3 exhibe la vista en la dirección **Z** del **MEF** y las interconexiones creadas entre las mallas de este. En tanto que en la figura 4.2.3.4 se presenta los elementos *shells* empleados para evaluar el proceso de interconexión semiautomático. En esta imagen, el **MEF** es visto en la dirección **Y**. Véase la figura 4.2.1.4b para comparar la malla creada en este proceso contra la malla muestra para establecer una referencia tangible sobre las evaluaciones cualitativas.

La tabla 4.2.3 muestra los resultados de las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de dichas interconexiones en torno a los **EFUI**.

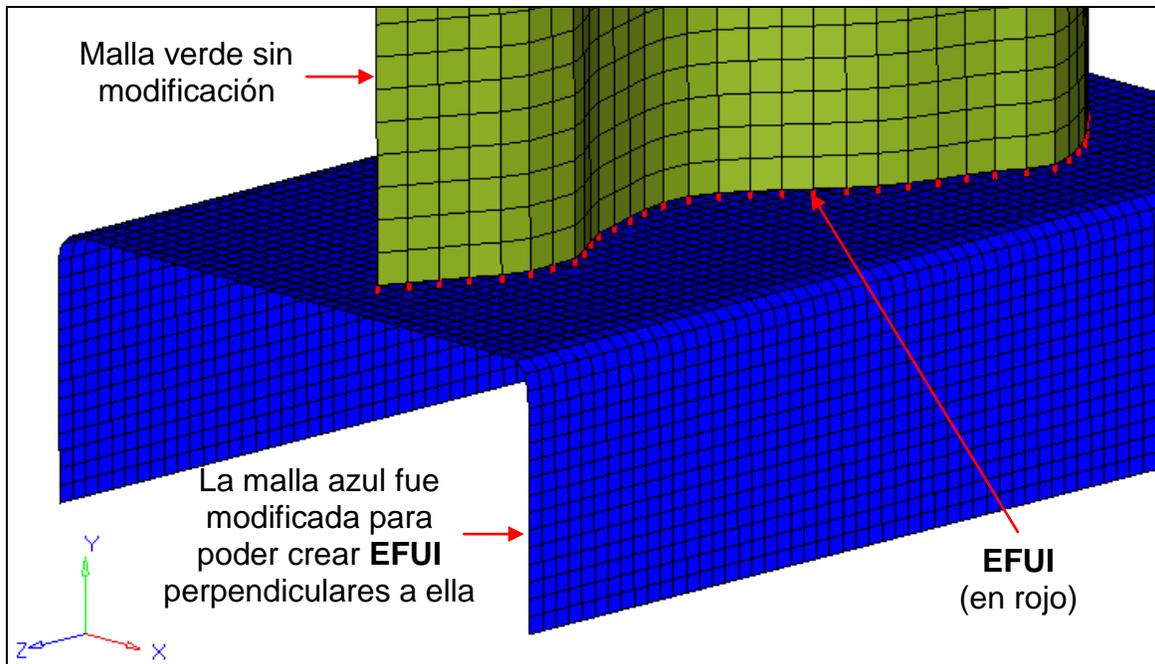


Figura 4.2.3.1. Interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento semiautomático (Vista Isométrica del **MEF**).

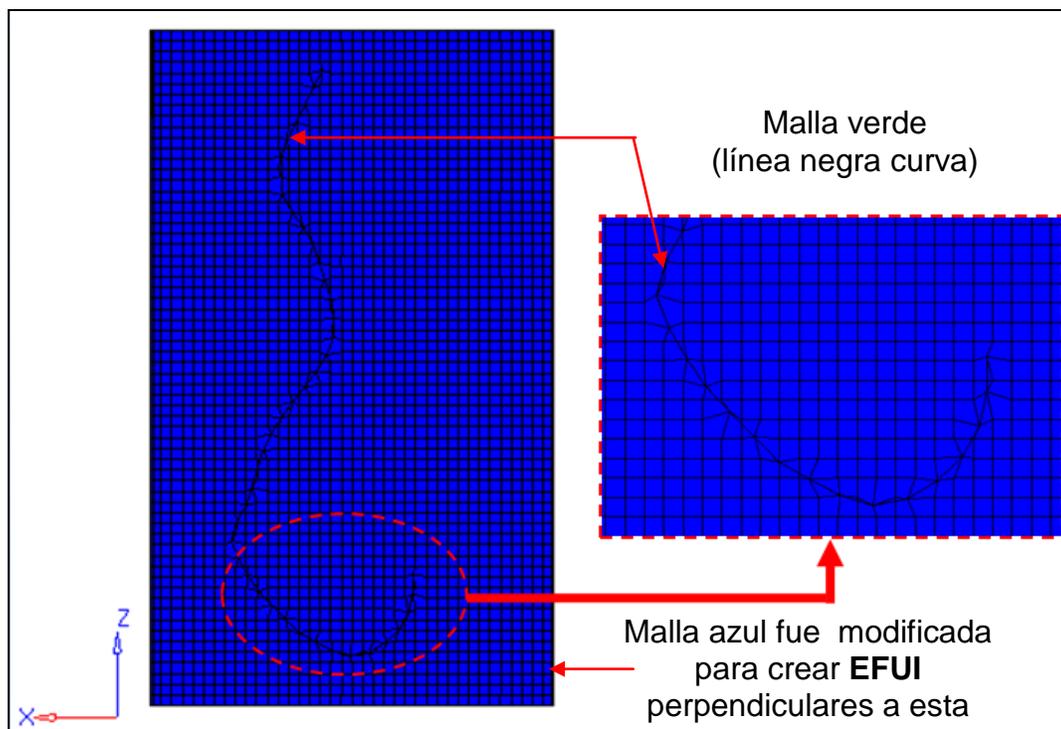


Figura 4.2.3.2. Mallas interconectadas con **EFUI**, procedimiento semiautomático. (Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

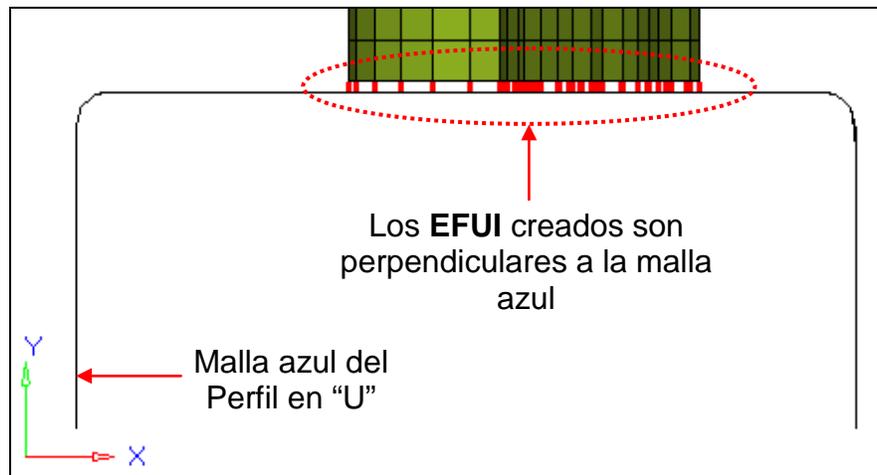


Figura 4.2.3.3. Resultados de la interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento semiautomático (Vista en la dirección **Z** del **MEF**).

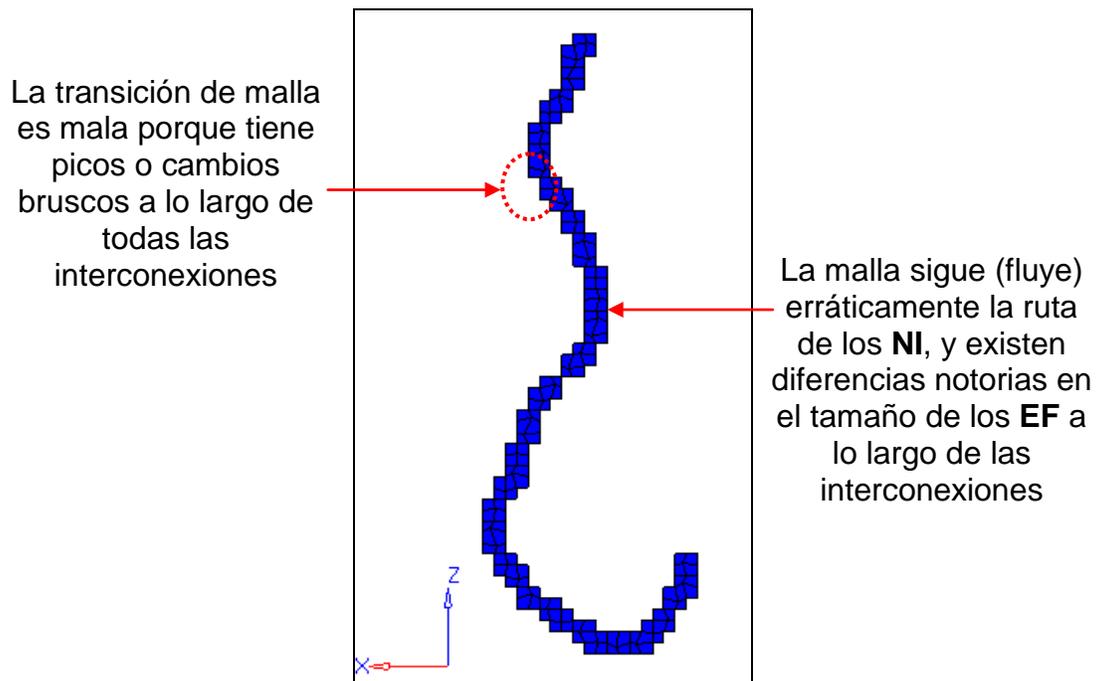


Figura 4.2.3.4. Elementos *shells* empleados para evaluar el proceso de interconexión semiautomático (Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

Tabla 4.2.3. Evaluaciones cualitativas y cuantitativas de la interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento semiautomático.

Procedimiento Semiautomático	Evaluación Cualitativa de EFUI				
	Variable	Malo	Regular	Bueno	
	Flujo de malla	5			
	Uniformidad de la malla		7		
	Transiciones de malla	5			
	Perpendicularidad de los EFUI			10	
	Evaluación Cuantitativa de EFUI				
	Variable	Valor Medido			
	Tamaño promedio de los elementos	3.17			
	Número de elementos triangulares	0			
Número de elementos cuadriláteros	150				
Jacobiano Mínimo	0.39				
Tiempo de ejecución	00:02:32				
Número de clics	44				

IV.2.4. Proceso Propuesto

Las interconexiones efectuadas con el proceso propuesto son presentadas en las figuras 4.2.4.1, 4.2.4.2 y 4.2.4.3. La tabla 4.2.4 muestra los resultados de las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de dichas interconexiones.

La implementación y automatización de la metodología de interconexión propuesta en el capítulo II, sección II.2.1 fue llevada a cabo con la interface gráfica del usuario (**GUI**) descrita en el capítulo III, sección III.3.4, la cual fue desarrollada para ejecutarse exclusivamente dentro del programa de pre-procesamiento comercial *HYPERMESH*.

En las figuras previamente referidas, se puede observar que los **EFUI** son perpendiculares a la malla azul. También se puede apreciar en la figura 4.2.4.4 que los **EF** empleados para evaluar el proceso de interconexión propuesto tienen un patrón de mallado sin aristas, con cambios de dirección “suavizadas” en torno a las interconexiones, esta última característica hace que el remallado del perfil en “U” reciba una evaluación cuantitativa y cualitativa superior a las asignadas a los procesos de interconexión previos (ver tablas 4.2.1 a la 4.2.4 y figura 4.2.1.4b).

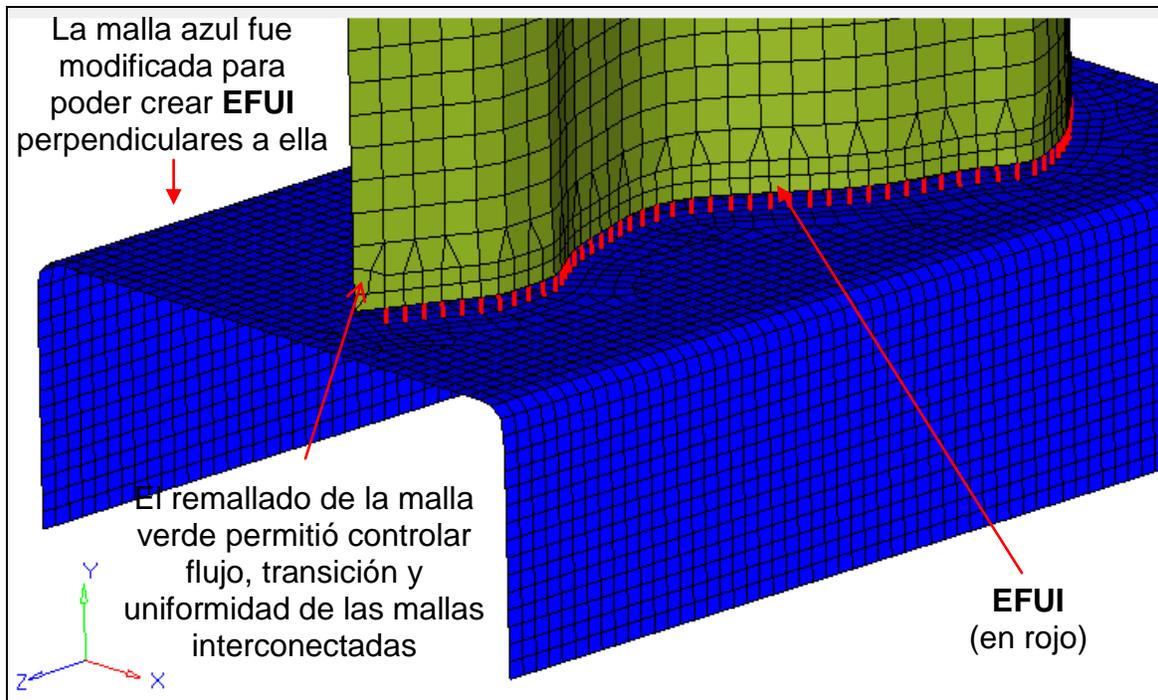


Figura 4.2.4.1. Interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento propuesto (Vista Isométrica del **MEF**).

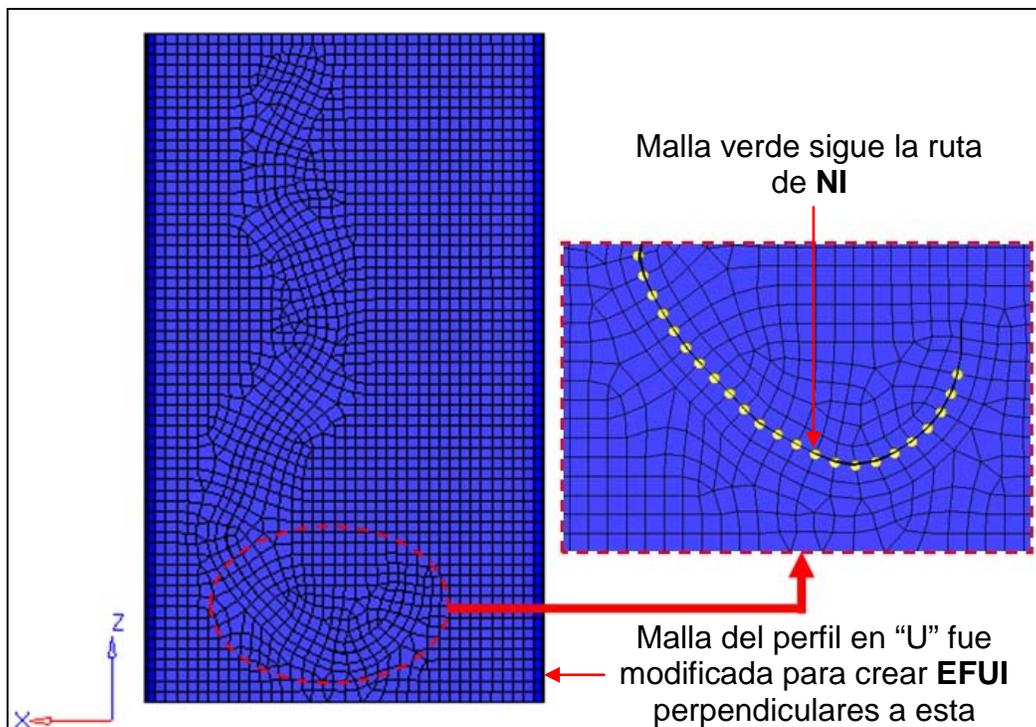


Figura 4.2.4.2. Mallas interconectadas con **EFUI**, procedimiento propuesto. (Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

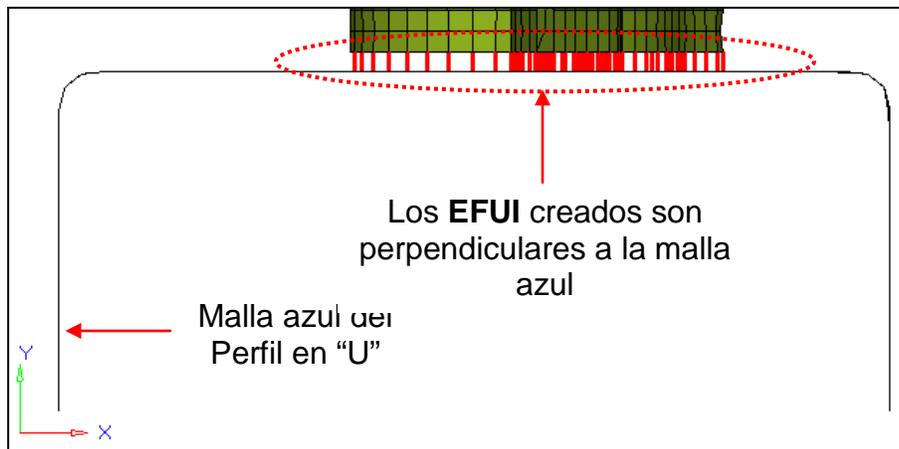


Figura 4.2.4.3. Resultados de la interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento propuesto (Vista en la dirección **Z** del **MEF**).

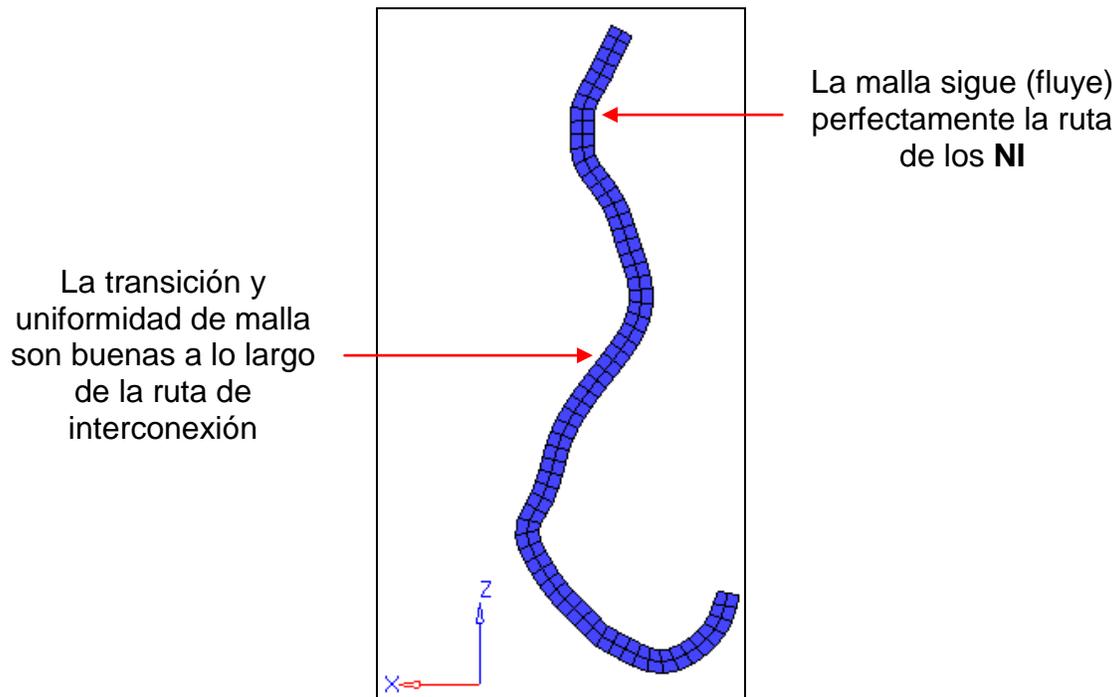


Figura 4.2.4.4. Elementos *shells* empleados para evaluar el proceso de interconexión propuesto (Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

Tabla 4.2.4. Evaluaciones cualitativas y cuantitativas de la interconexión de mallas con **EFUI**, procedimiento propuesto.

Procedimiento Propuesto	Evaluación Cualitativa de EFUI			
	Variable	Malo	Regular	Bueno
	Flujo de malla			10
	Uniformidad de la malla			10
	Transiciones de malla			10
	Perpendicularidad de los EFUI			10
	Evaluación Cuantitativa de EFUI			
	Variable	Valor Medido		
	Tamaño promedio de los elementos	3.13		
	Número de elementos triangulares	0		
Número de elementos cuadriláteros	132			
Jacobiano Mínimo	0.66			
Tiempo de ejecución	00:01:54			
Número de clics	34			

IV.2.5. Comparativo de Resultados

Considerando las evaluaciones cualitativas detalladas en las tablas 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, se observa que los procesos de interconexión existentes tienen una calidad de malla mala o regular en torno a los **EFUI**. La única calificación satisfactoria que recibieron dos de los tres procesos existentes fue asignada a la variable de perpendicularidad de los **EFUI**.

En condición similar se encuentran las evaluaciones cuantitativas de dichas interconexiones, siendo el jacobiano del elemento y tiempo de ejecución los parámetros más comprometidos, pues ellos impactan, al igual que la mala calidad de malla, los resultados de un **FEA** estructural.

En contraste, las evaluaciones cualitativas y cuantitativas asignadas al proceso propuesto (ver tabla 4.2.4) son consistentemente mejores que las otorgadas a cada uno de los procesos de interconexión existentes.

IV.3. Resultados de los Procesos de Interconexión Bidimensional

IV.3.1. Proceso Manual

Las figuras 4.3.1.1, 4.3.1.2 y 4.3.1.3 muestran los **EFBI** creados en conformidad con el procedimiento manual descrito en el capítulo III, sección III.4.1. En ellas se aprecia la modificación efectuada a la malla azul con la finalidad de crear los **EFBI** perpendiculares a ésta. La figura 4.3.1.4 exhibe los **EF** empleados para evaluar el proceso de interconexión. Véase también la figura 4.3.2.4 para comparar la malla creada en este proceso contra aquella del propuesto para establecer una referencia tangible sobre la evaluación cualitativa asignada al proceso manual.

La tabla 4.3.1 contiene las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de las interconexiones mostradas en las figuras previamente citadas.

No obstante que el proceso manual de este apartado permitió generar **EFBI** perpendiculares a la malla azul, el tiempo utilizado para crearlas (ver tabla 4.3.1 evaluaciones cualitativas y cuantitativas) contrasta significativamente con aquel mostrado en la tabla 4.3.2 de la evaluación cualitativa y cuantitativa del proceso propuesto. En este mismo tenor, pero comparando las evaluaciones cualitativas de los procesos referidos, es posible observar que el proceso propuesto posee cualitativamente mejores resultados que el proceso manual.

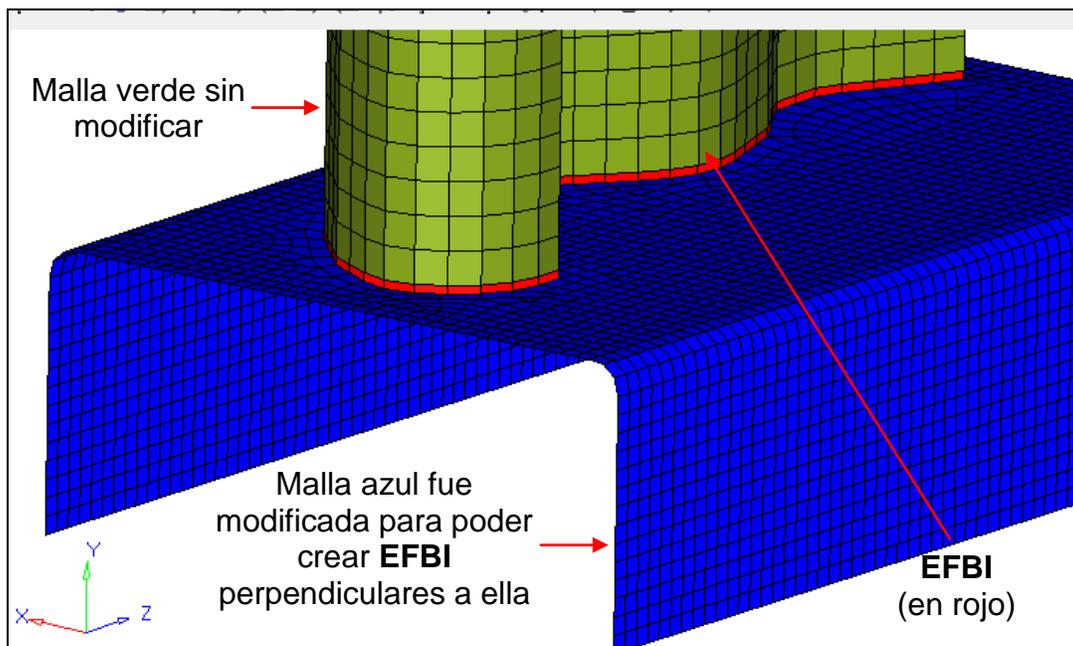


Figura 4.3.1.1. Interconexión de mallas con **EFBI**, procedimiento manual (Vista Isométrica del **MEF**).

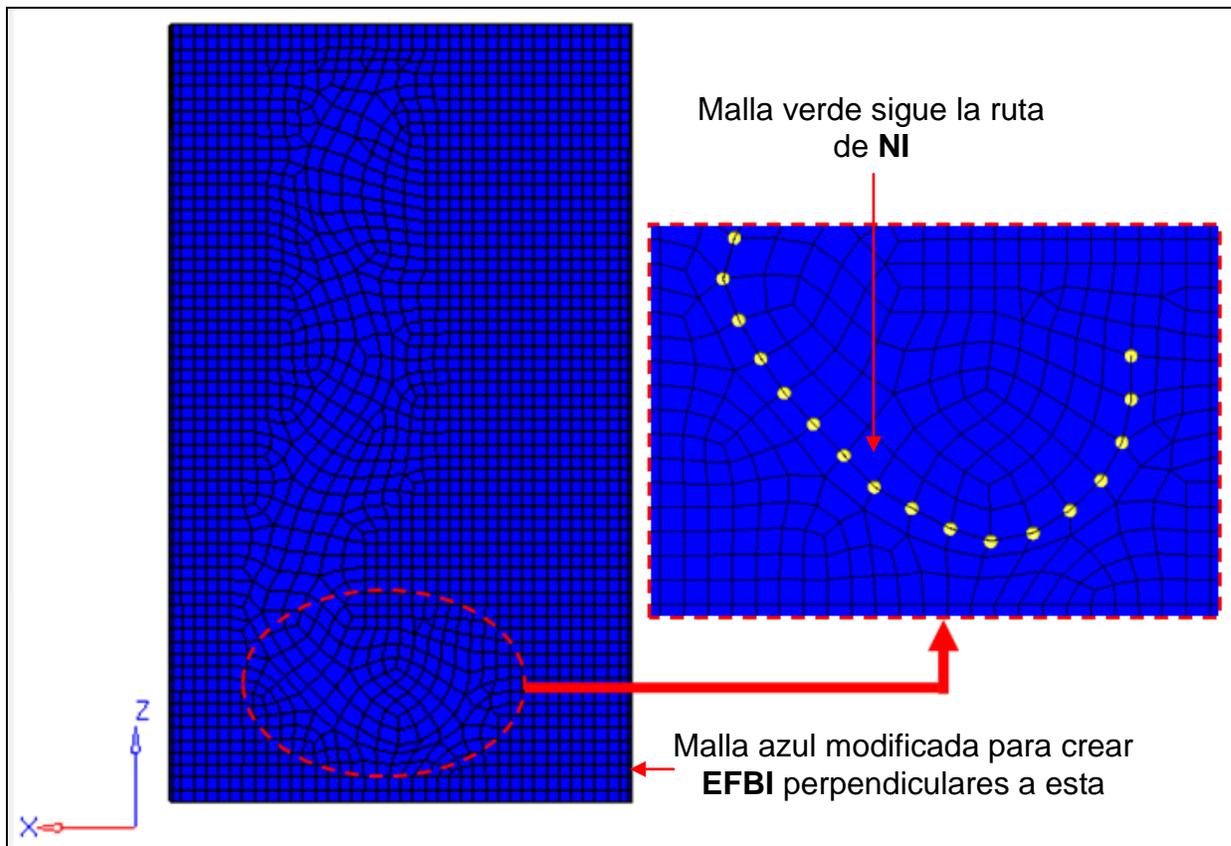


Figura 4.3.1.2. Mallas interconectadas con **EFBI**, procedimiento manual.
(Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

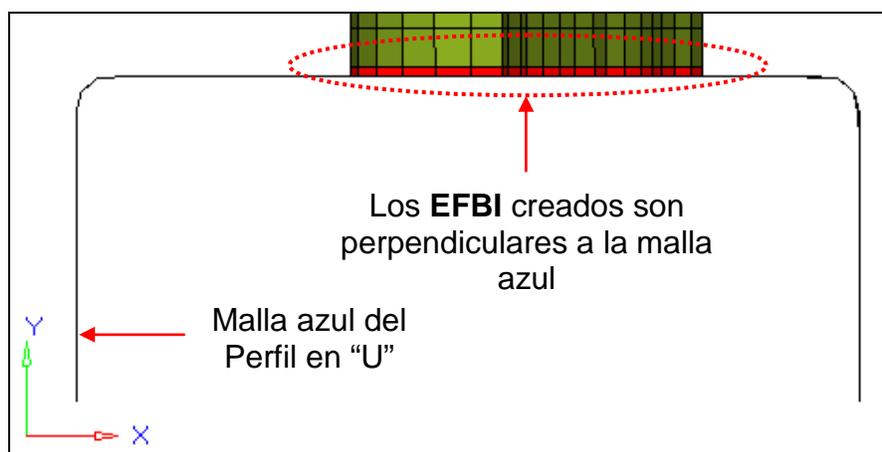


Figura 4.3.1.3. Resultados de la interconexión de mallas con **EFBI**,
procedimiento manual
(Vista en la dirección **Z** del **MEF**).

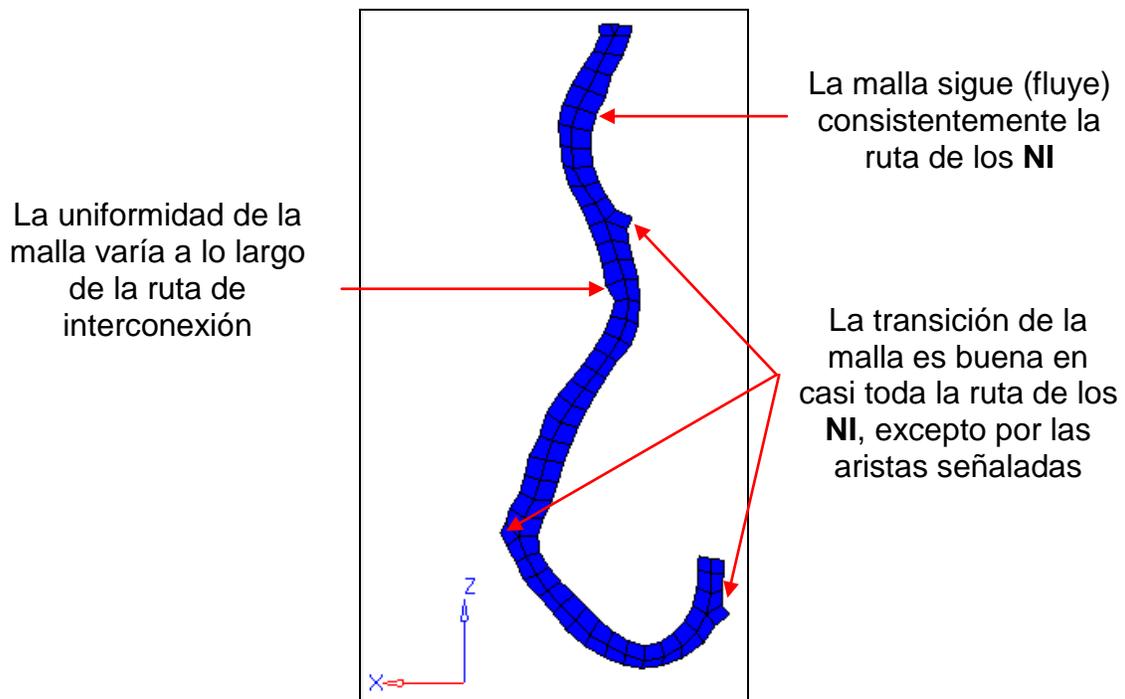


Figura 4.3.1.4. Elementos *shells* empleados para evaluar el proceso de interconexión manual (Vista en la dirección **Y** del MEF).

Tabla 4.3.1. Evaluaciones cualitativas y cuantitativas de la interconexión de mallas con EFBI, proceso manual.

Procedimiento Manual	Evaluación Cualitativa de EFBI			
	Variable	Malo	Regular	Bueno
	Flujo de malla			8
	Uniformidad de la malla		7	
	Transiciones de malla			9
	Perpendicularidad de los EFBI			10
	Evaluación Cuantitativa de EFBI			
	Variable	Valor Medido		
	Tamaño promedio de los elementos	4.67		
	Número de elementos triangulares	1		
Número de elementos cuadriláteros	91			
Jacobiano Mínimo	0.62			
Tiempo de ejecución	00:21:35			
Número de clics	1485			

IV.3.2. Proceso Propuesto

Las figuras 4.3.2.1, 4.3.2.2 y 4.3.2.3 muestran los **EFBI** creados en conformidad con el procedimiento manual descrito en el capítulo III, sección III.4.2. En ellas se muestran las modificaciones realizadas a las mallas del **MEF**. Esto con el propósito de crear los **EFBI** perpendiculares a la malla azul. La figura 4.3.2.4 exhibe los **EF** empleados para evaluar este proceso de interconexión.

La tabla 4.3.2 contiene las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de las interconexiones creadas mediante el proceso propuesto, cuya metodología fue implementada y automatizada con las interface gráfica del usuario (**GUI**) mostrada en el capítulo III, sección III.4.2, la cual puede ejecutarse exclusivamente dentro del programa de pre-procesamiento comercial *HYPERMESH*.

Contrastando las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de los procesos de interconexión manual y propuesto con **EFBI** (ver tablas 4.3.1 y 4.3.2), es posible establecer con certeza que el proceso propuesto posee cualitativa y cuantitativamente mejores resultados que los obtenidos con el proceso manual.

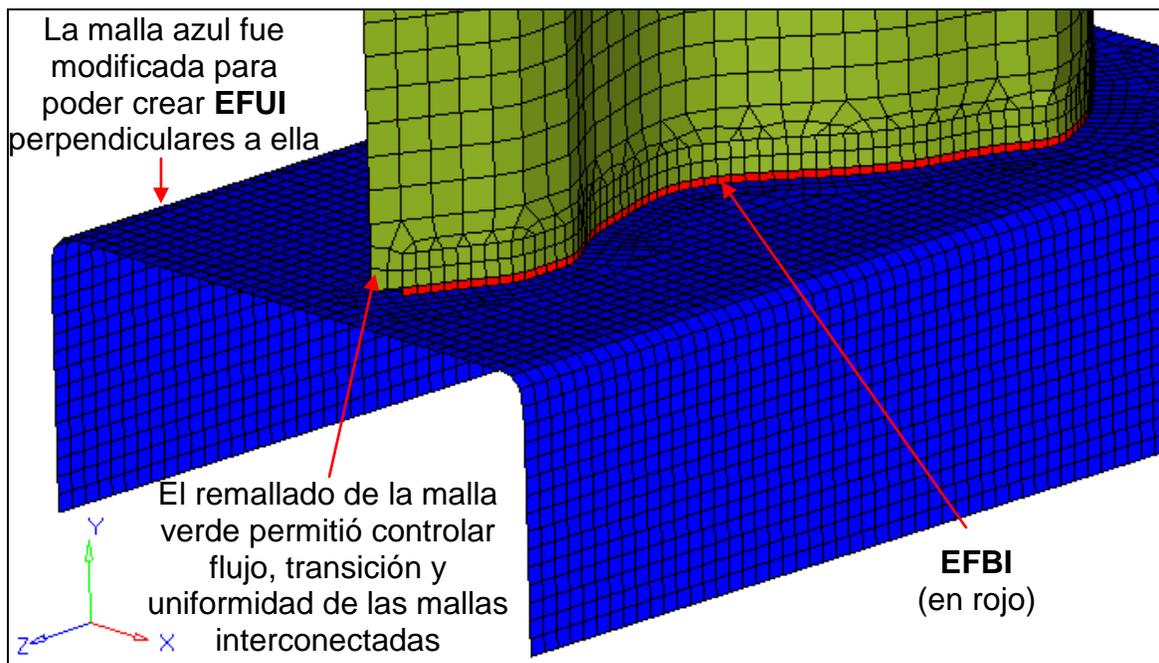


Figura 4.3.2.1. Interconexión de mallas con **EFBI**, procedimiento propuesto (Vista Isométrica del **MEF**).

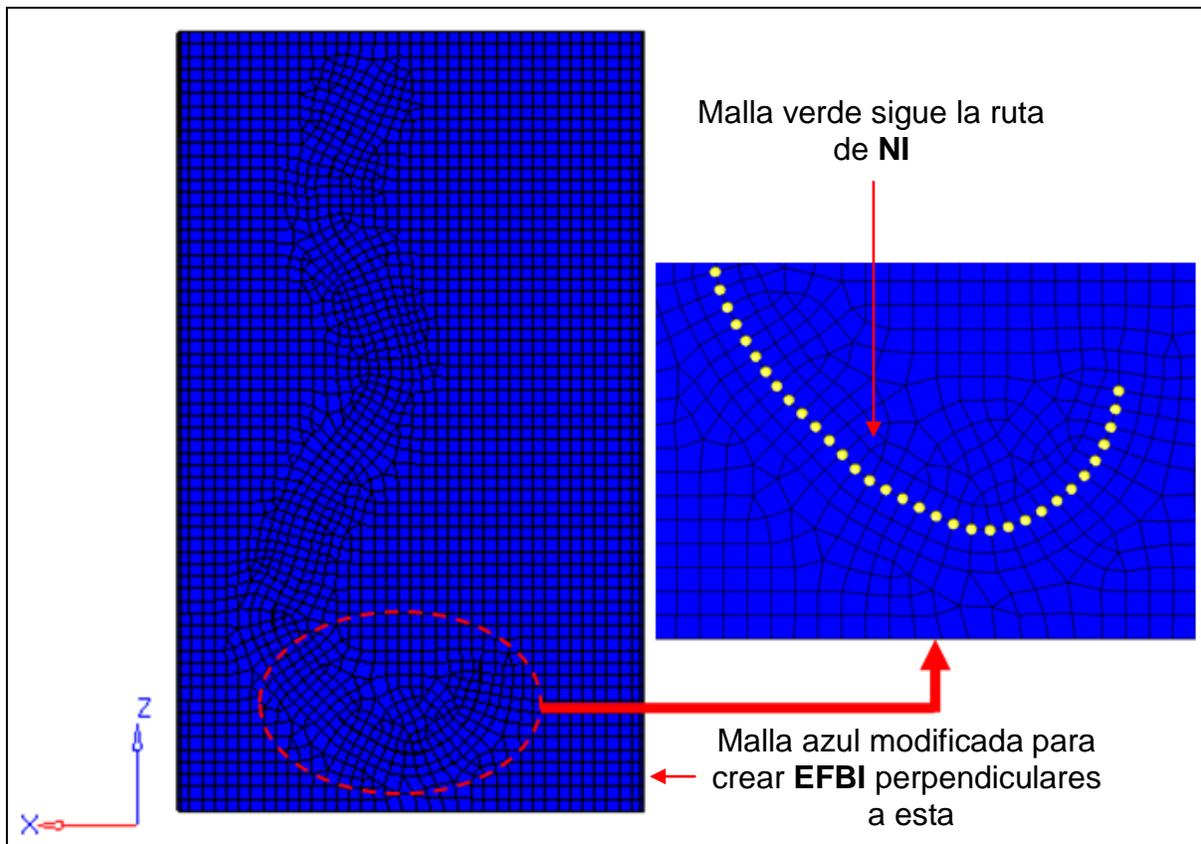


Figura 4.3.2.2. Mallas interconectadas con **EFBI**, procedimiento propuesto. (Vista en la dirección **Y** del **MEF**).

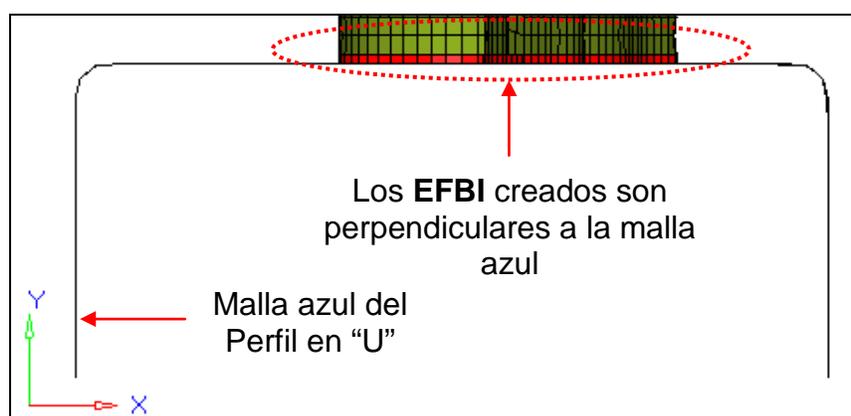


Figura 4.3.2.3. Resultados de la interconexión de mallas con **EFBI**, procedimiento propuesto (Vista en la dirección **Z** del **MEF**).

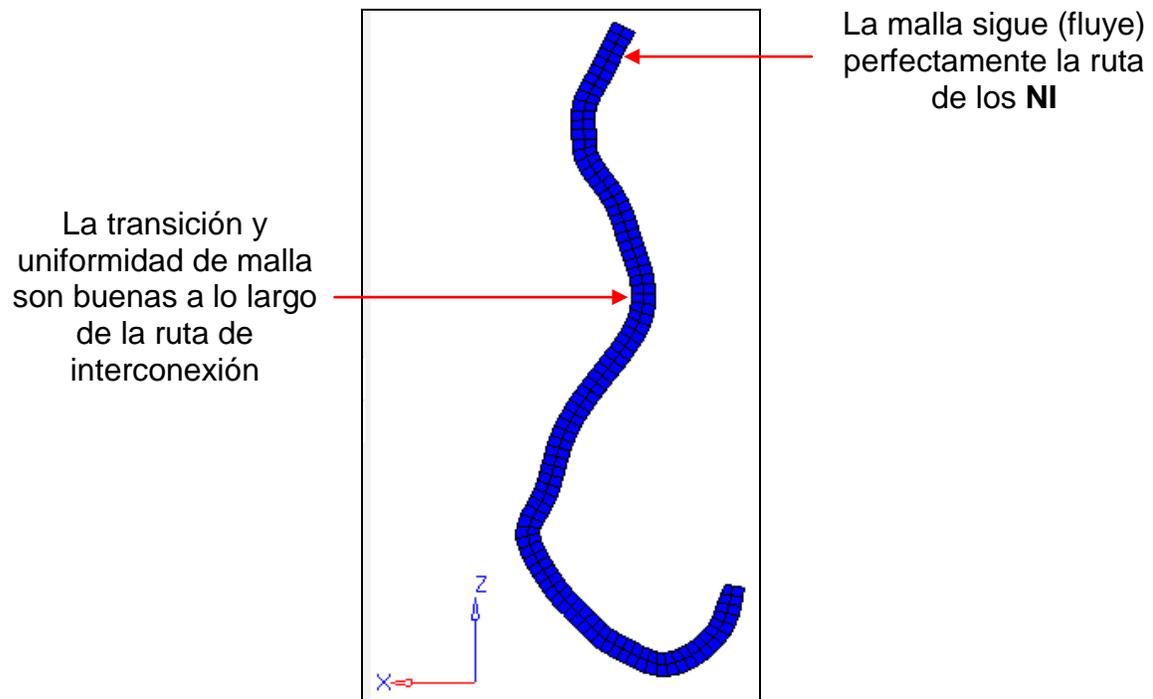


Figura 4.3.2.4. Elementos *shells* empleados para evaluar el proceso de interconexión propuesto (Vista en la dirección **Y** del MEF).

Tabla 4.3.2. Evaluaciones cualitativas y cuantitativas de la interconexión de mallas con **EFBI**, proceso propuesto.

Procedimiento Propuesto	Evaluación Cualitativa de EFBI			
	Variable	Malo	Regular	Bueno
	Flujo de malla			10
	Uniformidad de la malla			10
	Transiciones de malla			10
	Perpendicularidad de los EFBI			10
	Evaluación Cuantitativa de EFBI			
	Variable	Valor Medido		
	Tamaño promedio de los elementos	0.69		
	Número de elementos triangulares	0		
Número de elementos cuadriláteros	186			
Jacobiano Mínimo	0.66			
Tiempo de ejecución	00:02:48			
Número de clics	52			

IV.3.3. Comparativo de Resultados

Las evaluaciones cualitativas y cuantitativas detalladas en las tablas 4.3.1 y 4.3.2, denotan que el proceso novel de interconexión de mallas con elementos finitos bidimensionales brinda notablemente mejores resultados que el proceso manual, lo cual se refleja en una buena transición, flujo y uniformidad de malla, así como también en la perpendicularidad de los **EFBI** y en el tiempo empleado para completar la interconexión de mallas.

Conclusiones

Al término del presente proyecto - el cual se sitúa en el ámbito de las tareas de pre-procesamiento de modelos de elementos finitos (**MEF**) llevados a cabo en el contexto de la industria, y particularmente, en los procesos de interconexión de mallas conformadas exclusivamente por elementos *shells* - se desarrollaron dos nuevas metodologías para interconectar mallas mediante el uso de elementos finitos unidimensionales y bidimensionales cuadriláteros (**EFUI**, **EFBI**). Se interconectaron las mallas del caso de estudio mediante dichas metodologías, lo cual demostró que para esa disposición de mallas en particular, las metodologías propuestas fueron funcionales y automatizables al 100%, y sugiere que son factibles de emplearse como herramienta alternativa para interconectar mallas similares utilizadas en un análisis por elementos finitos (**FEA**) de índole estructural. La documentación de los resultados obtenidos, permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Las metodologías desarrolladas reducen la variabilidad de los actuales procesos de interconexión al eliminar: la selección manual de los nodos de interconexión (**NI**) en una de las mallas, del parámetro de búsqueda de nodos y de múltiples opciones de los actuales procesos de interconexión, cuya elección de algunas de ellas, **NO** garantiza la creación de elementos finitos de interconexión perpendiculares a una de las mallas a unir.
- Las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de los procesos de interconexión efectuados, sugieren que las dos metodologías propuestas:
 - Crean consistentemente **EFUI** y **EFBI** perpendiculares a la malla del perfil en “U”.
 - Generan una mejor calidad de malla en torno a los elementos de interconexión.

Propuestas de Mejora

Si bien, las metodologías propuestas de interconexión de mallas con **EFUI** y **EFBI** fueron 100% funcionales en el caso de estudio, y poseen mejoras cualitativas y cuantitativas significativas con respecto a los procesos existentes, sería necesario llevar a cabo la interconexión de mallas con posiciones distintas a las del caso de estudio, para verificar que las metodologías produzcan interconexiones con resultados similares a los aquí reportados. También sería deseable mejorar el flujo, transición y uniformidad de la malla contigua a los elementos de interconexión. Para ello se sugiere el desarrollo de sub-métodos que manipulen dicha malla contigua en forma independiente, pero complementaria a lo establecido en las metodologías aquí propuestas, que la subdividan en subregiones más pequeñas para lograr con ello un mejor control del remallado.

Referencias

- [1] Cesar A. Rivas, Pedro Orta. "CAE process improvement based on knowledge management and task automation". SAE international. 2009. 2009-01-0402.
- [2] Gilles Foucault, Jean-Christophe Cuilliere, Vicent Francois, Jean-Claude Léon, Roland Maranzana. "Adaptation of CAD model topology for finite element analysis". Computer aided design. October 2007. 40 (2008) 176-196.
- [3] C.K.Lee, S.P. Chiew, S.T. Lie, T.B.N. Nguyen. "Fatigue study of partially overlapped circular hollow section K-joints. Part 1: Geometrical models and mesh generation". Engineering fracture mechanics. August 2009. 76 (2009) 2445-2463.
- [4] Ugural, A.C., Fenster, S.K. Advanced Strength and Applied Elasticity. Second SI edition. United States of America, 1987. Elsevier. 471p.
- [5] Chandrasekharaiah, D.S., Debnath, Lokenath. Continuum Mechanics. United States of America, 1994. Academic Press. 595p.
- [6] Segerlind, Larry J. Applied Finite Element Analysis. Second edition. United States of America., 1984. John Wiley and Sons. 427p.
- [7] Kaliakin, Victor N. Introduction to Approximate Solution Techniques, Numerical Modeling and Finite Element Methods. United States of America, 2002. 674p.
- [8] Gent, Alan N. Engineering with Rubber –How to design rubber components. Second edition, 2001. United States of America. Hanser. 373p.
- [9] S.T. Lie, C.K. Lee, S.M. Wong. "Model and mesh generation of cracked tubular Y-joints". Engineering Fracture Mechanics. March 08, 2002. 70 (2003) 161–184.
- [10] T.E. Tay, F. Shen, K.H. Lee, A. Scaglione, M. Di Sciuva. "Mesh design in finite element analysis of post-buckled delamination in composite laminates". Composite Structures 2000. 47 (1999) 603-611.
- [11] Abhay Bhandari, Daniel Erdman, Aashish Bhatia and William Strang. "Finite Element Analysis and Material Modeling of Elastomeric Components and Assemblies: Some Practical Considerations". SAE international. 2007. 2007-26-041.
- [12] Ruding Lou, Jean-Philippe Pernot, Alexei Mikchevitch, Philippe Vérona. "Merging enriched Finite Element triangle meshes for fast prototyping of alternate solutions in the context of industrial maintenance". Computer-Aided Design. January 2010. ARTICLE IN PRESS.

[13] Ju Young Kang, B.S. Lee. "Mesh-based morphing method for rapid hull form generation". Computer-Aided Design. July 2009. ARTICLE IN PRESS.

[14] Patrick Laug . "Some aspects of parametric surface meshing ".Finite Elements in Analysis and Design. July 2009. 46 (2010) 216 - 226.

[15] K Ho-Le. "Finite element mesh generation methods: a review and classification". Computer-aided design. Volume 20, Issue 1, January-February 1988, Pages 27-38.

[16] A.J. Baptista, J.L. Alvesb, D.M. Rodriguesa, L.F. Menezesa . "Trimming of 3D solid finite element meshes using parametric surfaces: Application to sheet metal forming". Finite Elements in Analysis and Design. March 2006. 42 (2006) 1053–1060.

[17] TCL/TK 8.5 manual. <http://www.tcl.tk/man/tcl8.5/>

[18] Altair HYPERMESH online user manual version 9.0, 2008.