

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Trabajo Fin de Grado***

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA BARRA DE  
COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO EN  
CASO DE CAÍDA ACCIDENTAL**

**(Structural analysis of a spent nuclear fuel rod in  
an accidental fall scenario)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**Autora: Laura Priscila Abascal Pachito**

**Septiembre – 2019**

## RESUMEN

Este proyecto pretende evaluar el comportamiento mecánico de un elemento de combustible nuclear gastado en el caso de sufrir una caída accidental durante su transporte. El elemento combustible está formado por una agrupación de varillas revestidas de zircaloy que, en su interior, contienen las pastillas de material fisionable— normalmente uranio enriquecido en un porcentaje no superior al 5%. El diseño de elemento combustible en que se basa el análisis es el KWU 16x16-20, empleado en la central nuclear de Trillo. Los objetivos que busca satisfacer este trabajo principalmente son el desarrollo de un modelo numérico del elemento combustible y el estudio de la respuesta de deformación de la barra cuando ocurre la caída accidental. Con esto, se pretende inferir conclusiones acerca de la viabilidad de trabajar con un modelo realizado con elementos de tipo sólido o tipo superficie. Todo esto se realiza en el dominio del tiempo y empleando la herramienta de software, basada en elementos finitos, ANSYS Mechanical.

## ABSTRACT

This project is intended to evaluate the mechanical behaviour of a spent nuclear fuel assembly in case of suffering an accidental fall during transportation. This nuclear fuel assembly consists of a group of rods which are covered by a zircalloy cladding. Inside them, there are pellets that contain fissile material – often enriched uranium no more than 5%. The design of the nuclear fuel assembly on which the analysis is based is KWU 16x16-20, used in the nuclear plant placed in Trillo. The main goals of this project are to develop a numerical model of the fuel assembly and to study the strain response when an accidental fall takes place. Having done this, conclusions on the feasibility of using solid or surface models are made. All analysis take place in the time domain, and the computer tool based on finite elements, ANSYS Mechanical, is used.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	7
1.1.	CICLO DE VIDA DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR.....	7
1.2.	RESIDUOS NUCLEARES Y COMBUSTIBLE GASTADO. DEFINICIONES Y TIPOS .....	8
1.3.	GESTIÓN Y TRANSPORTE DE RESIDUOS NUCLEARES .....	10
1.3.1.	GESTIÓN DE RESIDUOS NUCLEARES .....	10
1.3.2.	TRANSPORTE DE RESIDUOS NUCLEARES .....	12
1.4.	ELEMENTOS COMBUSTIBLES.....	15
1.5.	LABOR DE EQUIPOS NUCLEARES SA EN LA GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE.....	16
2.	OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	18
3.	BASES TEÓRICAS.....	19
3.1.	MECÁNICA ESTRUCTURAL .....	19
3.1.1.	PRINCIPIOS BÁSICOS DE MECÁNICA ESTRUCTURAL .....	19
3.1.2.	PROBLEMAS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL .....	19
3.1.3.	DESPLAZAMIENTO .....	20
3.1.4.	TENSIÓN .....	20
3.1.6.	DEFORMACIÓN.....	21
3.1.7.	RELACIONES DEFORMACIÓN-DESPLAZAMIENTO .....	22
3.1.8.	RELACIONES TENSIÓN-DEFORMACIÓN .....	22
3.2.	BASES DEL ANÁLISIS DINÁMICO .....	24
3.3.	TIPOS DE CAÍDAS Y TRANSFERENCIA DE FUERZAS.....	25
3.3.1.	RESPUESTA A CAÍDA VERTICAL.....	25
3.3.2.	RESPUESTA A CAÍDA HORIZONTAL .....	28
3.3.3.	RESPUESTA A CAÍDA CON INCLINACIÓN Y VUELCO .....	31
3.4.	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....	33
4.	ESTADO DEL ARTE .....	37

5.	DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO.....	45
5.1.	TRANSIENT STRUCTURAL.....	45
5.2.	DATOS DE INGENIERÍA (ENGINEERING DATA) .....	46
5.3.	GEOMETRÍA.....	48
5.4.	SUPUESTOS SIMPLIFICATIVOS CONSIDERADOS.....	50
5.5.	MODELOS Y CONDICIONES DE CONTORNO .....	51
5.5.1.	EN QUÉ CONSISTE EL MODELO SÓLIDO .....	51
5.5.2.	EN QUÉ CONSISTE EL MODELO SUPERFICIAL .....	52
5.5.3.	REALIZACIÓN DEL MODELO SÓLIDO.....	52
5.5.4.	REALIZACIÓN DEL MODELO EN SUPERFICIE .....	59
5.6.	MALLADO .....	60
5.6.1.	MALLADO DEL MODELO SÓLIDO .....	61
5.6.2.	MALLADO DEL MODELO SUPERFICIE.....	62
6.	OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	64
6.1.	RESULTADOS EN MODELO SÓLIDO .....	64
6.2.	RESULTADOS EN MODELO SUPERFICIAL .....	71
7.	CONCLUSIONES .....	75
8.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	76
9.	REFERENCIAS.....	78
	APÉNDICE: DEFINICIONES.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ciclo del combustible nuclear, [1].....	8
Figura 2.	Piscina de almacenamiento inicial de combustible quemado, [6].....	11
Figura 3.	Esquema del ATC propuesto en España, [7]. .....	12
Figura 4.	Clases de las materias peligrosas a transportar de acuerdo con las recomendaciones de la ONU, [3]. .....	13

Figura 5. Ensayos reglamentarios en caso de accidente, [3]. .....	14
Figura 6. Infografía de la composición de un elemento combustible, [3]. .....	15
Figura 7. Esquema del modelo de elemento combustible empleado en Trillo, [11]. .....	16
Figura 8. Algunos componentes fabricados y suministrados por ENSA, [12]. .....	16
Figura 9. Lista de los modelos de contenedores de diseño propio de ENSA, [13]. .....	17
Figura 10. Vistas de las tensiones descompuestas en sentidos positivos y negativos del cubo de referencia, [16, pp. 26-27] .....	20
Figura 11. Tipos de caídas que puede sufrir un contenedor en transporte, [15, p. 54]. .....	25
Figura 12. Vista de la limitación del desplazamiento de la barra central de un elemento combustible, [15, p. 61]. .....	26
Figura 13. Modelo de la barra para caída vertical y comportamiento de los muelles,[15, p. 62]. .....	27
Figura 14. Introducción de cargas en el caso de caída vertical e historial de la aceleración en función del tiempo,[15, p. 63]. .....	27
Figura 15. Secuencia de caída y relatividad entre velocidades de elemento y contenedor, [15, p. 65]. .....	28
Figura 16. Secuencia del mecanismo de transferencia de la fuerza y gráfica fuerza-desplazamiento para cada fase, [15, p. 56]. .....	29
Figura 17. Modelo simplificado de caída horizontal y relación fuerza-desplazamiento para los muelles de dicho modelo,[15, p. 57]. .....	29
Figura 18. Distribución de fuerzas sobre el elemento combustible e historial aceleración-tiempo,[15, p. 59]. .....	30
Figura 19. Cargas e historial aceleración-tiempo para dominancia de impacto inicial,[15, p. 66]. .....	31
Figura 20. Cargas e historial aceleración-tiempo para dominancia de segundo impacto,[15, p. 67]. .....	32
Figura 21. Representación de la función u, de su aproximación y de las funciones base, [18]. .....	34
Figura 22. Aproximación de la función u por medio de una combinación de funciones lineales distribuidas de manera no uniforme, [18]. .....	34
Figura 23. Elementos más comunes en 2 y 3 dimensiones, [18]. .....	35
Figura 24. Representación de elementos sólidos 3D y la disposición de sus nodos. Adoptan diferentes geometrías: hexaedro, tetraedro, pirámide con base cuadrada y prisma de base triangular, [16, p. 38] .....	36
Figura 25. Representación de elementos superficie 3D. Cuadrilátero y triángulo,[16, p. 38] .....	36
Figura 26. Componentes de un diseño de contenedor, [15, p. 92]. .....	38
Figura 27. Modelo del elemento combustible en caída horizontal propuesto por el SAND90-2406, [15, p. 58]. .....	38

Figura 28. Modelo de la barra propuesto por el NUREG-1864, [14, p. C4]. .....	41
Figura 29. Área de contacto en una sección del modelo propuesto por Almomani et al., [19, p. 330]. .....	42
Figura 30. Composición del modelo de segmento de la barra propuesto por Lee et al., [20, p. 4]. ....	43
Figura 31. Gráficas de los historiales de desplazamiento máximo en función del tiempo y de la altura de la caída, [20, p. 10]......	44
Figura 32. Diagrama de flujo de trabajo de Transient Structural en ANSYS Workbench. ....	46
Figura 33. Tabla con los datos del Zircaloy introducidos en el programa. ....	47
Figura 34. Curva tensión-deformación realizada por ANSYS Workbench al definir el material.....	47
Figura 35. Boceto de la sección transversal de la barra de combustible.....	48
Figura 36. Zoom de la geometría 3D desarrollada en Design Modeler. Boca superior de la barra.....	49
Figura 37. Zoom de la geometría 3D generada para el modelo en superficie.....	50
Figura 38. Interacción de las cargas laterales debidas a rejillas separadoras supuestas en una sola dirección, [15]. .....	51
Figura 39. Correspondencia de ejes del programa con características del modelo. Eje Y: directriz de la barra. Eje X: dirección longitudinal de los muelles de las rejillas separadoras. Eje Z: movimiento restringido en esta dirección. ....	53
Figura 40. Tablas de definición de los muelles en Mechanical. ....	54
Figura 41. Tipos de soporte para modelos sólidos en Mechanical. ....	55
Figura 42. Material Zircaloy asignado al sólido y propiedades calculadas por el programa. ....	56
Figura 43. Definición de la carga de aceleración en Mechanical. ....	58
Figura 44. Vista isométrica del modelo sólido con los muelles, la carga y los soportes.....	58
Figura 45. Vista de un nivel de rejillas separadoras representadas por muelles en el software. ....	59
Figura 46. Modelo superficie con etiquetas de soportes y de carga aplicados. ....	60
Figura 47. Definición del mallado en el modelo sólido.....	61
Figura 48. Mallado del modelo sólido.....	62
Figura 49. Ventana de propiedades del mallado. Solo se ha intervenido sobre las opciones Relevance Center y Span Angle Center. Los cuadros grises contienen valores generados por el programa. ....	63
Figura 50. Mallado del modelo superficie. ....	63
Figura 51. Árbol de trabajo en la interfaz Mechanical y definición de los parámetros que se desean como solución. ....	64
Figura 52. Curva de la máxima deformación sobre la barra obtenida por Mechanical. ....	67
Figura 53. Curva de las máximas tensiones sobre la barra obtenida por Mechanical. ....	68
Figura 54. Distribución de la deformación en el instante de 0,032s. ....	69



Figura 55. Distribución de la tensión en el instante 0,032s. .... 70

Figura 56. Curva de la máxima deformación sobre la barra obtenida por Mechanical para el modelo superficial..... 73

Figura 57. Curva de máximas tensiones sobre la barra obtenida por Mechanical para el modelo superficial..... 74

## 1. INTRODUCCIÓN

La integridad de los elementos combustibles gastados, confinados en contenedores tanto de transporte como de almacenamiento, se ha convertido en un tema de especial atención con el paso de los años. Esto se debe, principalmente, a que las normativas tanto nacional como internacionales buscan garantizar la máxima seguridad en el manejo de estos residuos desde que son extraídos del reactor, y hasta completar su ciclo de vida según sea este abierto o cerrado. De este modo, no se pone en riesgo radiológico ni a personas ni al medio ambiente, ni ahora ni en el futuro.

En el caso de España, los residuos provenientes del sector nuclear para la generación de energía no son reprocesados, por lo que se requiere su envío a un emplazamiento donde se puedan almacenar. La empresa encargada de estas actividades de gestión y transporte es ENRESA, bajo la supervisión del Consejo de Seguridad Nuclear.

A continuación, se exponen las bases del ciclo de vida del combustible nuclear, así como las formas de gestión de este tipo de residuos y los requisitos más importantes en su transporte (marco del presente proyecto). También se explica brevemente en qué consiste un elemento combustible y cómo y dónde se fabrica.

### 1.1. CICLO DE VIDA DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

El ciclo de vida del combustible nuclear se define como el conjunto de procesos por los que pasa dicho combustible, comprendiendo las fases de extracción y tratamiento del mineral, fabricación del combustible, uso y gestión final. Se distinguen dos tipos de ciclo de vida: ciclo abierto y ciclo cerrado.

El ciclo de vida abierto considera al combustible irradiado completamente como residuo radiactivo que habrá que gestionar. Por su parte, el ciclo de vida cerrado prevé la recuperación del uranio y el plutonio no quemados y su reproceso para la fabricación de nuevos materiales combustibles. En el caso de estos últimos también hay residuos tenidos en cuenta y normalmente son de alta actividad.



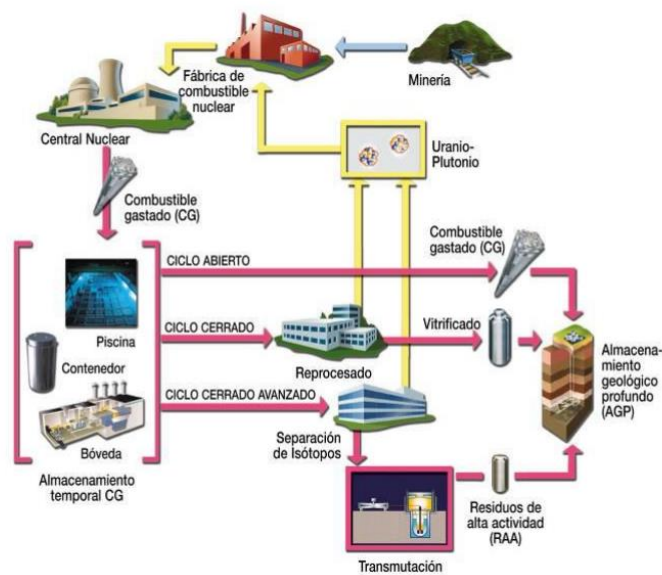


Figura 1. Ciclo del combustible nuclear, [1].

En la actualidad, se está desarrollando también el ciclo cerrado avanzado que, como indica la figura 1, implica la transmutación de actínidos minoritarios – de vida larga- y ciertos productos de fisión. Con esto se busca la reducción de la actividad de estos así como de la radiotoxicidad antes de ser almacenados. [2]

## 1.2.RESIDUOS NUCLEARES Y COMBUSTIBLE GASTADO. DEFINICIONES Y TIPOS

De acuerdo con el artículo 2 de la Ley 25/1964 sobre energía nuclear, un residuo radiactivo se define como “cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear”, [3].

Los residuos radiactivos pueden ser de tres tipos diferentes según su clasificación en función del período de semidesintegración y la actividad inicial que presentan los radionucleidos presentes en mayor proporción en dichos residuos.

### Residuos de muy baja actividad

Estos contienen muy pequeñas cantidades de radionucleidos: de 10 a 1000 Bq/g.

Pueden ser, a su vez, de vida corta y media si sus elementos más notables presentan un período de semidesintegración menor a 30 años. O bien, de vida larga si el período de semidesintegración es mayor los 30 años.

### **Residuos de baja y media actividad**

Estos tipos suelen conformar el mayor volumen de residuos. En su caso, la concentración de radionucleidos es de entre 1000 y 1.000.000 Bq/g. Además, se indica que poseen menos de 10000 Bq/g de radionucleidos de vida larga.

Al igual que antes, los residuos de baja y media actividad pueden ser de vida corta y media o de vida larga según su período de semidesintegración sea menor o mayor a los 30 años, respectivamente.

En España, estos residuos se trasladan al Centro de Almacenamiento El Cabril, propiedad de ENRESA, [4]. Se prevé gestionar los residuos de vida larga de esta categoría en el Almacén Temporal Centralizado en superficie.

### **Residuos de alta actividad**

No se distingue entre vida corta y media y vida larga. La radioactividad de estos residuos es muy elevada y generan calor en grandes cantidades.

Es en este grupo en el cual se encuentran clasificados los elementos combustibles gastados. Su almacenamiento se realiza en Almacenes Temporales Individualizados, aunque se prevé también el Almacenamiento Temporal Centralizado en superficie.

Nótese que el residuo radiactivo abarca a cualquier tipo de residuo, proveniente de cualquier sector, ya sea el industrial, el médico o el nuclear para la generación de energía. Siendo este último el sector de interés del trabajo, se distingue un tipo de residuo radiactivo que es el denominado combustible nuclear gastado o irradiado. Dicho concepto también presenta una definición oficial, en este caso, dada por el Real Decreto 102/2014 para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos, que establece lo siguiente: “El combustible nuclear irradiado en el núcleo de un reactor y extraído permanentemente de éste”, [3].

### 1.3.GESTIÓN Y TRANSPORTE DE RESIDUOS NUCLEARES

Dado que en España no se llevan a cabo acciones de recuperación y reproceso, el ciclo de combustible en que se trabaja es de tipo abierto. Así, resultan imprescindibles las tareas de gestión de residuos, que conllevan a su vez actividades de transporte de estos de un punto a otro no solo dentro de la central nuclear, mas fuera de ella también si estos se trasladan a un lugar de Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC).

#### 1.3.1. GESTIÓN DE RESIDUOS NUCLEARES

Como ya se mencionó en la introducción, en España, los organismos encargados de la gestión de residuos radiactivos son la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA) y el Consejo de Seguridad Nacional (CSN). Este último es el encargado de vigilar y controlar los residuos generados en cada instalación, desde las etapas de generación y transporte hasta su almacenamiento. El objetivo básico es, como siempre, el de garantizar la seguridad de personas y medio ambiente en tiempos presente y futuro, de acuerdo con las indicaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Como se ha explicado en el apartado anterior, el combustible gastado que se genera tras la operación de las centrales nucleares pertenece a la categoría de residuos de alta actividad. La gestión de este tipo de residuos se puede dividir en tres etapas diferenciadas: almacenamiento inicial, almacenamiento intermedio y almacenamiento definitivo.

En primer lugar, el almacenamiento inicial conlleva el traslado del combustible gastado del reactor a unas piscinas situadas en el propio edificio del reactor con el objeto de reducir la carga calorífica de los productos irradiados. Dicho almacenamiento tiene una duración de unos cinco años. Las piscinas que los contienen son de hormigón armado, con las paredes recubiertas de acero soldado. El agua actúa como un blindaje contra la radiactividad y tiene como misión, además, extraer el calor residual generado. Una vez se reduce el calor residual y la radiactividad cae, el combustible puede ser considerado como residuo y es posible realizar, a partir de aquí, actividades de transporte y almacenamiento,[2], [5].



*Figura 2. Piscina de almacenamiento inicial de combustible quemado, [6].*

En segundo lugar, en el caso de almacenamiento intermedio, los residuos pueden ser colocados en contenedores en seco o en piscinas de combustible gastado. Se distinguen dos emplazamientos diferentes para el depósito: Almacenamiento Temporal Individualizado (ATI) y Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC).

En el ATI, se almacenan los productos de alta actividad y vida larga que se obtienen en la central nuclear fuera del edificio del reactor. Se puede llevar a cabo en superficie o a pequeñas profundidades. Este tipo de almacenamiento se denomina temporal pues los residuos se ubican en él a la espera de ser enviados a otras instalaciones como plantas de reproceso – si el ciclo de vida es cerrado –, o ATC o Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) – si el ciclo de vida es abierto. De nuevo, los sistemas de almacenamiento existentes son:

- Sistema húmedo, con empleo de piscinas.
- Sistema seco, en contenedores o en bóvedas.

Los ATIs presentes en España actualmente son los situados en las centrales nucleares de Trillo, de José Cabrera y de Ascó. En ellos se realiza almacenamiento en seco; es decir, en contenedores.

El ATC se diferencia del ATI por su función: está destinado al almacenaje de residuos de combustible gastado y residuos de alta actividad provenientes de diversas centrales nucleares de un mismo país. El período de estancia de dichos residuos es limitado y se sitúa en unos sesenta años; una vez alcanzado, no debe ser superado.

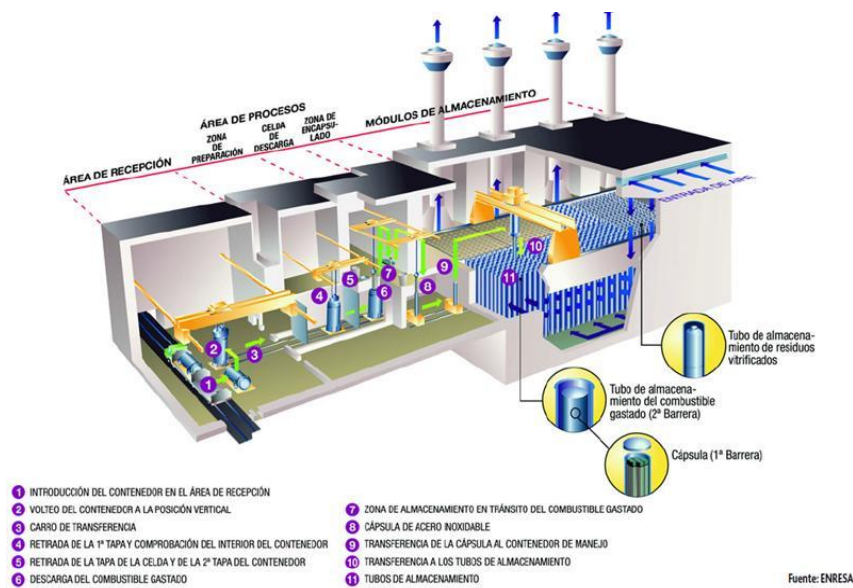


Figura 3. Esquema del ATC propuesto en España, [7].

En tercer y último lugar, se encuentra la etapa de gestión final de los residuos, por medio del Almacenamiento Geológico Profundo (AGP). Este consiste en depositar tanto elementos combustibles irradiados como residuos de actividad alta vitrificados, en el interior de contenedores de metal, dentro de formaciones geológicas estables. Dichas formaciones deben presentar poca fracturación y no deben situarse en zonas de fallas. Como requisito, el terreno tiene baja permeabilidad y alta capacidad de retención. Si la roca es dura, la colocación de los contenedores tiene lugar a unos 500 a 1000 metros de profundidad, [5]. Se dice que es un almacenamiento definitivo porque no se contempla la recuperación de los residuos allí depositados, aunque los diseños se realizan en previsión de lo contrario.

### 1.3.2. TRANSPORTE DE RESIDUOS NUCLEARES

El transporte de residuos radiactivos, y por ende del combustible nuclear gastado, se enmarca en primer lugar, en la categoría 7 de 9 propuestas por la ONU en sus “Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas”. Estas recomendaciones suponen las bases de los reglamentos reguladores tanto a nivel internacional como nacional. En segundo lugar, aunque no menos importante, se encuentran los requisitos establecidos por la OIEA en

“Reglamento para el transporte seguro de los materiales radiactivos”, cuyas premisas son seguidas por todos los países miembros de la organización.












Clasificación de las materias peligrosas		
CLASE 1:	Materiales y objetos explosivos	
CLASE 2:	Gases	
CLASE 3:	Líquidos inflamables	
CLASE 4:	Sólidos inflamables	
CLASE 5:	Oxidantes	
CLASE 6:	Venenos Materias tóxicas Materias repugnantes Materias infecciosas	  
CLASE 7:	Materiales radiactivos	
CLASE 8:	Corrosivos	
CLASE 9:	Materias peligrosas no recogidas en otras clases	

Figura 4. Clases de las materias peligrosas a transportar de acuerdo con las recomendaciones de la ONU, [3].

En cuanto a los requisitos concretos que debe cumplir el transporte que nos interesa, se identifican dos fundamentales, [8]:

- Una garantía de calidad que constituye las medidas tomadas por el fabricante.
- La verificación del cumplimiento de las condiciones establecidas.

Además, es notable el papel de la seguridad del embalaje en que se introducen los residuos. Los bultos con material radiactivo de alta actividad se encuentran en la categoría de bultos de tipo B. Estos tienen la finalidad de resistir tanto condiciones normales de transporte como accidentes. Para ello, deben ser ensayados [3], [8].

Algunos de los ensayos a los que se someten los contenedores de residuos son los siguientes:

Ensayo de caída libre desde 9 m. de altura sobre una plancha de acero o un suelo de hormigón.

Ensayo de caída libre desde 1 m. de altura sobre un punzón de acero.

Ensayo de fuego a 800 °C soportado durante 30 minutos.

Ensayo de inmersión a 200 m. soportada durante 1 hora.

Véase la figura 5 que ilustra las condiciones a las que se somete el contenedor antes de su aprobación como embalaje fiable para el traslado.

Además, si el material contiene aún parte fisionable, deberán analizarse y cumplirse controles especiales, basados en la criticidad de una posible reacción nuclear en cadena.

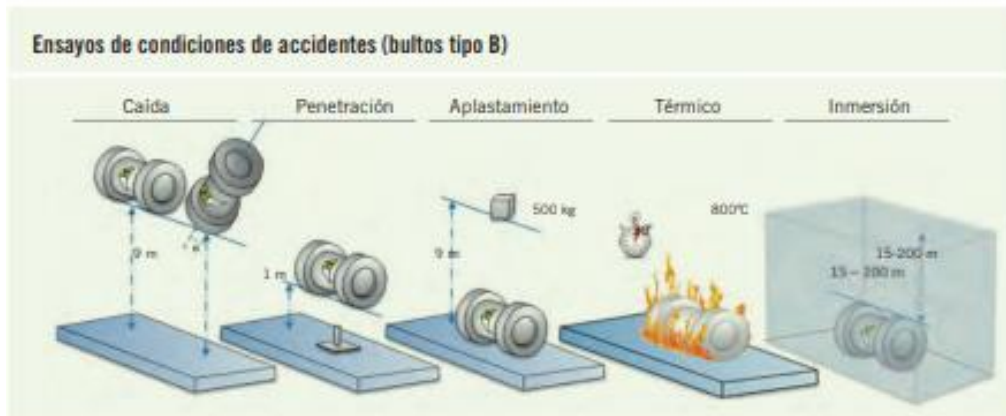


Figura 5. Ensayos reglamentarios en caso de accidente, [3].

#### 1.4. ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Un elemento de combustible nuclear se compone por una agrupación de vainas o varillas de aleación metálica, independientes unas de otras, que contienen las pastillas de uranio así como un gas inerte en su interior, de modo que el interior queda sellado herméticamente. Dichas pastillas se fabrican prensando el dióxido de uranio y sinterizándolo para conseguir pastillas cerámicas. Las varillas se unen por medio de una serie de elementos estructurales, formando el elemento combustible completo. En España, la empresa dedicada a la fabricación de los elementos combustibles es ENUSA, situada en Juzbado, Salamanca. En la figura siguiente se puede observar cuáles son los componentes que se han mencionado, y otros, como cabezales, rejillas y el esqueleto que contiene tubos guía.

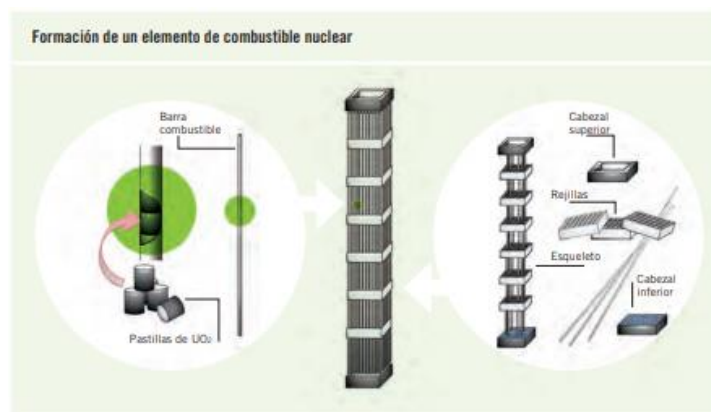


Figura 6. Infografía de la composición de un elemento combustible, [3].

El diseño de los elementos combustibles propuestos por Equipos Nucleares SA (ENSA) para el estudio es el KWU 16x16-20, modelo HTP. Estos son los elementos que se emplean en la central nuclear de Trillo. De acuerdo con un informe semestral de 2017, en la central, el combustible utilizado alcanza una masa de 83 Tm, es de dióxido de uranio enriquecido con U-235 entre el 3,9% y el 4,2% en promedio, y se distribuye en 177 elementos de 16x16 vainas, [9] Las pastillas de combustible tienen dimensiones de 9,1mm de diámetro y 11mm de longitud, y están enfundadas en vainas de aleación zircaloy, cuyo diámetro es de 10,7mm. [10] Un modelo del elemento comentado es el que se muestra a continuación la Figura 7.



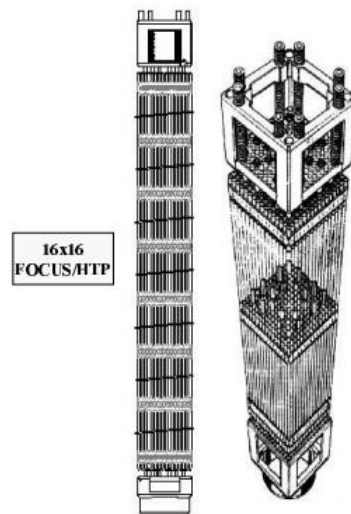


Figura 7. Esquema del modelo de elemento combustible empleado en Trillo, [11].

### 1.5. LABOR DE EQUIPOS NUCLEARES SA EN LA GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE

La empresa Equipos Nucleares S.A. (ENSA) fue constituida en 1973. Su primer objetivo es la fabricación de grandes componentes para la industria de la energía nuclear. Entre otros, se fabrican vasijas de reactor, generadores de vapor, contenedores para almacenaje y transporte del combustible y bastidores. Desde la década de los ochenta, cuenta con una división de servicios por la que realiza diversos tipos de trabajos para las centrales nucleares españolas. Entre dichos servicios se encuentra la gestión del combustible.



Figura 8. Algunos componentes fabricados y suministrados por ENSA, [12].

Los contenedores (casks) fabricados están destinados tanto a combustible fresco como a combustible gastado. Son de múltiples tecnologías y ENSA tiene diseños propios de contenedores de doble propósito; es decir, destinados tanto a transporte como a almacenaje, tal como se enumeran en la Figura 9.

- Ensa Dual Purpose Cask (ENSA-DPT).
- Hitachi – Ensa Dual Purpose cask (HI-EN69).
- Ensa Universal Cask (ENUN 32P).
- Ensa Universal Cask (ENUN 52B).
- Ensa Universal Cask (ENUN 52BR).

*Figura 9. Lista de los modelos de contenedores de diseño propio de ENSA, [13].*

Los bastidores desarrollados son, sobre todo, para combustible PWR y BWR. El combustible PWR es aquel que se emplea en reactores de agua a presión (del inglés, Pressurized Water Reactor), mientras que el BWR se usa en reactores de agua en ebullición (del inglés, Boiling Water Reactor). De acuerdo con la información disponible, la empresa realiza el suministro de estos componentes a nivel nacional e internacional.

Para las tareas de diseño y cálculo, el área de ingeniería se apoya en el uso de software como ANSYS, HTRI o PVElite. Los distintos cálculos que se realizan son de tipo térmico, estructural y dinámica de fluidos, entre otros.

Actualmente, una de las actividades enmarcadas en la investigación es el estudio de la integridad estructural de los elementos combustibles en el interior de los contenedores cuando se dan posibles casos de impacto. El software empleado para su estudio es ANSYS, más concretamente, en la interfaz de Mechanical APDL Product Launcher. En él se está realizando un análisis transitorio implícito con elementos tipo BEAM (sólidos).

## 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Actualmente, existe un creciente interés a nivel internacional por la investigación acerca del comportamiento del combustible nuclear gastado cuando se dan diversos escenarios de accidente en su manejo fuera del reactor. Dada la imposibilidad de desarrollar pruebas directamente a los elementos de combustible gastado, por la radiactividad que presentan, resulta imprescindible el uso de software de simulación que permita reproducir de la manera más fiel posible los diferentes eventos a los que se puede ver sometido el mencionado combustible.

El presente proyecto pretende presentar un primer estudio del comportamiento de un elemento combustible en caída vertical. Dicho estudio toma como base la actividad que realiza ENSA en este ámbito. Para llevarlo a cabo, se establecen los siguientes objetivos:

- **OBJETIVO 1:** Desarrollar dos modelos numéricos basados en el método de elementos finitos. Uno de los modelos estará constituido por elementos sólidos. Por su parte, el segundo modelo se compondrá de elementos superficiales.
- **OBJETIVO 2:** Obtener resultados estructurales (tensiones, deformaciones, desplazamientos) del elemento combustible cuando sufre una caída accidental vertical durante el transporte de los elementos combustibles en el interior de un contenedor destinado a tal propósito.

El elemento combustible a estudiar se basa en el modelo KWU 16x16-20 HTP, de Siemens. Este modelo es el utilizado en la central nuclear de Trillo, en sus variantes HTP y FOCUS. Los dos modelos numéricos desarrollados se realizarán usando la herramienta de mecánica estructural del que dispone el software ANSYS Workbench: ANSYS Mechanical. El tipo de estudio a realizar será de carácter temporal. Una vez se tengan ambos modelos, y sus respuestas al evento de caída vertical simulado, se inferirán conclusiones sobre los resultados obtenidos, estudiando la validez de estos. El grado de validez de ambos modelos se determinará comparando dichos resultados con los de los documentos NUREG [14] y SAND [15] comentados en el apartado del Estado del Arte.

### 3. BASES TEÓRICAS

Las bases teóricas de este proyecto comprenden diversidad de temas entre los cuales se encuentra la mecánica estructural, base de la que se vale el resolvidor que se va a emplear. También se describe el método de elementos finitos en que se sustenta ANSYS. Además de esto, es imprescindible el conocimiento del comportamiento de los elementos combustibles gastados al caer, de tal modo que, más adelante, estas condiciones puedan aplicarse e los modelos que se realicen. Por lo tanto, a continuación, se lleva a cabo una exposición de los supuestos teóricos sobre los que se dirige este trabajo.

#### 3.1. MECÁNICA ESTRUCTURAL

##### 3.1.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DE MECÁNICA ESTRUCTURAL

Esta sección explica las bases teóricas de la mecánica estructural con las que resuelve ANSYS Workbench.

Inicialmente, para un análisis estructural estático lineal (elásticamente), homogéneo e isotrópico, se realizan las siguientes asunciones:

- La ley de Hooke es aplicable debida la linealidad en la elasticidad de los materiales.
- Las deformaciones que tienen lugar son tan pequeñas que se acepta una relación lineal entre los desplazamientos y las deformaciones.
- No se observan cambios significativos en la topología, ni variaciones en el contacto.
- La deformación se considera lo suficientemente lenta como para despreciar cualquier efecto de tipo dinámico.

Partiendo de estas ideas, el conocimiento de la mecánica estructural se podrá generalizar y extender a problemas no homogéneos, anisótropos, no lineales y con carácter dinámico.

##### 3.1.2. PROBLEMAS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En un problema de tipo estructural, el estudio está centrado en cuerpos sólidos. Las condiciones de contorno se componen por cargas, soportes, cambios de temperatura o

fuerzas de inercia, y que las respuestas pueden ser descritas por desplazamientos, tensiones o deformaciones.

### 3.1.3. DESPLAZAMIENTO

La deformación que sufre un cuerpo puede ser descrita por un campo de desplazamiento  $\{u\}$ , el cual es función de posiciones. En el caso tridimensional, el campo es un vector de tres componentes, con unidades de metro en el Sistema Internacional (SI), como se puede ver en la Expresión (I), [16, p. 24].

$$\{u\} = \{u_x, u_y, u_z\} \quad (I)$$

Lo que describe este vector es la diferencia de posiciones entre el estado de deformación final y el estado de deformación inicial del cuerpo que se está estudiando.

### 3.1.4. TENSIÓN

Las tensiones en un punto determinado del espacio pueden ser definidas como la fuerza por unidad de área que actúan en las superficies de un cuerpo infinitamente pequeño. Normalmente, dichas tensiones son diferentes en cada una de las caras del cuerpo. Para un estudio simplificado, el cuerpo que se toma como referencia es un cubo infinitamente pequeño como el que se muestra en la Figura 10. Su unidad en el SI es el Pascal, aunque muy comúnmente se emplean sus múltiplos MPa y GPa.

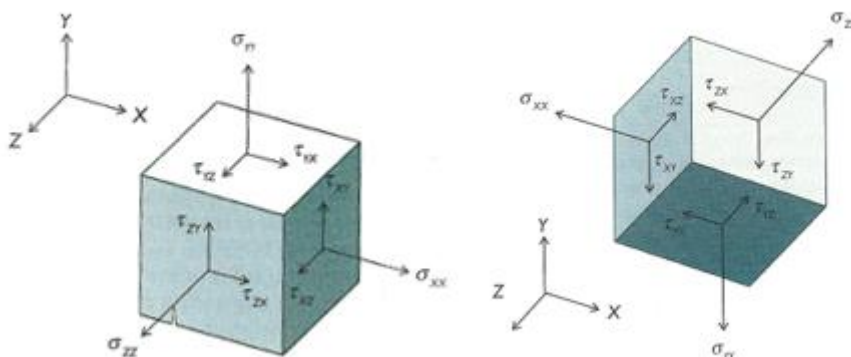


Figura 10. Vistas de las tensiones descompuestas en sentidos positivos y negativos del cubo de referencia, [16, pp. 26-27]

### 3.1.5. COMPONENTES DE LA TENSIÓN

A cada una de las superficies del cubo se le asigna un nombre significativo; en este caso, de acuerdo con los ejes coordenados de referencia, X, Y, Z. La tensión aplicada a cada cara se suele descomponer en tres, como se ha visto en la Figura 10: tensión normal  $\sigma_{xx}$  y dos componentes de tensión tangencial  $\tau_{xy}$ ;  $\tau_{xz}$ . Así, agrupando todos los términos, se obtiene la matriz de tensiones de la expresión (II).

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (II)$$

Se han tomado nueve valores para las caras X, Y, Z en direcciones positivas. Las direcciones negativas, poseen los mismos valores de tensión, pero con signos opuestos. Las tensiones tangenciales son simétricas, siendo esto obtenido por aplicación del equilibrio de momentos en las tres direcciones, respectivamente.

El estado tensional en un punto es descrito por medio de seis componentes de acuerdo a la expresión (III), [16, p. 27].

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}\} \quad (III)$$

Cuando se estudia una cara cualquiera, con una posición distinta a la paralela o perpendicular a un eje, las componentes de la tensión para la matriz se obtienen por medio del círculo de Mohr.

### 3.1.6. DEFORMACIÓN

La deformación se define como una relación entre la variación de las posiciones de los puntos del cuerpo entre dos estados y su situación inicial. Dado que también puede ocurrir en las distintas direcciones espaciales, se define un tensor de deformaciones tal como muestra la expresión (IV).

$$[\varepsilon] = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (IV)$$

De igual manera, como se hizo en el estado tensional de un punto, la deformación en un punto requiere de seis componentes para estar totalmente definida. Dichas componentes son las que se muestran en la expresión (V).

$$\{\sigma\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}\} \quad (V)$$

### 3.1.7. RELACIONES DEFORMACIÓN-DESPLAZAMIENTO

Existen relaciones geométricas entre desplazamiento y deformación que, bajo la condición de pequeña deformación, son lineales y son las presentadas en los grupos de expresiones (VI) y (VII).

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial X}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial Y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial Z} \quad (VI)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial Y} + \frac{\partial u_y}{\partial X}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial Z} + \frac{\partial u_z}{\partial Y}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial X} + \frac{\partial u_x}{\partial Z} \quad (VII)$$

### 3.1.8. RELACIONES TENSION-DEFORMACIÓN

Para un modelo de material lineal, la relación entre tensión y deformación viene dada por la ley de Hooke, de modo que las ecuaciones que describen el comportamiento del material, independientemente de su geometría y las condiciones de contorno, son las expresiones (VIII-XIII).

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_z}{E} \quad (VIII)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_z}{E} \quad (IX)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} \quad (X)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (XI)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (\text{XII})$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (\text{XIII})$$

Hay tres parámetros fundamentales ligados al material lineal con que se trabaja y son:

- El módulo de Young, E. También denominado módulo elástico, es la relación existente entre la tensión y la deformación axiales. Definición en la expresión (XIV), [17].

$$\sigma_{xx} = E \cdot \varepsilon_{xx} \quad (\text{XIV})$$

- El coeficiente de Poisson,  $\nu$ . Se trata de un valor constante que resulta de la relación entre las deformaciones que sufre un cuerpo cuando se estira longitudinalmente. En el numerador se tiene la deformación transversal mientras que en denominador está la deformación axial o longitudinal. El coeficiente siempre tiene valor positivo, a pesar del signo negativo con que se define en la expresión (XV).

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{transv}}{\varepsilon_{axial}} \quad (\text{XV})$$

- El módulo de rigidez tangencial, G. Al igual que el módulo elástico, el módulo de rigidez tangencial es una relación entre una tensión y una deformación, pero aplicada al caso de los esfuerzos cortantes sobre el elemento de estudio. Véase la expresión (XVI).

$$\tau_{xx} = G \cdot \gamma_{xx} \quad (\text{XVI})$$

Dichos parámetros no son independientes, estando relacionados mediante la expresión (XVII).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{XVII})$$

Dada dicha relación, cualquier pareja de estas características describe la relación tensión-deformación.



### 3.2. BASES DEL ANÁLISIS DINÁMICO

El sistema de análisis con que se realizan los modelos y las posteriores simulaciones se denomina Transient Structural. Se trata de un bloque del software que permite realizar estudios estructurales en el dominio del tiempo, introduciendo también todos los efectos dinámicos. Además de tener en cuenta las bases vistas, este emplea un método de integración implícito para el cálculo de la respuesta. Dicho método permite resolver la ecuación general que gobierna el movimiento, ecuación (XIX), [16, p. 424].

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = \{F\} \quad (\text{XIX})$$

Siendo:

[M] La matriz de masas que componen el sistema.

[C] La matriz de amortiguamiento si el sistema dispone de este. En este caso, no se empleará.

[K] La matriz de rigidez.

{D} El vector desplazamiento.

{F} El vector de fuerzas exteriores actuado sobre el sistema

### 3.3. TIPOS DE CAÍDAS Y TRANSFERENCIA DE FUERZAS

En el estudio del modelo resulta de gran importancia entender cómo tiene lugar la transferencia de fuerzas del contenedor hacia las barras de combustible. Esto es totalmente dependiente del tipo de caída que el contenedor pueda sufrir.

En general, se distinguen tres tipos de caída genéricos: caída vertical, caída horizontal y caída con inclinación y vuelco. En la Figura 11 se pueden observar las orientaciones que toma el contenedor para cada caída.

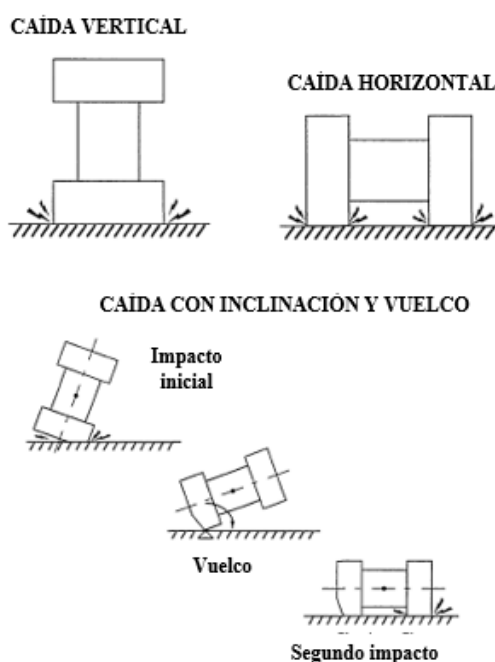


Figura 11. Tipos de caídas que puede sufrir un contenedor en transporte, [15, p. 54].

A continuación, se estudian las respuestas de las barras ante los distintos eventos de caída, así como la forma en que se deben modelar, de acuerdo con la referencia [15].

#### 3.3.1. RESPUESTA A CAÍDA VERTICAL

En esta situación, las fuerzas se transfieren de manera axial desde el contenedor a las barras de combustible gastado, y se distribuyen de igual forma a lo largo de estas últimas. Si se supone que todas las barras del conjunto sufren las mismas deformaciones, tan solo resulta

necesaria una barra para modelizar la caída vertical de un conjunto completo. A pesar de que esta suposición pueda parecer demasiado simplificada, continúa siendo conservadora, debido a la limitación que introducen las barras que rodean a la tomada para el modelo en la deformación de esta última. En la Figura 12 se puede observar esta idea con respecto a la barra central.

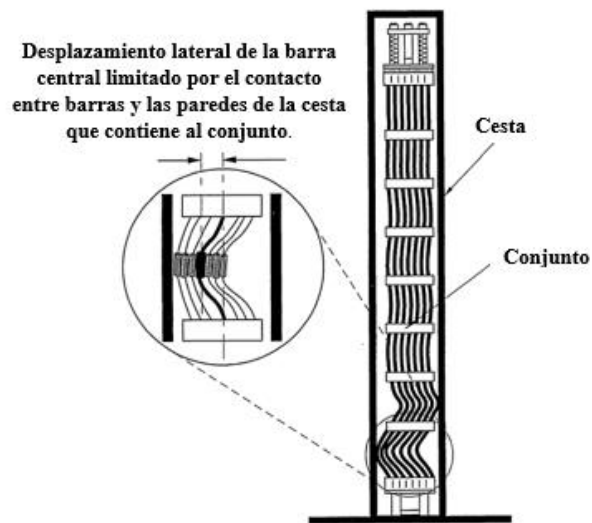


Figura 12. Vista de la limitación del desplazamiento de la barra central de un elemento combustible, [15, p. 61].

Las restricciones laterales en el elemento combustible tienen un papel importante en la determinación de la respuesta de la barra de combustible. Los desplazamientos laterales no restringidos entre las rejillas separadoras incrementan en gran medida la probabilidad de fallo de la barra. Por lo tanto, el modelo de barra completo para la simulación de una caída vertical se compone de una única barra de combustible modelada por elementos viga segmentados, muelles de las rejillas separadoras y muelles de restricción lateral entre las rejillas, tal como se muestra en la Figura 13. El comportamiento de los muelles que representan a las rejillas separadoras está basado en la curva fuerza-deformación de la misma Figura. En ella se muestra la relación fuerza-deformación de una barra central del conjunto del combustible, desde el desplazamiento inicial hasta que todas las barras están en contacto entre ellas y el soporte de la cesta. Cada tramo indica el pandeo de una celda separadora.

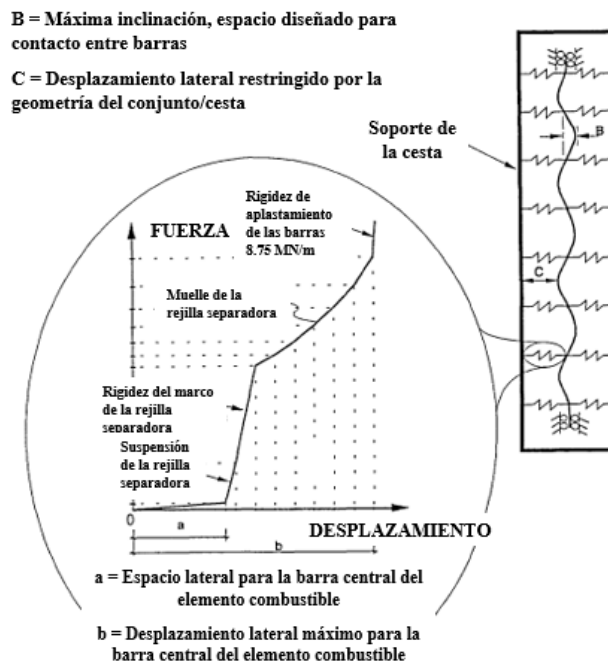


Figura 13. Modelo de la barra para caída vertical y comportamiento de los muelles,[15, p. 62].

El modelo de actuación de cargas sobre uno de los elementos de combustible es el mostrado en la Figura 14. En esta misma Figura se representa también la aceleración frente al tiempo que se prevé.

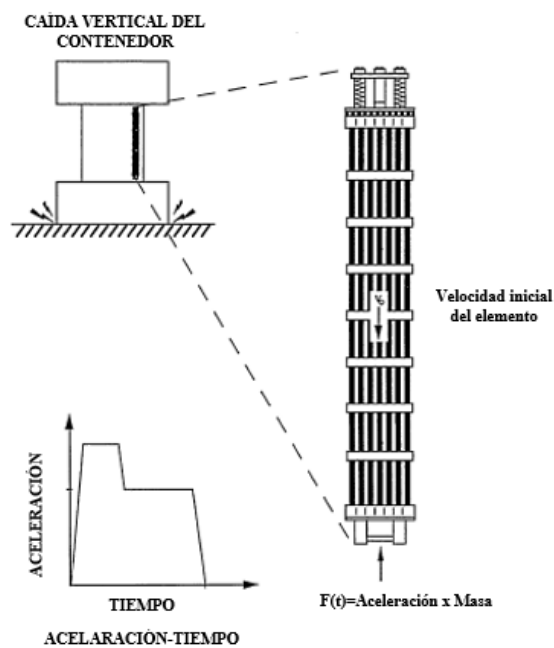


Figura 14. Introducción de cargas en el caso de caída vertical e historial de la aceleración en función del tiempo,[15, p. 63].

Por último, los espacios existentes entre el elemento combustible y el contenedor aumentan la deceleración del sistema debido a la velocidad relativa durante el impacto. Como se muestra en la Figura 15, el elemento combustible cae junto con el contenedor, habiendo entre ellos una separación inicial. Cuando el contenedor impacta contra el suelo, el elemento combustible sigue cayendo. Finalmente, este choca con el contenedor.

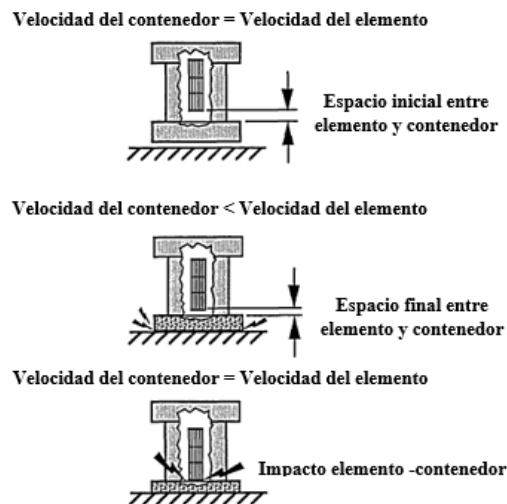


Figura 15. Secuencia de caída y relatividad entre velocidades de elemento y contenedor, [15, p. 65].

### 3.3.2. RESPUESTA A CAÍDA HORIZONTAL

En el estudio de esta caída, el modelo a desarrollar incluye varias barras de combustible pues se requiere la simulación de las interacciones que se producen entre las barras. El modo de transferencia de la fuerza tiene lugar de la siguiente manera:

1. Las rejillas sostienen todo el peso de las barras de combustible.
2. Los contactos separadores comienzan a aplanarse y pierden resistencia cuando la carga aumenta.
3. Cuando las rejillas llegan a su pandeo crítico, se tiene que las barras pasan a estar unas sobre otras.
4. Posteriormente, las barras flectan y el revestimiento de estas se ovaliza hasta tocar las pastillas de combustible de su interior.

Todos estos pasos presentan una relación fuerza - desplazamiento lineal como se muestra en la Figura 16.

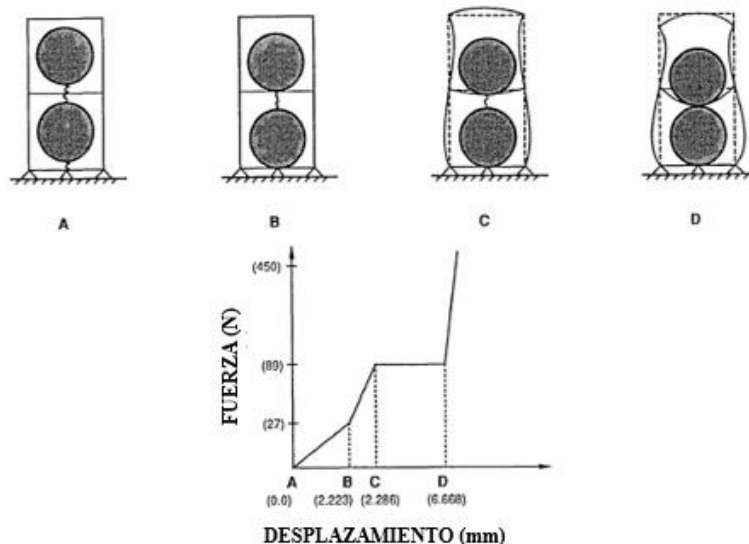


Figura 16. Secuencia del mecanismo de transferencia de la fuerza y gráfica fuerza-desplazamiento para cada fase, [15, p. 56].

Las rejillas separadoras se modelan por medio de muelles, cuyo comportamiento se basa en las relaciones fuerza-desplazamiento lineales de los pasos indicados en la Figura siguiente.

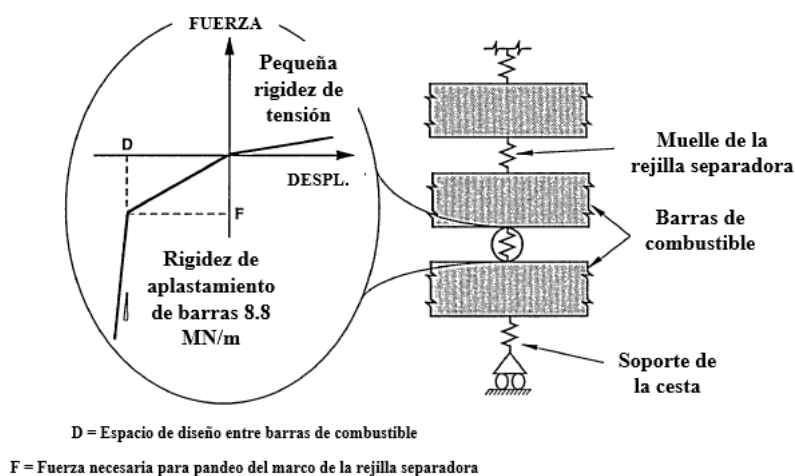


Figura 17. Modelo simplificado de caída horizontal y relación fuerza-desplazamiento para los muelles de dicho modelo, [15, p. 57].

Las barras están limitadas a seguir el movimiento transversal y rotacional de las placas de sujeción finales, pero pueden deslizar hacia dentro y hacia fuera de dichas placas. La barra de sujeción y el tubo guía de la barra de control pueden soportar cargas axiales.

El análisis de la caída se realiza simulando la caída libre del elemento combustible por medio de una velocidad inicial aplicada a todos los elementos que constituyen el modelo. La fuerza del impacto resulta del producto entre masa y valores de aceleración y se obtiene de estudios experimentales de caídas de contenedores de residuos radiactivos. La distribución de fuerzas y el historial de aceleración es el que se muestra en la Figura 18.

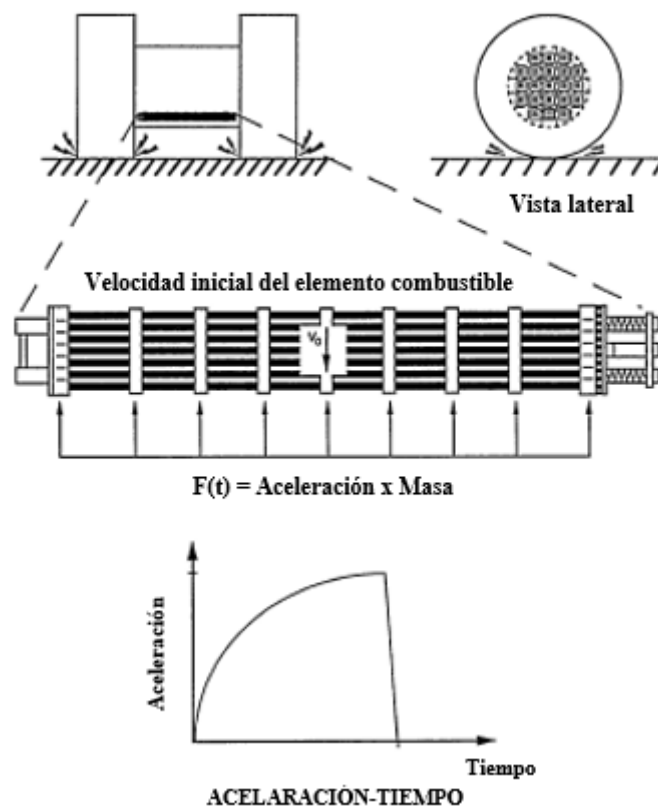


Figura 18. Distribución de fuerzas sobre el elemento combustible e historial aceleración-tiempo,[15, p. 59].

### 3.3.3. RESPUESTA A CAÍDA CON INCLINACIÓN Y VUELCO

Este evento de caída se divide en dos etapas: impacto inicial – a raíz de la caída inclinada -, y segundo impacto – debido al vuelco-. Una de estas etapas será dominante en el estudio de la caída, en función del ángulo entre la base del contenedor y el suelo, que se supone horizontal.

Cuando el impacto inicial es dominante, el ángulo del impacto es grande y el modelo que se emplea para el estudio se asemeja al anteriormente visto para caída vertical. En caso de que el impacto posterior sea dominante por ser el ángulo de impacto menor, la respuesta será analizada a través del modelo para caída horizontal.

Las fases explicadas quedan representadas en las Figuras 19 y 20, en las que, además, se muestran las distribuciones de fuerzas sobre un elemento y los historiales de aceleración.

El caso de impacto inicial se modela como una única barra de combustible, con una carga lateral y rotacional debida al ángulo de impacto. La Figura 19 muestra la velocidad inicial aplicada, las cargas actuantes sobre el conjunto y la gráfica de aceleración-tiempo.

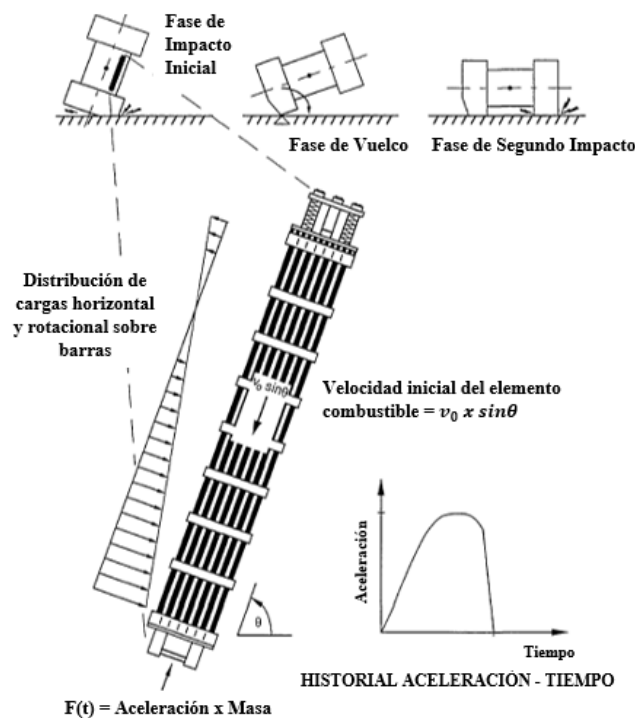


Figura 19. Cargas e historial aceleración-tiempo para dominancia de impacto inicial,[15, p. 66].



La respuesta al caso del segundo impacto se parece a la respuesta de la caída lateral, pero con una pequeña modificación en el modelo bidimensional. La Figura 20 muestra la actuación de las cargas y de la velocidad sobre el conjunto, así como las representaciones gráficas de las aceleraciones transversal y rotacional frente al tiempo:

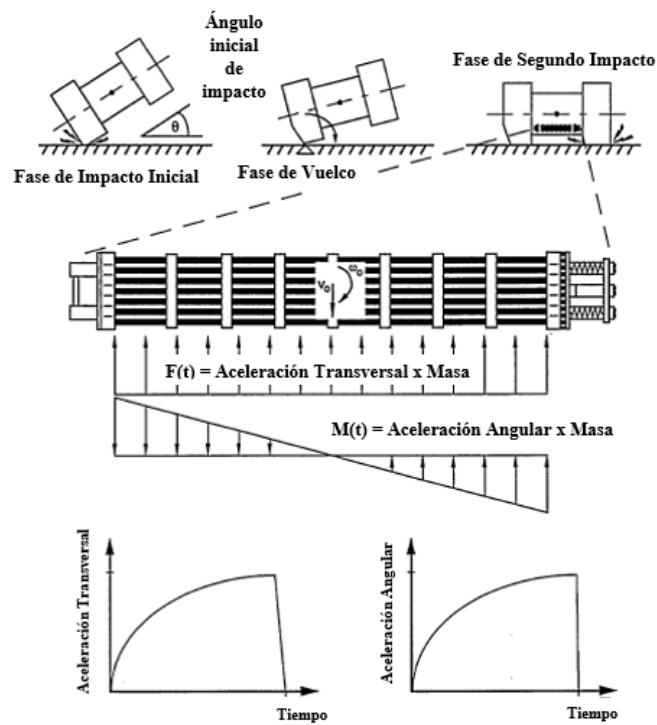


Figura 20. Cargas e historial aceleración-tiempo para dominancia de segundo impacto,[15, p. 67].

### 3.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En la realidad, la mayoría de los problemas resultan demasiado complicados para proceder a su resolución de manera analítica. Esto se debe a la complejidad que pueden presentar la geometría del cuerpo o las condiciones de contorno, así como la consideración de efectos dinámicos y la no linealidad. Además, normalmente, la descripción de las leyes de la física para problemas dependientes de espacio y tiempo se expresa por medio de ecuaciones diferenciales parciales. Para la mayoría de los casos, dichas ecuaciones no pueden ser resueltas por métodos analíticos. En su lugar, puede realizarse una aproximación de dichas ecuaciones basada en discretización.

Los métodos de discretización aproximan las ecuaciones diferenciales parciales por medio de ecuaciones algebraicas que se pueden resolver empleando métodos numéricos. La solución de las ecuaciones numéricas es una aproximación de la solución real de las ecuaciones diferenciales, [18]. El Método de Elementos Finitos (MEF) se usa para calcular dichas aproximaciones. Lo que ocurre es que el sistema es dividido en múltiples elementos pequeños, con una geometría simple y finita, de modo que las ecuaciones correspondientes puedan ser totalmente definidas. Para cada uno de los elementos, se propone la resolución de las ecuaciones de forma simultánea.

Véase como ejemplo una función  $u$  cualquiera, que es la variable dependiente en una ecuación diferencial parcial.  $u$  puede aproximarse por una función  $u_h$ , por medio del uso de combinaciones lineales de funciones base de acuerdo con las siguientes expresiones, (XX) y (XXI):

$$u \approx u_h \quad (XX)$$

$$u_h = \sum_i u_i \psi_i \quad (XXI)$$

Siendo,  $\psi_i$ , en la expresión (XXI), las funciones base, y  $u_i$ , los coeficientes de las funciones con que se realiza la aproximación de la expresión (XX). Para el caso de un problema en una

dimensión, la Figura 21 ilustra cómo las funciones base toman el valor de 1 en sus correspondientes nodos mientras que en el resto, son nulas.

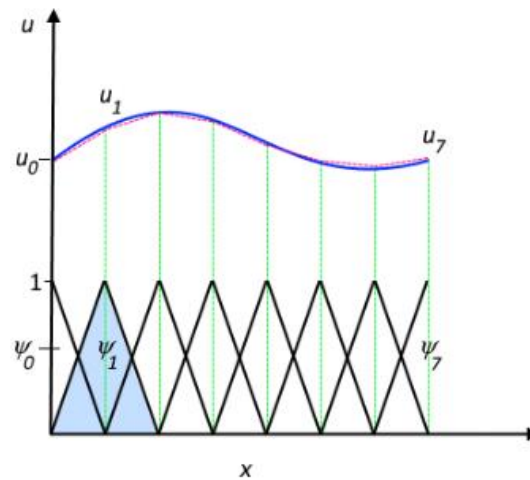


Figura 21. Representación de la función  $u$ , de su aproximación y de las funciones base, [18].

Una de las ventajas del MEF, de acuerdo con la referencia [18], es que la selección de la forma en que se discretiza es prácticamente libre, permitiendo distribuir tanto los elementos de espacio como los de las funciones base de manera no uniforme, como se puede ver en la Figura 22.

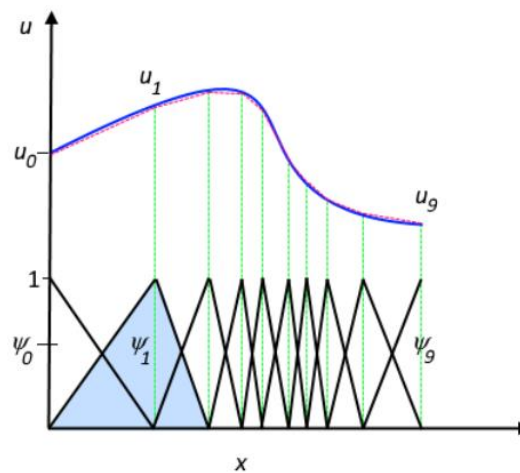


Figura 22. Aproximación de la función  $u$  por medio de una combinación de funciones lineales distribuidas de manera no uniforme, [18].

Las funciones mostradas en las figuras anteriores se corresponden con casos lineales, mas dependiendo del problema que se desee resolver, se podrán emplear otro tipo de funciones, no lineales.

En el caso de emplear funciones lineales en dos y tres dimensiones, los elementos más comunes son los que se muestran en la Figura 23. Las funciones base se definen como funciones de las posiciones de los nodos ( $x, y$  en 2D;  $x, y, z$  en 3D).

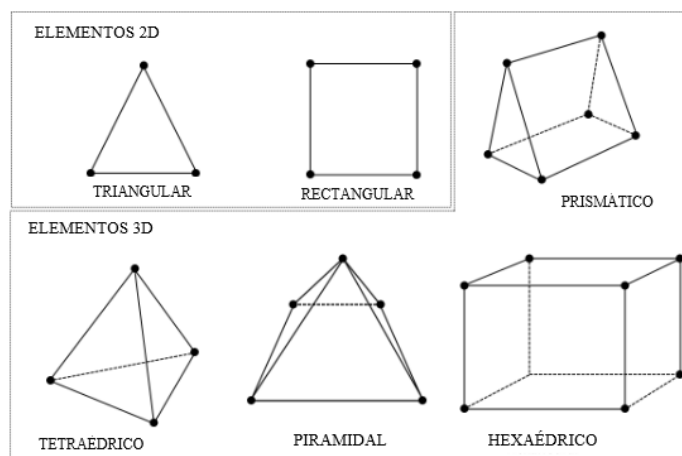


Figura 23. Elementos más comunes en 2 y 3 dimensiones, [18].

Por lo general, en dos dimensiones se aplican los elementos rectangulares cuando se trabaja con problemas de análisis de mecánica estructural. La analogía en tres dimensiones es el hexaedro y también se aplica normalmente a la mecánica estructural y al mallado de las capas de contorno del cuerpo.

Las funciones base que mayor eficiencia aportan son, normalmente, las funciones polinomiales cuadráticas. En este caso, se añade un nodo más en el medio de cada borde. Los elementos se identifican como elementos cuadráticos, de segundo orden o de orden superior, [16, p. 37]. Las Figuras 24 y 25 ilustran los tipos básicos de elementos que se emplean en ANSYS Workbench, para cuerpos sólidos y cuerpos superficiales en tres dimensiones.

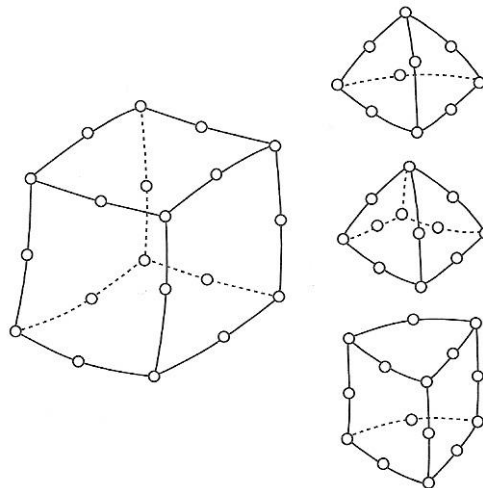


Figura 24. Representación de elementos sólidos 3D y la disposición de sus nodos. Adoptan diferentes geometrías: hexaedro, tetraedro, pirámide con base cuadrada y prisma de base triangular, [16, p. 38]

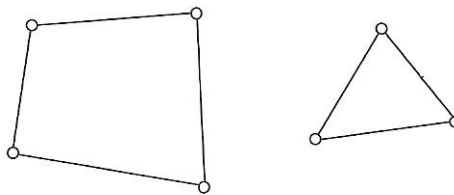


Figura 25. Representación de elementos superficie 3D. Cuadrilátero y triángulo, [16, p. 38]

Cuando se trata del MEF, una consideración importante a hacer es la estimación del error. Esto se debe a que cuando se alcanza una determinada tolerancia, tiene lugar la convergencia y da lugar a una solución aproximada al modelo matemático de ecuaciones. La diferencia existente entre la solución exacta y las ecuaciones numéricas de las ecuaciones del modelo matemático es el error, según la expresión (XXII).

$$e = u - u_h \tag{XXII}$$

En algunos casos, dicho error puede estimarse antes de la resolución de las ecuaciones numéricas, prediciendo el orden de convergencia del método de elementos finitos aplicado. Cuanto más denso es el mallado, más rápido decae el orden de convergencia.

## 4. ESTADO DEL ARTE

El estudio de la respuesta de los contenedores y de los elementos combustibles depositados en su interior suscita una gran cantidad de cuestiones debido al deseo de mantener en todo momento los criterios de seguridad exigidos por normativa. Desde la década de los noventa hasta ahora se ha registrado un aumento en la realización de estudios acerca de las respuestas a diferentes condiciones por parte de los contenedores y el combustible a nivel internacional. Además, dada la peligrosidad de la exposición a la radiación emitida por los residuos, ha resultado de gran utilidad el desarrollo de software de simulación que permite estudiar y predecir comportamientos sin la necesidad de experimentar con los componentes.

La base de los estudios en esta materia la constituye el documento SAND90-2406 [15], publicado en 1992 por Laboratorios Sandia en Estados Unidos. Se trata de un informe en que se examinan los requerimientos de los contenedores para el transporte de combustible nuclear gastado en condiciones normales y bajo hipótesis de accidente. El objetivo principal se centra en la creación de una metodología capaz de estimar la probabilidad con que se producirá el fallo de las barras de combustible y la cantidad de material radioactivo que puede ser liberado debido a dicho fallo.

Los análisis hechos a las barras de combustible dependen del comportamiento que tiene el contenedor en el que se encuentran, y de cuyo comportamiento existe más información debido a los ensayos que de acuerdo con la normativa han de ser sometidos para garantizar su fiabilidad. Se tienen en cuenta, además, las condiciones previas al transporte y la dependencia de la altura de las caídas. Los elementos analizados son tanto para BWR como para PWR. En la Figura 26 se puede ver la disposición que se contempla del elemento combustible dentro del contenedor y algunas de las partes esenciales de este último.

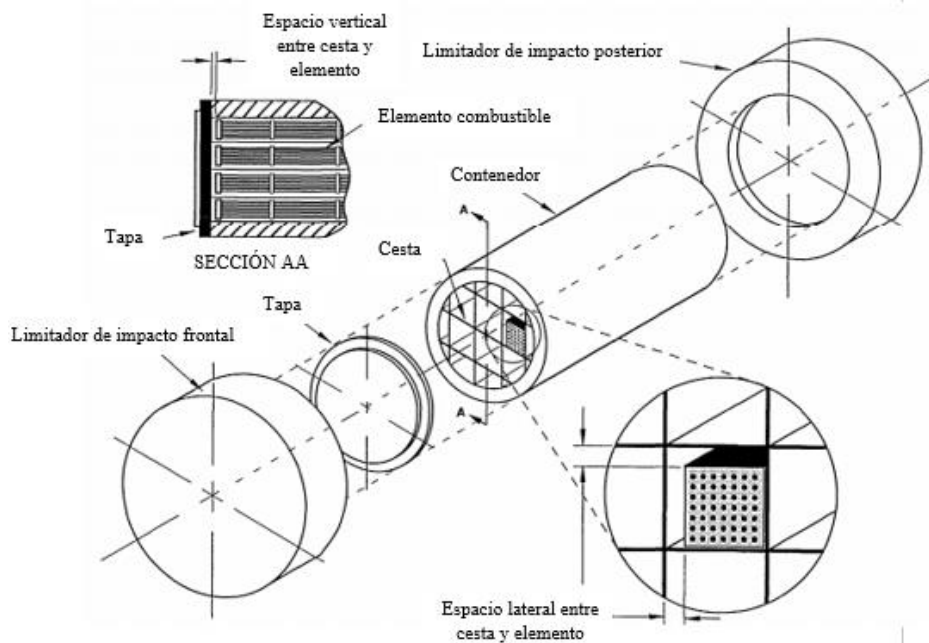


Figura 26. Componentes de un diseño de contenedor, [15, p. 92].

A lo largo del estudio se definen diversos tipos de caídas -vertical, horizontal y vuelco-, para las cuales se proponen modelos ajustados a las condiciones de cada una. En la Figura 27 se puede ver una imagen del modelo propuesto para la caída horizontal, bastante más complejo y con un mayor número de elementos que en el caso de caída vertical.

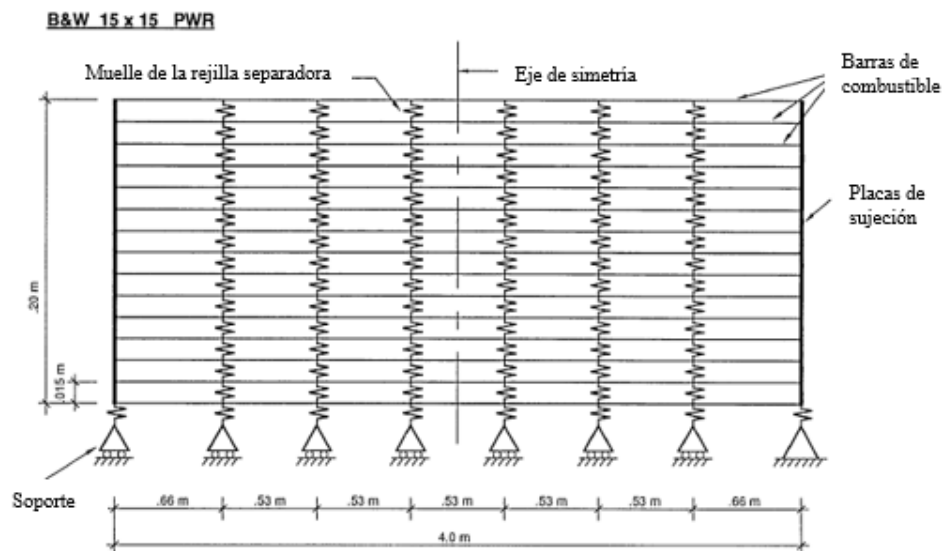


Figura 27. Modelo del elemento combustible en caída horizontal propuesto por el SAND90-2406, [15, p. 58].

Las condiciones de carga del combustible no solo se estudian para eventos de caídas, también se hace un estudio de las vibraciones en condiciones normales de transporte y de la influencia

térmica en caso de exposición a fuego durante un tiempo de media hora. En todo momento, las propiedades físicas de los materiales involucrados son dependientes de la temperatura.

Por su parte, en 2007, la Comisión de Regulación Nuclear publicó el documento NUREG 1864 [14] en el cual se desarrolla una metodología sistemática para la evaluación de riesgos y fallos en contenedores de almacenamiento en seco y que se propone como guía para futuros proyectos con finalidades similares. En él se estudian diversas situaciones a la que puede verse sometido un contenedor de múltiple propósito durante los procesos de carga del combustible gastado en su interior, preparación para el almacenaje y transporte al lugar de almacenamiento. Entre otras opciones, se contemplan caídas del contenedor mientras este se manipula, así como la influencia de terremotos, inundaciones y accidentes o explosiones.

Principalmente, se modelan las cargas mecánicas y térmicas para determinar la respuesta del contenedor. Esto se realiza por medio del uso del software LS-DYNA, basado en el método de elementos finitos, y otras herramientas que se basan en el método de Montecarlo. Además, se realizan estimaciones de la exposición a los riesgos mencionados anteriormente y de la frecuencia de ocurrencia de estos.

En esta evaluación, el estudio de los accidentes de caída se centra en las caídas de tipo vertical. Los elementos combustibles son analizados como un conjunto de columnas largas y delgadas, con soportes intermedios conocidos como rejillas espaciadoras. La sección que soporta todo el peso de la columna es aquella que se encuentra en el segmento entre las dos rejillas separadoras de la parte inferior. Esta idea se propone como una simplificación respecto del documento anterior utilizada para el modelado en ordenador de la barra.

Para dicho segmento, por tanto, la carga crítica de pandeo es  $\alpha_{cr}$  y se obtiene según indica la ecuación (XXIII):

$$\alpha_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot I_c}{l^2 \cdot (W_c + W_f)} \quad \text{(XXIII)}$$

Siendo los términos los siguientes:



$l$ : Longitud axial de la barra entre las dos rejillas separadoras consecutivas del final

$E_c \cdot I_c$ : Rigidez de flexión del revestimiento

$W_c$ : Peso total del revestimiento de la barra de combustible

$W_f$ : Peso total de las pastillas de combustible presentes en la barra que se está analizando

En cada impacto, las interacciones que se producen tienen lugar entre diversos componentes, como son: centenares de barras, sus rejillas separadoras, placas de anclaje, separadores del combustible, la cesta y el contenedor.

Teniendo en cuenta que el análisis se realiza por medio de simulación computacional y que se busca en todo momento alcanzar la máxima eficiencia posible, se desarrolla un modelo 3D de elementos finitos consistente en una única barra de combustible con restricción en el desplazamiento lateral que incorpora a todos los componentes mencionados anteriormente por medio de la definición de condiciones de contorno específicas. Así, el estudio está centrado en el comportamiento de una barra de combustible bajo cargas dinámicas de impacto.

Para la evaluación del modelo, se asume lo siguiente:

- a. Todas las barras del elemento combustible sufren la misma deformación. Por tanto, la respuesta de una sola barra es característica y se puede estudiar independientemente. En este caso, la barra central es la que representa la respuesta de todo el conjunto de barras.
- b. Todas las deformaciones de flexión tienen lugar a un solo plano.
- c. Las propiedades de masa y de rigidez del área transversal del revestimiento es modelado por medio elementos tipo superficie.
- d. Las interacciones entre las pastillas de combustible y el recubrimiento de la barra no se incluyen debida la limitada información de que se dispone en ese momento.
- e. Las barras de combustible gastado muestran, generalmente, desviaciones en su posición vertical tras la exposición al flujo neutrónico. Por tanto, antes de la simulación, estas se deben presentar ya deformadas un tanto.
- f. Las rejillas de separación se insertan en el modelo como muelles. Son ellas las que soportan lateralmente las barras de combustible, con una curva fuerza-desviación no lineal.

- g. El contenedor también se incluye en el modelo de modo que las interacciones dinámicas entre combustible y contenedor queden registradas en el estudio. La representación de este en el modelo se define como una masa puntual

El modelo de la barra de combustible desarrollado se muestra a continuación en la Figura 28.

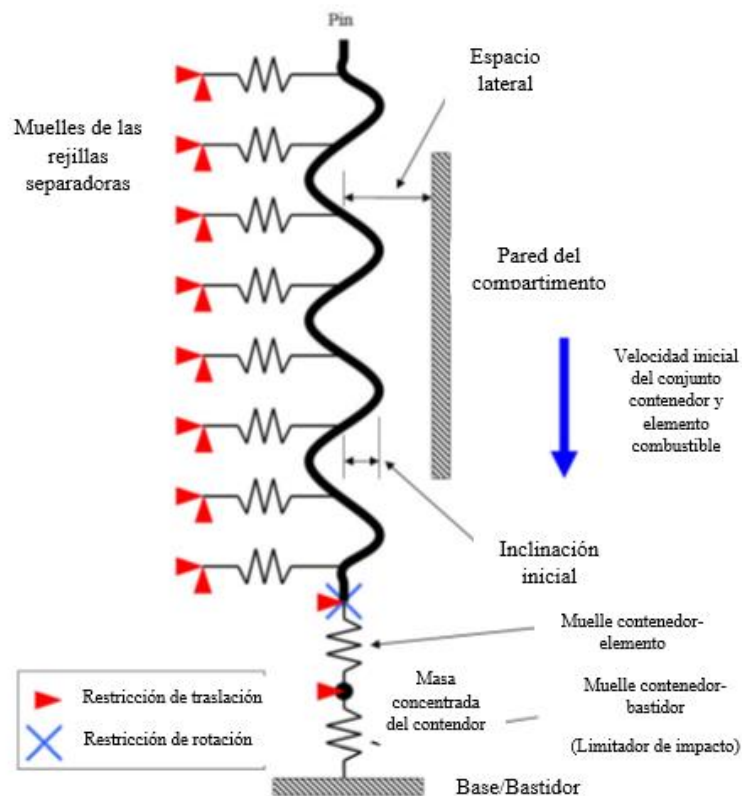


Figura 28. Modelo de la barra propuesto por el NUREG-1864, [14, p. C4].

Más recientemente, los estudios han pasado a ser más concisos en las consideraciones realizadas a la hora de crear un modelo matemático que recoja todas las condiciones observadas en la realidad. Por ello, un estudio del Instituto de Ciencia y Tecnología de Corea del Sur analiza el comportamiento de una barra de combustible en caída con especial atención en la influencia de la unión entre las pastillas de combustible y el revestimiento de las barras. Esta unión no se había tenido en cuenta en estudios anteriores, los cuales consideraban que las pastillas de combustible no añaden información estructural al modelo[19].

Según se describe en el artículo publicado en 2018 por Almomani et al. [19], la unión entre pastillas y revestimiento tras el quemado del combustible en el reactor incide significativamente en la magnitud que adquiere la máxima deformación principal plástica de una barra y en su ubicación, afectando por consiguiente a la resistencia total de la estructura. De nuevo, se emplea una herramienta informática basada en elementos finitos, en este caso, ABAQUS. Dos modelos son propuestos. Estos se diferencian en el tipo de interacción mecánica con que se modeliza la unión:

- Unión con epoxy.
- Contacto sin fricción entre ambos elementos.

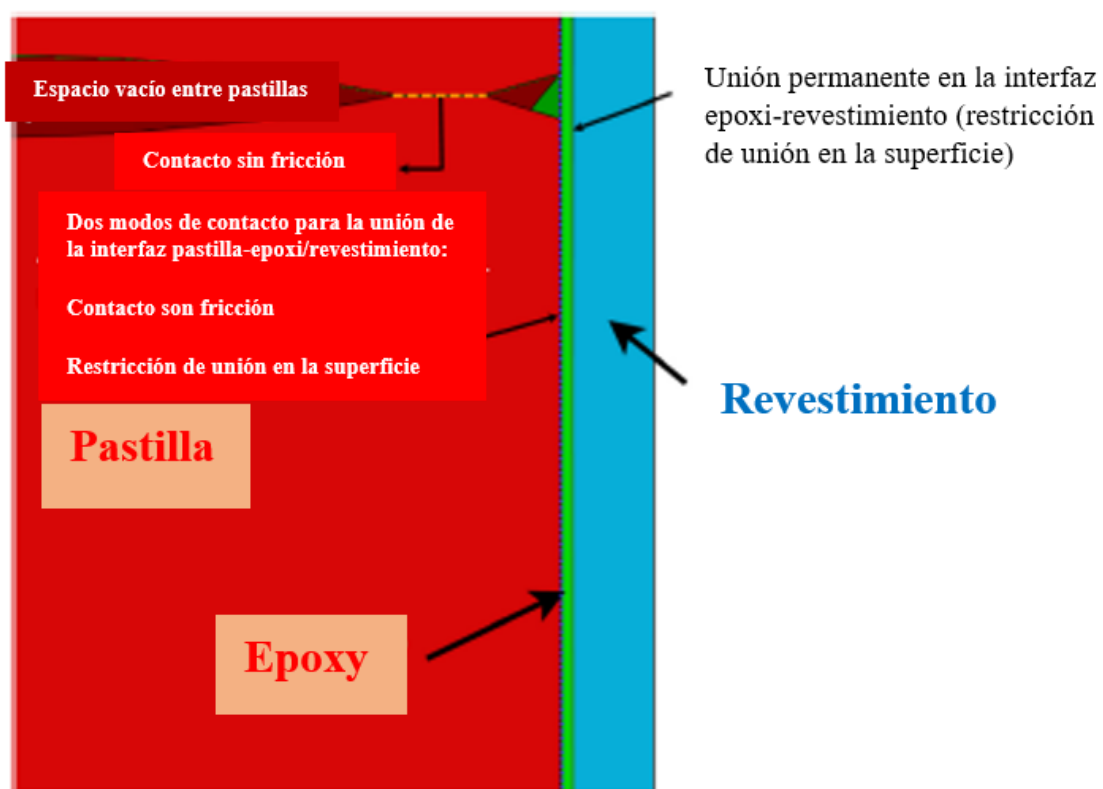


Figura 29. Área de contacto en una sección del modelo propuesto por Almomani et al., [19, p. 330].

Por último, más recientemente y con el objetivo de optimizar el peso computacional del modelo propuesto por Almomani et al., Lee et al. [20] han publicado un artículo en que se realiza un modelo simplificado de una barra de combustible gastado considerando la

influencia de las interacciones entre pastillas y revestimiento. En la Figura 30 se puede observar el modelo numérico que consiste en una pieza de revestimiento y varias piezas representando las pastillas de combustible en su interior.

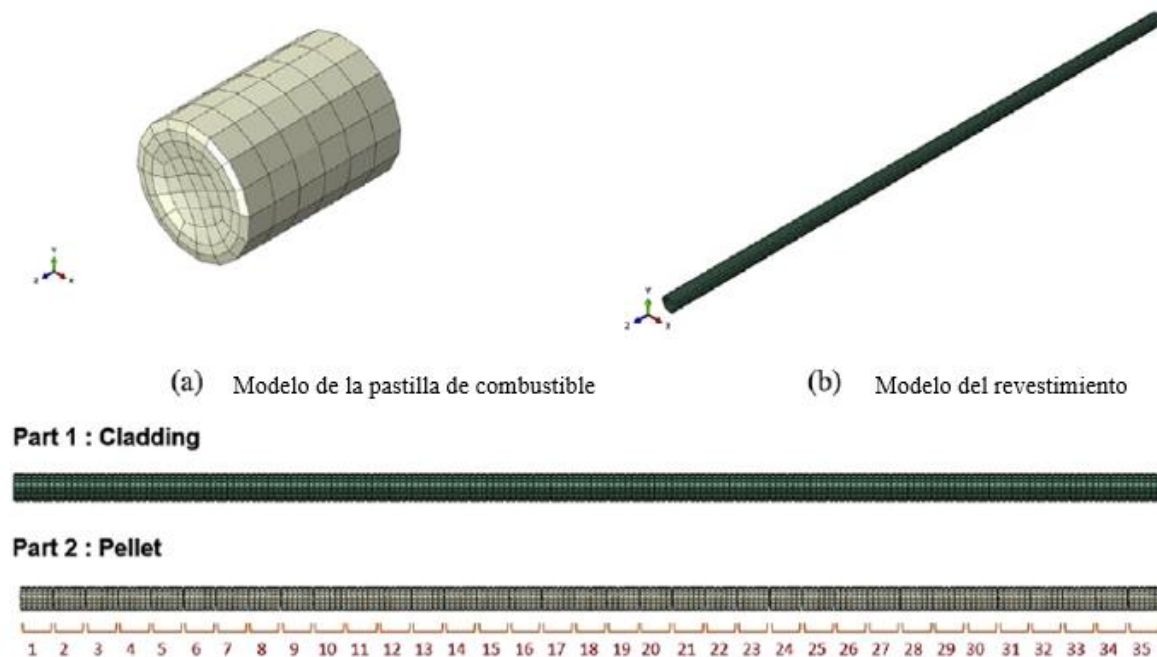


Figura 30. Composición del modelo de segmento de la barra propuesto por Lee et al., [20, p. 4].

En este caso, se ha cortado el modelo completo a una determinada distancia – según se comenta en el artículo, la longitud del modelo simplificado no resultaba demasiado significativa – de la base de la barra. Se ha adaptado su respuesta a los casos ya conocidos de otros artículos. Los parámetros de temperatura y propiedades del material se han determinado por medio de métodos estadísticos, llegando a valores redondeados. Después de esto, empleando también ABAQUS, se ha estudiado la respuesta del modelo a las condiciones de una caída en posición horizontal, comparando los historiales de desplazamiento de la barra en dos casos: 1) con revestimiento y vainas de combustible separadas y 2) con revestimiento y vainas de combustible unidas. En la Figura 31 se muestran algunos de los resultados graficados obtenidos en el estudio en cuestión.

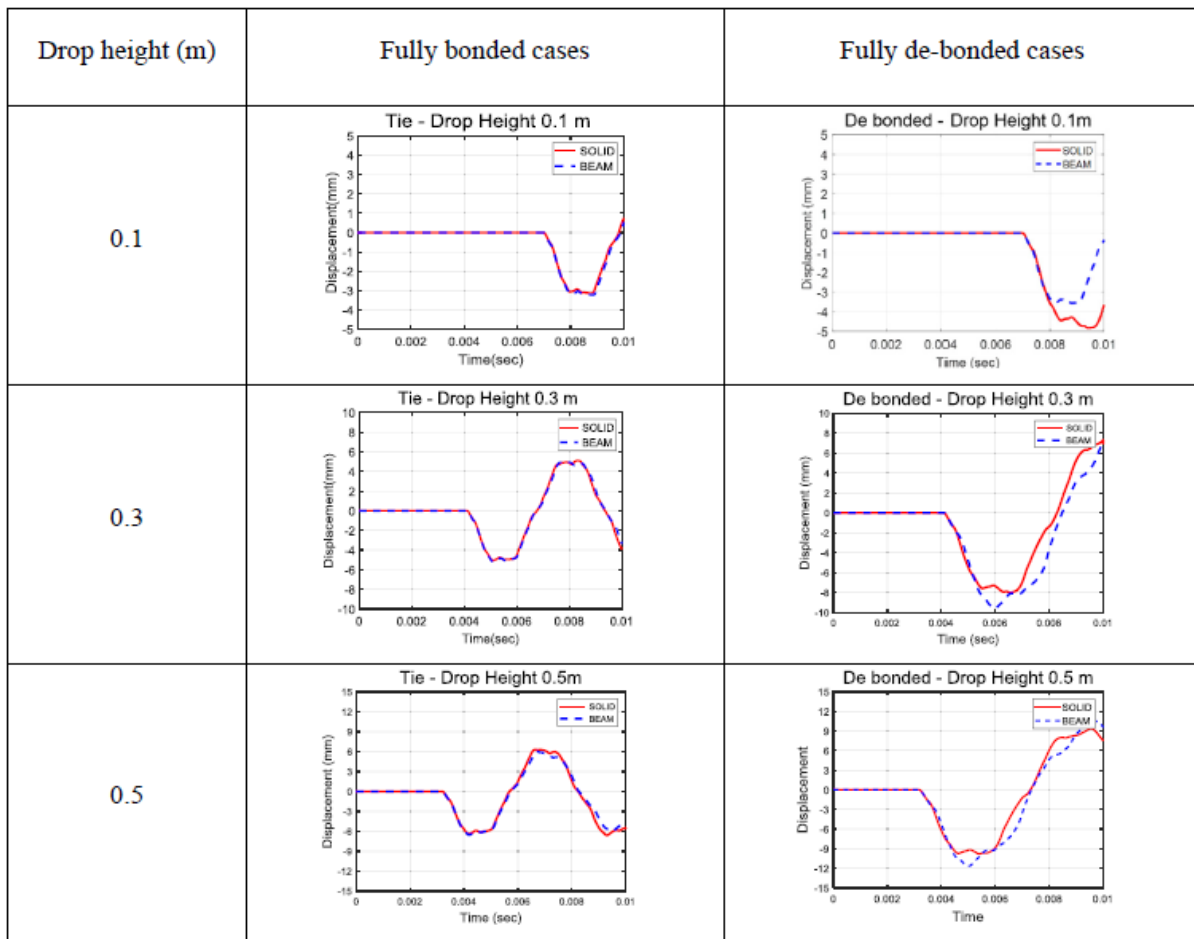


Figura 31. Gráficas de los historiales de desplazamiento máximo en función del tiempo y de la altura de la caída, [20, p. 10].

## 5. DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO

Una vez conocido el trasfondo teórico del diseño y del estudio que se desea realizar, se procede a trabajar en la herramienta ANSYS Workbench para la modelización del elemento de combustible nuclear gastado que, como ya se ha visto, deriva, mediante una simplificación consistente, en una única barra para el caso de caída vertical. Dentro de la herramienta Workbench se distinguen diversos sistemas de análisis que basan sus cálculos en distintas leyes físicas según se estén estudiando fluidos, cuerpos rígidos o deformables, así como la influencia que puede tener en ellos la temperatura, por ejemplo. En este caso, se trabaja con el sistema de análisis Transient Structural, el cual se describe a continuación, antes de proceder a la descripción de la obtención de los modelos.

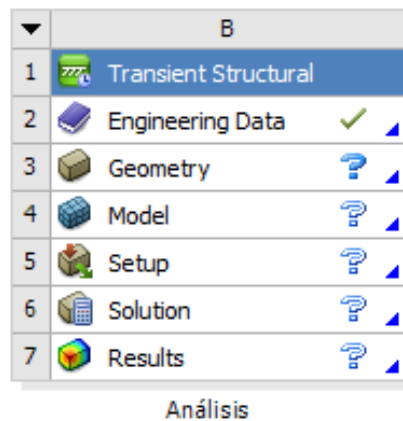
### 5.1. TRANSIENT STRUCTURAL

Transient Structural es un sistema de análisis, perteneciente a ANSYS Workbench, que permite realizar análisis temporales. Emplea el resolvidor que incorpora el software y se conoce como ANSYS Mechanical, en adelante Mechanical.

Se ha elegido este sistema de análisis porque ofrece la posibilidad de estudiar y obtener resultados de la respuesta dinámica de una estructura cualquiera, bien sea rígida o flexible, bajo la acción de cargas dependientes del tiempo. Los resultados que se pueden obtener son tanto desplazamientos, como tensiones, deformaciones y fuerzas presentes en la estructura, todos ellos variables en el tiempo. Además de las posibilidades de análisis, otra razón por la que se emplea este sistema es la importancia que toman las fuerzas de inercia.

A nivel computacional, un bloque de Transient Structural requiere más recursos que uno estático, como Static Structural, y, por tanto, el tiempo de resolución será mayor, aunque este es variable en función de múltiples factores, como el mallado.

Una característica a tener en cuenta de ANSYS Workbench es el orden en la realización de actividades a llevar a cabo para completar el análisis con éxito. Como se puede ver en la Figura 32, el sistema de Transient Structural consta de seis pasos a seguir. En los siguientes apartados se detallan las tareas realizadas en cada paso.



*Figura 32. Diagrama de flujo de trabajo de Transient Structural en ANSYS Workbench.*

El diagrama mostrado en la Figura 32 es un esquema simple de uno de los bloques de Transient Structural. Sin embargo, cuando se finalice el trabajo, se podrá ver cómo el proyecto incorpora más bloques que, además, estarán interconectados.

## 5.2. DATOS DE INGENIERÍA (ENGINEERING DATA)

En primer lugar, se procede a la definición de los *Datos de Ingeniería*, referidos a las características de los materiales que se emplean en el modelo. Dado que en este caso el revestimiento de la barra que se debe representar es de Zircaloy, se introducen los valores para este material presentados en la tabla 1 y que se han extraído de la referencia [20]. Todos estos datos se corresponden con el comportamiento del material en cuestión a una temperatura ambiental media de 300°C.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del Zircaloy del revestimiento.

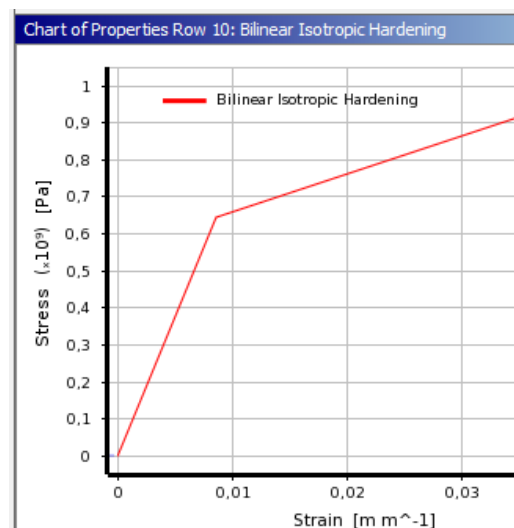
Densidad, $\rho$ ( $kg/m^3$ )	6590
Módulo de elasticidad / Young, E (MPa)	75220
Coeficiente de Poisson	0,33
Módulo de cizalla, G (MPa)	28280
Límite elástico, $\sigma_y$ (MPa)	644,79
Tensión última, $\sigma_{e+p}$ (MPa)	788,68

La figura 33 muestra la introducción de los datos en la ventana de *Datos de Ingeniería*. Las dos celdas sombreadas en color gris presentan datos que el propio programa calcula cuando se introducen la densidad, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

Properties of Outline Row 4: Zircaloy			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	6590	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modu...	
6	Young's Modulus	75220	MPa
7	Poisson's Ratio	0,33	
8	Bulk Modulus	7,3745E+10	Pa
9	Shear Modulus	2,8278E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	644,79	MPa
12	Tangent Modulus	10277	MPa
13	Tensile Ultimate Strength	788,68	MPa

*Figura 33. Tabla con los datos del Zircaloy introducidos en el programa.*

Como se puede observar en la Figura 33, el Zircaloy queda definido como material isótropo, teniendo gran importancia la zona lineal. A pesar de ello, con los valores de tensión última y límite elástico, el programa grafica la curva tensión-deformación mostrada en la Figura 34 para el material del revestimiento. La curva obtenida es una simplificación de la real, pues en zona plástica la relación ha sido linealizada automáticamente.



*Figura 34. Curva tensión-deformación realizada por ANSYS Workbench al definir el material.*



### 5.3. GEOMETRÍA

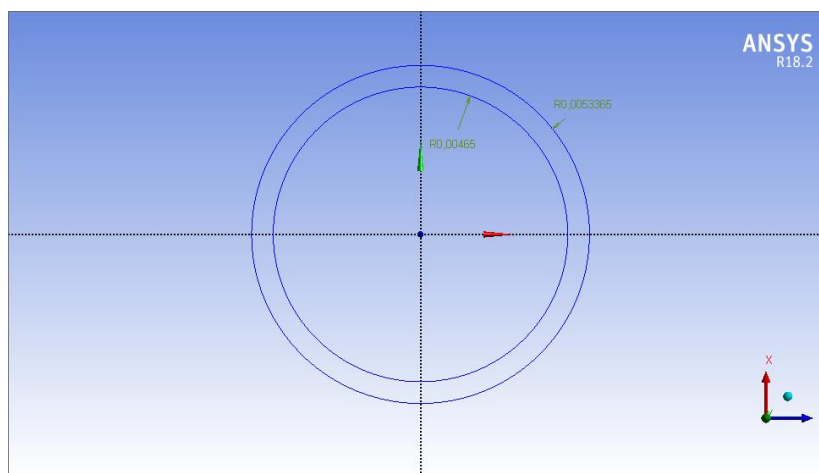
En segundo lugar, se desarrolla la geometría, la cual será la misma para los dos modelos. Actualmente, ANSYS dispone de dos herramientas de dibujo, Design Modeler y Space Claim, siendo la última de estas la aplicación por defecto. Sin embargo, se opta por hacer los bocetos y la generación del cuerpo en Design Modeler pues es sencillo y es la aplicación que se enseña a utilizar en el manual de la referencia [16].

Así, la barra que representa al elemento combustible tiene las dimensiones indicadas en la tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones del revestimiento de la barra de combustible, [21].

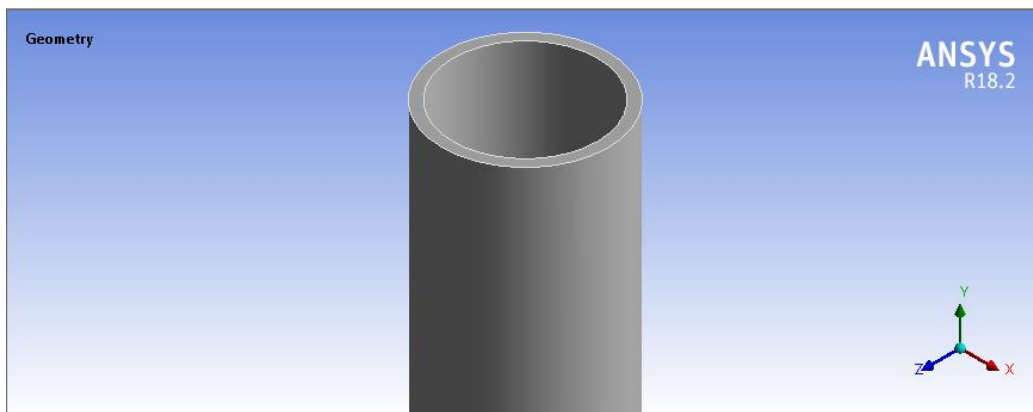
Radio exterior (m)	0,00465
Radio interior (m)	0,0053365
Longitud total(m)	4,0
Longitud para el modelo (m)	0,89231

Partiendo de los datos de la tabla 2 se dibuja el boceto en 2D, el cual se compone de dos circunferencias de radios el interior y el exterior de la mencionada tabla. Este boceto se observa en la Figura 35.



*Figura 35. Boceto de la sección transversal de la barra de combustible.*

A continuación, para conseguir el modelo 3D, se extruye el boceto, con una longitud de 0,89231m desde la base de esta y que se corresponde con la zona más susceptible de la barra. Entiéndase como zona más susceptible de la barra aquella región de la base del elemento situada entre las dos primeras rejillas separadoras que soportan todo el peso. Allí es donde se establece que ocurre el pandeo crítico del elemento. En la figura 36 se muestra una captura de la parte superior de la geometría conseguida.



*Figura 36. Zoom de la geometría 3D desarrollada en Design Modeler. Boca superior de la barra.*

Hasta aquí, se terminaría con la definición de la geometría necesaria usada tanto en el modelo sólido como en el modelo superficie. Más tarde, se explicará con más detalle en qué consiste cada modelo y cuál es su diferencia. Sin embargo, aun trabajando en Design Modeler, se procede a configurar el cuerpo para el modelo superficie. Para ello, se duplica el bloque de *Geometría* y se hace uso de una opción denominada *Mid-Surface*. Una vez activa esta opción, se selecciona la barra, indicando que se desea convertir el cuerpo a uno de tipo superficial. A continuación, se seleccionan las caras interior y exterior del tubo que conforma la barra. De esta manera, se obtiene una barra formada por un plano intermedio, con los que más tarde de continuará trabajando. Véase la Figura 37 donde se muestra cómo queda la geometría del modelo en superficie. Obsérvese la falta de espesor en este caso.

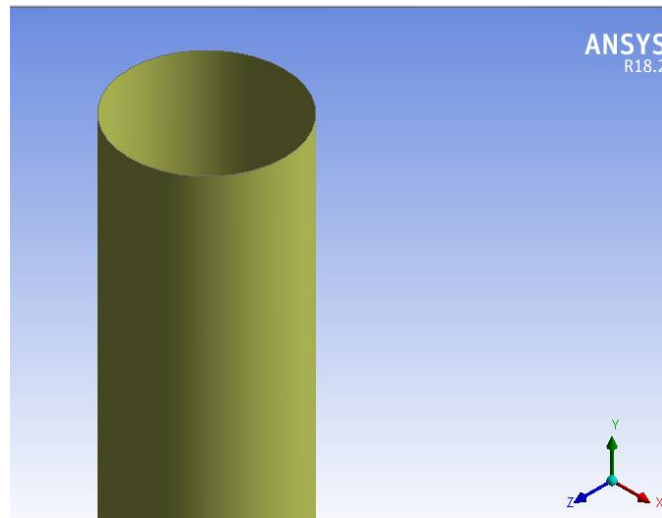


Figura 37. Zoom de la geometría 3D generada para el modelo en superficie.

#### 5.4. SUPUESTOS SIMPLIFICATIVOS CONSIDERADOS

A pesar de buscar un modelo lo más fiel a la realidad posible, resulta necesaria la aplicación de una serie de simplificaciones en la modelización para evitar un gran gasto computacional y tiempos de cálculo desmedidos para el presente trabajo. En todo caso, dichas simplificaciones son siempre conservadoras de modo que el comportamiento en la simulación sea lo más aproximado posible al esperado en la realidad.

**Primer supuesto.** El movimiento en los extremos de la barra está restringido en las direcciones transversales a la dirección axial. Esto quedaba ilustrado en la Figura 13.

**Segundo supuesto.** En la realidad, a la altura de la rejilla separadora, la barra está rodeada por esta en todo su perímetro. En el estudio de la caída vertical, se simplifica la acción de dicha rejilla a una determinada área, quedando libres las otras partes de la barra, como se muestra en la Figura 38.

**Tercer supuesto.** Las rejillas separadoras se consideran prácticamente rígidas, pero se modelan con muelles lineales que proporcionan algo de flexibilidad al modelo. La rigidez de dichos muelles es constante y de valor  $k=65\text{N/mm}$ . El recorrido máximo de la barra en la dirección de los muelles es de  $1,775\text{mm}$ , longitud que se da a los muelles que se definen más adelante.

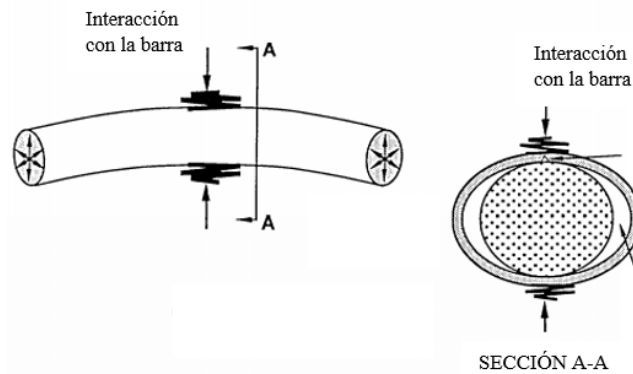


Figura 38. Interacción de las cargas laterales debidas a rejillas separadoras supuestas en una sola dirección, [15].

**Cuarto supuesto.** En las demás partes de la barra que no son los extremos, el movimiento no está permitido axialmente. Solo podrá desplazarse la barra en la dirección transversal al eje. Por consiguiente, se estará siguiendo la dirección que tienen los muelles. Estos solo podrán comprimir o traccionar, pero no deformarse en ninguna otra dirección.

## 5.5. MODELOS Y CONDICIONES DE CONTORNO

A partir del paso *Modelo* en el esquema de flujo de trabajo, se hacen los dos modelos por separado. Se debe tener en cuenta que las hipótesis que implican no son las mismas, así como las definiciones en el programa varían de un tipo de elementos a otros. A continuación, se presentan las hipótesis y supuestos que se asocian al modelo sólido y al modelo superficial.

### 5.5.1. EN QUÉ CONSISTE EL MODELO SÓLIDO

En ANSYS Workbench hay tres tipos de cuerpos 3D soportados: cuerpos sólidos, cuerpos superficie y cuerpos lineales. El primero de los modelos que se realizan es un modelo compuesto por un cuerpo sólido, representando la barra de combustible nuclear gastado. El modelo sólido se caracteriza por permitir un análisis completo de la estructura. Se diferencia de los otros tanto en los métodos de mallado y como en las condiciones de contorno disponibles en Mechanical a la hora de definir las distintas hipótesis que se plantean. La barra

se dividirá en pequeños elementos en todo su volumen. El número de elementos y nodos variará según la configuración de mallado que se elija, cosa que se comentará más adelante.

### 5.5.2. EN QUÉ CONSISTE EL MODELO SUPERFICIAL

El segundo modelo se compone de un cuerpo superficie, el cual pasa a estar formado por elementos planos con un espesor de valor nulo. ANSYS Mechanical permite convertir los cuerpos sólidos en cuerpos superficie o bien en sólidos delgados, teniendo estos últimos un pequeño valor de espesor, pero no se contemplan en este trabajo.

En el modelo de superficie el mallado del cuerpo no puede ser realizado con los mismos métodos que los empleados en cuerpos sólidos. Además, es destacable que son necesarios menos nodos y elementos finitos en este caso que en el anterior. Esto resulta en un ahorro de peso computacional y tiempo a la hora de obtener soluciones para los análisis estructurales.

No todas las opciones que se vean para el modelo sólido estarán disponibles para el modelo superficial. Por tanto, las definiciones a realizar serán diferentes. Sin embargo, siempre se buscará que se cumplan los mismos supuestos vistos anteriormente.

### 5.5.3. REALIZACIÓN DEL MODELO SÓLIDO

Cuando la geometría está cargada, se procede a la aplicación de las restricciones y condiciones de contorno correspondientes. Como se ha visto en los Supuestos Simplificativos, la barra posee dos restricciones al movimiento en distintas partes de su cuerpo. En primer lugar, los extremos solo tienen un grado de libertad, en dirección axial. Dicha dirección es la Y en el programa. Esto se consigue definiendo en los extremos de la barra soportes que no contemplen desplazamiento ni en X ni en Z. A pesar de esto, la base de la barra sí debe poder deformarse bajo la acción de las cargas.

Por otro lado, la barra fuera de sus extremos no se desplaza axialmente, sino que sigue la dirección de los muelles. Este movimiento tiene lugar en la dirección X según el programa. En la Figura 39 se puede ver la disposición de los ejes.



Figura 39. Correspondencia de ejes del programa con características del modelo. Eje Y: directriz de la barra. Eje X: dirección longitudinal de los muelles de las rejillas separadoras. Eje Z: movimiento restringido en esta dirección.

Los muelles en ANSYS Mechanical se conocen como Spring. Son un tipo de conexión y se clasifican en dos categorías diferentes, de acuerdo con los cuerpos que sean conectados: *Body-Ground Spring* y *Body-Body Spring*. El tipo de muelle que se elige es el *Body-Ground* pues, por un lado, los muelles estarán sujetos a la barra mientras que el extremo opuesto estará unido al elemento fijo o tierra. Además, su comportamiento es lineal. Se permite el movimiento en la dirección X, cumpliendo los supuestos segundo y cuarto. Las propiedades de los muelles que se aplican al modelo son las presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de los muelles y posición respecto a la base.

Rigidez, K (N/mm)	65
Longitud, L (mm)	1,775
Distancia 1 (m)	0,0615384
Distancia 2 (m)	0,6153845

Todos los datos de los muelles han sido determinados y provistos por ENSA, [21].

Los parámetros que se introducen en el programa son la rigidez y las coordenadas en que se sitúan los extremos. No se establece ningún valor de amortiguamiento. La Figura 40 muestra las tablas de definición del programa.

Details of "Longitudinal - Ground To Solid 1"	Details of "Longitudinal - Ground To Solid 2"
<b>Definition</b>	<b>Definition</b>
Type: Longitudinal	Spring Behavior: Both
Spring Behavior: Both	Longitudinal Stiffness: 65000 N/m
Longitudinal Stiffness: 65000 N/m	Longitudinal Damping: 0, N·s/m
Longitudinal Damping: 0, N·s/m	Preload: None
Preload: None	Suppressed: No
Suppressed: No	Spring Length: 1,775e-003 m
Spring Length: 1,775e-003 m	<b>Scope</b>
<b>Scope</b>	Scope: Body-Ground
Scope: Body-Ground	<b>Reference</b>
<b>Reference</b>	Coordinate System: Global Coordinate System
Coordinate System: Global Coordinate System	Reference X Coordinate: -7,1115e-003 m
Reference X Coordinate: 7,1115e-003 m	Reference Y Coordinate: 6,1538e-002 m
Reference Y Coordinate: 6,1538e-002 m	Reference Z Coordinate: 0, m
Reference Z Coordinate: 0, m	Reference Location: Click to Change
Reference Location: Click to Change	<b>Mobile</b>
<b>Mobile</b>	Scoping Method: Geometry Selection
Scoping Method: Geometry Selection	Applied By: Remote Attachment
Applied By: Remote Attachment	Scope: 1 Face
Scope: 1 Face	Body: Solid
Body: Solid	Coordinate System: Global Coordinate System
Coordinate System: Global Coordinate System	Mobile X Coordinate: -5,3365e-003 m
Mobile X Coordinate: 5,3365e-003 m	Mobile Y Coordinate: 6,1538e-002 m
Mobile Y Coordinate: 6,1538e-002 m	Mobile Z Coordinate: 0, m

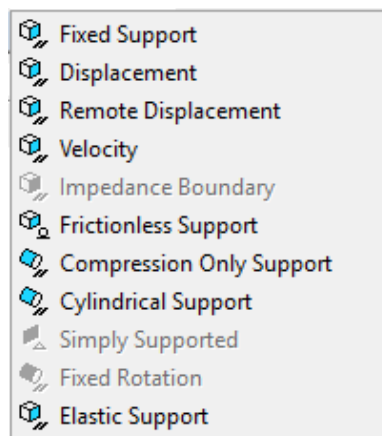
  

Details of "Longitudinal - Ground To Solid 3"	Details of "Longitudinal - Ground To Solid 4"
<b>Definition</b>	<b>Definition</b>
Type: Longitudinal	Spring Behavior: Both
Spring Behavior: Both	Longitudinal Stiffness: 65000 N/m
Longitudinal Stiffness: 65000 N/m	Longitudinal Damping: 0, N·s/m
Longitudinal Damping: 0, N·s/m	Preload: None
Preload: None	Suppressed: No
Suppressed: No	Spring Length: 1,775e-003 m
Spring Length: 1,775e-003 m	<b>Scope</b>
<b>Scope</b>	Scope: Body-Ground
Scope: Body-Ground	<b>Reference</b>
<b>Reference</b>	Coordinate System: Global Coordinate System
Coordinate System: Global Coordinate System	Reference X Coordinate: -7,1115e-003 m
Reference X Coordinate: 7,1115e-003 m	Reference Y Coordinate: 0,61538 m
Reference Y Coordinate: 0,61538 m	Reference Z Coordinate: 0, m
Reference Z Coordinate: 0, m	Reference Location: Click to Change
Reference Location: Click to Change	<b>Mobile</b>
<b>Mobile</b>	Scoping Method: Geometry Selection
Scoping Method: Geometry Selection	Applied By: Remote Attachment
Applied By: Remote Attachment	Scope: 1 Face
Scope: 1 Face	Body: Solid
Body: Solid	Coordinate System: Global Coordinate System
Coordinate System: Global Coordinate System	Mobile X Coordinate: 5,3365e-003 m
Mobile X Coordinate: 5,3365e-003 m	Mobile Y Coordinate: 0,61538 m
Mobile Y Coordinate: 0,61538 m	Mobile Z Coordinate: -5,3365e-003 m

Figura 40. Tablas de definición de los muelles en Mechanical.

En estas tablas se puede observar cómo el tipo de muelle es siempre longitudinal y su longitud natural se mantiene constante en 1,775 mm. Dicha longitud se fija a través de las coordenadas introducidas, para dos sistemas diferentes. Por un lado, se introducen las coordenadas al sistema de referencia, el cual está vinculado con el punto en que el muelle está unido a la barra. Por otro lado, se meten unas segundas coordenadas, en un sistema móvil, que se corresponde con la situación del otro extremo del muelle, que se une con el elemento fijo o tierra. En cada tabla, varían los valores de las coordenadas para indicar las distintas alturas en que los muelles se sitúan. También se indican, en dos casos, valores negativos para indicar la posición en el lado opuesto de dos de los muelles.

En cuanto a los soportes existentes en Mechanical y disponibles para los modelos sólidos, se tienen las opciones vistas en la figura 41. Sin embargo, no todas son válidas para el modelo pues no permiten restringir los movimientos en las direcciones que se desea o no es posible contemplar la deformación transversal del sólido. Por consiguiente, atendiendo a las características de los soportes, *Compression Only Support* es el más adecuado, porque, aplicado sobre una superficie, este restringe los desplazamientos en el plano de dicha superficie y permite la compresión en la dirección normal a este. Con esto, se cumple con el primer supuesto simplificativo.



*Figura 41. Tipos de soporte para modelos sólidos en Mechanical.*

Además de las restricciones de los elementos muelle y los soportes vinculados al sólido, también son fundamentales las condiciones ambientales y los materiales. Así, la temperatura ambiente media que se define es de 300°C. El material del sólido que se indica es el definido en el paso de *Datos de Ingeniería*: el Zircaloy. En cuanto esto es definido, el programa muestra en una de sus ventanas de Propiedades el volumen, la masa y las inercias que calcula para el modelo. Véase la Figura 42.



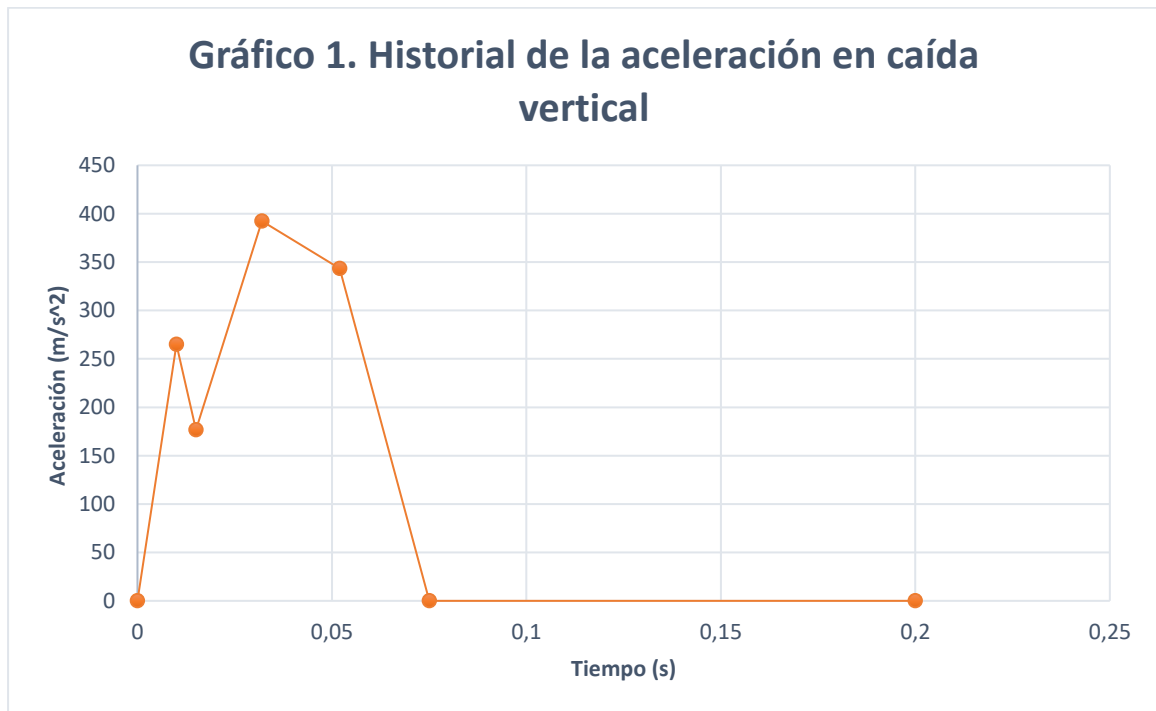
Details of "Solid"	
Behavior	None
<b>Material</b>	
Assignment	Zircaloy
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
<b>Bounding Box</b>	
<b>Properties</b>	
<input type="checkbox"/> Volume	1,9218e-005 m <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Mass	0,12665 kg
Centroid X	5,8221e-019 m
Centroid Y	0,44616 m
Centroid Z	3,6591e-019 m
<input type="checkbox"/> Moment of Inertia ...	8,3624e-003 kg·m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Moment of Inertia ...	3,1406e-006 kg·m <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/> Moment of Inertia ...	8,3624e-003 kg·m <sup>2</sup>

*Figura 42. Material Zircaloy asignado al sólido y propiedades calculadas por el programa.*

Para terminar con la preparación del modelo, se introducen las cargas. En este caso, se tiene una carga de tipo inercial, definida como una aceleración cuyos valores en el tiempo se pueden ver en la tabla 4 y en el gráfico 1. Los datos han sido aportados por ENSA [22]. Estos recogen los valores numéricos correspondientes a la aceleración en caída vertical. Además, tienen en cuenta las masas de los elementos combustibles y del contenedor en que están alojados. Se aplican así sobre la barra modelizada. En ANSYS, la carga se define en la pestaña de *Inertial – Acceleration* y se aplica axialmente a la barra del modelo.

Tabla 4. Aceleración del conjunto combustible – contenedor en caso de caída vertical.

Tiempo (s)	Aceleración ( $m/s^2$ )
0	0
0,01	264,87
0,015	176,58
0,032	392,4
0,052	343,55
0,075	0
0,2	0



Para un ensayo llevado a cabo en un intervalo de 0,2s, el comportamiento en caída del elemento combustible es el siguiente:

Como se puede observar, el elemento parte de una aceleración inicial nula, en la dirección vertical, durante su transporte. Cuando el conjunto contenedor-elementos cae, la aceleración crece rápidamente, llegando a un valor de  $264,87m/s^2$  en una centésima de segundo. En ese momento, el contenedor choca con el suelo y hay una pequeña deceleración. Dado que el interés está en el elemento combustible, se observa que este continúa la caída y la aceleración llega a su valor máximo en 0,032s. Esto se debe a que existe un espacio entre elementos y contenedor que permite seguir el movimiento de los elementos unos segundos más. Cuando ocurre el choque de la barra con el fondo del contenedor, comienza la deceleración. Esta se divide en dos pequeños intervalos y se anula tras 0,075 segundos, cuando el conjunto queda quieto sobre el suelo.

A continuación, se puede ver la definición realizada de la aceleración en la ventana de Mechanical. Dicha aceleración se introduce como un vector en dirección contraria al movimiento de caída de la barra, indicando el movimiento del suelo hacia la barra. ANSYS permite definir esta carga sin problema alguno. Primero se introducen los valores de tiempo para los intervalos y luego se indican los valores de aceleración.

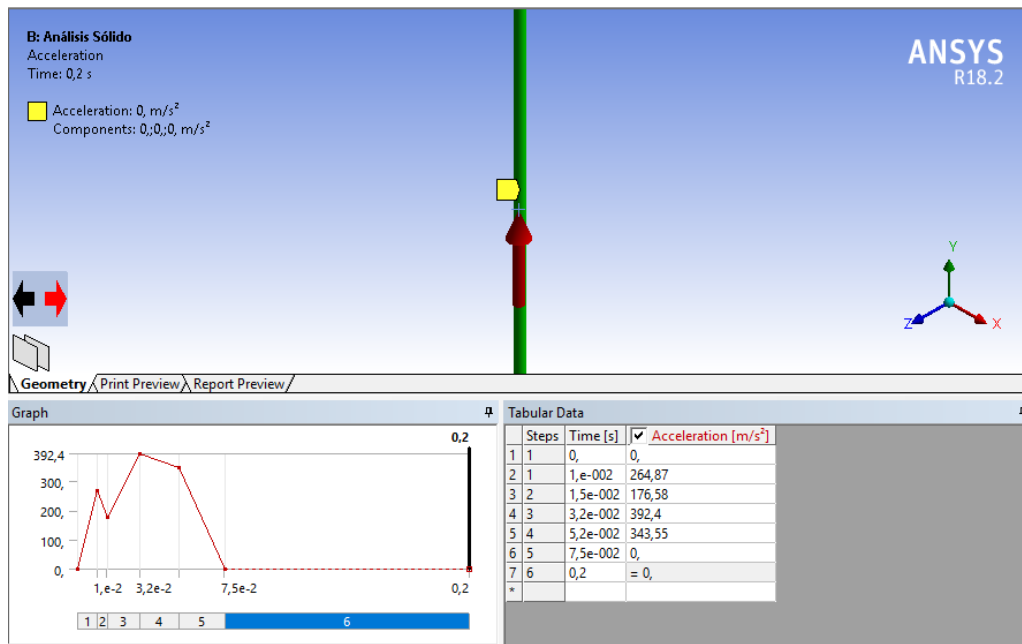


Figura 43. Definición de la carga de aceleración en Mechanical.

Una imagen del modelo sólido con todas las condiciones introducidas se puede observar en la figura 44. A y B se refieren a los soportes aplicados en los extremos. C es la etiqueta correspondiente a la aceleración.

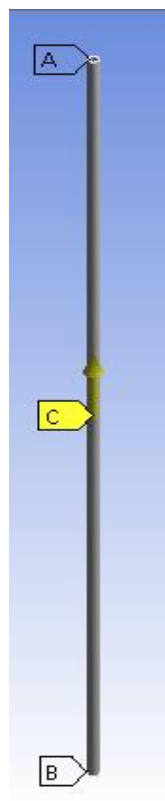


Figura 44. Vista isométrica del modelo sólido con los muelles, la carga y los soportes.

Dado que los muelles de las rejillas separadoras no se aprecian a simple vista en el modelo completo, se muestran a continuación las dos de la base. A una distancia de 0,6153845 m respecto de la base de la vaina, como se indicó en la tabla 3, se encuentra el otro par de muelles del modelo.



Figura 45. Vista de un nivel de rejillas separadoras representadas por muelles en el software.

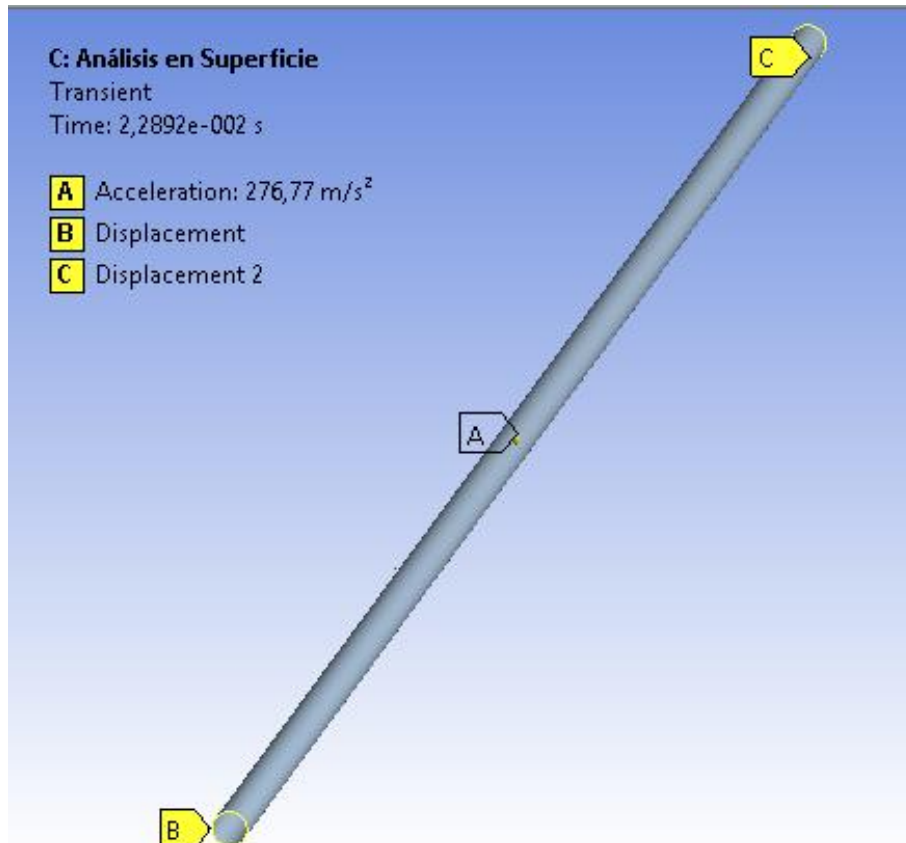
Con esto, queda terminada la modelización del primer modelo, con todas las hipótesis correspondientes.

#### 5.5.4. REALIZACIÓN DEL MODELO EN SUPERFICIE

El segundo modelo tiene la misma geometría que el sólido y se conservan las condiciones de contorno en cuanto a temperatura ambiental y muelles de las rejillas separadoras. La aplicación de la carga aceleración es exactamente igual que en el caso anterior. Como se vio al final de la definición de la *Geometría*, se trabaja con la barra ya convertida en plano por medio de la opción *Mid-Surface*.

Ahora bien, el caso de los soportes se ve modificado porque al trabajar con elementos superficie, no todas las opciones vistas anteriormente (Figura 41) están disponibles. De hecho, el soporte *Compression Only Support* utilizado en el modelo sólido ya no se puede emplear. Por tanto, se busca otro soporte que cumpla con la mayor precisión posible con las hipótesis establecidas. El soporte que se aplica ahora a los extremos es *Displacement*. Esta opción permite definir en qué direcciones habrá desplazamiento y en cuáles estará restringido. Sin embargo, no tiene en cuenta la posible deformación de la base en el choque, lo cual sí quedaba contemplado en con *Compression Only Support*. Se deja entonces la dirección Y libre

mientras que las otras dos se restringen. Con esto, se da por terminado el modelo superficie, que se puede ver a continuación.



*Figura 46. Modelo superficie con etiquetas de soportes y de carga aplicados.*

## 5.6. MALLADO

Si no se realizan más ajustes sobre los modelos que los indicados en apartados anteriores y se desea resolver directamente, ANSYS Mechanical prepara un mallado por defecto para proceder a los cálculos de la respuesta. Sin embargo, dada la importancia de emplear una buena discretización en el Método de Elementos Finitos, se definen las características de mallado para que sea homogéneo, sencillo y razonable en cuanto al peso computacional. Un mallado óptimo puede suponer una mayor exactitud en los resultados, así como una reducción en el tiempo de resolución.

### 5.6.1. MALLADO DEL MODELO SÓLIDO

Se procede, en primer lugar, a definir un método de mallado de los que están definidos en el programa por defecto. El Método *MultiZone*, que se aplica, se basa en la generación de elementos hexaédricos por medio de una predivisión del cuerpo. A continuación, se realiza un barrido para la discretización de las subdivisiones generadas. Además, se indica en el apartado *Mesh* que el mallado sea lo más fino posible. En la Figura 47 se ve la definición que se hace.

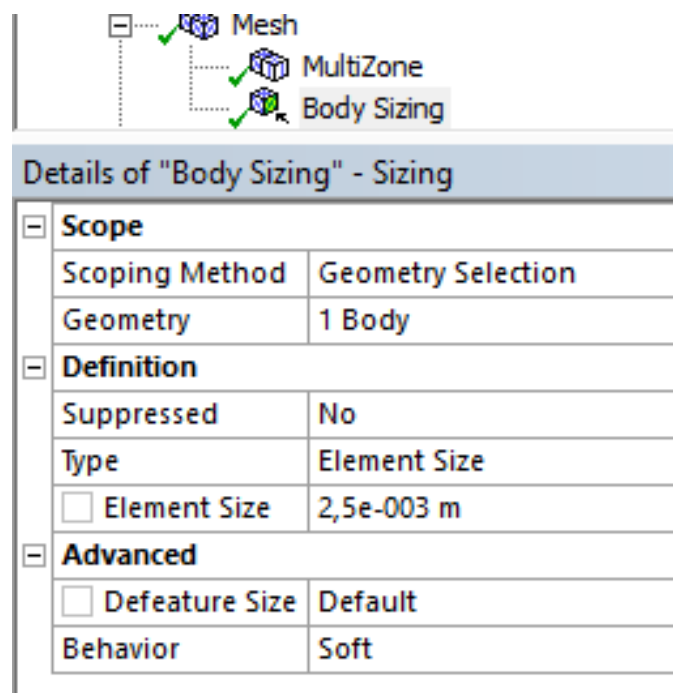


Figura 47. Definición del mallado en el modelo sólido.

A pesar de estas mejoras, el número de elementos que se genera es pequeño, del orden de los 800 elementos. Dado que se desea tener una precisión razonable en los resultados a obtener, se actúa sobre el tamaño de estos y se indica un tamaño de 2,5mm. La Figura muestran el mallado generado finalmente.

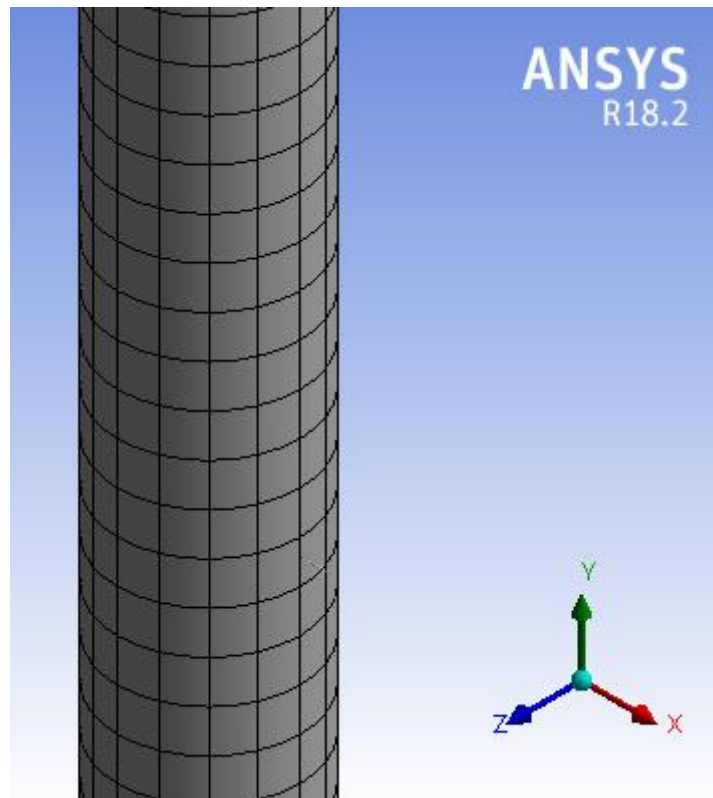


Figura 48. Mallado del modelo sólido.

Como se puede ver, los elementos en que se ha dividido el cuerpo son, efectivamente, hexaédricos y se reparten de forma regular por todo el cuerpo. Se ha conseguido un mallado homogéneo que consta de 5712 elementos sólidos y 40064 nodos.

### 5.6.2. MALLADO DEL MODELO SUPERFICIE

El modelo superficie, por su parte, no requiere de la aplicación de un método de mallado en concreto. En las propiedades del mallado lo que sí se modifica es el refinamiento de las celdas, que se indica con la opción *Fine*. También se indica un tamaño de los elementos de 2,5mm como en el caso anterior. En las Figuras 48 y 49 se pueden ver las características de definición del mallado y el resultado gráfico de este, respectivamente.

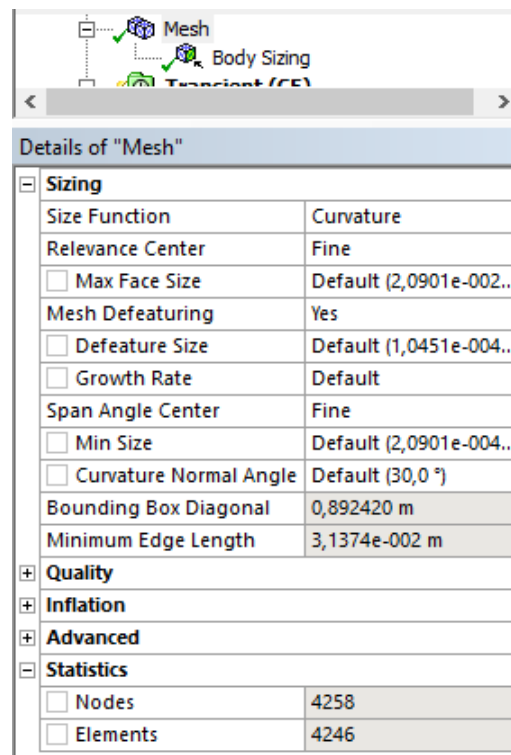


Figura 49. Ventana de propiedades del mallado. Solo se ha intervenido sobre las opciones Relevance Center y Span Angle Center. Los cuadros grises contienen valores generados por el programa.

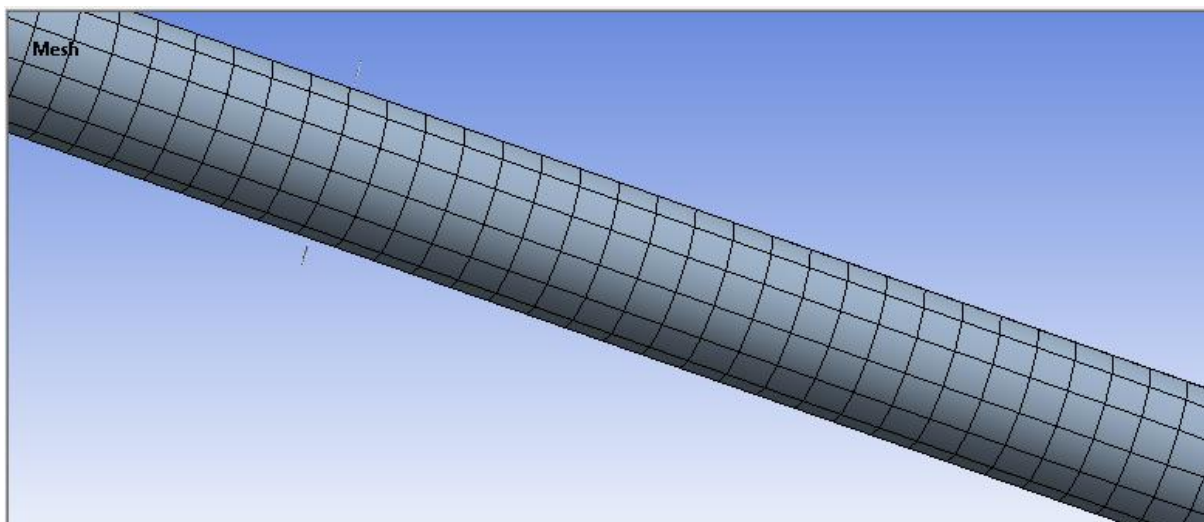


Figura 50. Mallado del modelo superficie.

El número de elementos planos en que se ha dividido el cuerpo superficie ahora es notablemente menor que en el caso del sólido. Ocurre de igual manera con el número de nodos. Se ha obtenido un mallado con 4246 elementos y 4258 nodos.



## 6. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Una vez están los modelos listos, con todas sus condiciones definidas, se obtienen resultados estructurales sobre la barra. Esto se realiza en la misma interfaz de Mechanical que se ha empleado para la modelización. En el árbol de trabajo de la ventana (Figura 51), hay una sección llamada *Solution*. Allí, es posible insertar las variables estructurales que se desean como resultado. La deformación estructural que se desea conocer se denomina *Maximum Principal Strain*. A su vez, se evalúan los valores de las tensiones que aparecen sobre el cuerpo durante el tiempo que actúan las cargas sobre él. Dichas tensiones también se definen en la sección *Solution*. Se denominan *Maximum Principal Stress*.

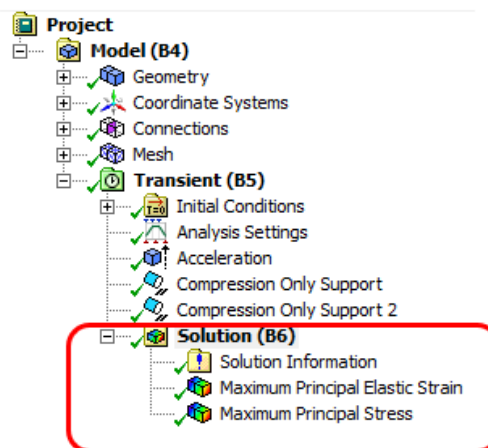


Figura 51. Árbol de trabajo en la interfaz Mechanical y definición de los parámetros que se desean como solución.

El estudio se realiza en el programa igual que en los casos experimentales, en el tiempo. Esto se analiza para un tiempo de 0,2s. El programa realizará una división del tiempo en subintervalos de manera automática.

### 6.1. RESULTADOS EN MODELO SÓLIDO

Los resultados que nos proporciona Mechanical son tanto numéricos como gráficos. En el caso de resultados numéricos, para cada intervalo de tiempo en que se ha buscado la convergencia, el programa ha calculado un valor de deformación y de tensión. Como resultados gráficos, se tienen dos representaciones:

- Una gráfica por cada uno de los parámetros analizados en función del tiempo.
- La distribución de dichos parámetros sobre la propia pieza.

A continuación, se muestran y se comentan dichos resultados.

En primer lugar, tenemos los resultados numéricos, que se indican en la Tabla 5. Se puede ver cómo el programa ha dividido el tiempo total de 0,2s en 23 intervalos. Para todos ellos, se han calculado tanto los valores máximos como mínimos de deformación. Los mínimos no tienen mayor interés, pues no comportan un riesgo de daño de la barra. Sin embargo, las deformaciones máximas localizadas sí se tienen en cuenta, por poder ser perjudiciales para el revestimiento de la barra.

Tabla 5. Resultados numéricos de la deformación principal en la barra modelizada.

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
5,e-003	2,2074e-011	7,3756e-006
1,e-002	4,4154e-011	1,4752e-005
1,5e-002	2,9435e-011	9,8344e-006
2,0667e-002	4,1424e-011	1,3841e-005
2,5667e-002	5,2015e-011	1,7377e-005
2,8833e-002	5,8713e-011	1,9614e-005
3,2e-002	6,5427e-011	2,1855e-005
4,2e-002	6,1345e-011	2,0493e-005
5,2e-002	5,7269e-011	1,9134e-005
6,35e-002	2,863e-011	9,5667e-006
6,925e-002	1,432e-011	4,7833e-006
7,5e-002	-2,8433e-015	8,2453e-010
8,4615e-002	-3,5654e-017	4,5834e-010
9,4231e-002	-2,4613e-016	4,9249e-010
0,10673	-1,4415e-015	5,7493e-010
0,11923	-1,4457e-015	5,1831e-010
0,13173	-2,0012e-015	6,5794e-010
0,14423	-2,5248e-015	6,4099e-010
0,15673	5,0019e-017	7,5744e-010
0,16923	-3,4238e-015	7,5577e-010
0,18173	-4,1313e-015	8,4726e-010
0,19087	-2,6577e-015	8,4841e-010
0,2	-1,6172e-015	9,012e-010

Como se puede ver, los órdenes de magnitud son pequeños en todos los casos. Sin embargo, en la columna *Maximum*, que es de nuestro interés, hay variaciones importantes durante los tiempos en que las cargas son variables y tienen un valor mayor. El máximo valor que

encontramos en la tabla para la deformación es  $2,1855e-5$  en el instante de máxima aceleración, es decir, a  $0,032s$  después de la caída.

Los resultados de tensión también aparecen tabulados (Tabla 6). De nuevo, el programa ha calculado unos valores para la tensión. Dichos datos han sido tanto de tensiones máximas producidas sobre la barra como de tensiones mínimas, en cada uno de los intervalos de tiempo analizados. Los valores de las máximas tensiones alcanzadas son los que se discutirán más adelante.

Tabla 6. Resultados numéricos de la tensión principal en la barra modelizada.

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
5,e-003	-317,42	4,1555e+005
1,e-002	-634,8	8,3113e+005
1,5e-002	-423,21	5,5407e+005
2,0667e-002	-595,6	7,7978e+005
2,5667e-002	-747,72	9,7901e+005
2,8833e-002	-844,02	1,1051e+006
3,2e-002	-940,37	1,2313e+006
4,2e-002	-881,82	1,1546e+006
5,2e-002	-823,32	1,078e+006
6,35e-002	-411,7	5,3899e+005
6,925e-002	-205,86	2,6949e+005
7,5e-002	-1,9661e-002	46,44
8,4615e-002	-0,89707	25,877
9,4231e-002	-1,2764	27,677
0,10673	-1,2485	32,202
0,11923	-1,4639	28,636
0,13173	-1,5719	36,353
0,14423	-1,7692	35,382
0,15673	-1,9258	41,827
0,16923	-2,0785	41,699
0,18173	-2,2635	46,775
0,19087	-2,3474	46,796
0,2	-2,4834	49,761

Todos los datos que se han presentado en las tablas 5 y 6 están también representados en las gráficas de las Figuras 52 y 53. Estas representaciones permiten una interpretación más fácil

de los resultados debido a que se pueden comparar con la gráfica de aceleración introducida como carga.

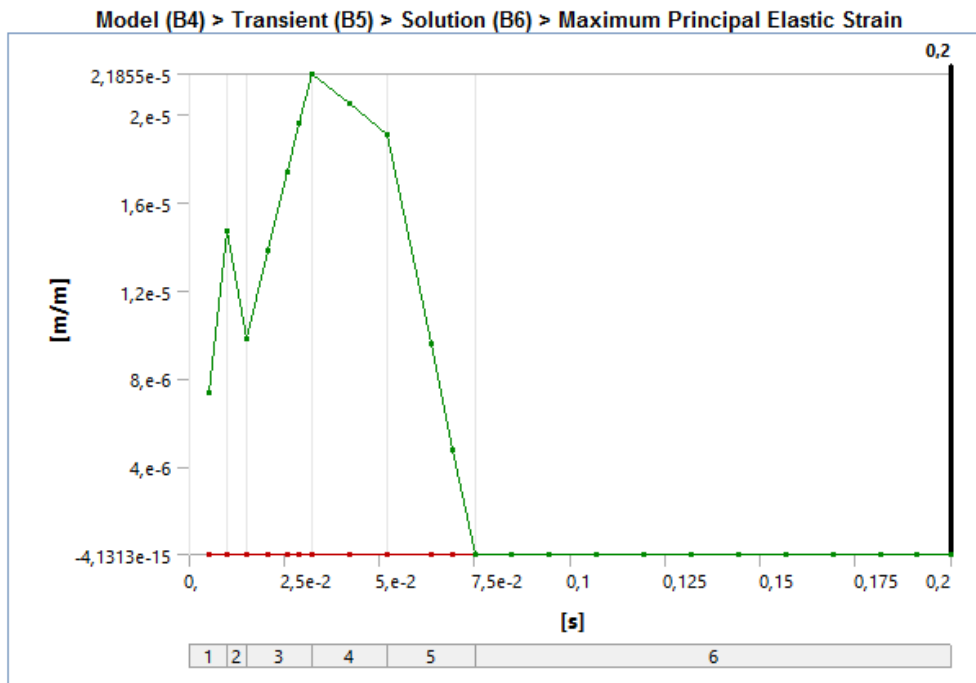


Figura 52. Curva de la máxima deformación sobre la barra obtenida por Mechanical.

La gráfica de la Figura 52 muestra una curva de deformación similar a la curva de la aceleración mostrada en el Gráfico1. Se puede ver cómo, hasta los 0,01s, la deformación elástica es creciente, conforme el contenedor choca primeramente con el suelo. A continuación, esta decrece. Luego, crece según la barra sigue cayendo y acelerándose hasta llegar a un máximo a los 0,032s después de la caída. Dado que el programa toma el material Zircaloy como material lineal, homogéneo e isótropo, las deformaciones, elásticas todas ellas, se retiran con el tiempo hasta anularse prácticamente.

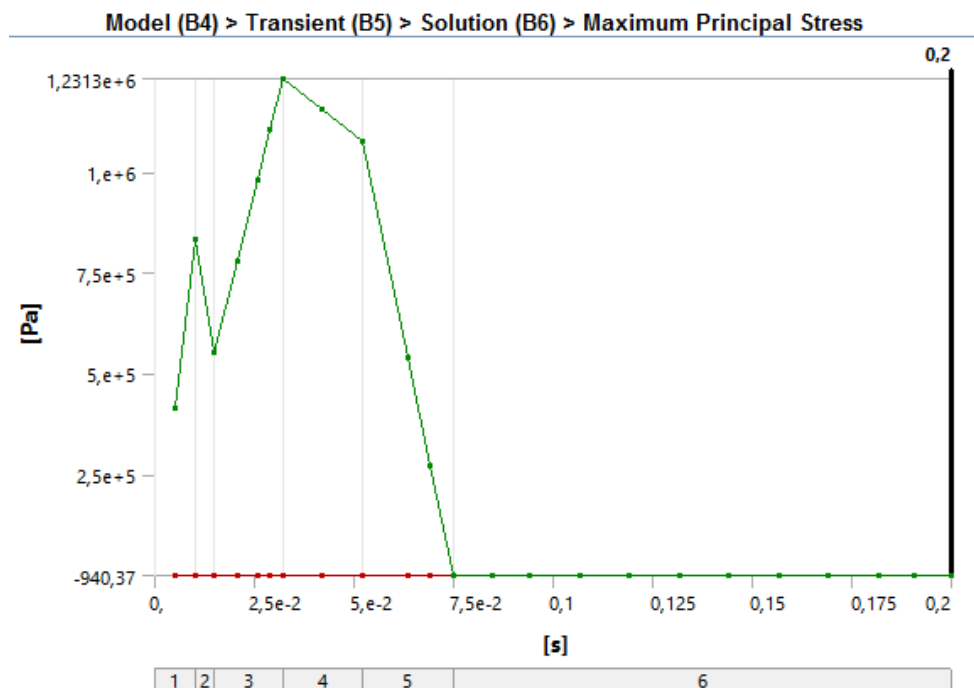


Figura 53. Curva de las máximas tensiones sobre la barra obtenida por Mechanical.

Las tensiones a las que se somete la barra durante la caída dentro del contenedor (Figura 53) describen una curva idéntica a la de la carga aceleración, así como a la de la Figura 52 de la deformación. Se aprecia, entonces, que entre la tensión y la deformación hay una relación directamente proporcional. Por consiguiente, las consideraciones que ha hecho el programa han tenido todas lugar en el rango elástico. De nuevo, se puede ver, cómo la tensión alcanza un máximo a los 0,032s de la caída, cuando la aceleración es máxima. Tras el choque, las tensiones permanecen, pero van disminuyendo linealmente, en dos intervalos diferentes. Se anulan cuando se retira la aceleración y se da por hecho que el conjunto de contenedor-elemento combustible quedan quietos sobre la superficie en que han caído.

Para completar la información que nos permite analizar los resultados, se puede ver la distribución tanto de la deformación (Figura 54) como de la tensión (Figura 55) sobre la barra. Estas distribuciones varían con el tiempo. Las Figuras muestran capturas de los instantes en que ocurren la máxima deformación y tensión. Además de esto, en la simulación se puede observar que no hay movimientos o desplazamientos de la barra apreciables durante la aplicación de las cargas. Esto cumple uno de los requisitos de las hipótesis.

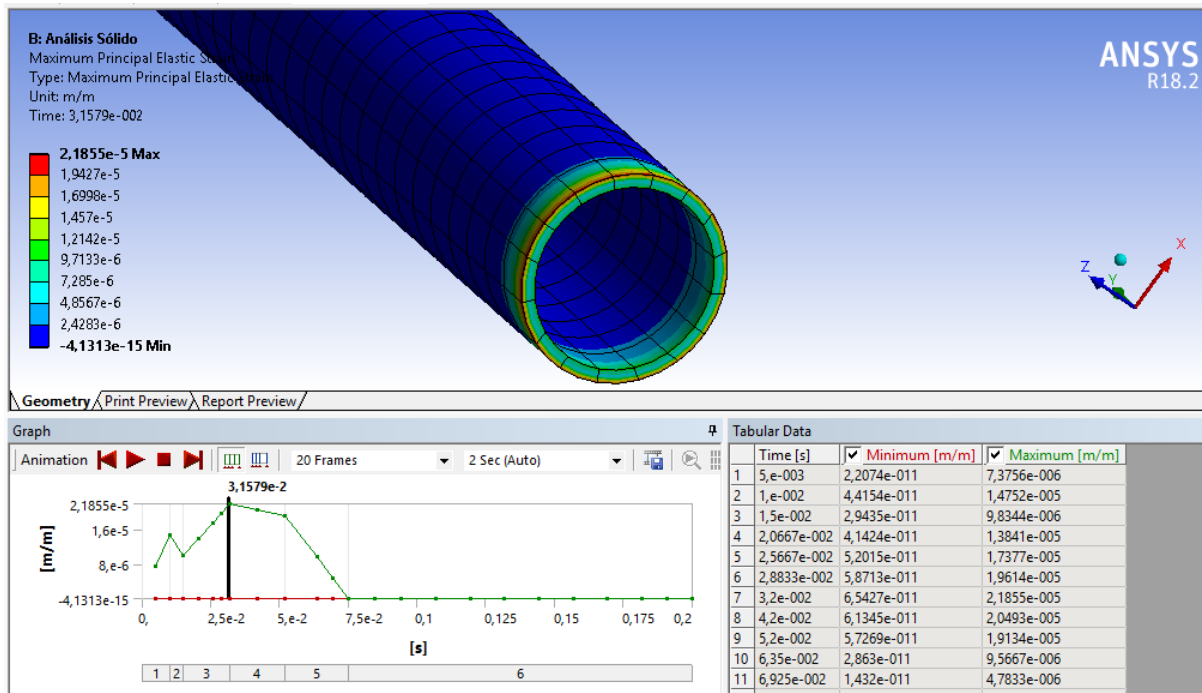


Figura 54. Distribución de la deformación en el instante de 0,032s.

Como el lector podrá apreciar, los mayores valores de deformación se dan en la base de la barra, siendo esta la primera parte en recibir los esfuerzos. Estos crecen y se extienden hacia arriba de la barra, mas no llegan a la zona de muelles. Se puede ver también, como la máxima deformación comienza desde el exterior de lo que sería el revestimiento de la barra, internándose después en el cuerpo, pero sin cubrir todo el espesor. Esto indica que el fallo puede comenzar a producirse desde el exterior del elemento y no desde el interior.

En la Figura 55 queda patente que la distribución de tensiones es similar a la de las deformaciones sobre la base de la barra. Como antes, el valor máximo ocurre en los bordes, extendiéndose hacia el interior y hacia arriba, pero disminuyendo su valor. Se puede apreciar, en contraste con la Figura 54, que las tensiones no llegan al interior de la base, quedándose a la mitad de esta. Sin embargo, unos centímetros más arriba, sí que se llega al interior.

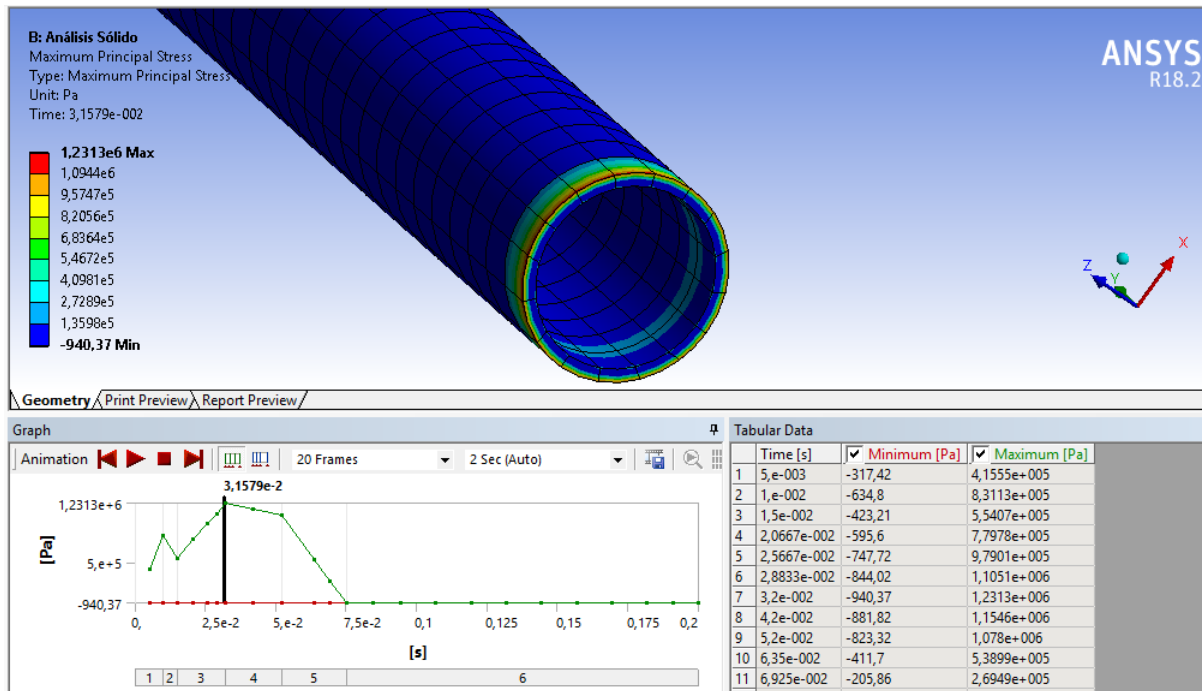


Figura 55. Distribución de la tensión en el instante 0,032s.

## 6.2. RESULTADOS EN MODELO SUPERFICIAL

De igual manera que en el modelo anterior, se obtienen una serie de resultados de distinto tipo. Dichos resultados son tanto numéricos como gráficos. En primer lugar se muestran los resultados numéricos obtenidos para la deformación de la barra y las tensiones a las que esta se ve sometida. En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para el caso de las deformaciones.

Tabla 7. Resultados numéricos de la deformación principal en la barra modelizada.

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
5,e-003	3,0549e-018	6,0202e-008
1,e-002	6,7811e-018	3,333e-007
1,5e-002	6,3305e-017	9,141e-007
2,0667e-002	1,3593e-016	1,9609e-006
2,5667e-002	2,0931e-016	3,2838e-006
2,8833e-002	3,2425e-016	4,3558e-006
3,2e-002	3,5397e-016	5,6396e-006
4,2e-002	4,7853e-016	1,1176e-005
5,2e-002	1,369e-015	1,8903e-005
6,35e-002	1,2809e-015	2,9961e-005
6,925e-002	1,5807e-015	3,6089e-005
7,5e-002	1,7044e-015	4,2379e-005
8,4615e-002	2,2417e-015	5,2964e-005
9,4231e-002	2,9525e-015	6,3536e-005
0,10673	5,1147e-015	7,7239e-005
0,11923	5,7726e-015	9,0886e-005
0,13173	7,7591e-015	1,0447e-004
0,14423	6,5405e-015	1,1797e-004
0,15673	1,0165e-014	1,314e-004
0,16923	7,0704e-015	1,4473e-004
0,18173	1,1975e-014	1,5795e-004
0,19087	7,1686e-015	1,6755e-004
0,2	1,1775e-014	1,7708e-004

Como se puede ver en la tabla 7, el programa ha vuelto a calcular tanto los valores de deformación máxima y mínima en la barra en cada uno de los instantes de tiempo. El período de tiempo total de 0,2s, ha sido dividido en 23 subintervalos para los que se han obtenido los resultados. El máximo valor de deformación que ha tenido lugar ha sido 1,7708e-4, a los 0,2 segundos del inicio del análisis de la caída. Se puede observar por tanto, que el instante difiere



bastante de caso del modelo anterior, en que la deformación máxima tenía lugar en el instante máxima aceleración. En comparación con el modelo sólido, también se observa que los órdenes de magnitud de las respuestas han crecido, y no se encuentran ya entre  $10^{-10}$  y  $10^{-6}$ , sino entre  $10^{-8}$  y  $10^{-4}$ .

La tabla 8 muestra los resultados de tensión. Como en la deformación, se presentan tanto valores de mínima tensión como de máxima, siendo los de máxima de nuestro interés.

Tabla 8. Resultados numéricos de la tensión principal en la barra modelizada.

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
5,e-003	-3,8681e-007	3396,3
1,e-002	-2,3494e-006	18803
1,5e-002	-6,3428e-006	51570
2,0667e-002	-1,1061e-005	1,1062e+005
2,5667e-002	-2,9591e-005	1,8526e+005
2,8833e-002	-2,711e-005	2,4573e+005
3,2e-002	-4,0155e-005	3,1816e+005
4,2e-002	-6,6274e-005	6,3048e+005
5,2e-002	-1,3412e-004	1,0664e+006
6,35e-002	-1,5236e-004	1,6903e+006
6,925e-002	-1,9397e-004	2,036e+006
7,5e-002	-2,8551e-004	2,3909e+006
8,4615e-002	-4,5686e-004	2,988e+006
9,4231e-002	-4,104e-004	3,5845e+006
0,10673	-5,2021e-004	4,3575e+006
0,11923	-5,5935e-004	5,1274e+006
0,13173	-6,4169e-004	5,8936e+006
0,14423	-7,0822e-004	6,6556e+006
0,15673	-7,4458e-004	7,4129e+006
0,16923	-1,0611e-003	8,1649e+006
0,18173	-1,1377e-003	8,911e+006
0,19087	-1,257e-003	9,4523e+006
0,2	-1,0579e-003	9,9899e+006

Se observa en esta tabla de datos que la tensión tiene una tendencia creciente en todo momento, alcanzado su mayor valor al final del intervalo de tiempo. Esto no parece tener mucho sentido porque las cargas sobre el cuerpo de la barra en ese momento ya son nulas, por lo que las tensiones no deberían ser tan altas. Sin embargo, es verdad que se distingue una relación lineal entre la deformación de la tabla 7 y la tensión de la tabla 8. Esto muestra

que, en este segundo modelo, el programa ha vuelto a considerar el material como elástico, sin tener en cuenta la zona de deformaciones plásticas para nada.

Una vez vistos los datos obtenidos, se representan estos en sus gráficas correspondientes. Las Figuras 56 y 57 muestran las representaciones de deformación y tensión en función del tiempo, respectivamente.

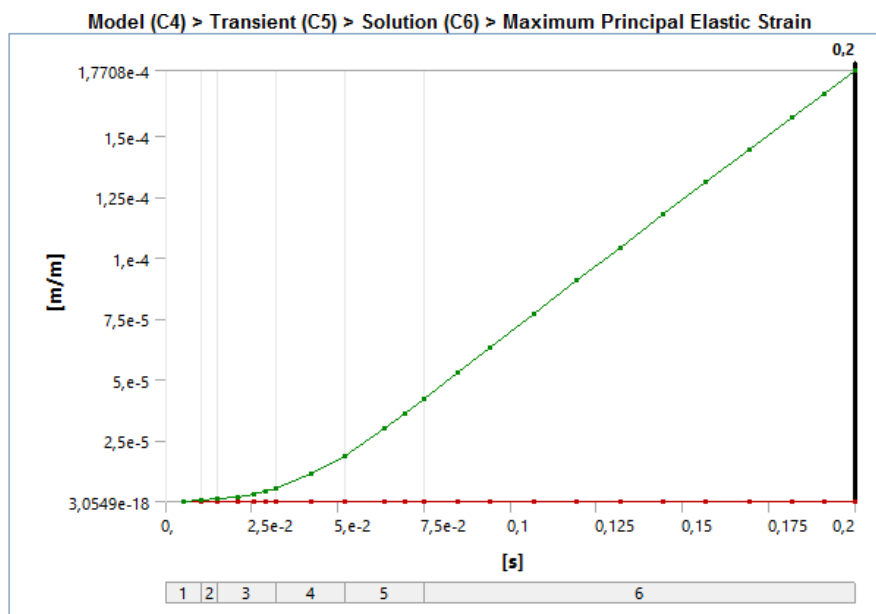


Figura 56. Curva de la máxima deformación sobre la barra obtenida por Mechanical para el modelo superficial.

La curva de la Figura 56 describe una forma totalmente diferente a la descrita por la aceleración o por la deformación del modelo sólido antes presentado. Las mayores deformaciones deberían tener lugar en los instantes próximos al de máxima aceleración. Nunca en el instante final, en que las cargas ya han cesado. En todo caso, podría quedar un pequeño valor de deformación correspondiente a las deformaciones no recuperables en zona plástica del material. No resulta ser una solución fiable para adaptar el estudio al caso de este modelo.

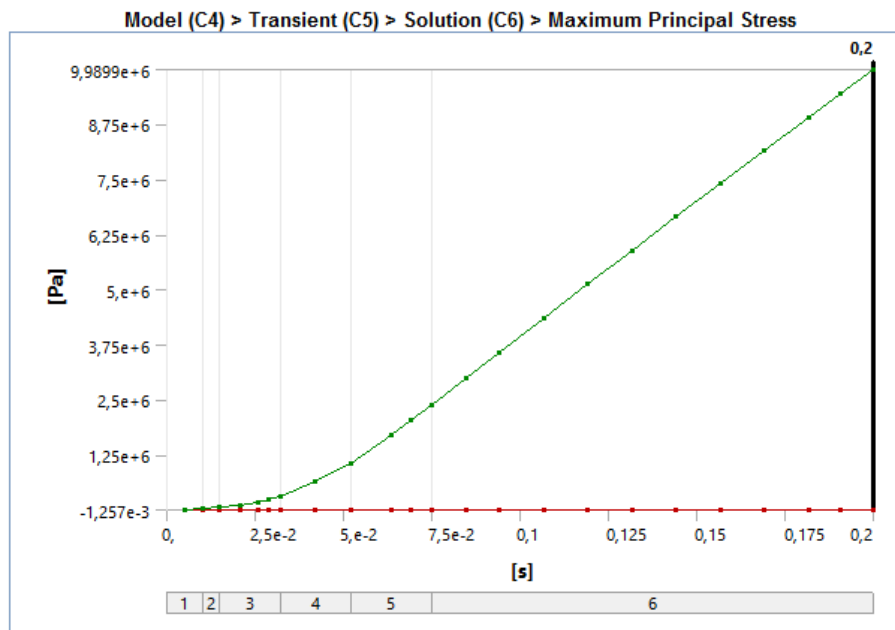


Figura 57. Curva de máximas tensiones sobre la barra obtenida por Mechanical para el modelo superficial.

Como ya se había visto en tablas, la tensión sigue una distribución creciente, concluyendo en el último instante con su mayor valor máximo. Se puede apreciar que la curva descrita es idéntica a la de deformaciones. Comparando datos con el modelo anterior, la tensión en este caso alcanza un valor máximo nueve veces mayor que en el modelo sólido, y con una disposición en el tiempo incorrecta.

Una vez analizados los datos y sus gráficos, se estudian ahora los resultados gráficos de la simulación. En ellos, se aprecia que la barra describe un movimiento vertical muy marcado durante todo el análisis temporal. Durante este movimiento, el programa ha determinado que para ello los muelles han de deformarse en la dirección axial de la barra también. Esta solución incumple los supuestos definidos en el apartado 5.4 de este trabajo. Esto se debe a que tanto la barra como los muelles no debían desplazarse verticalmente en un principio. Visto el resultado de la simulación, este modelo no cumple las hipótesis requeridas en la modelización de la barra. Por consiguiente, no se puede tomar como un modelo que reproduzca fielmente las condiciones en la realidad y no se trabaja con él. En todo caso, se necesitaría analizar otras opciones de modelado superficial o 2D para simplificar el problema. No obstante, esto implica la profundización el uso de la herramienta y los métodos de optimización de modelizado.

## 7. CONCLUSIONES

Este trabajo ha servido como introducción al mundo del modelado por el Método de Elementos Finitos con la herramienta ANSYS Workbench. Esto ha permitido también apreciar la capacidad y la utilidad del software en la modelización de problemas reales complejos y que muchas veces no pueden ser ensayados. Además, ha resultado útil para conocer más a fondo unas actividades que está llevando a cabo la empresa de Equipos Nucleares SA: el diseño de contenedores de combustible nuclear gastado.

Para la extracción de conclusiones acerca de resultados y modelos desarrollados, se repasan los objetivos propuestos al inicio y algunas propuestas de los artículos del Estado del Arte.

En un primer paso, se establecieron como objetivos el desarrollo de dos modelos diferenciados en su constitución por elementos sólidos y elementos superficiales y el análisis estructural en ambos casos. Ambos objetivos han sido cumplidos. Se han desarrollado dos modelos, con sus condiciones, y se ha llegado a la obtención de soluciones.

De los resultados de los análisis de deformación y tensión estructural, se han podido extraer conclusiones diferenciadas para ambos modelos desarrollados:

- En el caso del modelo superficial no se ha visto coherencia en el comportamiento de la barra ni en las distribuciones de deformaciones y tensiones. El desplazamiento que, por otro lado, sufría la barra en la simulación, nos ha llevado a descartar este modelo.
- Por consiguiente, se ha optado por emplear el modelo 3D sólido ya que se aproxima mejor el comportamiento de un elemento de combustible nuclear gastado en un evento de caída vertical.
- En cuanto a los resultados del modelo elegido, estos resultan de muy pequeño valor. Aunque no se desprecian, pues las deformaciones obtenidas se encuentran por debajo del 1%, que representa el límite en el que la deformación del revestimiento de las vainas sería aceptable de acuerdo con [14]. Se ha apreciado también que las deformaciones son máximas en el exterior y van disminuyendo conforme nos desplazamos al interior de la vaina.

## 8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Tal como se mencionó en los objetivos del trabajo, este se propone como un primer estudio del comportamiento estructural de un elemento combustible nuclear gastado. Se han desarrollado dos modelos, quedando claro que el modelo sólido es más preciso, por respetar en mayor medida las hipótesis y bases teóricas. También se han obtenido una serie de resultados sobre parámetros estructurales en el caso de caída vertical. Sin embargo, estos últimos pueden mejorarse con la optimización de los modelos y la definición de nuevas configuraciones en la aplicación de ANSYS Mechanical.

Se proponen, por tanto, como nuevas líneas de investigación las siguientes:

### **AMPLIACIÓN DE ESTUDIOS DESARROLLADOS**

- A partir del modelo construido, cambiar las condiciones de contorno aplicadas y realizar el análisis estructural de otros casos de caída accidental: caída horizontal y caída con vuelco. La caída con vuelco es uno de los casos menos estudiados y cuyo estudio puede resultar interesante desarrollar.
- Trabajar sobre la definición de las propiedades de los materiales definidos en ANSYS Workbench o bien cambiar dicho material.
- Añadir la modelización de las pastillas de combustible al modelo de revestimiento de Zircaloy ya realizado. A partir de aquí, realizar el análisis estructural. O bien, analizar la importancia de los contactos entre pastillas y revestimiento en la respuesta.
- Crear nuevos modelos en otros sistemas de análisis. Dichos sistemas deberán contemplar la posibilidad de definir cargas en función del tiempo. El sistema de análisis que se podría emplear para esto sería el denominado Explicit Dynamics, que se puede encontrar de igual manera en ANSYS Workbench.

### **OPTIMIZACIÓN DE MODELOS**

- Realizar un barrido paramétrico en el modelo. Dicho barrido puede realizarse para diferentes valores de la temperatura sobre la barra. O bien, para diferentes valores de la rigidez de las rejillas separadoras.



- Optimizar el modelo de la barra por medio de la variación de las condiciones de mallado. Dicha mejora puede llegar a realizarse por medio de un test de resultados independientes del mallado (Mesh-Independent Test del inglés). Este consiste en afinar el mallado e ir obteniendo resultados hasta llegar a un punto en que los resultados dejen de ser dependientes del nivel de mallado.
- Aprender a manejar las herramientas y los métodos de optimización provistos por el propio software de ANSYS Workbench. Una de las herramientas es DesignXplorer, propuesta en el capítulo 8 de la referencia [16, p. 309,327]. La optimización no solo se basa en mejorar el mallado sino también las coordenadas de puntos y nodos del modelo para una mejora sustancial de los resultados.

## 9. REFERENCIAS

- [1] «Ciclo de combustible nuclear gastado», 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.sne.es/images/stories/recursos/actividades/organizadas-colaboracion-SNE/2010/26-marzo/Ponencias/ENRESA.pdf>.
- [2] Consejo de Seguridad Nuclear, «Residuos Radiactivos». [En línea]. Disponible en: [https://www.csn.es/documents/10182/1005809/Residuos radiactivos \(Monografía\)](https://www.csn.es/documents/10182/1005809/Residuos+radiactivos+(Monografía)). [Accedido: 24-jun-2019].
- [3] Consejo de Seguridad Nuclear, «El transporte de material radiactivo. Transporte de residuos radiactivos y de combustible nuclear irradiado.», Madrid, 2016.
- [4] Consejo de Seguridad Nuclear, «Ciclo del combustible nuclear», 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/el-combustible-nuclear-y-su-ciclo>. [Accedido: 24-jun-2019].
- [5] «El combustible nuclear y su ciclo». [En línea]. Disponible en: [https://www.csn.es/documents/10182/932121/El combustible nuclear y su ciclo \(Monografía\)](https://www.csn.es/documents/10182/932121/El+combustible+nuclear+y+su+ciclo+(Monografía)). [Accedido: 24-jun-2019].
- [6] «El Almacén Temporal Centralizado (ATC)», 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.enresa.es/esp/inicio/actividades-y-proyectos/atc>. [Accedido: 24-jun-2019].
- [7] Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), «Actualidad del Almacén Temporal Centralizado (ATC)», p. 28.
- [8] «Cuestiones de Energía Nuclear», 2006. [En línea]. Disponible en: [www.foronuclear.org/pdf/222\\_Cuestiones\\_sobre\\_la\\_energia\\_2.pdf](http://www.foronuclear.org/pdf/222_Cuestiones_sobre_la_energia_2.pdf). [Accedido: 24-jun-2019].
- [9] CNAT, «Informe Semestral. Segundo semestre 2017. Central de Trillo.», Trillo, Guadalajara, 2017.
- [10] CNAT, «Central Nuclear de Trillo. La generación de calor. Combustible». [En línea]. Disponible en: [https://www.cnat.es/publipdf/INFORME-2017-2\\_final.pdf](https://www.cnat.es/publipdf/INFORME-2017-2_final.pdf). [Accedido: 07-ago-2019].
- [11] C. Queral y A. Expósito, «Combustible nuclear y esquemas de recarga», *ETSI Minas UPM*. [En línea]. Disponible en: <http://etsiminas.wdfiles.com/local--files/segundo->

- semestre-4/combustible-nuclear.pdf. [Accedido: 08-ago-2019].
- [12] E. N. S. (ENSA), «ENSA. Fabricantes de Componentes». [En línea]. Disponible en: <https://www.ensa.es/es/fabricantes-de-componentes-nucleares-en-espana/>. [Accedido: 06-sep-2019].
- [13] E. N. S. (ENSA), «Gestión de combustible. Contenedores de combustible.» [En línea]. Disponible en: <https://www.ensa.es/es/gestion-de-combustible/contenedores-de-combustible/>. [Accedido: 06-sep-2019].
- [14] G. Bjorkman *et al.*, *A Pilot Probabilistic Risk Assessment of a Dry Cask Storage System at a Nuclear Power Plant (NUREG-1864)*, Primera. Washington, DC, US: Comisión de Regulación Nuclear, 2007.
- [15] T. L. Sanders *et al.*, «A Method for Determining the Spent-Fuel Contribution to Transport Cask Containment Requirements (SAND90-2406)», Albuquerque and Livermore, 1992.
- [16] H.-H. Lee, «Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. Theory, Applications, Case Studies», Taiwan: SDC Publications, 2018, pp. 217-224.
- [17] C. Multiphysics, «Introduction to Structural Mechanics». [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/multiphysics/introduction-to-structural-mechanics>. [Accedido: 06-sep-2019].
- [18] C. Multiphysics, «Detailed explanation of the Finite Element Method (FEM)». [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>.
- [19] B. Almomani, D. Jang, y S. Lee, «Structural integrity of a high-burnup spent fuel rod under drop impact considering pellet-clad interfacial bonding influence», *Nucl. Eng. Des.*, vol. 337, pp. 324-340, oct. 2018.
- [20] S. Lee y S. Kim, «Simplified beam model of high burnup spent fuel rod under lateral load considering pellet-clad interfacial bonding influence», *Nucl. Eng. Technol.*, mar. 2019.
- [21] E. N. S. (ENSA), «Modelo en Mechanical APDL Product Launcher 16x16\_HTP». 2018.
- [22] E. N. S. (ENSA), «190606 Curvas aceleración modelos ANSYS \_ Barras de combustible».



- [23] A. Tanarro Sanz y A. Tanarro Onrubia, *Diccionario Español-Inglés sobre Tecnología Nuclear. Glosario de Términos*, Segunda. Madrid: Foro Nuclear y Tecnatom SA, 2008.

## APÉNDICE: DEFINICIONES

Las siguientes definiciones se presentan al lector de este documento como un apoyo en la comprensión de algunos de los conceptos citados a lo largo del texto. Dichas definiciones están basadas en el Diccionario de Tecnología Nuclear de Tanarro Sanz y Tanarro Onrubia [23].

**Actínidos:** se llama así a los metales con un número atómico igual o superior a 89 y que presentan propiedades químicas similares. Durante sus primeros años de vida, su actividad es similar a la de productos de fisión, pero luego esta aumenta.

**Actividad (A):** se trata del número de desintegraciones que tienen lugar en una muestra de material radiactivo durante un período de tiempo determinado. Siendo  $A_0$  la actividad inicial y  $t$  el tiempo, la ley que sigue la actividad es:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$\lambda$  es la constante de desintegración, una constante propiedad de cada radionucleido que indica con qué probabilidad tiene lugar una desintegración por unidad de tiempo. Se relaciona con el período de semidesintegración de la forma siguiente:

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2)$$

**Combustible quemado:** combustible nuclear que ha sido previamente irradiado/expuesto a radiación y, por tanto, ha variado en su cantidad de nucleidos fisionables contenidos.

**Período de semidesintegración ( $t_{1/2}$ ):** se trata del tiempo que debe pasar para que la mitad de los átomos de una muestra de cierta sustancia radiactiva se desintegran, reduciéndose, a su vez, la actividad a la mitad de su valor inicial.

**Radionucleidos:** son isótopos radiactivos de los elementos químicos.

**Radiotoxicidad:** se denomina radiotoxicidad a la toxicidad que se asocia a la radiación ionizante que emite un radionucleido que ha sido absorbido por un organismo humano y, así como la radiación que emitan los productos de su desintegración.