

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA
INDUSTRIAL DE ZARAGOZA**



PROYECTO FIN DE CARRERA

**“ANÁLISIS DE UNIONES SOLDADAS DE
COMPONENTES DE SEMIRREMOLQUE
PARA LA PREDICCIÓN DE FALLO FRENTE
A FATIGA”**

**ESPECIALIDAD:
MECÁNICA**

**ALUMNO:
LUIS MÁÑEZ**

**DIRECTORES
DR. MARCO CARRERA ALEGRE
DR. JAVIER ABAD BLASCO**

INDICE

1. OBJETIVOS Y ALCANCE	pág.6
2. MARCO DEL PROYECTO	pág.7
3. PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGIA	pág.8
4. MATERIAL Y METODOS TEORICO-EXPERIMENTALES	pág.9
4.1. EL MEF, DESARROLLO DE MODELOS TEORICOS	pág.9
4.1.1. TEORIA. EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	pág.9
4.1.2. DESARROLLO DE MODELOS	pág.17
4.1.3. MODELOS MEF REALIZADOS	pág.18
4.1.3.1. RESULTADOS NUMERICOS DE TENSION V.M.	pág.20
4.2. METODOS EXPERIMENTALES	pág.23
4.2.1. ANALISIS DE DUREZA.	pág.23
4.2.1.1. INTRODUCCION TEORICA.	pág.23
4.2.1.1.1. ENSAYOS DE DUREZA	pag.23
4.2.1.1.2. ZAT	pág.33
4.2.2. ANALISIS DE FATIGA	pág.35
4.2.2.1. INTRODUCCION TEORICA	pág.35
4.2.2.2. ENSAYOS DE FATIGA	pág.39
4.2.3. ANÁLISIS MODAL	pág.45
4.2.3.1. INTRODUCCION TEORICA	pág.45
4.2.3.2. PROCEDIMIENTO GENERAL DEL ENSAYO MODAL EXPERIMENTAL	pág.50
5. ENSAYO DE DUREZA	pág.57
5.1. INTRODUCCION	pág.57
5.2. PROCESO DE ENSAYO	pág.57
5.3. EQUIPO	pág.62
5.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO	pág.64
5.5. COMPARATIVA DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	pág.69
6. ANALISIS MODAL	pág.71
6.1. INTRODUCCIÓN	pág.71
6.1.1. PROCESO DE ENSAYO	pág.74
6.1.2. EQUIPO	pág.76
6.2. MODELOS TEORICOS	pág.79
6.3. RESULTADOS NUMERICOS MEF	pág.81
6.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO	pág.83
6.5. COMPARATIVA DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	pág.84
7. ESTUDIO FRENTE A FATIGA	pág.89
7.1. INTRODUCCION	pág.89
7.2. RESULTADOS NUMÉRICOS	pág.93
7.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO	pág.104
7.4. CONCLUSIONES	pág.104
8. CONCLUSIONES FINALES	pág.106
9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	pág.108

10. ANEXOS

- 10.1. ANEXO 4.1.2 DESARROLLO DE MODELOS NUMERICOS
- 10.2. ANEXO 4.1.5 MODELOS MEF

Agradecimientos:

*Quiero agradecer sinceramente el apoyo y la ayuda
recibidos de los miembros del Grupo VEHIVIAL:*

Marco Carrera, Javier Abad, Luis Tello, David

*Valladares y Hugo Malón sin los cuales no habría
sido posible finalizar con éxito este proyecto*



1. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal del presente proyecto se centra en el **análisis de uniones soldadas de componentes de semirremolques para conocer su comportamiento frente a solicitaciones de fatiga**, inducidas en condiciones de operación habitual de este tipo de vehículos. A partir de una serie de herramientas de análisis teóricas y experimentales, descritas y detalladas en posteriores apartados de la memoria, será posible obtener el comportamiento de uniones típicas realizadas por soldadura, en definitiva, estimar el número de ciclos (vida útil) soportados por las estructuras analizadas y, por lo tanto, la vida a fatiga de una estructura como es el caso de un semirremolque.

Una de las **causas de fallo más comunes y complejas de analizar en una estructura soldada, como es el caso de un semirremolque, consiste en la estimación de la vida útil de la misma**, la cual se ve limitada, en la mayoría de las ocasiones, por la acción de solicitaciones dinámicas de fatiga. Por otra parte, el fallo se producirá por lo general en aquellas zonas más débiles de la estructura, siendo la zona de unión soldada la más crítica en este sentido, por lo que en el proyecto se realiza un análisis de modelos de unión realizados por soldadura. Los modelos analizados tendrán en cuenta la soldadura completa, es decir, el modelo de comportamiento tanto del cordón así como el de las zonas afectadas térmicamente por soldadura (comúnmente denominadas como ZAT's).

Con esto, y derivados del objetivo principal comentado anteriormente, **se contemplan los siguientes objetivos secundarios:**

- **Planteamiento del problema y desarrollo de modelos** teóricos (basados en el Método de los Elementos Finitos, en adelante, MEF) y experimentales (probetas) para su posterior estudio y análisis.
- **Caracterización de uniones realizadas mediante soldadura.** Las propiedades tanto de los cordones de soldadura como de las ZAT's deben ser estimadas, en este caso, mediante la aplicación de métodos experimentales (ensayos de dureza) para su posterior incorporación en los modelos teóricos desarrollados.
- **Caracterización dinámica de las estructuras objeto de estudio.** En este caso, se aplicarán diferentes técnicas numérico-experimentales (MEF y ensayos en laboratorio) con objeto de estimar el comportamiento modal (modos y frecuencias naturales) de las estructuras consideradas.
- **Análisis de uniones frente a fatiga.** Las estructuras objeto de estudio serán analizadas, tanto numérica (aplicación del MEF) como experimentalmente (ensayos de fatiga en banco universal de ensayos), con objeto de estimar la vida útil de la unión frente a este tipo de solicitaciones.



2. MARCO DEL PROYECTO

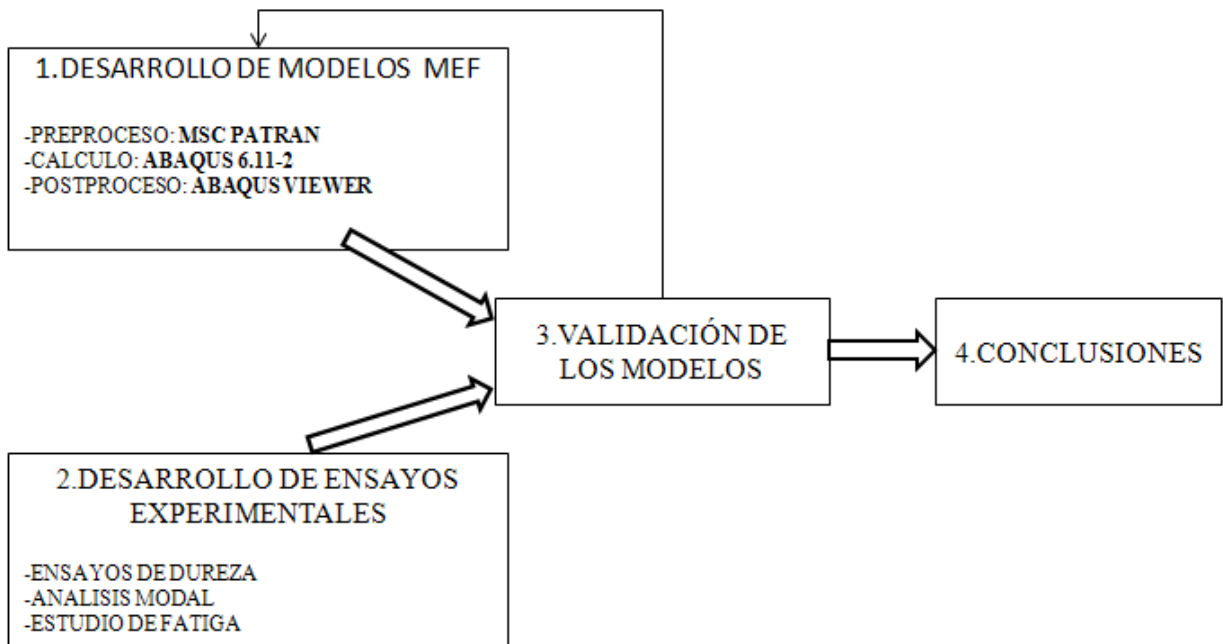
El proyecto **ha sido desarrollado en el seno del grupo de Nuevas Tecnologías en Vehículos y Seguridad Vial (VEHIVIAL)**, el cual desarrolla fundamentalmente su actividad en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza. De entre las diferentes líneas de trabajo del grupo se encuentra la de análisis y optimización de estructuras de vehículos pesados, fundamentalmente de aplicación a estructuras de semirremolques de diferentes tipologías.

De entre los diferentes proyectos de I+D en los cuales participa VEHIVIAL se encuentra el proyecto “Optimización del diseño de autobuses y semiremolques integrando técnicas de ensayo virtual (OPTIVIRTEST)”, enmarcado dentro del Plan Nacional I+D+i (referencia TRA2009-14513-C02-01), desarrollado por el grupo Vehivial en colaboración con el INSIA (Instituto del Automóvil, Madrid) y la Universidad de Oviedo. **Este proyecto fin de carrera ha sido propuesto y desarrollado en el marco del proyecto OPTIVIRTEST como parte de algunas de sus tareas y actividades pendientes de ejecutar.**



3. PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGÍA

El plan de trabajo que se siguió en la realización de este proyecto empezó desarrollando los modelos numéricos MEF en tres fases: preproceso, cálculo y postproceso. En paralelo al desarrollo de los modelos numéricos se desarrollaron ensayos experimentales en laboratorio. Una vez obtenidos los resultados numéricos y los experimentales, se contrastaban para validar los modelos numéricos, en el caso de que existieran defectos en los citados modelos se revisaban y corregían hasta validarlos. Por último se sacaban las conclusiones pertinentes sobre los resultados obtenidos.





4. MATERIAL Y MÉTODOS TEORICO EXPERIMENTALES

4.1 EL MEF, DESARROLLO DE MODELOS TEORICOS

4.1.1 TEORIA, EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Introducción.

El Método de los Elementos Finitos (M.E.F.) es un método numérico para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales. Su desarrollo desde los años cincuenta hasta la actualidad ha sido constante y actualmente puede considerarse como el método numérico más extendido en la mayoría de los ámbitos de la ingeniería. Son muchas las facetas de la ingeniería en las que se precisa determinar la distribución de tensiones y deformaciones en un continuo elástico. Los casos particulares de dichos problemas pueden variar desde problemas bidimensionales de tensión o deformación plana, sólidos de revolución y flexión de placas y láminas, hasta el análisis más general de sólidos tridimensionales.

El M.E.F. consiste en su formulación física en la división del dominio espacial, ya sea uni, bi o tridimensional en una serie de subdominios de geometría simple, a los cuales se le denomina elementos. Estos elementos se encuentran formados por una serie de puntos que definen su geometría y se denominan nodos. En el interior de cada elemento se interpola una función de desplazamientos que se formula en función de los valores de desplazamientos que existen en los nodos.

La forma de trabajo de estos elementos consiste en aplicar las ecuaciones de compatibilidad y comportamiento y obtener una relación entre la fuerza aplicada sobre los elementos y los desplazamientos de los nodos. Esta relación se expresa mediante la matriz elemental, la cual depende del número de nodos, situación de estos, material utilizado, geometría de los elementos y tipo de problema.

Dependiendo del tipo de formulación del problema se determina si el problema es lineal (elasticidad lineal) o si es no lineal (grandes desplazamientos o deformaciones, comportamiento del material complejo).

A continuación se expresa el proceso de cálculo con el MEF:



- Planteamiento de continuidad de desplazamientos y equilibrio de fuerza entre elementos.
- Sistema de ecuaciones globales de la estructura.
- Tipo de formulación inicial (lineal o no lineal).
- Resolución.
- Obtención de los desplazamientos nodales (incógnitas básicas).
- Obtención de otras variables: deformaciones y tensiones.

La aproximación de los elementos finitos no requiere la selección del tipo de ecuación que será usada para modelar la estructura. Los códigos disponibles en el mercado han definido previamente los elementos para los cuales la matriz de rigidez individual del elemento ha sido resuelta.

De esta forma, el usuario necesita definir únicamente el tipo de elemento. Una vez que el elemento ha sido definido el procedimiento es el siguiente:

1. Decidir la geometría requerida para modelar correctamente el problema.
 - 1D (cables, vigas).
 - 2D (tensión o deformación plana).
 - 2D axisimétrica (láminas y sólidos de revolución).
 - 3D (láminas y sólidos).
2. Seleccionar el tipo de elemento y formular la matriz de rigidez del elemento si se requiere:
 - Definir la matriz que relaciona las deformaciones del elemento con los desplazamientos nodales $\{B\}$.
 - Definir la matriz de la ley constitutiva $\{D\}$.
 - Aplicar una rutina numérica cuadrática para evaluar la rigidez del elemento sobre el volumen del elemento,

$$\int_V \{B\}^T \{D\} \{B\} dv$$

El MEF consiste en dividir un medio continuo en un número finito de partes cuyo comportamiento se especifica con un número finito de parámetros, pasando de un sistema con infinitos grados de libertad a otro con un número fijo, con similares propiedades físicas y geométricas, en el que las ecuaciones de equilibrio se pueden expresar mediante un



sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un determinado número de incógnitas, obteniéndose la solución del sistema completo mediante el ensamblaje de las soluciones para cada elemento finito.

3. Discretizar la geometría en una malla.
 - Definir las localizaciones de los nodos de los elementos.
 - Refinar el mallado en zonas de concentración de tensiones.
4. Definir las propiedades locales del elemento.
 - Anisótropo.
 - Isótropo.
 - Ortótropo.
5. Siguiendo los pasos anteriores obtenemos la matriz de rigidez del elemento.
6. Transformar la matriz de rigidez local del elemento en coordenadas globales.
7. Obtener el ensamblaje de la matriz de rigidez superponiendo las matrices de rigidez globales de los elementos.
8. Definir las condiciones de contorno aplicadas al sistema y formular el vector de fuerzas nodales $\{F\}$ así como definir desplazamientos, nodos fijos, contactos, cargas, temperatura, etc.
9. Resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas lineales resultante usando los métodos apropiados.
10. Resolver tensiones y deformaciones locales de elementos. Calcular tensiones y deformaciones en lámina y comparar con los criterios de rotura.

Una vez que se han establecido las características de los nodos o los elementos las ecuaciones individuales deben ensamblarse para formar un sistema global de ecuaciones que describa la respuesta general del sistema. Este ensamblaje, el cual aparece en el punto 9, da lugar a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales cuya forma básica es la siguiente:

$$[K]\{u\}=\{f\}$$



en donde:

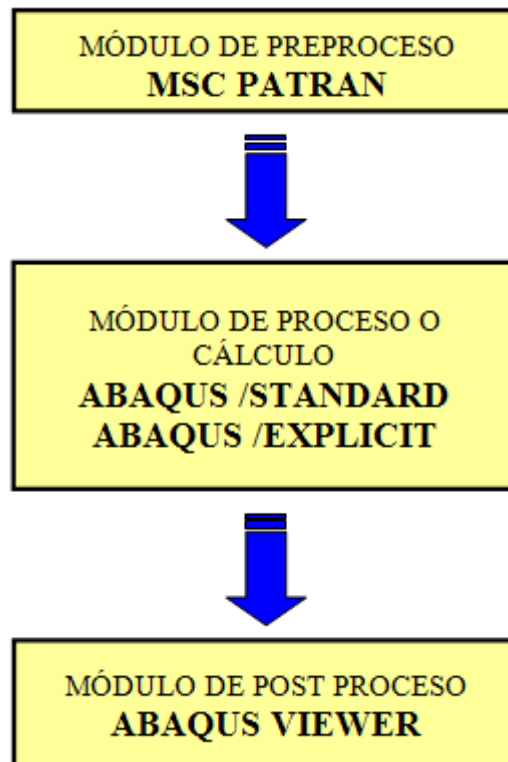
$[K]$ es una matriz ($n \times n$) de rigidez del sistema,

$\{u\}$ es un vector columna ($n \times 1$) que normalmente representa las deflexiones del sistema que son desconocidas,

$\{f\}$ es un vector columna ($n \times 1$) que normalmente son las cargas aplicadas que son conocidas.

Abaqus: Programa de Elementos Finitos.

Un programa de cálculo de Elementos finitos, sea cual sea el tipo de problema, tiene tres partes (o módulos) claramente diferenciadas (ver *Figura 4.1.*).



Módulos de un Programa de Elementos Finitos (en negrita, el software utilizado)



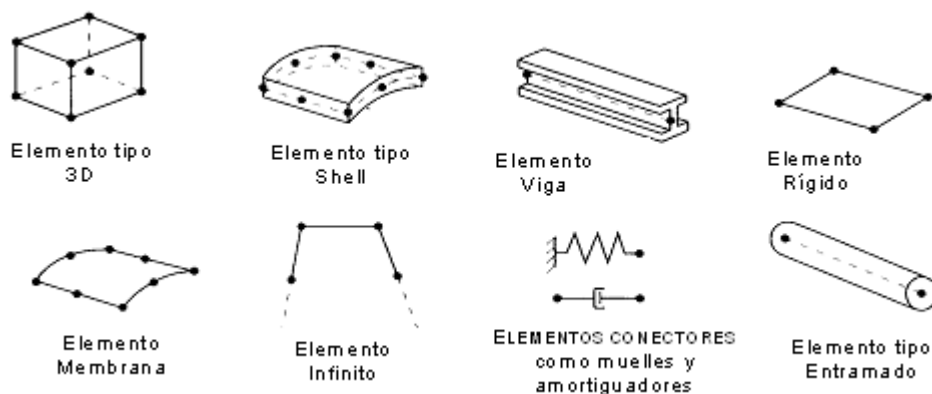
A continuación se explican las características del programa comercial utilizado para la realización de este proyecto; para ser más concreto, del paquete de elementos finitos ABAQUS.

MSC Patran.

MSC Patran es el módulo de Preproceso utilizado, en este caso, con salida a Abaqus; en él se define el elemento a estudiar y el tipo de discretización deseada para la resolución del problema. Para ello se siguen los siguientes pasos:

- Geometría: El objeto a estudio se define su geometría por medio de coordenadas u otros elementos de ayuda auxiliar (rectas, circunferencia, etc.,...).
- Discretización: El sólido que queremos analizar se divide en nodos, en donde se consideran los grados de libertad del objeto a estudio, y elementos, los cuales forman la malla de nuestro estudio conectando los nodos. Este apartado es muy importante ya que hay que definir el elemento con el cual se va a discretizar el objeto. Una vez elegido el elemento a utilizar la discretización se puede realizar de forma automática o generando elemento a elemento.

Abaqus posee una librería muy amplia de elementos que pueden ser utilizados dependiendo del tipo de geometría sobre la que se quiera efectuar el cálculo y de la precisión que se desea en el mismo dentro del propio elemento. En la Figura 3.12 se muestran los distintos tipos de elementos:

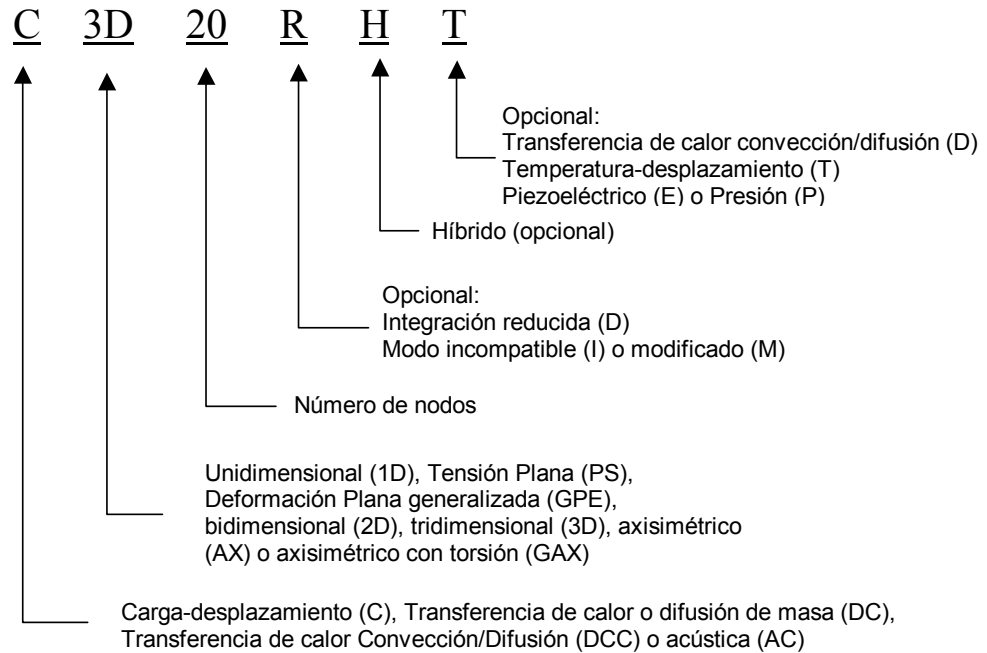


Tipos de Elementos

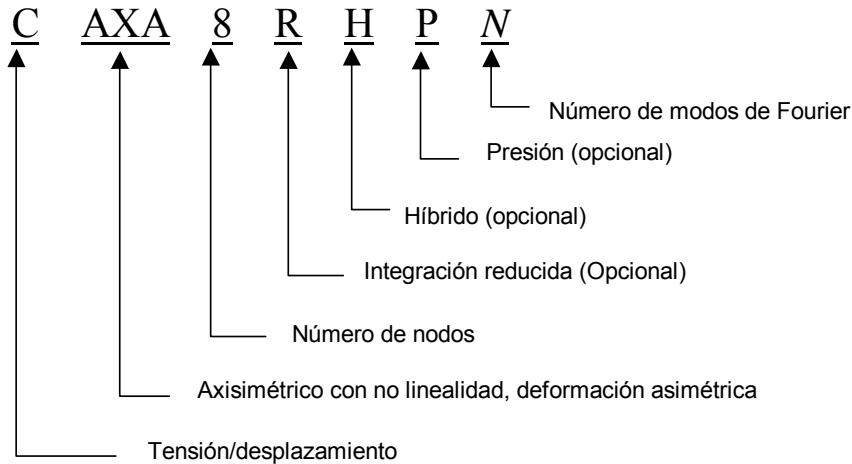


Abaqus tiene un criterio a la hora de nombrar los distintos elementos de su librería. A continuación se detalla la manera que tiene este programa de nombrar a los elementos.

a) Elementos unidimensionales, bidimensionales, tridimensionales axisimétricos.



b) Elementos axisimétricos con deformación no lineal asimétrica.



- Materiales: Se define la característica del material del cual está hecho nuestro sólido (módulo elástico, coeficiente de dilatación, etc.). En Patran se puede introducir la curva del material (pares de valores tensión – deformación) con la precisión que se quiera (tantos pares de valores como se precise).



- Cargas y condiciones de contorno: Por último se definen las cargas a las que está sometido el sólido, condiciones de apoyo en desplazamiento y contactos entre distintas superficies.

Una vez llegados a este paso, la etapa en Patran ha finalizado, pero antes éste prepara la información para ser enviada a la siguiente etapa, procesador o programa principal, e imprime o dibuja por pantalla de forma interactiva la geometría inicial y las condiciones para que sean verificadas por el usuario.

Posteriormente, deberá obtenerse un fichero de datos (input) en el cual se especifica todos los parámetros necesarios para, posteriormente, llevar a cabo el cálculo. Este fichero contiene la siguiente información:

- En primer lugar, aparece un listado de todos los nodos que forman parte del modelo y con las coordenadas espaciales de cada uno de pendiente del sistema de referencia utilizado.
- A continuación, aparecen los distintos grupos de elementos existentes. Cada uno de los grupos se especifican de la siguiente forma: primero aparece un listado del conjunto de nodos que forman parte de dicho grupo (NSET) y, después, se enumera cada elemento detallando el conjunto de nodos que forma parte del mismo (ELSET).
- En el siguiente bloque se asigna a cada uno de los grupos el material correspondiente según las especificaciones dadas. Además, cuando se trata de elementos tipo lámina (SHELL) se especifica el espesor, el número de puntos de integración y el sistema de orientación de cada grupo de elementos.
- Después, se definen los materiales utilizados. En este bloque se especifica el nombre del material y las distintas propiedades asociadas a los mismos (densidad, módulo elástico, límite de rotura, etc.).
- Posteriormente, se define el tipo de cálculo que va a realizarse (en este caso estático).
- Por último, se especifican tanto las condiciones de contorno como las cargas aplicadas. En este caso aparece un listado de los nodos en los cuales se aplican las condiciones de contorno con sus correspondientes valores de



restricción, y otro listado de los nodos en los que deben aplicarse las cargas con el correspondiente valor de las mismas.

- Una vez obtenido y comprobado el fichero anterior, se realizará el proceso de cálculo en sí del modelo. En este caso, va a utilizarse el módulo de cálculo mediante elementos finitos Abaqus descrito a continuación.

Abaqus.

Es el bloque en donde se da lugar el cálculo, realizando éste por medio de la aplicación del método de los elementos finitos a partir de la introducción e interpretación de los datos de la geometría, mallado, cargas, apoyos, contactos y material utilizados.

Este bloque no necesita ninguna interacción con el usuario y la manera de ejecutarlo es decirle por medio de un comando qué fichero queremos calcular. Una vez que se le ha ordenado la ejecución, el programa revisa el fichero obtenido del pre – proceso para obtener algún posible fallo de estructura de datos y si no hay errores da paso a la etapa de cálculo.

Abaqus posee dos tipos de cálculo diferenciados, que son los siguientes:

- **Abaqus/Standard.** Corresponde con el método general de cálculo estático del programa. Es el más ampliamente utilizado en el cálculo de geometrías y permite calcular el comportamiento mecánico en cuanto a tensiones y deformaciones de cualquier estructura que le sea introducida y en cualquier dirección. En este módulo de cálculo se obtienen los resultados aplicando la teoría del Método de los Elementos Finitos mediante integración implícita, lo que implica mayor gasto computacional pero también mayor precisión.
- **Abaqus/Explicit.** Corresponde con el otro módulo de cálculo convencional de ABAQUS y está desarrollado con una estructura completamente vectorizada para su utilización en supercomputadores. El análisis dinámico con *Explicit* está basado en la implementación de una regla de integración explícita junto con el uso de matrices masa diagonales o agrupadas. Permite el cálculo de cualquier estructura sometida a cargas dinámica en el tiempo.

Abaqus Viewer.



Este bloque es el encargado de presentar la información obtenida durante el cálculo. Los módulos de cálculo, en este caso ABAQUS, escriben los resultados del cálculo en unos fichero de texto los cuales recogen toda la información por nodo y elemento pudiendo saber de esta manera los desplazamientos de los nodos, mapas de tensiones o deformaciones, deformada de la estructura, etc.

Como el usuario no puede manejar de forma efectiva todo este volumen de datos es en este momento cuando intervienen los post – procesadores. Éstos representan de una forma gráfica todos los resultados obtenidos en el cálculo, pudiendo así obtener los resultados pedidos mediante una gradación de tonalidades y colores, y realizar, a su vez, vistas desde cualquier ángulo posible.

4.1.2 DESARROLLO DE MODELOS NUMÉRICOS

Se ha utilizado el programa “MD 2.1 Patran” para hacer el modelado de las probetas, los pasos que se han seguido son los siguientes (Ver anexo 4.1.2) :

Paso 1. MODELO DE PREPROCESO MSC PATRAN

- Geometría
- Mallado
- Creación de los grupos
- Unificación de los nodos
- Materiales
- Propiedades de la malla: tipo Solid y tipo Shell
- Apoyos y Cargas

Paso 2. MODULO DE PROCESO O CÁLCULO ABAQUS 6.11-2

- Análisis: con Patran y Abaqus
 - Análisis con cargas
 - Análisis modal
- Compilación
 - Modificación para el cálculo con cargas
 - Modificación para el análisis modal

Paso 3. MODULO DE POSTPROCESO ABAQUS VIEWER

- Visualización de resultados con Abaqus Viewer



4.1.3 MODELOS MEF REALIZADOS

Se han realizado 8 modelos numéricos (Figura 4.1.5a) para contrastar los resultados y elegir posteriormente el más preciso comparándolos con los resultados experimentales del laboratorio. Varía el tipo de mallado de las placas y del cordón, se utilizarán elementos tipo Shell y Solid. (Ver Anexo 4.1.3).

Se han calculado la resistencia de cada modelo para una carga de 3.2kN (Figura 4.1.5b) y otra de 4.4kN (Figura 4.1.5c). La tensión Von Mises se muestra a continuación en la Figura 4.1.5d

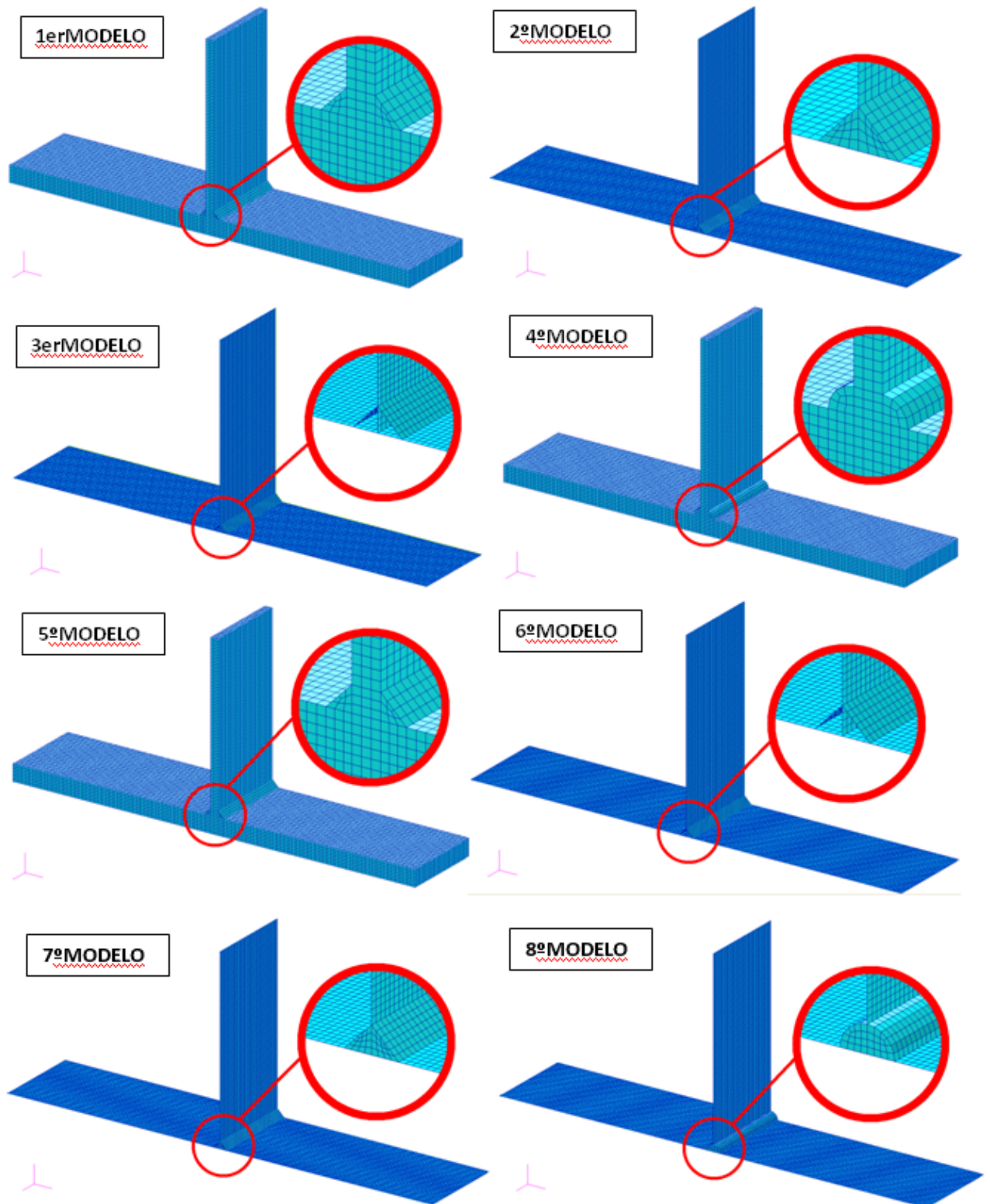


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento.4.1.3.1



4.1.3.1 RESULTADOS NUMERICOS DE TENSION VON MISES

RESULTADOS 3.2KN

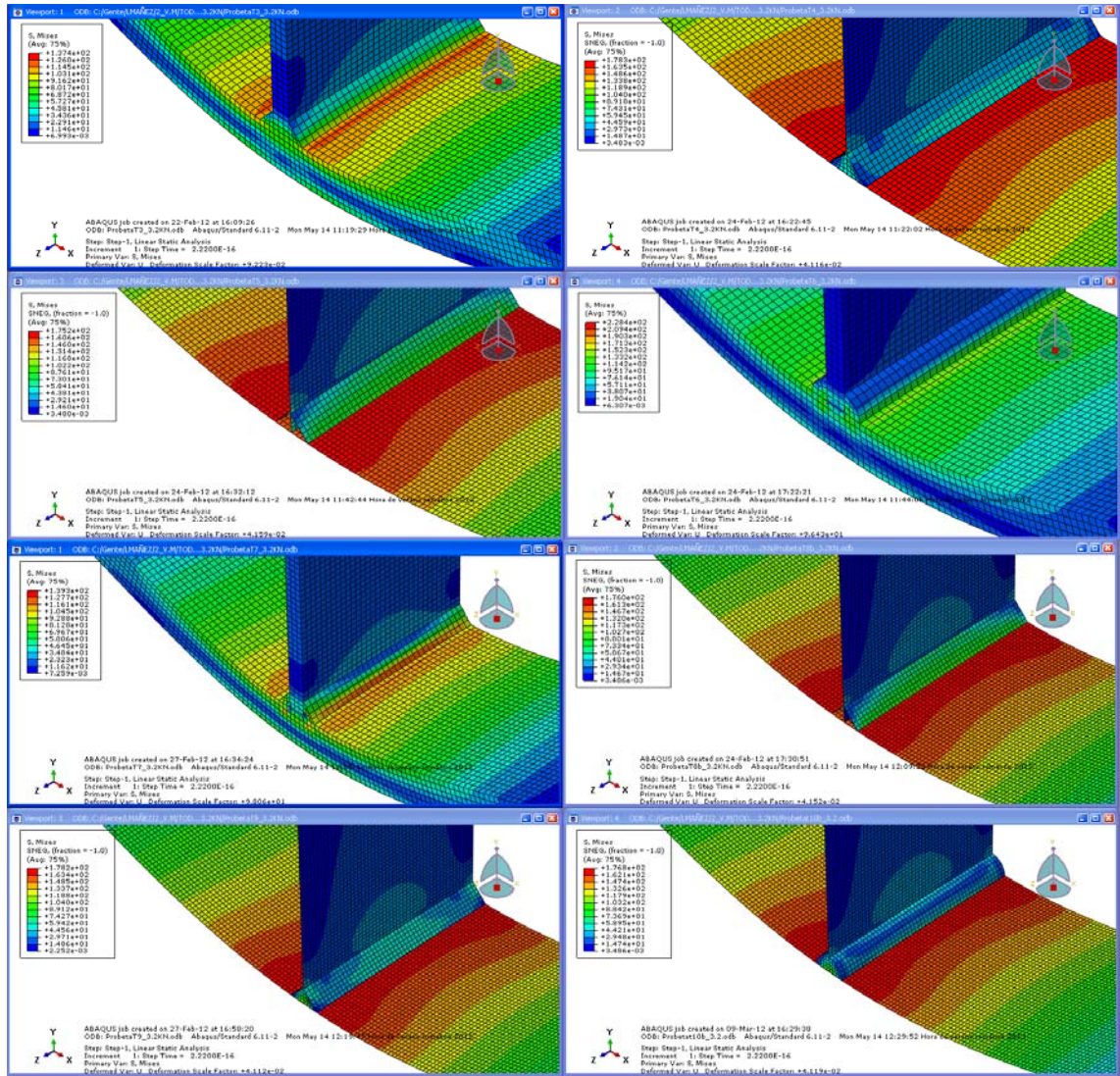


Figura 4.1.3.1



RESULTADOS 4.4KN

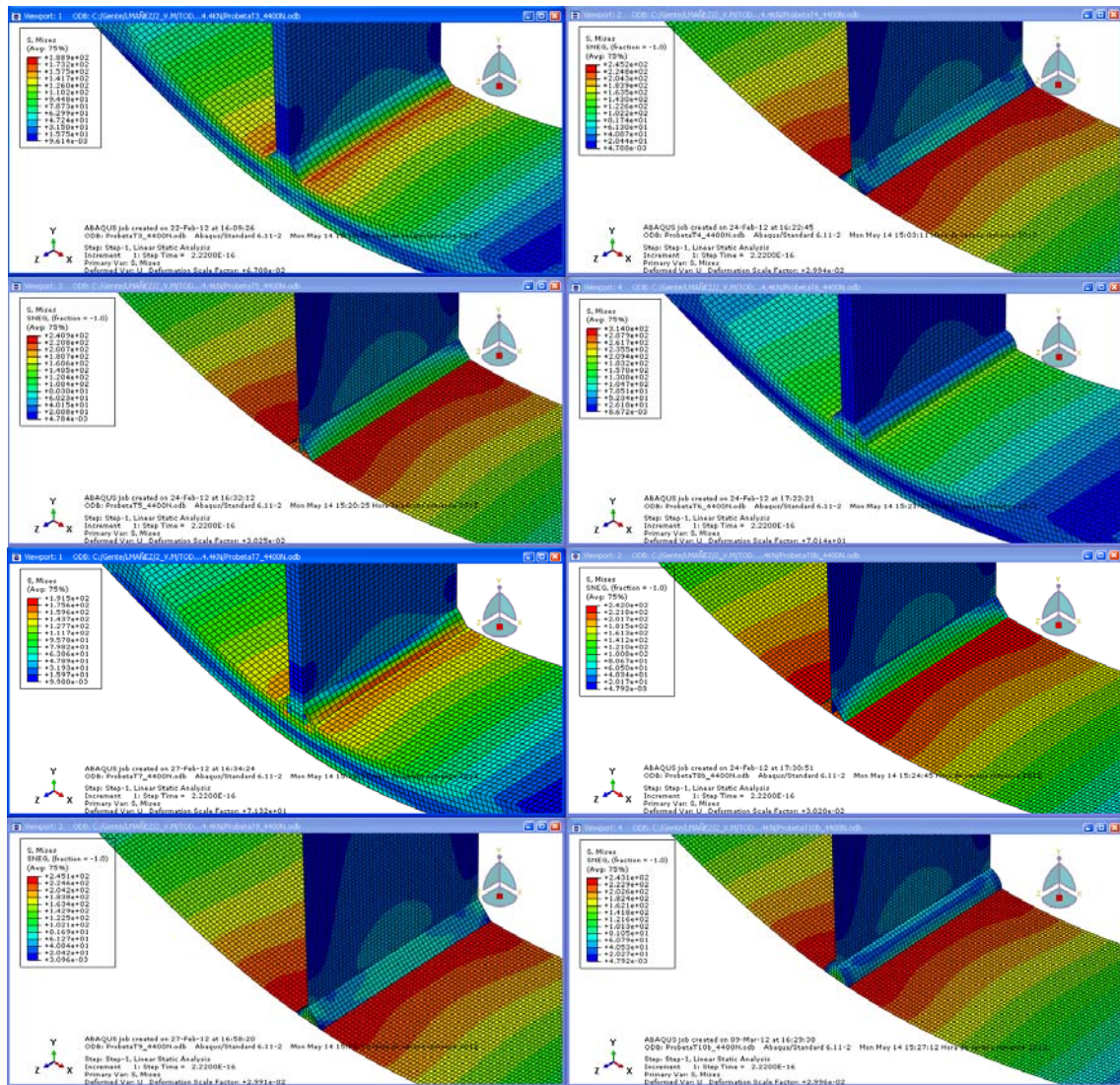


Figura 4.1.3.1.2



4.2 MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.2.1 ANALISIS DE DUREZA

4.2.1.1 INTRODUCCION TEORICA

La dureza y la resistencia a la tracción son propiedades que están relacionadas con la resistencia de los materiales a la deformación, de manera que al aumentar la dureza aumenta la resistencia a la tracción, y viceversa. Para obtener la resistencia de un material al cual se le ha hecho un ensayo de dureza bastara con consultar las tablas correspondientes.

El cálculo de la dureza se utiliza ampliamente para la inspección y control de los materiales. En la industria metalúrgica y, en concreto, en las del acero, el ensayo de dureza es uno de los más utilizados.

No hay una única forma de definir la dureza, pero de forma general puede decirse que es la resistencia superficial que un material opone a la deformación, bien sea deformación por rayado o por penetración superficial.

En la actualidad se utilizan ensayos donde la dureza se calcula con la resistencia a dejarse penetrar por otro cuerpo más duro que llamaremos penetrador el cual aplicara una carga determinada. Los ensayos más utilizados son el Brinell, Vickers, Rockwell y Shore.

4.2.1.1.1 ENSAYOS DE DUREZA

Brinell. Es el más antiguo de los cuatro, data de 1900. Se caracteriza porque utiliza un penetrador que era una bola de acero templado de 10 mm de diámetro al que se le aplicaba una carga de 3000 kg durante un tiempo establecido. Al retirar el penetrador queda una huella en el material a ensayar con forma de casquete esférico, La dureza Brinell vendría dada por la formula:

$$HB = \frac{P \text{ (Kg)}}{S \text{ (mm}^2\text{)}}$$

HB = siglas de dureza Brinell ('dureza' = Hardeness);

P = carga aplicada al penetrador;

S = superficie de la huella.

(Esta fórmula es difícil de aplicar por la dificultad de calcular la superficie de la huella.)



$$H = \frac{2 P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

En esta fórmula solo hay que introducir la medida del diámetro de la huella (d), ya que P y D son valores fijos, por lo que es la fórmula que se utilizara para el cálculo de la dureza Brinell. Para calcular el valor de la dureza Brinell solo se necesita medir el diámetro de la huella dejada en la probeta.

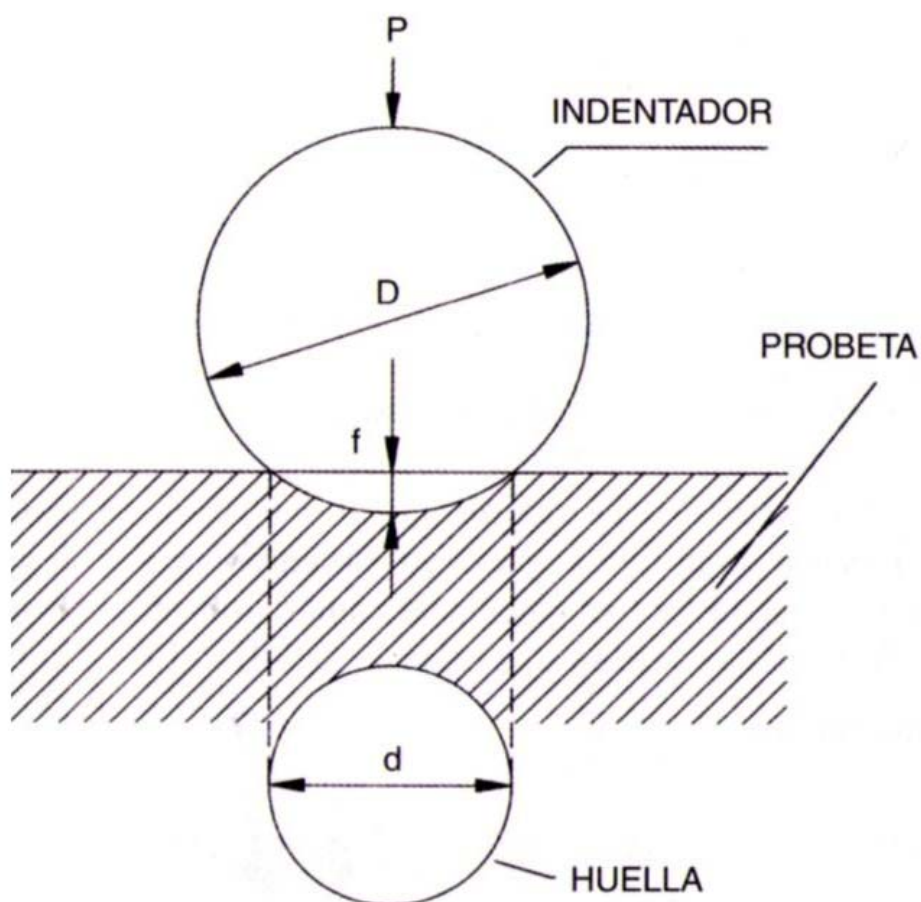


Figura 4.2.1.1.1.1

Brinell recomendó utilizar un penetrador de 10 mm de diámetro y una carga de 3000 kg. Estas condiciones de ensayo se utilizan cuando el material a ensayar es acero, pero con otro tipo de materiales, como cobre, latón, acero o aleaciones de aluminio, se emplean cargas menores y bolas de diámetros inferiores.

Para que los resultados de los valores de dureza sean comparables midiendo con distintas cargas y penetradores, no se pueden utilizar cualquier carga con cualquier diámetro



de penetrador. Debe cumplirse que las huellas dejadas por el penetrador sean geoméricamente comparables, lo cual se cumple siempre que las cargas aplicadas son proporcionales al cuadrado del diámetro del penetrador utilizado, es decir:

$$H = \frac{P_1}{\pi D_1 f_1} = \frac{P_2}{\pi D_2 f_2}$$

Como:

$$f_1 = \frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2} \cos \theta_1 = \frac{D_1}{2} (1 - \cos \theta_1)$$

$$f_2 = \frac{D_2}{2} (1 - \cos \theta_2)$$

resulta:

$$H = \frac{2P_1}{\pi D_1^2 (1 - \cos \theta_1)} = \frac{2P_2}{\pi D_2^2 (1 - \cos \theta_2)}$$

Para que las huellas sean semejantes se debe cumplir que $\theta_1 = \theta_2$, es decir, $P_1/D_1 = P_2/D_2 = \text{constante} = K$. A; esta relación es la constante de ensayo y sus valores dependen del material que se ha de ensayar. Se han elegido de manera que entre los diámetros de los penetradores y de la huella se verifique la relación: $0,24D < d < 0,6 D$.

El diámetro del penetrador que se utiliza para realizar la huella en el ensayo de dureza Brinell también es función del tipo de material sobre el que se va a realizar la medición. Los valores adoptados según la norma del ensayo son:

D (diámetro del penetrador) = 10, 5, 2.5, 2, ò 1mm.

Una vez determinado el diámetro y la constante de ensayo, la carga se calcula mediante la relación expresada anteriormente.

Una vez conocidas las condiciones del ensayo, se realizara el mismo, haciendo una huella con el penetrador en la superficie de la probeta y midiendo el diámetro y calculando el área de dicha huella después de quitar la carga.

El método Brinell se utiliza para determinar la dureza en materiales blandos o relativamente blandos, como un acero al carbono o una aleación de aluminio. Si este método se utilizase con materiales de elevada dureza se deformaría la bola del penetrador, con lo que la medida no sería correcta.

El procedimiento de ensayo y las características del penetrador y la carga están reguladas por la norma UNE-EN 10 003 Materiales metálicos, ensayo de dureza Brinell. En ella se indica que se utilizara bola de acero para materiales de dureza Brinell inferior a 450; si el material a caracterizar es más duro puede utilizarse como penetrador una bola de un



material más duro, por ejemplo, carburo de wolframio, siempre que la dureza sea inferior a 650. Si la dureza fuera aun superior, no valdría este método de ensayo y habria que utilizar otro tipo de ensayo de dureza.

Para un mismo material debe cumplirse una semejanza geometrica en las huellas Brinell.

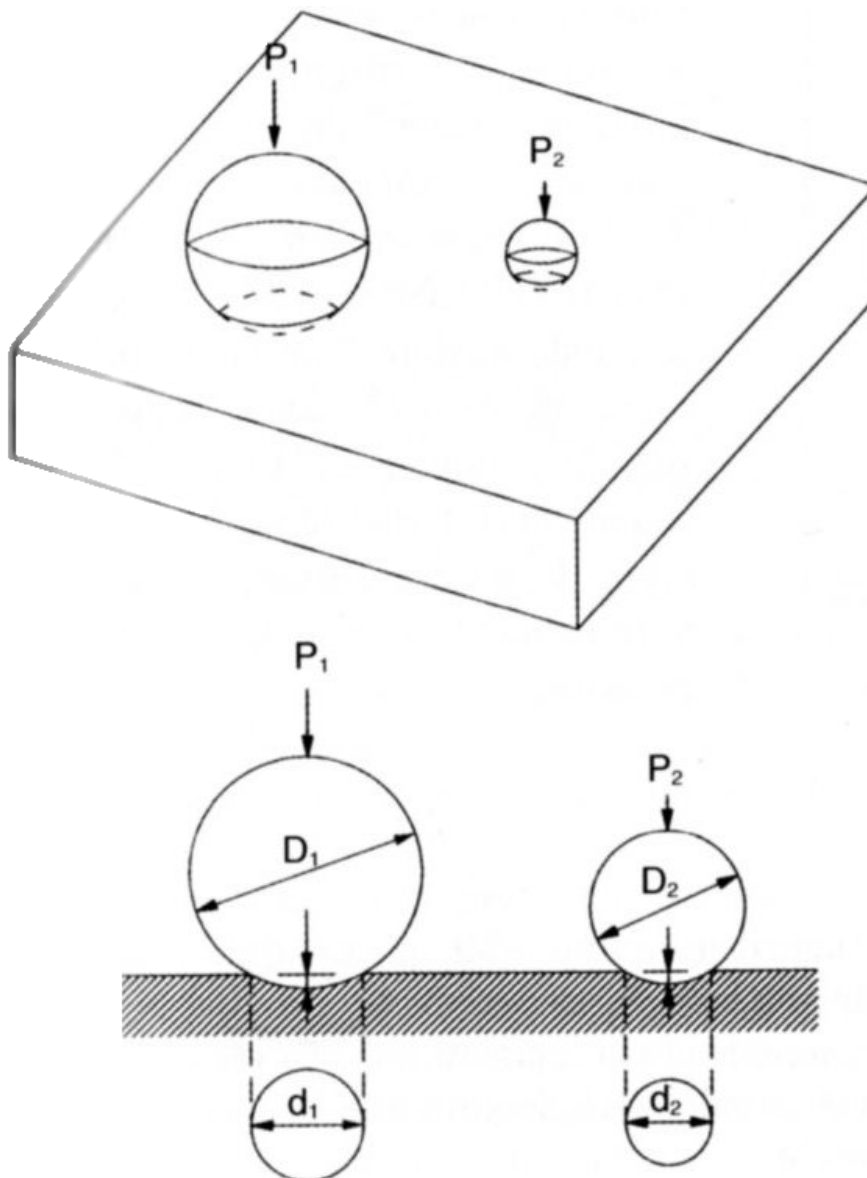


Figura 4.2.1.1.1.2

Debido a las diferentes condiciones en que se puede realizar el ensayo Brinell, hay que indicar claramente como se ha realizado para asegurar la repetibilidad de las medidas.

HBS = dureza en el caso de que se utilice bola de acero.

HBW = dureza en el caso de que se utilice bola de metal duro.

Estos símbolos van precedidos por el valor de la dureza obtenida y seguidos por unos índices que precisan las condiciones de ensayo en el orden siguiente:

Diámetro de la bola en mm.



Numero que representa la carga de ensayo.

Tiempo, en segundos de aplicar la carga.

Por ejemplo, 350 HBS 5/750/30 indica una dureza Brinell de 350, medida con bola de acero de 5mm de diámetro, bajo carga de ensayo de 750 kg aplicada durante 30 s.

El equipo donde se mide la dureza se llama durómetro.

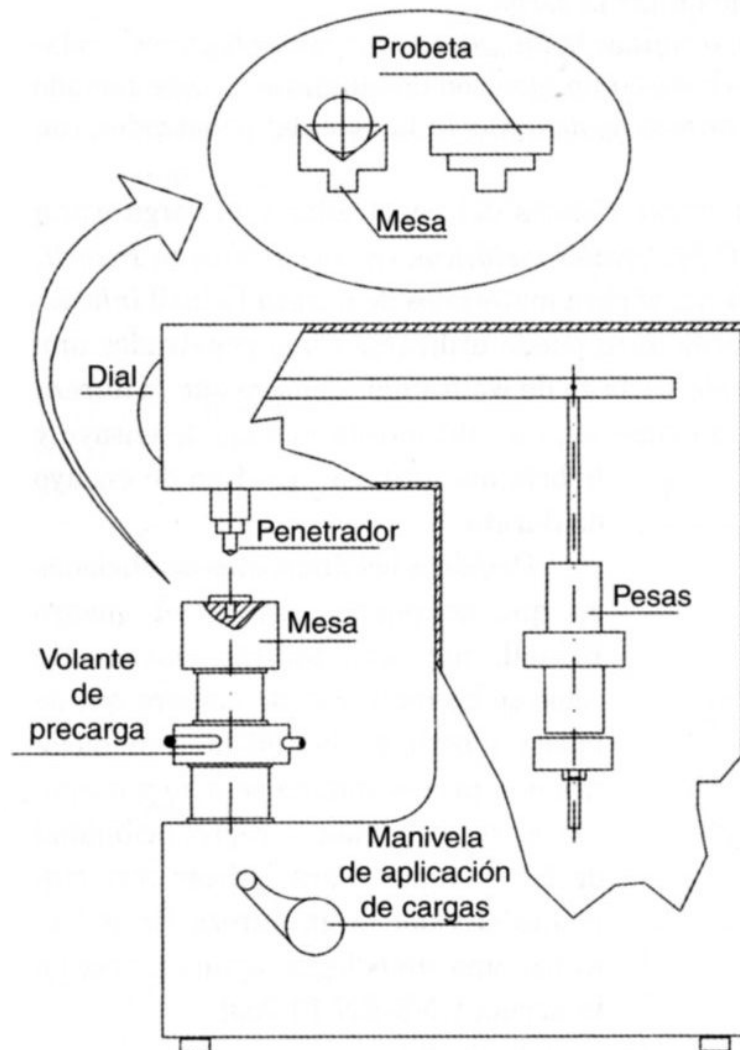


Figura 4.2.1.1.1.3

Este tipo de durómetro se utiliza para el ensayo de dureza Brinell, Vickers y Rockwell.

En el cuerpo lateral se colocan las pesas correspondientes a las cargas que vamos a aplicar. Debajo del penetrador se encuentra un tornillo para acercar la muestra al penetrador.

Una vez colocada la muestra, se acerca el tornillo hasta que esta en contacto con el penetrador; entonces, se aplica la carga mediante una palanca situada en el lateral. Se mantiene la carga el tiempo establecido y después se retira. Se saca la muestra y se determina el diámetro de la huella mediante un microscopio de mano, de 20 o 25 aumentos, con una reglilla graduada de lente. Una vez calculado el diámetro se utiliza la fórmula de dureza Brinell desarrollada anteriormente para saber el valor de la dureza.



Vickers. El método Vickers surge como consecuencia de la limitación que tiene el Brinell para materiales duros. Ahora, en lugar de usar una bola de acero como penetrador, se utilizara una pirámide cuadrada de diamante, construida de manera que sus caras opuestas forman un ángulo de 136° . Este ángulo se eligió para que la bola del Brinell quedase circunscrita en el borde de la huella.

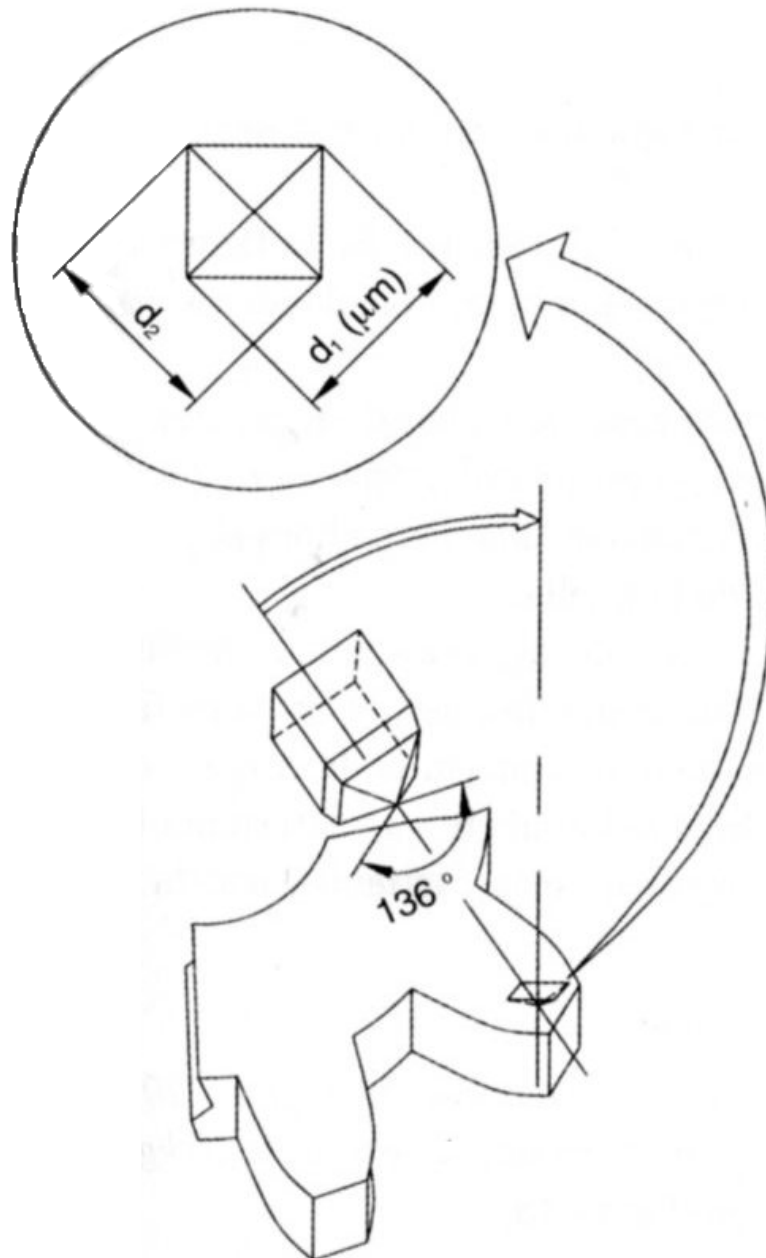


Figura 4.2.1.1.4

El número de dureza Vickers (HV) se define, igual que en el Brinell, como la relación entre la carga aplicada y la superficie de la huella.



$$HV = \frac{P}{S}$$

Desarrollando la formula se obtiene

$$HV = 1,8544 \frac{P \text{ (kp)}}{d^2 \text{ (mm}^2\text{)}}$$

Donde d es la semisuma de las diagonales de la huella, $(d_1+d_2 / 2)$.

Al utilizar como penetrador una pirámide, todas las huellas dejadas son geoméricamente semejantes, por lo que solo hay un tamaño de penetrador. Las cargas van a variar en función de la dureza del material, las más corrientes son: 1, 5, 10, 30, 50 y 100 kg.

El procedimiento de ensayo y las características del penetrador y la carga están reguladas por la norma UNE 7-423, Ensayo Vickers para materiales metálicos, que van a definir el método de ensayo, así como la forma de dar el resultado. Este se indicara con el valor de dureza obtenido, seguido de las letras HV (dureza Vickers) y el valor de la carga aplicada en el ensayo.

Por ejemplo, 450 HV 100 quiere decir que se ha obtenido un valor de dureza Vickers de 450 aplicando una carga de 100 kg.

Para materiales muy delgados, o en aquellos donde se quieren estudiar variaciones de dureza en zonas muy pequeñas, se puede utilizar este método, pero con cargas muy pequeñas, que van desde 1 g hasta 1000 g, es lo que se llama MICRODUREZA. Las huellas que dejan son muy pequeñas, del orden de micras, por lo que el equipo utilizado debe ser distinto, se llama microdurómetro y actúa por un lado, como microscopio metalográfico, para poder ver la huella y calcular la longitud de las diagonales.

La forma de realizar el ensayo Vickers y la forma de medir la huella es igual al ensayo Brinell.

El método Vickers se puede utilizar para materiales de todo tipo, tanto duros como blandos. El penetrador, al ser de diamante, no se va a deformar ni ni siquiera con los materiales más duros. Además, al poder aplicar cargas desde 1 gramo hasta 1000 kg, se puede elegir el valor más adecuado para cada tipo de material.

Rockwell. El ensayo Rockwell permite la lectura directa en el durómetro.

El principio del ensayo es el mismo que en los casos anteriores, un penetrador que aplicara una carga determinada, durante un tiempo establecido, dejara una huella que aplicara una carga determinada, durante un tiempo establecido, dejara una huella que deberemos medir para determinar la dureza en función de ella. Pero ahora el parámetro a medir no es la superficie, sino la profundidad de la huella.

Otra diferencia es que la carga no se aplica en una sola vez sino que hay una primera aplicación, llamada precarga e inmediatamente después, la carga restante.

Hay varios tipos de ensayos de dureza Rockwell, en función de la carga y el penetrador. Se denominan por las siglas HR y una letra del alfabeto que determina las condiciones de ensayo (carga y penetrador). Los métodos más corrientes son la dureza Rockwell C (HRc) y Rockwell B (Hrb).

La forma de realizar el ensayo en cada uno de los casos es:

Rockwell C: utiliza como penetrador un cono de diamante en ángulo 120° y una carga de 150 kg, que se aplican de manera que primero es una precarga de 10 kg, seguido de los 140 restantes. Los pasos a seguir son:

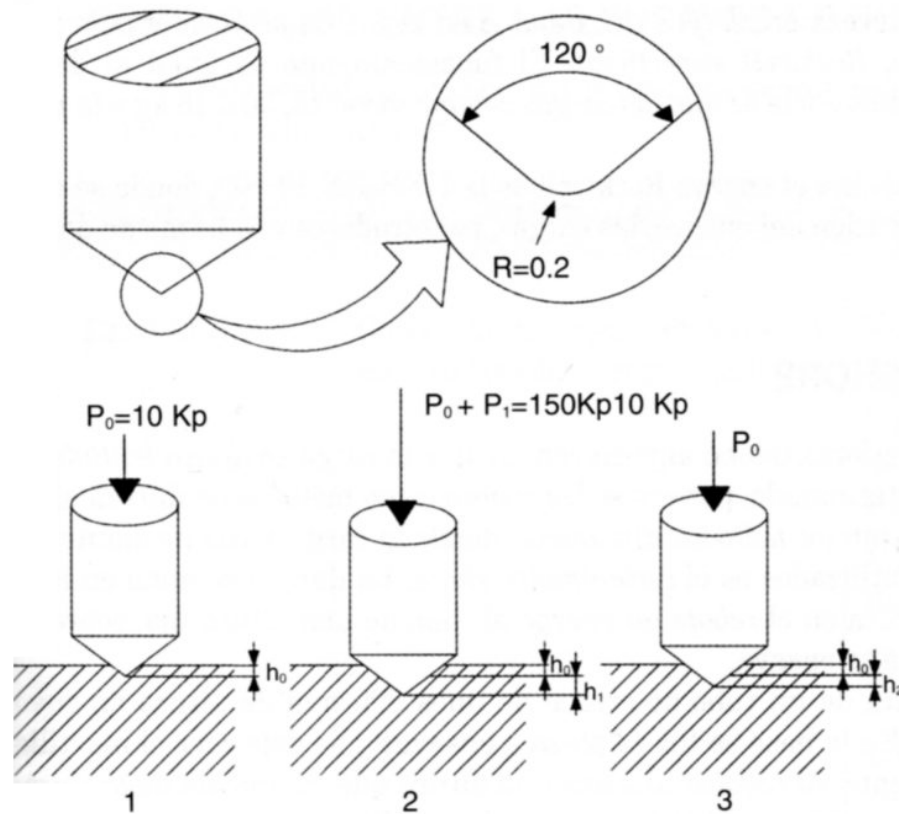


Figura 4.2.1.1.1.5

Colocación de la probeta

Aplicación de la carga previa (precarga) 10kg, que hace una huella de profundidad h_0 .

Se hace actuar el resto de la carga (140 kg), con lo que la profundidad de la huella llega hasta h_1 .

Se mantiene el tiempo predeterminado.

Se retira la carga y, debido a la recuperación elástica del material, el penetrador retrocede hasta una altura h .

El valor de la dureza viene determinado en función de lo que se llama deformación remanente, de manera que:

$$\text{HRc} = 100 - e$$

Rockwell B: se utiliza como penetrador una bola de acero templado de diámetro de 1/16 pulgadas (1,58 mm) y la carga aplicada es de 100 kg, dividida en una precarga de 10 kg y una carga adicional de 90 kg.



El procedimiento del ensayo es idéntico al Rockwell C, pero ahora el numero de dureza se obtiene:

$$HRc = 130 - e$$

Tanto en el caso Rockwell C como en el Rockwell B, el valor indicado en la formula se lee directamente en el dial del durómetro.

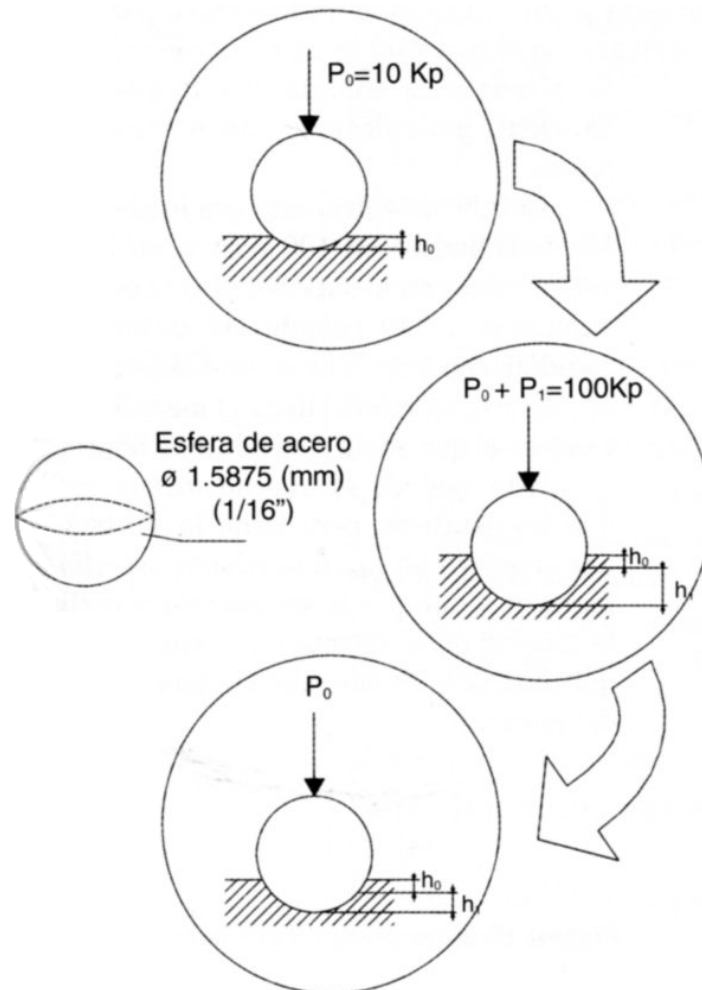


Figura 4.2.1.1.1.6

La utilización del método Rockwell C ó B depende del tipo de material a ensayar: el Rockwell C, al utilizar diamante como penetrador, se emplea cuando el material a ensayar es de gran dureza (acero templado, acero de herramientas, etc.), mientras que el Rockwell B, al tener la bola de acero, se utilizara con materiales más blandos (aleaciones de aluminio, cobre, bronce, etc.)

De manera que las dos escalas son complementarias, es decir, cuando la escala B comienza a no ser válida porque el material a ensayar es muy duro, la escala C empieza a tener validez.

Para determinar la dureza en chapas delgadas, o en capas de pequeño espesor, se utiliza la llamada dureza Rockwell superficial. El funcionamiento es igual al de la Rockwell normal, pero la diferencia es que las cargas son menores: 15, 30 ó 45 kg y la precarga es de 3 kg.



La norma UNE que define el ensayo Rockwell es la UNE-EN 10 109, donde se dan todos los datos para la ejecución del ensayo, las cargas, penetradores y la forma de dar el resultado.

Tablas de equivalencia: muestran las equivalencias entre las distintas escalas de dureza. Este tipo de tablas se obtienen de forma experimental y hay que utilizarlas solamente como una primera aproximación, para conocer de una forma aproximada el valor en otra escala. (Ver Figura 4.2.1.1.7)

Tabla 1. Esquema comparativo de las diferentes escalas de dureza

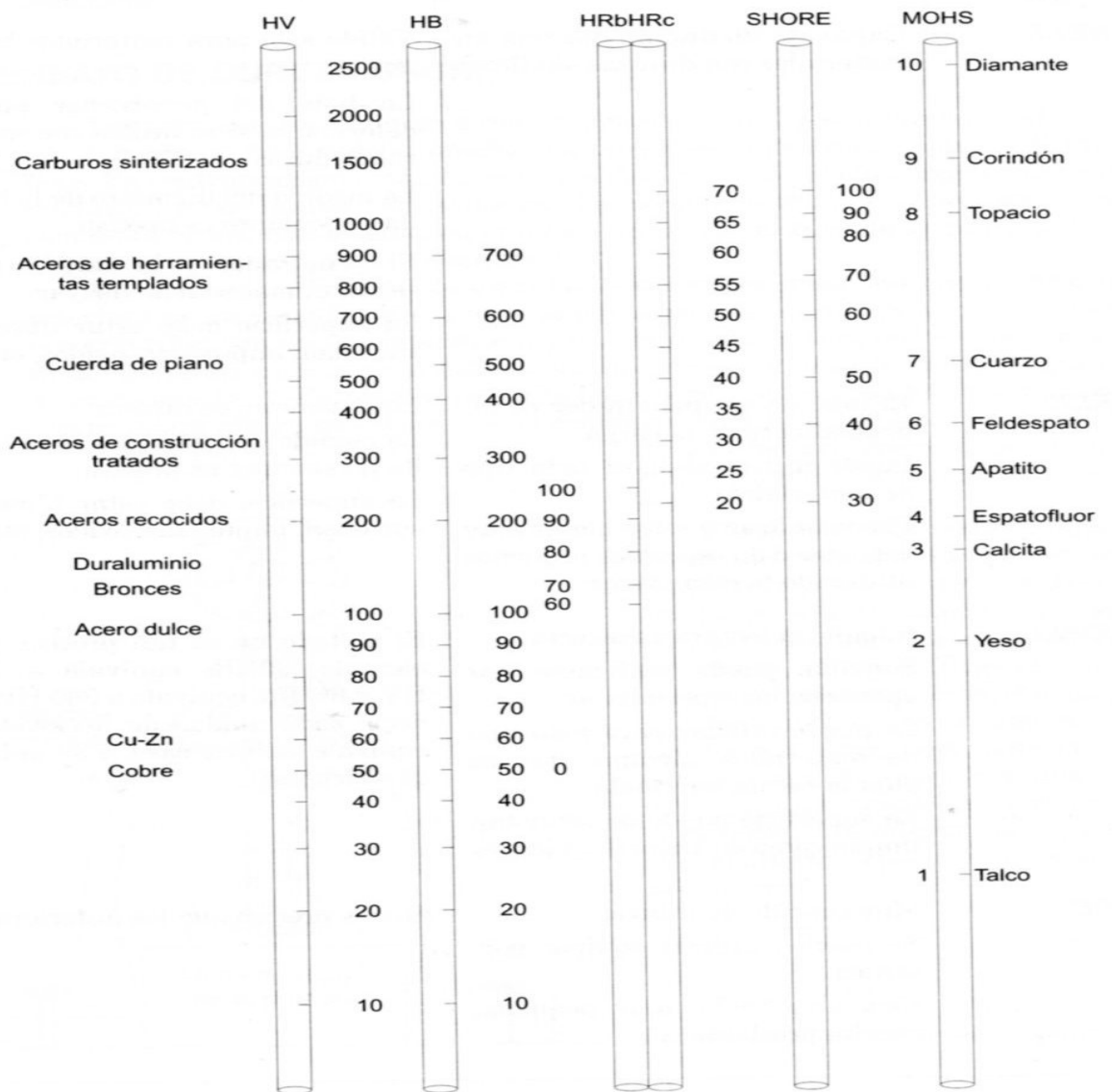


Figura 4.2.1.1.7

4.2.1.1.2 ZAT (Zona Afectada Térmicamente)

Cómo afecta la soldadura a las ZATs

En los procesos de soldadura, se produce un endurecimiento del material. El calor se transfiere a través del material adyacente al cordón de soldadura. Una vez terminada la soldadura se distinguen tres zonas: el metal de aportación o cordón de soldadura, la zona afectada térmicamente adyacente a la soldadura y el material base más allá de la ZAT la cual no se ve afectada por la operación de soldeo.

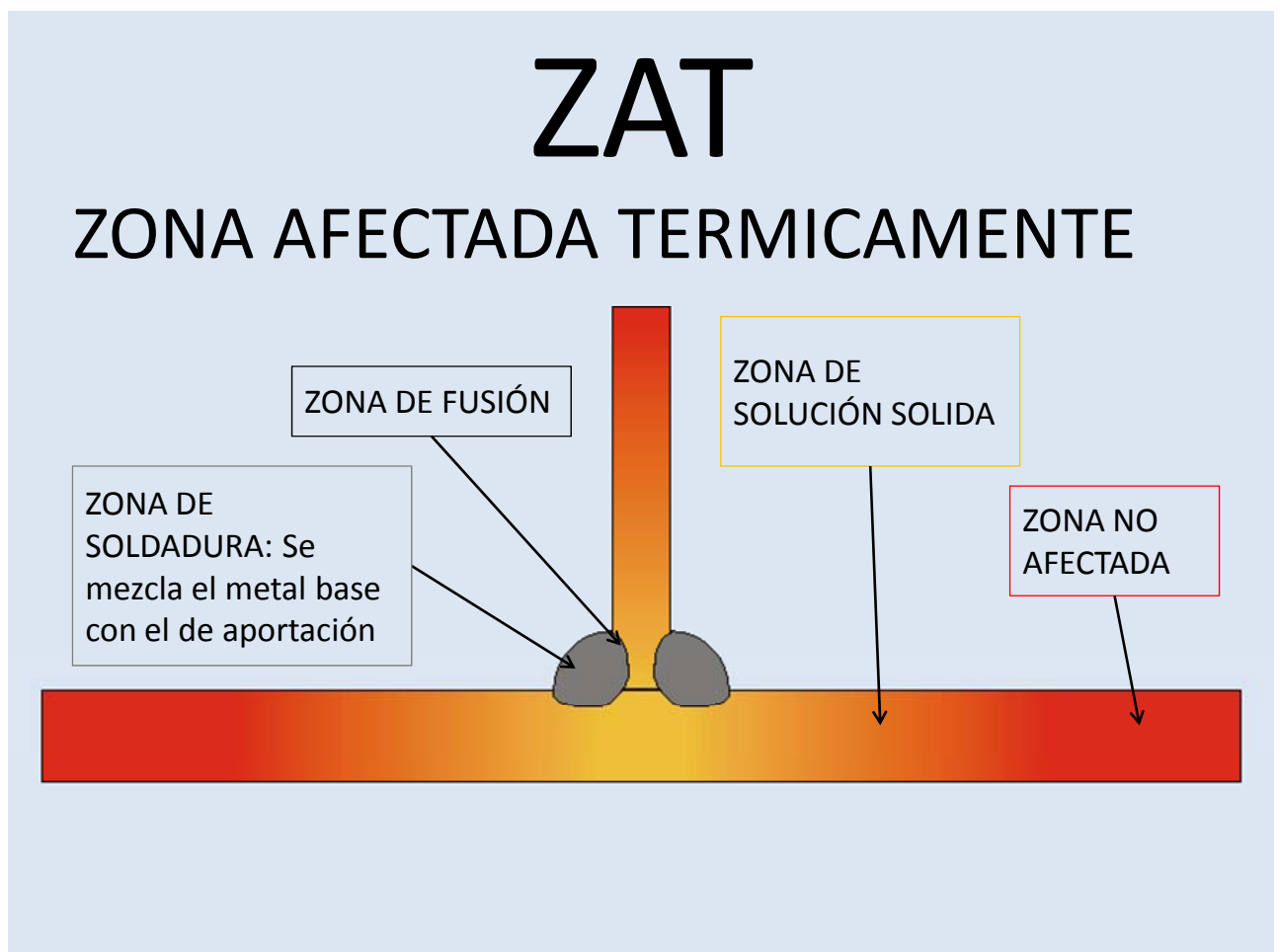


Figura 4.2.1.1.2.1

En la siguiente imagen se aprecia la ZAT de una de las probetas a ensayar, se puede observar que la Zona Afectada Térmicamente posee una forma circular alrededor de las soldaduras.



Figura 4.2.1.1.2.2 ZAT de una de las probetas soldadas

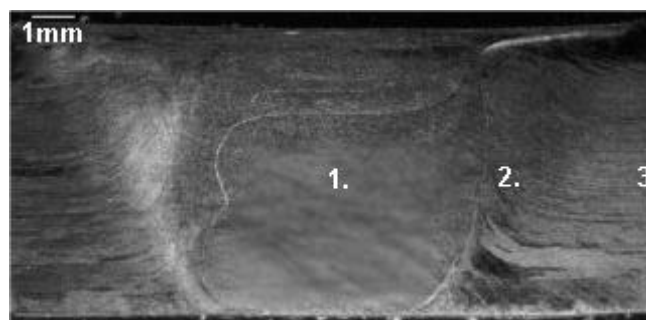


Figura 4.2.1.1.2.3. Sección perpendicular a la soldadura: 1) Soldadura 2) Zona de transición, 3) Material base

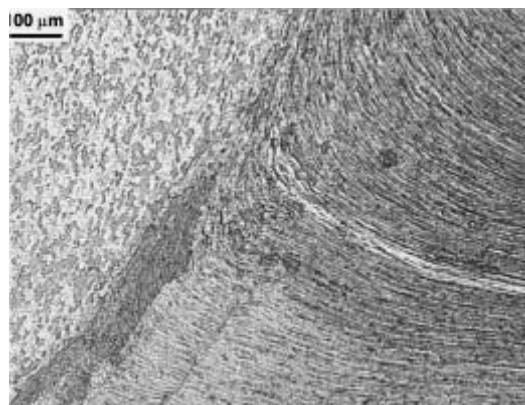


Figura 4.2.1.1.2.4 Detalle de la microestructura entre las zonas de unión y de transición



4.2.2 ANALISIS DE FATIGA

4.2.2.1 INTRODUCCION TEORICA

Los materiales están sometidos a cargas variables de mayor o menor intensidad. Una buena parte de las roturas que se producen en los materiales son debidas al fenómeno de fatiga. Este tipo de rotura es más complejo que el de tipo estático. En la fatiga afectan diversos factores como: la variación de las cargas, el tamaño de la pieza, las formas geométricas, la rugosidad superficial, el grado de supervivencia, etc.

Tipo de rotura

El tipo de rotura que se produce cuando la pieza falla por fatiga es distinto del que se produce como consecuencia de una carga estática. La rotura por fatiga se produce de forma súbita. El fallo de una pieza por fatiga comienza con la formación de una pequeña grieta que no puede ser detectada a simple vista y que se origina en un punto en el cual se produce alguna discontinuidad en el material. Esta discontinuidad puede ser una ranura circular, un chavetero, un cambio brusco de sección, un agujero transversal, etc.

La rotura se produce a lo largo de tres etapas:

1. Iniciación de la grieta. En la superficie del metal se produce algún tipo de distorsión a escala molecular, producido, por ejemplo, por las cargas a las que está sometido, de manera que sea un punto de concentración de tensiones que a actuar como iniciador de la grieta. Esta etapa tiene una duración variable, dependiendo del material y el esfuerzo al que esta sometido. La grieta que aparece no es visible únicamente esta a nivel microscópico.

2. Propagación de la grieta. La velocidad de crecimiento de la grieta aumenta notablemente, pasando a ser visible y poderse detectar por distintos ensayos. En cada sollicitación la grieta va avanzando lentamente, de manera que la superficie de fractura que se observa al final tiene un aspecto típico, donde es posible apreciar unas líneas de marca de tipo concéntrico, que se expanden desde el punto de inicio de la grieta.

3. Rotura. Llega un momento en que la grieta se ha propagado tanto que la sección no es capaz de soportar los esfuerzos a que está sometida y el metal rompe bruscamente. Al observarse la sección de la fractura tiene un aspecto distinto al anterior, ya no aparecen las líneas de marca, sino que el aspecto es uniforme y brillante, de fractura frágil.

Los esfuerzos a los que pueden estar sometidos el material pueden ser varios: de tracción-compresión, de flexión o de torsión. En cualquier caso si un material está sometido a esfuerzos variables, lo más probable es que adquiera un carácter periódico o cíclico, que se puede representar como una curva sinusoidal en una gráfica donde en abscisas se indique el tiempo y en ordenadas las tensiones. Los parámetros característicos de estas curvas son:

Tensión superior, σ_s , o tensión máxima, σ_{max} . Es la tensión máxima durante el ciclo

Tensión inferior, σ_i , o tensión mínima, σ_{min} . Es la tensión mínima durante el ciclo.

Amplitud de la tensión, σ_a . Representa la mitad del intervalo entre las tensiones máximas y mínimas.



$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = f$$

Tensión media, σ_m , Es el promedio de las tensiones máximas y mínimas en cada ciclo.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Tipos de ciclos de fatiga

Ciclo alternativo simétrico, los esfuerzos varían entre dos valores iguales y de sentido contrario.

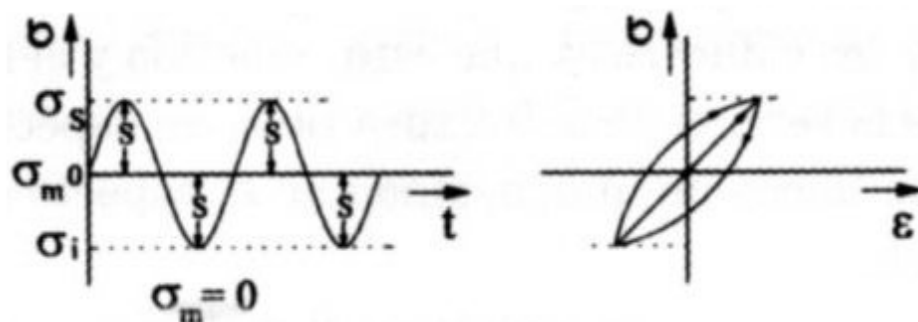


Figura 4.2.2.1.1

Ciclo alternativo asimétrico, cuando los esfuerzos son de sentido contrario, pero de magnitudes desiguales.

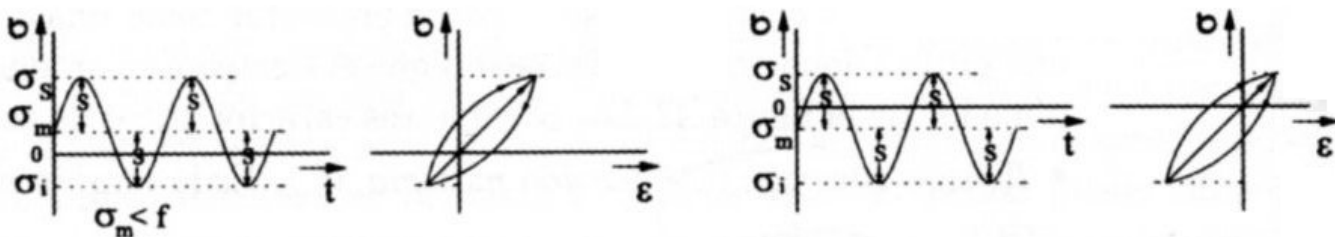


Figura 4.2.2.1.2

Ciclo intermitente, cuando los esfuerzos varían entre cero y un máximo.

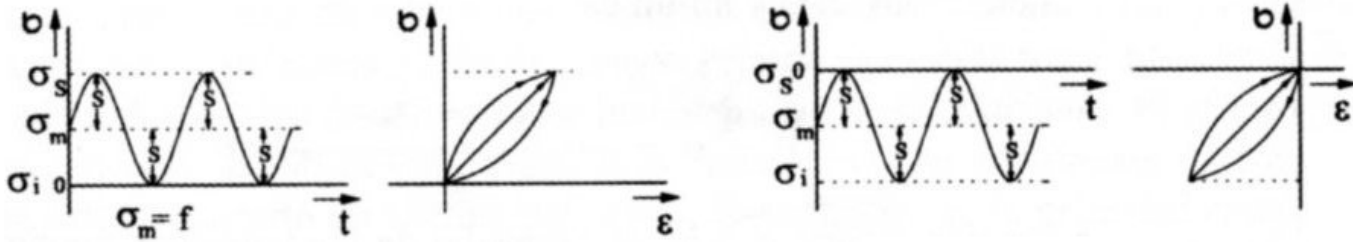


Figura 4.2.2.1.3

Ciclo pulsatorio, cuando los esfuerzos varían entre dos valores del mismo sentido, uno máximo y otro mínimo.

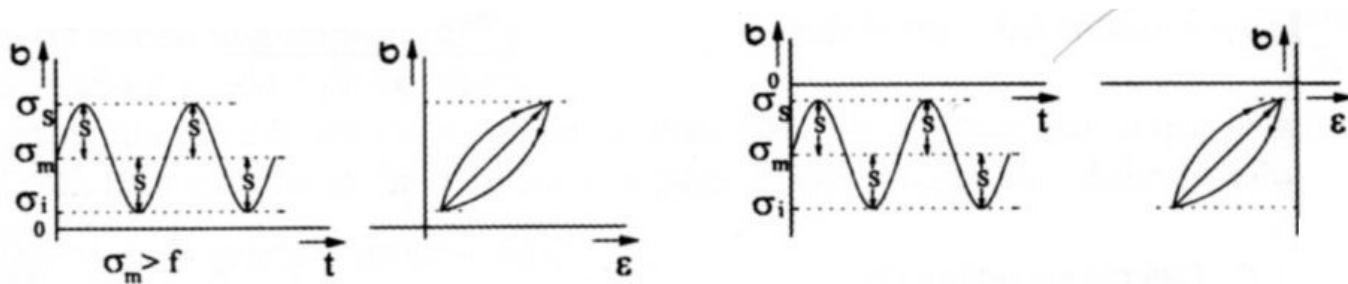


Figura 4.2.2.1.4

CORDON DE SOLDADURA

El cordón de soldadura tiene tres partes bien diferenciadas

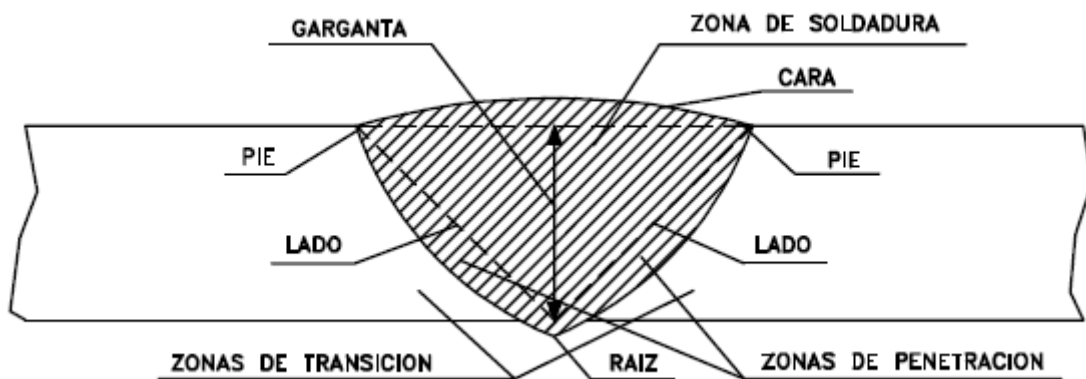


Figura 4.2.2.1.5 Partes del cordón de soldadura.

Zona de soldadura: Es la zona central, que está formada fundamentalmente por el metal de aportación.



Zona de penetración. Es la parte de las piezas que ha sido fundida por los electrodos. La mayor o menor profundidad de esta zona define la penetración de la soldadura. Una soldadura de poca penetración es una soldadura generalmente defectuosa.

Zona de transición. Es la más próxima a la zona de penetración. Esta zona, aunque no ha sufrido la fusión, sí ha soportado altas temperaturas, que le han proporcionado un tratamiento térmico con posibles consecuencias desfavorables, provocando tensiones internas.

LA FATIGA EN UNIONES SOLDADAS

Las probetas utilizadas en el ensayo se han soldado en ángulo recto, con el tipo de unión a tope en T.

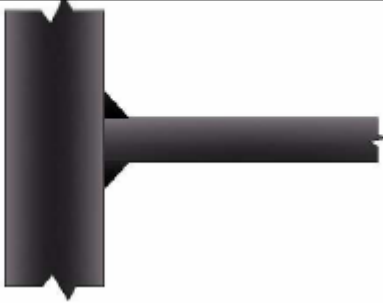
Tipo de soldadura	Tipo de unión
Soldadura en ángulo	

Figura Figura 4.2.2.1.6

Las uniones soldadas son una fuente importante de reducción de la resistencia a fatiga debido a las tensiones residuales, a posibles fallos de llenado, poros, defectos, y concentración de tensiones.

El objeto principal de la unión es el de asegurar la mejor continuidad de las piezas, continuidad que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión del esfuerzo. La transmisión de esfuerzos en las uniones se hace en muchas ocasiones de modo indirecto, ya que para pasar el esfuerzo de una pieza a otra se la obliga previamente a desviarse de su trayectoria normal. En el caso de soldadura a tope, la transmisión es directa.

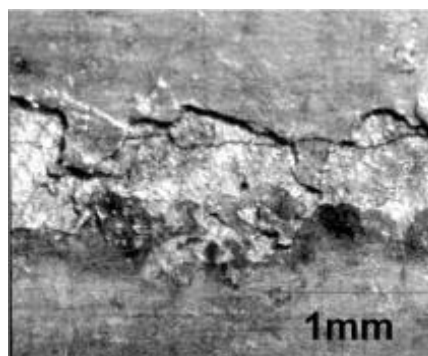




Figura 4.2.2.1.7 Aspecto de las fisuras por fatiga sobre la superficie correspondiente a la raíz de la soldadura.

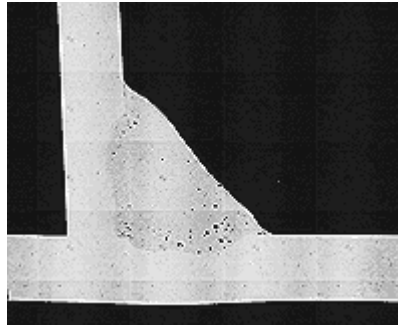


Figura 4.2.2.1.8 Porosidad en el material de soldadura

El fallo de las uniones soldadas en la mayor parte de los casos es causado por la generación de grietas en el cordón de soldadura debido a la porosidad de este y la concentración de tensiones.

4.2.2.2 EL ENSAYO DE FATIGA

Las propiedades de fatiga pueden determinarse a partir de ensayos de laboratorio. Para estudiar la influencia que ejercen los valores de las tensiones variables sobre el número de ciclos (N) que puede soportar un metal hasta la rotura se utiliza el diagrama de Wöhler.

Para cada material existen unos diagramas realizados de forma experimental: se mecanizan varias probetas del material a estudiar, se toma una y se le somete a una tensión cíclica del tipo adecuado en cada caso (alternativa simétrica, alternativa asimétrica, intermitente o pulsatoria), comenzando con una amplitud máxima relativamente grande (del orden de 2/3 de la resistencia a la tracción) y determinando el número de ciclos, N, hasta producir la rotura. Los resultados obtenidos se representan de una gráfica donde se sitúan en el eje de ordenadas la amplitud de la tensión a la que se somete la probeta y en abscisas el número de ciclos necesarios para producir la rotura.

Diagrama de Wöhler. Viendo este tipo de diagramas se aprecia que cuanto mayor es la amplitud de la tensión, menor es el número de ciclos que el material es capaz de soportar antes de romperse, hasta que llega a un valor de amplitud de tensión a la cual, sea cual sea el número de ciclos, la rotura se produce siempre al mismo valor. A este valor se le denomina límite de fatiga, o resistencia a la fatiga, y se define como el esfuerzo de mayor amplitud que puede aplicarse sin producir la rotura en un número infinito de ciclos, es decir, por debajo de este valor no ocurrirá la rotura a fatiga. En muchos aceros el límite de fatiga está comprendido entre el 35 y 60 por ciento de la resistencia a la tracción. La siguiente gráfica representa la amplitud de la tensión (S) frente al logaritmo del número de ciclos hasta la rotura por fatiga (N) para un material que presenta un límite de fatiga.

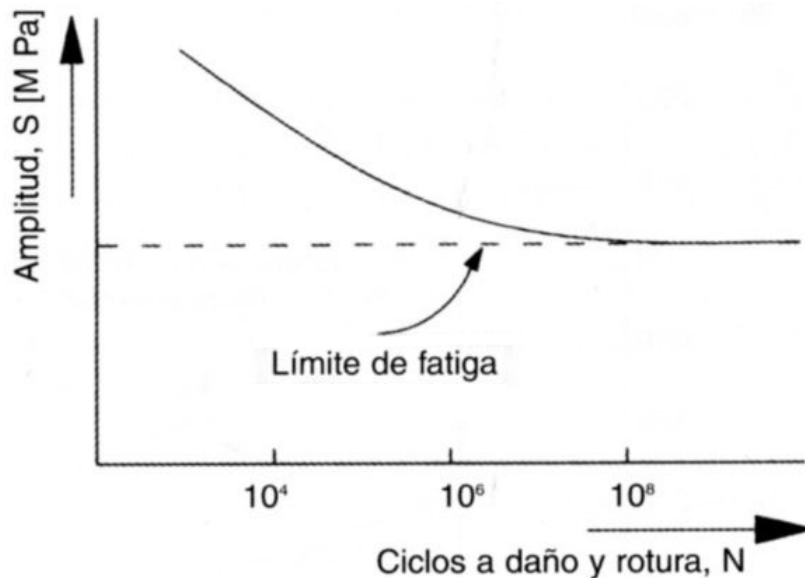


Figura 4.2.2.2.1

En algunos materiales la curva de Wöhler no llega a ser horizontal, sino que decrece progresivamente, de manera que no hay un límite de fatiga. Como el definido anteriormente. La curva sigue disminuyendo al aumentar N . En este caso la resistencia a la fatiga se determina por la amplitud de la tensión que produce la rotura después de un determinado número de ciclos. Este tipo de comportamiento se da en muchos metales o aleaciones no férreas, como aluminio, cobre o magnesio.

Para utilizar el diagrama de Wöhler se supone, por ejemplo, un elemento de máquina que esté sometido alternativamente a tracción y compresión, conociendo cual es la tensión máxima de tracción y mínima de compresión se calcula la amplitud de la tensión, con este valor se acude al diagrama de Wöhler correspondiente al material estudiado:

Si la amplitud de la carga es superior al límite de fatiga, mediante el diagrama de Wöhler se puede determinar el número de ciclos que puede soportar el elemento sin romperse, y por tanto saber cuándo se debe sustituir por otro nuevo y así evitar el fallo por rotura de fatiga.

Si la amplitud es inferior al límite de fatiga, teóricamente, no sucede el fallo por fatiga. En la siguiente figura aparece un ejemplo del diagrama de Wöhler. Para un acero de herramientas con una amplitud de 90.000 psi (1 psi = 6,8948 kPa) la duración a fatiga es de 100000 ciclos. Con amplitudes inferiores a 60000 psi no romperá a fatiga.

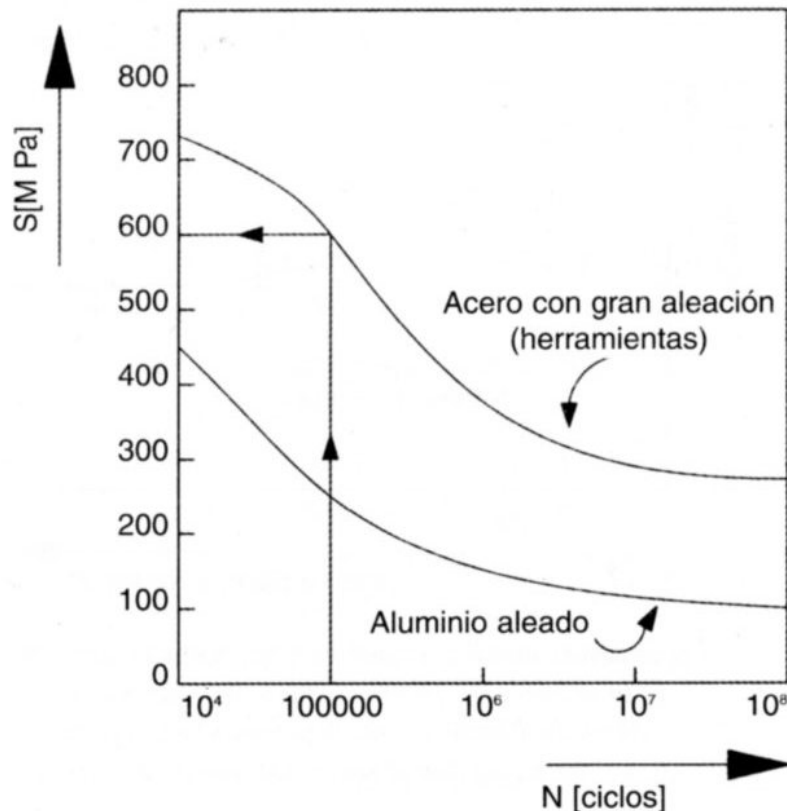


Figura 4.2.2.2.2

Factores que afectan a la fatiga

Los diagramas obtenidos son de gran utilidad pero suele existir una gran dispersión en los resultados de fatiga, consecuencia de la gran sensibilidad que tiene este valor a distintos factores. Los que más afectan a la rotura por fatiga son:

Concentración de tensiones. El límite de fatiga puede reducirse considerablemente si se introduce un concentrador de tensiones, como una entalla, agujero o un cambio brusco de sección. En elementos de máquinas existen elementos con formas que actúan como concentradores de tensiones como roscas, bulones o chaveteros, por lo que en la rotura a fatiga suelen iniciarse estas irregularidades geométricas.

Factores de diseño. Como cualquier discontinuidad geométrica puede producir una concentración de tensiones hay que evitar, en lo posible, estas irregularidades realizando modificaciones de diseño que eliminen los cambios bruscos de contorno o los cantos vivos.

Estado de la superficie. Puesto que la rotura por fatiga comienza por pequeñas deformaciones microscópicas en la superficie, si estas ya están presentes, como grietas de tratamientos, poros, marcas de mecanizado, zonas de corrosión, el límite de fatiga puede disminuir considerablemente. Para prevenir la rotura por fatiga, antes del tiempo estudiado, se debe asegurar que la superficie este sin ningún tipo de fallo.

Estado de la superficie. Puesto que la rotura por fatiga comienza por pequeñas deformaciones microscópicas en la superficie, si estas ya están presentes, como grietas de tratamientos, poros, marcas de mecanizado, zonas de corrosión, el límite de fatiga puede disminuir considerablemente. Para prevenir la rotura por fatiga, antes del tiempo estudiado, se debe asegurar que la superficie este sin ningún tipo de fallo.



Por el contrario, una superficie perfecta y con una elevada dureza va a conseguir elevar el límite de fatiga, ya que al aumentar la dureza dificulta el que se produzca la primera deformación inicial.

Las propiedades de fatiga son muy sensibles al estado superficial, como:

Rugosidad. El límite de fatiga mejora cuanto más pulida este la superficie. Un acabado basto produce la disminución en el límite de fatiga.

Endurecimiento superficial. Con un aumento de la dureza superficial se consigue mejorar el límite de fatiga. Tratamientos como la cementación o nitruración no solo consiguen un aumento de la dureza superficie, sino que puede aumentar el límite de fatiga.

Tensiones residuales superficiales. La formación de tensiones residuales compresivas en la superficie de un metal es, probablemente, el método más efectivo para mejorar el comportamiento a fatiga. Una de las formas más típicas de introducir esas fuerzas compresivas es mediante el proceso llamado granallado, que consiste en proyectar a alta velocidad partículas pequeñas y duras sobre la superficie a tratar. La deformación resultante induce tensiones de compresión en la superficie del metal.

Corrosión. La rotura que tiene lugar por la acción simultánea de una tensión cíclica y el atranque químico se denomina fatiga con corrosión. Los medios corrosivos tienen una influencia negativa y reducen la vida a fatiga.

Diagrama de Smith

Para cada valor de tensión media existe un valor distinto de la amplitud de tensión que puede soportar un material sin que rompa a fatiga (límite de fatiga).

El diagrama de Smith (llamado también diagrama de Goodman) relaciona el límite con la tensión media y el tipo de sollicitación. En abscisas se indica los valores de la tensión media, σ_m , y en ordenadas, el límite de fatiga.

La representación que se obtiene, es una curva donde la rama superior, ABCD, representa los valores de las tensiones máximas y la rama inferior, A'B'C'D, la de las tensiones mínimas. El punto D corresponde a una carga suficiente como para producir la rotura son que haya fatiga.

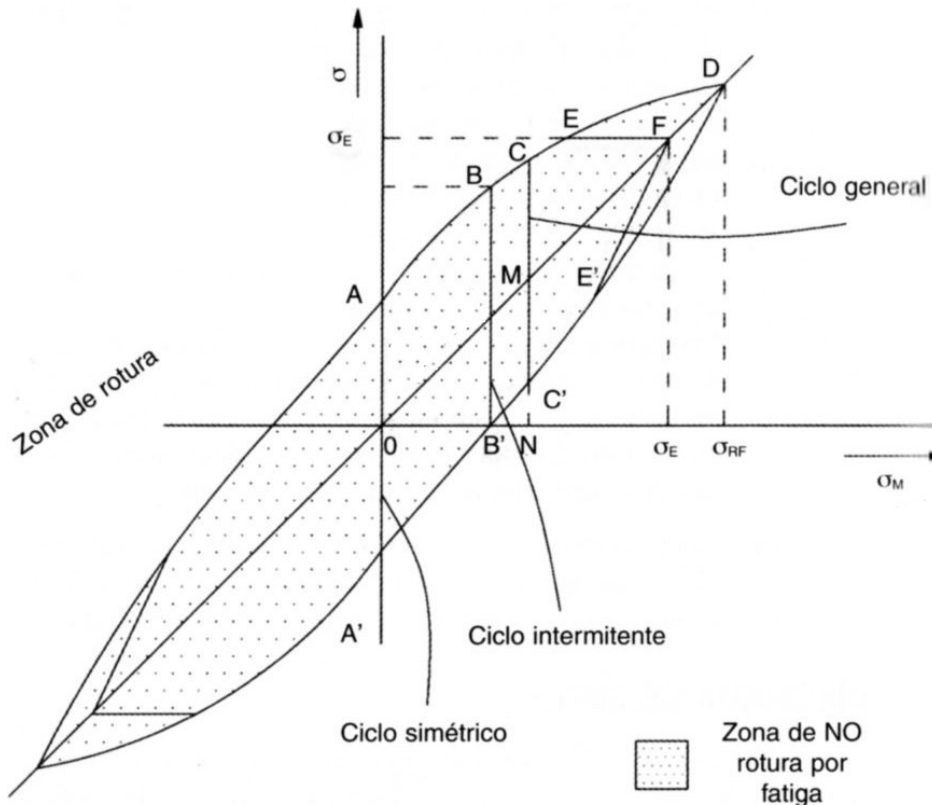


Figura 4.2.2.2.2

Interpretación del diagrama de Smith es la siguiente:

A medida que aumenta la tensión media, σ_m , disminuye el límite de fatiga.

Para $\sigma_m = 0$, los puntos A y A' del diagrama corresponden al límite de fatiga con cargas alternativas simétricas.

Para $\sigma_m = OB'$, los puntos B y B' del diagrama corresponden al límite de fatiga con cargas alternativas simétricas.

Para $\sigma_m < OB'$, los puntos de las ramas AB y A'B' del diagrama corresponden al límite de fatiga con cargas alternativas asimétricas.

Para $\sigma_m > OB'$, los puntos de las ramas BD y B'D del diagrama corresponden al límite de fatiga con cargas pulsatorias.

Los puntos interiores del diagrama ABDB'A' corresponden a la combinación de esfuerzos que no provocan la rotura. Los puntos exteriores corresponden a esfuerzos que provocan la rotura.

Tipos de ensayos de fatiga

Según sea el tipo de esfuerzo variable a que están sometidas las probetas los ensayos de fatiga pueden ser:

De tracción-compresión. Este ensayo puede realizarse en una máquina universal de ensayos sobre probetas de sección rectangular o cilíndrica. Consiste en someter a la probeta a esfuerzos axiales alternos de tracción-compresión.

De flexión plana. Se aplica a probetas de sección rectangular, empotradas por un extremo y sometidas por el otro a un momento flector alternativo. Al cambiar el



sentido del momento flector, los esfuerzos a que están sometidas las fibras de la probeta cambian de tracción a compresión.

De torsión. Se realiza sobre probetas de sección circular, empotradas por un extremo y sometidas por el otro a un momento de torsión alterno.

De flexión rotativa. Es el ensayo de fatiga más comúnmente utilizado. Se realiza, generalmente, sobre probetas cilíndricas empotradas por uno de los extremos en un mandril que las hace girar un cierto número de revoluciones y, por el otro extremo, actúa un momento flector constante. Cuando la probeta gira, los esfuerzos a que están sometidas sus fibras cambian cada media vuelta de tracción a compresión, es decir, las tensiones de tracción y compresión se originan cuando la probeta es flexionada y girada.

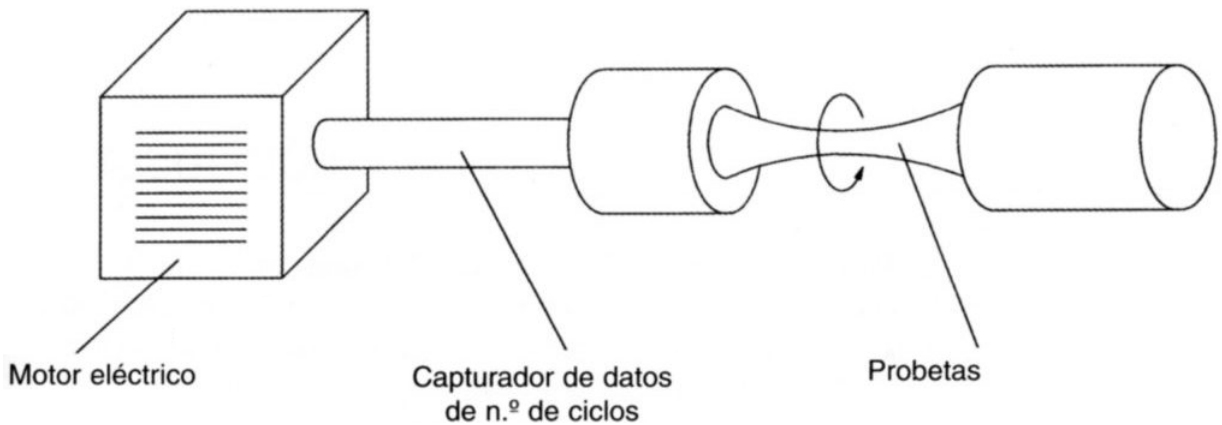


Figura 4.2.2.2.3

4.2.3. ANÁLISIS MODAL

4.2.3.1 INTRODUCCION TEÓRICA

Resonancia en máquinas

La resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural de la estructura de la máquina. Una frecuencia natural es una frecuencia a la que una estructura vibrará si uno la desvía y después la suelta. Una estructura típica tendrá muchas frecuencias naturales. Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños muy rápidamente.



Figura 4.2.3.1.1

En una máquina que produce un espectro ancho de energía de vibración, la resonancia se podrá ver en el espectro, como un pico constante aunque varíe la velocidad de la máquina. El pico puede ser agudo o puede ser ancho, dependiendo de la cantidad de amortiguación que tenga la estructura en la frecuencia en cuestión.

Para determinar si una máquina tiene resonancias prominentes se puede llevar a cabo una o varias pruebas con el fin de encontrarlas:

La prueba del Impacto. Se impacta a la máquina con una masa, mientras que se graban los datos. Si hay una resonancia, la vibración de la máquina ocurrirá a la frecuencia natural.



El arranque y rodamiento libre. Se prende y se apaga la máquina, mientras que se graban datos de vibración y de tacómetro. La forma de onda de tiempo indicará un máximo, cuando las RPM igualan las frecuencias naturales.

La prueba de la velocidad variable. En una máquina cuya velocidad se puede variar en un rango ancho, se varía la velocidad, mientras que se están grabando datos de vibración y de tacómetro. La interpretación de los datos se hace como en la prueba anterior.

Curva de respuesta idealizada de resonancia mecánica

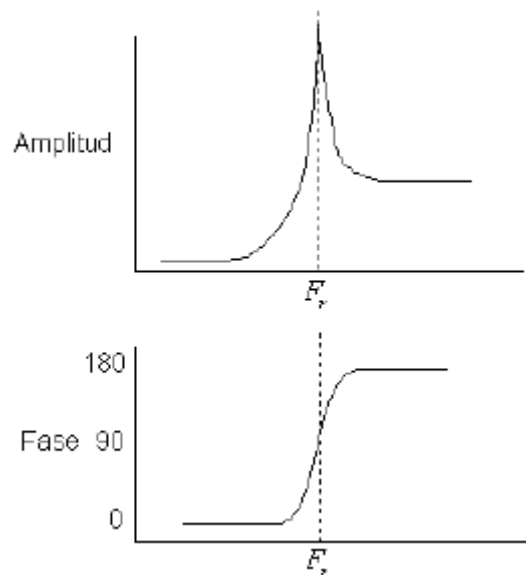


Figura 4.2.3.1.2

En el comportamiento de un sistema resonante cuando se le somete a una fuerza de excitación si la frecuencia forzada es más baja que la frecuencia natural, a la izquierda del pico, el sistema se comporta como un resorte y el desplazamiento es proporcional a la fuerza. En esta área, controlada por el resorte, el sistema se comporta reaccionando con un movimiento más amplio cuando se le aplica una fuerza más grande, y el movimiento está en fase con la fuerza.

Si la frecuencia forzada es más alta que la frecuencia natural, a la derecha del pico, la masa es el elemento que controla. El sistema parece una masa a la que se le aplica una fuerza, la aceleración es proporcional a la fuerza aplicada y el desplazamiento es relativamente constante con la frecuencia que cambia. El desplazamiento está fuera de fase con la fuerza excitadora. Cuando se empuja al sistema, este se mueve hacia el que está empujando y viceversa.

A la resonancia misma, el sistema se comporta totalmente diferente en presencia de una fuerza aplicada. La fuerza solamente ve la amortiguación o la fricción en el sistema. No se puede aplicar mucha fuerza al sistema en la frecuencia de resonancia, ya que la amplitud de la vibración se puede incrementar hasta valores muy altos. La amortiguación controla el movimiento de un sistema resonante a su frecuencia natural.



El ángulo de fase entre la vibración de la fuente de excitación y la respuesta de la estructura siempre es de 90 grados a la frecuencia natural.

En el caso de rotores largos, como en turbinas, las frecuencias naturales se llaman "frecuencias críticas" o "velocidades críticas" y se debe cuidar que estas máquinas no operen a velocidades donde $1x$ o $2x$ corresponde a esas frecuencias críticas.

Ejemplo de colapso de una estructura resonante, El Puente de Tacoma Narrows

Es un puente colgante de Estados Unidos de 1600 metros de longitud con una distancia entre soportes de 850 m. Se derrumbó en 1940 a causa de su resonancia estructural.



Figura 4.2.3.1.3

El puente estaba sólidamente construido, con vigas de acero al carbono ancladas en grandes bloques de hormigón. Al poco tiempo de haber concluido la construcción se descubrió que en el puente se producía resonancia, se deformaba y ondulaba de forma peligrosa aún en condiciones de viento relativamente bajas para la zona.

Esta resonancia era de tipo longitudinal, por lo que el puente se deformaba en dirección longitudinal, con la calzada elevándose y descendiendo alternativamente en ciertas zonas. La mitad de la luz principal se elevaba mientras que la otra porción descendía.



Figura 4.2.3.1.4 Modo longitudinal, Flexión de la calzada

El fallo del puente ocurrió a causa de un modo de torsión, con vientos de apenas 65 km/hora, cuando el lado derecho de la carretera se deforma hacia abajo, el lado izquierdo se eleva, y viceversa, con el eje central de la carretera permaneciendo quieto. Esta vibración fue inducida por flameo aero-elástico. El flameo se origina cuando una perturbación de torsión aumenta el ángulo de ataque del puente (o sea el ángulo entre el viento y el puente). La estructura responde aumentando la deformación. El ángulo de ataque se incrementa hasta el punto en que se produce la pérdida de sustentación, y el puente comienza a deformarse en la dirección opuesta. En el caso del puente de Tacoma Narrows, este modo estaba amortiguado en forma negativa (o lo que es lo mismo tenía realimentación positiva), lo cual significa que la amplitud de la oscilación aumentaba con cada ciclo porque la energía aportada por el viento excedía la que se disipaba en la flexión de la estructura.



Figura 4.2.3.1.5 Modo de Torsión de la calzada

Finalmente, la amplitud del movimiento aumento hasta que se excedió la resistencia de una parte vital, en este caso los cables de suspensión. Una vez que varios de los cables fallaron, el peso de la cubierta se transfirió a los cables adyacentes, que no soportaron el peso, y se rompieron en sucesión hasta que casi toda la cubierta central del puente cayó al agua.



Figura 4.2.3.1.6 Fallo del puente

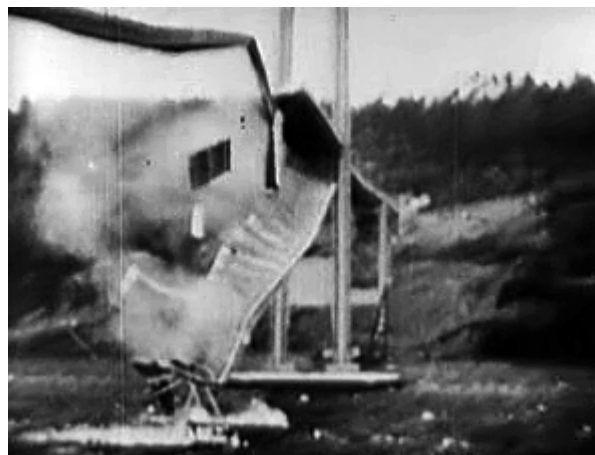


Figura 4.2.3.1.2 Derrumbamiento

Finalmente, la amplitud del movimiento aumento hasta que se excedió la resistencia de una parte vital, en este caso los cables de suspensión. Una vez que varios de los cables fallaron, el peso de la cubierta se transfirió a los cables adyacentes, que no soportaron el peso, y se rompieron en sucesión hasta que casi toda la cubierta central del puente cayó al agua.

4.2.3.2 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO MODAL EXPERIMENTAL

El ruido y los problemas de vibración están relacionados con fenómenos de resonancia, causados por las fuerzas excitadoras de misma frecuencia que los modos de vibración. Cuando los modos de vibración se encuentran dentro del rango de frecuencias de las fuerzas de funcionamiento se presentan serios problemas. Una propiedad importante de modos es que cualquier respuesta dinámica forzada o libre de una estructura puede ser reducida a un discreto conjunto de los modos.

Los parámetros modales son:

- La frecuencia modal
- Amortiguamiento modal
- Forma modal

Los parámetros modales de todos los modos, dentro de la frecuencia rango de interés, constituyen una descripción dinámica completa de la estructura. De ahí que los modos de vibración representan las propiedades inherentes dinámicas de una estructura libre (Una estructura sobre la que no existen fuerzas que actúan). El análisis modal es el proceso de determinación de todos los parámetros de los modos de vibración, suficiente para formular un modelo matemático dinámico. El análisis modal puede llevarse a cabo a través de técnicas analíticas o experimentales.

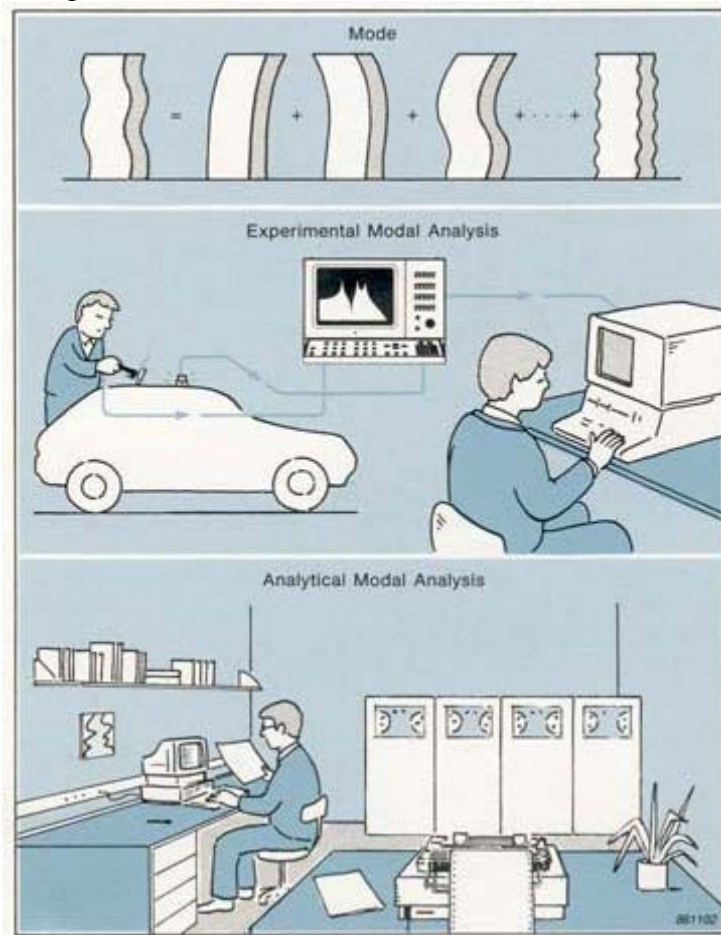


Figura 4.2.3.2.1

Modelos matemáticos dinámicos

Los modelos matemáticos son necesarios ayudan a comprender y comunicar cómo se comportan las estructuras bajo cargas dinámicas, simular o predecir la respuesta a las fuerzas externas, y a simular cambios en las características dinámicas debido a modificaciones físicas. No son modelos de la estructura misma. Son modelos simplificados que simulan el comportamiento de su estructura, limitada por un conjunto de supuestos y condiciones de contorno. Los modelos matemáticos analíticos se basan el cálculo en las masas y la rigidez de la estructura. Estos cálculos se hacen generalmente por el Método de Elementos Finitos (MEF), y el modelo produce un enorme conjunto de ecuaciones diferenciales. Los modelos experimentales matemáticos se pueden construir a partir de datos modales medidos, que representan el sistema bajo las condiciones de medición. El modelo consiste normalmente en un conjunto de ecuaciones diferenciales independientes, uno para cada modo en la medición. Este modelo se refiere a menudo como el "Modelo modal".

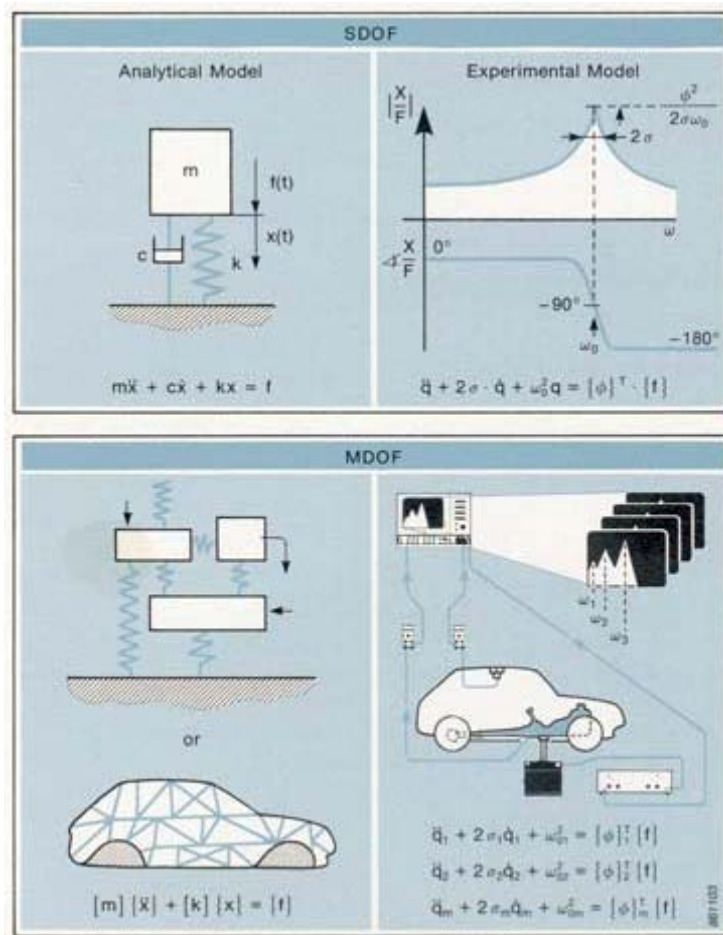


Figura 4.2.3.2.2

Aplicación de los datos modales

El resultado de una prueba modal experimental puede ser de cualquier grado de

Análisis de uniones soldadas de componentes de semirremolque para la predicción de fallo frente a fatiga



sofisticación que van desde medir una sola frecuencia de respuesta (FRF) que muestra debilidad de las condiciones estructurales dinámicas en modos de transporte de frecuencias, a la creación de un conciso modelo matemático modal dinámico con los datos de forma modal y la animación posterior de la formas de los modos.

La gama de aplicaciones para los datos modales es muy amplia e incluye:

- Control de las frecuencias modales
- Las descripciones cualitativas de las formas modales, como una ayuda para entender el comportamiento estructural dinámico para la solución de problemas
- Verificar y mejorar los modelos analíticos
- Realizar simulaciones por ordenador (basado en el modelo modal) para la solución de problemas de desarrollo de prototipos, o avanzado, donde tenemos que predecir la respuesta a excitaciones asumidos, y comprobar el comportamiento dinámico, el cambio en las propiedades dinámicas debido a las modificaciones físicas, como la adición de carga, o la rigidez, predecir las modificaciones necesarias físicas requeridas para obtener una propiedad dinámica, predecir el comportamiento combinado cuando dos o más estructuras están acoplados entre sí como una unidad, etc.

La verificación de un modelo matemático de análisis

Primero se crea un modelo matemático de análisis con las fuerzas de diseño. Los resultados muestran su comportamiento. Después de que el modelo real está construido, el diseño debe ser demostrado. El modelo matemático contiene cierta inercia y rigidez ideal, que no pueden ser medidas directamente. Los parámetros modales del modelo tanto analítico como experimental son directamente comparables. Si los resultados no son satisfactorios, el modelo analítico se ajusta y se refina hasta que sean correctos. Finalmente, se repite la analítica de cálculos con el modelo modificado, y la respuesta a las fuerzas se puede predecir.

Excitación

Para las mediciones modales la estructura debe ser excitada por una fuerza.

Si el propósito de la prueba es sólo medir las frecuencias naturales, la precisión requerida es mucho menor que cuando las mediciones son para formar la base para un modelo matemático. El costo de la precisión adicional reside en el tiempo tomado para las mediciones, y en la instrumentación.

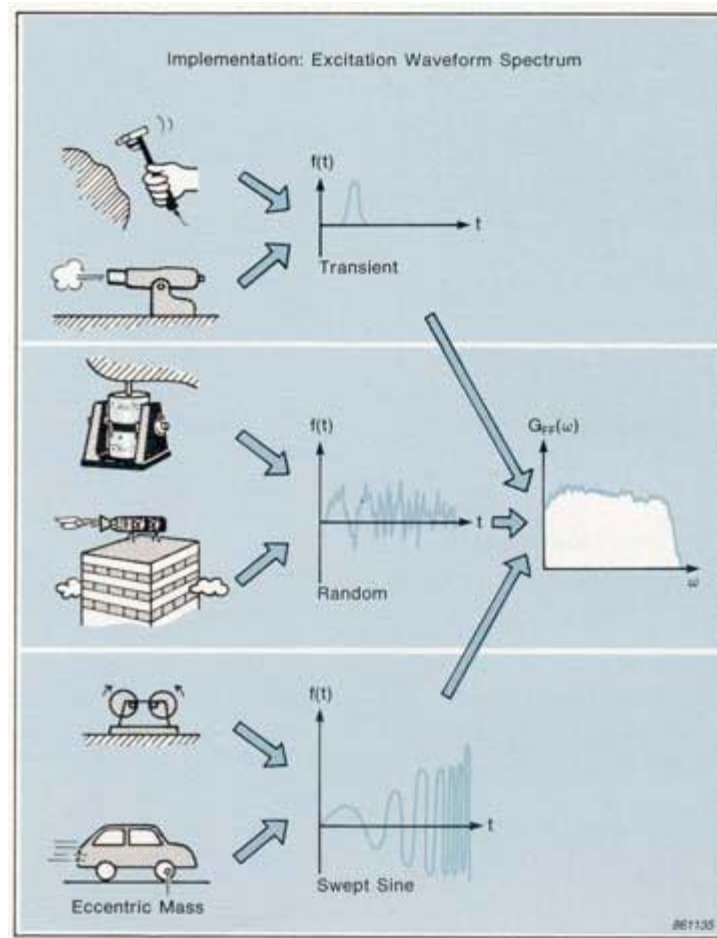


Figura 4.2.3.2.3

El **espectro de control** limita la excitación a la gama de frecuencias de interés. Si la estructura es excitada sólo en la gama de frecuencias de interés, el rango dinámico de la medición se minimiza. Esto mejora la señal disminuyendo el ruido, y limpia los datos.

El **factor de cresta** describe la "peakiness" de la señal. Se define como la relación entre el pico y la desviación (RMS) en la señal. Un factor de cresta alta en la forma de onda de excitación tiene dos desventajas:

- La relación señal-ruido se reduce, y parte de la señal se pierde en el ruido existente.
- Las fuerzas de pico elevadas pueden provocar un comportamiento no lineal en la estructura.

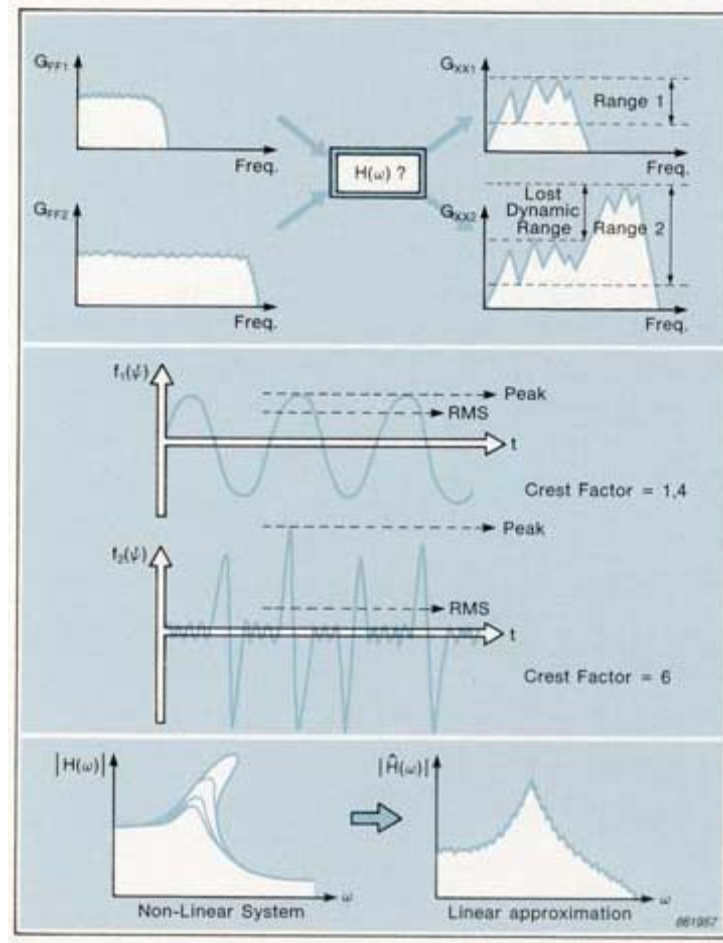


Figura 4.2.3.2.4

Aplicación de la excitación

Las fuerzas de excitación pueden ser generadas por muchos tipos diferentes de dispositivos.

Ejemplos:

- Los vibradores electromagnéticos
- Los sacudidores electrohidráulicos
- Las masas excéntricas rotativas
- Los dispositivos tales como cohetes o armas de fuego
- Martillos
- Los impactadores de gran péndulo
- Los cables de suspensión para la producción de "snap-back"

Medida de fuerza

La fuerza de excitación se mide normalmente mediante el uso de un piezoeléctrico transductor de fuerza, en el que una fracción de la fuerza es transmitida a través de un elemento piezoeléctrico.



Las ventajas del transductor de fuerza piezoeléctrico son:

- Pequeño tamaño y masa, producción de poca masa adicional / amortiguación / rigidez
- Linealidad extrema
- Amplio rango dinámico (120 dB)
- Amplio rango de frecuencia

La fuerza total generada por el excitador tiene que atravesar todas las partes móviles: La bobina de excitación / pistón, el mecanismo de conexión, y la estructura. La fuerza de la estructura sólo se puede medir si el transductor de fuerza está montado directamente sobre ella, o tan cerca como sea posible.

Excitador adjunto

El excitador debe ser fijado a la estructura de modo que la fuerza de excitación actúa sólo en el punto deseado, y en la dirección deseada. La estructura debe ser libre para vibrar en los otros cinco grados de libertad en ese punto, sin restricciones de giro o desplazamiento.

Una técnica de un buen agarre, para conectar el excitador de el transductor de fuerza, es con una delgada varilla de empuje o "agujón". Este tipo de agarre tiene una elevada rigidez axial, pero baja rigidez transversal y de rotación, dando un buen control de la dirección de la excitación. Un beneficio adicional es que el agujón actúa como un fusible mecánico entre la estructura y el excitador, protege a ambos de las sobrecargas destructivas del transductor.

Impacto de excitación con martillo

La excitación más popular técnica utilizada para el análisis modal es la de impacto, o excitación con martillo. La forma de onda producida por un impacto es transitorio (de corta duración) de transferencia de energía. El espectro es continuo, tiene una estructura periódica con frecuencias en N / T intervalos, donde n es un número entero y T es la duración efectiva de la onda transitoria. El rango de la frecuencia útil es de 0 Hz a una frecuencia F , en cuyo punto la magnitud del espectro ha decaído de 10 a 20 dB. La duración, y por lo tanto la forma del espectro de un impacto está determinada por la masa y rigidez tanto del impactador como de la estructura. Para un martillo relativamente pequeño utilizado en una estructura dura, la rigidez de la punta martillo determina el espectro. La punta de martillo actúa como un filtro mecánico. La selección de la rigidez de la punta permite el elegir la frecuencia de corte.

Los martillos de impacto se pueden construir mediante la adición de un transductor de fuerza a un martillo, y un elemento de rigidez de control al final del transductor. La fuerza es igual a la masa total del impactador multiplicada por la aceleración durante el impacto. Los martillos pueden ser construidos con pesos que van desde unos pocos gramos hasta varias toneladas, y que cubren el rango de frecuencias 0 a 5000 Hz, con el más



pequeño, y 0 - 10 Hz con el más grande.

Las ventajas de las pruebas de impacto con martillo son:

- Velocidad - sólo son necesarios unos pocos promedios
- No hay accesorios obligatorios.
- No hay carga variable de la masa de la estructura. Este es una particular ventaja con estructuras ligeras, ya que cambiando la carga de la masa de punto a punto puede provocar cambios en las frecuencias modales de una medición a otra.
- Es portátil y muy adecuado para las mediciones en el campo.
- Es relativamente barato.

Sin embargo, hay algunas desventajas a tener en cuenta:

- El factor de cresta alta hace la técnica no apta para sistemas no lineales.
- Para aplicar la energía suficiente para una gran estructura, es necesario un pico de fuerza muy alto, y la estructura puede dañarse localmente.
- La señal es altamente determinista, y el nivel de fuerza sólo varía un poco entre los niveles de sobrecarga y de baja carga.
- El espectro sólo se puede controlar a la frecuencia superior límite, lo que significa que la técnica no es adecuada para el análisis de zoom.

5. ENSAYO DE DUREZA

5.1 INTRODUCCION

Se realizaron ensayos complementarios en el laboratorio de materiales de probetas de materiales s235 y dx355, según norma UNE EN ISO 6507. Estos ensayos fueron previos a la obtención de las probetas utilizadas en este proyecto. Se hicieron para obtener una resistencia del material mas aproximada a la realidad de la que da el fabricante.



Figura 5.1.1 Fotografía de una probeta ensayada

Descripción del ensayo

Se tenían a disposición 5 probetas para ensayar (Figura 4.2.1.2a y Figura 4.2.1.2b). Todas se ensayaron con un durómetro vickers HV1 de carga 1Kn (Figura 4.2.1.2c). En primer lugar se prepararon las superficies de las probetas puliéndolas con una lija de grano fino. Posteriormente se sujetaban en las mordazas del microdurómetro, se observaba a través del microscopio con una cámara digital de 40 aumentos para medir las diagonales de las huellas en micrómetros. Se hacían tres pasadas por probeta. De cada huella se obtiene la media de las dos diagonales.

5.2 PROCESO DE ENSAYO

Paso 1.-En primer lugar se deben preparar las superficies de las probetas, mediante un pulido con una lija de grano fino, se pule la superficie hasta que se aprecie como un espejo, así se eliminan las imperfecciones superficiales.

Las probetas a ensayar estaban formadas por los siguientes materiales (Figura 4.2.1.2a y Figura 4.2.1.2b) :

	Material 1	Material 2
Probeta nº2	S235JR	S235JR
Probeta nº3	DX355MCD	DX355MCD
Probeta nº4	DX355MCD	DX355MCD
Probeta nº5	DX355MCD	S235JR



Probeta nº6	S235JR	DX355MCD
-------------	--------	----------



Figura 5.2.1



Figura 5.2.2



Paso 2.- Posteriormente se limpia la superficie con un paño y se introduce en la mordaza del microdurometro (*Matsuzawa MXT50*, Figura 5.3.1).

Paso 3.- Se centra la probeta y se regula el cero, el microdurómetro posee un micrómetro que facilita las mediciones, el carro posee una holgura de 25mm y se medirá una longitud en cada probeta de 20mm por pasada. Por esta razón deben hacerse las pasadas en dos etapas, primero la parte izquierda de la probeta y luego la derecha o viceversa. Se ejecutan tres pasadas en cada probeta, la primera pasada se realiza en medio de la probeta, y las otras dos desplazadas 5 mm y -5mm en dirección Y (ver Figura 4.2.1.2d). En total se realizan 6 pasadas por probeta. Las mediciones deben ser precisas y distar entre si 0.5 mm, no deben estar muy juntas porque ello afectaría al resultado de la medición.

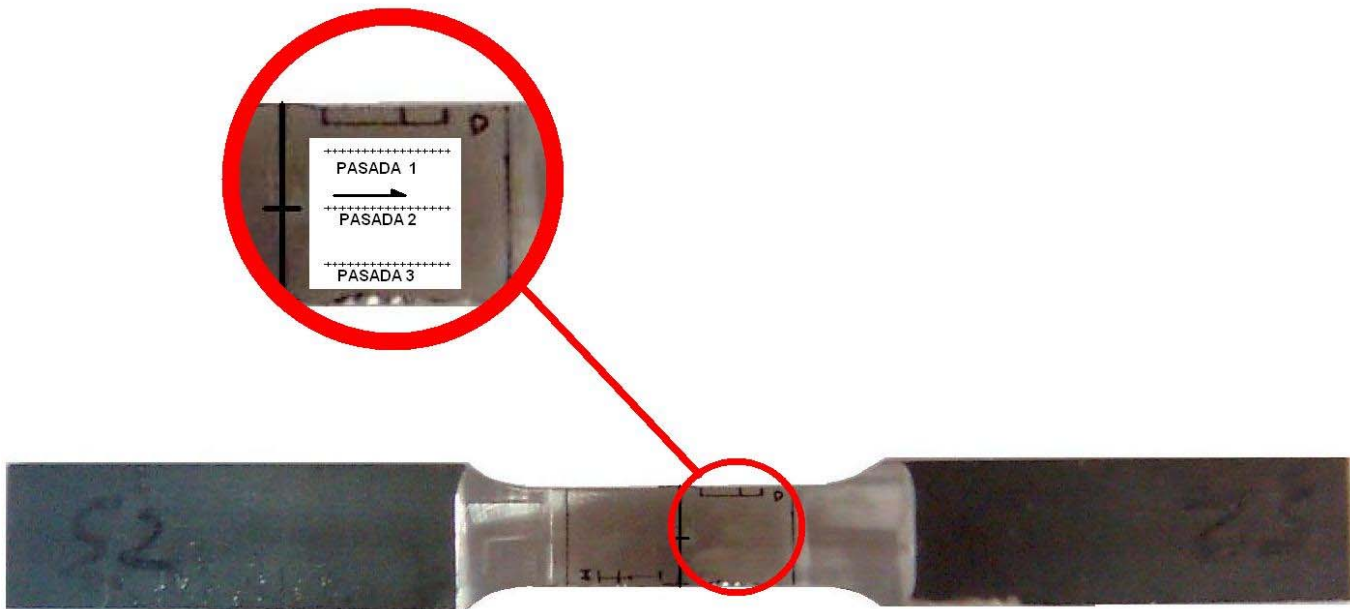


Figura 5.2.3

Paso 4.- Se ajusta la carga a 1kN y se selecciona la opción HV1 en el microdurometro, se eleva el carro (mordazas) que sujeta la probeta hasta que permita el enfoque de la probeta con la lupa de 40 aumentos, la elevación se realiza con la manivela situada a la derecha del microdurómetro, Una vez elegida la zona para hacer el ensayo, se baja el carro (con dos vueltas a la manivela es suficiente) se cambia el cabezal de la lupa a la punta de diamante, se gira con la mano (Figura 5.2.4). Y se sube el carro (dos vueltas a la manivela en sentido contrario) .

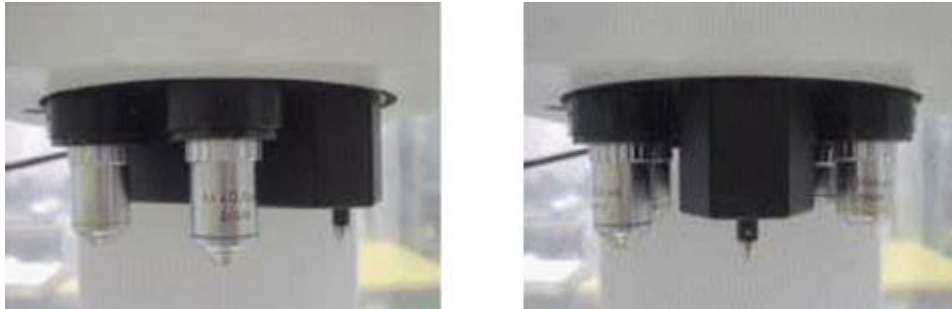


Figura 5.2.4

Paso 5.- Se ejecuta el ensayo, se presiona el botón “START” y el microdurómetro baja automáticamente la punta de diamante, que deja la huella en la probeta.

Paso 6.- Se procede a la medición de la huella, para ello se cambia el cabezal de la punta de diamante al de la lupa de 40 aumentos (bajando y subiendo el cabezal como en la acción anterior) y se procede a medir la huella con una reglilla graduada de lente, la medida se hace en micras, 1 micra = $10E-3$ mm. Se miden las dos diagonales y se hace la media.

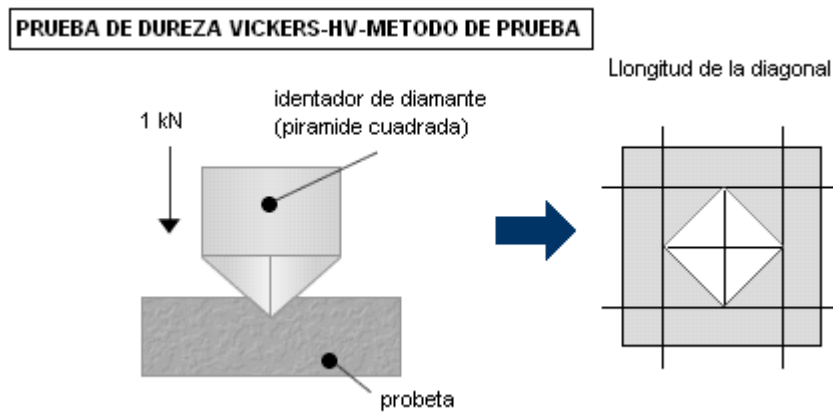


Figura 5.2.5

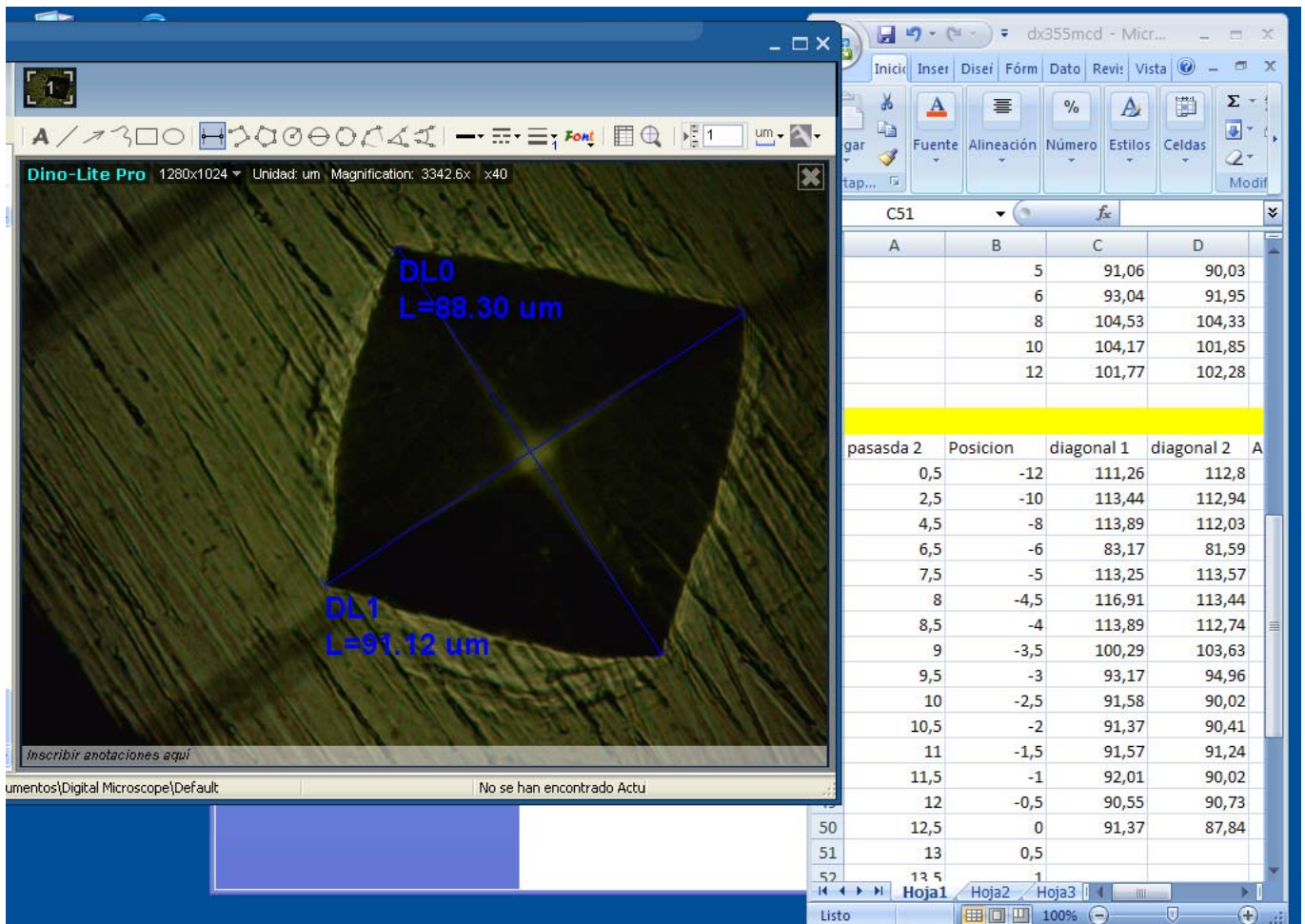


Figura 5.2.6

Paso 7.- El resultado se apunta en una tabla Excel en la cual se ha introducido la fórmula para obtener la dureza Vickers directamente. (Figura 5.2.6)

$$HV = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2}$$

1,8544 = constante de la fórmula

F = Fuerza de ensayo en kp

d = semisuma del diámetro de las dos diagonales de las huellas en mm



Paso 8.- Se repite el proceso hasta finalizar las pasadas

5.3 EQUIPO

Se utilizó el microdurómetro *Matsuzawa MXT50* (Figura 5.3.1), junto con una cámara digital conectada este. De las imágenes se midió la longitud de la huella mediante el software de medición DinoCapture 2.0 (Figura 5.3.2)

Microdurómetro *Matsuzawa MXT50*

Cámara digital de 40 aumentos

Software:

Microsoft Office Excel

DinoCapture 2.0



Figura 5.3.1 Matsuzawa MXT50

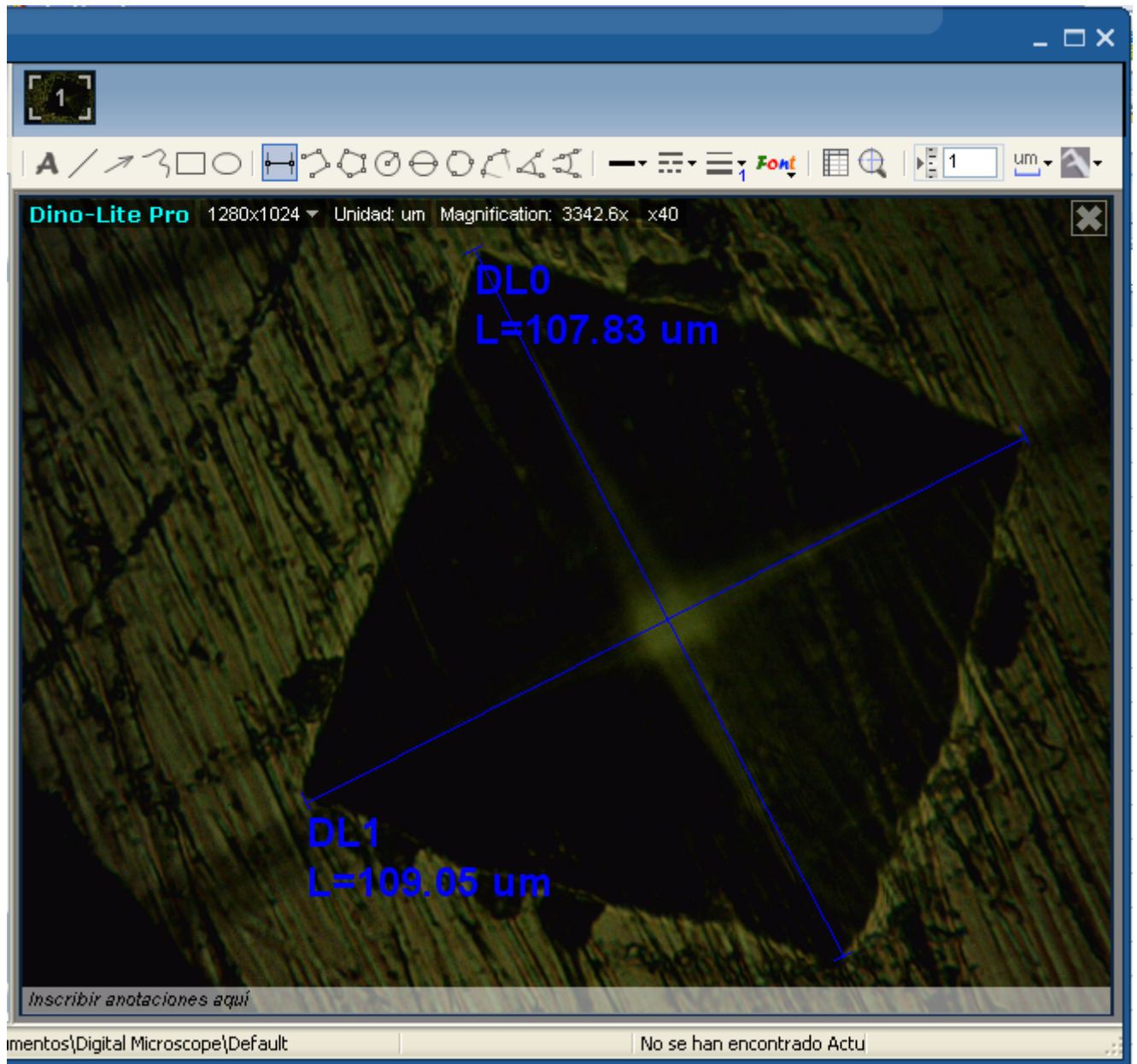


Figura 5.3.2 DinoCapture 2.0



5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO

Datos del fabricante

Para estos materiales los fabricantes nos dan una resistencia de:

Mechanical properties of grade S235JR (1.0038)		
Nominal thickness (mm)	3 - 100	100 - 125
Rm -Tensile strength (MPa)	360-510	350-500

Mechanical properties of grade S355J2 (1.0577)		
Nominal thickness (mm)	3 - 100	100 - 125
Rm -Tensile strength (MPa)	470-630	450-600

Figura 5.4.1

Material	Espesor	Resistencia a tracción
S235JR	10 mm	360-510 MPa
DX355MCD	4.5 mm	470-630 MPa



Material S235JR

Media de la dureza Vickers HV1:

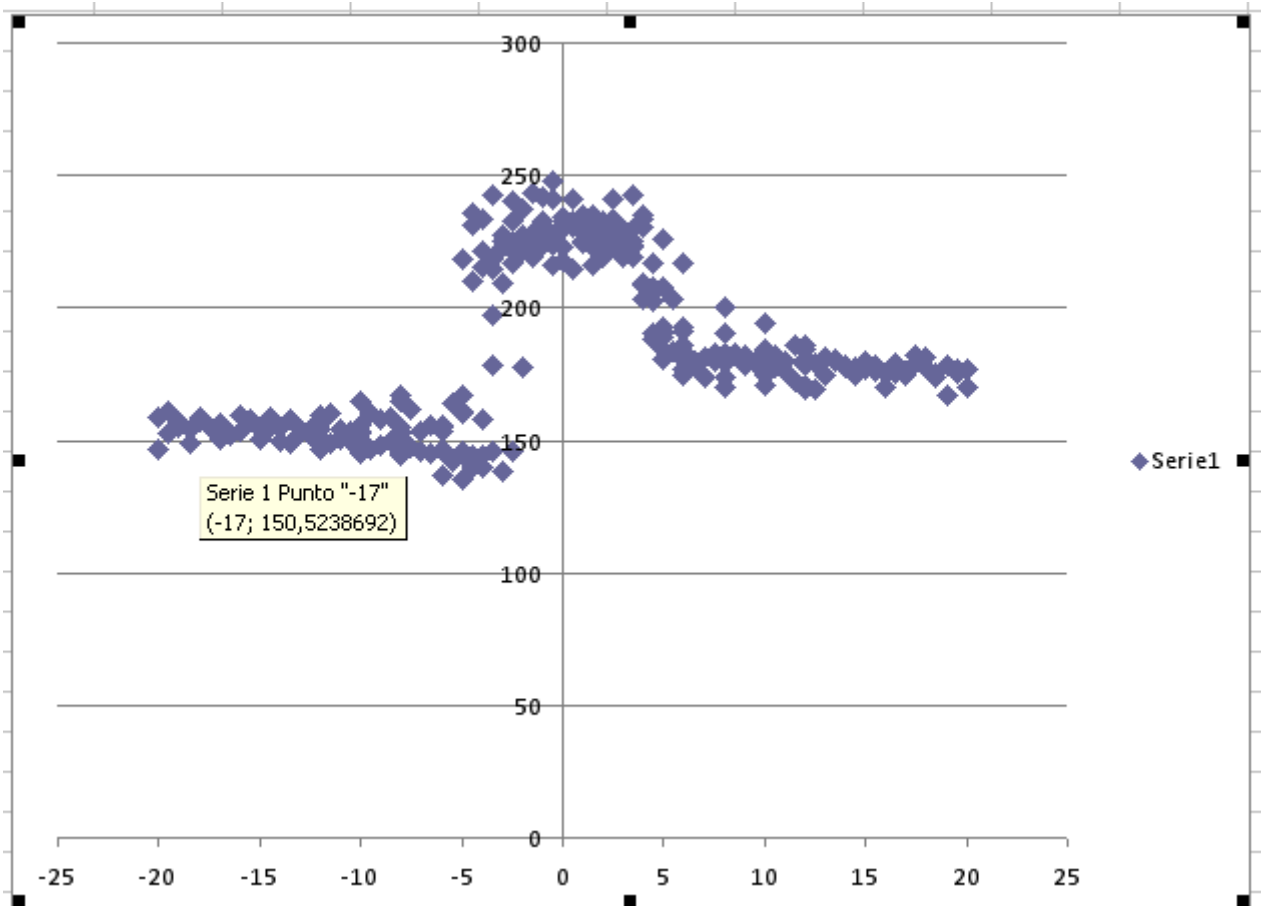


Figura 5.4.2

La dureza HV1 aproximada que se obtiene de las medias de las medidas es de 150 HV. En la Tabla de conversión (*Figura 5.4.7 Tabla de conversión Dureza Vickers- Resistencia a tracción*, Columna 1 HV30), se observa que para esa dureza el material posee una resistencia de 500 MPa, que está dentro del rango de valores que da el fabricante (360-510 MPa).



Vickers hardness HV 30	Brinell hardness HB 30	Rockwell hardness ²⁾		Tensile strength σ_B N/mm ²
		HRB	HRC	
150	150	82.2	-	500

Figura 5.4.3

Material DX355MCD

Media de la dureza Vickers HV1:

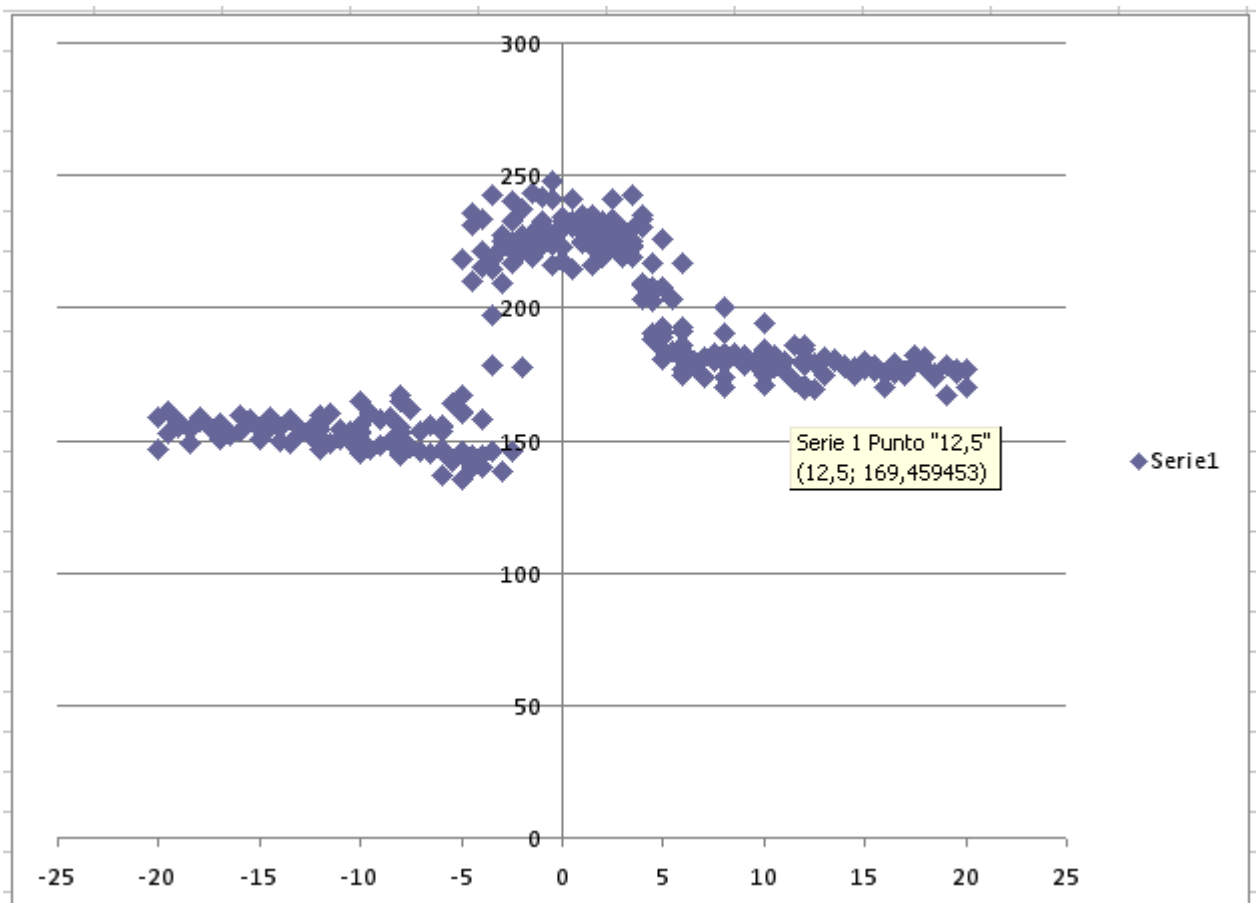


Figura 5.4.4

Se obtiene una dureza aproximada de 170 HV. En la Tabla de conversión (Figura 5.4.7 Tabla de conversión Dureza Vickers- Resistencia a tracción, Columna 1 HV30), el material posee una resistencia de 570 MPa, que esta dentro del rango de valores que da el fabricante (470-630 MPa).



Vickers hardness HV 30	Brinell hardness HB 30	Rockwell hardness ²⁾		Tensile strength σ_B N/mm ²
		HRB	HRC	
170	170	88.2	-	570

Figura 5.4.5

Material cordón de soldadura

Media de la dureza Vickers HV1:

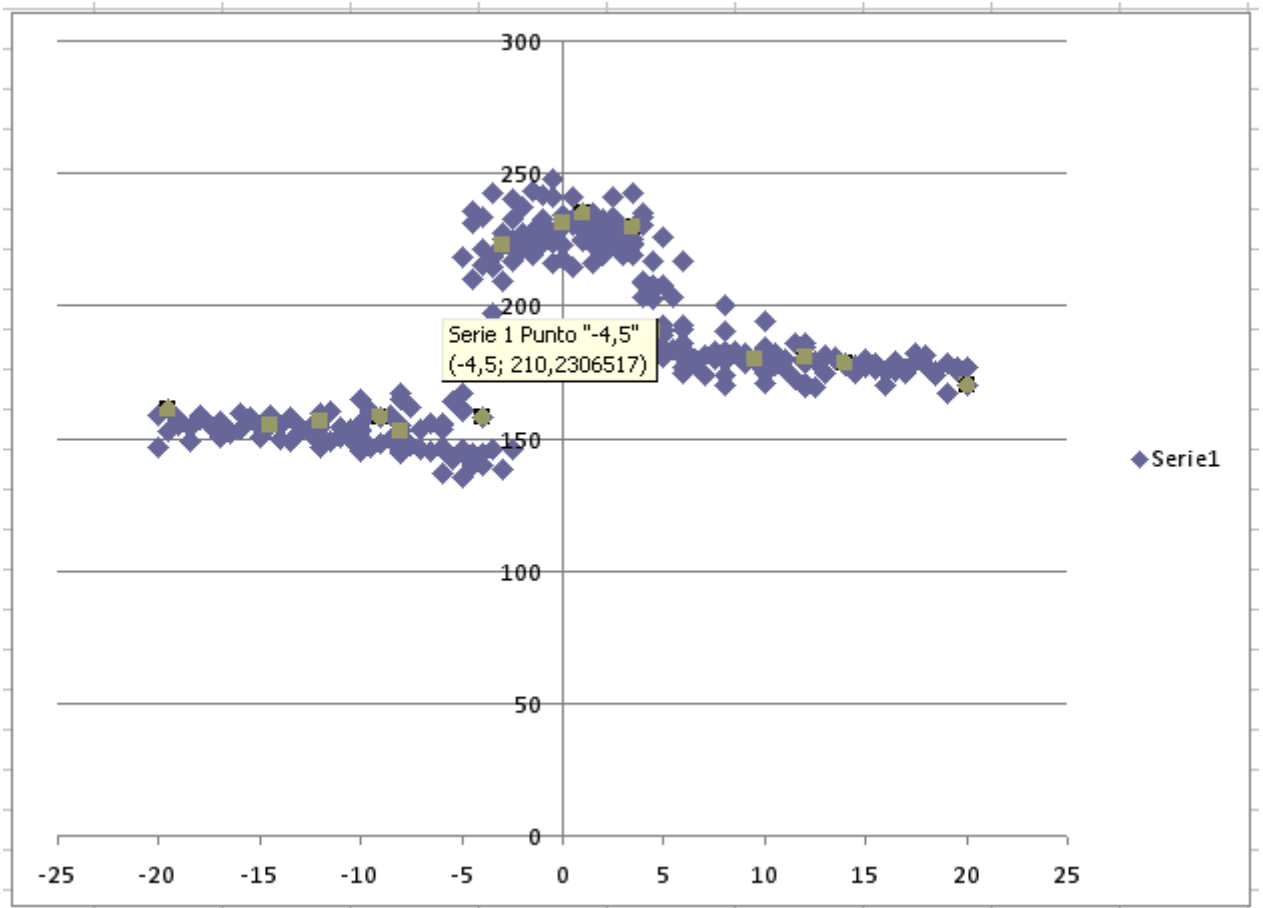


Figura 5.4.6



Se obtiene una dureza aproximada de 210 HV. En la Tabla de conversión (*Figura 5.4.7 Tabla de conversión Dureza Vickers- Resistencia a tracción, Columna 1 HV30*), el material posee una resistencia de 710 MPa.



Comparative table of Vickers, Brinell and Rockwell hardness and tensile strength ¹⁾
 ~ DIN 50150

Vickers hardness HV 30	Brinell hardness HB 30	Rockwell hardness ²⁾		Tensile strength σ_B N/mm ²
		HRB	HRC	
80	80	36.4	-	270
85	85	42.4	-	290
90	90	47.4	-	310
95	95	52.0	-	320
100	100	56.4	-	340
105	105	60.0	-	360
110	110	63.4	-	380
115	115	66.4	-	390
120	120	69.4	-	410
125	125	72.0	-	420
130	130	74.4	-	440
135	135	76.4	-	460
140	140	78.4	-	470
145	145	80.4	-	490
150	150	82.2	-	500
155	155	83.8	-	520
160	160	85.4	-	540
165	165	86.8	-	550
170	170	88.2	-	570
175	175	89.6	-	590
180	180	90.8	-	600
185	185	91.8	-	620
190	190	93.0	-	640
195	195	94.0	-	660
200	200	95.0	-	670
205	205	95.8	-	680
210	210	96.6	-	710
215	215	97.6	-	720
220	220	98.2	-	730
225	225	99.0	-	750
230	230	-	19.2	760
235	235	-	20.2	780
240	240	-	21.2	800
245	245	-	22.1	820
250	250	-	23.0	830
255	255	-	23.8	850
260	260	-	24.6	870
265	265	-	25.4	880
270	270	-	26.2	900
275	275	-	26.9	920
280	280	-	27.6	940
285	285	-	28.3	950
290	290	-	29.0	970
295	295	-	29.6	990
300	300	-	30.3	1010
310	310	-	31.5	1040
320	320	-	32.7	1080
330	330	-	33.8	1110
340	340	-	34.9	1140

Vickers hardness HV 30	Brinell hardness HB 30	Rockwell hardness ²⁾		Tensile strength σ_B N/mm ²
		HRB	HRC	
350	350	-	36.0	1170
360	359	-	37.0	1200
370	368	-	38.0	1230
380	376	-	38.9	1260
390	385	-	39.8	1290
400	392	-	40.7	1320
410	400	-	41.5	1350
420	408	-	42.4	1380
430	415	-	43.2	1410
440	423	-	44.0	1430
450	430	-	44.8	1460
460	-	-	45.6	-
470	-	-	46.3	-
480	-	-	47.0	-
490	-	-	47.7	-
500	-	-	48.3	-
510	-	-	49.1	-
520	-	-	49.7	-
530	-	-	50.4	-
540	-	-	51.0	-
550	-	-	51.6	-
560	-	-	52.2	-
570	-	-	52.8	-
580	-	-	53.3	-
590	-	-	53.9	-
600	-	-	54.4	-
610	-	-	55.0	-
620	-	-	55.5	-
630	-	-	56.0	-
640	-	-	56.5	-
650	-	-	57.0	-
660	-	-	57.5	-
670	-	-	58.0	-
680	-	-	58.5	-
690	-	-	59.0	-
700	-	-	59.5	-
720	-	-	60.4	-
740	-	-	61.2	-
760	-	-	62.0	-
780	-	-	62.8	-
800	-	-	63.6	-
820	-	-	64.3	-
840	-	-	65.0	-
860	-	-	65.7	-
880	-	-	66.3	-
900	-	-	66.9	-
920	-	-	67.5	-
940	-	-	68.0	-

¹⁾ All hardness values determined on different materials using various hardness testing methods are only approximately comparable.

²⁾ The Rockwell values given to one decimal place serve only for interpolation and should be rounded to integers in the end result.

Figura 5.4.7 Tabla de conversión Dureza Vickers- Resistencia a tracción



Resultados experimentales

Material	Resistencia a tracción
S235JR	500 MPa
DX355MCD	570 MPa
CORDONES	710 Mpa

5.5 COMPARATIVA DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la siguiente tabla se muestran los datos con la gráfica de las mediciones de dureza de todas las probetas de material 235-235. Las mediciones en rojo se han realizado con las probetas sin pulir mientras que las mediciones azules se han realizado tras pulir la superficie. La grafica correcta debe poseer una pendiente en la ZAT que crece cuando se acerca a la soldadura y decrece cuando se aleja, esto se aprecia en las mediciones de color rojo, pero no en las de color azul, las cuales experimentan un salto brusco de dureza desde la zona del material al cordón de soldadura. Se consideran más correctas las mediciones en color rojo, debido a que al pulir la superficie se provocó un calentamiento del material que devolvió características originales al material antes de la soldadura.

Se podría dar el caso de que el proceso de soldadura produzca un endurecimiento general del material, similar a un tratamiento térmico superficial, esto se ve si se comparan los datos del fabricante con los resultados experimentales:

Material	Datos del fabricante	Resultados experimentales
S235JR	360-510 MPa	500 MPa
DX355MCD	470-630 MPa	570 MPa

Debido a la dificultad de obtener la dureza de las ZAT no se han tenido en cuenta para los cálculos numéricos, la zona afectada térmicamente se ha considerado como material base.

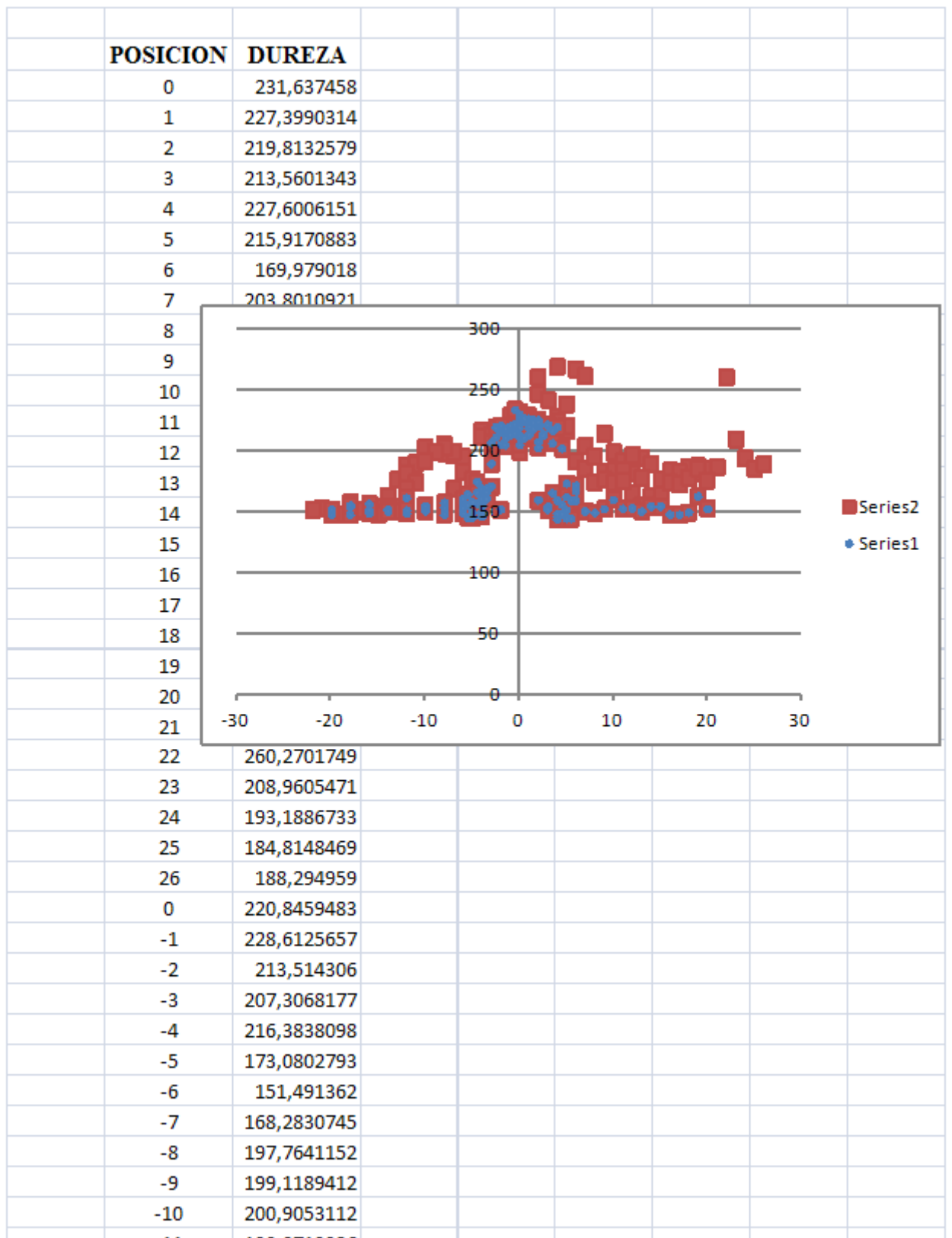


Figura 5.5.1 Tabla y gráfica con los valores de dureza de las probetas 235-235

6. ANÁLISIS MODAL

6.1 INTRODUCCIÓN

El análisis modal de las probetas se ha realizado en el Laboratorio de Ensayos Modales y Operacionales, por el profesor Javier Abad del Dpto. de Ing. Mecánica de la Universidad de Zaragoza, EINA (Zaragoza).

En el ensayo se determinaron las frecuencias propias y amortiguamientos modales de las probetas.

Se ensayaron 22 probetas

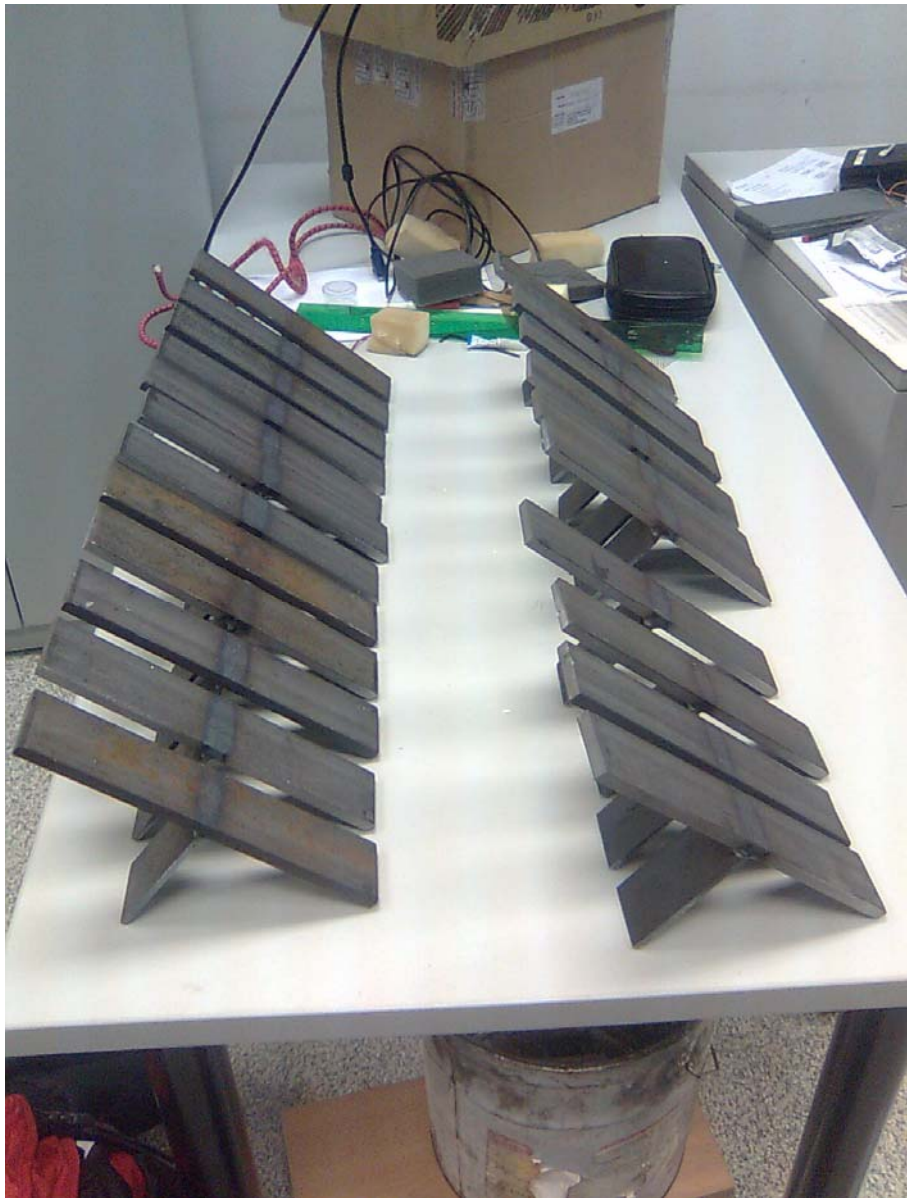


Figura 6.1.1



Todas ellas del mismo material y soldadas mediante el mismo proceso, el Alma a 90° del Ala. (Figura 6.2 , Figura 6.3).



Figura 6.1.2



Figura 6.1.3

6.1.1 PROCESO DE ENSAYO

A continuación se explica un breve resumen para llevar a cabo el ensayo. Previamente se adhiere un reflector en una esquina del Ala de cada probeta. Los pasos para configurar el equipo son los siguientes:

Paso 1. Se arranca el software LMS TestLAB (programa utilizado para hacer el ensayo).

Primero se configura el frontend y después las mediciones que se quieren efectuar. Se configuran los analizadores, las graficas, las medidas...

Paso 2. El ensayo se ejecuta con la opción Roving que implica que en análisis el acelerómetro se encontrara en una posición fija mientras que el martillo se irá desplazando por distintos puntos.

Paso 3. Se configuran la señal de entrada (en este caso el martillo de impacto), y el acelerómetro.

Señal de entrada: Hammer Enderco 2302-10 (Figura 6.1.2c)

Acelerómetro: Vibrómetro Polytec PDV 100 (Figura 6.1.2b)

Paso 4. Se dibuja o importa la geometría de la pieza a ensayar, solo serán necesarios los puntos de medida y de excitación.

Después se insertan los nodos y se establecen las coordenadas respecto del origen. Una vez establecidos todos los nodos se reorganiza su numeración.

Paso 5. Se indica la localización de cada transductor y los ejes en los que mide (en este caso solo hay una medición y en el eje y). A cada probeta se le a pegado un reflector en una esquina del Ala para medir la vibración con el Vibrómetro Polytec PDV 100 (laser).

Paso 6. Hay que asegurarse de que la secuencia del orden de llevar a cabo las medidas es la correcta.



Paso 7. Se configuran las propiedades del analizador que se va a emplear. Se indica el rango de frecuencia que se va a utilizar, la resolución del ensayo, el disparador que permitirá grabar la medida en este caso el martillo de impactos.

Paso 8. Se configura el martillo de impactos.

Paso 9. Se calibra el transductor

Paso 10. Se configura la grabación de las medidas ejecutadas.

A continuación se explicaran los pasos para realizar las mediciones:

Paso 1. Se coloca cada probeta por separado, sobre un material lo suficientemente blando, como la gomaespuma, para que no afecte a sus modos de vibración, ya que las condiciones de apoyo deben ser libre-libre, esto significa que la probeta debe comportarse igual que si estuviera suspendida en el aire (ver Figura 6.1.1)



Figura 6.1.1.1

Paso 2. Se comienza el ensayo aplicando golpes con el martillo de impacto en los nodos establecidos anteriormente de la probeta.

Paso 3. Se registran las mediciones de las frecuencias modales y los amortiguamientos.



6.1.2 EQUIPO

El equipo utilizado consta (a parte de material básico) de:

FRONT-END LMS Scadas Mobile Recorder (Figura 6.1.2a)

Vibrómetro Polytec PDV 100 (Figura 6.1.2b)

Hammer Enderco 2302-10 (Figura 6.1.2c)

Software LMS TestLAB (Figura 6.1.2c)

FRONT-END LMS SCADAS Mobile and LMS SCADAS Recorder

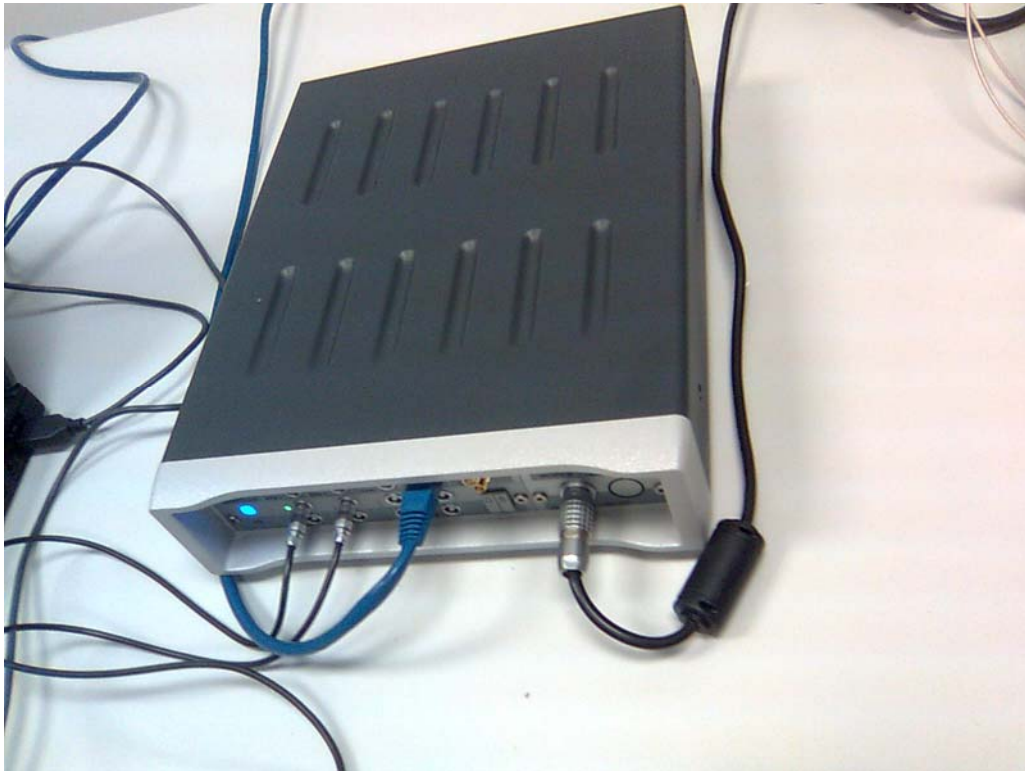


Figura 6.1.2.1 FRONT-END LMS SCADAS Mobile and LMS SCADAS Recorder

Características:

8 canales

canal Configuración maestro-esclavo para sistemas distribuidos y expansión del

Hasta 204,8 kHz frecuencia de muestreo por canal

24-bit tecnología DSP

150 dB espuria-libre de rango dinámico

velocidad 14 Msamples/s de rendimiento para albergar PC con conexión de alta



Ethernet

Vibrómetro Polytec PDV 100



Figura 6.1.2.2 Vibrómetro Polytec PDV 100

Características:

- Velocidad de medición sin contacto desde 0 hasta 22 kHz
- Tres rangos de velocidad de alta resolución
- Procesamiento de señal digital
- Salidas analógicas y digitales de señal
- Distancia de trabajo variable desde 0,2 m hasta 30 m

Hammer Enderco 2302-10



Figura 6.1.2.3 Hammer Enderco 2302-10



Softfare LMS TestLAB

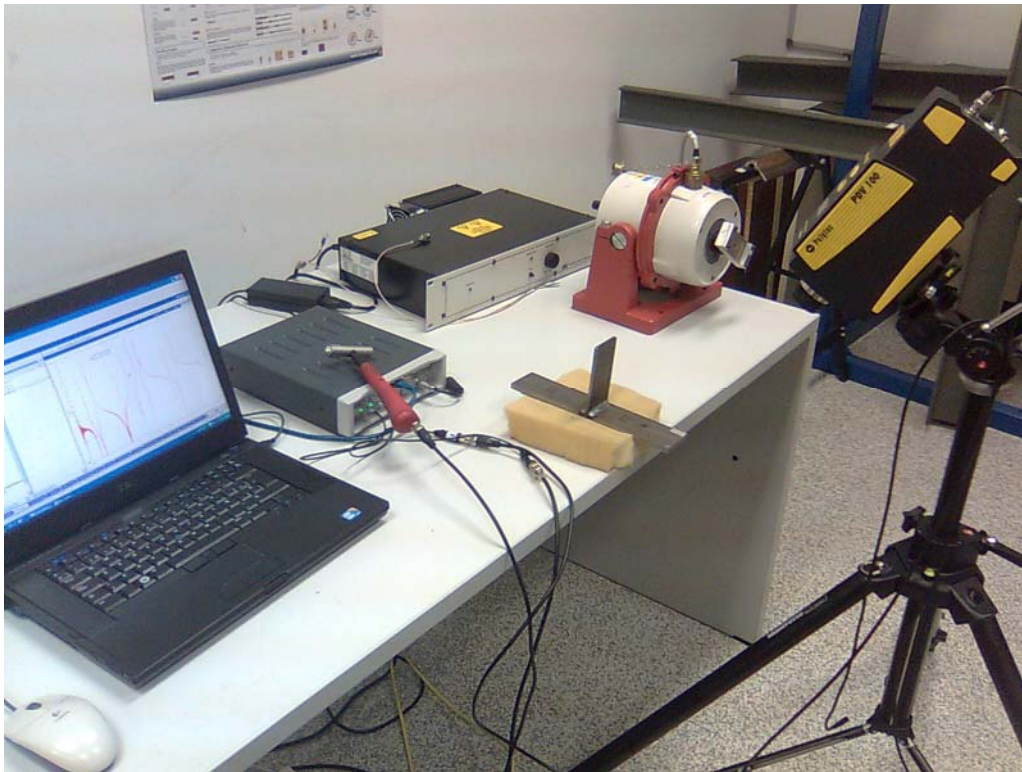


Figura 6.1.2.4 Softfare LMS TestLAB

6.2 MODELOS TEORICOS

Para el análisis modal realizado con ABAQUS 6.11-2 y ABAQUS VIEWER, se utilizaron los mismos modelos que para el análisis de cargas, lo único que se modificó de los modelos fueron sus unidades, ya que para calcular la tensión de Von Mises con Abaqus se utilizaron las unidades [N,mm,kg], mientras que para el análisis modal se utilizaron las unidades del sistema internacional [N, m, kg]. Las características del material se cambiaron en las propiedades de los modelos, pero las dimensiones se cambiaron mediante un escalado de la malla.

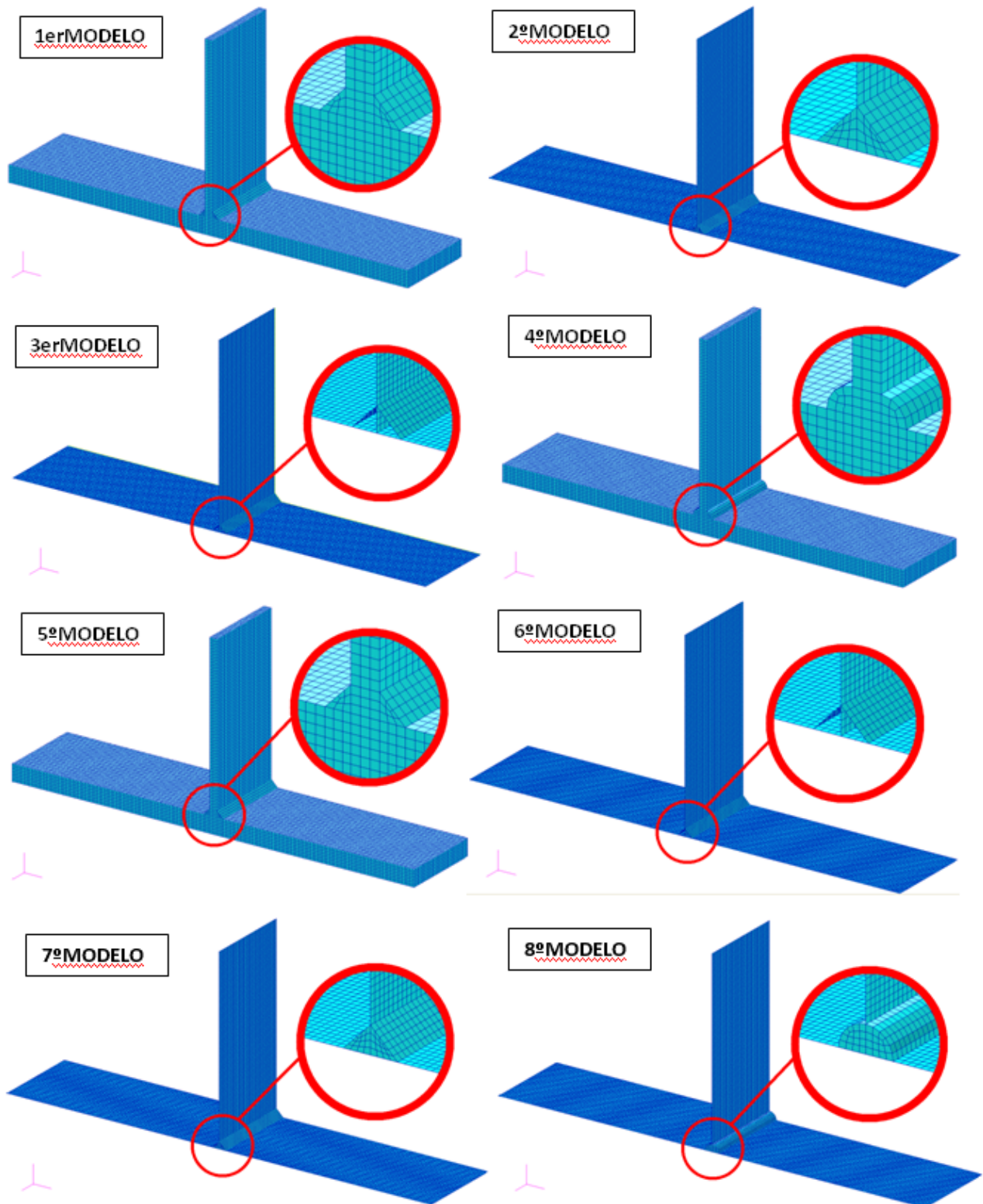


Figura 6.2.1



6.3 RESULTADOS NUMERICOS MEF

Hay que tener en cuenta que MSC PATRAN es un programa matemático, esto significa que no trabaja con unidades, con lo cual el mallado que se había realizado en mm y tenía una longitud de 100 (mm), si se tenía que pasar a m había que dividir por mil, con lo cual, la nueva longitud de la probeta era 0.1 (m).

UNIDADES V.M-> [N,mm,kg] => E=210,Densd=7.8E-6

UNIDADES Análisis modal-> [N,m,kg] => E=2.1E11, Densd=7800

El análisis mediante ABAQUS 6.11-2 exigía cambiar el código de texto para que el programa ejecutara el análisis modal, la carta de comandos que se introdujo fue la siguiente:

```
** Step 1
**
*STEP
**
*FREQUENCY
, (1), (2), (3), ,
**
```

1-nº de valores propios
2-mínima frecuencia de interés (Hz)
3-máxima frecuencia de interés

MODOS DE VIBRACION

Tras ejecutar el programa y visualizar el resultado con ABAQUS VIEWER se cogieron los 10 primeros modos de vibración.

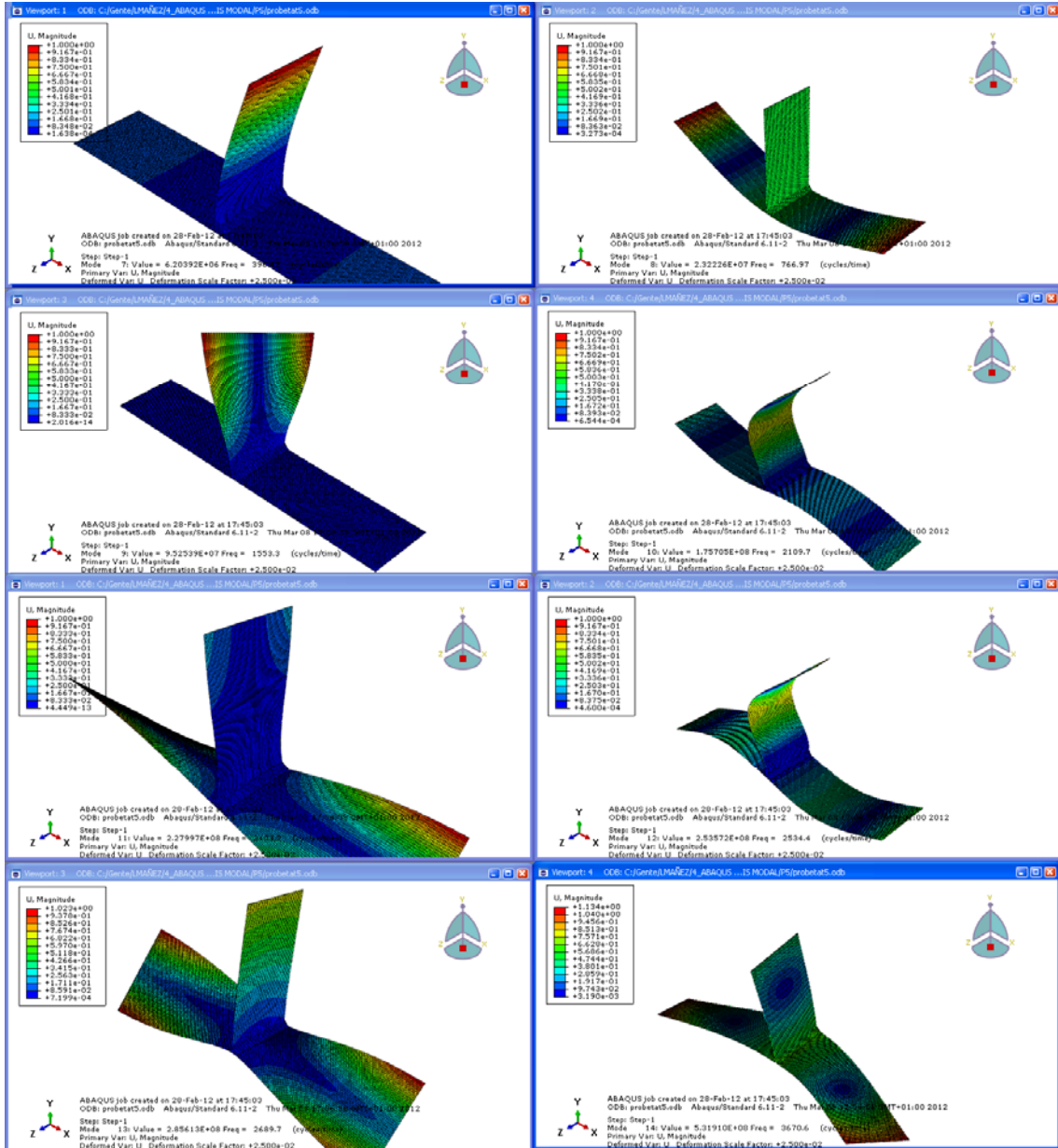


Figura 6.3.1 Modos de vibración



MALLADO TIPO SOLIDO_3D MODELOS 1,4,5				MALLADO TIPO PLANO_SHELL MODELOS 2,3,6,7,8			
1erMODELO	modo	freq Hz	tipo	2ºMODELO	modo	freq Hz	tipo
	1	431,39	Flex Alma		1	382,54	Flex Alma
	2	789,39	Flex Ala		2	767,52	Flex Ala
	3	1632	Tors Alma		3	1524,3	Tors Alma
	4	2168,4	Flex Alma Ala		4	2077,2	Flex Alma Ala
	5	2452,7	Tors Alma Ala		5	2391,3	Tors Alma Ala
	6	2635	Flex Alma Ala		6	2486,8	Flex Alma Ala
	7	2735,1	Tors Ala		7	2678,5	Tors Ala
	8	3725,3	Flex Ala fuera de plano		8	3684,5	Flex Ala fuera de plano
3erMODELO	modo	freq Hz	tipo	4ºMODELO	modo	freq Hz	tipo
	1	396,42	Flex Alma		1	428,62	Flex Alma
	2	766,97	Flex Ala		2	781,66	Flex Ala
	3	1553,3	Tors Alma		3	1633	Tors Alma
	4	2109,7	Flex Alma Ala		4	2167	Flex Alma Ala
	5	2403,2	Tors Alma Ala		5	2464,1	Tors Alma Ala
	6	2534,4	Flex Alma Ala		6	2683	Flex Alma Ala
	7	2689,7	Tors Ala		7	2732,3	Tors Ala
	8	3670,6	Flex Ala fuera de plano		8	3707	Flex Ala fuera de plano
5ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	6ºMODELO	modo	freq Hz	tipo
	1	424,25	Flex Alma		1	385,37	Flex Alma
	2	779,92	Flex Ala		2	766,13	Flex Ala
	3	1623,5	Tors Alma		3	1536,5	Tors Alma
	4	2162,3	Flex Alma Ala		4	2084,7	Flex Alma Ala
	5	2448,6	Tors Alma Ala		5	2399,6	Tors Alma Ala
	6	2663,1	Flex Alma Ala		6	2500,1	Flex Alma Ala
	7	2723,9	Tors Ala		7	2675,1	Tors Ala
	8	3708,9	Flex Ala fuera de plano		8	3670,4	Flex Ala fuera de plano
7ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	8ºMODELO	modo	freq Hz	tipo
	1	351,94	Flex Alma		1	366,41	Flex Alma
	2	767,18	Flex Ala		2	766,61	Flex Ala
	3	1482,1	Tors Alma		3	1503	Tors Alma
	4	1992,8	Flex Alma Ala		4	2034,8	Flex Alma Ala
	5	2387,9	Tors Alma Ala		5	2392,2	Tors Alma Ala
	6	2422,7	Flex Alma Ala		6	2450,6	Flex Alma Ala
	7	2670,5	Tors Ala		7	2675,9	Tors Ala
	8	3682,9	Flex Ala fuera de plano		8	3678,8	Flex Ala fuera de plano

Figura 6.3.2 Tabla de resultados

6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO

Frecuencias obtenidas:

- 445.4Hz
- 779.0Hz
- 2140.0Hz
- 2490.6Hz
- 2731.4Hz



6.5 COMPARATIVA DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Comparación de resultados Análisis Numérico – Análisis experimental

RESULTADOS NUMERICOS				RESULTADOS EXPERIMENTALES			
1erMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	431,39	Flex Alma		1	445,4	3,15
	2	789,39	Flex Ala		2	779	1,33
	3	1632	Tors Alma				
	4	2168,4	Flex Alma Ala		3	2140	1,33
	5	2452,7	Tors Alma Ala		4	2490,6	1,52
	6	2635	Flex Alma Ala		5	2731,4	3,53
	7	2735,1	Tors Ala				TOTAL
	8	3725,3	Flex Ala fuera de plano				10,86
2ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	382,54	Flex Alma		1	445,4	14,11
	2	767,52	Flex Ala		2	779	1,47
	3	1524,3	Tors Alma				
	4	2077,2	Flex Alma Ala		3	2140	2,93
	5	2391,3	Tors Alma Ala		4	2490,6	3,99
	6	2486,8	Flex Alma Ala		5	2731,4	8,96
	7	2678,5	Tors Ala				TOTAL
	8	3684,5	Flex Ala fuera de plano				31,46
3erMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	396,42	Flex Alma		1	445,4	11,00
	2	766,97	Flex Ala		2	779	1,54
	3	1553,3	Tors Alma				
	4	2109,7	Flex Alma Ala		3	2140	1,42
	5	2403,2	Tors Alma Ala		4	2490,6	3,51
	6	2534,4	Flex Alma Ala		5	2731,4	7,21
	7	2689,7	Tors Ala				TOTAL
	8	3670,6	Flex Ala fuera de plano				24,68
4ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	428,62	Flex Alma		1	445,4	3,77
	2	781,66	Flex Ala		2	779	0,34
	3	1633	Tors Alma				
	4	2167	Flex Alma Ala		3	2140	1,26
	5	2464,1	Tors Alma Ala		4	2490,6	1,06
	6	2683	Flex Alma Ala		5	2731,4	1,77
	7	2732,3	Tors Ala				TOTAL
	8	3707	Flex Ala fuera de plano				8,21



5ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	424,25	Flex Alma		1	445,4	4,75
	2	779,92	Flex Ala		2	779	0,12
	3	1623,5	Tors Alma				
	4	2162,3	Flex Alma Ala		3	2140	1,04
	5	2448,6	Tors Alma Ala		4	2490,6	1,69
	6	2663,1	Flex Alma Ala		5	2731,4	2,50
	7	2723,9	Tors Ala				TOTAL
	8	3708,9	Flex Ala fuera de plano				10,10
6ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	385,37	Flex Alma		1	445,4	13,48
	2	766,13	Flex Ala		2	779	1,65
	3	1536,5	Tors Alma				
	4	2084,7	Flex Alma Ala		3	2140	2,58
	5	2399,6	Tors Alma Ala		4	2490,6	3,65
	6	2500,1	Flex Alma Ala		5	2731,4	8,47
	7	2675,1	Tors Ala				TOTAL
	8	3670,4	Flex Ala fuera de plano				29,84
7ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	351,94	Flex Alma		1	445,4	20,98
	2	767,18	Flex Ala		2	779	1,52
	3	1482,1	Tors Alma				
	4	1992,8	Flex Alma Ala		3	2140	6,88
	5	2387,9	Tors Alma Ala		4	2490,6	4,12
	6	2422,7	Flex Alma Ala		5	2731,4	11,30
	7	2670,5	Tors Ala				TOTAL
	8	3682,9	Flex Ala fuera de plano				44,80
8ºMODELO	modo	freq Hz	tipo	Probeta T	modo	freq Hz	% ERROR
	1	366,41	Flex Alma		1	445,4	17,73
	2	766,61	Flex Ala		2	779	1,59
	3	1503	Tors Alma				
	4	2034,8	Flex Alma Ala		3	2140	4,92
	5	2392,2	Tors Alma Ala		4	2490,6	3,95
	6	2450,6	Flex Alma Ala		5	2731,4	10,28
	7	2675,9	Tors Ala				TOTAL
	8	3678,8	Flex Ala fuera de plano				38,47

Figura 6.5.1 Comparativa de resultados

CONCLUSIONES

Debido a que en el análisis experimental el vibrómetro solamente se realizaron mediciones en una esquina del Ala, hay un modo de vibración que no se pudo obtener.

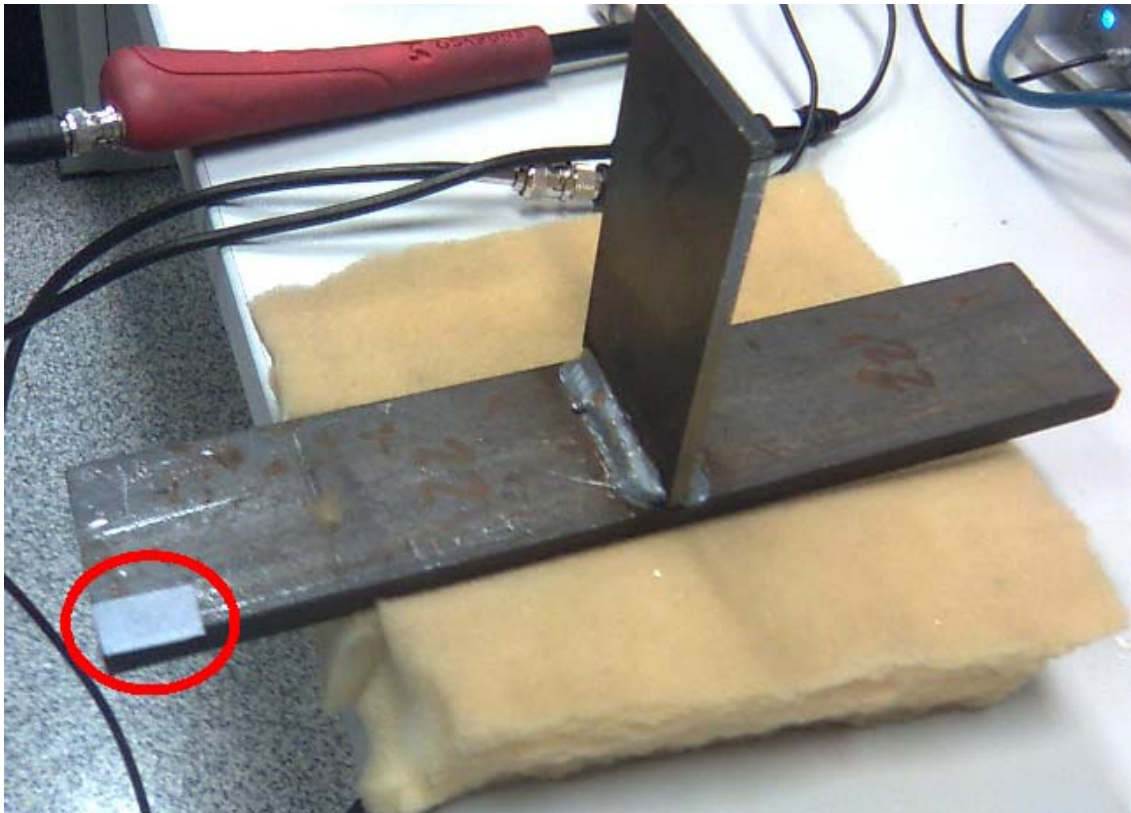


Figura 6.5.2

Modo de vibración que no se midió experimentalmente: 3er Modo de Vibración

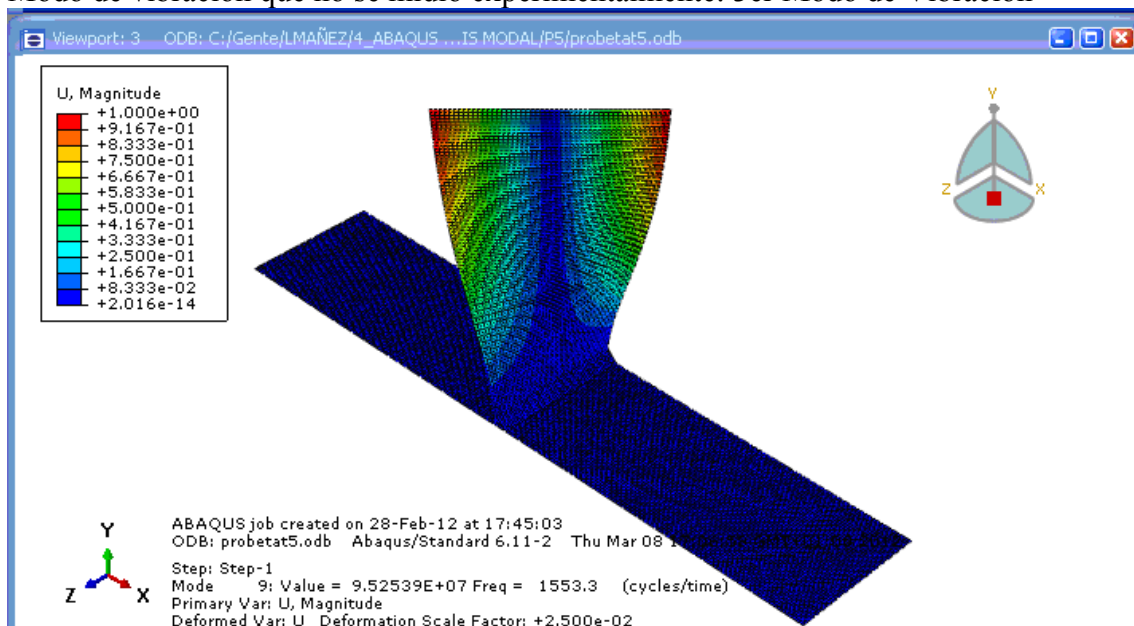


Figura 6.5.3 3er Modo de vibración, torsión Alma. Frecuencia = 1623.5 Hz



Validación de los modelos

En general todos los modelos son correctos, pero el que ha obtenido una mayor aproximación del análisis modal al modelo real ha sido el 4º Modelo con un error del 8%.

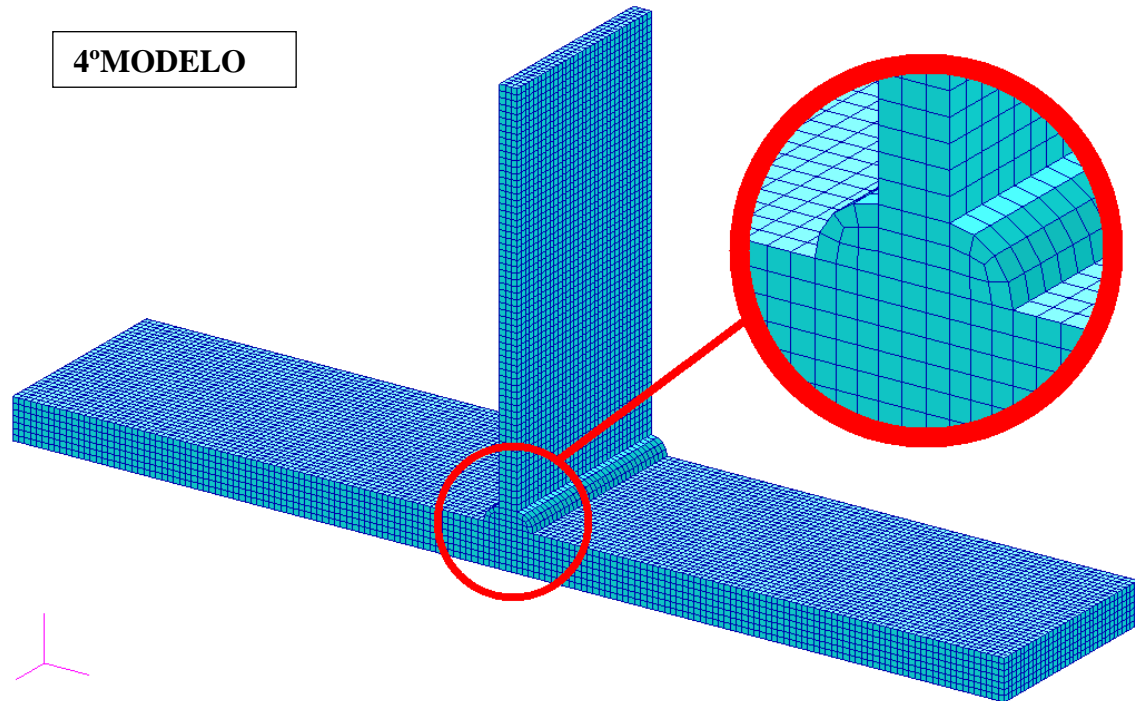


Figura 6.5.4

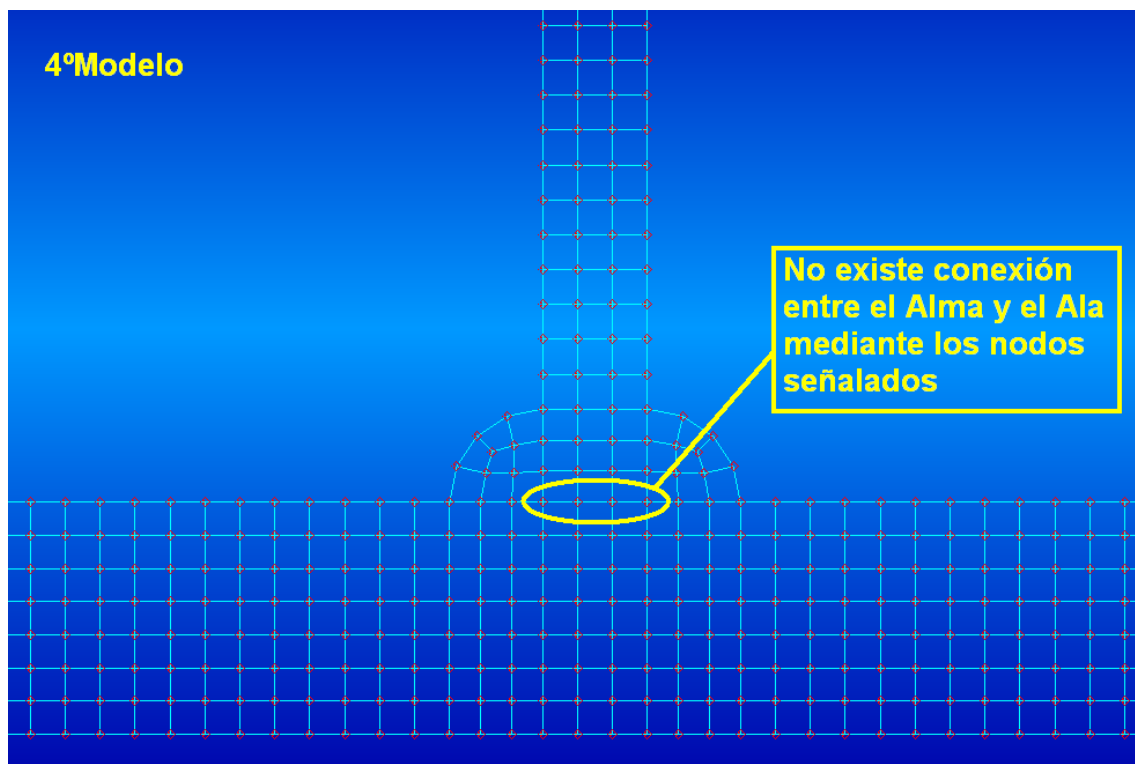


Figura 6.5.5



Características del 4º Modelo numérico:

Modelo de elementos tipo Solid.

No hay unión entre los nodos del Alma y el Ala.

Cordon tipo Solid circular.

Mallado de 1mm de espesor.

7. ESTUDIO FRENTE A FATIGA

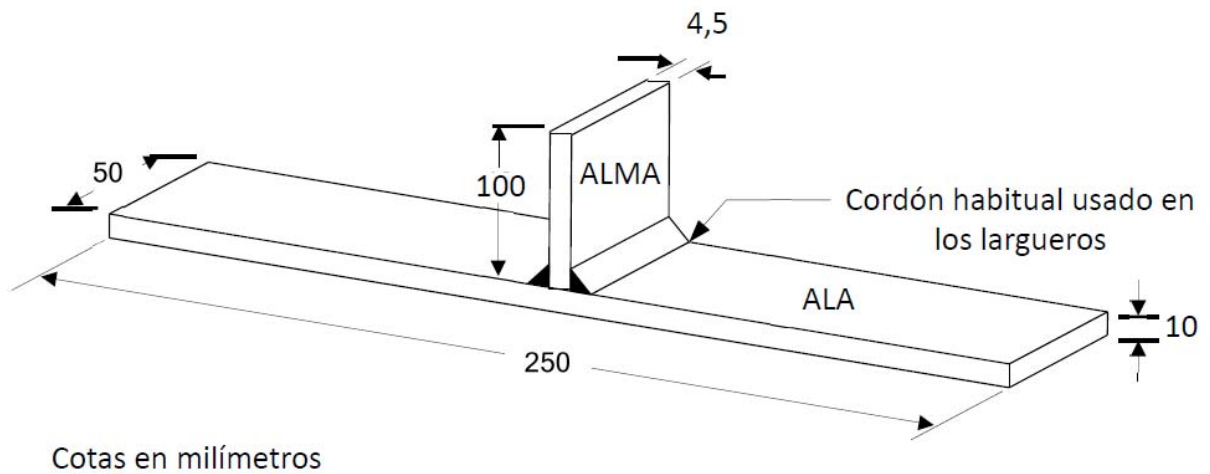
7.1 INTRODUCCION

El siguiente ensayo se ha realizado en la Nave 5 Ingeniería Mecánica del bloque de naves del edificio Betancourt (EINA) , en Zaragoza.



Figura 7.1.1

La probeta se sujeta mediante un utillaje que permite el giro en los apoyos de la probeta.



Material del ALMA = DX355MCD
Material del ALA = S235JR

Figura 7.1.2

Materiales

	Material	E[MPa]	Densidad[kg/mm ³]	Coef. Poisson
Alma	DX355MCD	210	7.8E-6	0.3
Ala	S235JR	210	7.8E-6	0.3
Cordones	SOLDADURA	210	7.8E-6	0.3

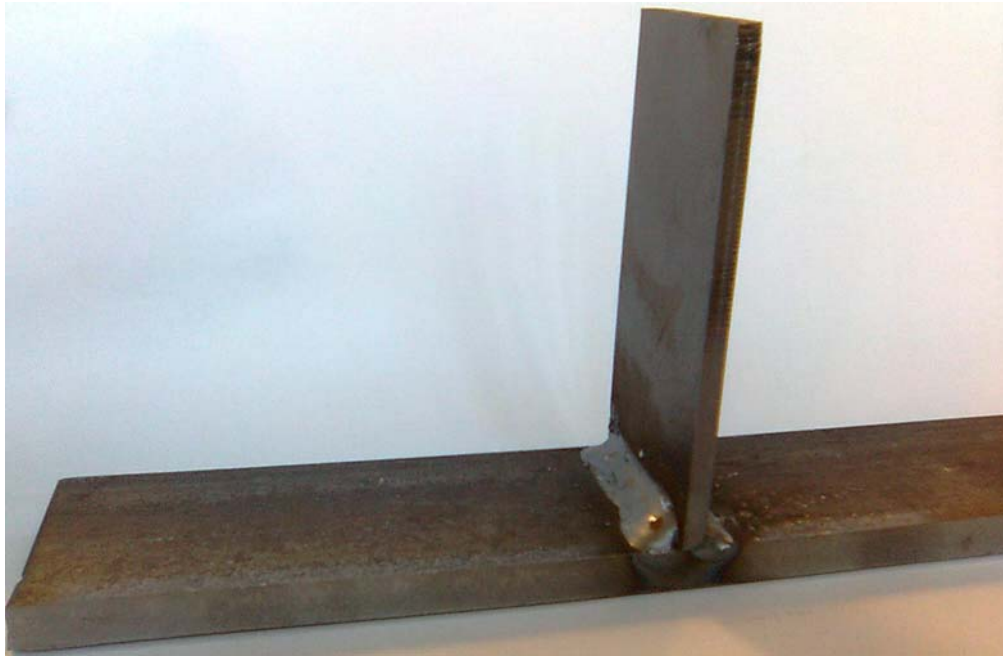


Figura 7.1.3 Fotografía de una de las probetas

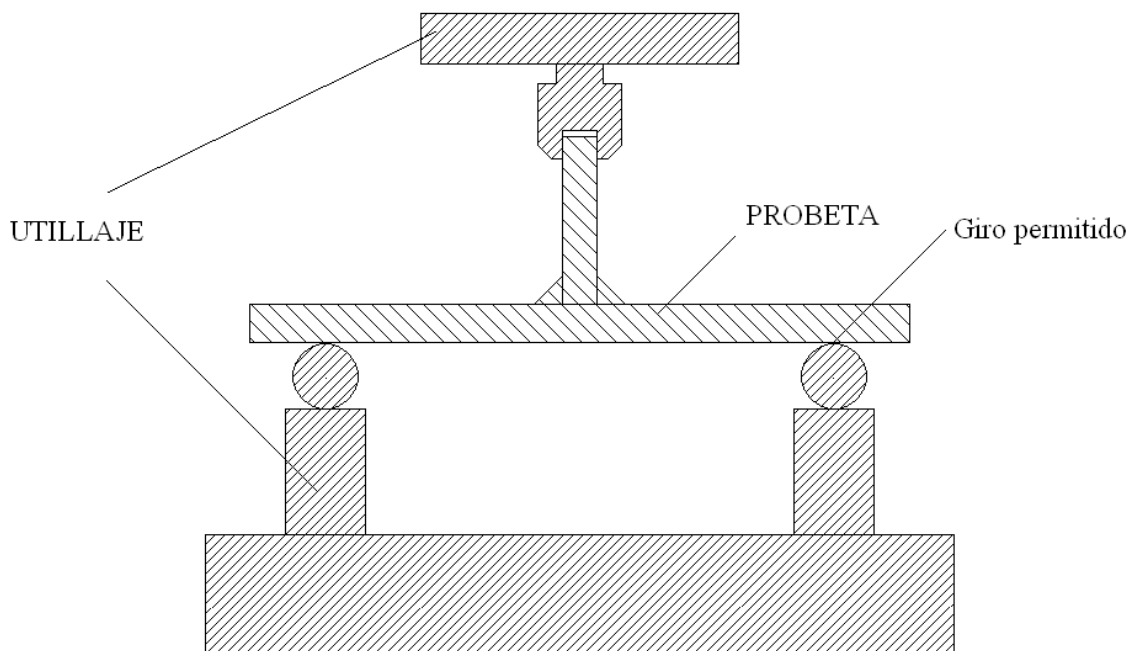
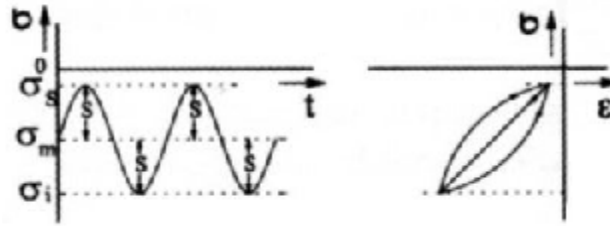


Figura 7.1.4 Utillaje

El ensayo realizado ha sido del tipo de flexión plana. Se aplica a probetas de sección rectangular, se apoya la probeta por los dos extremos (permitiendo el giro en el eje z) y se le somete a una fuerza cíclica en el centro de compresión.



Cargas

La probeta se somete a un ensayo de tensión fluctuante de compresión. Esto se consigue aplicando una fuerza constante F_1 de compresión y otra fuerza variable F_2 de tracción y compresión de valor inferior a la constante F_1 .

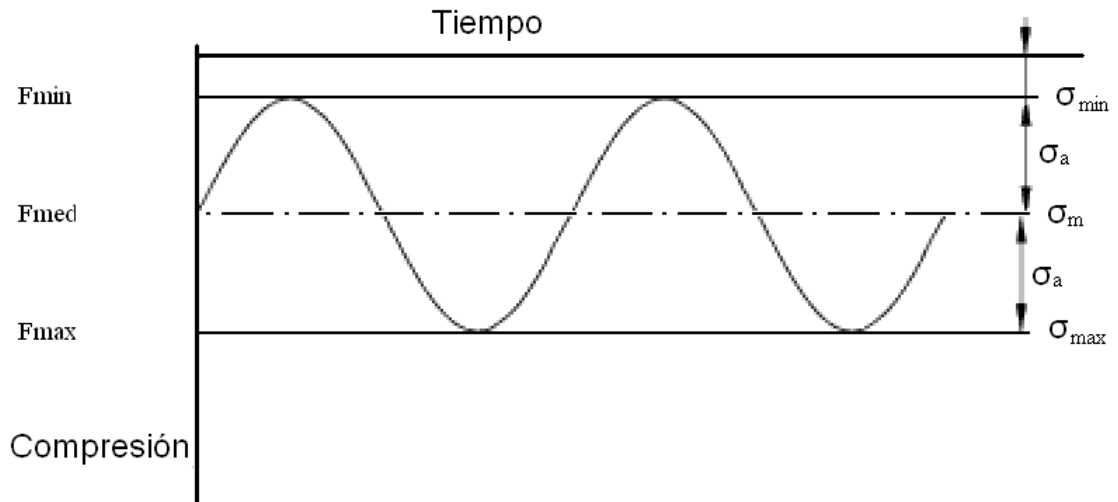


Figura 7.1.5

Se empieza con una carga aproximada del 80% a la resistencia a tracción del material menos resistente, en este caso el S235JR de unos 240MPa de resistencia a tracción.

Procedimiento de ensayo

Se sujeta la probeta en la posición indicada, apoyada en los extremos y amordazada en la parte más alta del alma



Figura 7.1.6

Se configura la maquina a la determinada carga, amplitud y frecuencia del ensayo y se inicia el ensayo.
Una vez acabado se salvan los resultados.

7.2 RESULTADOS NUMERICOS

PROCESO DE ANÁLISIS NUMÉRICO

Archivos necesarios:

Nombre	Tamaño	Tipo
ProbetaT4-4kN-fatiga.inp	2.082 KB	Archivo INP
Propiedades materiales.txt	1 KB	Documento de texto
Sub-fatiga-alternante.exe	32 KB	Aplicación

Figura 7.2.1

“ProbetaT4-4kN-fatiga.inp”: Es el archivo que se obtiene de hacer el análisis de la probeta con Patran, para las cargas y condiciones de apoyo iniciales.
“Propiedades materiales.txt” :es un fichero de texto que contiene las propiedades de los materiales que se utilizaran a continuación para hacer el análisis numérico.

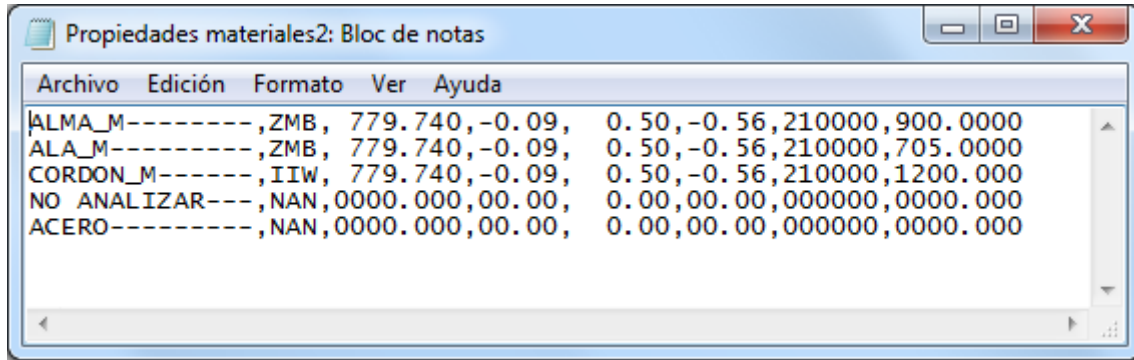


Figura 7.2.2

“Sub-fatiga-alternante.exe”: Es la aplicación con la que se ejecutara la subrutina para obtener los resultados de fatiga.

Paso1: se modifica el fichero “ProbetaT4-4kN-fatiga.inp”: obtenido del análisis de cargas ejecutado con **MSCPatran**. Cambios del archivo “.inp”

```
Se borran los grupos ELSET, ELSET=... y los también los NSET, NSET
*ELSET, ELSET=TODO_FEM, GENERATE
1, 19250, 1
**
** Alma
**
*NSET, NSET=ALMA, GENERATE
12802, 12906, 1
12908, 13012, 1
```

Hay que modificar la cantidad de caracteres de las propiedades y los materiales. Las propiedades deben ser de 8 caracteres de longitud y los materiales de 14

```
**
** Alma_p
**
*SHELL SECTION , ELSET=ALMA_P--, MATERIAL=S235JR-----
4.5, 5
**
** Ala_p
**
*SHELL SECTION , ELSET=ALA_P---, MATERIAL=S235JR-----
10., 5
**
** Cordon_p
**
*SOLID SECTION , ELSET=CORDON_P, MATERIAL=CORDON-----
1.,
**
```



```
**
** S235JR-----
**
**MATERIAL, NAME=S235JR-----
**
**DENSITY
  7.8E-6,
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
  210000., 0.3
**
**
**PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
  235., 0.
  410., 0.2
**
** CORDON-----
**
**MATERIAL, NAME=CORDON-----
**
**DENSITY
  7.8E-6,
**
**ELASTIC, TYPE=ISO
  210000., 0.3
**
**
**PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
  400., 0.
  797.71, 0.25
**
**
```

Y por ultimo hay que pegar la siguiente carta, modificando los datos correspondientes al material y la carga.

```
**
**
**STEP, AMPLITUDE=RAMP,NLGEOM, inc=100
**
**STATIC
0.01,1,0.00001,0.2
**
**
** Carga4kN
**
```



```
*CLOAD, OP=NEW
CARGA4KN, 2, -44.11
**
**
**
*DLOAD, OP=NEW
, GRAV, 9.81, 0, -1, 0
**
**
**
*NODE PRINT
U,
**
*EL PRINT, POS=INTEG
S,
E,
**
**
*OUTPUT, FIELD
*NODE OUTPUT
U,
RF,
CF,
**
*OUTPUT, FIELD
*ELEMENT OUTPUT
S, PEEQ
E,
**
**
*EL FILE, POSITION=integration point, FREQ=100
IEP, EEP
SINV,
**
**
*END STEP
**
**
*STEP, AMPLITUDE=RAMP, NLGEOM, inc=100
**
*STATIC
0.01, 1, 0.00001, 0.2
**
**
**
** Carga4kN
**
*CLOAD, OP=NEW
CARGA4KN, 2, -78.43
**
```




```
**
**
*DLOAD, OP=NEW
, GRAV, 9.81, 0, -1, 0
**
**
*NODE PRINT
U,
**
*EL PRINT, POS=INTEG
S,
E,
**
**
*OUTPUT, FIELD
*NODE OUTPUT
U,
RF,
CF,
**
*OUTPUT, FIELD
*ELEMENT OUTPUT
S, PEEQ
E,
**
**
*EL FILE, POSITION=integration point, FREQ=100
IEP, EEP
SINV,
**
**
*END STEP
**
**
*STEP, AMPLITUDE=RAMP, NLGEOM, inc=100
**
*STATIC
0.01, 1, 0.00001, 0.2
**
**
** Carga4kN
**
*CLOAD, OP=NEW
CARGA4KN, 2, -9.80
**
**
**
*DLOAD, OP=NEW
```



```
,GRAV,9.81, 0, -1, 0
**
**
*NODE PRINT
U,
**
*EL PRINT, POS=INTEG
S,
E,
**
**
*OUTPUT, FIELD
*NODE OUTPUT
U,
RF,
CF,
**
*OUTPUT, FIELD
*ELEMENT OUTPUT
S, PEEQ
E,
**
**
*EL FILE,POSITION=integration point,FREQ=100
IEP,EEP
SINV,
**
**
*END STEP
```

El archivo se guarda con el nombre “ProbetaT3-3.2kN.inp”

Paso 2: Ejecutar archivo en **ABAQUS COMMAND**, se abre la aplicación ABAQUS COMMAND, primero hay que situarse en la carpeta donde se encuentran los archivos.

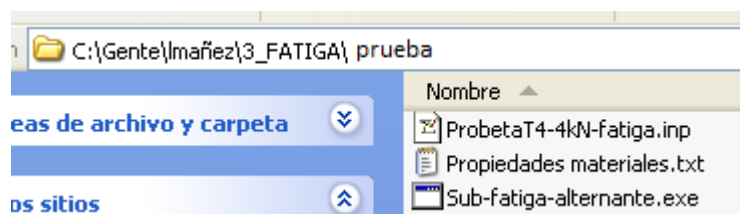


Figura 7.2.3



(en este caso “C:\Gente\lmañez\3_FATIGA\prueba”) y donde se quiere que se guarden los resultados, y a continuación se escribe el siguientes comando: **abq651 Sub-fatiga-alternante.exe** , abq651 hace referencia a la versión de ABAQUS COMMAND con la que se calcula. “**Sub-fatiga-alternante.exe**” hace referencia a la subrutina para el cálculo a fatiga

```
Directorio de C:\Gente\lmañez\3_FATIGA\prueba
10/05/2012  18:05  <DIR>      .
10/05/2012  18:05  <DIR>      ..
09/05/2012  19:05          52.531.200  probetat3_3.2kn.fil
09/05/2012  18:01          6.862.727  ProbetaT3_3.2KN.inp
10/05/2012  18:08              702  Propiedades materiales.txt
25/07/2011  08:27          32.768  Sub-fatiga-alternante.exe
           4 archivos      59.427.397 bytes
           2 dirs      213.587.501.056 bytes libres

C:\Gente\lmañez\3_FATIGA\prueba>abq651 Sub-fatiga-alternante.exe
```

Figura 7.2.4

Paso 3: Después se escribe el nombre del fichero input que se ha modificado anteriormente “ProbetaT3-3.2kN.inp”. Se pulsar Enter

```
+-----+
|                   |
|   P R O G R A M   |
|   ---   F P E R T |
| Obtención de datos de fichero .fil |
|                   |
+-----+

Nombre del fichero a leer (<.inp>):
ProbetaT3_3.2KN.inp
```

Figura 7.2.5

Paso 4: Comienza la lectura de datos, y el programa crea el archivo “ProbetaT3-3.2kN.fin”. Renombrar el archivo “.fin” cambiándole la extensión a la de “.fil” ->“ProbetaT3-3.2kN.fil”.

```
Nombre del fichero abierto:ProbetaT3_3.2KN.inp
Comienza lectura de datos:

Cerrado fichero:ProbetaT3_3.2KN.inp
Cerrado fichero:ELSET_MATERIAL.015

+-----+
|                   |
|   P R O G R A M   |
|   ---   F P E R T |
| Obtención de datos de fichero .fil |
|                   |
+-----+
```

Figura 7.2.6



Paso 5: Se pide el archivo “.fil”, se cita “ProbetaT3-3.2kN.fil”. y se comienza a calcular.

```
+-----+
| P R O G R A M --- F P E R T
| Obtención de datos de fichero .fil
+-----+

Nombre del fichero de resultados (w/o .fil):
ProbetaT3_3.2KN

Cerrado fichero: ELEMENT_ELSET_MATERIAL.013

Los resultados han sido escritos en el fichero: ELEMENT_ELSET_MATERIAL.013

Los materiales han sido escritos correctamente

Numero de nodos en el modelo . . . . . 55284
Numero de elementos en el modelo . . . . . 45738

Los resultados han sido escritos en el fichero: pruebasub-conjunto-32.011

ABIERTO FICHERO: "vida-fatiga-9.010"
ABIERTO FICHERO: "VIDAFATIGA.007"
CERRADO FICHERO: "VIDAFATIGA.009"
CERRADOS FICHEROS DE UIDA FATIGA
COMIENZA ESCRITURA DE RESULTADOS
ABIERTO FICHERO: "fichero_resultados.005"
FIN ESCRITURA DE RESULTADOS
CERRADO FICHERO: "fichero_resultados.005"

. . . PROGRAM FINISHED SUCCESSFULLY . . .
```

Figura 7.2.7

. . . PROGRAM FINISHED SUCCESSFULLY . . . indica que el cálculo ha sido satisfactorio

Paso 6: Se crea una base de datos **MSCPATRAN** en la cual hay que importar la geometría del modelo y los resultados.

Importar Geometría: En la barra de herramientas de PATRAN seleccionar en el botón de Analysis/ Read Input/ Model Data/ Select Input File... , seleccionar el archivo “.inp” y pulsar “Apply”. (Figura Paso 4a)

Importar Resultados: Seleccionar Analysis/ Read Results/ Result Entities/ Translate/ Select Result File... , seleccionar el archivo “.fil” (renombrado en el Paso 4) (Figura Paso 6b)

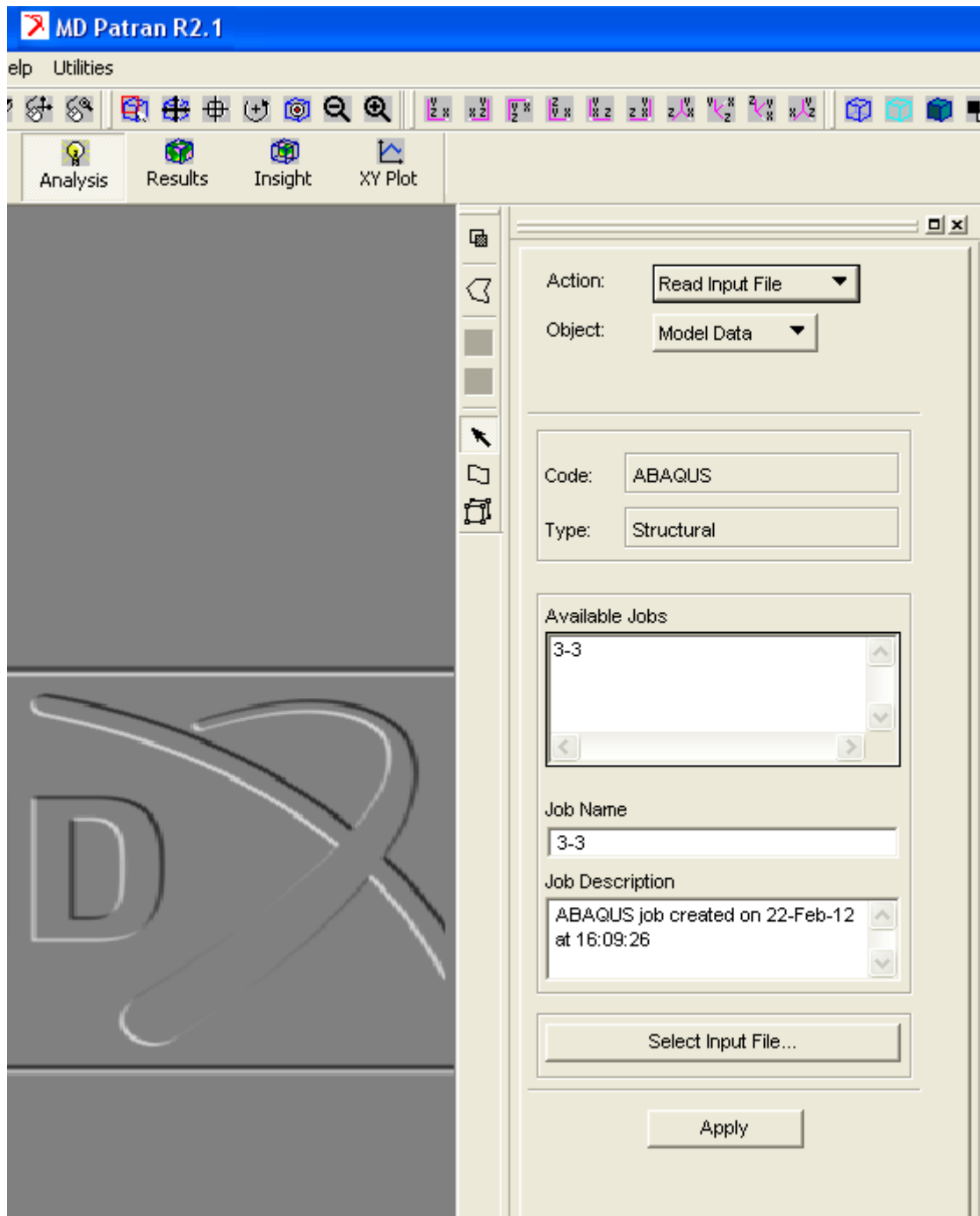


Figura 7.2.8 Paso 6a

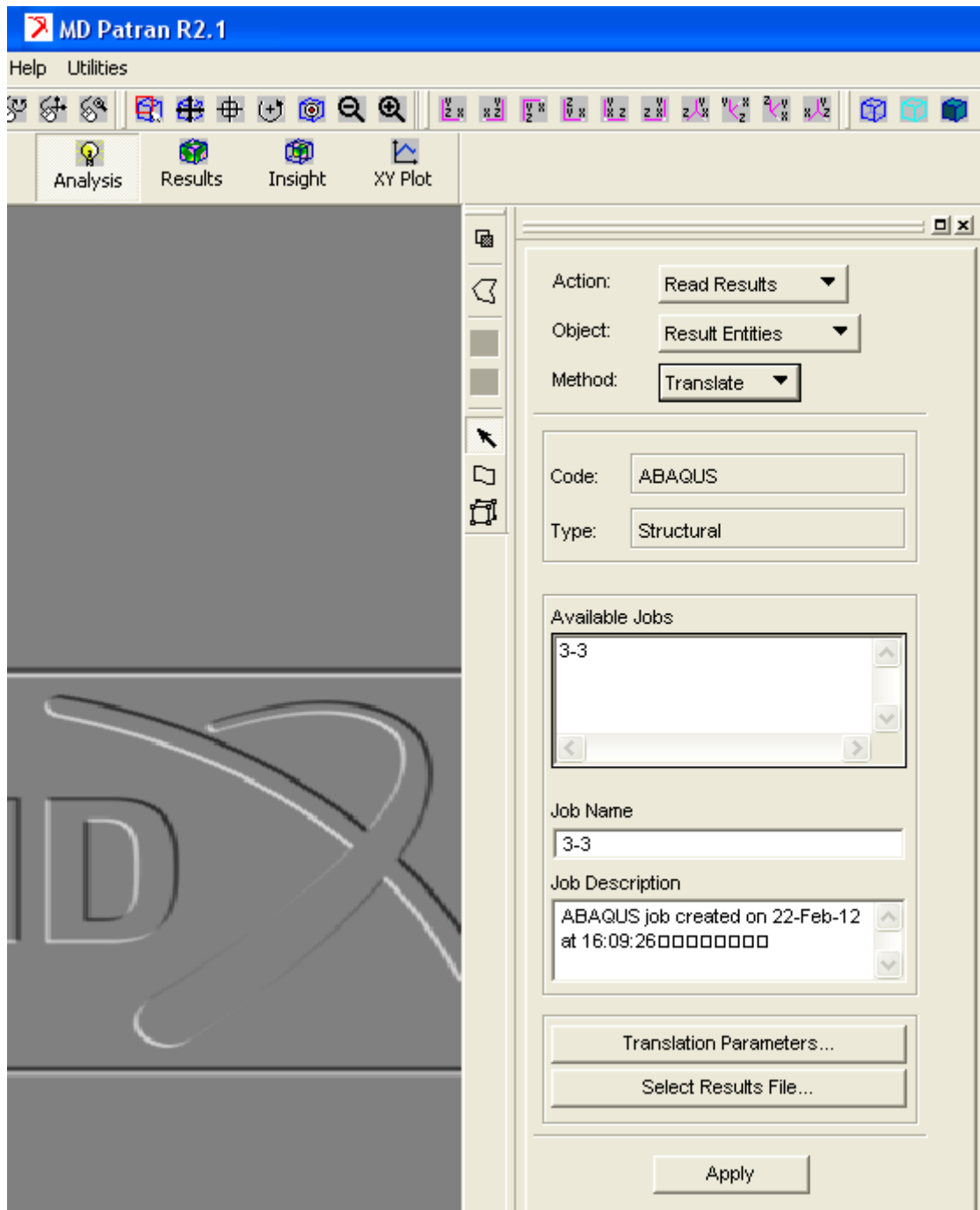


Figura 7.2.9 Paso 6b

Paso 7: Para ver los resultados se selecciona la pestaña Results/ Create/ Fringe , se selecciona el Step_Load_Case_3, Step3 , y Stress, Tresca , y se pulsa el botón de Apply (Figura Paso 5a). PATRAN nos muestra el resultado del análisis. (Figura Paso 5b)

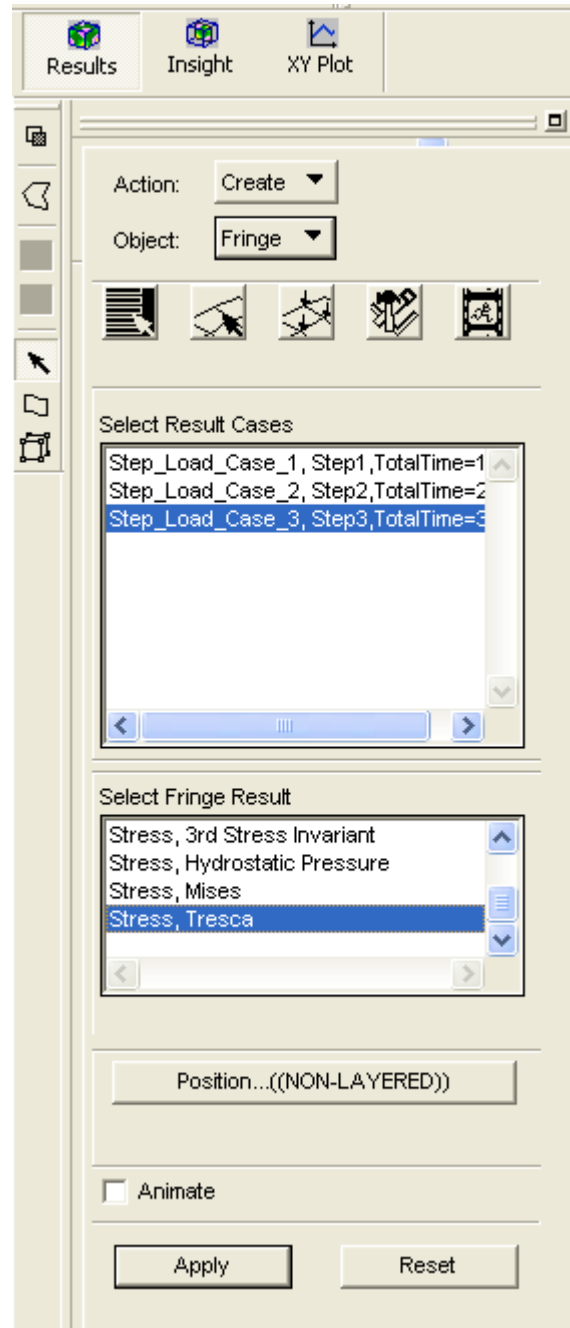


Figura 7.2.10 Paso 7a

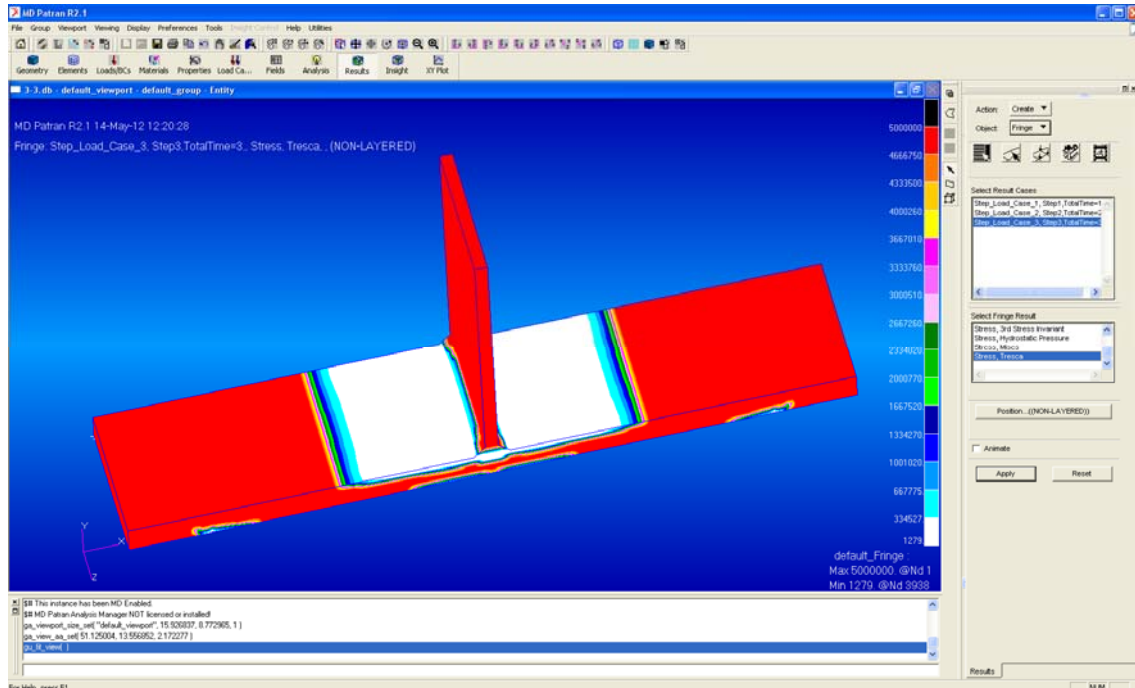


Figura 7.2.11 Paso 7b

7.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO

No se ha tenido tiempo para obtener todos los resultados del laboratorio antes de la redacción de este proyecto, se han hecho ensayos con ciclo de compresión con 3.2kN y 4.4kN. En el de 3.2kN la probeta no ha llegado a plastificar, mientras que en el 4.4kN, la probeta ha plastificado a los 97000 ciclos.

7.4. CONCLUSIONES

Se ha observado que en los primeros ensayos con ciclo de compresión no se ha producido fallo en la soldadura. Una razón por la cual la probeta no falla podría ser que los fabricantes de materiales aunque indiquen que el valor del S235JR es de 360-510 MPa de resistencia a tracción, realmente su resistencia es mayor ya que trabajan con un margen de seguridad.

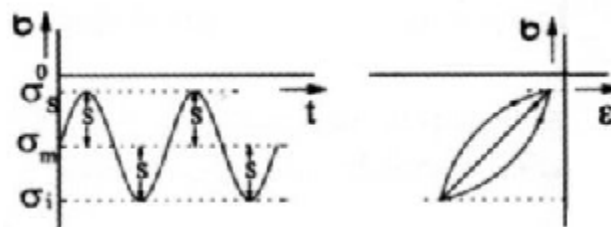


Figura 7.3.1



Por esta razón se está preparando un utillaje para ensayar la probeta también a tracción

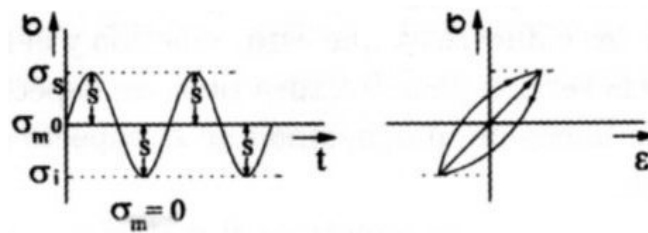


Figura 7.3.2

Para hacer el ensayo a tracción se necesita un nuevo utillaje que mediante unas mordazas sujeta la probeta.

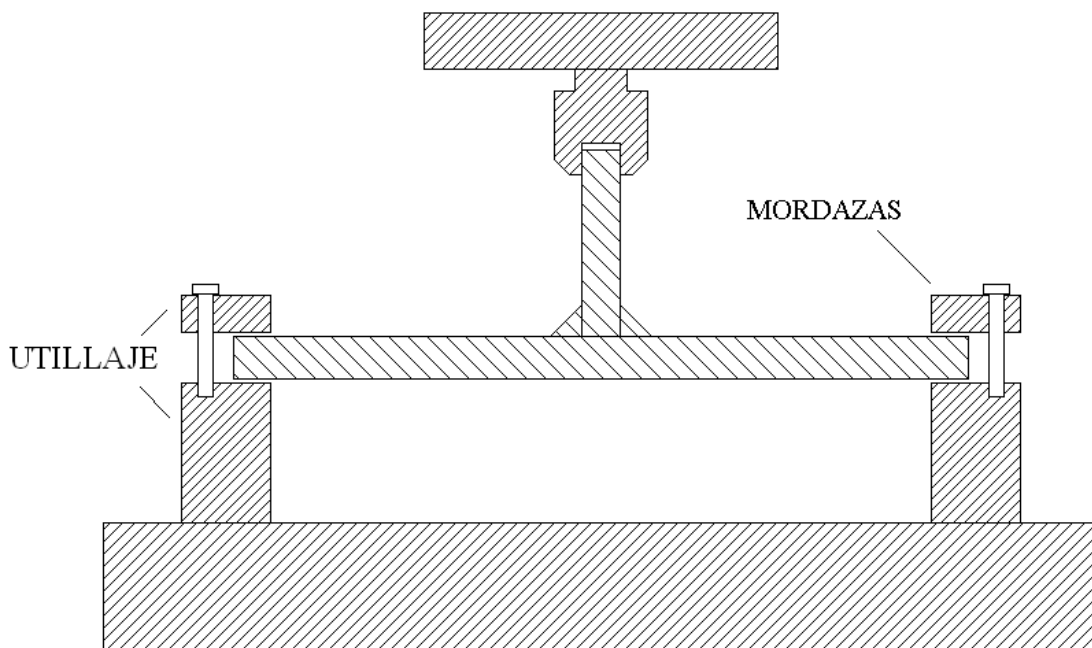


Figura 7.3.3 Utillaje con mordazas

Hipótesis de resultados: En este caso posiblemente se producirá el fallo en la unión soldada, ya que es el lugar donde se encuentran los concentradores de tensiones y donde la porosidad del cordón de soldadura reduce el límite de fatiga de la probeta.



8. CONCLUSIONES FINALES

De forma general, **el proyecto realizado ha permitido realizar una valoración, mediante la aplicación de diferentes metodologías y técnicas, del comportamiento de uniones soldadas de componentes de semirremolques** sometidos a sollicitaciones de fatiga. Partiendo de una serie de herramientas de análisis teóricas y experimentales ha sido posible obtener el comportamiento, a nivel de probeta, de uniones típicas realizadas por soldadura, es decir, la vida a fatiga de una estructura como es el caso de un semirremolque.

Tal y como se ha mostrado en la memoria, para alcanzar el objetivo anterior ha sido necesario lograr una serie de **objetivos secundarios, cuyas principales conclusiones se comentan a continuación:**

- **Planteamiento del problema y desarrollo de modelos** teóricos (basados en el Método de los Elementos Finitos, en adelante, MEF) y experimentales (probetas) para su posterior estudio y análisis. En este caso, han sido desarrollados diferentes modelos teóricos basados en el MEF (diferente tipo de elemento tanto en cordón como en probeta), los cuales han sido analizados y valorados en cuanto a precisión con los resultados experimentales obtenidos. Comparando los resultados numéricos con los experimentales del análisis modal, el modelo MEF más preciso fue el 4º: Se trata de un modelo creado con elementos tipo Solid , sin equivalencia entre los nodos de la unión del alma y el ala, esto quiere decir que las dos partes de la probeta solo están unidas mediante el cordón de soldadura. El cordón es de tipo Solid y su forma es circular. Las dimensiones de la malla del modelo son las mismas que las de la probeta real, y los elementos son de 1 mm. Todos los demás modelos MEF también son válidos pero con un error mayor.
- **Caracterización de uniones realizadas mediante soldadura.** A partir de una serie de ensayos de dureza ha sido posible caracterizar los materiales de la unión (cordones y ZAT's). En este sentido, se presentaron varias dificultades en los ensayos de dureza de los materiales. Una de ellas era que al pulir la superficie de las probetas para hacer el ensayo con el microdurómetro se producía un calentamiento superficial y las propiedades de las probetas cambiaban. Por esta razón no se pudieron medir las propiedades de las ZATs.
- **Caracterización dinámica de las estructuras objeto de estudio.** En este caso, se aplicaron diferentes técnicas numérico-experimentales (MEF y ensayos en laboratorio) con objeto de estimar el comportamiento modal (modos y frecuencias naturales) de las estructuras consideradas. Debido a que en el análisis experimental el vibrómetro solamente se realizaron mediciones en una esquina del Ala, hay un modo de vibración que no se pudo obtener (3er Modo de Vibración). Respecto a la validación de los modelos, en general, todos los modelos son correctos, pero el que obtuvo una mayor aproximación del análisis modal al modelo real ha fue el 4º Modelo con un error del 8%.



- **Análisis de uniones frente a fatiga.** Los modelos de probeta desarrollados fueron analizados frente a fatiga, tanto numérica (aplicación del MEF) como experimentalmente (ensayos de fatiga en banco universal de ensayos). En este caso, se observó que en los primeros ensayos con ciclo de compresión con cargas de 3.2 kN la probeta no llegó a deformar plásticamente, y en los ensayos de carga de 4.4 kN la probeta deformó plásticamente a los 97000 ciclos. No se esperaba que las probetas tuvieran una resistencia a fatiga tan alta. Se hicieron ensayos posteriores a estos de tracción compresión posteriores a la redacción de este proyecto. Una hipótesis de los resultados de los ensayos tracción-compresión es que en ese caso se produzca el fallo de la probeta en la unión soldada debido a los concentradores de tensiones y a la porosidad del cordón de la soldadura.
- **Soldadura de las probetas.** Además de las cuestiones señaladas anteriormente, en cuanto a las soldaduras se refiere se observó que el cordón en algunas probetas no abarcaba el ancho total de la pieza, esto pudo repercutir en algún resultado obtenido. No obstante al poseer 22 ejemplares la media de las medidas se considero bastante exacta.

Además de las meramente técnicas, la realización del proyecto **me ha permitido alcanzar otros objetivos de carácter personal y transversal** al proyecto que se resumen a continuación:

- **Aprendizaje de otras herramientas y técnicas de simulación** en el ámbito de la ingeniería. El proyecto me ha permitido conocer el uso y aplicación de herramientas comúnmente utilizadas en el ámbito de la ingeniería que anteriormente no conocía. En este sentido, cuando empecé este proyecto había utilizado desarrolladores de elementos finitos, tales como SolidWorks, Matlab o Catia, en las asignaturas de “Vibraciones Mecánicas”, “Cinemática y Dinámica de Máquinas” o “Elasticidad y Resistencia de los Materiales”. En este proyecto utilicé MSCPATRAN para crear los modelos numéricos y esto supuso un gran esfuerzo, debido a que no poseía ningún conocimiento de la aplicación. Estudié un manual de MSCPATRAN que me ayudó a iniciarme hasta que comprendí el funcionamiento y las herramientas disponibles para desarrollar los modelos numéricos y al final con perseverancia y ayuda de mi director de proyecto y personal docente de la universidad desarrollé satisfactoriamente ocho modelos numéricos diferentes.
- **Aplicación de conocimientos teóricos aprendidos en la carrera.** Este trabajo me ha servido para aplicar una gran parte de conocimientos teóricos adquiridos en las asignaturas que he cursado, y me ha aportado muchos conocimientos prácticos, como los ensayos en el laboratorio y el desarrollo de los modelos MEF, que considero muy importantes para mi formación y con una gran proyección de futuro.



9. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Libros:

- "Ingeniería de materiales para industria y construcción" Martín San José, Madre Sediles, Franco Gimeno, MIRA, 2004 ISBN 9788484650881
- "Cálculo y construcción de máquinas" A. Serrano Nicolás Servicio de publicaciones Universidad de Zaragoza 2005.
- Tesis doctoral: "Desarrollo de un método innovador de análisis de comportamiento frente a cargas de fatiga de uniones soldadas y componentes estructurales de semirremolques" Hugo Malón Litago, Luis Castejón Herrero, Universidad de Zaragoza. 2010.

Apuntes:

- "Vibraciones Mecánicas" Javier Abad Blasco, Universidad de Zaragoza. 2010.

Software:

- Manual "Introduction to MSC PATRAN"
- Manual "Abaqus/CAE User's Manual Version 6.8". Ed. Simulia. 2010

Internet:

- <http://www.bksv.com/Library/Primers.aspx>
- http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/chile/indice_archivos/download/i79.pdf
- <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/qa/How-does-welding-affect-the-HAZ-of-the-weld.cfm>
- <http://www.iberisa.com/productos/winlife.htm>
- http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/chile/indice_archivos/download/i79.pdf
- <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6080/7/06.pdf>
- http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/ElementosConstruccion02.PDF
- <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/0221.pdf>
- <http://www.azimadli.com/vibman-spanish/resonancia.htm>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Tacoma_Narrows
- http://matsuzawa-ht.com/us/item/m_vick.htm
- http://www.splav.kharkov.com/steelgrade/mat_start_eu.php?name_id=4
- http://www.splav.kharkov.com/steelgrade/mat_start_eu.php?name_id=10
- http://www.strack.de/pdf_upload/info/vickers1.pdf?sid=2&opentree=;28;
- <http://www.lmsintl.com/test/testXpress-analyzer/LMS-scadas-mobile-data-aquisition-front-end>
- <http://www.polytec.com/us/products/vibration-sensors/single-point-vibrometers/complete-systems/pdv-100-portable-digital-vibrometer/>

ANEXO 4.1.2

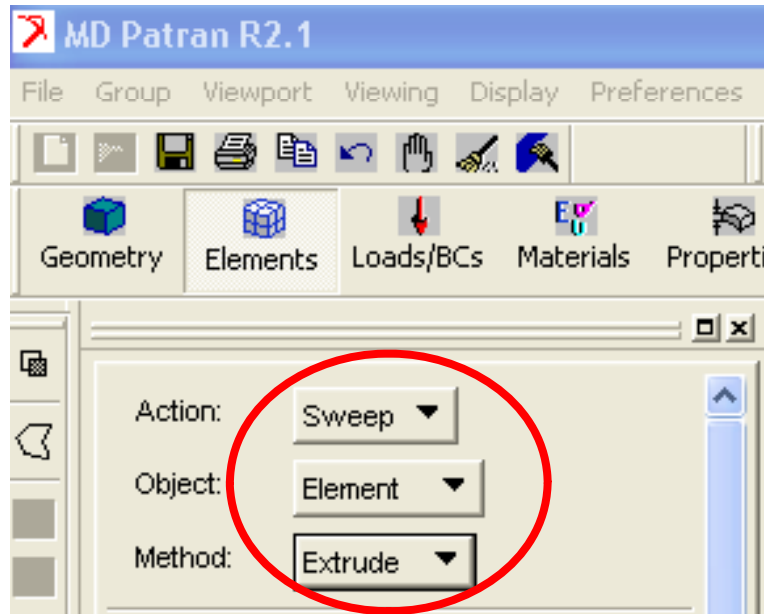
DESARROLLO DE MODELOS NUMÉRICOS

PREPROCESO, CÁLCULO Y
POSTPROCESO

4.1.2.1 PREPROCESO DE MODELOS TEORICOS MEDIANTE PATRAN

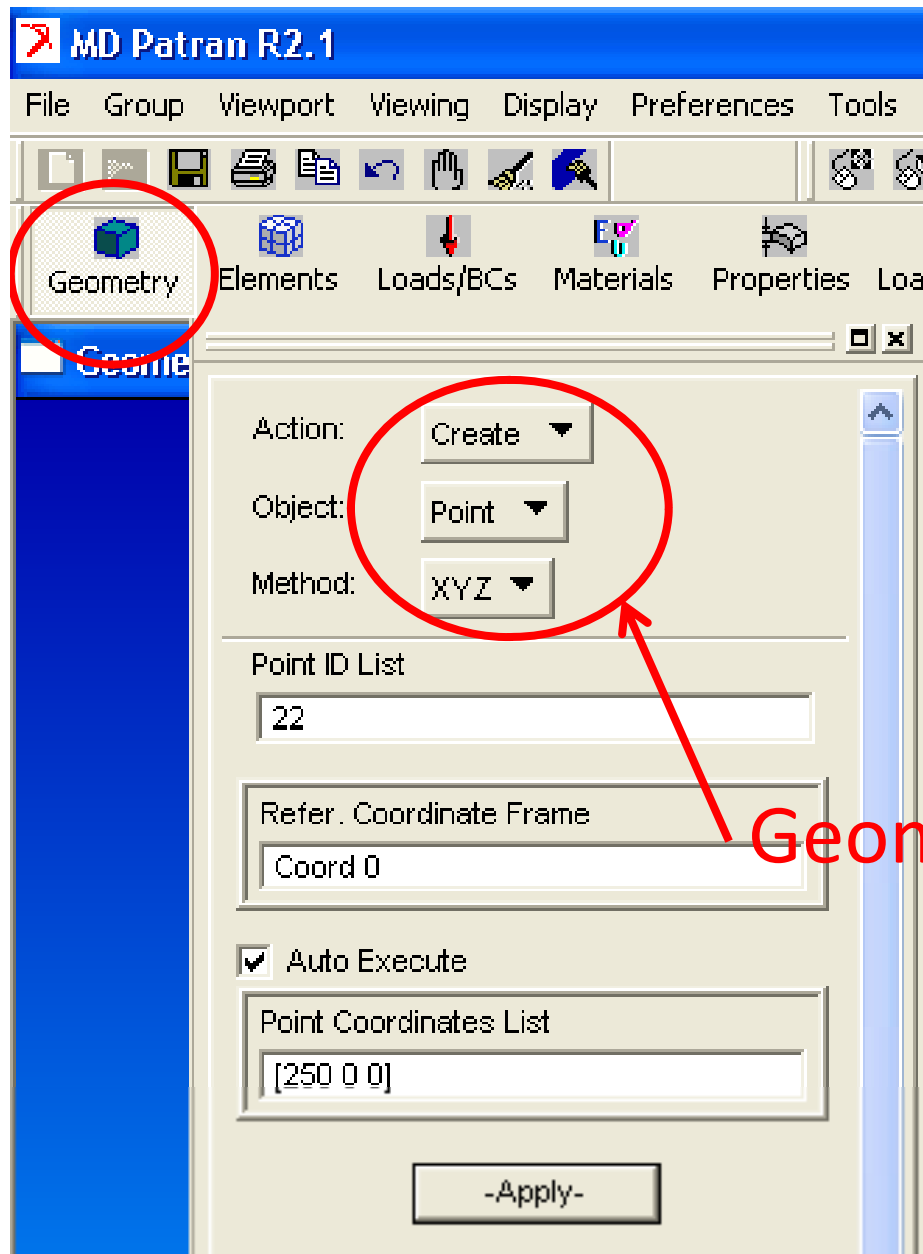
Se ha utilizado el programa “MD 2.1 Patran” para hacer el modelado de las probetas, los pasos que se han seguido son los siguientes:

4.1.2.1.1.Geometria



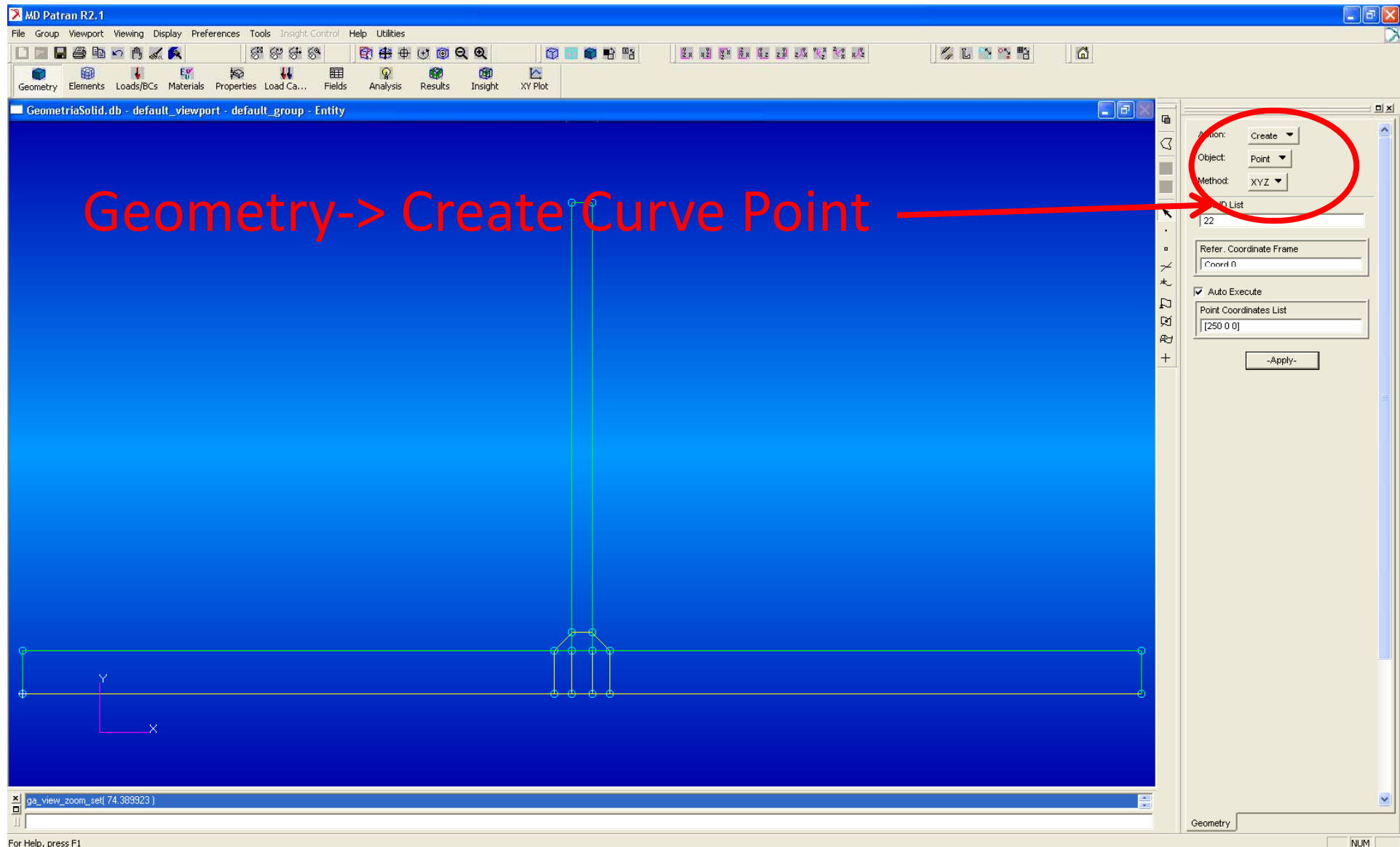
El mallado del modelo se ha realizado mediante extrusión así solo se ha necesitado la geometría de una cara lateral de la probeta

Elements->Sweep/Element/Extrude



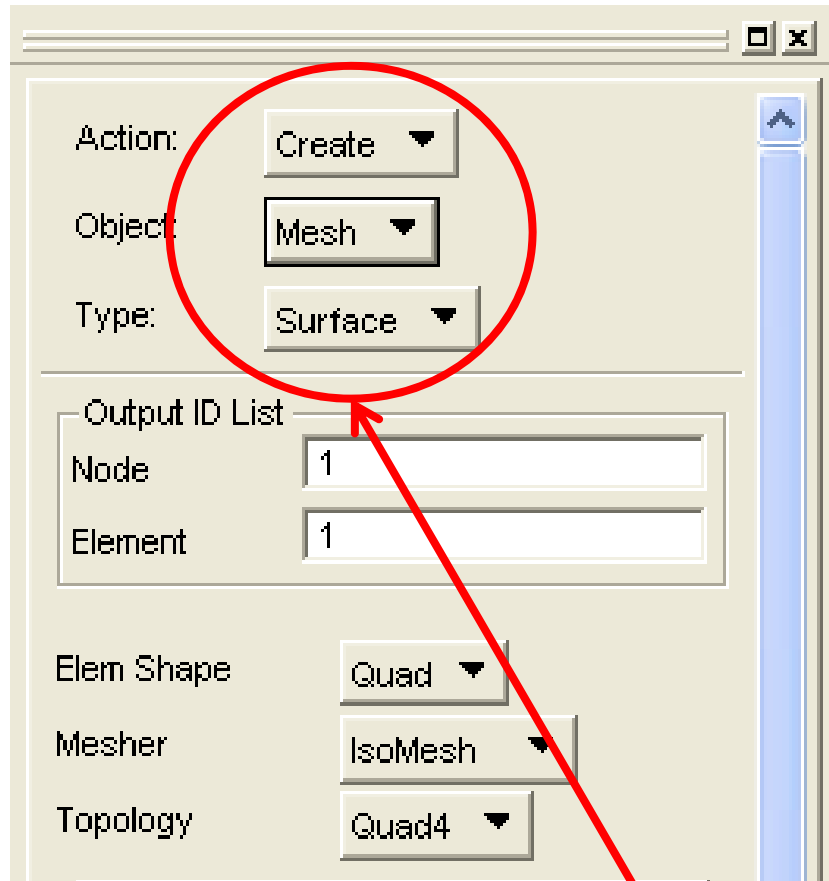
Mediante la herramienta Geometry se crean los puntos

Geometry-> Create/Point/XYZ



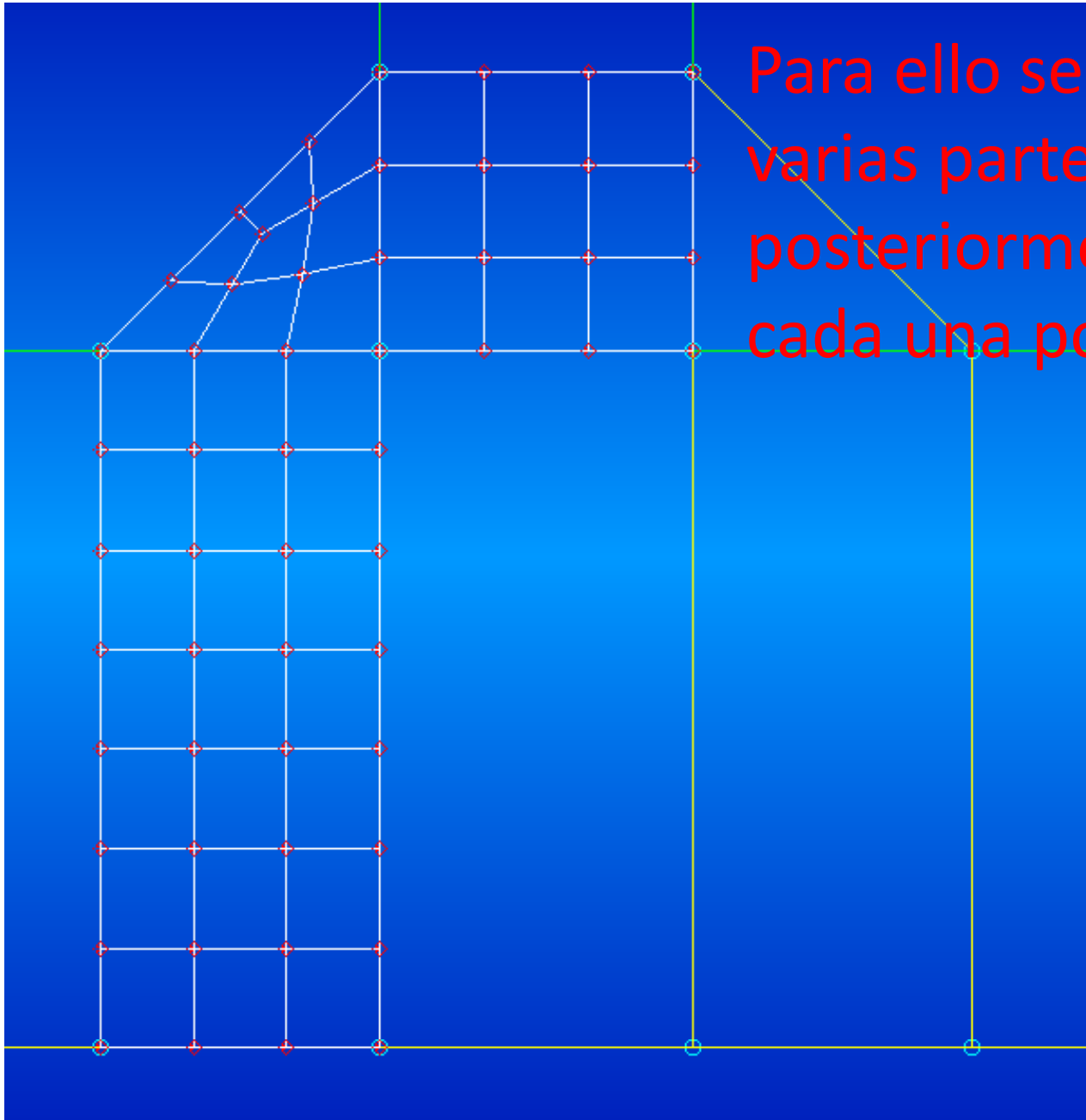
Y posteriormente se unen los puntos para crear una superficie. Asi se concluye toda la geometría necesaria para el modelo.

4.1.2.1.2 Mallado



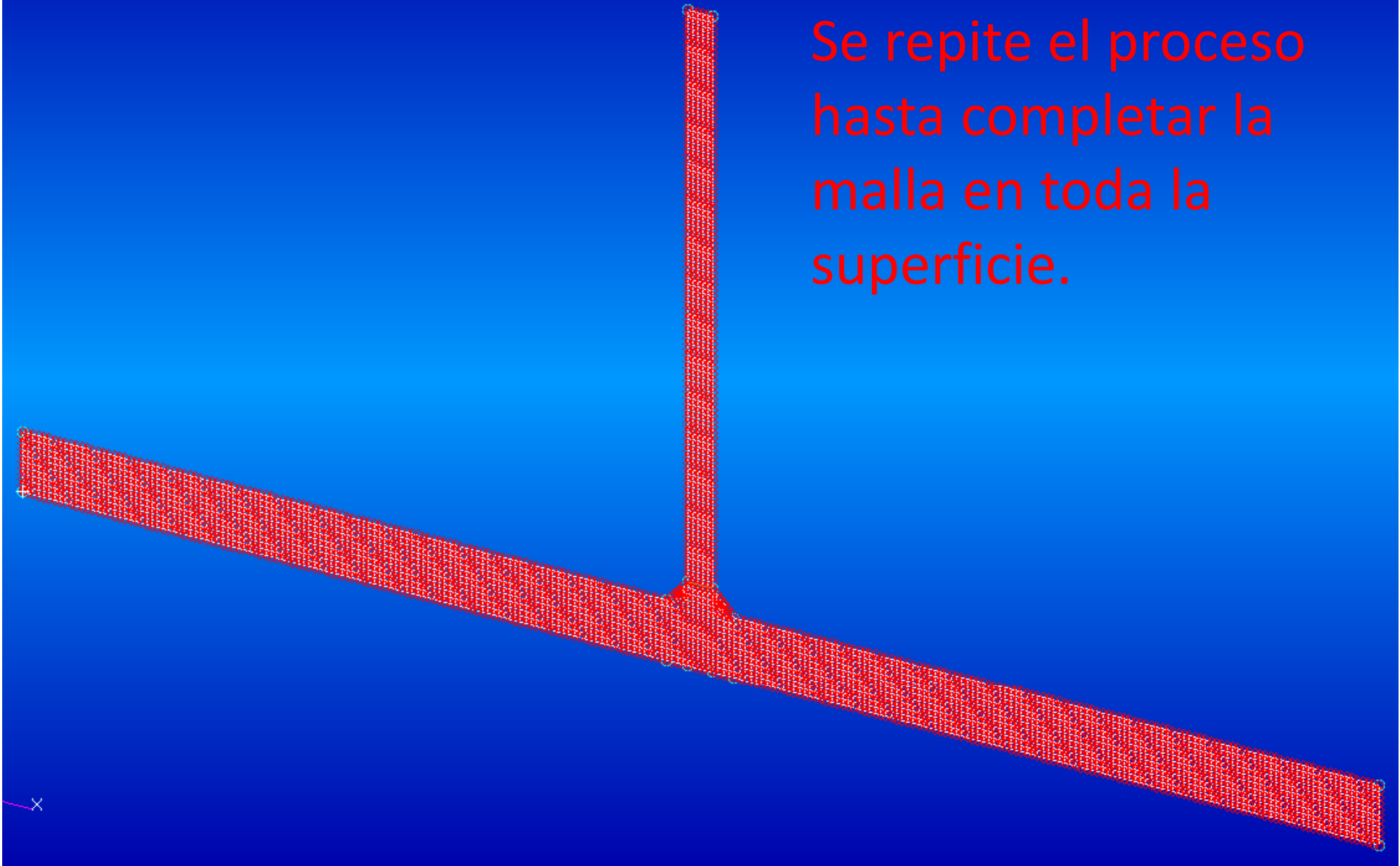
Para mallar una superficie se utiliza la herramienta, se eligen elementos Quad (tipo Shell de dos dimensiones) ya que al extruir la malla inicial, se les añade profundidad y estos se convertirán en elementos tridimensionales. Se tiene especial cuidado en el mallado de la parte de la unión soldada, ya que los nodos de elementos próximos deben estar en la misma posición para hacer una malla uniforme.

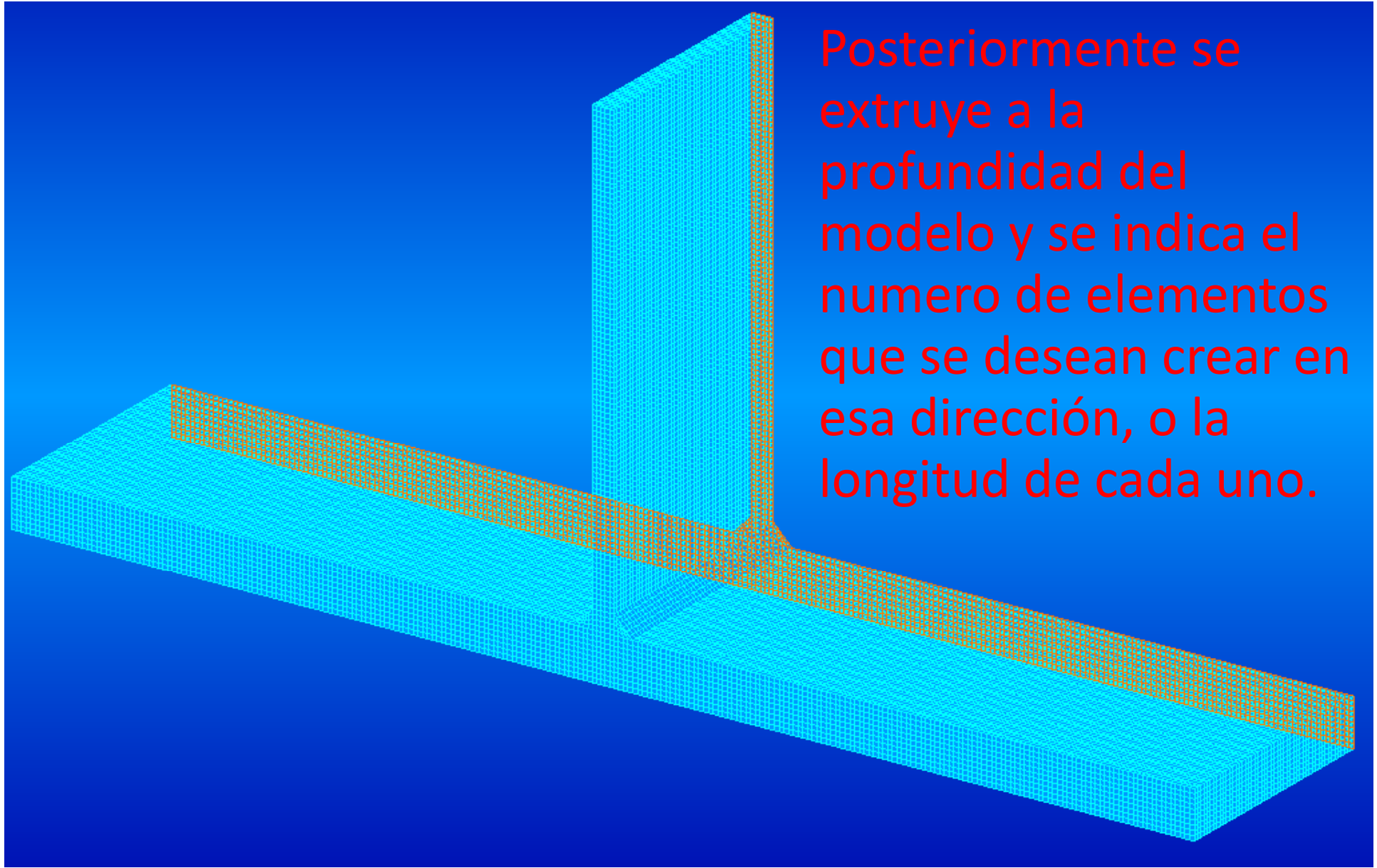
Elements-> Create/Mesh/Surface



Para ello se divide en varias partes y posteriormente se malla cada una por separado.

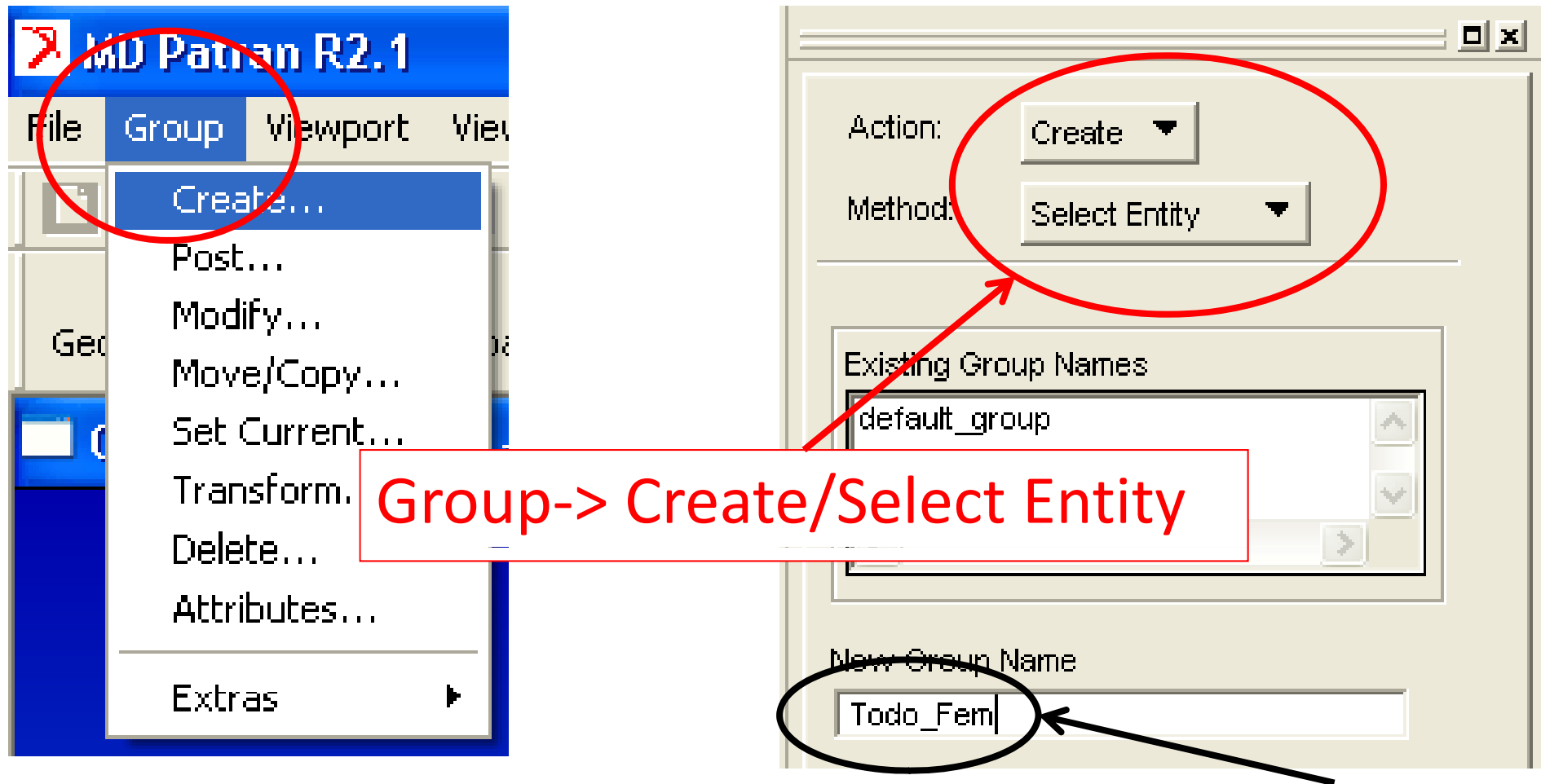
Se repite el proceso hasta completar la malla en toda la superficie.





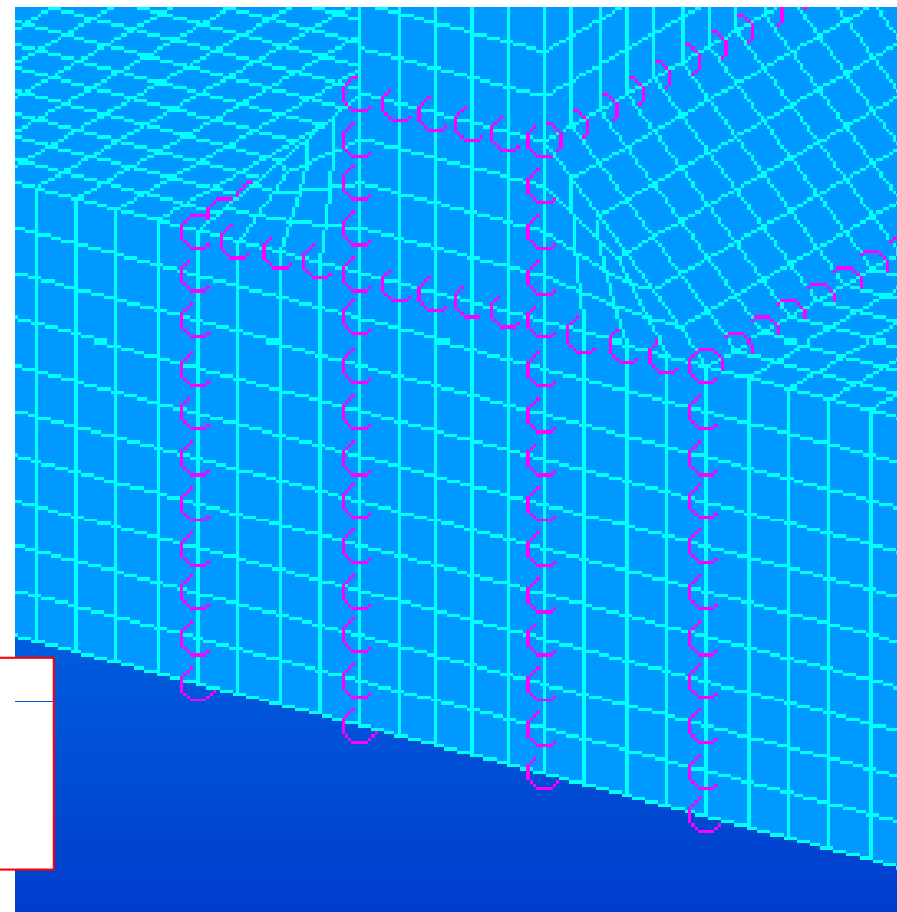
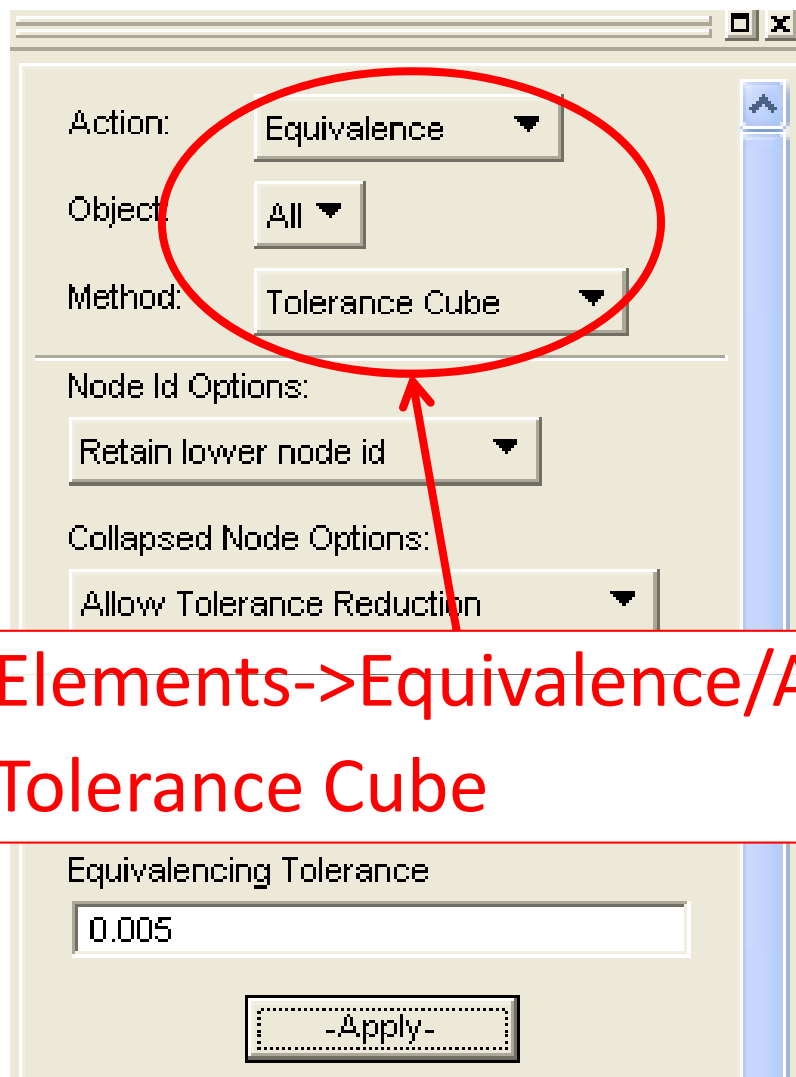
Posteriormente se extruye a la profundidad del modelo y se indica el numero de elementos que se desean crear en esa dirección, o la longitud de cada uno.

4.1.2.1.3 CREACIÓN DE LOS GRUPOS

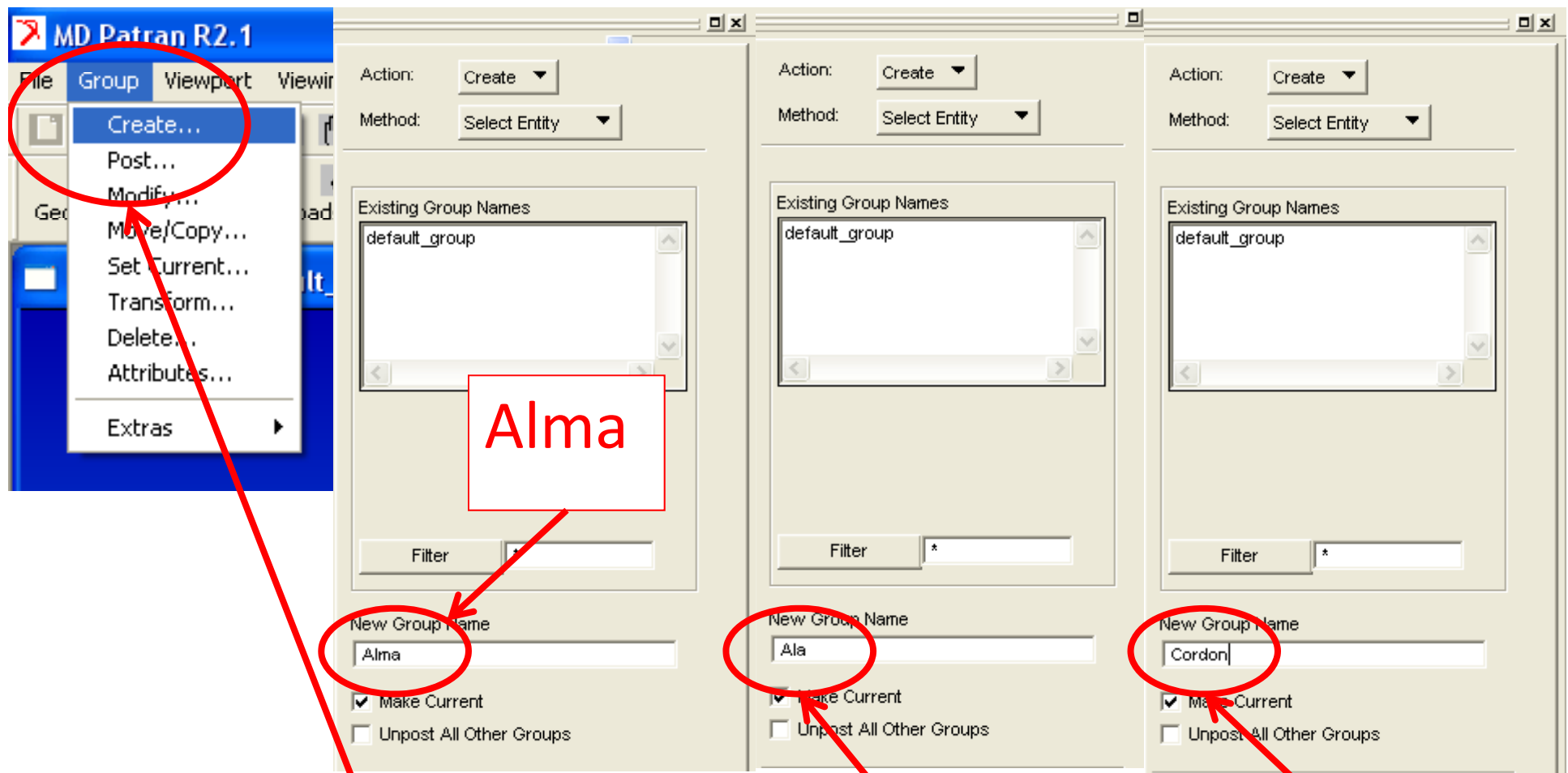


Para trabajar con más comodidad se crea un grupo llamado "Todo_Fem" que contiene todos los elementos tipo C3D8R (elementos tridimensionales tipo solid) y se eliminan los elementos Shell y la geometría.

4.1.2.1.4 UNIFICACIÓN DE LOS NODOS



La herramienta Equivalence se utiliza para unificar los nudos que están en el mismo espacio, de esta forma todos los elementos quedan unidos.



Se crean tres grupos nuevos que contengan los elementos de cada parte de la probeta para facilitar la asignación de los materiales.

4.1.2.1.5 MATERIALES

El siguiente paso es la creación de los siguientes materiales: **Alma_m**

Property Name	Value
Elastic Modulus =	2.1E+008
Poisson's Ratio =	0.30000001
Density =	7800.
Fraction Critical Damping =	
Mass Propornl Damping =	
Stiffness Propornl Damping =	
Reference Temperature =	
Thermal Expansion Coeff =	

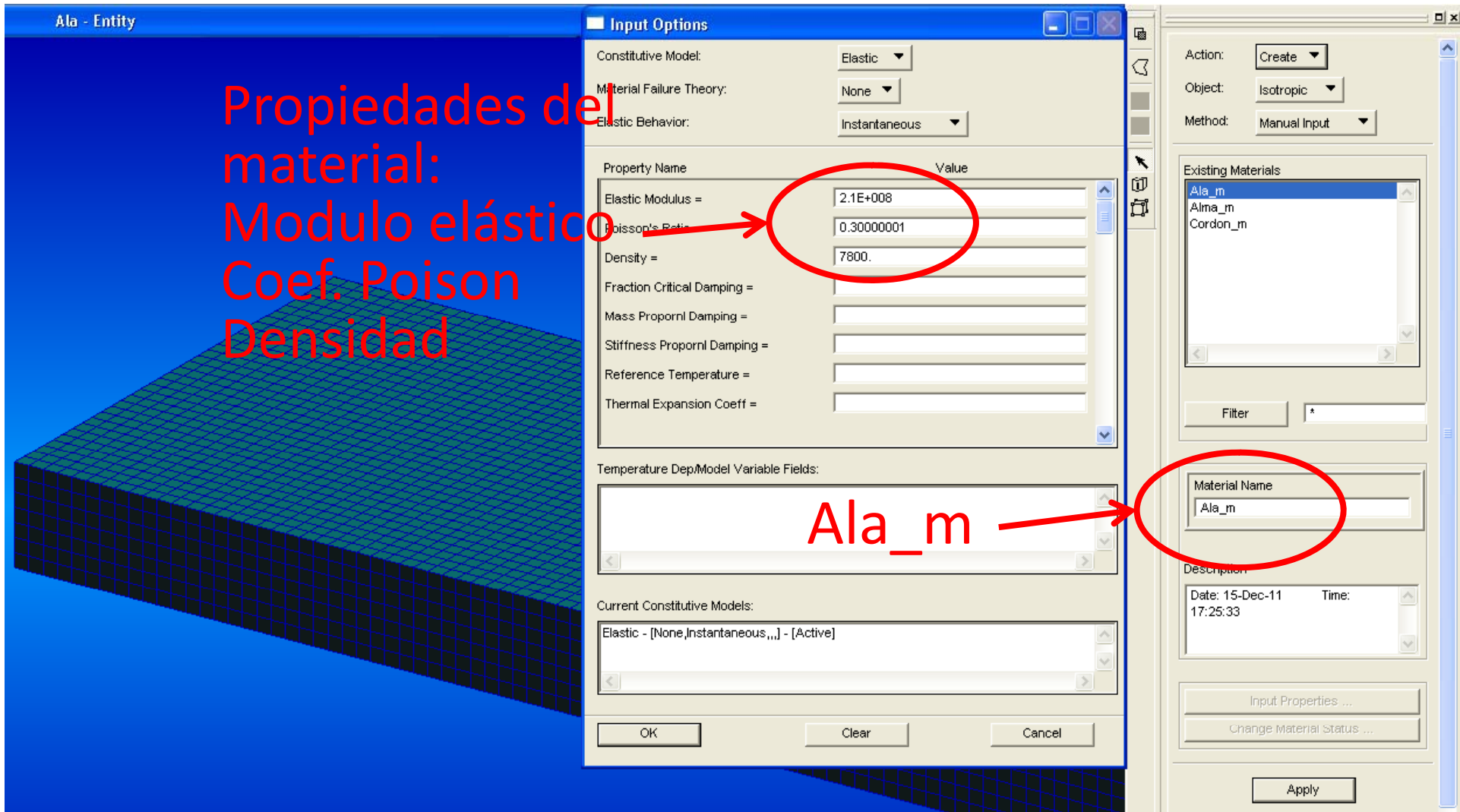
Material Name: Alma_m

Existing Materials: Ala_m, Alma_m, Cordon_m

Material Name: Alma_m

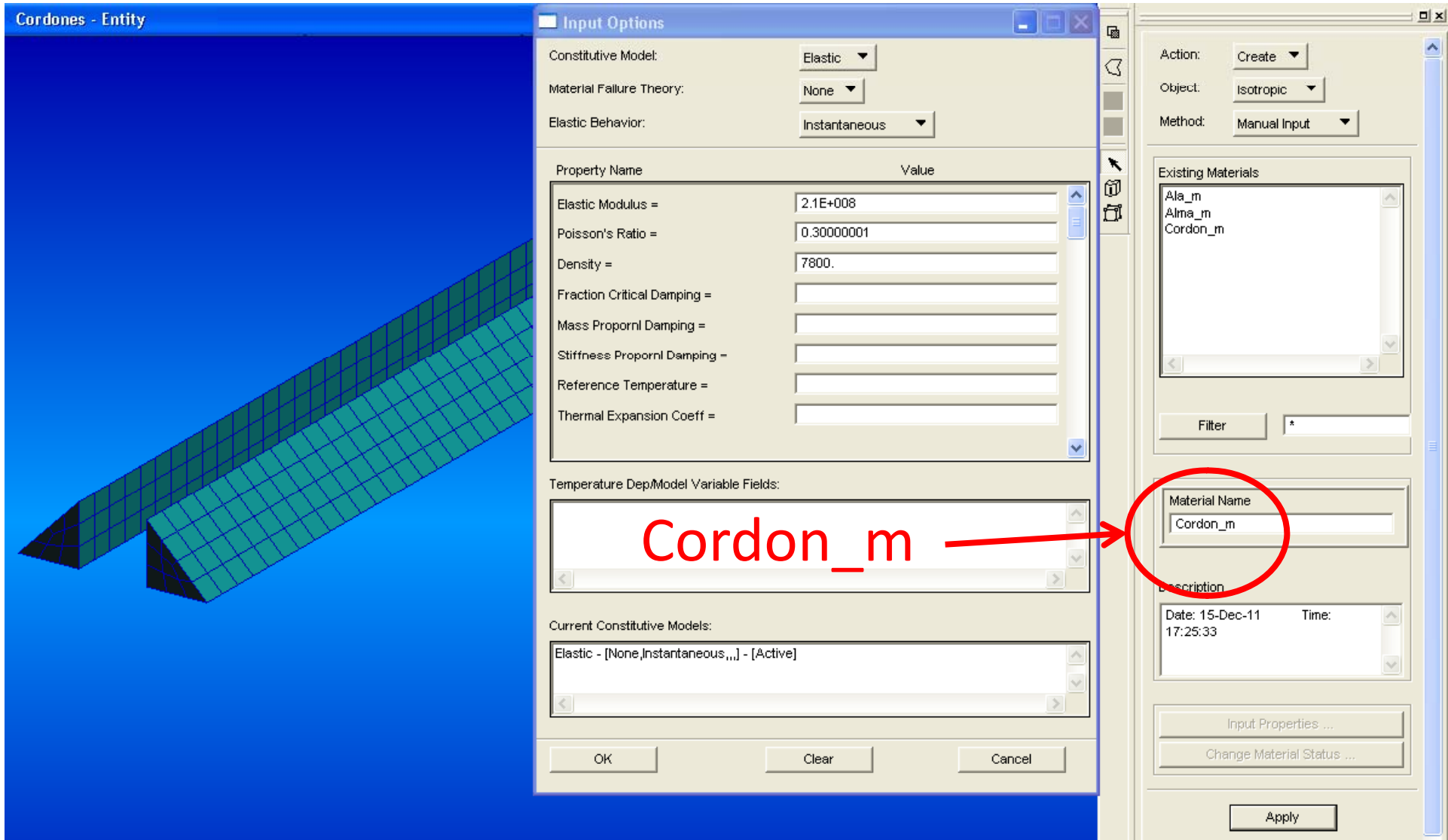
Description: Date: 15-Dec-11 Time: 17:25:33

Current Constitutive Models: Elastic - [None,Instantaneous,...] - [Active]



Propiedades del material:
Modulo elástico
Coef. Poison
Densidad

Ala_m



4.1.2.1.6 PROPIEDADES DE LA MALLA (SOLID)

Herramienta Properties->
Create/3D/Solid

Input Properties

Solid

Property Name	Value	Value Type
Material Name	:Alma_m	Mat Prop Name
[Orientation System]		CID
[Orientation Axis]		Integer
[Orientation Angle]		Real Scalar

Materials

- Ala_m
- Alma_m
- Cordon_m

Buttons: OK, Clear, Cancel

Action: Create

Object: 3D

Type: Solid

Prop. Sets By: Name

- Ala_p
- Alma_p
- Cordon_p

Filter: *

Property Set Name: Alma_p

Options:

- Homogeneous
- Standard Formulation

Buttons: Input Properties ..., Select Application Region ...

Buttons: Apply, Close 16

Asignación del material

4.1.2.1.6 PROPIEDADES DE LA MALLA (SHELL)

Herramienta Properties-> Create/2D/Solid

Material Name: Alma_m
Shell Thickness: 4.5
Mat Prop Name: Real Scalar
[# Integration Points]: Integer
[Orientation System]: CID
[Orientation Axis]: Integer
[Orientation Angle]: Real Scalar
[Fractional Offset]:
[Average Shear Strain]:

Materials:
Ala_m
Alma_m
Cordon_m

Action: Create
Object: 2D
Type: Shell

Prop. Sets By Name:
Ala_p
Alma_p
Cordon_p

Filter: *
Property Set Name: Alma_p

Options:
Thin
Homogeneous

Input Properties ...
Select Application Region ...

OK Clear Cancel

En este caso la malla es de tipo shell, y a parte de asignarle el material tambien se le asigna el espesor

4.1.2.1.7 APOYOS Y CARGAS

Con la herramienta Loads/BCs se crean las cargas y las condiciones de apoyo

Loads/BCs-> Create/
Displacement/ Nodal

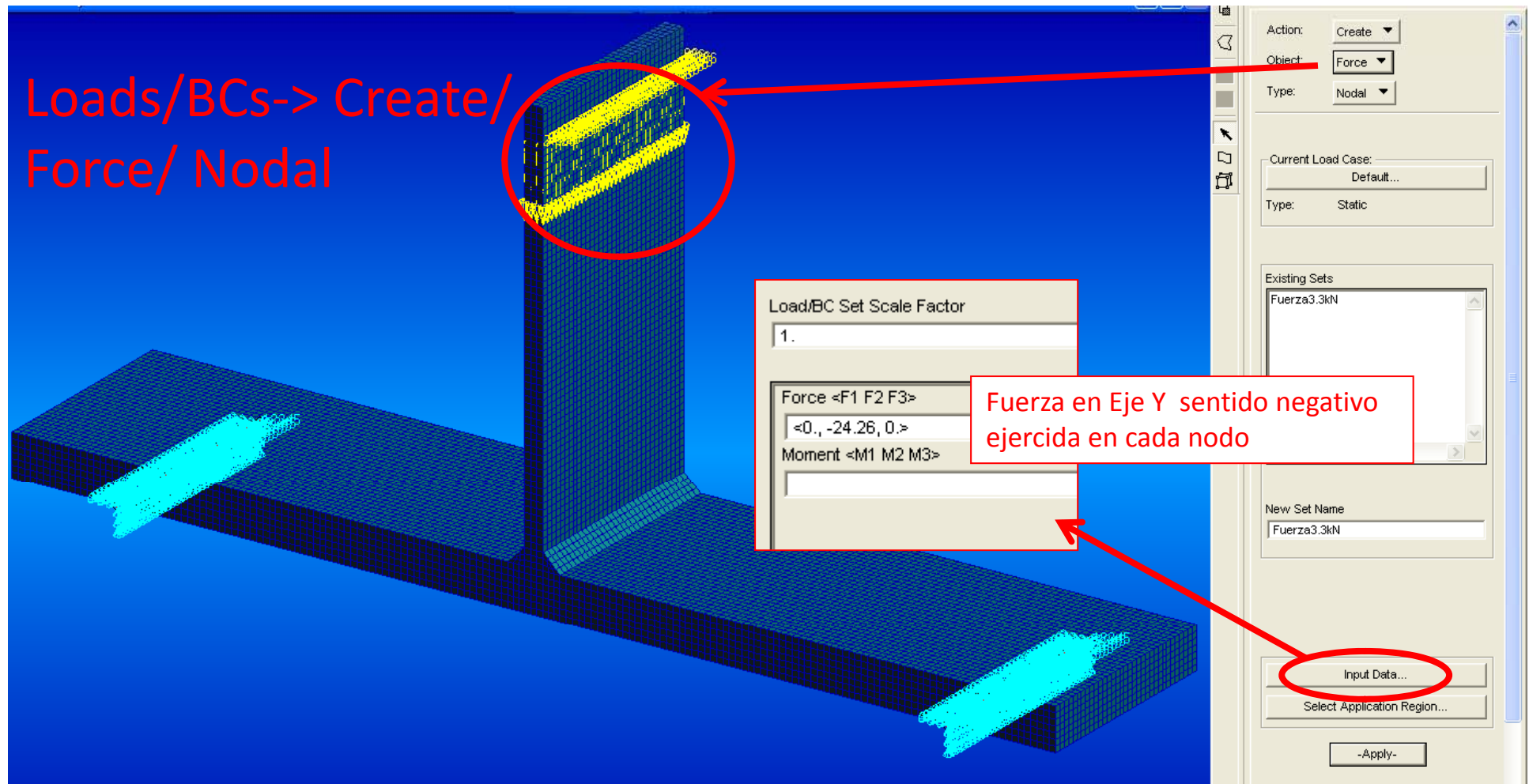
Restringido en ejes: X,Y,Z

Restringido en ejes: X,Y eje Z libre

Input Data...

4.1.2.1.7 APOYOS Y CARGAS

Loads/BCs-> Create/
Force/ Nodal

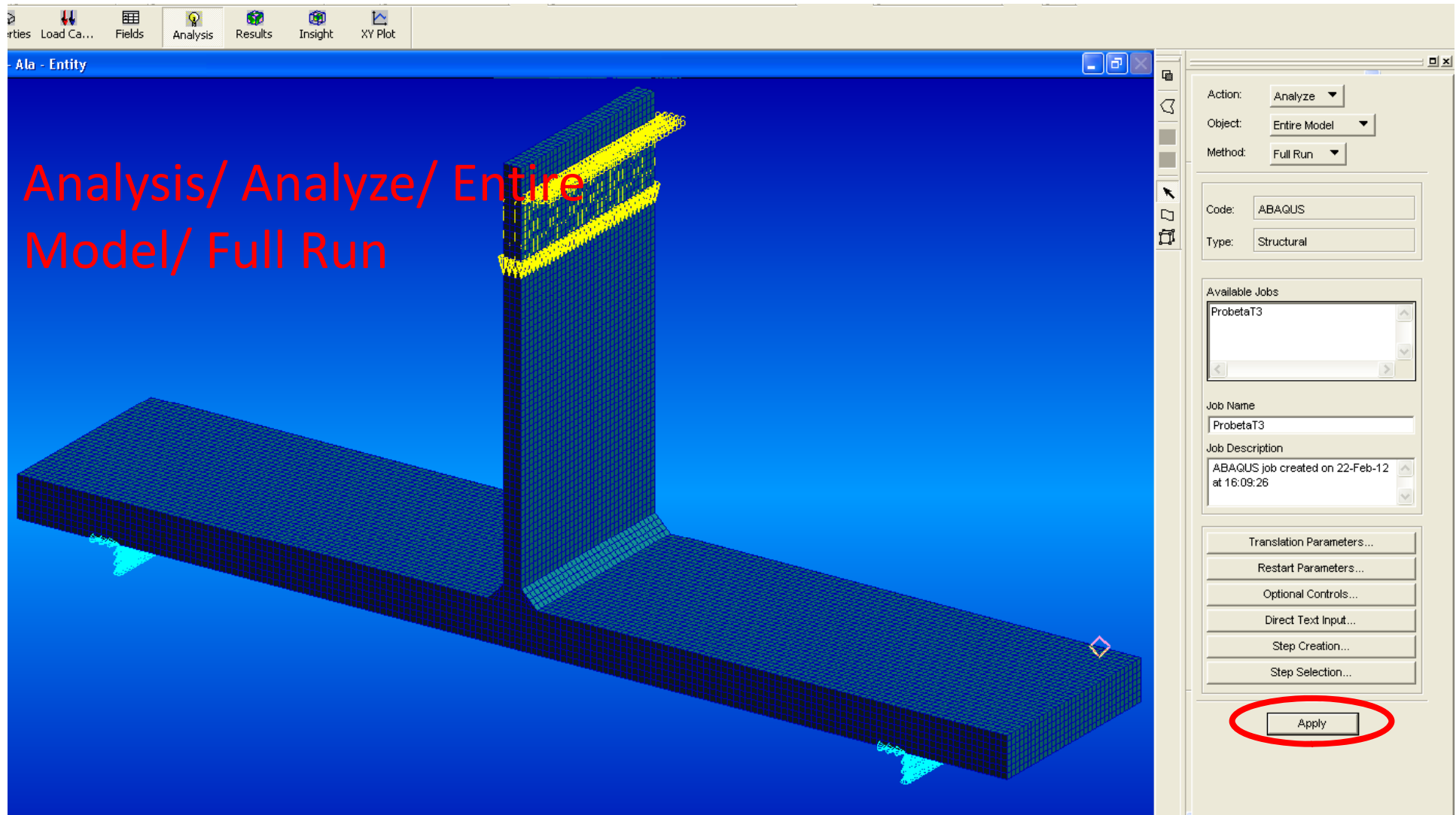


4.1.2.2 CÁLCULO DEL MODELO

Se han utilizado los programas “MD 2.1 Patran” y “Abaqus 6.11-2” para hacer el análisis del modelo, los pasos que se han seguido son los siguientes:

4.1.2.2.1 ANALISIS CON CARGAS

Con la herramienta Analysis se analiza el modelo

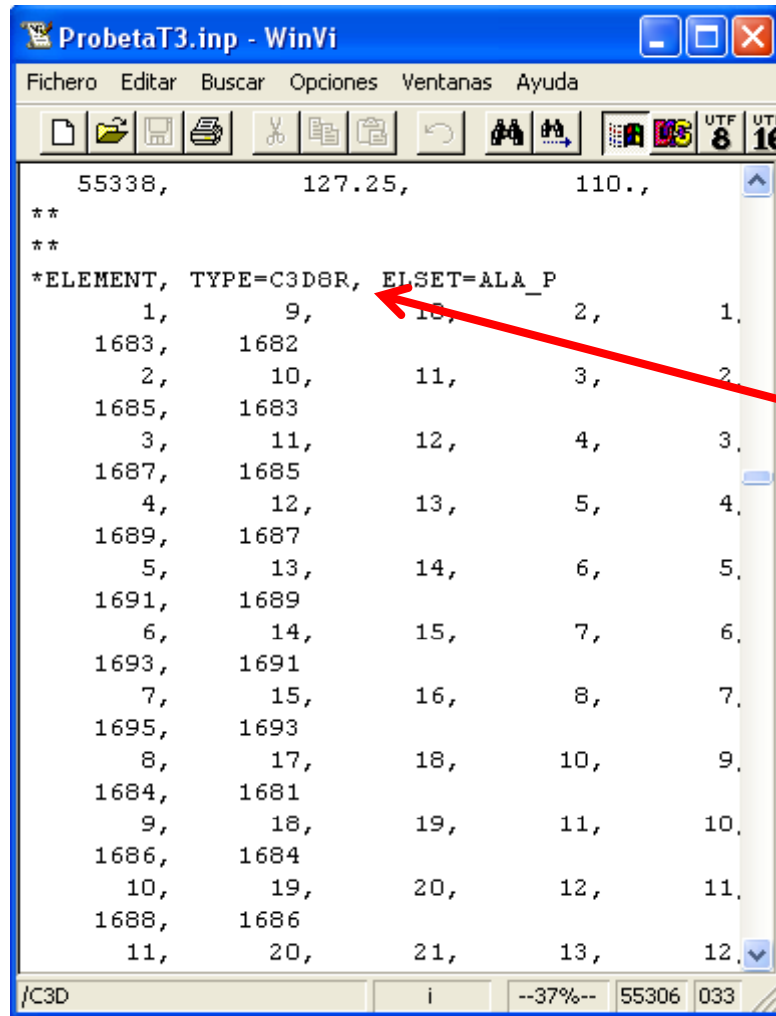


En la carpeta donde se encuentra el archivo de Patran se crea un archivo de texto “.inp” que se compilará con Abaqus command

4.1.2.2.1 COMPILACIÓN

El archivo “.inp” es totalmente modificable, lo que significa que si se quiere cambiar datos como propiedades del material, carga aplicada, etc, se puede hacer directamente en el archivo de texto sin necesidad de abrir Patran.

4.1.2.2.2 MODIFICACIÓN PARA EL CALCULO CON CARGAS



```
55338,      127.25,      110.,
**
**
*ELEMENT, TYPE=C3D8R, ELSET=ALA_P
  1,      9,      10,      2,      1,
1683,      1682
  2,      10,      11,      3,      2,
1685,      1683
  3,      11,      12,      4,      3,
1687,      1685
  4,      12,      13,      5,      4,
1689,      1687
  5,      13,      14,      6,      5,
1691,      1689
  6,      14,      15,      7,      6,
1693,      1691
  7,      15,      16,      8,      7,
1695,      1693
  8,      17,      18,      10,      9,
1684,      1681
  9,      18,      19,      11,      10,
1686,      1684
  10,      19,      20,      12,      11,
1688,      1686
  11,      20,      21,      13,      12,
```

Se cambian los tipos de elemento:

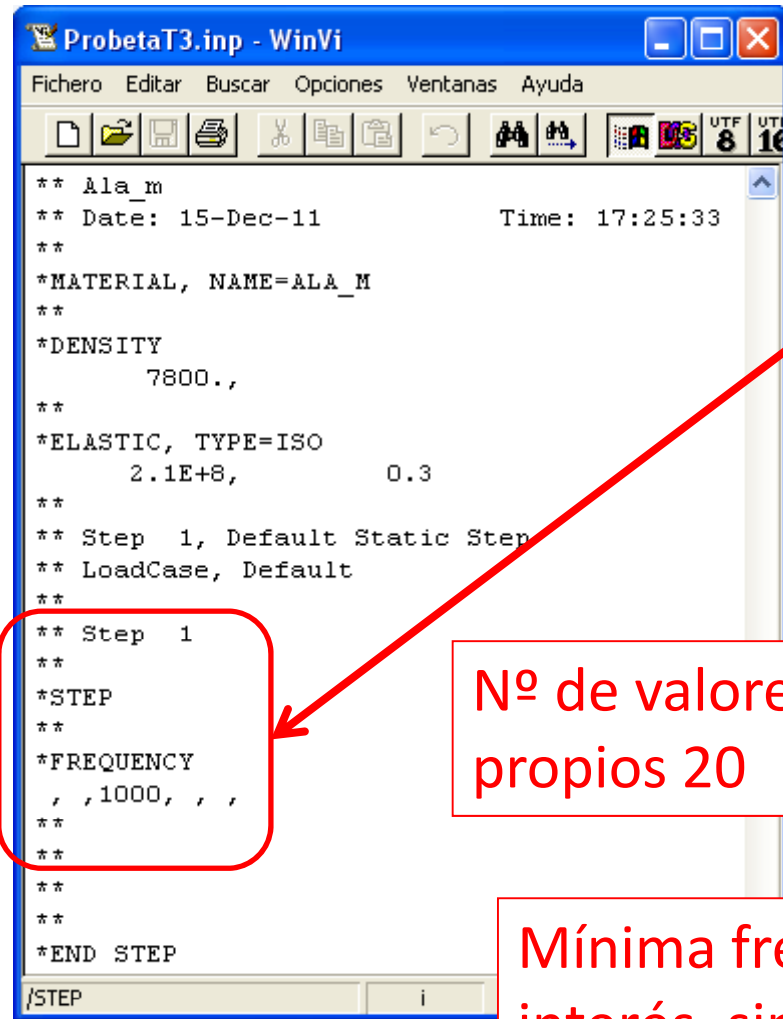
ELEMENTOS SOLID

C3D8-> C3D8R

ELEMENTOS SHELL

S4R5-> S4R

4.1.2.2.3 MODIFICACIÓN PARA EL CALCULO DEL ANÁLISIS MODAL



```
** Ala_m
** Date: 15-Dec-11 Time: 17:25:33
**
** *MATERIAL, NAME=ALA_M
**
** *DENSITY
7800.,
**
** *ELASTIC, TYPE=ISO
2.1E+8, 0.3
**
** Step 1, Default Static Step
** LoadCase, Default
**
** Step 1
**
** *STEP
**
** *FREQUENCY
, ,1000, , ,
**
**
**
** *END STEP
/STEP
```

Carta de análisis modal:

** Step 1

**

*STEP

**

*FREQUENCY

20, ,1000, , ,

**

Nº de valores propios 20

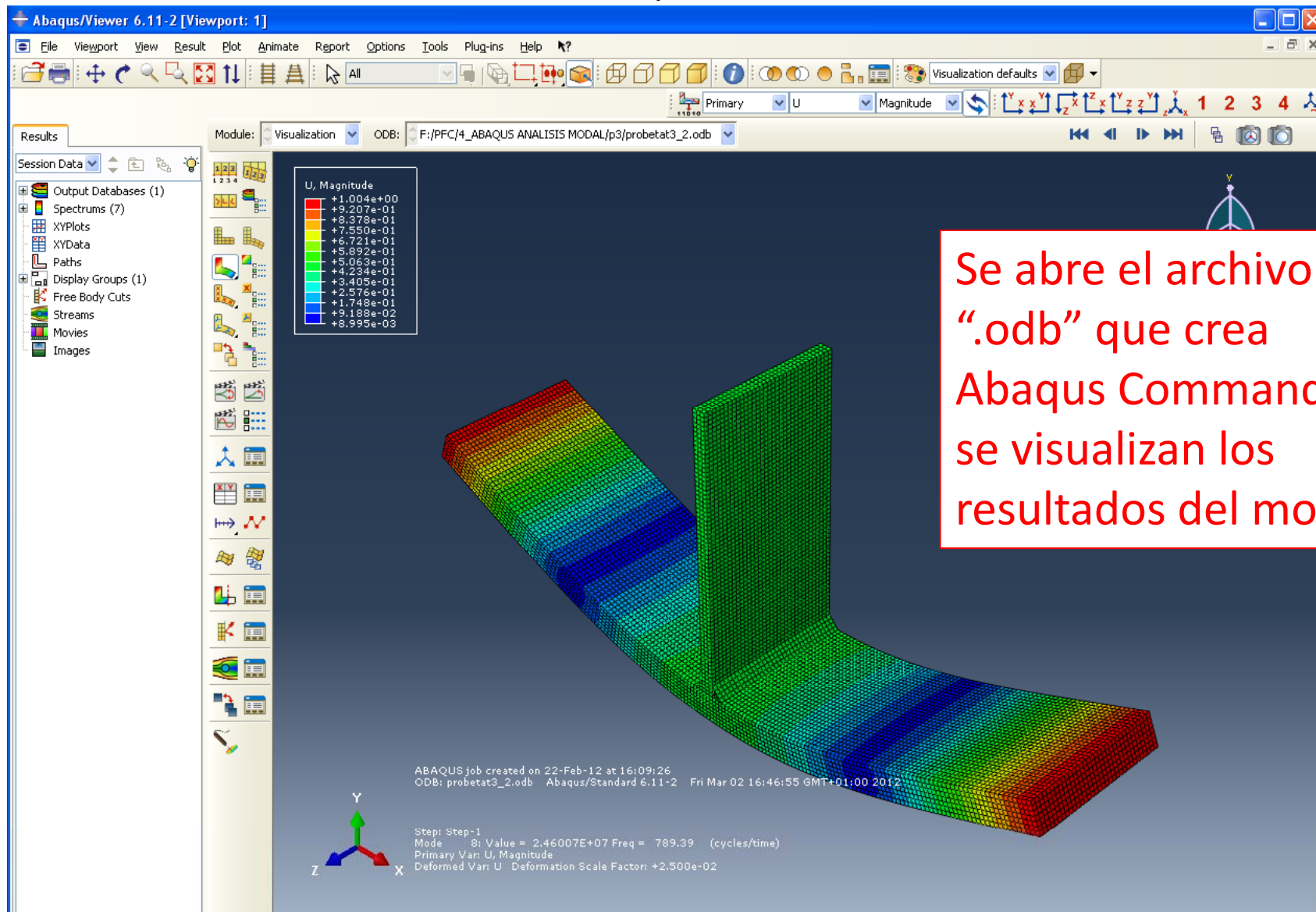
Mínima frecuencia de interés, sin restricción

Máxima frecuencia de interés 1000Hz

4.1.2.3 POSTPROCESO CON ABAQUS VIEWER

Se ha utilizado el programa “Abaqus Viewer” para visualizar los resultados obtenidos, los pasos que se han seguido son los siguientes:

4.1.2.3.1 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS CON ABAQUS VIEWER



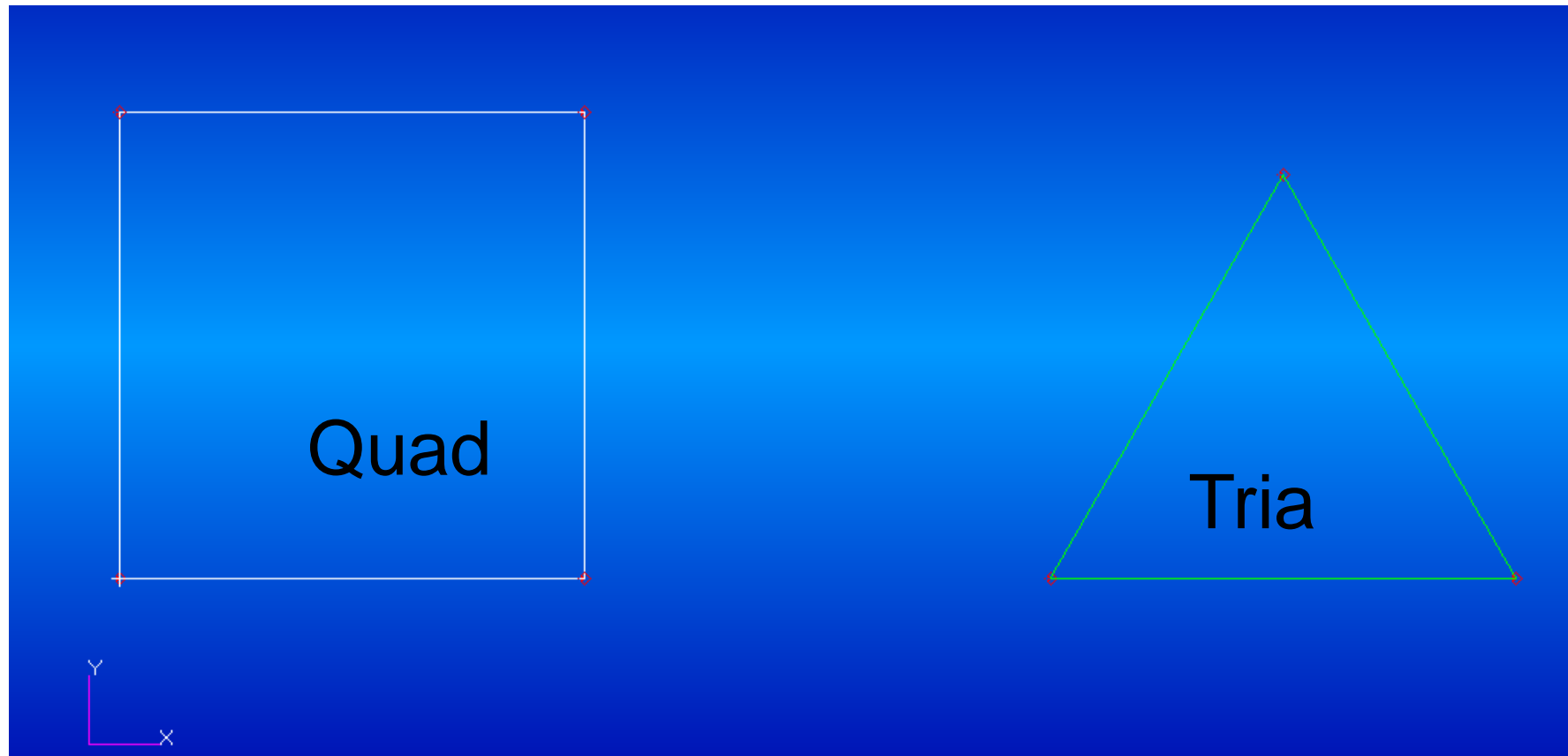
Se abre el archivo ".odb" que crea Abaqus Command, y se visualizan los resultados del modelo

ANEXO 4.1.3 MODELOS MEF

Se han realizado 8 modelos para contrastar los resultados y elegir posteriormente el más preciso comparándolos con los resultados experimentales del laboratorio. Varía el tipo de mallado de las placas y del cordón, se utilizarán elementos tipo Shell y Solid.

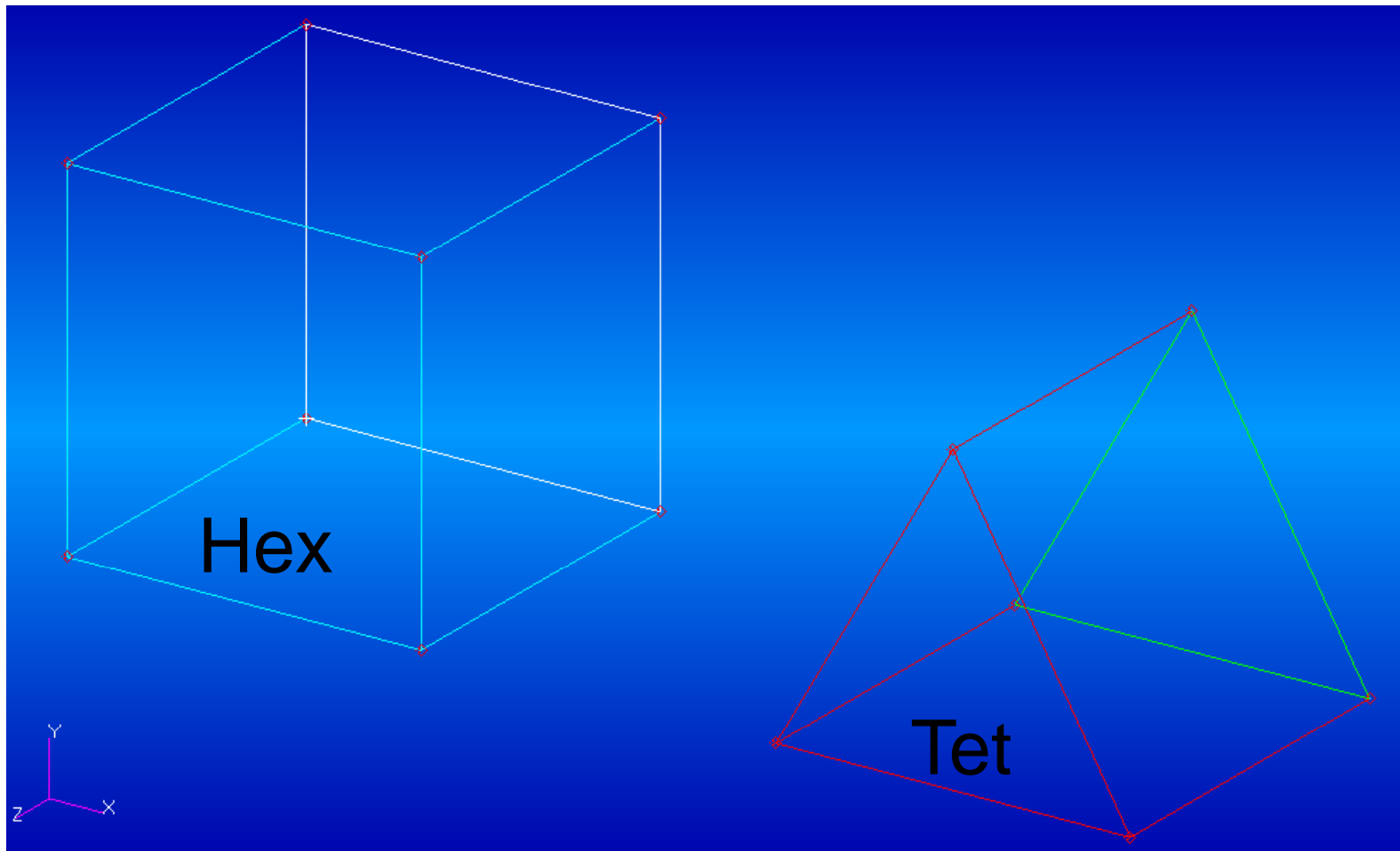
ELEMENTOS TIPO SHELL

- Son elementos de mallado de dos dimensiones.

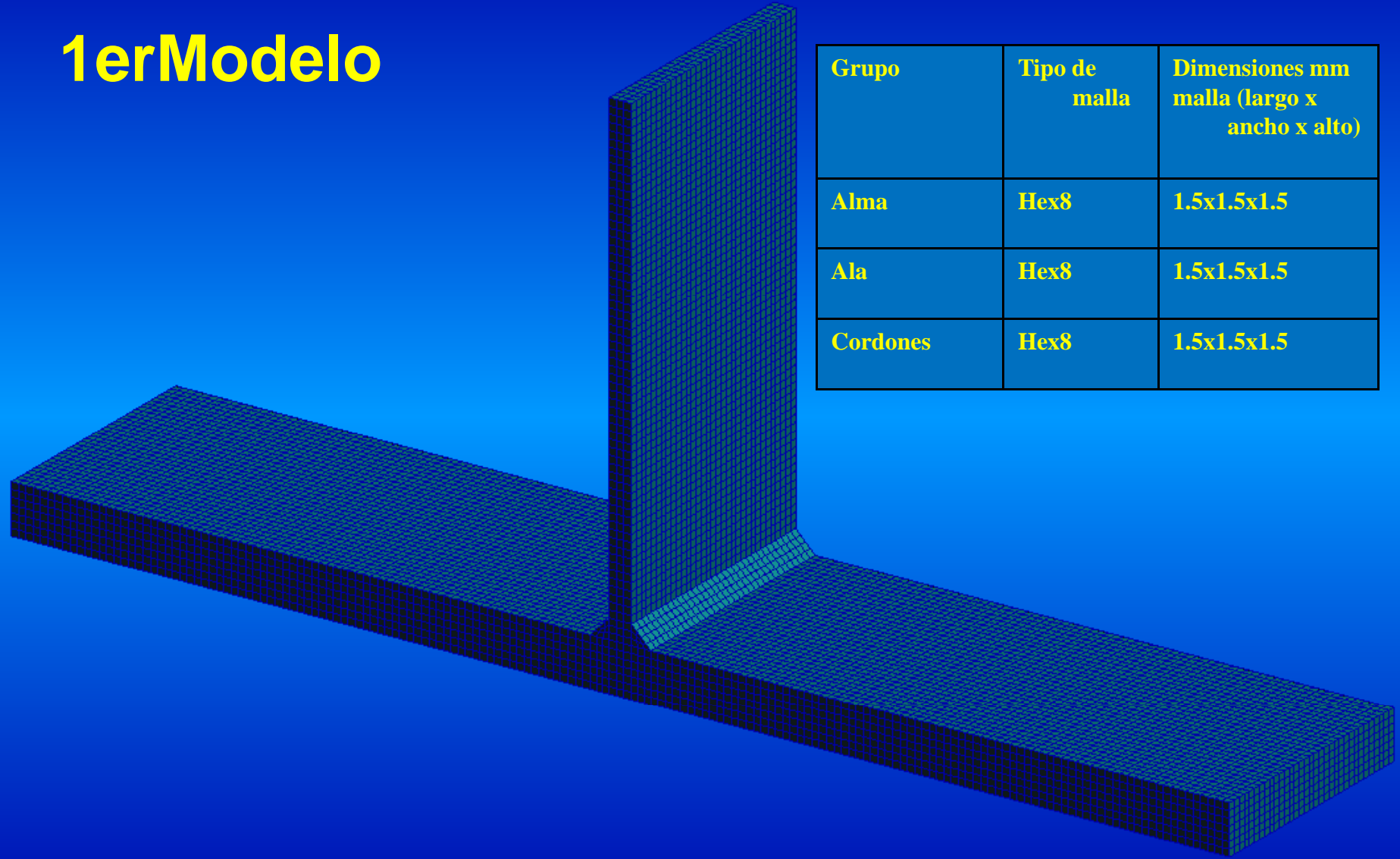


ELEMENTOS TIPO SOLID

- Son elementos de mallado de tres dimensiones.



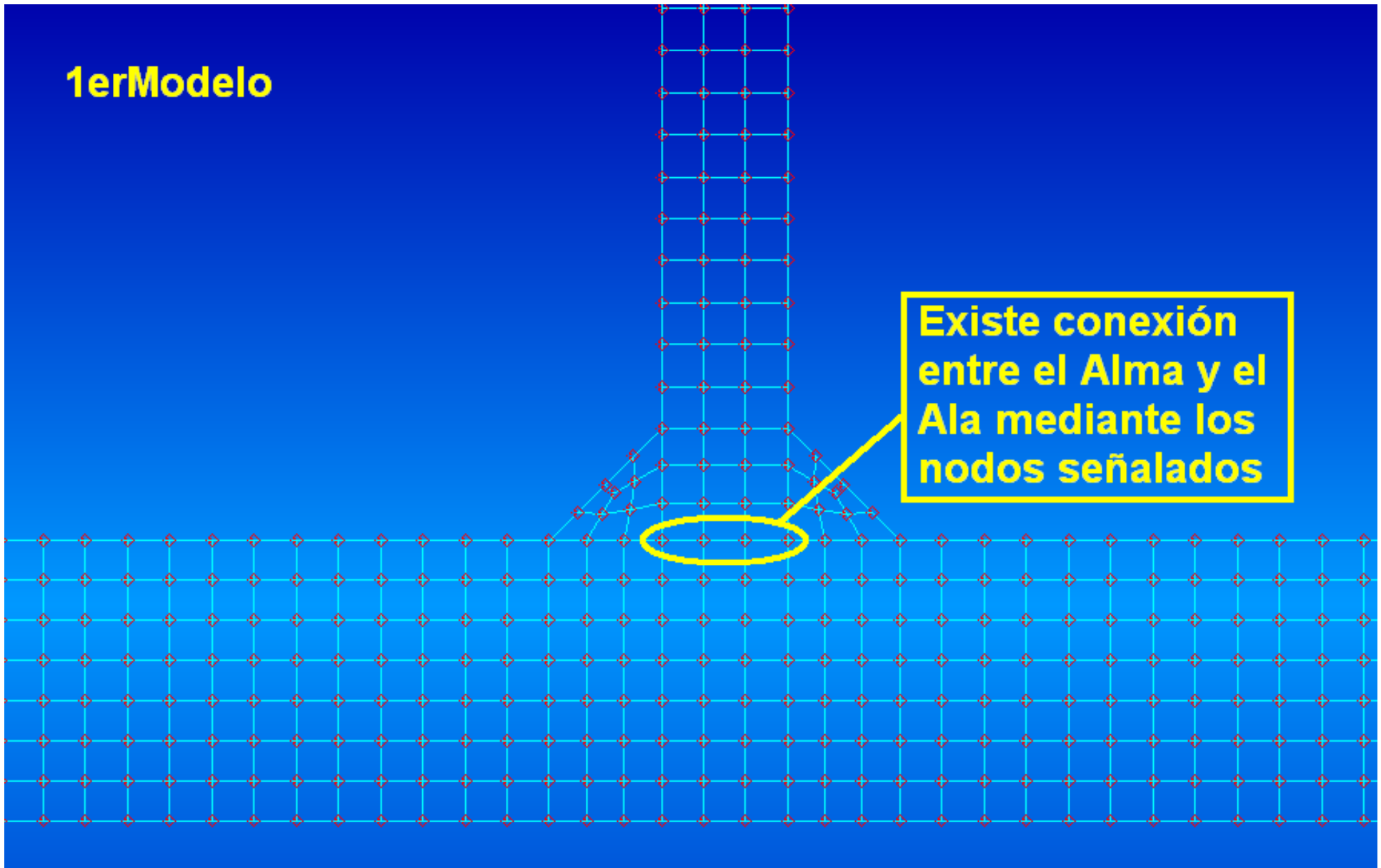
1erModelo



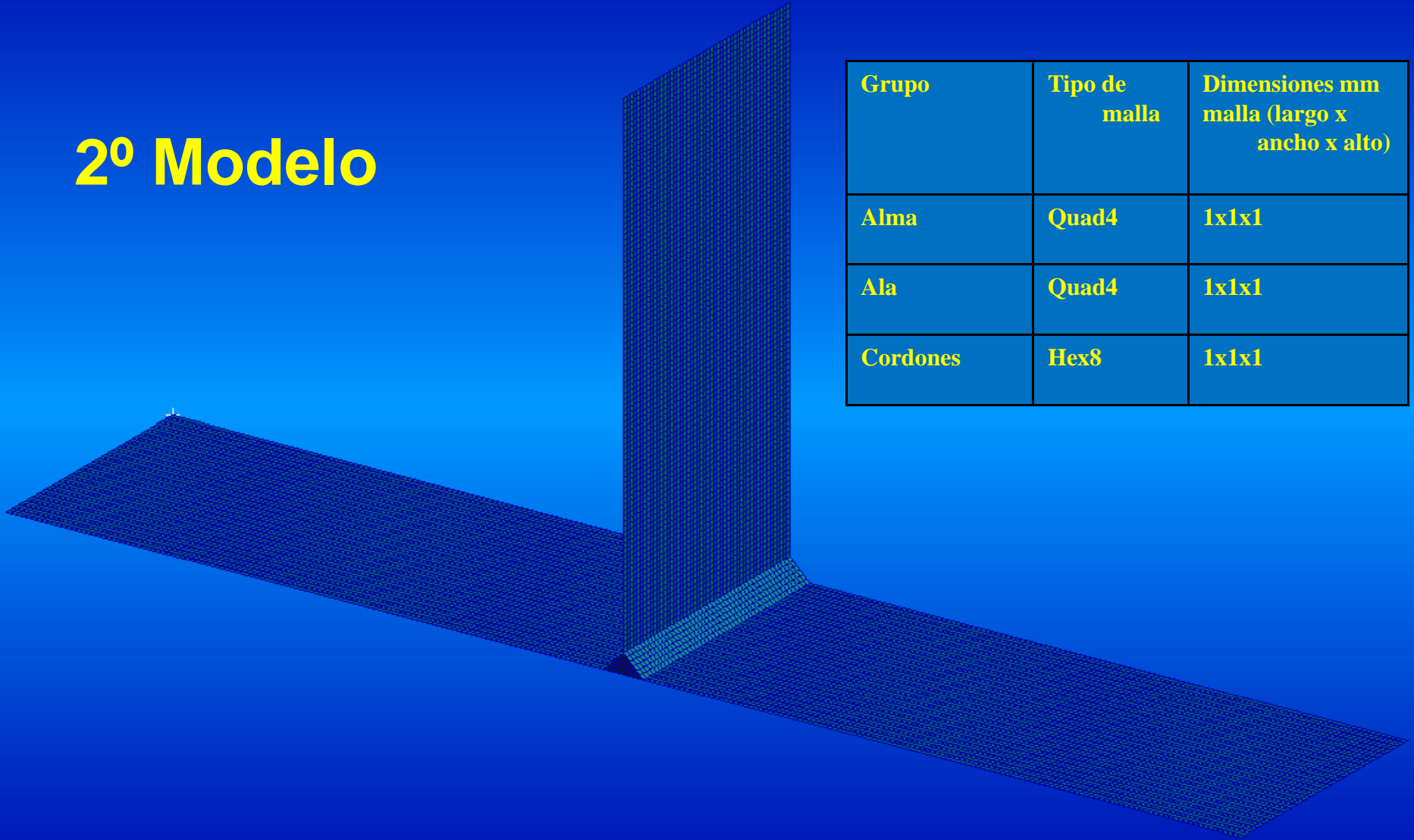
Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Hex8	1.5x1.5x1.5
Ala	Hex8	1.5x1.5x1.5
Cordones	Hex8	1.5x1.5x1.5

1erModelo

Existe conexión
entre el Alma y el
Ala mediante los
nodos señalados

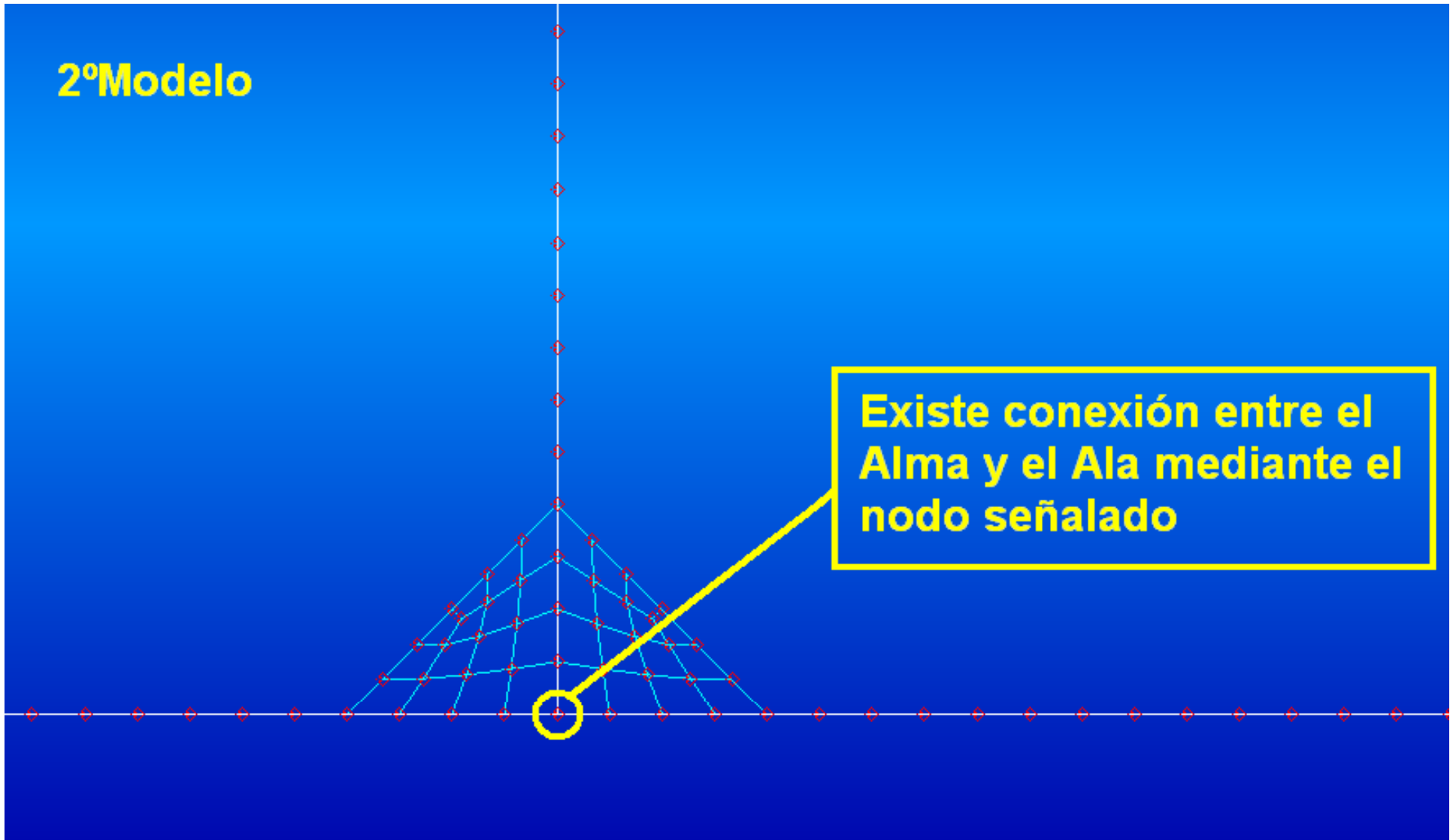


2º Modelo



Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Quad4	1x1x1
Ala	Quad4	1x1x1
Cordones	Hex8	1x1x1

2º Modelo

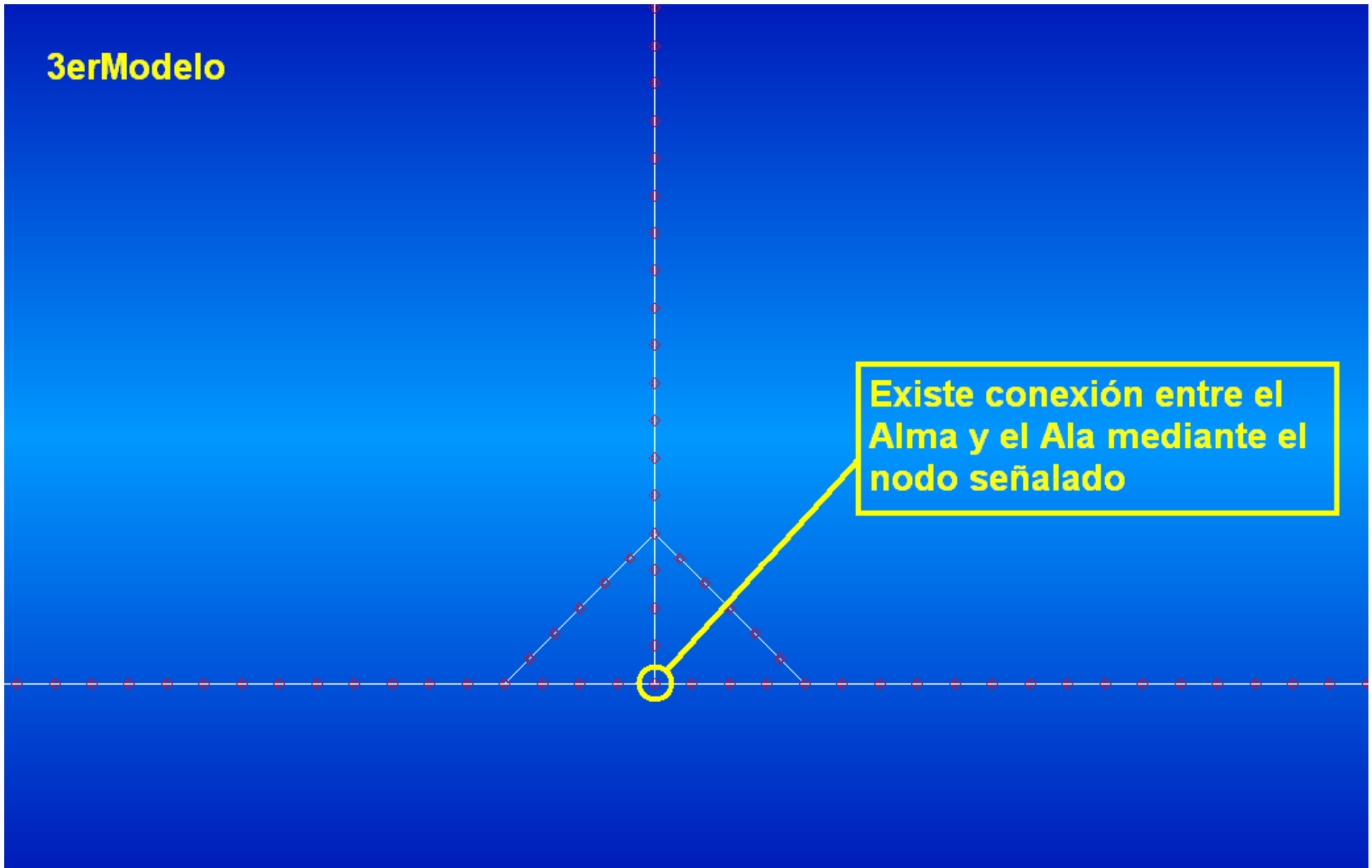


3erModelo

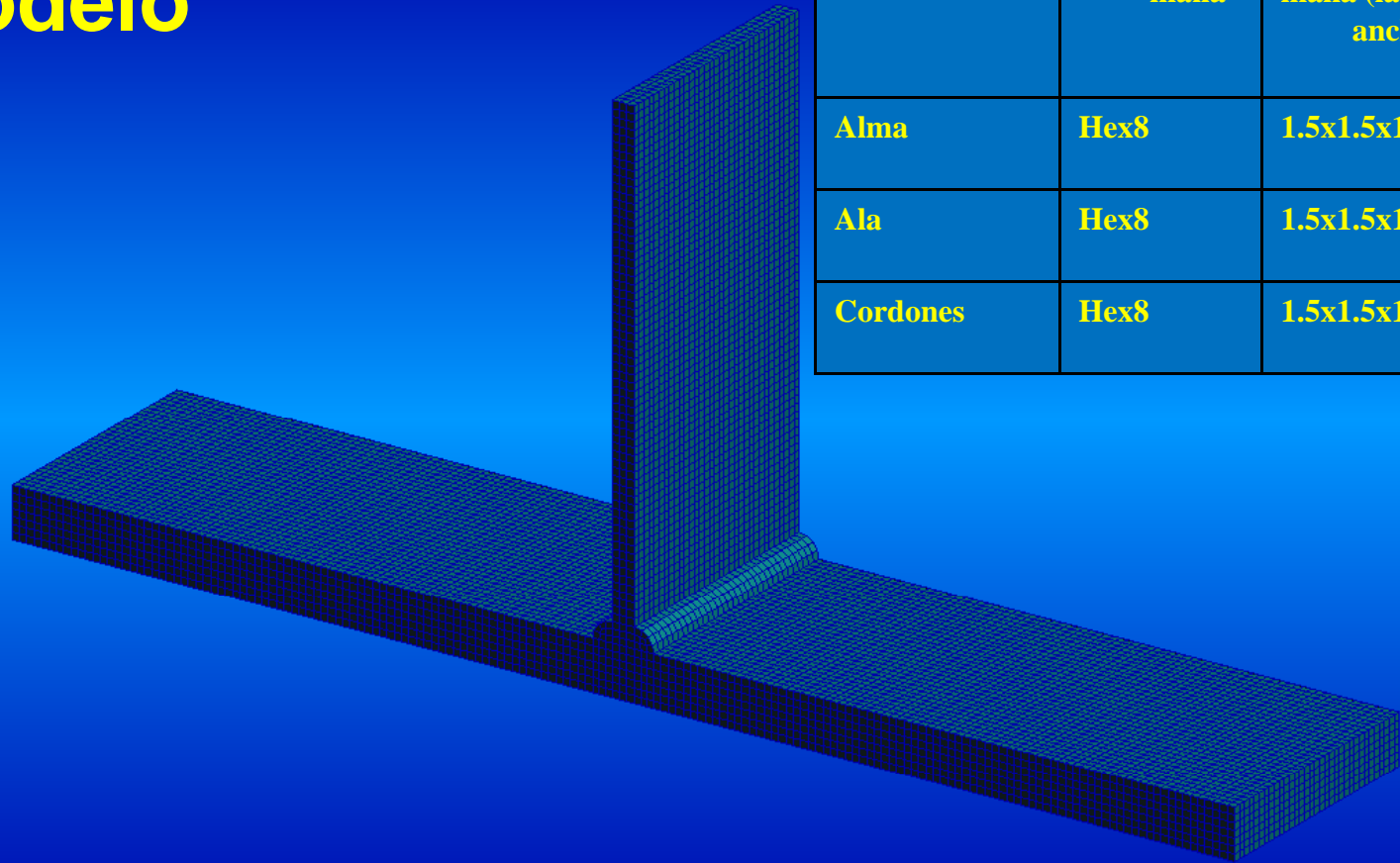


Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Quad4	1x1x1
Ala	Quad4	1x1x1
Cordones	Quad4	1x1x1

3erModelo



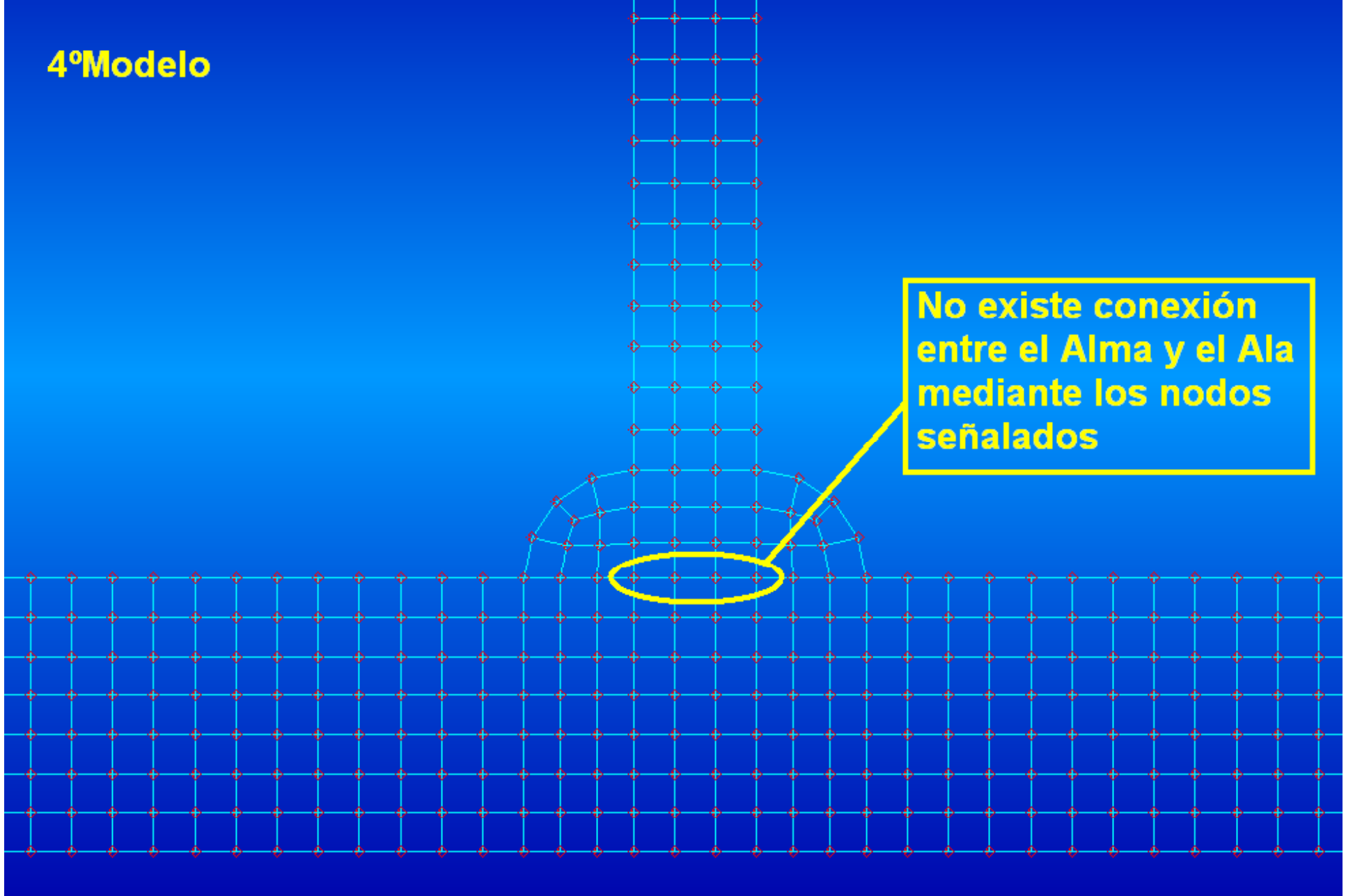
4º Modelo



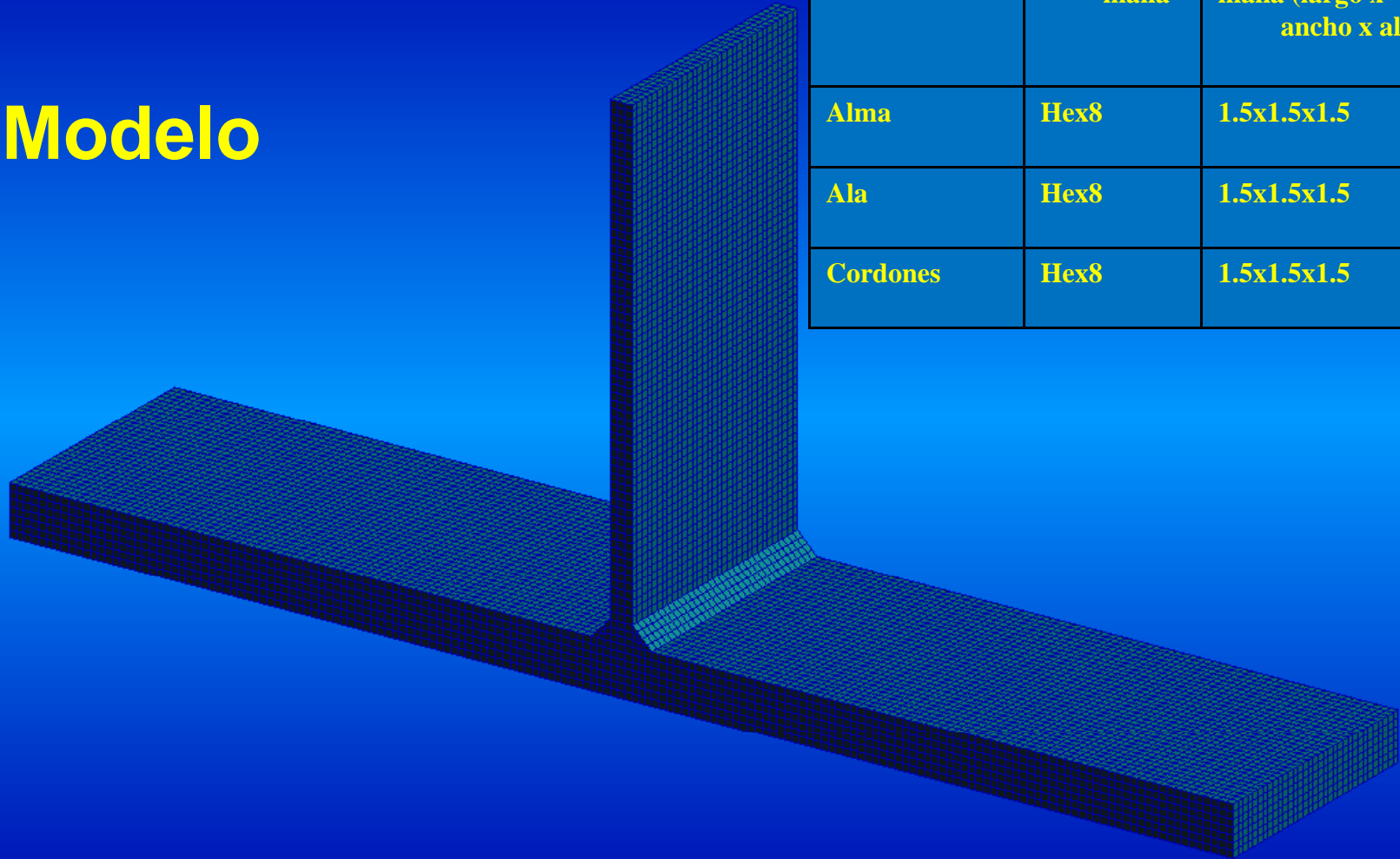
Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Hex8	1.5x1.5x1.5
Ala	Hex8	1.5x1.5x1.5
Cordones	Hex8	1.5x1.5x1.5

4º Modelo

No existe conexión entre el Alma y el Ala mediante los nodos señalados



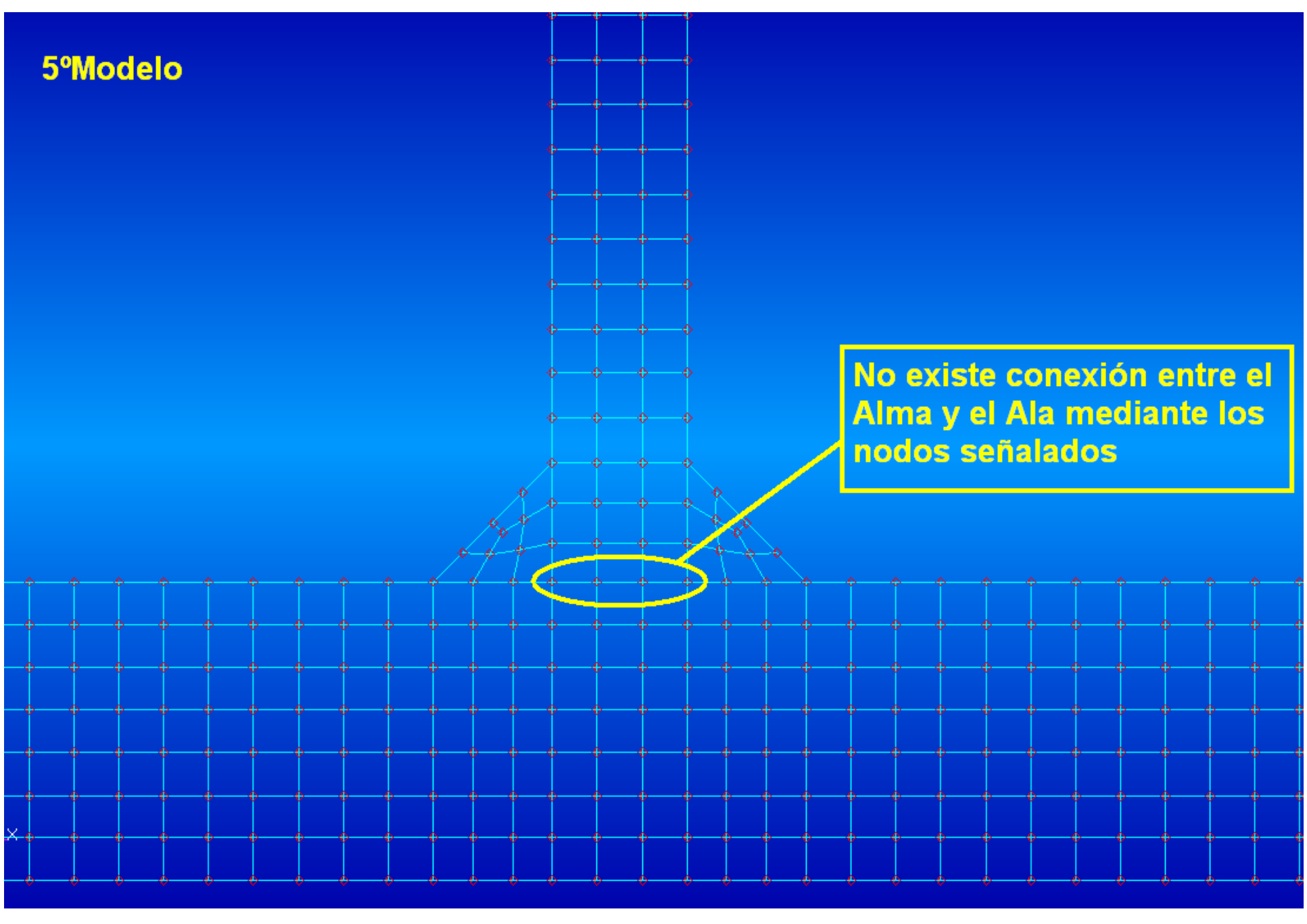
5º Modelo



Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Hex8	1.5x1.5x1.5
Ala	Hex8	1.5x1.5x1.5
Cordones	Hex8	1.5x1.5x1.5

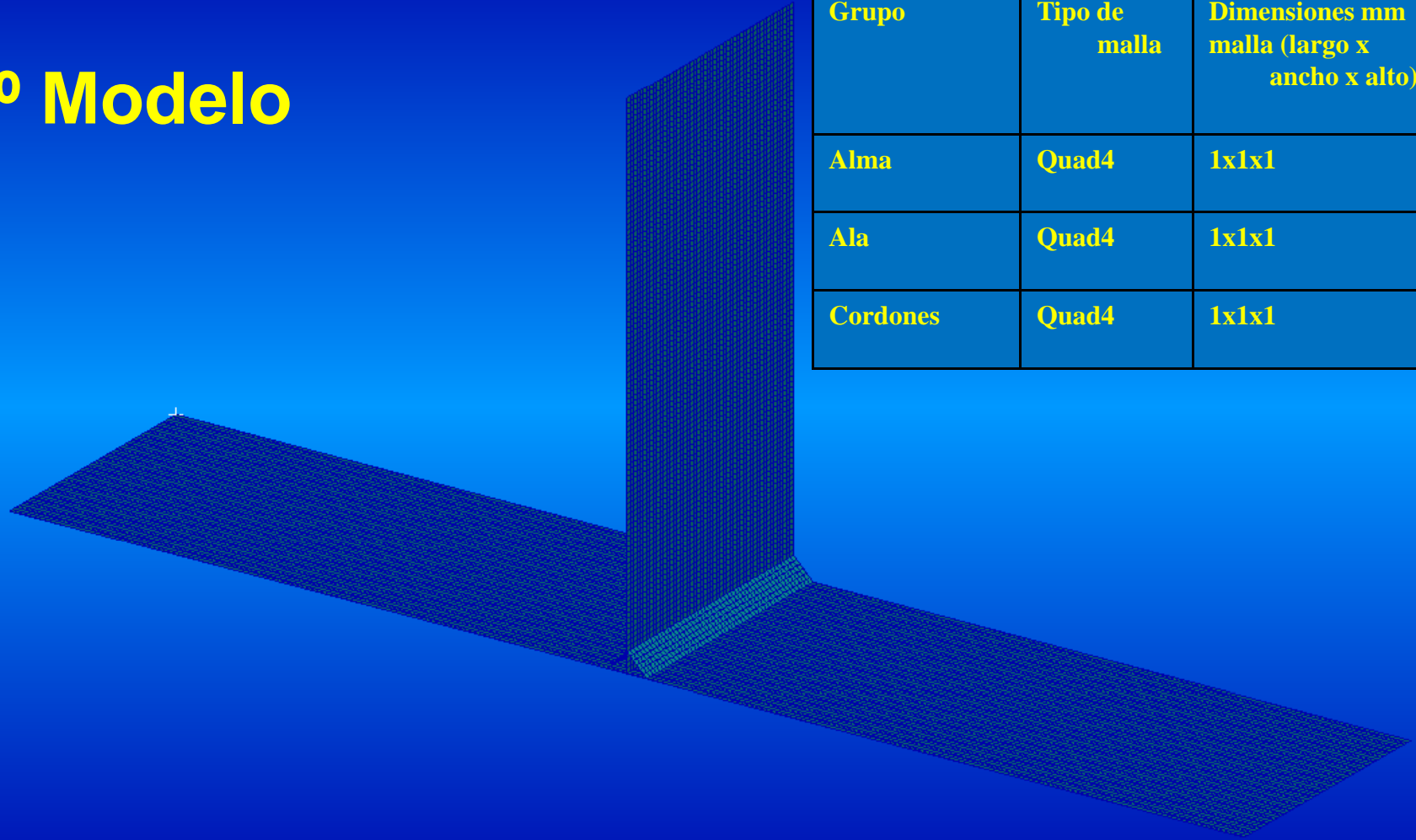


5ºModelo



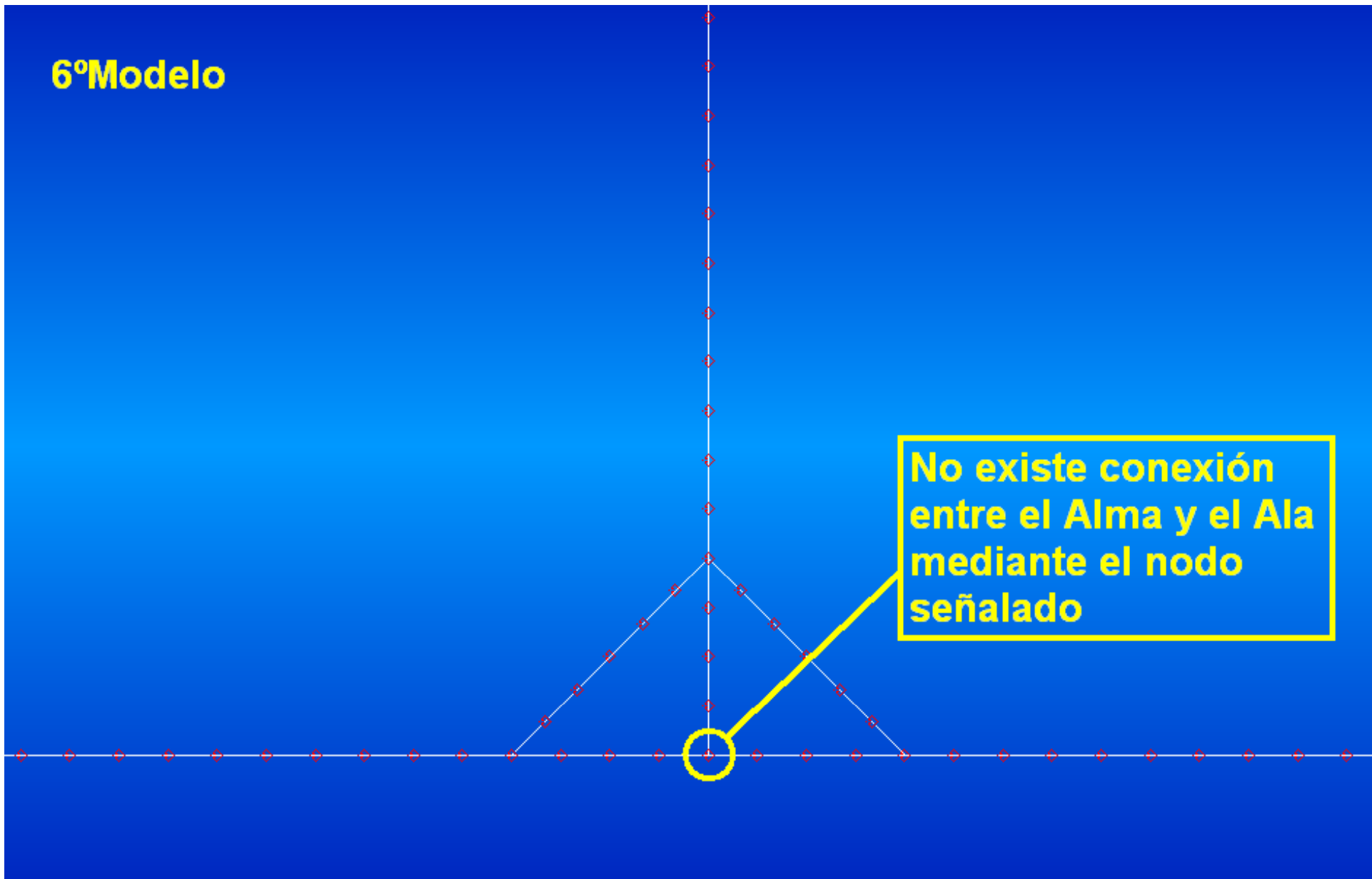
No existe conexión entre el Alma y el Ala mediante los nodos señalados

6º Modelo



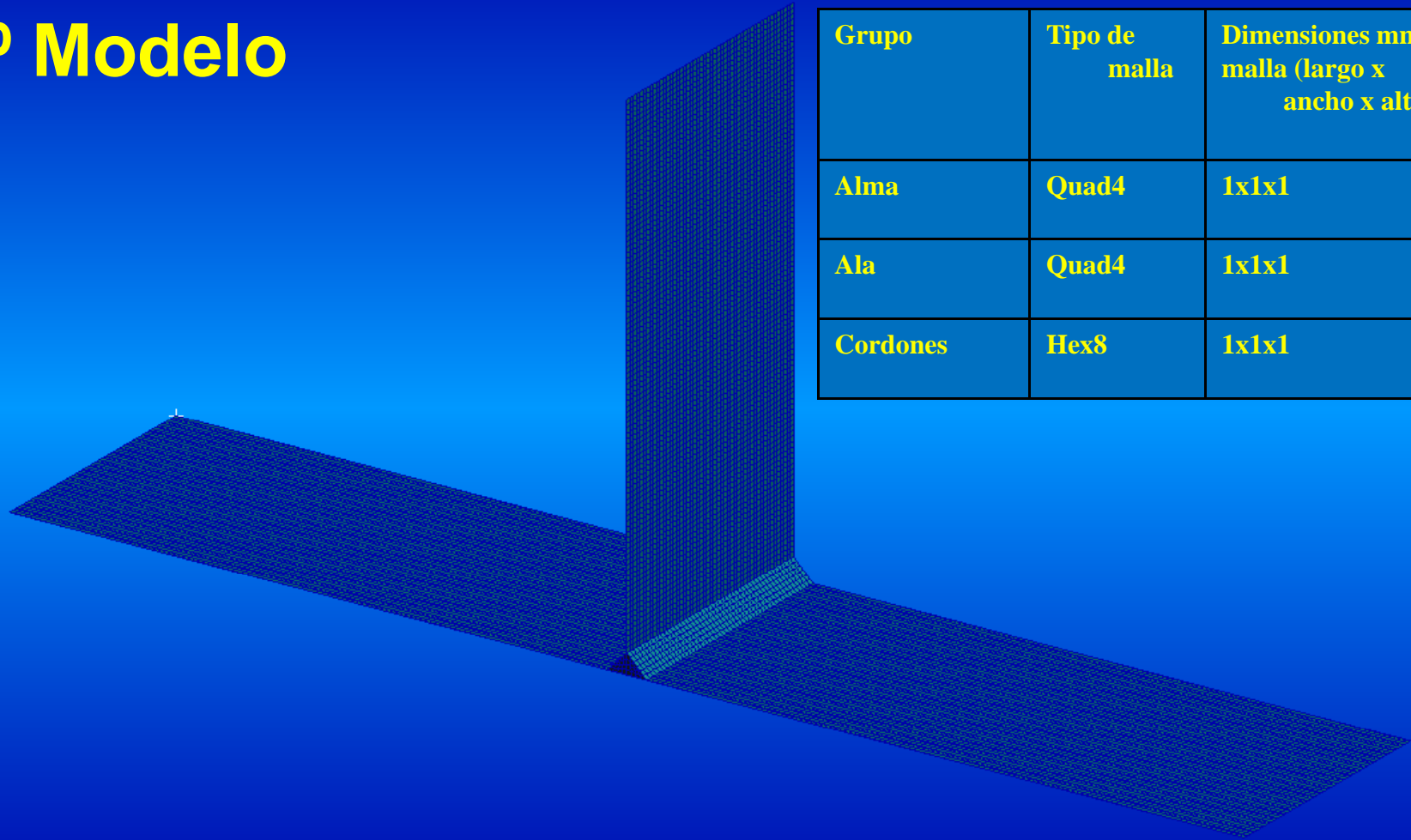
Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Quad4	1x1x1
Ala	Quad4	1x1x1
Cordones	Quad4	1x1x1

6ºModelo



No existe conexión entre el Alma y el Ala mediante el nodo señalado

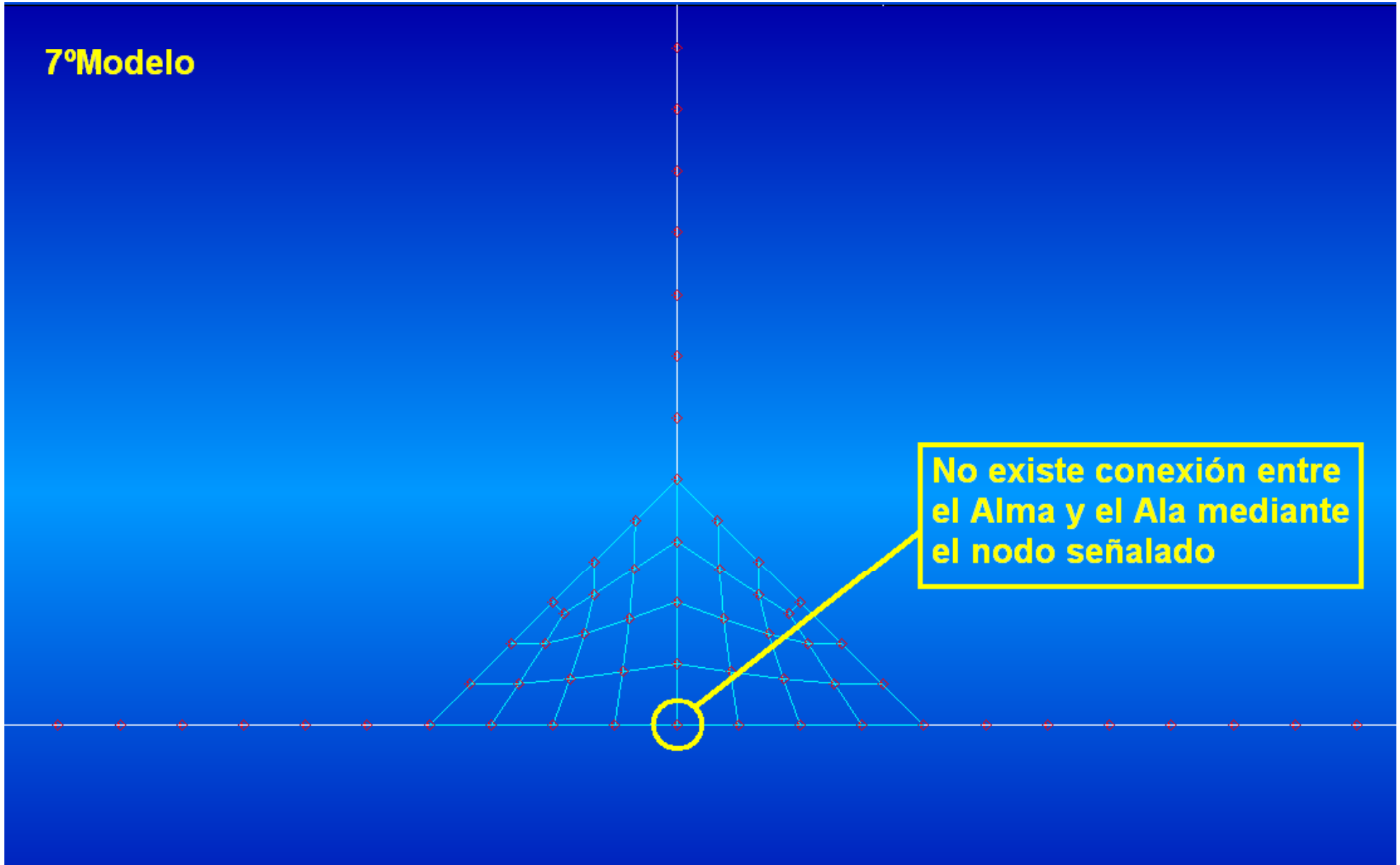
7º Modelo



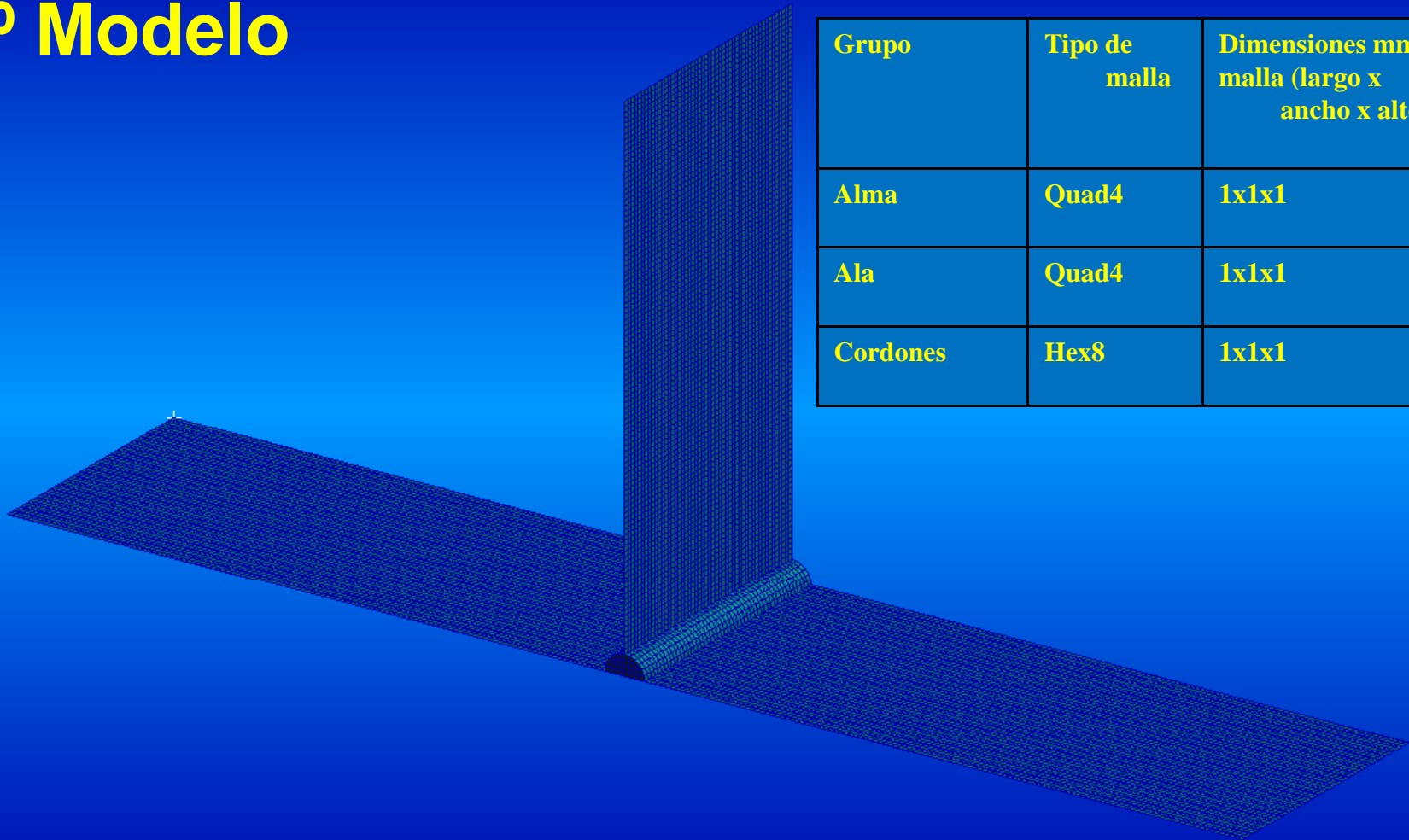
Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Quad4	1x1x1
Ala	Quad4	1x1x1
Cordones	Hex8	1x1x1

7º Modelo

No existe conexión entre el Alma y el Ala mediante el nodo señalado



8º Modelo



Grupo	Tipo de malla	Dimensiones mm malla (largo x ancho x alto)
Alma	Quad4	1x1x1
Ala	Quad4	1x1x1
Cordones	Hex8	1x1x1

8ºModelo

No existe conexión entre el Alma y el Ala mediante el nodo señalado

