

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TITULO

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DE UN RACK DE BATERÍAS
FRENTE A EVENTOS DE CHOQUE”**

Autor: D. Javier Fernando Rivera Hoyos.

Tutor: D. Luis Martínez Sáez.

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Este trabajo está dedicado...

A la memoria de mi abuela.

A mis padres y hermanos, que siempre me han apoyado.

A mis amigos en Colombia que me animaron a enfrentar este reto.

A Aldo, Alberto y Alfredo, quienes fueron mi apoyo durante el Máster.

Javier.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es la culminación de una etapa más de mi vida académica, pero a la vez, representa el punto de partida de otra que me llevará a obtener uno de los más altos títulos académicos que se pueden adquirir en la ingeniería.

Quiero agradecer en estas líneas, al Dr. D. Luis Martínez Sáez quien me brindó la oportunidad de formar parte de su grupo de Investigación en la Unidad de Biomecánica del Instituto Universitario de Investigación del Automóvil – INSIA y quien, gracias a su amplia experiencia, me facilitó llevar a buen término este Trabajo Fin de Máster.

Agradezco también a los integrantes de la Unidad de Biomecánica que me han acogido amablemente durante el tiempo que he estado desarrollando este proyecto, en especial al ingeniero D. Antonio García, con quien he pasado muchas horas conociendo e indagando sobre los diferentes módulos que posee el software de simulación y compartiendo los descubrimientos propios, las nuevas herramientas del programa, las cuales nos ayudaron en la creación del modelo en elementos finitos.

Aunque no he tenido el privilegio de conocerles personalmente, reconozco la labor que han aportado los ingenieros D. Anthony Alves y D. Gilles Waymel, quienes han dedicado mucho tiempo y esfuerzo al diseño del *rack* de baterías y que han proporcionado el modelo 3D en CAD para el desarrollo del análisis de su resistencia. Agradezco en estas líneas también su autorización para la publicación de las imágenes que se refieren al *rack* de baterías.

Un agradecimiento especial al Instituto Universitario de Investigación del Automóvil – INSIA de la Universidad Politécnica de Madrid, cuyas instalaciones y personal profesional han sido primordiales para el desarrollo del presente trabajo.

RESUMEN

El presente TFM se lleva a cabo en el desarrollo del proyecto europeo OPERA4FEV, el cual hace parte del 7º Programa Marco de la Comisión Europea realizado por diez entidades, de seis países diferentes, especializadas en diversos campos de la ingeniería, teniendo como objetivo, el proponer una solución alternativa que sea barata, ligera y versátil, que mejore la tecnología actual, la cual está basada en la utilización de *racks* metálicos para el empaquetamiento de las baterías de los vehículos eléctricos. Para cumplir con el objetivo mencionado, se ha propuesto desarrollar un *rack* para baterías fabricado en algún material termoplástico y en el rediseño de los componentes internos del mismo, cumpliendo todos los requisitos normativos de seguridad y reduciendo el peso del conjunto.

Este Trabajo Fin de Master trata del análisis de la resistencia mecánica de un *rack* de baterías, el cual fue llevado a cabo mediante el uso de la técnica de los elementos finitos, empleando software especializado de simulación para representar las condiciones características de diferentes eventos de choque.

Se siguió la metodología tradicional para el análisis por elementos finitos, que inicia con una geometría inicial creada en un programa CAD y la cual posteriormente es dividida en elementos finitos. A continuación, se procede a la asignación de cargas y condiciones de contorno completando el modelo y dejándolo preparado para el proceso de cálculo. Finalmente, los resultados son analizados y se toman las decisiones para realizar modificaciones en el modelo.

Con este TFM se logró realizar la evaluación de una primera propuesta de diseño de un *rack* de baterías para un vehículo industrial, determinando las áreas críticas de fallo y aportando soluciones para su mejoramiento.

Palabras clave: Hyperworks, simulación, mallado, OPERA4FEV.

Códigos UNESCO: 1206.08, 2205.09, 3312.09, 3312.10, 3317.02.

ABSTRACT

This Master's Thesis is carried out in the development of the European project OPERA 4FEV, which is part of the 7th Framework Programme of the European Commission accomplished by ten organizations from six different countries, specialized in different fields of engineering, aiming at the propose an alternative solution that will be cheap, lightweight and versatile, to improve the current technology, which is based on the use of metal *racks* for packaging the batteries of electric vehicles. To meet the above objective, it is proposed to develop a battery *rack* made of thermoplastic material and a redesign of the internal components, it fulfilling all regulatory requirements of safety and contributing to reduce the overall weight.

This Master's Thesis is about of the analysis of the mechanical strength of a *rack* of batteries, which was accomplished by means of the use of the technique of finite elements using specialized simulation software to represent the characteristic conditions of different shock events.

For this project was used traditional methodology for the finite elements analysis, which starts with an initial geometry created in a CAD program, after which it is discretized into finite elements. Then it proceeds to assign loads and boundary conditions for to complete the model and it leaving prepared for the calculation process. Finally, results are discussed and decisions are made for changes in the model.

With this Master's Thesis was achieved the evaluation of a first design proposal of a batteries *rack* for an industrial vehicle, identifying critical areas of failure and providing solutions for improvement.

Keywords: Hyperworks, simulation, meshing, OPERA4FEV.

UNESCO codes: 1206.08, 2205.09, 3312.09, 3312.10, 3317.02.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	OBJETIVOS Y ALCANCE	12
3.	EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	14
4.	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE COMPONENTES MEDIANTE EL MEF	17
4.1	PRE-PROCESAMIENTO	17
4.1.1	Mallado en 2D.	21
4.2	PROCESAMIENTO – CÁLCULO	25
4.2.1	Método de integración implícito	25
4.2.2	Método de integración explícito	26
4.3	POST- PROCESAMIENTO – VISUALIZACIÓN.....	26
5.	CASO DE ESTUDIO	28
5.1	INFORMACIÓN CAD	28
5.2	PREPROCESAMIENTO	29
5.2.1	Mallado.....	29
5.2.2	Asignación de materiales y propiedades	33
5.2.3	Asignación de cargas y restricciones	35
5.3	PROCESAMIENTO - CÁLCULO	38
5.4	POST PROCESAMIENTO	40
6.	RESULTADOS.....	41
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	44
8.	BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Suite HYPERWORWS.....	16
Figura 2. Metodología de análisis por el Método de los Elementos Finitos.	17
Figura 3. Proceso de discretización de superficies continuas.	18
Figura 4. Nodos y elementos	18
Figura 5. Elementos en 1D.	19
Figura 6. Elementos en 2D.	19
Figura 7. Elementos en 3D.	20
Figura 8. Elementos característicos para el mallado 2D.	21
Figura 9. Elemento tipo trias.	22
Figura 10. Elementos CST y LST.....	22
Figura 11. Elemento tipo <i>Quad</i>	22
Figura 12. Elementos tipo <i>Quad4</i> y <i>Quad8</i>	23
Figura 13. Proceso de retroalimentación en el análisis por el MEF.	27
Figura 14. Cambio de formato del archivo CAD.	29
Figura 15. <i>Rack</i> de baterías.....	29
Figura 16. Superficie media generada en HYPERMESH.	30
Figura 17. Proceso de mallado en HYPERMESH.	32
Figura 18. Tarjetas características de HYPERMESH para la definición de propiedades y materiales.....	35
Figura 19. Perfiles de aceleración utilizados para representar diferentes situaciones de choque.....	36
Figura 20. Definición de contactos Type 7 en HYPERCRASH.	37
Figura 21. Restricciones impuestas al modelo.	37
Figura 22. Modelado de uniones atornilladas en elementos finitos..	38
Figura 23. <i>Rack</i> de baterías discretizado en elementos finitos.....	41
Figura 24. Visualización, en HYPERVIEW, de los esfuerzos soportados sobre el <i>rack</i> de baterías.	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Funciones de desplazamiento de diferentes tipos de elementos.....	24
Tabla 2. Índice de calidad utilizado en el mallado.	31
Tabla 3. Estructura del modelo del <i>rack</i> de baterías en elementos finitos.....	41

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

MEF: Método de los Elementos Finitos.

CAD: Computer-Aided Design (Diseño asistido por ordenador)

CAE: Computer-Aided Engineering (Ingeniería asistida por ordenador)

GUI: Graphical User Interface.

CST: Constant Strain Triangule

LST: Linear Strain Triangule

IGES: Initial Graphics Exchange Specification

OPERA 4FEV: OPerating Energy *Rack* for Full Electric Vehicle

1. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz ha venido impulsando en los últimos años, el desarrollo de productos acordes a las tendencias actuales de reducción del uso de combustibles fósiles y de conservación medioambiental, promoviendo la utilización de sistemas de propulsión eléctricos en vehículos convencionales. Y aunque se han dado grandes pasos para lograr la masificación del vehículo eléctrico en las grandes ciudades, aún quedan retos tecnológicos por resolver, relacionados principalmente con aumentar la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías, disminuir el peso de los componentes y garantizar la seguridad en el uso de este tipo de vehículos.

El proyecto “*OPerating Rack For Full-Electric Vehicle – OPERA4FEV*”, en el cual se enmarca este Trabajo Fin de Máster, es un proyecto europeo del 7º Programa Marco que tiene como objetivo mejorar los componentes que actualmente se utilizan para el empaquetamiento de baterías en vehículos eléctricos, esto mediante el diseño y construcción de un *rack* de baterías, utilizando materiales termoplásticos para su fabricación. Con este desarrollo, se busca reducir el peso de los elementos que no almacenan energía en el vehículo para poder compensar dicha reducción con el aumento del número o del tamaño de las baterías y así incrementar la autonomía del vehículo para un mismo peso máximo. También se busca el facilitar el montaje en el bastidor, el hacer más rápidas las conexiones de las baterías, el disminuir los costes y el facilitar la producción, todo ello cumpliendo con los requisitos normativos exigidos que garantizan la seguridad de los usuarios del vehículo.

Este Trabajo Fin de Máster, el cual fue realizado en la Unidad de Biomecánica del INSIA-UPM, se centró en el estudio de un primer diseño de *rack* de baterías para vehículos eléctricos, utilizando para ello el modelado y el análisis por elementos finitos. Para llevar a cabo esta labor, fue necesario el uso de software especializado tanto de diseño asistido por ordenador (CAD), como de análisis por elementos finitos. Con estas herramientas se efectuaron las labores de diseño mecánico de los componentes del *rack* de baterías, así como el pre-procesamiento, cálculo y post procesamiento del modelo obtenido mediante la discretización por elementos finitos de la geometría inicial.

El documento presenta una recopilación inicial del fundamento de los elementos finitos y su desarrollo a través del tiempo. A continuación, se describe la metodología empleada para abordar las labores de análisis de la resistencia de los componentes utilizando el método de los elementos finitos. Posteriormente se exponen las etapas prácticas que se siguieron en la creación del modelo de elementos finitos del *rack* de baterías en estudio y los resultados obtenidos al someter este modelo a condiciones de choque. Para finalizar, se presentan las conclusiones resultantes de la realización de este trabajo y las tareas futuras propuestas para su continuación.

La ejecución de este TFM, ha permitido evaluar la resistencia mecánica de un diseño de *rack* de baterías cuando se le somete a diferentes condiciones de aceleración, similares a las producidas en una situación de choque real, lo cual ha sido logrado mediante la reproducción de más de 200 ensayos virtuales, significando lo anterior un tiempo de aproximadamente diez mil horas de cálculo si cada ensayo fuera realizado independientemente, sin embargo con la disponibilidad de los ordenadores propios de la Unidad de Biomecánica, se hizo posible la ejecución de varias simulaciones en paralelo consiguiendo de esta manera, una reducción sustancial del tiempo total de verificación y de validación virtual de la resistencia mecánica del modelo en 3D diseñado previamente.

Mediante la aplicación de la simulación virtual para la validación de diseños de componentes mecánicos, cuyos procesos de fabricación implican altos costes en la elaboración del herramental y por ende requieren de un alto grado de precisión en el momento de su definición, como es el caso del dispositivo estudiado en el presente trabajo, se hace imprescindible la realización de este tipo de ensayos que disminuyen los elevados costes que surgirían en la realización sucesiva de pruebas a prototipos reales en un laboratorio especializado.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

Motivación del proyecto

Un análisis del comportamiento mecánico de componentes, como el que se pretende realizar en este trabajo, se desarrolla para generar conocimiento acerca de nuevos productos u optimización de los ya existentes. A la vez, con la aplicación de la metodología para el análisis del *rack* de baterías, se persigue brindar pautas básicas acerca del uso de procedimientos automatizados para la generación de modelos y simulaciones, basados en el MEF.

Así mismo, este trabajo procura proporcionar información al fabricante de componentes de plástico participante en el proyecto OPERA 4FEV, encaminada a contribuir con el desarrollo de nuevas piezas que inicialmente serán incorporadas en un modelo específico de vehículo eléctrico.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la resistencia de un *rack* de baterías de un vehículo eléctrico, realizado en materiales termoplásticos y sometido a situaciones de choque.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Generar un modelo de un *rack* de baterías para un vehículo eléctrico, utilizando el método de los elementos finitos.
- b. Simular el comportamiento mecánico del modelo generado en elementos finitos, bajo diferentes funciones de aceleración.
- c. Determinar las áreas de fallo mecánico del modelo generado mediante el método de los elementos finitos, utilizando herramientas de post-procesamiento.
- d. Aplicar los conocimientos y competencias adquiridas en la formación recibida como estudiante del master universitario en Ingeniería Mecánica.

Alcance del proyecto

Este trabajo se inicia con un diseño proporcionado en 3D del *rack* de baterías, elaborado previamente en un programa de CAD. Se efectuarán ensayos virtuales de aceleración sobre un modelo de elementos finitos con las especificaciones que proporcione el fabricante y siguiendo los parámetros establecidos en la normativa vigente para la realización de este tipo de pruebas. El número de ensayos a realizar dependerá de los efectos que se logren en la sucesiva evolución de modelo, lo que implicará cambios en el diseño original. Los ensayos, y por consiguiente este trabajo, concluirán en el momento en el que se asegure que los componentes externos del *rack* no rompen en ninguna de las condiciones establecidas en las cuales ha sido ensayado.

3. EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El análisis por elementos finitos, es un método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales (Jiménez, 2004, p.19.), empleado comúnmente en Ingeniería para la resolución de problemas relacionados con la mecánica de sólidos, la transferencia de calor, la dinámica de fluidos, el transporte de masa, entre otros.

En la ingeniería moderna, el método de los elementos finitos (MEF), se convierte en una poderosa herramienta de ayuda para el ingeniero, la cual le facilita la labor de cálculo, análisis y toma de decisiones, especialmente cuando se estudian geometrías complejas o situaciones de cargas gobernadas por una formulación matemática que resulta compleja y difícil de resolver de forma analítica.

Como lo exponen algunos autores, la idea del método es bastante sencilla, la cual se explica para el caso del análisis estructural:

“Dado un sólido continuo de geometría compleja, sometido a un sistema de cargas y restringido por unas ligaduras, el método consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de los nodos de los elementos, de manera que suponemos que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nodos del elemento (desplazamientos nodales); posteriormente, se podrá determinar la matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (siguiendo los pasos del análisis matricial de estructuras), permitirán la obtención de los desplazamientos en los nodos de cada elemento” (Navarro, 2009).

El proceso de cálculo mediante segmentación o discretización, se puede decir que nace con los antiguos matemáticos, tal como se evidencia en el trabajo realizado por Arquímedes, el cual utilizó el método exhaustivo para determinar el perímetro de un círculo, limitando este con polígonos (inscritos y circunscritos), de tal manera que los segmentos de recta aproximasen su circunferencia (Fonseca, 2011), hallando así el valor de la constante Pi (π), y planteando a la vez, un primitivo modelo de lo que hoy se conoce como los elementos finitos. Posteriormente fueron personajes como Isaac Newton y Gottfried Wilhelm Leibniz quienes desarrollaron el cálculo infinitesimal, el cual consiste en hacer divisible un modelo en pequeñas partes o diferenciales, que sumadas (integradas) dan nuevamente el total del modelo.

A partir de estos desarrollos, son muchos los investigadores que han aportado en el progreso del método de los elementos finitos. En 1909, Walter Ritz plantea lo que hoy en matemáticas es conocido como el método de Ritz, el cual consiste en asumir la “forma” de las incógnitas involucradas en el problema, en términos de unas funciones de aproximación conocidas y unos parámetros a determinar. La introducción de estas funciones en el funcional que describe el problema en estudio, y su posterior diferenciación con respecto a los referidos parámetros, produce una ecuación la cual es

igualada a cero. Si existen n parámetros desconocidos, se formará un sistema de n ecuaciones simultáneas. La solución de dicho sistema permite determinar dichos parámetros y, por lo tanto, obtener la solución aproximada del problema (Fonseca, 2011, p.3). En 1941 con los trabajos de Hrenikoff y en 1943 con los de McHenry se propone el uso de líneas en una dimensión para representar elementos como barras o vigas para el cálculo de esfuerzos en sólidos con sección transversal continua (Jiménez, 2004, p.22).

Luego, en 1943, el matemático alemán Richard Courant, publica una investigación en donde hace una extensión del trabajo de Ritz, introduciéndole funciones seccionalmente continuas, definidas sobre áreas triangulares, lo cual, conjuntamente con el principio de mínima energía potencial le permitió estudiar problemas de torsión (Fonseca, 2011, p.3).

Pero fue solo hasta 1960, con el trabajo del estadounidense Ray Clough, que se acuña el término de elemento finito en la publicación "*The finite element method in plane stress analysis.*" El trabajo de Clough es similar al que presentó Courant y en él presenta el método de los elementos finitos como una extensión de las técnicas de análisis estructural.

En 1967, Zienkiewicz y Cheung publican el primer libro sobre elementos finitos (Chandrupatla, 1999).

Desde la década de los 70's, la evolución de las técnicas, no solo de análisis estructural sino de otras áreas como fluidos, transferencia de calor, electromagnetismo, entre otras, mediante la implementación del MEF, se ha venido acrecentando gracias a los continuos y rápidos avances en el desarrollo de herramientas de procesamiento y cálculo, integradas en los ordenadores.

Y precisamente, han sido las industrias aeronáutica y automotriz, las que conjuntamente con las empresas desarrolladoras de software, han estado a la vanguardia en los adelantos generados en el campo del MEF a finales del siglo XX e inicios del XXI.

En la actualidad, programas comerciales de CAD y CAE tales como Solid Edge, Solid Works, NX, CATIA, entre otros, traen incorporados módulos que permiten realizar diferentes tipos de análisis, o simulaciones, utilizando el MEF, siendo un complemento de validación al simple modelado de piezas en 3D o al ensamblaje de productos.

Para el desarrollo de este proyecto se trabajó bajo la licencia de HyperWorks, un software CAE creado por la empresa estadounidense ALTAIR ENGINEERING INC, el cual se compone de varios módulos de simulación, útiles en diversos campos de la ingeniería; para el caso de estudio que se tratará posteriormente, se emplearon los módulos Hypermesh, Hypercrash, Radioss e Hyperview.

Altair Hypermesh es un pre-procesador de elementos finitos de alto rendimiento (Altair Eng. Inc, 2014), el cual permite realizar el mallado (discretización), de una geometría creada en un programa CAD convencional, con los criterios de calidad deseados, gracias a la posibilidad de efectuar modificaciones a los parámetros geométricos de los elementos que conforman la malla.

El módulo Altair Hypercrash posee una tecnología de pre-procesamiento altamente afinada, específicamente diseñada para automatizar la creación de modelos de alta fidelidad para análisis de *crash* y evaluación de seguridad. A través de un amplio conjunto de herramientas y procedimientos orientados (GUI), este módulo mejora y simplifica complejos problemas de creación de modelos *crash* de calidad (Altair Eng. Inc, 2014).

Por otra parte, Altair Radioss es uno de los módulos de procesamiento y cálculo proporcionados por ALTAIR HYPERWORKS. Éste es un programa de solución multidisciplinario de elementos finitos (Altair Eng. Inc, 2014), o “solver” como se conoce en inglés. Mediante este módulo se consigue el desarrollo de problemas lineales y no lineales, comunes en diferentes ramas de la ingeniería.

Finalmente, Altair HyperView proporciona un entorno de post-procesamiento y visualización para el análisis de modelos por elementos finitos, simulación de sistemas multicuerpo, video digital y datos ingenieriles. Con herramientas de animación interactiva para la creación de gráficos y con funcionalidad de video digital, se mejora la visualización de resultados, análisis y correlación de los mismos (Altair Eng. Inc, 2014).

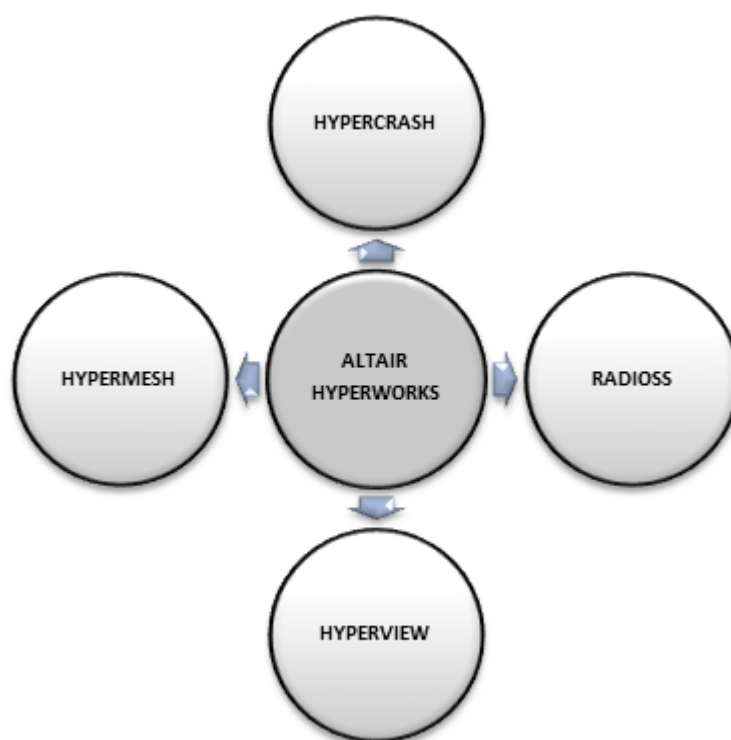


Figura 1. Suite HYPERWORWS.

4. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE COMPONENTES MEDIANTE EL MEF

El proceso de un análisis común mediante el MEF, puede resumirse en las siguientes etapas:

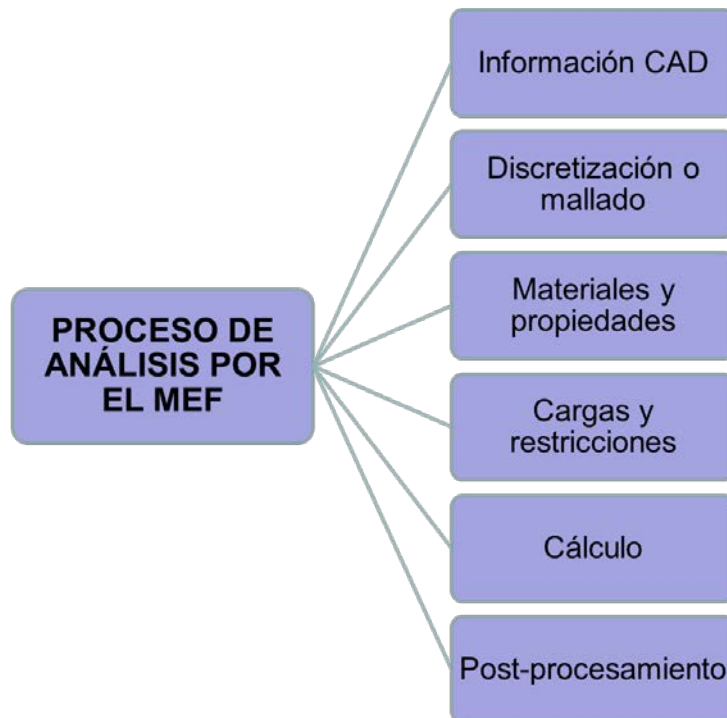


Figura 2. Metodología de análisis por el Método de los Elementos Finitos (Fuente: HW Starter manual).

4.1 PRE-PROCESAMIENTO

La fase de pre-procesamiento es aquella donde se genera el modelo en elementos finitos (Cerrolaza, 2007, p.364) y contempla todas las operaciones que se realizan antes de efectuar cualquier cálculo.

En esta etapa inicial del método, se asigna la información física al modelo, tanto la interna como la externa, es decir las propiedades del material, las cargas aplicadas, las condiciones de contorno, entre otras, que permitan la descripción total del componente original en el entorno que se procura simular. Sin embargo, para realizar la asignación de estos parámetros, primero se deberá preparar la superficie original, dividiendo ésta en elementos más pequeños. A este proceso se le conoce como mallado.

La generación de la malla es el proceso en el cual se efectúa la discretización del modelo (Altair Eng. Inc, 2012) pasando este de un dominio continuo, en el que se tienen infinitos puntos e infinitos grados de libertad, a uno finito, con finitos puntos y grados de libertad, como se muestra en la Figura 3 consiguiendo de esta manera que el número de ecuaciones a resolver se reduzca y por consiguiente, el tiempo de solución del sistema general. El mallado, en el análisis por el MEF, se considera como un proceso fundamental para obtener, al final del proceso, un resultado confiable y cercano a una solución analítica del problema.

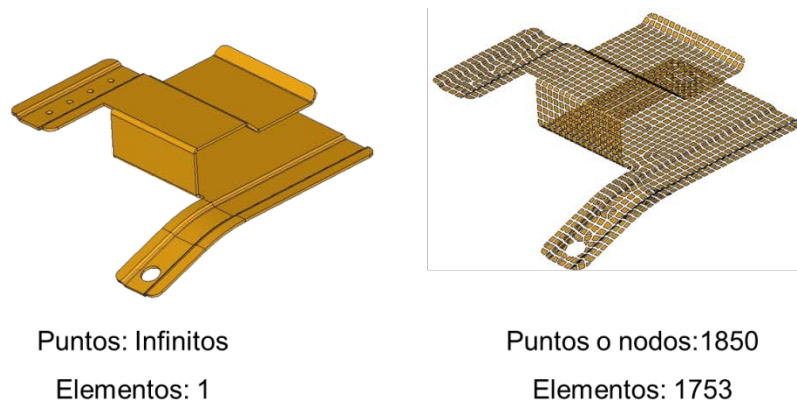


Figura 3. Proceso de discretización de superficies continuas.

La malla está conformada por un determinado número de elementos (finitos), logrados estos mediante la discretización de un componente. Cada elemento representa una pequeña porción o superficie, la cual se ha de comportar como un volumen de control independiente (Jiménez, 2004, p.21) y que se puede ver afectado por la interacción con otros elementos vecinos y/o por las condiciones de frontera del cuerpo estudiado. Cada elemento interactúa con su par a través de sus nodos en común. Los nodos son los puntos de conexión entre dos o más elementos, en ellos son calculados los desplazamientos puntuales, para posteriormente calcular esfuerzos y deformaciones que serán interpolados a todo el conjunto de elementos que conforman el cuerpo original sujeto al análisis.

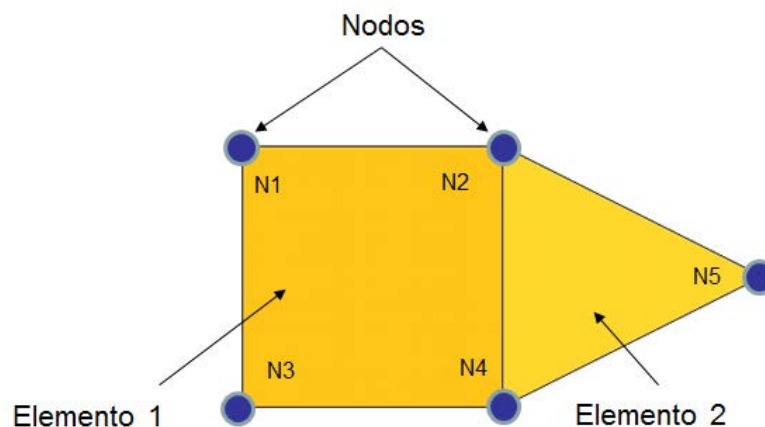


Figura 4. Nodos y elementos

Investigadores y desarrolladores de software de elementos finitos, han creado una serie de elementos con el fin de adaptar el mallado a diversos factores, siendo los principales la geometría del componente y el tipo de análisis que se desea realizar. Así mismo, en el

momento de escoger el elemento adecuado, también se debe considerar la experiencia de quien esté a cargo del mallado y el tiempo que se dispone para realizar el análisis.

En lo que respecta al tamaño y la forma de la pieza, sujeta a análisis por el MEF, pueden considerarse elementos 1D, 2D y/o 3D para efectuar el mallado. Se emplean elementos 1D cuando una de las dimensiones geométricas de la pieza es por lo menos diez veces más grande en magnitud que las dos restantes. Este tipo de elementos se emplean en componentes tales como barras, ejes, pasadores, uniones y similares. Cuando se usan elemento 1D, es necesario que el diseñador proporcione al programa las dos dimensiones restantes, de forma directa, o indirectamente a través del área transversal del elemento.

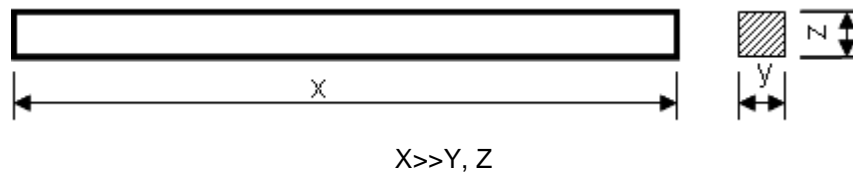


Figura 5. Elementos en 1D.

Cuando se utilizan elementos 2D en la malla, es porque se presenta la situación donde dos de las dimensiones geométricas de la pieza son mucho más grandes que la restante, por lo menos en diez veces. Este tipo de elementos se emplean con frecuencia en análisis de placas, láminas, componentes de plástico y similares cuyo espesor es muy pequeño. Cuando se efectúa el mallado con elementos 2D, es imprescindible que se proporcione al programa, como dato de entrada, el valor del espesor de la pieza.

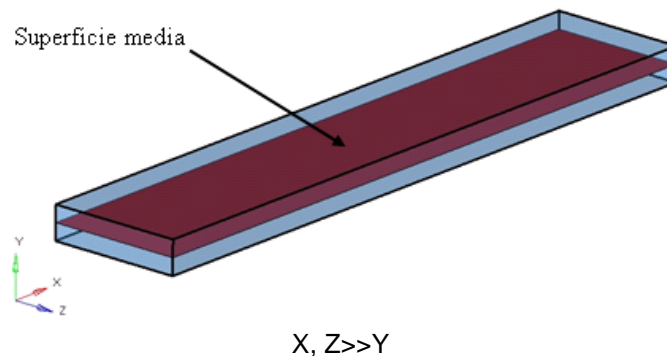


Figura 6. Elementos en 2D.

En cuanto al uso de elementos finitos para el mallado de piezas tales como bloque motor, cigüeñal, bielas u otras, donde sus tres dimensiones geométricas son comparables entre sí, se hace necesario el uso de elementos 3D que se adaptan al tamaño y la forma de este tipo de piezas.

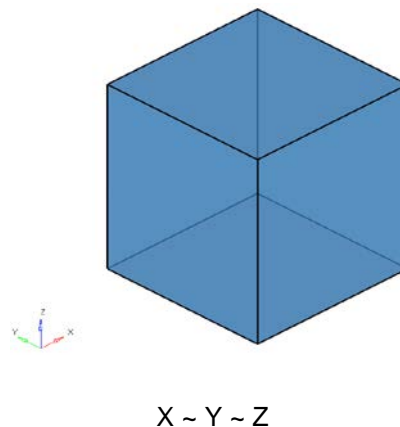


Figura 7. Elementos en 3D.

Otra de las consideraciones, a la hora de efectuar el mallado, es el tipo de análisis al que se someterá la pieza. Si se desea realizar, por ejemplo, un análisis estructural y de fatiga se prefiere el uso de elementos *quad*, para la situación 2D, o elementos *Hex*, cuando se da un estudio en 3D. Si lo que se pretende es efectuar un análisis no lineal o simular un evento de choque (*crash*) la prioridad debe estar centrada en las líneas de flujo de la malla, las cuales deben ser suaves en las secciones donde se presenten variaciones de forma, para el caso de un análisis de este tipo en 2D, se recomienda el uso de elementos *quad* combinado con elementos *Tria* que permitan, estos últimos, suavizar las líneas de flujo de la malla en las transiciones de sección de la pieza.

Cuando se realiza un análisis de flujo en moldes, los investigadores han podido determinar que se obtienen mejores resultados con el uso de elementos triangulares comparados a los que se logran con elementos cuadrangulares. Por último, en los análisis dinámicos se debe tratar de aproximar el análisis a elementos 2D, siempre que sea posible (Altair Eng. Inc., 2012).

El tercero de los factores es determinar el tamaño adecuado para el elemento seleccionado, dándole así el grado de densidad a la malla para que el resultado final tenga una aproximación mucho más cercana a la realidad, sin embargo conseguir el tamaño adecuado estará supeditado a factores como la experiencia previa del encargado de generar el mallado, el tipo de análisis a realizar, así como factores tecnológicos tales como la configuración del hardware y la capacidad de la tarjeta de video del ordenador.

Un último factor determinante en el pre-procesamiento, es el tiempo disponible para realizar el mallado de las superficies, el cual junto con las habilidades del modelador, influirán en la calidad final de la malla. Cuando se tiene un amplio periodo de tiempo de dedicación, la posibilidad de obtener una malla uniforme, con un flujo suave entre elementos y con el total cumplimiento de los criterios de calidad preestablecidos será mayor, influyendo positivamente en la etapa posterior de cálculo.

En lo que respecta a la asignación de propiedades, materiales, cargas y restricciones, los programas de pre-procesamiento por elementos finitos, incorporan un menú de

herramientas que facilita la asignación de estos parámetros, los cuales se configuran según los requerimientos específicos de cada modelo. En el caso de estudio presentado posteriormente, tema central de este trabajo, se ahondará en este tópico.

4.1.1 Mallado en 2D.

Este tipo de malla se emplea en componentes donde dos de sus dimensiones geométricas predominan sobre la tercera, siendo el espesor esa última referencia. El mallado en 2D se puede emplear frecuentemente para el análisis de piezas tales como láminas, membranas, componentes de plástico, entre otras, como se mencionó anteriormente.

Dentro de los elementos disponibles para la generación de una malla en 2D, se encuentran los elementos tipo *Tria* y los tipo *Quad*, que a su vez presentan cada uno, una subdivisión dependiendo del número de nodos que conforman el elemento.

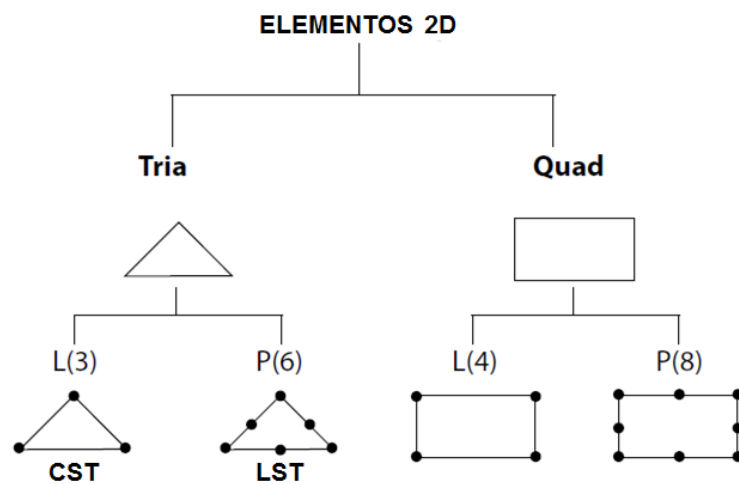


Figura 8. Elementos característicos para el mallado 2D.

4.1.1.1 ELEMENTOS TIPO TRIAS.

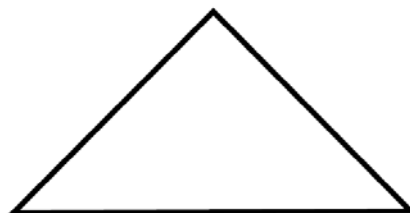


Figura 9. Elemento tipo trias.

Como se observa en la figura, los elementos tipo *Tria* son elementos triangulares y se consideran como la forma más simple para un elemento de análisis en 2D. Fue el primer elemento desarrollado para el análisis por elementos finitos (Prukl, 1992), sin embargo se han venido desarrollando otros elementos que den mayor precisión a los cálculos y puedan reemplazar los elementos triangulares. Los elementos *Tria*, pueden ser de dos clases, *Constant Strain Triangule (CST)*, el cual posee un nodo en cada uno de sus vértices, y la clase *Linear Strain Triangule (LST)*, un elemento que posee seis nodos, tres ubicados en cada uno de sus vértices y los tres restantes en el punto medio de sus lados, como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Elementos CST y LST.

4.1.1.2 ELEMENTOS TIPO QUADS

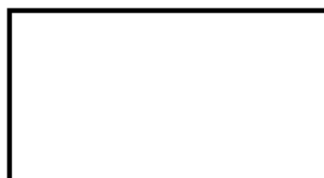


Figura 11. Elemento tipo *Quad*.

Los elementos *Quad*, son del tipo cuadrangular y fueron desarrollados para mejorar los resultados obtenidos a través de la discretización mediante los elementos *Tria*. Al igual que los anteriores, este tipo de elementos se subdivide en dos clases: *Quad* de cuatro nodos, uno en cada vértice, y *Quad* de ocho nodos, uno en cada vértice del cuadrilátero y los cuatro restantes en el punto medio de sus lados, tal como se aprecia en la Figura 12.

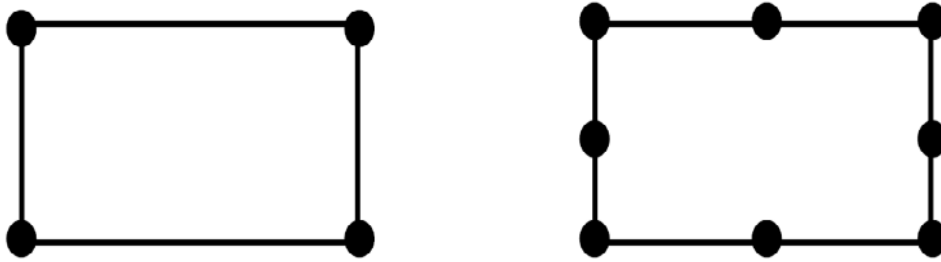


Figura 12. Elementos tipo *Quad4* y *Quad8*.

Los elementos triangulares CST, de tres nodos, y su evolución hacia elementos cuadrangulares, de cuatro nodos, para el análisis por el MEF se explica de la siguiente manera:

Se considera un elemento en una situación de esfuerzo plano de tres nodos, en el plano xy , numerados 1, 2 y 3, respectivamente. Los desplazamientos en la dirección x serán U_1 , U_2 y U_3 , mientras que los desplazamientos en la dirección y serán v_1 , v_2 y v_3 .

La función de desplazamiento tendrá la siguiente forma

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$

$$v = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y$$

Donde α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 y α_6 son las constantes que describen el comportamiento del elemento.

Mediante diferenciación es posible obtener el valor de las deformaciones:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \alpha_2$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha_6$$

Como se observa, los valores de la tensión tanto en x como en y son valores constantes.

Cuando se emplea un elemento con cuatro nodos, se tienen ocho constantes que describen el comportamiento del elemento.

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy$$

$$v = \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 xy$$

Mediante diferenciación se obtiene:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \alpha_2 + \alpha_4 y$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha_7 + \alpha_8 x$$

La deformación en x, ahora es una función lineal de su valor y.

Este resultado, mejora con respecto al obtenido en un elemento triangular de solo tres nodos.

Si se utilizaran elementos con más nodos, se mejorarían aún más los resultados obtenidos como se resume en la Tabla 1

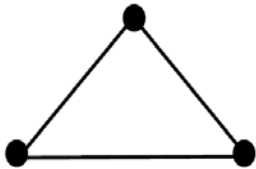
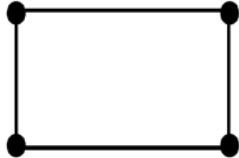
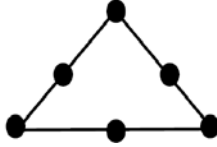
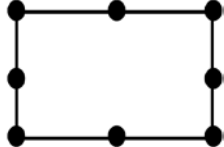
TIPO DE ELEMENTO	FUNCIÓN DE DESPLAZAMIENTO
 <p style="text-align: center;">CST</p>	$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$ <p>(3 nodos - 3 términos en la función desplazamiento)</p> $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \alpha_2 = cte$ $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha_6 = cte$
 <p style="text-align: center;">QUAD 4</p>	$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy$ <p>(Un término adicional en comparación a CST. Da mayor exactitud)</p>
 <p style="text-align: center;">LST</p>	$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 + \alpha_6 xy$ <p>(6 nodos - 6 términos en la función desplazamiento)</p>
 <p style="text-align: center;">QUAD 8</p>	$u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 + \alpha_6 x^2 y + \alpha_7 xy^2$ <p>(Dos términos adicionales en comparación a LST. Da mayor exactitud)</p>

Tabla 1. Funciones de desplazamiento de diferentes tipos de elementos.

4.2 PROCESAMIENTO – CÁLCULO

En el análisis por el MEF se conoce como etapa de procesamiento a la fase donde son realizados los cálculos computacionales para dar solución a la situación de fuerzas y restricciones del modelo, mediante la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas que rigen el problema. Los programas denominados “solver” o solucionadores, son los encargados de ejecutar los algoritmos que permiten la realización de los cálculos mencionados anteriormente.

Según como se plantee el modelo de elementos finitos, así como el objetivo del análisis, se implementará el método de integración más adecuado para optimizar los recursos disponibles tales como tiempo, capacidad de procesamiento, memoria disponible, entre otros.

Dentro de los métodos de integración disponibles se encuentran el método de integración explícito y el método de integración implícito.

4.2.1 Método de integración implícito

Es incondicionalmente estable, es decir, que requiere la solución en cada paso de un sistema global de ecuaciones.

Consiste en un cálculo incremental, en el cual se pueden considerar tres etapas, para cada paso o incremento:

ETAPA 1

Se efectúa un primer cálculo, basado en la matriz de rigidez original y las condiciones iniciales del problema.

ETAPA 2

Al final del cálculo, se actualiza la matriz de rigidez con los cambios geométricos y de materiales.

ETAPA 3

Se realiza una nueva iteración mediante métodos como el de Newton-Raphson o similares, para encontrar el equilibrio de las fuerzas externas y las internas.

El algoritmo se repite con la matriz de rigidez generada. El programa iterará hasta cuando la diferencia entre la fuerza interna y la fuerza externa sea inferior al error de la precisión de la solución. Cuando el código es capaz de encontrar la solución se dice que el cálculo converge. Si luego de un determinado número de iteraciones (dependiendo del solver), no se llega a la solución final, se dice que el cálculo diverge

Para problemas estático-lineales, encontrar el equilibrio requerirá de pocas iteraciones, las cuales se incrementarán en la medida que surjan no linealidades en los parámetros del modelo, es decir que se incremente la complejidad del mismo.

La principal ventaja de este método es la posibilidad de tener grandes pasos de integración, así como de dar resultados más precisos.

Este método de integración se aplica a análisis estáticos o cuasi-estáticos y en modelos de baja complejidad, debido al tiempo que se toma en realizar la doble iteración (Etapas 2 y 3).

4.2.2 Método de integración explícito

Es condicionalmente estable, es decir que el paso de tiempo se ve limitado por un tiempo crítico que depende del tipo de problema.

Al igual que la integración implícita, la integración explícita es un proceso incremental, con la única diferencia que solo se ejecutan las dos primeras etapas, mencionadas en el método anterior. Sin embargo, esa situación hace que el paso de integración sea muy pequeño con el fin de asegurar el equilibrio entre las fuerzas externas e internas. Para cálculos por este método, es necesario fijar un tiempo de ejecución en el cual se realizará la simulación y sobre el cual se estimará el tiempo de cada uno de los pasos de integración.

Es un método útil para el cálculo de modelos de gran complejidad, con situaciones de carga, materiales u otras condiciones de no linealidad, debido a que no es necesaria la comprobación de equilibrio (Etapas 3) que supone, para grandes sistemas, amplios tiempos de procesamiento y altos recursos computacionales.

4.3 POST- PROCESAMIENTO – VISUALIZACIÓN

Los datos que se generan en la fase de cálculo deben ser tratados para que tengan una presentación clara y permitan una fácil comprensión de los mismos, ayudando así al análisis de los diferentes resultados generados. Para ello, el software especializado en post procesamiento de información, cuenta con herramientas visuales que generan contornos, gráficas y tablas, útiles para entender el comportamiento del modelo en estudio.

Sobre el entorno visual del programa, y/o mediante datos numéricos, se hace el análisis para verificar que los requerimientos de diseño se cumplan a satisfacción, así como los reglamentos y normativas, si existen, garantizando con cierto nivel de seguridad la funcionalidad del producto. De presentarse una situación de inconformidad, debido a que no se cumplen o se exceden los requerimientos, o no son los resultados esperados, se deberá analizar en cuál de las etapas anteriores es necesario actuar para cumplir con la solicitud del producto, creando un bucle de retroalimentación como el mostrado en la Figura 13. Una vez se obtenga un resultado aceptable, se dará aprobación al proceso de diseño asistido y se procederá a realizar su validación.

Dada la situación, que se trate de un producto nuevo y no se tengan aún datos que permitan la correlación entre el comportamiento de la simulación y la realidad, la validación generalmente se realiza mediante la fabricación de un prototipo de la pieza y su posterior ensayo en el laboratorio.

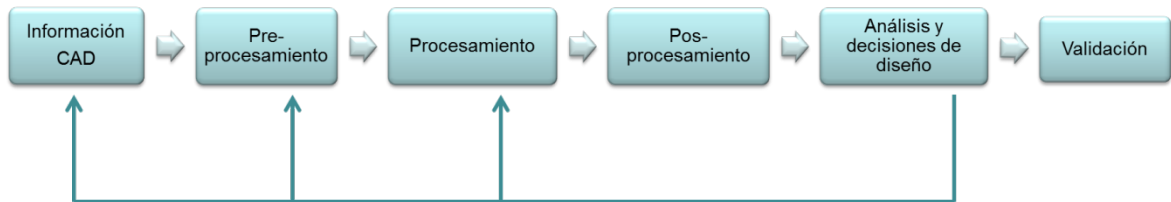


Figura 13. Proceso de retroalimentación en el análisis por el MEF.

5. CASO DE ESTUDIO

ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS Y DEFORMACIONES PRODUCIDAS SOBRE UN RACK DE BATERÍAS SOMETIDO A CHOQUE.

Para desarrollar este Trabajo Fin de Máster, fue necesario un periodo inicial de reconocimiento y aprendizaje de las principales funciones y herramientas con las que cuentan los módulos de pre-procesamiento (Hypermesh e Hypercrash), cálculo (Radioss) y pos-procesamiento (Hyperview), de la plataforma HYPERWORKS.

Durante este tiempo, cuya duración aproximada fue de cuatro meses, se consultaron los manuales y guías de usuario, proporcionados por la empresa fabricante ALTAIR INC; a la par con el desarrollo de tutoriales contenidos en la ayuda de la plataforma CAE.

Finalizada la etapa de instrucción sobre el manejo del software, y con la disponibilidad del modelo CAD, el cual fue proporcionado por una de las entidades participantes en el proyecto europeo OPERA 4FEV (Operating Energy Rack for Full Electric Vehicle), en el cual se enmarca este trabajo; se procedió a la implementación de la metodología que ha sido desarrollada en las últimas décadas para el análisis de estructuras y componentes, mediante el uso de la técnica de los elementos finitos, la cual fue expuesta en el capítulo anterior.

A continuación se detallan cada una de las etapas seguidas para el análisis por el MEF de un *rack* de baterías, el cual ha sido diseñado para su implementación inicial en un vehículo tipo N2 específico.

5.1 INFORMACIÓN CAD

El primer paso del proceso de análisis por el MEF, es el reconocimiento de las piezas que conforman el *rack* de baterías y el ensamblaje total del modelo CAD. Dichas piezas se encuentran modeladas en CATIA, siendo un total de veinticuatro archivos; sin embargo algunos de estos corresponden a elementos de fijación o refuerzos, los cuales serán discretizados con elementos especiales propios del software de simulación, razón por la cual su uso se limita a la obtención de algunas de sus propiedades físicas y a la observación de su posición dentro del conjunto general.

Una vez entendido el modelo CAD, es decir, establecida la ubicación de los componentes, la función de ellos dentro del conjunto y la posible interacción entre las piezas que lo conforman; así como la selección de las piezas fundamentales para realizar el análisis de esfuerzos y deformaciones, se procede a realizar la conversión del formato de los archivos, pasando de la extensión *.CATPART al formato neutro *.IGS. Esta

traducción se realiza debido a la imposibilidad de tener activa la licencia de Hyperworks que permite exportar los modelos directamente desde el formato del programa CATIA.

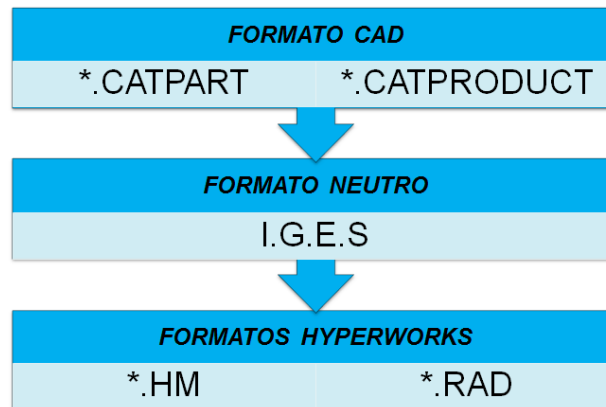


Figura 14. Cambio de formato del archivo CAD.

Una vez que se ha exportado el modelo al entorno de Hypermesh, los archivos serán guardados por el programa bajo la extensión *.hm*, propia del mismo.

5.2 PREPROCESAMIENTO

5.2.1 Mallado

Para iniciar la etapa de mallado, es necesario determinar cómo se van a discretizar los componentes, esto con el objetivo de realizar la selección del tipo de elementos que conformarán la malla. Basados en lo expuesto en el apartado 4.1, referente a las dimensiones y formas de las piezas; se determina que el mallado adecuado debería estar compuesto por elementos SHELL, combinando los tipos *quad* y *tria* de primer orden, para obtener así un mallado mixto. Con este tipo de malla se consiguen mínimas variaciones en el tamaño de los elementos y se logran transiciones suaves entre secciones de diferentes anchos, lo cual es deseable cuando se pretende simular en condiciones no lineales.

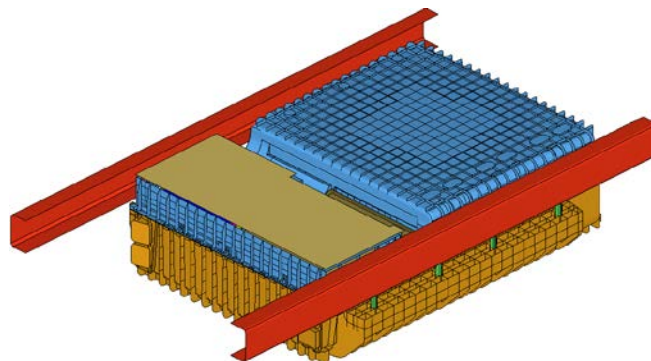


Figura 15. Rack de baterías.

Paso siguiente es la obtención de las superficies medias de cada una de las piezas y sobre las cuales se creará la malla correspondiente. Mediante el comando “*auto midsurface*” de HYPERMESH, se realiza este procedimiento de manera simple. Sin embargo, debido a la complejidad que presentan ciertos componentes, las irregularidades del diseño, así como a la pérdida de información derivada de los procesos iniciales de conversión a los que fueron sometidos los archivos originales, las superficies obtenidas presentaron uno o varios de los problemas siguientes:

- Superficies inexistentes
 - Superficies adicionales
 - Superficies libres
 - Superficies alabeadas
 - Superficies con conexiones erradas.
 - Superficies duplicadas

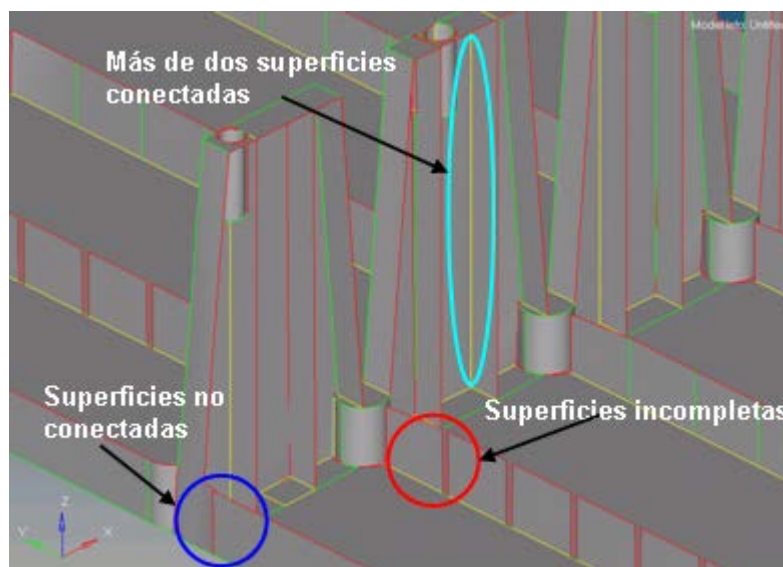


Figura 16. Superficie media generada en HYPERMESH.

Para dar solución a los problemas anteriormente planteados, es necesario hacer uso de las herramientas de edición de superficies del software. HYPERMESH facilita la ubicación de ese tipo de errores, mediante un código de colores en las líneas que representan las fronteras de las superficies, las cuales, dependiendo de su relación con las aristas de las superficies adyacentes, adquieren un color característico. En la Figura 16, se observan líneas de color verde, indicando que se encuentran dos aristas conectadas, amarillo, lo cual indica que por lo menos hay tres aristas conectadas y rojo, cuya indicación es la de una arista libre. Se debe prestar atención cuando se presenten estas últimas, especialmente en superficies con aristas interiores, ya que podría significar que dos superficies que deberían estar unidas, no lo están.

El tiempo y esfuerzo requerido para la labor de edición y obtención de una geometría correctamente definida de las superficies medias, será directamente proporcional a la complejidad en las formas de los componentes, siendo frecuente que sea la etapa del

proceso de análisis por el MEF que requiera de un mayor tiempo de dedicación, y más aún, si no se cuenta con experiencia previa en el manejo de las herramientas que posee el programa HYPERMESH, para la edición de superficies.

Durante esta etapa, también se persigue la posibilidad de realizar cambios a la superficie media original, con el fin de simplificar su geometría y facilitar el mallado. Dentro de las variaciones convenientes a efectuar se encuentran:

- Eliminación de agujeros poco relevantes.
- Eliminación de aristas redondeadas
- División de algunas superficies

Una vez se tiene una superficie media “limpia”, sin errores en su geometría, se deben establecer los criterios de calidad del mallado, con ellos se especifican los requerimientos de forma y tamaño que deben poseer los elementos para lograr mejores resultados y optimizar el tiempo de cálculo

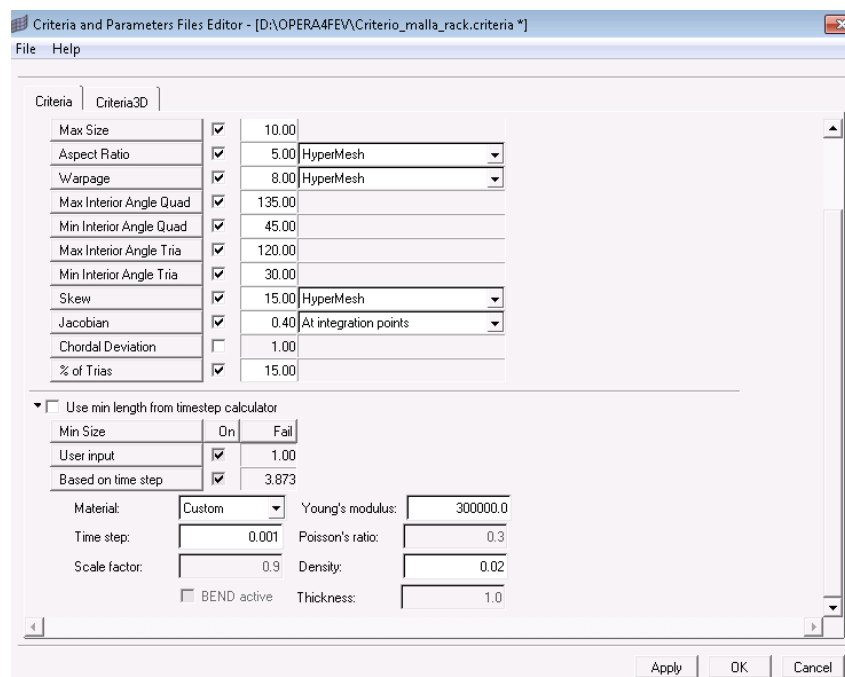


Tabla 2. Índice de calidad utilizado en el mallado.

Los criterios adoptados para el mallado del *rack* en estudio, y mostrados en la Tabla 2, corresponden a los estandarizados por algunas empresas fabricantes de automóviles en sus *guide-lines* para proveedores de partes.

Si la superficie media fue correctamente creada, el mallado de la misma no debería presentar mayores inconvenientes. Haciendo uso de la herramienta de generación automática de la malla de HYPERMESH, se proceden a seleccionar las superficies a discretizar, teniendo especial cuidado en aquellas zonas cuyas formas sean complejas,

existan transiciones o se observen fuertes irregularidades en los elementos creados. El programa generará la malla correspondiente sobre las superficies previamente seleccionadas, aproximando ésta a los criterios de calidad definidos anteriormente. A medida que se avanza en el mallado de las superficies de un componente, es importante verificar a la vez, la correcta conexión entre los elementos de superficies adyacentes para evitar así nodos libres que afecten el resultado final. Esta revisión se realiza, en HYPERMESH, mediante la herramienta *Edge*, la cual señala con un elemento 1D, de color rojo, las aristas de los elementos que poseen nodos libres.

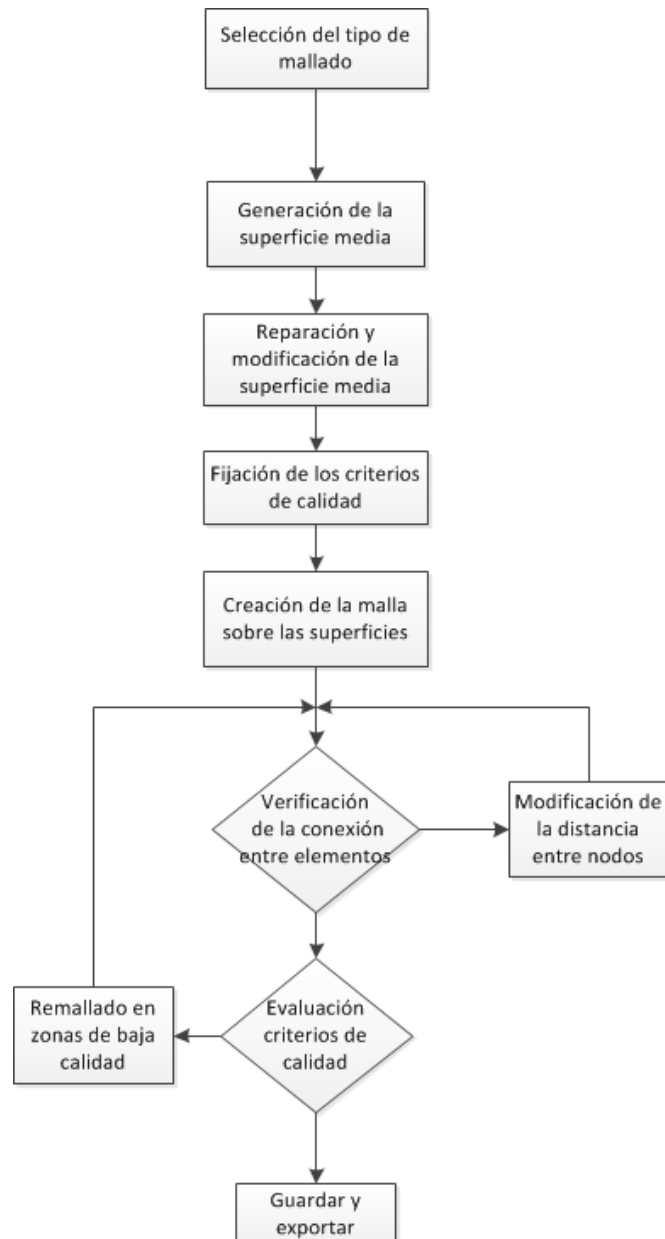


Figura 17. Proceso de mallado en HYPERMESH.

Concluido el mallado de la totalidad de superficies de un componente y verificada la correcta conectividad de los elementos de cada una de las mallas generadas, a continuación se procede a corregir aquellos elementos que se encuentran fuera los valores de aceptación del criterio de calidad definido al inicio. A través de la herramienta

Mesh-check-elements-Quality index es posible determinar los elementos que se encuentren fuera del rango de aceptación, los cuales deberán ser optimizados, de forma automática, con la herramienta *element optimize*, o manualmente, mediante el re-mallado de la zona con elementos por fuera del nivel de calidad establecida, o a través de la modificación de la geometría de la superficie media.

El proceso de mallado descrito anteriormente y mostrado en la Figura 17, debe ser realizado para cada uno de los componentes del conjunto del *rack*, para posteriormente realizar el ensamble de las mallas de cada uno de ellos.

Es recomendable, por motivos de organización y facilidad en su posterior ubicación durante la etapa de post-procesamiento, establecer una numeración predefinida de los nodos y de los elementos de cada uno de los componentes.

5.2.2 Asignación de materiales y propiedades

Una vez que fue verificada y aceptada la calidad de la malla creada, a continuación se procede a asignar, a cada uno de los elementos del modelo, las propiedades y el tipo de material con el que se pretende simular.

En cuanto a la asignación de las propiedades, cada uno de los tipos de elementos finitos existentes (*beam*, *shell*, *solid*, etc.) poseen parámetros propios que hacen parte de su formulación matemática, la cual es utilizada posteriormente en la etapa de cálculo. En el modelo creado, se utilizaron tres tipos de elementos diferentes: elementos *shell*, elementos *spring* y elementos *beam*, cada uno de los cuales posee un conjunto de parámetros característicos que los definen.

Para el caso de los elementos tipos *shell*, el primer parámetro que se procede a establecer es el correspondiente al espesor de la pieza, el cual, si no es constante en toda la superficie de la misma, deberá asignarse el valor correspondiente a cada uno de los elementos que la representan. Junto al espesor, HYPERMESH da la posibilidad de modificar los valores de otros parámetros que hacen parte de la formulación matemática que sirve para el cálculo de las matrices de rigidez y de los vectores de fuerza.

En la definición de las propiedades de los elementos modelados como tipo *spring*, se deben asignar parámetros tales como la masa, la inercia, el criterio de falla a utilizar, la rigidez y amortiguamiento, entre las más importantes.

En los elementos *beam*, se deben establecer los valores correspondientes al área de la sección transversal del elemento, así como sus momentos de inercia a flexión y torsión.

En cuanto a la designación del material, debe tenerse en cuenta el comportamiento mecánico del mismo. Por ejemplo, si se trabaja con un material cuyo comportamiento característico es lineal, bastará con especificar parámetros tales como la densidad, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Para el caso en estudio, el material a simular posee un comportamiento no lineal y requiere de magnitudes específicas para su definición, estas deberán ser definidas para una correcta caracterización dentro del

software. Para obtener las características del material, se realizaron ensayos de tensión a diferentes temperaturas (-20°C, 20°C y 60°C), representando el rango de temperaturas de trabajo al que va a ser sometido el *rack*.

Mediante las herramientas *Create Materials* y *Create Properties*, se realiza la asignación de materiales y propiedades en HYPERMESH, respectivamente. En el modelo se pueden identificar dos tipos de material, uno correspondiente a elementos con comportamiento elástico lineal, el cual se ha utilizado para representar, de manera simplificada, el comportamiento de las piezas metálicas que componen el *rack* y otro, que corresponde a los componentes plásticos cuyo comportamiento es evidentemente no lineal.

En las piezas cuyo material obedece a un comportamiento elástico-lineal, el software emplea la formulación matemática correspondiente a la Ley de Hooke, en la cual tan solo hace falta conocer el módulo de elástico o de Young y la relación de Poisson. Esta ley se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma = E\varepsilon$$

La formulación matemática seleccionada para representar el material plástico, del que se componen la mayoría de piezas del *rack*, es la de Johnson-Cook. Esta es una ley empleada para describir el comportamiento de materiales elasto-plásticos, es decir, materiales que poseen un comportamiento elástico lineal cuando el esfuerzo equivalente aplicado es menor al valor del límite elástico del material, mientras que para valores superiores de esfuerzo, el material adopta un comportamiento plástico. La ley de Johnson-Cook, se rige bajo la siguiente formulación:

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^m)$$

Donde:

σ = Esfuerzo.

ε_p = Deformación plástica.

a = Límite elástico.

b = Módulo de endurecimiento.

n = Exponente de endurecimiento.

c = Coeficiente velocidad de deformación.

$\dot{\varepsilon}$ = Velocidad de deformación.

$\dot{\varepsilon}_0$ = Velocidad de deformación de referencia.

m = Exponente de temperatura.

En la Figura 18 se presenta el modelo mediante el cual se asignan las propiedades y materiales al modelo, en el entorno de HYPERMESH.

Format

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/PROP/TYPE1/prop_ID/unit_ID or /PROP/SHELL/prop_ID/unit_ID									
prop_title									
Ishell	Ismstr	Ish3n	Idrill						
hm		hf		hr		dm		dn	
N	Istrain	Thick		Ashear			Ithick	Iplas	

Format

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
/MAT/LAW2/mat_ID/unit_ID or /MAT/PLAS_JOHNS/mat_ID/unit_ID									
mat_title									
ρ_i									
E	V								
a	b		n		ϵ_p^{\max}		$\sigma_{\max 0}$		
c	$\dot{\epsilon}_0$		ICC	Fsmooth	Fcut		Chard		
m	Tmelt		ρ_{Cp}		Tr				

Figura 18. Tarjetas características de HYPERMESH para la definición de propiedades y materiales.

5.2.3 Asignación de cargas y restricciones

Ejecutadas las etapas anteriores, se deberá completar la definición del modelo mediante la asignación de cargas y condiciones de contorno. Para ello, se hace necesario exportar el modelo en elementos finitos del *rack* de baterías desde HYPERMESH hacia HYPERCRASH, un software de pre-procesamiento con herramientas especializadas para la definición de condiciones en modelos de elementos finitos cuando se requiere simular situaciones de choque. El archivo creado en HYPERMESH bajo la extensión **.hm* deberá ser exportado a HYPERCRASH con la extensión del solver a emplear, en este caso particular será bajo la extensión **.rad* propia de RADIOSS.

En la situación que se analiza en este trabajo, es necesario representar una fuerza que simule a la que se produciría en un choque real. Para ello se ha impuesto, a todos los elementos del modelo, una carga gravitacional que represente los cambios en la aceleración que se dan cuando existe un choque en un vehículo. Se han seleccionado cinco situaciones comunes para ser simuladas:

- Choque producido en la zona lateral derecha del vehículo.
- Choque producido en la zona lateral izquierda del vehículo
- Choque producido en la zona frontal derecha del vehículo
- Choque producido en la zona frontal izquierda del vehículo
- Choque producido por una aceleración vertical.

Por la experiencia que posee el Laboratorio de Seguridad Pasiva del INSIA, en la realización de ensayos de choque de componentes de vehículos, y basándose en el reglamento para vehículos N° 100 – Anexo 8C, de las Naciones Unidas (UN), referente a las “Prescripciones relativas a la homologación de vehículos en lo relativo a los requisitos específicos de la cadena de tracción eléctrica”, se determinaron las funciones que representarán las condiciones de aceleración en cada uno de los eventos mencionados anteriormente. Dichas funciones se presentan en la Figura 19

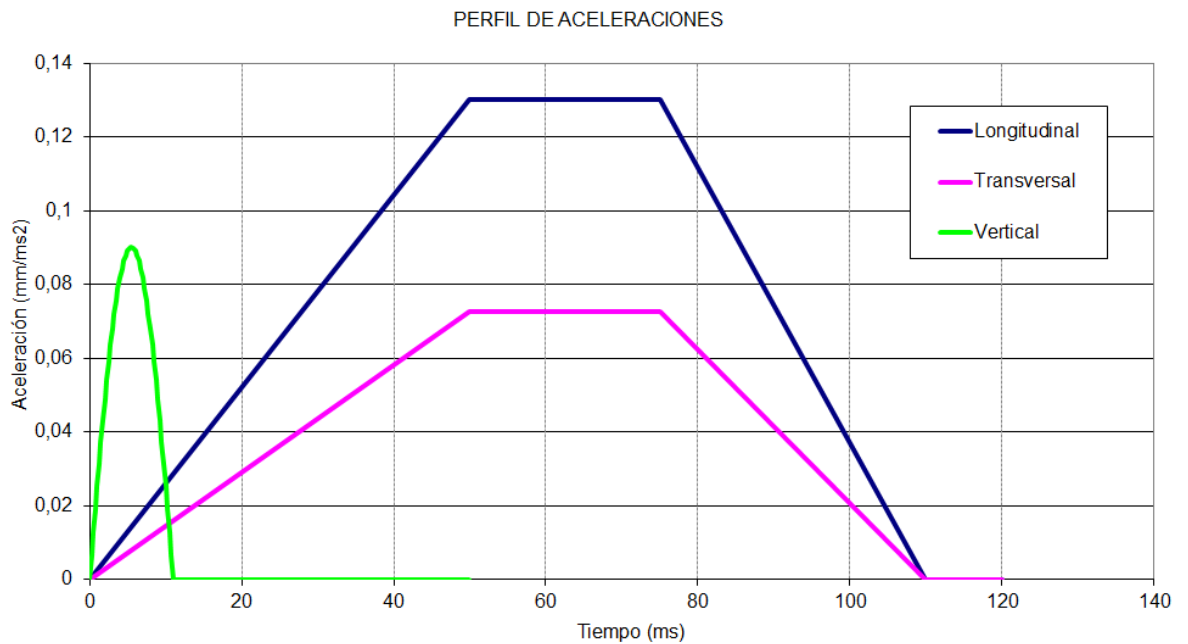


Figura 19. Perfiles de aceleración utilizados para representar diferentes situaciones de choque.

Dentro del modelo, es importante establecer la forma en que interactúan entre sí los componentes, ya que en sus superficies se generan fuerzas de contacto que afectan el comportamiento del conjunto general, por ello, en el modelo se hace necesario definir las superficies de contacto que se presentan entre las piezas. Este tipo de contactos se establecen mediante la creación de relaciones entre nodos y superficies (Figura 20), con las cuales se representan las fuerzas que se generan en la interacción entre componentes, debidas principalmente a la fricción que se produce durante el movimiento relativo entre ellas.

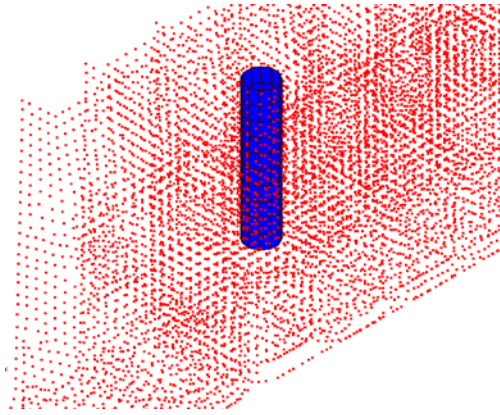


Figura 20. Definición de contactos Type 7 en HYPERCRASH.

Es importante, una vez se tienen ensambladas todas las mallas que conforman el modelo en HYPERCRASH, verificar que no existan intersecciones ni penetraciones entre elementos, para ello, este pre-procesador cuenta con la herramienta “checker model” para detectar este tipo de errores. Una intersección se produce cuando un elemento traspasa completamente a otro, mientras que una penetración hace referencia a la superposición de espesores entre elementos. En el modelo del *rack* de baterías desarrollado, se observaron varios casos de penetraciones e intersecciones, las cuales fueron solucionadas corrigiendo la distancia entre elementos y/o nodos de las superficies que presentaban algún tipo de conflicto.

Por otra parte, el *rack* de baterías se encuentra apoyado sobre dos vigas que conforman el chasis del vehículo y se ensambla a él mediante ocho uniones atornilladas, las cuales se representaron en el modelo mediante elementos 1D, específicamente con elementos *Rigid Body*. En los extremos de las mencionadas vigas, se impusieron restricciones de desplazamiento lineal en los tres ejes coordenados, como se aprecia en la Figura 21

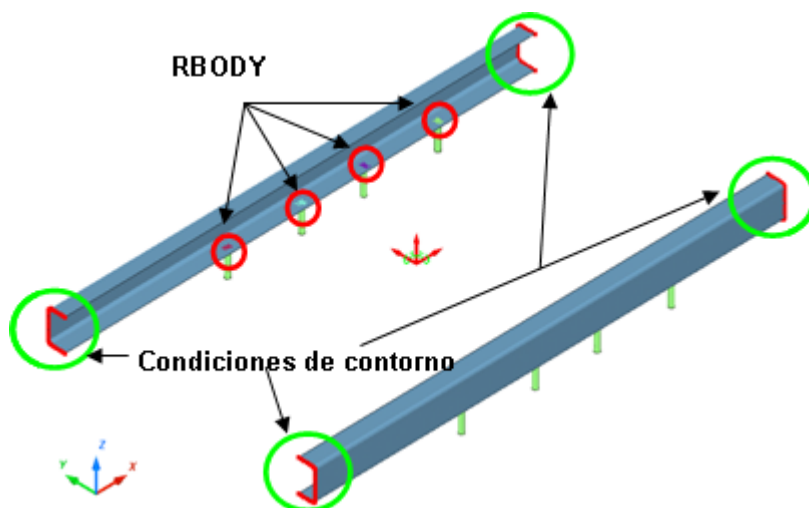


Figura 21. Restricciones impuestas al modelo.

Las uniones, entre la cubierta superior e inferior del *rack* de baterías, fueron modeladas mediante elementos tipo *beam* y *spring* (Figura 22).

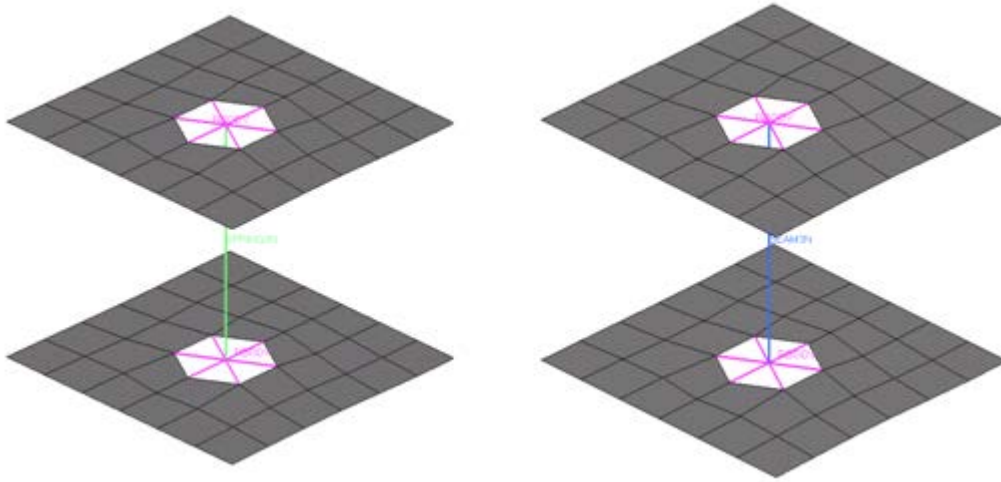


Figura 22. Modelado de uniones atornilladas en elementos finitos. Elemento tipo Spring (izq.) y elemento tipo beam (der).

5.3 PROCESAMIENTO - CÁLCULO

Como se ha mencionado anteriormente, el solver utilizado para efectuar los cálculos de las ecuaciones generadas al plantear el modelo en elementos finitos, junto con sus cargas y restricciones, es RADIOSS.

Cuando se ha definido completamente el modelo, en elementos finitos, del componente a simular, se genera un archivo con extensión **_0000.rad*, el cual será el formato del archivo de entrada de datos que se le proporcionará al solucionador o solver. Este archivo se denomina *starter*.

El archivo *starter* contiene toda la información respecto a la definición del modelo y con él se realiza el diagnóstico del modelo para encontrar posibles errores. Produce, al final del diagnóstico, un archivo binario de reinicio.

Otro archivo necesario para dar inicio al programa de cálculo es el denominado *engine*, se distingue por tener la extensión **_0001.rad*. Con este archivo se ejecuta el cálculo del modelo. El *engine* produce archivos de salida para la animación, el trazado de elementos (la historia del tiempo), y archivos de reinicio.

Luego de cargados los archivos *starter* y *engine* en el programa de cálculo, RADIOSS permite elegir una serie de opciones enfocadas a aprovechar los recursos informáticos con los que se disponen y las necesidades de la simulación. Algunas de las opciones utilizadas para la simulación del *rack* de baterías fueron:

- Both: Esta opción permite ejecutar los archivos *starter* y *engine* de forma simultánea, procediendo primero a cargar la definición del modelo, luego realizando el diagnóstico del mismo y posteriormente, realizar el cálculo de los sistemas de ecuaciones que rigen al modelo.
- Nproc: Especifica el número de procesadores que se desean utilizar para efectuar el cálculo del modelo.
- Noh3d: Evita que se generen archivos de animación con extensión **.h3d*, los cuales ocupan mucho espacio en el disco duro y no son indispensables para visualizar los resultados en la etapa de post-procesamiento.

Una vez ejecutado el programa (*RADIOSS*), este hace un análisis inicial para verificar que el modelo este correctamente definido. De resultar positivo dicho análisis, el programa empezará a iterar con el tiempo de paso definido en la etapa de pre-procesamiento, en el caso contrario el programa generará un mensaje de Error, seguido de la interrupción de la ejecución del programa, o una Advertencia en cuyo caso seguirá ejecutándose pero con ciertas consideraciones que toma *RADIOSS*, por lo cual, quien sea el encargado de ejecutar el programa, deberá prestar atención a las notificaciones que se generen en el análisis inicial del procesamiento, esto con el fin de tomar acciones correctivas en caso de ser necesarias, evitando resultados equivocados y pérdidas de tiempo innecesarias. El resultado del diagnóstico será almacenado por el software en un archivo de salida con extensión **_0000.out*.

Para el desarrollo de este proyecto, se asumirá el software de procesamiento y cálculo como una caja negra, sin profundizar en las operaciones y algoritmos que se ejecutan durante el tiempo que dura esta fase.

Durante la etapa de cálculo, se van generando diferentes tipos de archivos los cuales contienen información acerca del proceso que se realiza. Entre los archivos que se crean se encuentran:

- Archivos con extensión **.out*: Son archivos de salida que contienen toda la información respecto a los procesos de diagnóstico y cálculo.
- Archivos con extensión **.rst*: Estos archivos se generan cada cierto tiempo durante el proceso de cálculo, permitiendo reiniciar el proceso en ese punto determinado de la simulación, en el evento de que esta se haya suspendido.
- Archivos con extensión **.h3d*: Archivos de animación generados en *HYPERVIEW* con los resultados del cálculo.
- Archivos con extensión **A00x*: Son archivos de animación, en formato binario, que contienen la información respecto a las salidas del cálculo en cada uno de los intervalos de tiempo establecidos por el usuario para escribir la historia temporal de las variables solicitadas en el modelo.

5.4 POST PROCESAMIENTO

La etapa de post-procesamiento es aquella donde son evaluados los resultados obtenidos del cálculo del modelo y los cuales fueron solicitados en los archivos *starter* y *engine*. En el desarrollo de este trabajo, se utilizaron las herramientas del software HYPERVIEW para realizar el análisis del comportamiento mecánico del *rack* de baterías, en cada una de las simulaciones efectuadas. Este software, así como los de su tipo, interpreta los archivos de datos generados por el *solver* (RADIOSS), y los presenta de forma gráfica, lo que permite al usuario, una mejor y mayor comprensión de los resultados obtenidos.

Mediante el uso de HYPERVIEW, fue posible visualizar los esfuerzos que se producían sobre cada uno de los componentes del *rack* de baterías, en el transcurso de tiempo al que fue configurada cada simulación. También se analizaron sobre el software, variables tales como las fuerzas de contacto surgidas de la interacción entre componentes, desplazamientos, flexiones, así como la localización de las zonas de fallo del material; factores importantes que permitieron, la toma de decisiones respecto a cambios en el diseño de las piezas.

En el capítulo 6 se presentarán los resultados obtenidos.

6. RESULTADOS

El primero de los resultados obtenidos en el presente trabajo fue la creación del modelo en elementos finitos de cada uno de los componentes que integran el conjunto del rack de baterías, esto logrado a través de la discretización del diseño original proporcionado en 3D, creado en el programa CATIA.

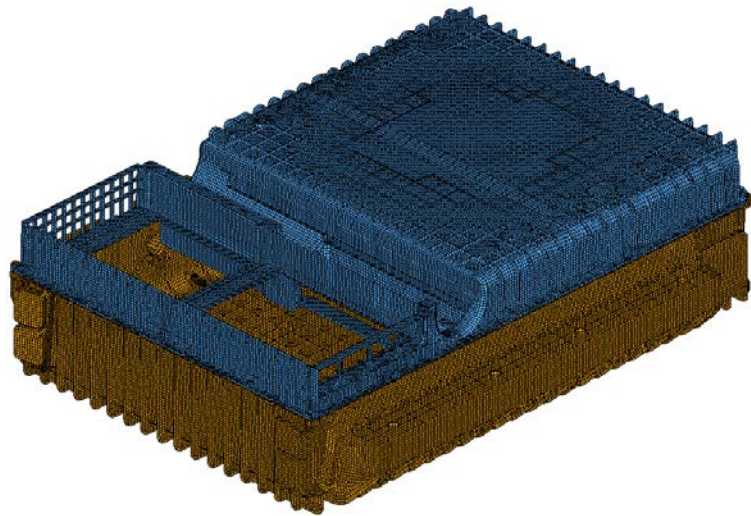


Figura 23. Rack de baterías discretizado en elementos finitos.

El modelo del *rack* de baterías totalmente terminado está compuesto por las entidades que se presentan a continuación, de modo resumido, en la Tabla 3.

ENTIDAD	CANTIDAD
Nodos	608353
Elementos	610443
Cuerpos rígidos	342
Partes	256
Ensambles	53
Propiedades	65
Materiales	14
Masas añadidas	17
Cargas gravitacionales	5
Condiciones de contorno	1
Superficie de contacto	36

Tabla 3. Estructura del modelo del *rack* de baterías en elementos finitos.

Durante el desarrollo de este TFM, el modelo ha sufrido diferentes modificaciones, teniendo contabilizadas quince versiones diferentes que bien implican cambios importantes del modelo o bien cuando se han analizado varias alternativas de diseño en paralelo, al existir diferentes opciones para solucionar un problema y así poder fundamentar la decisión final adoptada. Este número también indica que el diseño original se encontraba lejos de poder soportar los requisitos mecánicos del choque y el nivel de seguridad podría verse comprometido. Se realizaron diferentes configuraciones en los parámetros del material, restringiendo en algunos casos la rotura del mismo, con el objetivo de visualizar los esfuerzos y las deformaciones máximas que se producen sobre el material y así concentrar el trabajo de la toma de decisiones de diseño sobre las áreas de resistencia crítica.

En total, se procesaron más de doscientas (200) simulaciones, en las cuales se analizó el comportamiento mecánico de los componentes que integran el *rack* de baterías y el efecto de las modificaciones incorporadas. Cada una de las simulaciones tiene un tiempo de procesado de aproximadamente cincuenta horas (50h), utilizando cuatro núcleos (*cores*) de cálculo en cada una de ellas.

Como parte inicial del proceso de post-procesamiento, se verificó que el comportamiento general de los componentes correspondiera a las condiciones establecidas en el modelado, es decir que los desplazamientos correspondieran a las condiciones de carga planteadas y a las restricciones de contorno establecidas entre los componentes. En los casos donde se detectaron situaciones erróneas, fue necesario corregir el modelo comprobando el pre-procesamiento y efectuar las modificaciones correspondientes, para efectuar de nuevo el cálculo.

Igualmente, se examinan las áreas donde se produce el fallo del componente y se estudian las causas que provocan dichas roturas, entre las que se tienen, por ejemplo, la rigidez de dichas zonas, la interacción con otras piezas, el debilitamiento del material, entre otras.

En la Figura 24 se presenta el resultado obtenido del proceso de cálculo, en lo que se refiere a los esfuerzos que se generan sobre el material, visualizado el resultado en el entorno de HYPERVIEW.

Igualmente se muestran los dos componentes pertenecientes a la carcasa del *rack* de baterías y en los cuales se centra el análisis de esfuerzos debido a la importancia que estos tienen en la seguridad. Las áreas que se muestran en color rojo, son aquellas que soportan los mayores esfuerzos en la peor de las condiciones de aceleración, la cual está determinada para el caso de una aceleración máxima de 7G aplicada lateralmente.

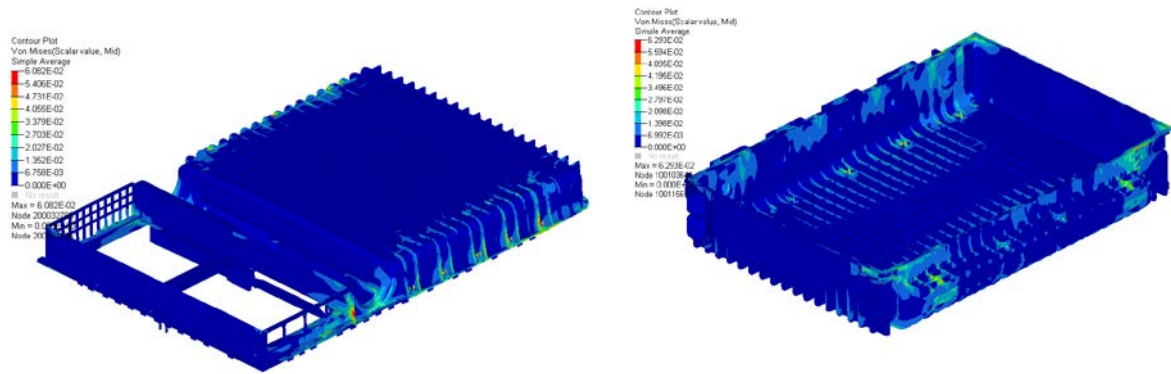


Figura 24. Visualización, en HYPERVIEW, de los esfuerzos soportados sobre el rack de baterías.

Se puede observar que aunque se presenten valores elevados de esfuerzo sobre determinadas áreas de estos componentes, este último modelo ensayado no presentaba rotura en las zonas externas de la carcasa, lo cual en una situación de choque favorece a la retención de los fluidos que circulan en el interior del rack, minimizando el derrame de estos sobre la vía o su vertimiento en sistemas hídricos cercanos al sitio donde se produce el evento. Así mismo, al asegurar la integridad de los componentes de la carcasa se garantiza el aislamiento eléctrico que debe existir entre las baterías, y los componentes electrónicos contenidas en el rack con la carrocería del vehículo, lo cual permite, en caso de choque, que los ocupantes evacuen de forma segura el vehículo o se facilite el rescate por parte de los organismos de socorro, sin poner en riesgo su integridad física.

Otro de los resultados importantes de la realización de este trabajo, fue el aprendizaje y la adquisición de habilidades para el manejo de los programas comerciales de análisis por elementos finitos, específicamente de la suite de HyperWorks con la que se ha tenido una experiencia de trabajo de más de 1500 horas.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

- El análisis por elementos finitos aplicado al *rack* de baterías en estudio, permite concluir que es posible su fabricación cumpliendo con la normativa de seguridad, garantizando de esta manera el bienestar de los ocupantes del vehículo o de otros usuarios de la vía, tanto en condiciones de uso normales así como en el evento de presentarse un choque.
- Con el uso de materiales plásticos para la fabricación de piezas en vehículos eléctricos e híbridos, es posible conseguir una disminución en el peso de los componentes auxiliares que benefician al conjunto del vehículo, cumpliendo además con la normativa referente a asegurar los niveles adecuados de seguridad.
- Gracias al avance en el conocimiento tanto del campo de los materiales, así como del diseño, están surgiendo nuevas tecnologías para ser implementadas en el sector automotriz, teniendo en cuenta tanto el enfoque tradicional de disminución de costes y reducción de peso, así como el de las tendencias actuales, encaminadas a la protección medioambiental y a la maximización de la seguridad de los ocupantes de los vehículos.
- El diseño en ingeniería es un proceso creativo, el cual se ve favorecido con el uso de herramientas informáticas especializadas tales como los programas de CAD y los programas de simulación por elementos finitos, con los cuales es posible detectar errores en el diseño y mejorar la calidad de los mismos.
- En la ingeniería, el desarrollo de un nuevo producto se convierte en un proceso iterativo, el cual parte de una idea inicial, la cual es básica y generalmente incompleta, pero ésta se va perfeccionando a partir del análisis de los datos obtenidos en diferentes ensayos, hasta conseguir un producto acorde a las necesidades del cliente. Los programas de simulación por elementos finitos son herramientas útiles en ese proceso de evolución del diseño, especialmente cuando se trabaja con piezas de mediano o alto grado de complejidad porque permiten realizar, en un entorno virtual, un amplio rango de ensayos y facilitan la modificación de parámetros, de manera relativamente sencilla, rápida y con un coste considerablemente menor con respecto al que implicaría la realización de pruebas en prototipos reales.
- Aunque con el uso de programas especializados en simulaciones por elementos finitos se logren disminuir los costes y tiempos en el desarrollo de un producto, se debe considerar que en la etapa inicial de creación de los modelos es donde más horas y esfuerzo profesional debe emplearse, lo cual es pocas veces reconocido y valorado en el sector industrial.

- El análisis mediante el MEF, permite mejorar continuamente el diseño de componentes, a un bajo coste.
- El uso del MEF disminuye los costes de fabricación debidos a errores en el diseño de componentes.
- Para el autor, en el ámbito personal, la realización de este trabajo ha supuesto un proceso de continuo aprendizaje en el uso de las herramientas disponibles para la creación de modelos de elementos finitos y a su vez, ha sido una experiencia enriquecedora en lo relacionado al proceso de desarrollo de producto. Así mismo, en el tiempo transcurrido en la realización de este trabajo se compaginó adecuadamente el trabajo individual y el trabajo en equipo, logrando a la fecha, cumplir con el objetivo trazado inicialmente.

Como parte de trabajo futuro se propone:

- Realizar la validación del modelo elaborado mediante el método de los elementos finitos, a través de la realización de pruebas destructivas, de prototipos físicos del *rack* de baterías, en el LSP del INSIA-UPM.
- Estudiar a profundidad la formulación matemática y los algoritmos que utiliza el programa de cálculo, entendiendo que en éste se realizan una serie de operaciones matemáticas y no actúa simplemente como una caja negra. Al hacerlo, se busca realizar la optimización de los parámetros que influyen en dichos cálculos, consiguiendo minimizar los errores entre la simulación y la validación.
- Obtener una metodología que permita mejorar la precisión de los modelos de elementos finitos de piezas realizadas con materiales plásticos de alto grado de aditamento.

8. BIBLIOGRAFÍA

ALTAIR ENG. INC. 2009. RADIOSS theory manual V10. Altair Engineering Inc. 179p.

ALTAIR ENG. INC. 2011. Hyperworks starter manual [en línea]. Versión 1. Altair Hyperworks, 23p. [Consultado 2014-06-13] Disponible en Internet:
<<http://www.altairuniversity.com/2011/04/07/hyperworks-startermanual-vers-1/>>

ALTAIR ENG. INC. 2012. Practical aspects of finite element simulation. A student guide [eBook]. Altair Hyperworks, 450p. Disponible bajo solicitud en: <
<http://www.altairuniversity.com/student-guide-request/>>

ALTAIR ENG. INC. 2013. Hyperworks 12.0 Tutorials [en línea]. Altair Hyperworks. [Consultado 2013-05-20] Disponible en Internet:
<http://www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/hw12.0/help/hwtut/hwtut.htm?hm1000.htm>

CHANDRUPATLA, Tirupathi R; BELEGUNDU, Ashok D. 1999. Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. 2a ed. Pearson Educación, 462p. ISBN 9701702603.

CERROLAZA, Miguel. 2007. El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas. CDCH UCV, 451p. ISBN 980002364X.

JIMÉNEZ, Alfredo. 2004. Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos. Director: Wieslaw Switek Wojcik. Tesis de licenciatura. Puebla: Universidad de las Américas. Escuela de Ingeniería, 215p.

MEDINA, Richard; SALAS, Marcos; LUCO, Richard *et al.* 2005. Análisis de estructuras navales mediante el método de elementos finitos [en línea]. Síntesis tecnológica. Mayo, vol.2, no.1 [citado 17 Febrero 2014], p.27-36. Disponible en la web:
<http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-025X2005000100004&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0718-025X.

FERNÁNDEZ SIERRA, Pablo. 2007. Análisis de un desvío de ferrocarril por el método de los elementos finitos. Proyecto fin de carrera. Gijón: Universidad de Oviedo, EPI Gijón. 263p.

FONSECA LOPES, Zeferino. El método de los elementos finitos: Una introducción. Maracaibo. Fondo editorial biblioteca Universidad Rafael Urdaneta, 2011. 277p. ISBN 978-980-7131-12-4.

NAVARRO UGEDA, Carlos; PÉREZ CASTELLANOS, José L. Material de clase, apuntes [en línea]. Universidad Carlos III de Madrid, 2009. [Consultado 2014-06-13] Disponible en:

<http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/>

PEZZOTTI, Santiago; ANTICO, Federico. 2007. Introducción a la teoría de elementos finitos. Universidad de La Plata, La Plata.

PRUKL, R.P. The CST (Constant Strain Triangle) – An insidious survivor from the infancy of FEA. *FEMSA'92 Symposium* [en línea], enero 1992. [Consultado 2014-06-13] Disponible en:
<http://www.finiteelements.net/Papers/The%20CST.PDF>

UNITED NATIONS. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train [en línea], agosto 2013. [Consultado 2014-05-13]. Disponible en:
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R100r2e.pdf>

ZHANG, Rui; JU, Jianmin. Finite Element Analysis Based on ProE, HyperMesh and ANSYS. *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering* [en línea], 12-14 Dec. 2008, vol.2, [Consultado 2014-06-13], pp.622, 625. Disponible en:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4722128&isnumber=4721981>