



Universidad de León



Ingeniería Técnica Industrial

SIMULACIÓN DE ENSAYO MECÁNICO DE FLEXIÓN MEDIANTE TRATAMIENTO DE IMAGEN Y CAE

MECHANICAL SIMULATION TEST BENDING BY IMAGE PROCESSING AND CAE

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIAL, INFORMÁTICA Y AERONÁUTICA

UNIVERSIDAD DE LEÓN

TUTOR: D. Fernando Jorge Fraile Fernández

AUTOR: David Fernández Cadenas



Este trabajo de “ SIMULACIÓN DE ENSAYO MECÁNICO DE FLEXIÓN MEDIANTE TRATAMIENTO DE IMAGEN Y CAE ” constituye el TRABAJO FIN DE CARRERA de DAVID FERNÁNDEZ CADENAS, alumno de la Escuela de Ingenierías Industrial e Informática de la Universidad de León.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por Fernando Jorge Fraile Fernández., profesor del Departamento de Química, Física y Expresión Gráfica de la Universidad de León.

VºBº Oficina Técnica:

Tutor:

Fdo. Manuel Castejón Limas

Fdo. Fernando Jorge Fraile Fernández

Autor:

Fdo. David Fernández Cadenas



En el presente documento me propongo documentar, con datos extraídos por medio de cuatro procesos bajo las mismas condiciones de carga, la medición de flecha en tres perfiles IPN con el objetivo de comparar los resultados obtenidos mediante los cuatro métodos y conocer así el grado de madurez de la tecnología de procesamiento de imagen y de Ingeniería asistida por ordenador (CAE) como metodologías para la extracción y medición del comportamiento mecánico de una estructura mediante el desarrollo de un programa informático en MATLAB y el análisis por elementos finitos en software Catia y SolidWorks.

In this paper I intend to document, with data taken through four processes under the same load conditions, the measurement of three profiles IPN arrow in order to compare the results obtained by the four well known methods and the degree of maturity technology and image processing computer Aided Engineering (CAE) methodologies for the extraction and measurement of the mechanical behavior of a structure by developing a computer program in MATLAB and finite element analysis software Catia and Solid Works .



A mis padres y hermanas.



Agradezco especialmente la ayuda inestimable de D. Ángel Solares Adán, director de la Sección de Control de Calidad de la Consejería de Fomento en León, en la búsqueda del laboratorio para la realización del ensayo mecánico a flexión y su posterior desarrollo, sin la cual no se habría podido llevar a cabo este Trabajo Fin de Carrera. Agradezco también a todo el equipo del Centro de Calidad de Palencia de la Consejería de Fomento de la Junta de Castilla y León por su colaboración en el mismo.

Agradezco la ayuda paciente de D. José Antonio Merayo González y D. Ricardo Fernández Fernández por sus innumerables horas de búsqueda de soluciones para los múltiples problemas que me fueron surgiendo en el desarrollo del programa.





ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes históricos	1
1.2 Estructuras metálicas	2
1.3 Vigas metálicas	3
1.4 Tipos de perfiles	4
1.5 Ventajas de las estructuras metálicas	5
1.6 Desventajas de las estructuras metálicas	7
1.7 Condiciones de seguridad	8
1.8 Comportamiento mecánico	11
2. OBJETIVOS	17
3. METODOLOGÍA Y MATERIALES	18
3.1 Cálculo analítico	18
3.1.1 Material utilizado	19
3.2 Ensayo mecánico de flexión	19
3.2.1 Material utilizado	21
3.3 Simulación por elementos finitos	22
3.3.1 Material utilizado	22



3.4 Procesamiento de imagen mediante MATLAB	23
3.4.1 Material utilizado	26
4. DESARROLLO	27
4.1 Cálculo analítico	27
4.1.2 Carga máxima admisible en régimen elástico	34
4.1.3 Resultados obtenidos	39
4.2 Ensayo mecánico de flexión	46
4.2.1 Resultados obtenidos	50
4.3 Cálculo de simulación. Elementos finitos	61
4.3.1 Introducción al método de elementos finitos	61
4.3.2 Desarrollo del método de elemento finitos	62
4.3.3 Teoría de la energía de distorsión	64
4.3.4 Análisis y simulación mediante CATIA	69
4.3.5 Análisis y simulación mediante SOLIDWORKS	90
4.3.6 Resultados obtenidos	103
4.4 Tratamiento de imagen con MATLAB	107
4.4.1 Resultados obtenidos	125
4.4.2 Resultados generales	145



5. CONCLUSIONES	150
6. BIBLIOGRAFÍA	153
ANEXO A. Tablas de perfiles laminados	
ANEXO B. Algoritmo del programa	



ÍNDICE DE TABLAS

4. DESARROLLO

4.1.2 CARGA MÁXIMA ADMISIBLE EN RÉGIMEN ELÁSTICO

Tabla 1. *Relación de Carga máxima admisible y flecha máxima en régimen elástico.*

Tabla 2. *Distribución de flecha en perfil IPN 80.*

Tabla 3. *Distribución de flecha en perfil IPN 80(II).*

Tabla 4. *Distribución de flecha en perfil IPN 100.*

Tabla 5. *Distribución de flecha en perfil IPN 120.*

Tabla 6. *Distribución de flecha en perfil IPN 120(II).*

4.2 ENSAYO MECÁNICO DE FLEXIÓN

Tabla 7. *Datos obtenidos en ensayo con perfil IPN 80.*

Tabla 8. *Comparación entre resultados teóricos y en ensayo en IPN 80.*

Tabla 9. *Datos obtenidos en ensayo con perfil IPN 100.*

Tabla 10. *Comparación entre resultados teóricos y en ensayo en IPN 100.*

Tabla 11. *Datos obtenidos en ensayo con perfil IPN 120.*

Tabla 12. *Comparación entre resultados teóricos y en ensayo en IPN 120.*

4.3 CÁLCULO DE SIMULACIÓN. ELEMENTOS FINITOS

Tabla 13. *Distribución de flecha perfil IPN 80 mediante Simulación.*

Tabla 14. *Distribución de flecha en perfil IPN 80 mediante Simulación (II).*

Tabla 15. *Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80.*

Tabla 16. *Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80 (II).*

Tabla 17. *Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80 (III).*

Tabla 18. *Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80 (IV).*



4.4 TRATAMIENTO DE IMAGEN CON MATLAB

Tabla 19. *Flecha indirecta perfil IPN 80.*

Tabla 20. *Comparación entre método indirecto y flecha máxima teórica.*

Tabla 21. *Comparación entre método indirecto y flecha máxima real.*

Tabla 22. *Distribución de flecha procesada en perfil IPN 80. Método directo.*

Tabla 23. *Distribución de flecha procesada en perfil IPN 80. Método directo (II).*

Tabla 24. *Distribución de flecha procesada en perfil IPN 80. Método directo (III).*

Tabla 25. *Comparación entre flecha teórica y procesada en perfil IPN 80.*

Tabla 26. *Comparación entre flecha teórica y procesada en perfil IPN 80 (II).*

Tabla 27. *Comparación entre flecha simulada y procesada en perfil IPN 80.*

Tabla 28. *Comparación entre flecha simulada y procesada en perfil IPN 80 (II).*

Tabla 29. *Comparación de flecha teórica, simulada y procesada en perfil IPN 80.*

Tabla 30. *Comparación de flecha teórica, simulada y procesada en perfil IPN 80 (II).*

Tabla 31. *Comparación de flecha máxima teórica, real, simulada y procesada por método indirecto y directo.*



1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El hierro irrumpe en el siglo XIX dando nacimiento a una nueva arquitectura, teniendo su antecedente histórico en la construcción en 1779 del puente Coalbrookdale de 30 m de claro, sobre el río Sueon en Shropshire. Se dice que este puente cambia la historia de la Revolución Industrial al introducir el hierro como material estructural, siendo el hierro 4 veces más resistente que la piedra y 30 veces más que la madera. El hierro se erige en protagonista a partir de la Revolución Industrial, llegando a su auge con la producción estandarizada de piezas. En 1836 aparece el perfil "doble T", reemplazando a la madera definitivamente y revoluciona la industria de la construcción creando las bases de la fabricación de piezas en serie.

Podemos considerar como máximo exponente de esta revolución tres obras significativas del siglo XIX:

Calerie des Machine: , un edificio que descubre en la Exposición de Paris de 1889 las ventajas plásticas del metal con una estructura ligera y mínima que permite alcanzar grandes luces con una transparencia nunca lograda antes.

Torre Eiffel: Otra obra ejecutada con hierro, protagonista que renueva y modifica formalmente la arquitectura antes de despuntar el siglo XX.

Palacio de Cristal: esta obra representa un hito al resolver estructuralmente y mediante procesos de prefabricación el armado y desarmado, y establece una relación novedosa entre los medios técnicos y los fines expresivos del edificio.



En España una de las primeras estructuras metálicas construida fue el faro de Buda en la delta del Ebro en 1864. Esta estructura fue diseñada por Lucio del Valle, ingeniero y arquitecto del siglo XIX habiendo estado en servicio hasta 1961, año en que fue derruido.

1.2 ESTRUCTURAS METÁLICAS

Las estructuras son el elemento básico de toda construcción y su función es recibir y transmitir su peso y el de las fuerzas exteriores al terreno, de manera que todos sus elementos estén en equilibrio. La transmisión de dichos esfuerzos se logra mediante la transformación en esfuerzos internos y su distribución a lo largo de las piezas estructurales.

Las estructuras metálicas constituyen un sistema constructivo muy difundido en la actualidad ya que poseen una gran capacidad resistente por el empleo de acero. Esta capacidad confiere la posibilidad de lograr soluciones de gran envergadura, como cubrir grandes luces y soportar cargas importantes. La estructura característica es la de entramados con nudos articulados, con vigas simplemente apoyadas o continuas y complementos singulares de celosía para arriostrar el conjunto.

Por su forma de trabajo las estructuras pueden ser activas o pasivas:

Estructuras activas: son capaces de modificar que las fuerzas hagan rodeos a través de una estructura, arco, dinteles, etc.

Estructuras pasivas: transmiten los esfuerzos en forma directas, como en un muro de carga o una columna, porque estos solo son elementos interpuestos entre las cargas y el terreno.



1.3 VIGAS METÁLICAS

En las estructuras metálicas, las barras trabajan a diferentes esfuerzos de compresión y flexión. Las vigas metálicas son barras que trabajan a flexión. Frente a acciones determinadas, sus fibras inferiores están sometidas a tracción, mientras que las superiores, a compresión. Los esfuerzos axiales, al actuar a una distancia de la fibra neutra de la barra, provocan un esfuerzo de momento flector (*fuerza x distancia*).

Debido a que uno de los mayores esfuerzos que una barra va a tener que soportar es debido a los esfuerzos de flexión, deben elegirse perfiles cuyo momento de inercia sea máximo para una misma cantidad de material. El acero posee una resistencia tal que responde en forma similar en los dos ejes, tanto longitudinal como transversal. Cuanto más lejos se disponen una de otra las masas de acero, mayor es su distancia y su inercia, en consecuencia, mayor será el momento flector que absorban, requiriendo una menor cantidad de acero para soportar eficazmente los esfuerzos.

Los perfiles más aptos para trabajar a flexión son los IPE y IPN [véase anexo A], debido a sus elevados momentos de inercia que permiten absorber estos esfuerzos. Los perfiles IPE y IPN son los adecuados pues para vigas y jácenas, con una mano de obra mínima para montaje en obra. Existen estructuras en las cuales las piezas sometidas a flexión no se pueden resolver con perfilaría en serie, por ello se recurre a perfiles compuestos, que son de alma llena y con secciones por lo general doble T y C.

Hay muchos casos en los cuales se recurre a las jácenas aligeradas alveoladas, llamadas Vigas Boid, o a Vigas Celosía. Tal elección se debe a razones constructivas como el paso de instalaciones, o para aligerar el peso estructural.



1.4 TIPOS DE PERFILES

Perfiles Laminados

Los perfiles laminados en forma de L ó T ó doble T, forman un conjunto de tipologías diferentes, de características adecuadas y económicas para responder a la flexión, pues las masas de acero se disponen en los extremos o alas, y el alma actúa simplemente a manera de unión. La cantidad de acero en el alma es menor que en las alas.

Vigas Boyd

Los perfiles alveolares o aligerados, conocidos como Vigas Boyd, obtenidos por mecanización de perfiles standard, se adecúan en forma óptima para trabajar a flexión. Además son más estéticos y permiten el paso de instalaciones a través de los alvéolos. Por lo general, los alvéolos son circulares o hexagonales. Con su empleo no se necesita reducir la altura de la planta del edificio; por ello se lo elige aún con el coste más elevado que insume este tipo de perfiles.

Vigas Armadas

Es también posible fabricar una barra en forma de L a través de la unión de platabandas por soldaduras. Estas son las llamadas vigas armadas. Pero requiere una cantidad mayor de mano de obra que encarece finalmente el trabajo. Las formas que adoptan, veamos, se asemejan a los diagramas de momentos flectores. Esta perfilería se obtiene siempre por corte y soldadura realizados en taller. El límite depende del tamaño a trasladar en camiones.



Vigas en Celosía

Las vigas en celosía son la solución más económica para la ejecución de grandes luces, es decir, de largas separaciones entre los apoyos. En realidad, este tipo de viga, es una clase de entramado, compuesta con barras (pilares y jácenos) de longitudes más pequeñas. Por lo general, se disponen angulares laminados normalizados dispuestos de a dos para los cordones del entramado. Las barras verticales también son angulares normalizados que offician de lama de la viga y que trabajan a tracción. Los nudos pueden ser isostáticos o hiperestáticos. En el caso de ser isostáticos, como el entramado puede deformarse ante los esfuerzos horizontales, se disponen barras diagonales en cada extremo para evitar las deformaciones (el triángulo no se deforma).

1.5 VENTAJAS DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

- **Alta resistencia**: la alta resistencia del acero por unidad de peso, permite estructuras relativamente livianas, lo cual es de gran importancia en la construcción de puentes, edificios altos y estructuras cimentadas en suelos blandos.
- **Homogeneidad**: las propiedades del acero no se alteran con el tiempo, ni varían con la localización en los elementos estructurales.
- **Elasticidad**: el acero es el material que más se acerca a un comportamiento linealmente elástico (Ley de Hooke) hasta alcanzar esfuerzos considerables.



- Precisión dimensional: los perfiles laminados están fabricados bajo estándares que permiten establecer de manera muy precisa las propiedades geométricas de la sección.
- Ductilidad: el acero permite soportar grandes deformaciones sin falla, alcanzando altos esfuerzos en tensión, ayudando a que las fallas sean evidentes.
- Tenacidad: el acero tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de energía en deformación (elástica e inelástica).
- Facilidad de unión con otros miembros: el acero en perfiles se puede conectar fácilmente a través de remaches, tornillos o soldadura con otros perfiles.
- Rapidez de montaje: la velocidad de construcción en acero es muy superior al resto de los materiales.
- Disponibilidad de secciones y tamaños: el acero se encuentra disponible en perfiles para optimizar su uso en gran cantidad de tamaños y formas.
- Costo de recuperación: las estructuras de acero de desecho, tienen un costo de recuperación en el peor de los casos como chatarra de acero.
- Reciclable: el acero es un material 100 % reciclable además de ser degradable por lo que no contamina.
- Tiempos reducidos de ejecución: ya que se pueden prefabricar estructuras en taller, reduciendo de este modo el tiempo en obra y consiguiendo además mayor exactitud.



Está recomendado el uso de estructuras metálicas en los siguientes casos:

- Zonas muy congestionadas como **centros urbanos o industriales** en los que se prevean accesos y acopios dificultosos.
- Edificios con probabilidad de **crecimiento y cambios** de función o de cargas.
- Edificios en **terrenos deficientes** donde son previsibles asientos diferenciales apreciables; en estos casos se prefiere los entramados con nudos articulados.
- Construcciones donde existen **grandes espacios** libres.

Actualmente el uso del acero se asocia a edificios con características singulares ya sea por su diseño como por la magnitud de luces a cubrir, de altura o en construcciones deportivas (estadios) o plantas industriales.

1.6 DESVENTAJAS DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

- Corrosión: el acero expuesto a intemperie sufre corrosión por lo que deben recubrirse siempre con esmaltes alquidáticos (primarios anticorrosivos) exceptuando a los aceros especiales como el inoxidable.
- Calor, fuego: en el caso de incendios, el calor se propaga rápidamente por las estructuras haciendo disminuir su resistencia hasta alcanzar temperaturas donde el acero se comporta plásticamente, debiendo protegerse con recubrimientos aislantes del calor y del fuego (retardantes) como mortero, concreto, asbesto, etc.



- Pandeo elástico: debido a su alta resistencia/peso el empleo de perfiles esbeltos sujetos a compresión, los hace susceptibles al pandeo elástico, por lo que en ocasiones no son económicas las columnas de acero.
- Fatiga: la resistencia del acero (así como del resto de los materiales), puede disminuir cuando se somete a un gran número de inversiones de carga o a cambios frecuentes de magnitud de esfuerzos a tensión (cargas pulsantes y alternativas).

No está recomendado el uso de estructuras metálicas en los siguientes casos:

- Edificaciones con grandes **acciones dinámicas**.
- Edificios ubicados en zonas de **atmósfera agresiva**, como marinas, o centros industriales, donde no resulta favorable su construcción.
- Edificios donde existe gran preponderancia de la **carga del fuego**, por ejemplo almacenes, laboratorios, etc.

1.7 CONDICIONES DE SEGURIDAD

El Código Técnico de la Edificación (CTE) establece en el Documento Básico (DB) sobre Seguridad Estructural (SE) las reglas y procedimientos que permitan cumplir las exigencias básicas de seguridad estructural. La correcta aplicación del conjunto del DB supone que se satisface el requisito básico “Seguridad estructural”.

Al construirse una edificación con estructura metálica, deben tenerse en cuenta sus deformaciones, esto es muy importante para que las mismas no afecten los elementos constructivos más rígidos, tal el caso de tabiques, cerramientos y pavimentos.



Si un perfil sufre una flecha o deformación excesiva, el cerramiento, por ser más rígido, no puede acompañar esa deformación, y tenderá a partirse siguiendo una forma parabólica, llamada arco de descarga. Por lo tanto, es menester limitar las flechas de las jácenas y de las viguetas para que éstas sean tolerables para el resto de los elementos constructivos.

El CTE-DB-SE en su epígrafe 4.3.3.1 establece el criterio de flecha máxima para los elementos constructivos. Dice así:

1. Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando sólo las deformaciones que se producen después de la puesta en obra del elemento, la flecha relativa es menor que:

a) $1/500$ en pisos con tabiques frágiles (como los de gran formato, rasillones, o placas) o pavimentos rígidos sin juntas;

b) $1/400$ en pisos con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas;

c) $1/300$ en el resto de los casos.

2. Cuando se considere el confort de los usuarios, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones característica, considerando solamente las acciones de corta duración, la flecha relativa, es menor que $1/350$.



3. Cuando se considere la apariencia de la obra, se admite que la estructura horizontal de un piso o cubierta es suficientemente rígida si, para cualquiera de sus piezas, ante cualquier combinación de acciones casi permanente, la flecha relativa es menor que 1/300.

4. Las condiciones anteriores deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos. En general, será suficiente realizar dicha comprobación en dos direcciones ortogonales.

5. En los casos en los que los elementos dañables (por ejemplo tabiques, pavimentos) reaccionan de manera sensible frente a las deformaciones (flechas o desplazamientos horizontales) de la estructura portante, además de la limitación de las deformaciones se adoptarán medidas constructivas apropiadas para evitar daños. Estas medidas resultan particularmente indicadas si dichos elementos tienen un comportamiento frágil.

Se admite que la seguridad de una estructura es aceptable cuando mediante cálculos y respetando las disposiciones en las normas:

UNE-EN ISO 14556 - Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado.

UNE-EN ISO 14556:2001/A1 - Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado.

y sometiendo la estructura a las acciones ponderadas establecidas en la combinación que resulta más desfavorable de la sección sobre Acciones de la Edificación (AE) contenida en el CTE-DB-SE, se comprueba que la estructura, en su conjunto y cada uno de sus



elementos son estáticamente estables y que las tensiones calculadas no sobrepasan la correspondiente condición de agotamiento.

Se admite que la deformación de una estructura es aceptable cuando; mediante cálculos por los métodos definidos en la norma:

UNE-EN ISO 9001 - *Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos.*

y sometiéndola a las acciones características establecidas en el CTE-DB-SE-AE en la combinación que resulta más desfavorable, se comprueba que las deformaciones calculadas no sobrepasen en ningún momento los límites de deformación prescritos.

1.8 COMPORTAMIENTO MECÁNICO

A la hora de proyectar una edificación se hace necesario conocer, a priori, el comportamiento mecánico y propiedades que tendrán los elementos constructivos involucrados en el proceso tanto individualmente como su respuesta en conjunto. Con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico de los metales se realizan análisis físico, químico y de espectrometría y una multitud de ensayos, tanto destructivos como no destructivos: de tracción utilizando probetas planas, de dureza y de ductilidad con el fin de conocer las características específicas bajo diversas hipótesis de cálculo: temperatura, cargas, fatiga... Del ensayo de tracción, en particular, se obtienen los parámetros que rigen el endurecimiento por deformación y el comportamiento ortótropo del material. A partir de este procedimiento experimental se modela el comportamiento mecánico de dichos materiales durante el ensayo de tracción. Por último, los resultados numéricos se validan con las correspondientes mediciones de laboratorio.



La caracterización experimental del material se resume en los siguientes pasos:

1. Obtener la composición química del material.
2. Realizar el ensayo de tracción. Obtener las propiedades mecánicas elástica y los parámetros de endurecimiento plástico.
3. Determinar el índice de anisotropía de Lankford.
4. Medir la dureza.
5. Realizar el ensayo tecnológico de Erichsen.

La complejidad de estos análisis y ensayos hace que la caracterización experimental del metal sea una tarea difícil pero a la vez necesaria pues el fin último de este proceso es extrapolar los datos obtenidos en los ensayos a través de las teorías de la Resistencia de Materiales para poder usar modelos matemáticos que describan de acuerdo a las evidencias experimentales, el comportamiento mecánico del material durante su vida útil.

El acero se ha utilizado como material de construcción durante más de un siglo, tiempo en el cual se ha sometido a pruebas, estudios y análisis más minuciosos y estrictos que cualquier otro material de construcción, por ejemplo, todas las laminaciones de acero para estructuras se prueban física y químicamente.

El método de elementos finitos (MEF o FEM), ya había sido empleado para describir estructuras complejas, las cuales requerían la solución de una gran cantidad de ecuaciones algebraicas asociadas a la modelación del fenómeno empleando dicha técnica para el análisis estructural, la obtención de una solución estructural por el medio del método de elementos finitos, se tornaba extremadamente difícil de resolver y por ende, de aplicar. Por lo que pese a que la modelación de estructuras y el desarrollo de las matemáticas de estructuras estaban bien cimentados en la descripción del fenómeno físico, el método no resultaba práctico.



Hasta principios de los años 50, los métodos matriciales y su asociación al método de elementos finitos no estaban listos para la solución de problemas complicados. No fue hasta la implantación de la computadora cuando la solución de miles de ecuaciones en cuestión de minutos se hizo posible.

Hoy en día, mediante simulación por ordenador sin necesidad de realizar ensayos destructivos, que por la complejidad de la gran mayoría de obras actuales de edificación sería impensable realizar, podemos conocer el comportamiento mecánico de las más complejas estructuras por medio del método de elementos finitos. Este procedimiento no se emplea sólo en las grandes empresas, como en la industria automovilística y la aeronáutica, sino que, cada vez más, también en las pequeñas y medianas empresas, se utiliza este método. Este método numérico es utilizado para resolver mediante ecuaciones matriciales las diversas ecuaciones diferenciales que se plantean en las distintas estructuras.

Uno de los principales problemas en la aplicación del FEM es la considerable complejidad de los programas de cálculo. Estas aplicaciones son muy extensas e incluyen sofisticados y complejos cálculos que sólo con una computadora central podrían llevarse a cabo. De entre la multitud de programas que en la actualidad permiten estudiar estructuras por el método de elementos finitos (ALGOR, ANSYS, SOLIDWORKS, CATIA V5, CYMECAP, COSMOS, CYPE, ABAQUS), he decidido trabajar con los programas SolidWorks y Catia V5 porque hacen posible que hoy en día se puedan realizar estos cálculos con un ordenador equipado con la tecnología capaz de soportar el software, sin necesidad de invertir en otro tipo de equipos para poder ejecutarlo.

La versión CATIA V5 posee la tecnología que hace posible el cómputo con este método numérico y que, a su vez, sea posible instalarse y ejecutarse en un ordenador con la tecnología estándar del mercado de la industria del PC. Esto se reduce, prácticamente, al ordenador más barato que tenemos hoy en día. CATIAV5 es uno de



los mejores programas de diseño gráfico en 3D y uno de los principales en el análisis en CAX-System. Este programa proporciona al diseñador de máquinas un ambiente de trabajo y una serie de tareas prácticas de cálculo, de manera rápida y eficiente de solucionar, que le permite incursionar en las diversas plataformas de diseño. El programa CATIA V5, nos permite la posibilidad de analizar, simular y calcular piezas de maquinaria en general GPS (Generative Part Structural Analysis) y grupos de piezas (montajes) GAS (Generative Assembly Structural Analysis), por el método de elementos finitos MEF. Además el módulo GPS nos permite obtener un estudio de tensiones (σ) y deformaciones (δ) de toda la estructura simulada.

SolidWorks Simulation nos permite hacer tests sobre los productos antes de fabricarlos para detectar defectos, con lo que contribuye a prevenir errores en las primeras fases del proceso de diseño. Es lo bastante eficaz para los analistas de FEA y, a la vez, lo bastante fácil para los diseñadores de productos. SolidWorks Simulation es lo bastante sencillo para que lo utilice cualquier diseñador, y lo bastante eficaz para obtener resultados fidedignos y valiosos. SolidWorks Simulation se abre a partir de la interfaz de usuario de SolidWorks, por lo que no es necesario iniciar varias aplicaciones. Permite someter nuestros diseños a las mismas condiciones que tienen lugar en la vida real, incluidos la tensión, el impacto, el calor, el flujo de aire y mucho más. No es necesario esperar a fabricar un producto para empezar a probarlo, ni pasar por varios prototipos físicos.

Conociendo la caracterización experimental, se modela el comportamiento mecánico a través de las ecuaciones de la mecánica del continuo y la plasticidad. Para ello se simula el ensayo de flexión resolviendo el modelo matemático a través del método de elementos finitos. Finalmente, los resultados de la simulación se validan con las mediciones de laboratorio.

Actualmente se está desarrollando cada vez más la tecnología de reconocimiento de imagen. Este método requiere de la aplicación de un potente software de procesamiento matricial como es MATLAB, plataforma fundamentalmente basada en



un sofisticado software matricial, en el que el elemento de información básico es una matriz que no requiere predimensionamiento.

Con una comunidad de usuarios superior a los 500.000 usuarios en el sector industrial, la administración y la universidad, MATLAB se usa en una gran variedad de áreas de aplicación, como en el procesado de señales de imágenes, el diseño de sistemas de control, la biología, la geología, las finanzas, la economía y la instrumentación. La arquitectura abierta de MATLAB facilita su uso y el de sus productos acompañantes para explorar datos y crear herramientas personalizadas que permitan obtener con rapidez información y confieran ventajas competitivas. La característica de la arquitectura abierta ha sido una importante característica para el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera pues necesitaba contar con un potente software matricial que se adaptase a las necesidades y particularidades individuales, y a la vez contar con un toolbox de herramientas ya desarrolladas y testadas. He encontrado en la combinación de la interfaz intuitiva, el lenguaje y las funciones incorporadas gráficas y matemáticas de MATLAB la plataforma ideal para el cálculo técnico.

MATLAB abarca una amplia gama de tareas de cálculo técnico y científico, desde la adquisición y el análisis de datos hasta el desarrollo de aplicaciones. El entorno MATLAB integra funciones de computación matemática con funciones de visualización y un poderoso lenguaje técnico. Las interfaces incorporadas permiten acceder rápidamente a los datos e importarlos desde instrumentos, archivos y programas y bases de datos externos.

MATLAB integra la computación matemática con funciones de visualización y un lenguaje de gran eficacia a fin de ofrecer un entorno flexible para la realización de computación técnica. La arquitectura abierta facilita el uso de MATLAB y de los productos acompañantes para explorar datos, crear algoritmos y herramientas a medida que permitan obtener de manera rápida la información y confieran ventajas competitivas. El entorno MATLAB estimula la creatividad y permite comprobar y



comparar rápidamente múltiples alternativas, permitiendo así la obtención de mejores soluciones.

Sería útil e interesante desde una Ingeniería Técnica realizar un Proyecto Fin de Carrera con el objetivo de conocer el grado de aproximación de la simulación en laboratorio mediante el método de elementos finitos y los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de flexión, mediante un proceso basado en una tecnología en crecimiento como es el procesamiento de imágenes.



2. OBJETIVOS

En el presente Proyecto Fin de Carrera me propongo realizar un estudio comparativo de los resultados de flecha obtenidos mediante:

1. Cálculo analítico.
2. Ensayo mecánico de flexión.
3. Simulación por elementos finitos.
4. Procesamiento de imagen mediante MATLAB.

Con el objetivo de comparar, mediante el desarrollo de un programa informático desarrollado en MATLAB que mida la flecha de un perfil biapoyado mediante un análisis de imagen, los datos extraídos en iguales condiciones mediante métodos de simulación y ensayo mecánico y analítico, que sirvan de datos de comparación, entre los diversos procedimientos de cálculo de flechas en una estructura biapoyada de perfiles IPN 80, IPN 100 e IPN 120, con la finalidad de saber si la tecnología de Procesamiento de imagen tiene una buena precisión para el cálculo de deformaciones estructurales y pudiera ser a corto plazo una tecnología a tener en cuenta a la hora de realizar estos cálculos, o si por el contrario es una tecnología que aún tiene que madurar.



3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

En cada uno de los ensayos efectuados, con el fin de obtener datos de comparación entre los diversos procedimientos de cálculo de flechas en una estructura biapoyada, se ha seguido una metodología específica para la que se han necesitado diversos materiales. Paso a exponer particularmente la metodología de cada ensayo.

3.1 CALCULO ANALÍTICO

El cálculo analítico tiene una metodología simple pues se trata de una estructura simple que no presenta gran complejidad.

Primeramente calculo las reacciones en los apoyos mediante las ecuaciones de la estática. Posteriormente y mediante la teoría de la Resistencia de Materiales trazo los diagramas de cortante y momento flector. Calculo las tensiones normales máximas en la sección más desfavorable a través de la ley de Navier-Bernoulli:

$$\sigma(x, y, z) = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{zI_z - yI_{yz}}{I_z I_y - I_{yz}^2} M_y(x) - \frac{yI_y - zI_{yz}}{I_z I_y - I_{yz}^2} M_z(x)$$

Finalmente calculo la flecha máxima a partir de la ecuación de la elástica obtenida de la teoría de la Resistencia de Materiales y con ayuda de los valores normalizados tabulados en las tablas de perfiles IPN.



3.1.1 MATERIAL UTILIZADO

- TIMOSHENKO, S., Resistencia de Materiales. Espasa-Calpe S.A. Madrid, 1957.
- Tablas normalizadas de perfiles IPN.

3.2 ENSAYO MECÁNICO DE FLEXIÓN

El ensayo mecánico de flexión se ha llevado a cabo en el CENTRO DE CALIDAD DE PALENCIA DE LA CONSEJERÍA DE FOMENTO DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN en una máquina de ensayos electromecánica de 200 kN de capacidad. El ensayo se ha realizado bajo las disposiciones que establecen las normas:

UNE-EN ISO 14556 - *Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado.*

UNE-EN ISO 14556:2001/A1 - *Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado.*

La aplicación estricta de estas normas no se ha podido llevar a cabo por las peculiares características que en ella se exigen. Los perfiles con los que contaba eran prestados y no era posible realizarles entalladura en V así como rebasar el límite elástico del material.



En este sistema, la carga es aplicada mediante un sistema de husillo actuador centrado en el marco de ensayos de la máquina, que junto a las columnas de la máquina, proporcionan una alta rigidez al conjunto.

Además, el desplazamiento del sistema de carga permite la aplicación de ésta sin impacto, de forma continua en un tiempo dado, no dependiendo del estado de limpieza que afecta a la actuación de correderas de electroválvulas o servo válvulas en sistemas hidráulicos.

La velocidad de ensayo en control por recorrido se gobierna de forma digital, mediante un codificador óptico incremental situado en el eje del motor, con lo que se regula con muy alta precisión el movimiento del mismo, al multiplicar por la relación de reducción completa del sistema.

La carga se transmite al husillo actuador por medio de un reductor sinfín-corona, que junto con la instalación de tuerca pretensada en el husillo proporcionan un movimiento lineal con resoluciones por debajo de la micra, dado que el husillo es rectificad.

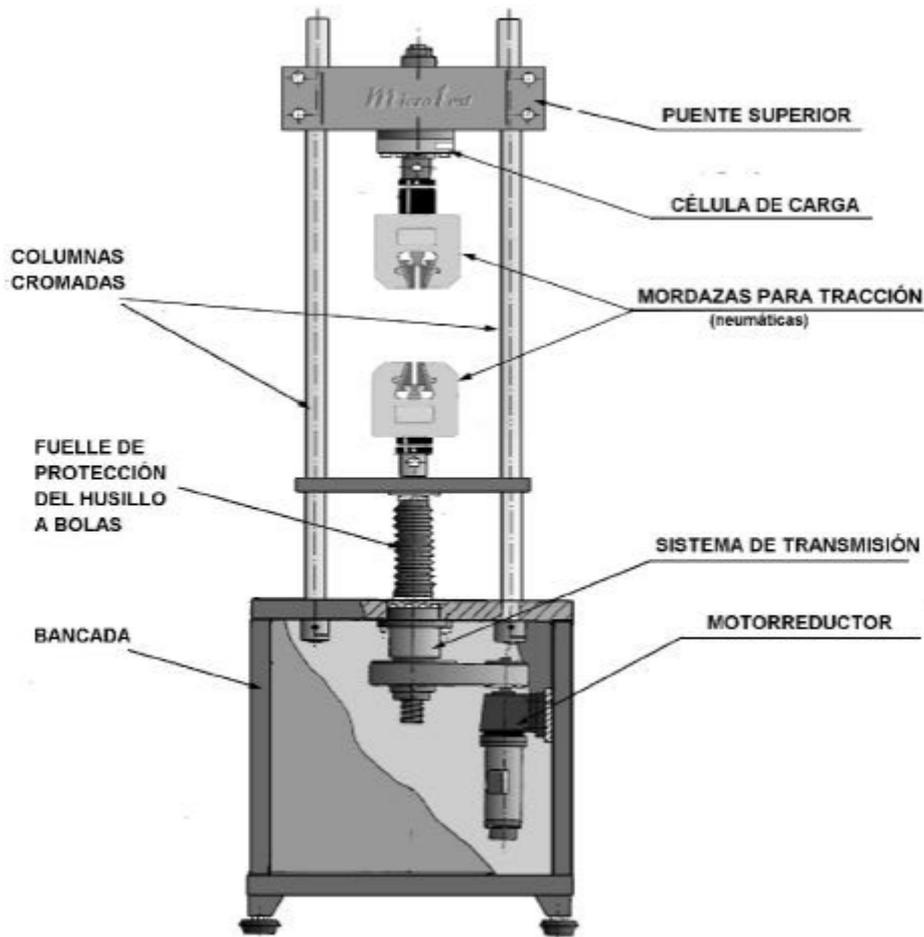


Figura 1. Esquema general de máquina electro-mecánica EM1/200/FR/M

3.2.1 MATERIAL UTILIZADO

- Máquina de ensayos electro-mecánica de 200 kN de capacidad Microtest, modelo EM1/200/FR/M para ensayos de flexión y compresión.
- Perfil IPN 80.
- Perfil IPN 100.
- Perfil IPN 120.



3.3 SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

Este ensayo lo realizo con dos programas: el software CATIA V5 y SolidWorks 2010. Para poder realizar la simulación previamente necesito modelar virtualmente los perfiles IPN 80, IPN 100, IPN 120 y aplicarles el material correspondiente; en este caso acero S 275. A continuación discretizo dichos perfiles mediante un mallado que abarca toda la pieza.

Una vez están modelados y mallados los perfiles establezco las restricciones debidas en los apoyos, colocando cada uno de ellos a la distancia que se realizó el ensayo mecánico de flexión.

Por último establezco las cargas a considerar en la simulación y mediante el módulo GAS (Generative Structural Analysis) del software CATIA V5 y el módulo Simulation de SolidWorks efectúo la simulación, en la que conseguiré los valores de desplazamiento a lo largo de todo el mallado del perfil.

3.3.1 MATERIAL UTILIZADO

- HP Pavilion dv9000.
- Software CATIA V5R19.
- Software SOLIDWORKS 2010.

3.4 PROCESAMIENTO DE IMAGEN MEDIANTE MATLAB

La toma de imágenes, para su posterior procesamiento mediante el programa implementado en el software MATLAB, tiene lugar en día y hora del ensayo mecánico de flexión en el CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD DE PALENCIA DE LA CONSEJERÍA DE FOMENTO DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. Para ello y debido a las restricciones impuestas por la maquina de ensayos se toman imágenes desde tres posiciones:

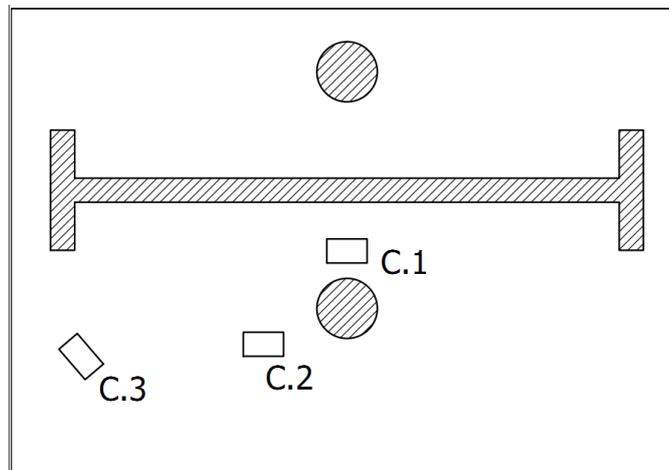


Figura 2. Situación de las cámaras en el ensayo.

- Cámara 1: paralela al perfil, entre este y el apoyo central de la máquina. Consigo una amplitud de imagen de 216 mm.
- Cámara 2: paralela al perfil, situada para evitar la aparición del apoyo en la imagen. Consigo una amplitud de imagen algo mayor a medio perfil, incluyendo el punto de flecha máxima.



- Cámara 3: en ángulo respecto al perfil. Consigo una amplitud de imagen total pero con perspectiva y por tanto con deformación.

Todas las máquinas fotográficas digitales implicadas en la toma de imágenes para este ensayo cuentan con la característica técnica común de poseer gran angular. Esta característica confiere una mayor profundidad de campo en la fotografía, necesaria por la cercanía con la que tuve que trabajar debido a las restricciones impuestas por la máquina de ensayo. El gran angular exagera la perspectiva de los objetos provocando una distorsión de líneas tanto más acusada cuanto más cerca se sitúa la cámara del perfil y, por tanto, se obtiene una imagen del perfil con una cierta distorsión curvada. Los modelos de las cámaras digitales son:

- Cámara 1: SONY DSC-W310. 12.1 megapíxeles.
- Cámara 2: OLYMPUS FE-4030. 14 megapíxeles.
- Cámara 3: PANASONIC DMC-TZ3EGM. 7.2 megapíxeles.

Todas las cámaras se situaron sobre trípode para conferir estabilidad a la imagen y se programaron para disparar a la máxima resolución técnica que era posible con el fin de conseguir la mayor precisión posible.



A continuación paso a mostrar una imagen representativa de cada cámara:

CAMARA 1:



CAMARA 2:



CÁMARA 3:



La máquina electromecánica se programó para un fin de rampa preestablecido de acuerdo con el número de imágenes a tomar por ensayo. Se programó una velocidad de aplicación de la carga de 50 N/s y en cada parada se dispara cámara por cámara.

3.4.1 MATERIAL UTILIZADO

- Software MATLAB Versión 7.9.0.529 (R2009b)
- HP Pavilion dv9000.
- Cámara compacta SONY DSC-W310.
- Cámara compacta OLYMPUS FE-4030.
- Cámara compacta PANASONIC DMC-TZ3EGM.
- Trípode CLAIREX L6662.

4. DESARROLLO

4.1 CÁLCULO ANALÍTICO

DEFORMACIÓN DE VIGAS CARGADAS TRANSVERSALMENTE

Al proyectar una viga se hace necesario conocer tanto las fatigas producidas por las cargas que la solicitan, como las deformaciones que dichas cargas producen; como se ha mencionado anteriormente el CTE-DB-SE en su *epígrafe 4.3.3.1* establece el criterio de flecha máxima para los elementos constructivos.

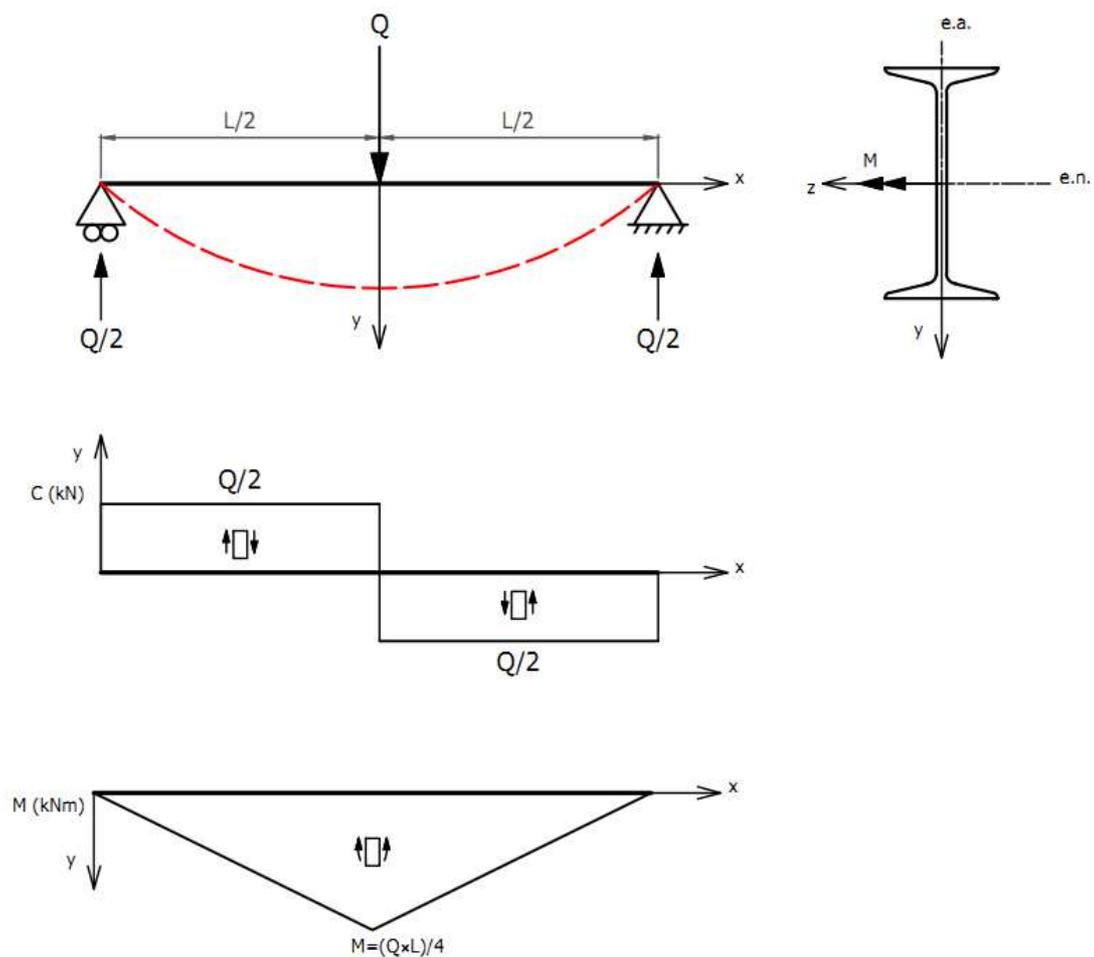


Figura 3. Diagramas de cortante (C) y momento flector (M).



La disposición del perfil que voy a tratar, biapoyado con carga puntual central, hace que el perfil esté sometido a una flexión recta debido a que el plano de acción (*e.a.*) pasa por un eje principal de la sección. En la flexión recta, el eje neutro (*e.n.*) de la sección es paralelo al vector momento flector (M) actuante en esa sección; por lo que el eje neutro es perpendicular al eje de acción.

De las ecuaciones de la estática obtenemos los esfuerzos en los apoyos. Que obviamente, al ser en el caso particular de que la estructura sea simétrica respecto al punto de aplicación de la carga, es decir, que la carga se aplique en el punto medio entre apoyos, se repartirán la carga a medias entre ambos apoyos.

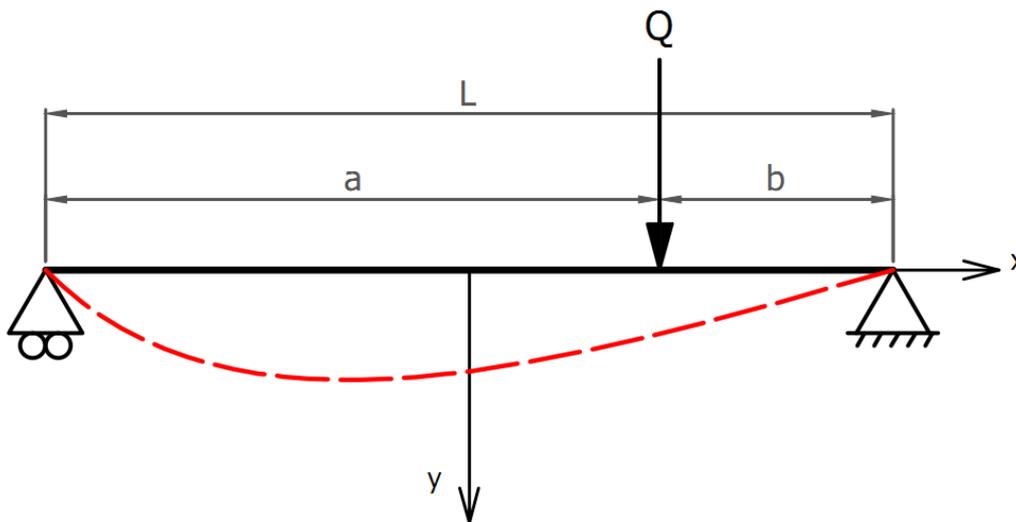


Figura 4. Esquema de elástica para aplicación de carga descentrada.

Para encontrar la ecuación diferencial de esta curva tomaremos el criterio de ejes propuesto en la *figura 3* y vamos a realizar la simplificación de que la curvatura de la elástica en cualquier punto depende únicamente del valor del momento flector (M) en ese punto. El efecto producido debido a la fuerza cortante en la curvatura es muy pequeño y lo podemos despreciar.



La relación entre curvatura y momento en el caso de flexión pura es:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI_z} \quad (1)$$

Donde:

M es el momento flector que produce la flexión.

E es el módulo de elasticidad del material.

I_z es el momento de inercia en el eje Z .

r es el radio de curvatura.

Tomemos dos secciones adyacentes separadas por ds sobre la elástica. Si representamos por θ el ángulo que la tangente forma con el eje x , el ángulo que forman las normales a la elástica será $d\theta$. El punto O de intersección de estas normales tiene lugar en el centro de la curvatura y a partir de ello podemos definir la longitud r del radio de curvatura. Teniendo como referencia el sistema de ejes establecido, obtenemos:

$$ds = rd\theta \quad \text{y} \quad \frac{1}{r} = -\frac{d\theta}{ds} \quad (a)$$

Debido una vez más a la particular disposición de la viga biapoyada y teniendo en cuenta las pequeñas luces (L) con las que van a llevarse a cabo los ensayos y mediciones, vamos a obtener pequeñas deformaciones (Teoría de pequeñas deformaciones) y por tanto se va a producir una elástica con curvatura poco acentuada. Por ello nos encontramos en una situación en la que podemos escribir con suficiente aproximación:



$$ds \approx dx \quad \text{y} \quad \theta \approx \text{tg} \theta = \frac{dy}{dx} \quad (\text{b})$$

Sustituyendo estos valores de ds y θ en la ecuación (a), obtenemos:

$$\frac{1}{r} = -\frac{d^2y}{dx^2} \quad (\text{c})$$

Por lo tanto, la ecuación de la elástica que pretendemos encontrar la podemos expresar como:

$$EI_z \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (2)$$

Como podemos observar, la ecuación diferencial de la elástica depende de:

- El material de la viga, representado por el módulo de elasticidad (E).
- La geometría del perfil elegido, siendo una elección importante pues el valor de la flecha será inversamente proporcional a su momento de inercia, (I_z).
- La carga puntual aplicada y su punto de aplicación, (M).
- La longitud de la distancia entre apoyos, representada por el momento flector, (M).

Debido a que será aplicada una carga puntual tendremos dos expresiones para el momento flector, dependiendo de si nos encontramos a la derecha o izquierda del punto de aplicación de la misma, estos serán:



$$EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{Qb}{L}x \quad \text{para } x \leq a \quad (d1)$$

$$EI_z \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{Qb}{L}x + Q(x-a) \quad \text{para } x \geq a \quad (d2)$$

Integrando estas ecuaciones obtenemos las expresiones de la pendiente:

$$EI_z \frac{dy}{dx} = -\frac{Qbx^2}{2L} + C_1 \quad \text{para } x \leq a \quad (e1)$$

$$EI_z \frac{dy}{dx} = -\frac{Qbx^2}{2L} + \frac{Q(x-a)^2}{2} + C_2 \quad \text{para } x \geq a \quad (e2)$$

Para descubrir las constantes de integración C_1 y C_2 debemos imponer características particulares para cada caso a tratar. En el caso a tratar, la elástica debe tener la tangente común en el punto de aplicación de la carga Q . Por ello las expresiones de la pendiente (e1), (e2) deben ser iguales para $x = a$. De ello se deduce que las constantes de integración son iguales: $C_1 = C_2$.

Integrando ambas expresiones de la pendiente obtenemos las expresiones de las flechas:

$$EI_z y = -\frac{Qbx^3}{6L} + C_1 x + C_3 \quad \text{para } x \leq a \quad (f1)$$

$$EI_z y = -\frac{Qbx^3}{6L} + \frac{Q(x-a)^3}{6} + C_1 x + C_4 \quad \text{para } x \geq a \quad (f2)$$

Para descubrir las constantes de integración C_3 y C_4 debemos imponer características particulares para cada caso a tratar. En el caso a tratar, la elástica debe



tener la misma flecha en el punto de aplicación de la carga Q . Por ello las expresiones de la pendiente ($e1$), ($e2$) deben ser iguales para $x = a$. De ello se deduce que las constantes de integración son iguales: $C_3 = C_4$.

Finalmente para descubrir las constantes de integración C_1 y C_3 tendremos que imponer más condiciones. En este caso diremos que la flecha en los apoyos es nula. Por tanto, dando $x = 0$ e $y = 0$ en la primera de las ecuaciones de flecha ($f1$), obtenemos:

$$C_1 = C_2 = 0 \quad (g)$$

Poniendo la condición de que la flecha en el apoyo de la derecha también es nula, es decir, dando $x = 1$ e $y = 0$ en la segunda ecuación de flecha ($f2$), obtenemos:

$$C_3 = C_4 = \frac{QbL}{6} - \frac{Qb^3}{6L} = \frac{Qb(L^2 - b^2)}{6L} \quad (h)$$

Introduciendo los valores de las constantes de integración (g) y (h) dentro de las ecuaciones de flecha ($f1$) y ($f2$) obtenemos las expresiones finales que permiten calcular las flechas producidas en el perfil:

$$EI_z y = \frac{Qbx}{6L}(L^2 - b^2 - x^2) \quad \text{para } x \leq a \quad (3)$$

$$EI_z y = \frac{Qbx}{6L}(L^2 - b^2 - x^2) + \frac{Q(x-a)^3}{6} \quad \text{para } x \geq a \quad (4)$$



La flecha máxima tiene lugar en el punto en que la tangente a la elástica es 0. Si $a > b$ como en la *figura 4*, la flecha máxima corresponde evidentemente al trozo izquierdo de la viga. Encontramos su posición igualando la primera ecuación de flecha (3):

$$L^2 - b^2 - 3x^2 = 0 \quad (h)$$

de donde el valor de abscisa contado a partir del extremos izquierdo del punto de aplicación de la flecha máxima es:

$$x = \frac{\sqrt{L^2 - b^2}}{\sqrt{3}} \quad (i)$$

Para obtener el valor de flecha máxima que acontecerá es suficiente introducir el valor de (i) en la primera de las ecuaciones de flecha (3):

$$y_{\max} = \frac{Qb(L^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}}{9\sqrt{3}LEI_z} \quad (5)$$

Particularizando para el caso que va a ser ensayado y estudiado, carga puntual aplicada en el punto medio entre apoyos, la flecha máxima la obtenemos cuando $b = \frac{L}{2}$ en la ecuación (5):

$$y_{\max_{b=\frac{L}{2}}} = \frac{QL^3}{48EI_z} \quad (6)$$



Introduciendo los valores de las constantes de integración (f) y (g) dentro de las ecuaciones de flecha ($d1$) y ($d2$) obtenemos las expresiones finales que permiten calcular las pendientes de la elástica en el perfil:

$$EI_z \frac{dy}{dx} = \frac{Qb}{6L} (L^2 - b^2 - 3x^2) \quad \text{para } x \leq a \quad (7)$$

$$EI_z \frac{dy}{dx} = \frac{Qb}{6L} (L^2 - b^2 - 3x^2) + \frac{Q(x-a)^2}{2} \quad \text{para } x \geq a \quad (8)$$

4.1.2 CARGA MÁXIMA ADMISIBLE EN RÉGIMEN ELÁSTICO

Realizaré ahora la peritación de la estructura que va a ser ensayada y de la cuál se tomarán los valores para el estudio comparativo objeto de este Proyecto Fin de Carrera. Calculo ahora la máxima capacidad de carga teórica de la viga ensayada suponiendo únicamente que trabajo con un perfil IPN, ya que así desarrollaré teóricamente los cálculos y después podré sustituir los valores particularmente en cada caso, de acero S 275 y 1 metro de longitud (L) entre apoyos, estando la carga puntual aplicada en el punto medio entre apoyos.

Considero únicamente el comportamiento elástico del perfil porque es el único comportamiento que va a ser ensayado, ya que los ensayos efectuados son no destructivos, y debido a que el comportamiento elástico es el que muestra una proporcionalidad directa entre tensión/deformación, pues entrando ya en el comportamiento plástico hay que tener en cuenta muchos factores que dificultan la comparación de resultados entre unos métodos de cálculo y otros.

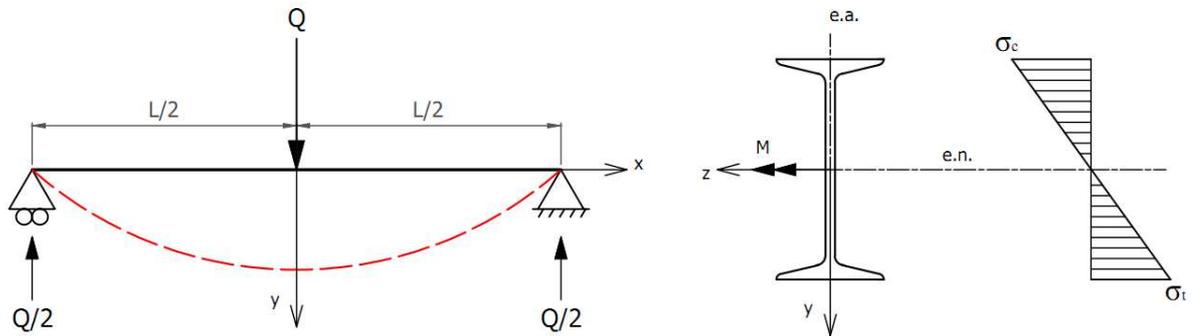


Figura 5. Distribución de tensiones normales en la sección transversal.

Calculo por tanto la máxima carga de agotamiento considerando un comportamiento elástico. Para ello, obtengo la distribución de tensiones normales a partir de la ley de Navier-Bernoulli:

$$\sigma(x, y, z) = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{zI_z - yI_{yz}}{I_zI_y - I_{yz}^2} M_y(x) - \frac{yI_y - zI_{yz}}{I_zI_y - I_{yz}^2} M_z(x) \quad (9)$$

Donde:

I_y, I_z son los momentos de inercia según los ejes Y y Z.

I_{yz} es el momento de área mixto o producto de inercia según los ejes Z e Y.

$M_y(x), M_z(x)$ son los momentos flectores según las direcciones Y y Z, que varían según la coordenada x .

$N_x(x)$ es el esfuerzo axial a lo largo del eje.



En nuestro caso particular puesto que estamos ante un caso de flexión recta y la dirección de los ejes de coordenadas (y, z) son coincidentes con las direcciones principales de inercia, los productos de inercia se anulan y como no existe esfuerzo axial, la ecuación de Navier-Bernoulli queda:

$$\sigma = -\frac{M_z(x)}{I_z} y \quad (10)$$

Como podemos apreciar la tensión máxima se produce en la fibra más alejada.

$$\sigma_{\max} = -\frac{M_z(x)}{I_z} y_{\max} \quad (11)$$

Si definimos el módulo resistente elástico [véase anexo A] que sólo depende de la geometría de la sección como:

$$W = \frac{I_z}{y_{\max}} \quad (12)$$

La ecuación (11) escrita en términos del módulo resistente elástico es:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z(x)}{W} \quad (13)$$

En el límite del estado elástico, cuando la tensión máxima en la fibra más alejada es igual al límite elástico del acero del perfil, tendremos:

$$\sigma_R = \frac{M_z(x)}{W} \quad (14)$$



Se define el momento resistente elástico ($M_{R,e}$) de un perfil, como aquel que genera una tensión máxima en la fibra más alejada de la sección igual a σ_R es decir, el máximo momento que aguanta el perfil en régimen elástico, y su valor es:

$$M_{R,e} = \sigma_R \cdot W \quad (15)$$

Considerando el diagrama de flectores de la *Figura 3*, y teniendo en cuenta que el momento máximo se produce en el punto medio entre apoyos y tiene un valor de:

$$M_{\max} = \frac{QL}{4} \quad (16)$$

Igualando el máximo momento solicitado por el perfil con el momento resistente elástico del perfil, se obtiene la máxima carga que es capaz de soportar el perfil considerando un comportamiento elástico de la sección, y es:

$$Q = \frac{4\sigma_R W}{L} \quad (17)$$

Como podemos observar, la carga máxima admisible en régimen elástico depende de:

- La geometría del perfil, expresado en (W).
- El material del perfil, (σ_R) [$\sigma_R = 275MPa$] [$E = 210GPa$]
- La distancia entre apoyos (L).

	$I_z [cm^4]$	$W_x [cm^3]$	$Q_{\max} [kN]$	$y_{\max} [mm]$
IPN 80	77,8	19,5	21,45	2,735
IPN 100	171	34,2	37,62	2,182
IPN 120	328	54,7	60,17	1,819

Tabla1. Relación de Carga máxima admisible y flecha máxima en régimen elástico.



Como era de esperar a medida que aumentamos la sección de los perfiles, estos son capaces de soportar más carga debido a que el módulo resistente elástico aumenta proporcionalmente al momento de inercia e inversamente a la distancia de alejamiento de las alas del perfil.

A medida que aumentamos la sección de los perfiles cada vez permiten menor deformación antes de plastificar debido a que esta deformación es proporcional a la carga soportada, $f(W_x)$, pero inversamente proporcional al momento de inercia, que como podemos observar tiene un rápido crecimiento a medida que aumentamos la sección; un crecimiento mucho más pronunciado que el crecimiento del momento resistente elástico (W_x).



4.1.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Perfil IPN 80

CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)
	200	0,072		200	0,290		200	0,507
	300	0,101		300	0,404		300	0,707
	400	0,120		400	0,481		400	0,843
1000	500	0,128	4000	500	0,510	7000	500	0,893
	600	0,120		600	0,481		600	0,843
	700	0,101		700	0,404		700	0,707
	800	0,072		800	0,290		800	0,507
	200	0,145		200	0,362		200	0,579
	300	0,202		300	0,505		300	0,808
	400	0,241		400	0,602		400	0,963
2000	500	0,255	5000	500	0,638	8000	500	1,020
	600	0,241		600	0,602		600	0,963
	700	0,202		700	0,505		700	0,808
	800	0,145		800	0,362		800	0,579
	200	0,217		200	0,435		200	0,652
	300	0,303		300	0,606		300	0,909
	400	0,361		400	0,722		400	1,083
3000	500	0,383	6000	500	0,765	9000	500	1,148
	600	0,361		600	0,722		600	1,083
	700	0,303		700	0,606		700	0,909
	800	0,217		800	0,435		800	0,652

Tabla 2. Distribución de flecha en perfil IPN 80.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)
	200	0,724		200	0,942		200	1,159
	300	1,010		300	1,313		300	1,616
	400	1,204		400	1,565		400	1,926
10000	500	1,275	13000	500	1,658	16000	500	2,040
	600	1,204		600	1,565		600	1,926
	700	1,010		700	1,313		700	1,616
	800	0,724		800	0,942		800	1,159
	200	0,797		200	1,014		200	1,231
	300	1,111		300	1,414		300	1,717
	400	1,324		400	1,685		400	2,046
11000	500	1,403	14000	500	1,785	17000	500	2,168
	600	1,324		600	1,685		600	2,046
	700	1,111		700	1,414		700	1,717
	800	0,797		800	1,014		800	1,231
	200	0,869		200	1,086		200	1,304
	300	1,212		300	1,515		300	1,818
	400	1,444		400	1,806		400	2,167
12000	500	1,530	15000	500	1,913	18000	500	2,295
	600	1,444		600	1,806		600	2,167
	700	1,212		700	1,515		700	1,818
	800	0,869		800	1,086		800	1,304

Tabla 3. Distribución de flecha en perfil IPN 80(II).

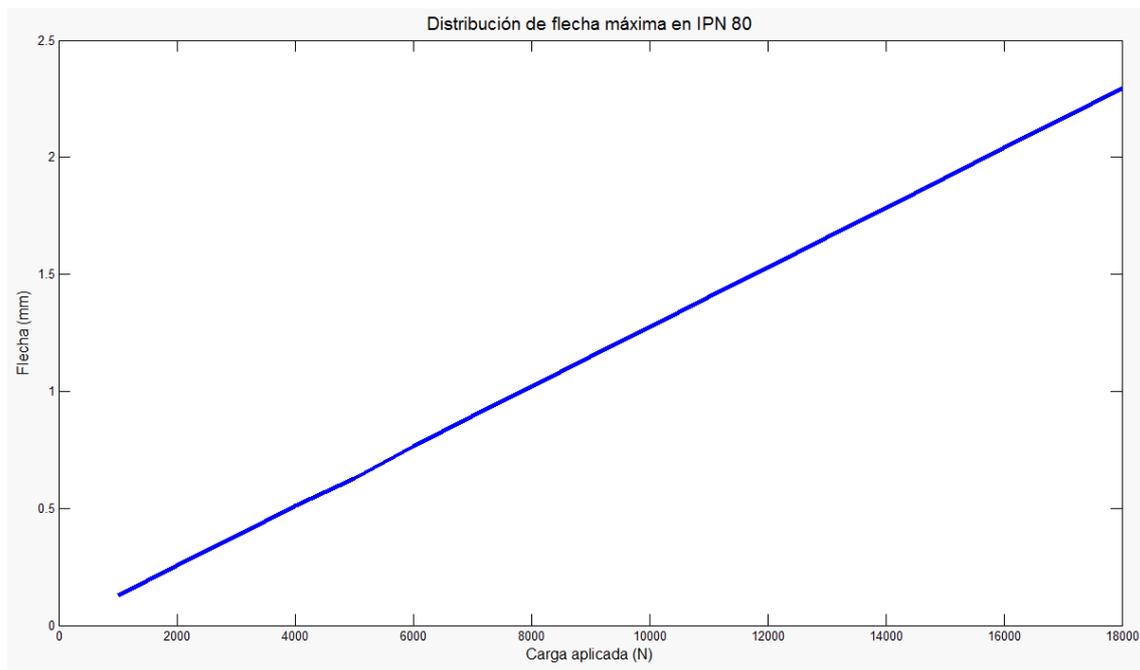


Figura 6. Representación de la distribución de flecha máxima en perfil IPN 80.



Perfil IPN 100

CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)
	200	0,033		200	0,428		200	0,824
	300	0,046		300	0,597		300	1,149
	400	0,055		400	0,712		400	1,369
1000	500	0,058	13000	500	0,754	25000	500	1,450
	600	0,054		600	0,706		600	1,358
	700	0,042		700	0,549		700	1,056
	800	0,020		800	0,265		800	0,511
	200	0,165		200	0,560		200	0,956
	300	0,230		300	0,781		300	1,332
	400	0,274		400	0,931		400	1,588
5000	500	0,290	17000	500	0,986	29000	500	1,682
	600	0,272		600	0,923		600	1,575
	700	0,211		700	0,718		700	1,225
	800	0,102		800	0,347		800	0,592
	200	0,297		200	0,692		200	1,087
	300	0,414		300	0,965		300	1,516
	400	0,493		400	1,150		400	1,807
9000	500	0,522	21000	500	1,218	33000	500	1,915
	600	0,489		600	1,140		600	1,792
	700	0,380		700	0,887		700	1,394
	800	0,184		800	0,429		800	0,674

Tabla 4. Distribución de flecha en perfil IPN 100.

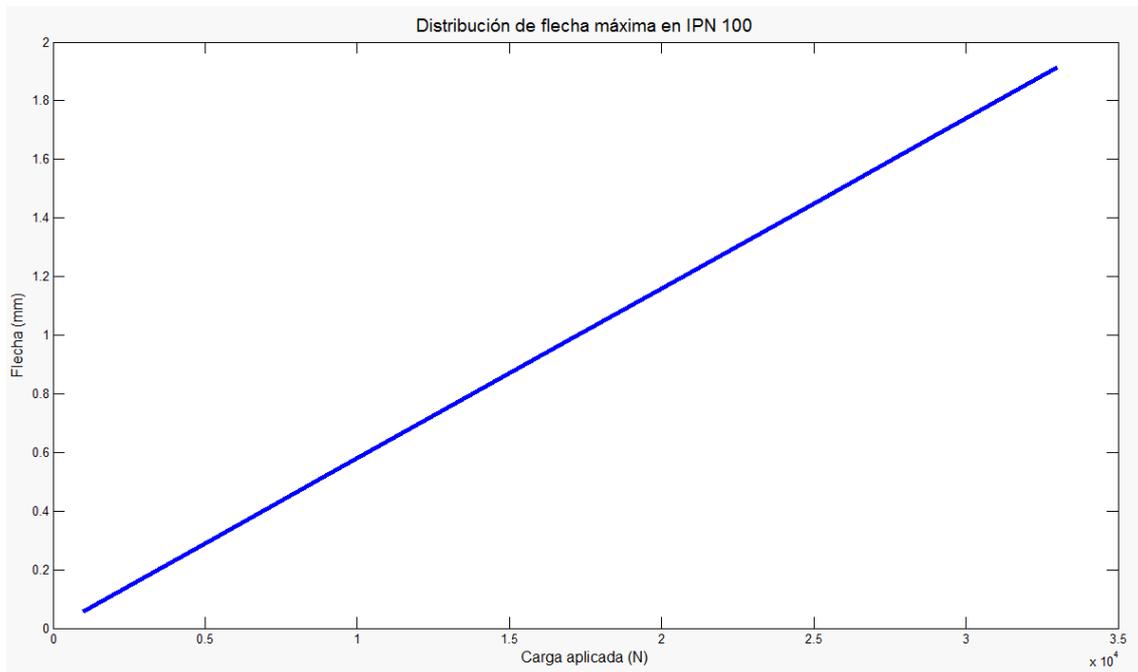


Figura 7. Representación de la distribución de flecha máxima en perfil IPN 100.



Perfil IPN 120

CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)
1000	200	0,017	10000	200	0,172	20000	200	0,344
	300	0,024		300	0,240		300	0,479
	400	0,029		400	0,286		400	0,571
	500	0,030		500	0,302		500	0,605
3000	600	0,028	13000	600	0,283	23000	600	0,566
	700	0,022		700	0,220		700	0,440
	800	0,011		800	0,106		800	0,213
	200	0,052		200	0,223		200	0,395
5000	300	0,072	15000	300	0,311	25000	300	0,551
	400	0,086		400	0,371		400	0,657
	500	0,091		500	0,393		500	0,696
	600	0,085		600	0,368		600	0,651
	700	0,066		700	0,286		700	0,506
	800	0,032		800	0,138		800	0,245
	200	0,086		200	0,258		200	0,429
	300	0,120		300	0,359		300	0,599
	400	0,143		400	0,428		400	0,714
	500	0,151		500	0,454		500	0,756
	600	0,142		600	0,425		600	0,708
	700	0,110		700	0,330		700	0,550
	800	0,053		800	0,160		800	0,266

Tabla 5. Distribución de flecha en perfil IPN 120.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)
	200	0,515		200	0,687		200	0,859
	300	0,719		300	0,958		300	1,198
	400	0,857		400	1,142		400	1,428
30000	500	0,907	40000	500	1,210	50000	500	1,512
	600	0,849		600	1,132		600	1,416
	700	0,661		700	0,881		700	1,101
	800	0,319		800	0,426		800	0,532
	200	0,567		200	0,739		200	0,911
	300	0,791		300	1,030		300	1,270
	400	0,942		400	1,228		400	1,513
33000	500	0,998	43000	500	1,301	53000	500	1,603
	600	0,934		600	1,217		600	1,500
	700	0,727		700	0,947		700	1,167
	800	0,351		800	0,458		800	0,564
	200	0,601		200	0,773		200	0,945
	300	0,838		300	1,078		300	1,318
	400	0,999		400	1,285		400	1,570
35000	500	1,059	45000	500	1,361	55000	500	1,664
	600	0,991		600	1,274		600	1,557
	700	0,771		700	0,991		700	1,211
	800	0,373		800	0,479		800	0,586

Tabla 6. Distribución de flecha en perfil IPN 120 (II).

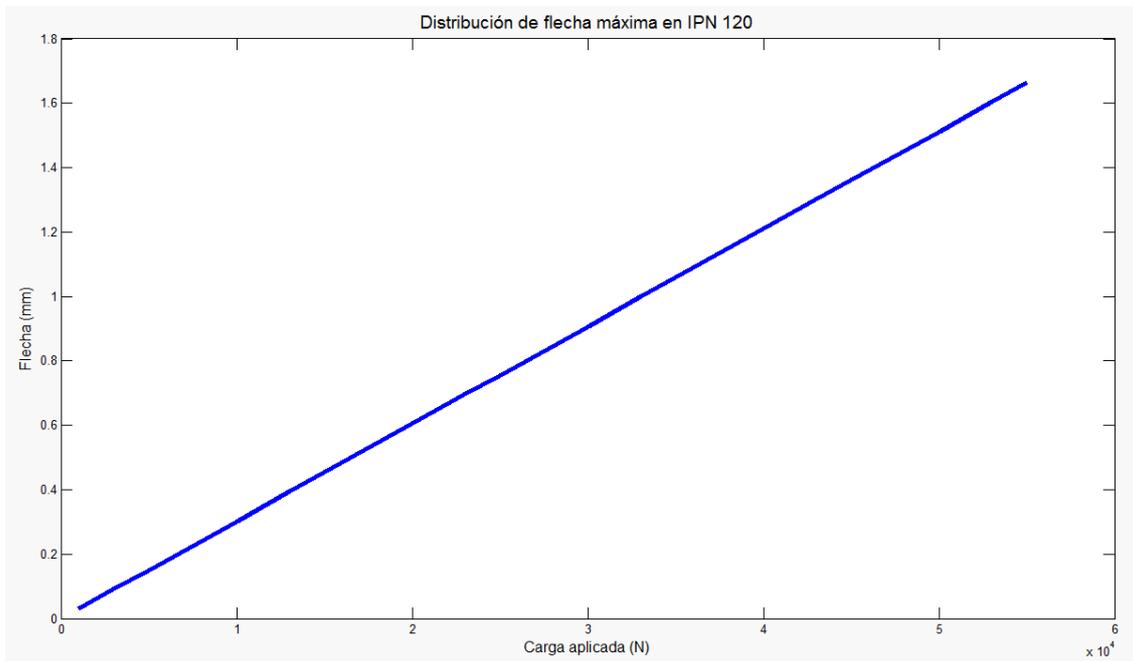


Figura 8. Representación de la distribución de flecha máxima en perfil IPN 120.

4.2 ENSAYO MECÁNICO DE FLEXIÓN

El ensayo mecánico de flexión se ha llevado a cabo en el “CENTRO DE CONTROL DE CALIDAD DE PALENCIA DE LA CONSEJERÍA DE FOMENTO DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN” mediante una máquina de ensayos electromecánica de 200 kN de capacidad Microtest, modelo EM1/200/FR/M para ensayos de flexión y compresión.

A continuación muestro unas fotografías generales para que se pueda comprender mejor la situación y las características del ensayo mecánico:



Figura 9. Imagen de las características del ensayo mecánico.



En el desarrollo del ensayo de flexión se han seguido las pautas establecidas en las normas:

UNE-EN ISO 14556 - *Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado.*

UNE-EN ISO 14556:2001/A1 - *Ensayo de flexión por choque sobre probeta Charpy con entalla en V. Método de ensayo instrumentado.*

La aplicación estricta de estas normas no se ha podido llevar a cabo por las peculiares características que en ella se exigen. Los perfiles con los que contaba eran prestados y no era posible realizarles entalladura en V así como rebasar el límite elástico del material.

La aplicación de la carga total se efectuó para una distancia entre apoyos de 1 metro, en tramos de fin de rampa de aproximadamente 3 kN a una velocidad de aplicación constante de 50 N/s con el objetivo de que el incremento se realizara lo suficientemente despacio para que la estructura fuese capaz de absorber la carga.

En ningún caso se llegó a superar la carga teórica máxima admisible en régimen elástico debido a la obligación de devolver los perfiles a sus dueños en iguales condiciones a las que fueron entregados.

Los perfiles IPN se definen de acuerdo con las siguientes normas:

UNE 36521:1996 - *Productos de Acero. Sección en I con alas inclinadas (antiguo IPN). Medidas.*



UNE-EN 10024:1995 - *Productos de Acero laminado en caliente. Sección en I con alas inclinadas. Tolerancias dimensionales y de forma.*

Las caras exteriores de las alas son perpendiculares al alma y las interiores presentan una inclinación del 14% respecto a aquéllas (I de caras inclinadas), por lo que las alas tienen espesor decreciente hacia los bordes.

Las uniones entre las caras del alma y las caras interiores de las alas son redondeadas. Estas tienen el borde con arista exterior viva e interior redondeada.

Estos perfiles son designados por las letras IPN, seguidas de un número que indica la altura total nominal (h) del perfil, expresada en milímetros. Las medidas, masas, pesos y propiedades geométricas y mecánicas presentadas en las tablas del programa correspondiente al perfil teórico.

Los resultados obtenidos los proporcionaba un programa informático cuya interfaz es la que muestro a continuación:

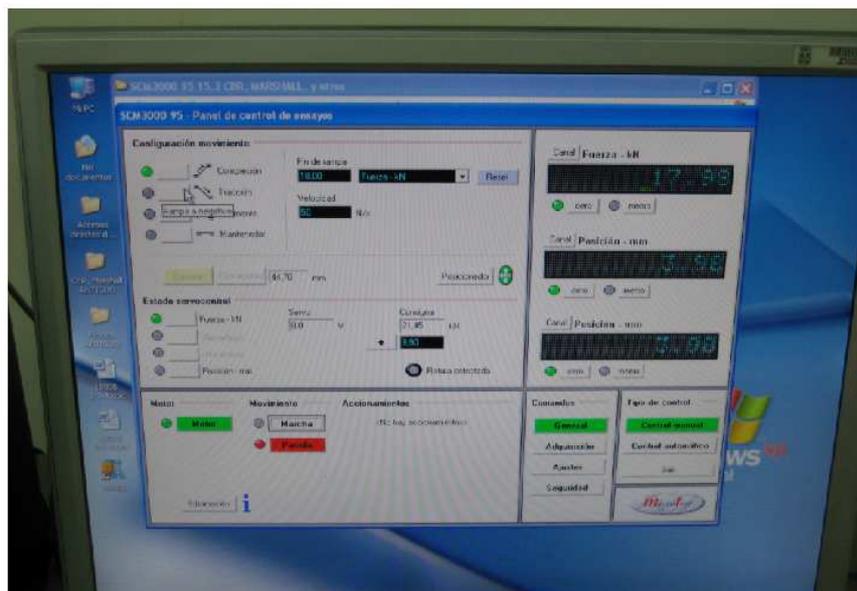


Figura 10. Interfaz del programa del ensayo mecánico de flexión.



4.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Perfil IPN 80

FIN DE RAMPA	CARGA (N)	FLECHA (mm)
1	1000	0,137
2	2000	0,293
3	3000	0,421
4	4000	0,537
5	5000	0,691
6	6000	0,832
7	7000	0,965
8	8000	1,103
9	9000	1,231
10	10000	1,382
11	11000	1,507
12	12000	1,651
13	13000	1,792
14	14000	1,918
15	15000	2,061
16	16000	2,189
17	17000	2,329
18	18000	2,446

Tabla 7. Datos obtenidos en ensayo con perfil IPN 80.

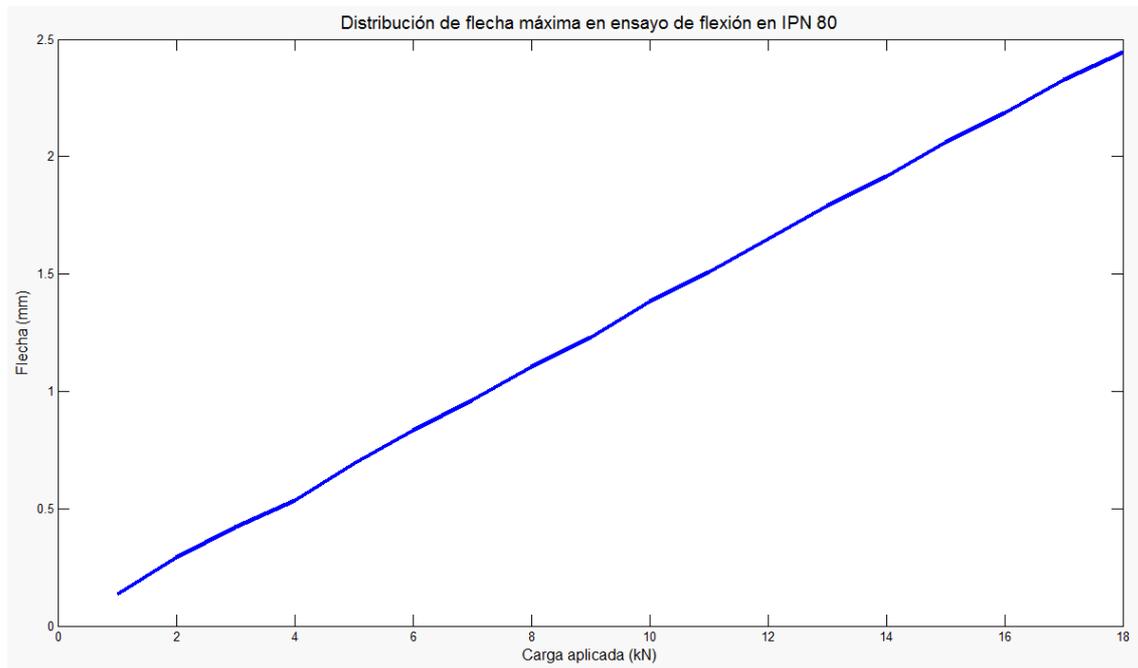


Figura 11. Distribución de flecha máxima en ensayo de flexión en IPN 80

En la *tabla 7* podemos observar que la distribución de flecha en el perfil IPN 80 se produce paulatinamente sin ninguna brusquedad llegando a tener valores próximos a los 2,735 mm máximos en régimen elástico mostrados según la Teoría de la Resistencia de Materiales para un valor de carga de 21,45 kN desarrollada con anterioridad.

Comprobamos también que la deformación sigue una recta de proporcionalidad directa respecto al valor de la carga aplicada según indican las Teorías de Resistencia de Materiales en los gráficos de deformación y tensión para régimen elástico del acero. Por ello, podemos afirmar que el ensayo cumple con las características necesarias en cuanto a validez de material y procedimiento seguido para comparar estos datos extraídos con los de otros métodos de medición como serán la simulación por ordenador y el procesamiento de imagen.

Muestro a continuación la tabla comparativa de los resultados obtenidos teóricamente mediante las Teorías de la Resistencia de Materiales y los medidos



experimentalmente con el fin de comparar ambos métodos de medición de deformaciones y tener una idea de la divergencia que entre ellos se producen:

FIN DE RAMPA	CARGA (N)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA ENSAYO (mm)	ERROR
1	1000	0,128	0,137	7%
2	2000	0,255	0,293	15%
3	3000	0,383	0,421	10%
4	4000	0,510	0,537	5%
5	5000	0,638	0,691	8%
6	6000	0,765	0,832	9%
7	7000	0,893	0,965	8%
8	8000	1,020	1,103	8%
9	9000	1,148	1,231	7%
10	10000	1,275	1,382	8%
11	11000	1,403	1,507	7%
12	12000	1,530	1,651	8%
13	13000	1,658	1,792	8%
14	14000	1,785	1,918	7%
15	15000	1,913	2,061	8%
16	16000	2,040	2,189	7%
17	17000	2,168	2,329	7%
18	18000	2,295	2,446	7%

Tabla 8. Comparación entre resultados teóricos y en ensayo en IPN 80.

Como se puede apreciar en la *tabla 8*, los resultados obtenidos teóricamente y por medio de un ensayo mecánico de flexión son muy similares. Se produce prácticamente una desviación constante entre ambos métodos con un error de un 8%. Esto nos indica que el perfil está hecho de un acero de calidad que cumple estrictamente las normas establecidas y que sería apto para entrar a formar parte de la estructura metálica de una obra. Cabe señalar que estamos aplicando una carga máxima de 18.000 N y obtenemos deformaciones de 2,5 mm, para hacernos una idea de las pequeñas dimensiones en las que nos estamos moviendo.



Perfil IPN 100

FIN DE RAMPA	CARGA (N)	FLECHA (mm)
1	1000	0,092
2	5000	0,69
3	9000	1,19
4	13000	1,67
5	17000	2,172
6	21000	2,684
7	25000	3,26
8	29000	3,756
9	33000	4,328
10	37000	5,021

Tabla 9. Datos obtenidos en ensayo con perfil IPN 100.

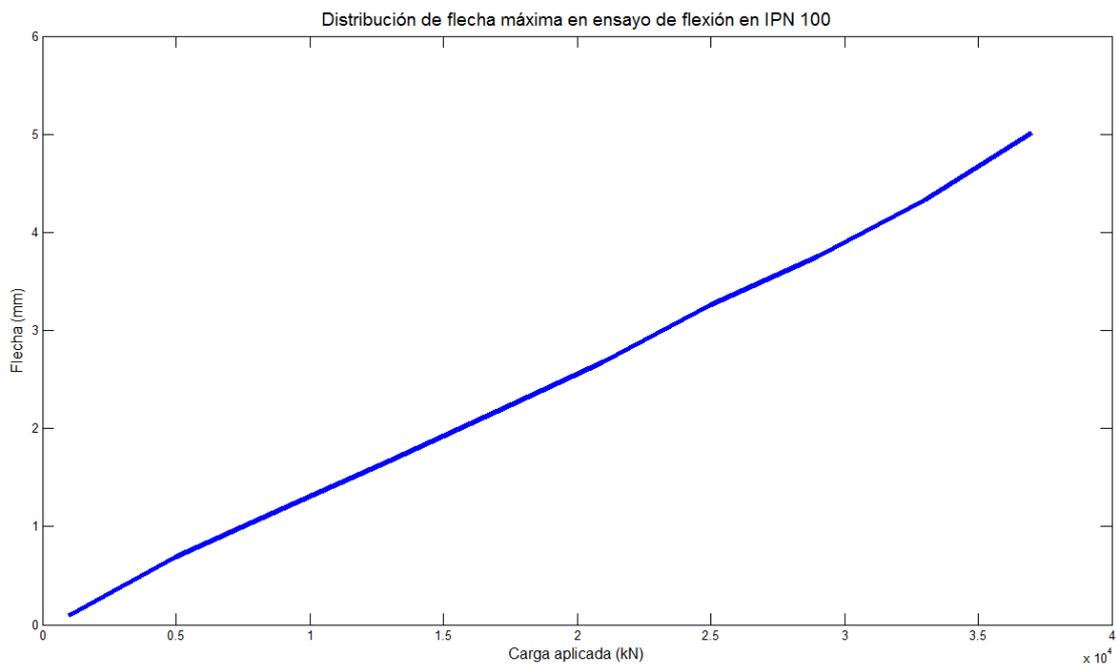


Figura 12. Distribución de flecha máxima en ensayo de flexión en IPN 100.

Podemos observar que los resultados no son compatibles con la teoría mostrada a lo largo del presente Trabajo Fin de Carrera. La flecha máxima admisible en régimen elástico para un perfil IPN 100 con una distribución de carga como la estudiada en el presente es de un valor de 2.182 mm, mientras que como muestra la *tabla 9* el ensayo mostró una flecha a la carga de 37000 N de 5 mm. Esta deformación es mucho mayor a la permitida y por tanto deberíamos estar en régimen plástico pero esto no sería posible con una carga de semejantes características. Este hecho fue comprobado experimentalmente ya que al dejar de aplicar la presión de carga, el perfil IPN 100 volvió a recuperar totalmente su forma lo que nos indica que estábamos trabajando dentro de los límites del régimen elástico. En el desarrollo del ensayo mecánico de flexión y ante tal incompatibilidad observamos detenidamente la posición de la estructura de la máquina y cómo estaba dispuesto el perfil y nos dimos cuenta de que se había producido una oscilación de los apoyos y que el perfil estaba trabajando a torsión. A continuación mostramos una secuencia de fotografías tomadas en el desarrollo del ensayo que evidencian estos hechos:



Figura 13. Efecto de torsión y oscilación de los apoyos en el perfil IPN 100.



Las desavenencias en las que incurren los datos extraídos en este segundo ensayo se deben a que como se pudo apreciar en el momento del ensayo, el perfil IPN 100 se deformó notablemente debido a imperfecciones en su geometría (todos son perfil de recortes) y comenzó a trabajar a torsión. Este motivo produjo una oscilación de los apoyos y por tanto hace que los datos extraídos no sean útiles para ser comparados con los demás datos extraídos mediante otros métodos. Muestro a continuación la tabla comparativa de los resultados obtenidos teóricamente mediante las Teorías de la Resistencia de Materiales y los medidos experimentalmente con el fin de comparar ambos métodos de medición de deformaciones y tener una idea de la divergencia que entre ellos se producen para un ensayo que incurre en este tipo de complicaciones:

FIN DE RAMPA	CARGA (N)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA ENSAYO (mm)	ERROR
1	1000	0,058	0,092	59%
2	5000	0,290	0,690	138%
3	9000	0,522	1,190	128%
4	13000	0,754	1,670	121%
5	17000	0,986	2,172	120%
6	21000	1,218	2,684	120%
7	25000	1,450	3,260	125%
8	29000	1,682	3,756	123%
9	33000	1,915	4,328	126%

Tabla 10. Comparación entre resultados teóricos y en ensayo en IPN 100.

Como podemos apreciar en la tabla 10, los resultados obtenidos mediante ambos métodos no tienen ninguna similitud. Estamos hablando de desviaciones más que significativas al hallarnos con errores por encima del 100%. Este tipo de errores no tienen posibilidad de justificación más que una incorrección en la ejecución y desarrollo del ensayo, como es la mala colocación del perfil en el plano de acción del elemento encargado de proporcionar la presión de carga, sumada a una geometría imperfecta del perfil por ser este un perfil de desecho. Por todo ello, los datos extraídos de este ensayo



no son aptos para ser tratados en las comparaciones con datos extraídos mediante otros métodos.

Perfil IPN 120

FIN DE RAMPA	CARGA (N)	FLECHA (mm)
1	1000	0,025
2	3000	0,071
3	5000	0,16
4	10000	0,357
5	15000	0,498
6	20000	0,651
7	25000	1,862
8	30000	2,215
9	35000	2,72
10	40000	3,169
11	45000	3,63
12	50000	4,071
13	55000	4,561

Tabla 11. Datos obtenidos en ensayo con perfil IPN 120.

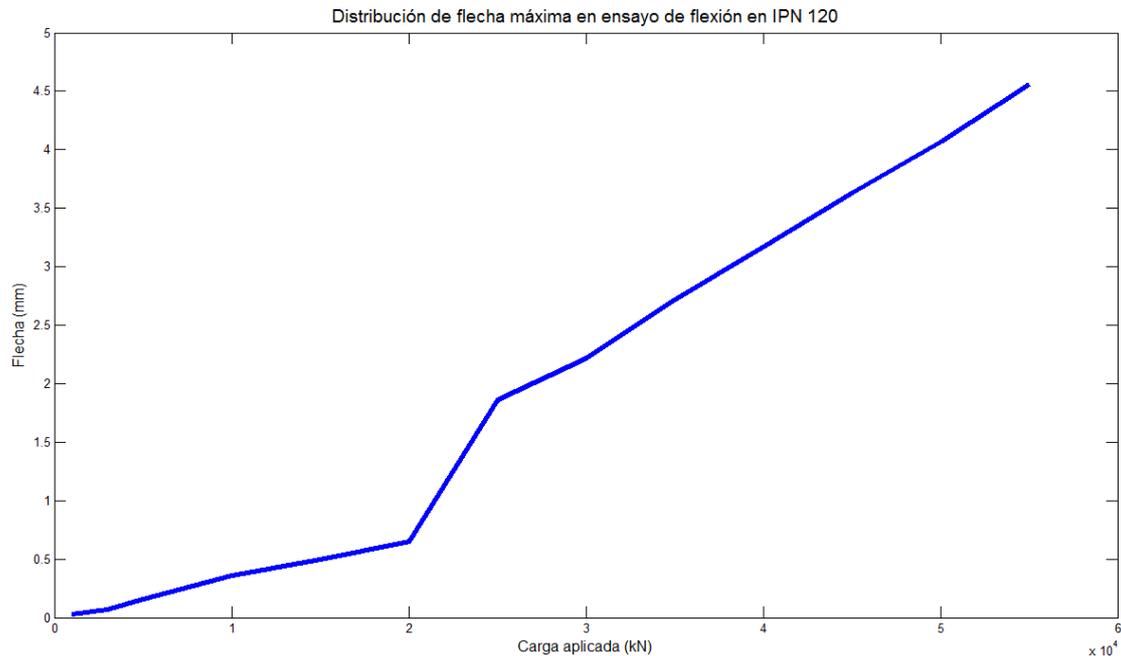


Figura 14. Distribución de flecha máxima en ensayo de flexión en IPN 120.

Podemos observar que los resultados obtenidos en este ensayo tampoco son totalmente coherentes con la teoría mostrada en el presente Trabajo Fin de Carrera. Las primeras tomas del ensayo son correctas en cuanto a la deformación y eso indica que el ensayo en principio estaba desarrollándose correctamente. El problema se presenta en el séptimo fin de rampa cuando de repente, la deformación medida pasa a ser de 1,2 mm aproximadamente. En el momento del ensayo mecánico de flexión y teniendo ya la experiencia anterior del IPN 100, se había creído corregir el error de colocación del perfil en el plano de acción del elemento que proporciona la presión de carga y en el punto del ensayo en que se produjo el exagerado aumento de la deformación para un incremento de carga establecido no se apreció oscilación de los apoyos así como que el perfil IPN 120 estuviera trabajando a momento torsor. Debido a este desconocimiento de la causa que producía esa deformación exagerada y de que no había tiempo para repetir el ensayo, se procedió a continuar a pesar de ser conscientes de las incongruencias. Una vez en el despacho y viendo la secuencia completa de las

fotografías tomadas en este ensayo, se encontró la causa del error. En la secuencia se puede observar cómo en el séptimo fin de rampa se produce una progresiva oscilación del apoyo izquierdo y a ello se debe el salto en la deformación de este ensayo. A continuación muestro dos fotografías, la de fin de primera rampa y la última, con el fin de mostrar esta oscilación del apoyo izquierdo que no siendo tan evidente como el del IPN 100, pues la experiencia ya nos hizo corregir ese error, si que es apreciable.



Figura 15. Efecto de oscilación de apoyos en el perfil IPN 120.

Por los motivos anteriormente expuestos y ante la imposibilidad de volver a realizar ninguno de los ensayos por motivos ajenos a mi voluntad, me veo obligado a tomar en cuenta solamente los datos extraídos de este ensayo hasta el tercer fin de rampa y por ello decido desechar por completo tanto el ensayo de flexión del perfil IPN 100 como el del IPN 120.

Muestro a continuación la tabla comparativa de los resultados obtenidos teóricamente mediante las Teorías de la Resistencia de Materiales y los medidos



experimentalmente en el ensayo mecánico de flexión para el perfil IPN 120 con el fin de comparar ambos métodos de medición de deformaciones y tener una idea de la desviación que produce una pequeña oscilación de un apoyo cuando hemos tenido en cuenta la colocación del perfil IPN 120 en el plano de acción del elemento que proporcionaba la presión de carga:

FIN DE RAMPA	CARGA (N)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA ENSAYO (mm)	ERROR
1	1000	0,030	0,025	17%
2	3000	0,091	0,071	22%
3	5000	0,151	0,160	6%
4	10000	0,302	0,357	18%
5	15000	0,454	0,498	10%
6	20000	0,605	0,651	8%
7	25000	0,756	1,862	146%
8	30000	0,907	2,215	144%
9	35000	1,059	2,720	157%
10	40000	1,210	3,169	162%
11	45000	1,361	3,630	167%
12	50000	1,512	4,071	169%
13	55000	1,664	4,561	174%

Tabla 12. Comparación entre resultados teóricos y en ensayo en IPN 120.

Como se puede observar en la *tabla 12*, aunque hasta el séptimo fin de rampa el ensayo se estaba desarrollando correctamente en apariencia, no obtenemos la desviación constante del 8% del IPN 80 sino que se producen fluctuaciones controladas pero amplias en los primeros fines de rampa y ello nos indica que aunque los valores aparentes tomados en el laboratorio podían perfectamente ser válidos, en realidad se estaba produciendo pequeños ajustes en el asentamiento del apoyo izquierdo desde el primer momento de aplicación de la presión de carga. El resultado que nos da la voz de alarma es el séptimo fin de rampa en el que debido a este constante asentamiento del



perfil izquierdo se produce un incremento más significativo que no es sino que el apoyo había llegado a un punto de inestabilidad y para volver a ser estable la única solución era oscilar ligeramente. Por ello, a partir del séptimo fin de rampa en adelante, obtenemos errores muy exagerados y que no tienen otra justificación que la mencionada pues la geometría y el material del perfil estaban en muy buenas condiciones (el perfil IPN 120 era el de mejores características en este aspecto de los tres ensayados).

Como conclusión a la observación de estos datos extraigo que a la hora de realizar un ensayo con fines de extraer de él de datos de comparación, deben estar muy bien definidas todas las características de todos los elementos que entre a jugar un papel dentro del desarrollo del mismo. Ya que una pequeña imperfección en el desarrollo del ensayo produce graves márgenes de error en los datos extraídos y complica su tratamiento llegando incluso a tener que desecharlos.



4.3 CÁLCULO DE SIMULACIÓN. ELEMENTOS FINITOS

4.3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería comúnmente empleado hoy en día para la resolución de problemas que involucran un alto grado de complejidad. El método de elementos finitos tiene un importante ámbito de aplicación en disciplinas relacionadas con las matemáticas aplicadas y cálculos estructurales y térmicos, ya que la mayoría de los problemas que se presentan en estas áreas involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales. Motivo por el cual no siempre es posible obtener una solución analítica directamente de expresiones matemáticas. Entre las áreas de la matemática aplicada y la ingeniería en las que el uso del método de elementos finitos es aplicado para la solución de problemas cabe destacar: el análisis de estructuras, problemas de transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masa y cálculo de potencial electromagnético.

La obtención de una solución analítica en estos campos, generalmente requiere la solución de complejas ecuaciones diferenciales ya sean parciales y ordinarias, las cuales, debido a que se analizan geometrías complejas, determinación de propiedades de materiales o como en el caso a tratar cargas no distribuidas, no son posibles de resolver.

Sin embargo la formulación que se propone por medio del uso del método de elementos finitos, permite que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de requerir la resolución de ecuaciones diferenciales complejas, pero, dado que el problema tiene que ser “discretizado”, este método numérico, al igual que todos los métodos numéricos, arrojan valores aproximados de las incógnitas en un número finito de localizaciones dentro del cuerpo. Condición que en el



caso de análisis estructural resolveremos por medio de un mallado de una dimensión específica para cada problema a resolver.

Discretización es el proceso de modelación de un cuerpo que consiste en la división equivalente del mismo, en un sistema conformado por cuerpos más pequeños (elementos finitos) interconectados por medio de puntos comunes o nodos, los cuales forman superficies y se comportan como volúmenes de control independientes, los que a su vez son afectados por las condiciones de frontera que afecten al cuerpo estudiado como un todo. Durante la aplicación del método de elementos finitos, en lugar de intentar resolver el problema como un todo en una sola operación, se divide el cuerpo del problema en un número finito de elementos, los cuales a su vez se resuelven simultáneamente y se obtiene el resultado de un todo conformado por cada resultado arrojado por los elementos finitos.

4.3.2 DESARROLLO DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

En general, para el análisis de un problema estructural de esfuerzos, el ingeniero analista busca la determinación de esfuerzos y desplazamientos en la estructura estudiada, la cual se encuentra en equilibrio ya que es sometida a cargas determinadas. Para la gran mayoría de los análisis estructurales es difícil determinar la distribución de deformaciones usando métodos convencionales por lo que el método de elementos finitos se hace necesario.

Existen dos métodos generales de hacer frente a la aplicación del método de elementos finitos:



- **Fuerza o flexibilidad:** el cual se basa en el uso de fuerzas internas como las incógnitas del problema. Para la obtención de las ecuaciones gobernantes tienen que emplearse primero las ecuaciones de equilibrio. Después es necesario introducir ecuaciones adicionales generadas por las ecuaciones de compatibilidad. El resultado es el arreglo de ecuaciones algebraicas redundantes que determinan las fuerzas internas desconocidas.
- **Desplazamiento ó rigidez:** el cual asume el desplazamiento de nodos como las incógnitas del problema. Por requerimiento de este método se necesita que los elementos estudiados se interconecten por nodos comunes entre si a lo largo de un eje común o una superficie común, de tal manera, que aún después de que la deformación se presente, los nodos permanezcan conectados al nodo común. Las ecuaciones gobernantes son expresadas en términos de desplazamientos nodales usando las ecuaciones de equilibrio en cada nodo, de tal forma, que se pueda aplicar la ley que relaciona la fuerza con los desplazamientos.

El método de elementos finitos involucra la modelación de una estructura empleando pequeños elementos interconectados llamados elementos finitos. Una función de desplazamiento es asociada a cada elemento. Cada elemento interconectado está ligado entre si, directa o indirectamente a través de interfaces comunes como lo pueden ser: nodos, superficies comunes o bordes.

Al implementar incógnitas de propiedades de materiales en donde se estudie el esfuerzo/deformación, se puede determinar el comportamiento de un nodo determinado en términos de las propiedades de cualquier otro elemento en la estructura.

La compatibilidad total entre las ecuaciones describe el comportamiento de cada nodo en una serie de ecuaciones algebraicas, las cuales se expresan en notación matricial para su mejor procesamiento. El criterio establecido por el módulo de simulación de CATIA V5, GAS (Generative Structural Analysis), es el criterio de la energía de máxima distorsión.



4.3.3 TEORÍA DE LA ENERGÍA DE DISTORSIÓN

Propuesta por Richard Edler Von Mises al observar que los materiales bajo esfuerzos hidrostáticos soportan esfuerzos mucho mayores que sus esfuerzos de fluencia bajo otros estados de carga.

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. Un material dúctil puede definirse como aquel cuya resistencia al deslizamiento es menor que su resistencia a la separación. En este tipo de materiales la falla ocurre por fluencia.

La teoría establece:

“La falla se producirá cuando la energía de distorsión por unidad de volumen debida a los esfuerzos máximos absolutos en el punto crítico sea igual o mayor a la energía de distorsión por unidad de volumen de una probeta en el ensayo de tensión en el momento de producirse la fluencia.” [HILL, R., 1950]

La teoría de Von Mises sostiene que la distorsión del elemento es debida a los esfuerzos principales restándoles los esfuerzos hidrostáticos $\left(\sigma_k = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}\right)$. La energía de distorsión es la diferencia entre la energía total de deformación por unidad de volumen y la energía de deformación por unidad de volumen debida a los esfuerzos hidrostáticos.

Como el material se encuentra en el rango elástico (ya que la falla se produce al llegar a la zona plástica), la energía total de deformación por unidad de volumen para el elemento es:



$$U = \frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1 + \frac{1}{2}\sigma_2\varepsilon_2 + \frac{1}{2}\sigma_3\varepsilon_3 \quad (18)$$

La tensión de Von Mises es un escalar proporcional a la energía de deformación elástica de distorsión que puede expresarse en función de las componentes del tensor tensión, en particular admite una expresión simple en función de las tensiones principales, por lo que la tensión de Von Mises puede calcularse a partir de la expresión de la energía de deformación distorsiva. Las deformaciones son:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Reemplazando las deformaciones de la ecuación (19) en la ecuación de la energía total de deformación (18), resulta la energía total de deformación debida a los esfuerzos hidrostáticos que es:

$$U = \frac{1}{2E} \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \right] \quad (20)$$

La energía de distorsión es entonces:

$$U_d = U - U_k \quad (21.a)$$

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3) \quad (21.b)$$

En el ensayo de tensión al producirse la fluencia, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ y $\sigma_1 = S_y$ y entonces la energía de distorsión en la probeta es:



$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (22)$$

Igualando las ecuaciones (21.b) y (22) como se enuncia en la teoría, tenemos:

$$S_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (23)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (23.a)$$

Se define el esfuerzo de Von Misses como:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (24)$$

Entonces, la falla se produce cuando:

$$\sigma' = S_y \quad (25)$$

En el caso bidimensional, $\sigma_2 = 0$ y el esfuerzo de Von Misses es:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3} \quad (26)$$

Igualmente la superficie de fluencia de un material que falla de acuerdo con la teoría de fallo elástico de Von Mises puede escribirse como el lugar geométrico de los



puntos donde la tensión de Von Mises como función de las tensiones principales supera cierto valor. Matemáticamente esta ecuación puede expresarse aún como el conjunto de puntos donde el invariante cuadrático de la parte desviadora del tensor tensión supera cierto valor.

La siguiente figura muestra para el caso bidimensional, en el plano $(\sigma_1 - \sigma_3)$ los pares de valores de dichas tensiones, que encerrados por una elipse, no provocan falla alguna conforme la teoría de falla de la máxima energía de distorsión.

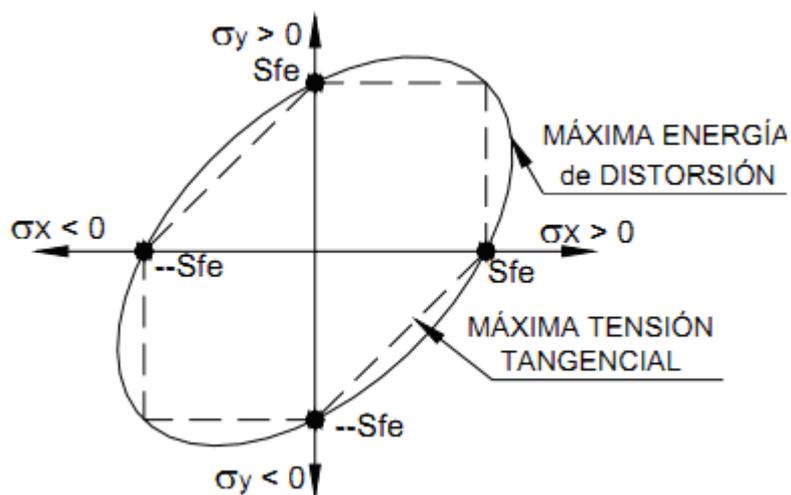


Figura 16. Representación teoría de la máxima distorsión.

Del análisis de las “zonas de admisibilidad” correspondientes a las teorías de falla de la máxima tensión tangencial y de la máxima energía de distorsión, la primera restringe con respecto a la segunda, los pares posibles de tensiones normales.

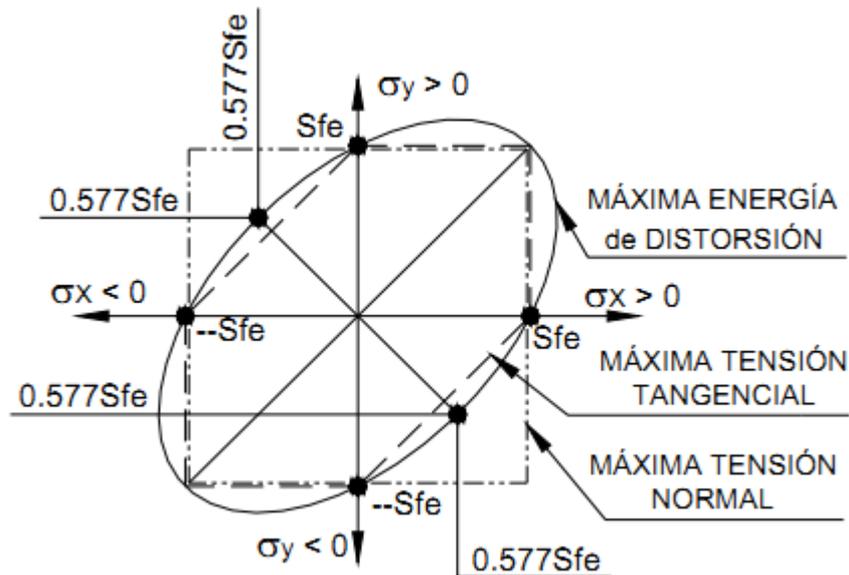


Figura 17. Representación teorías de fallo.

La falla se presentará cuando el punto determinado por los esfuerzos ($\sigma_1 - \sigma_3$) se encuentra fuera del área delimitada por la línea continua y la línea a trazos en la *figura 17*. La línea más gruesa representa las locaciones donde se presentará la falla de acuerdo con Von Mises, las líneas interiores representan las locaciones de falla de acuerdo con Tresca.

En la *figura 16* puede observarse que la teoría de Von Mises tiene un mayor área en la cual no se presentará falla que la teoría de Tresca, por eso la teoría del esfuerzo cortante máximo es la teoría escogida para hacer cálculos conservadores de falla de un material y tener mayor certeza de que no se producirá falla.



4.3.4 ANALISIS Y SIMULACIÓN MEDIANTE CATIA

En el presente apartado me propongo explicar detalladamente el proceso seguido para llegar a poder realizar la simulación bajo el módulo GAS (Generative Structural Analysis), para el que previamente necesito componer y definir mi perfil en el módulo Part Design. Los pasos generales a seguir son los siguientes:

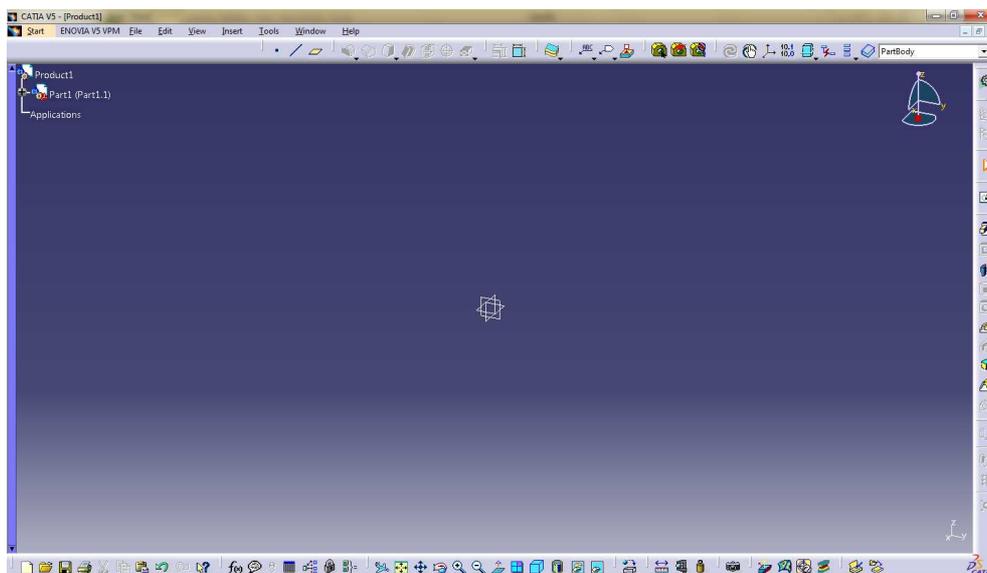
1. **Part Design.**

- 1.1 Dibujo la geometría de la sección imponiendo restricciones.
- 1.2 Extruyo la sección para lograr un perfil en 3D.
- 1.3 Aplico el material correspondiente.

2. **Analysis & Simulation. Generative Structural Analysis.**

- 2.1 Discretizo el perfil mediante un mallado.
- 2.2 Establezco los apoyos con sus restricciones.
- 2.3 Aplico las cargas de simulación.
- 2.4 Efectúo la simulación

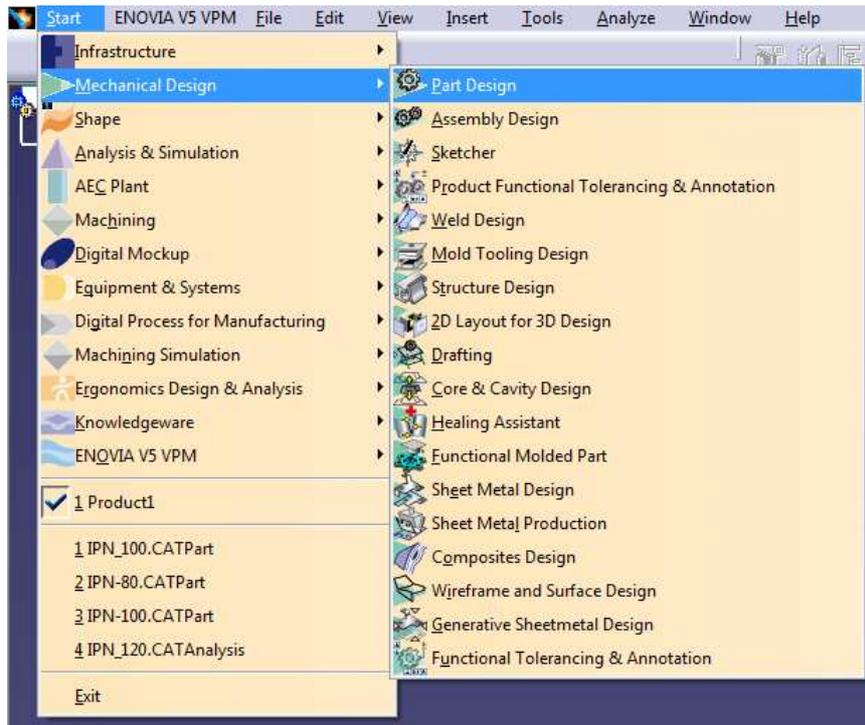
En primer lugar, iniciamos CATIA V5 y nos aparecerá la siguiente pantalla de trabajo:





Comenzamos el proceso de definición de nuestra geometría y para ello iniciamos el módulo Part Design, para ello la ruta a realizar es:

Start → Mechanical Design → Part Design

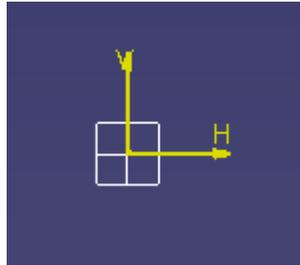


Nos aparecerá en el centro de la zona de trabajo la representación de los tres planos coordenados y debemos seleccionar sobre el plano que deseamos trabajar. En mi caso he seleccionado el plano ZX.





Teniendo el plano de trabajo seleccionado nos dirigimos a la barra lateral derecha y hacemos clic sobre el icono SKETCH . Ahora en el centro del área de trabajo nos aparece la siguiente representación:

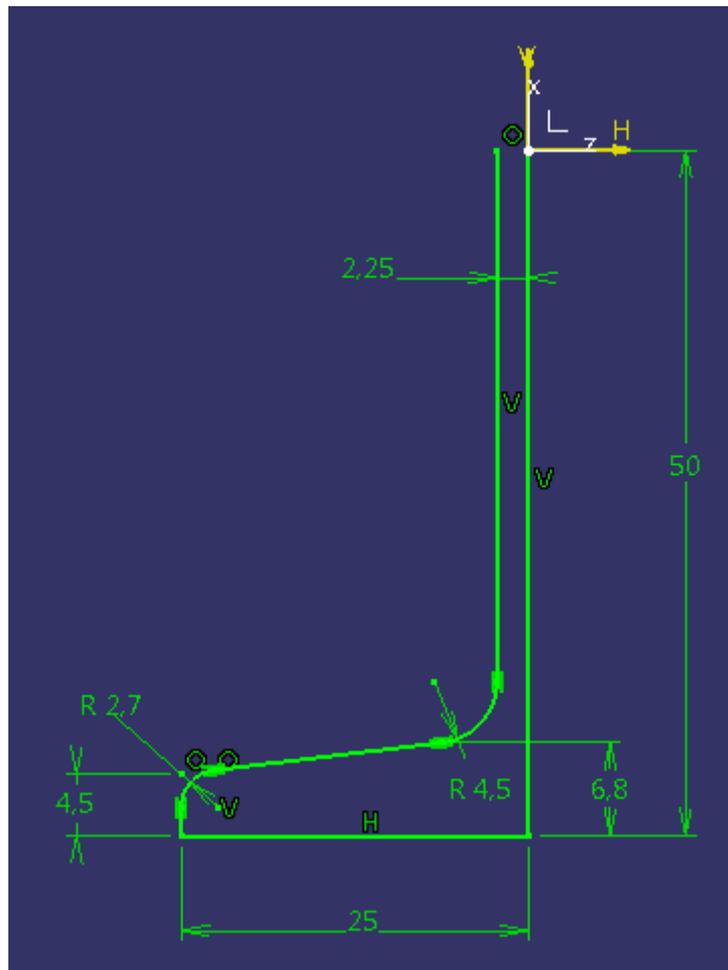


Esto nos indica que estamos trabajando sobre el plano seleccionado previamente y hace referencia, además, a las direcciones que considera positivas para los ejes coordenados.

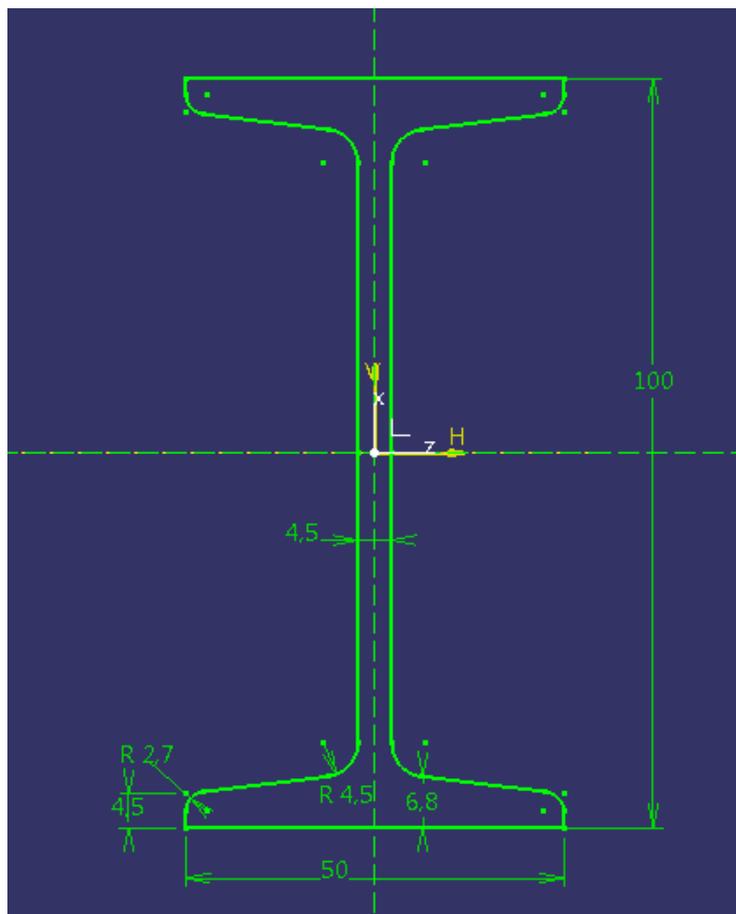
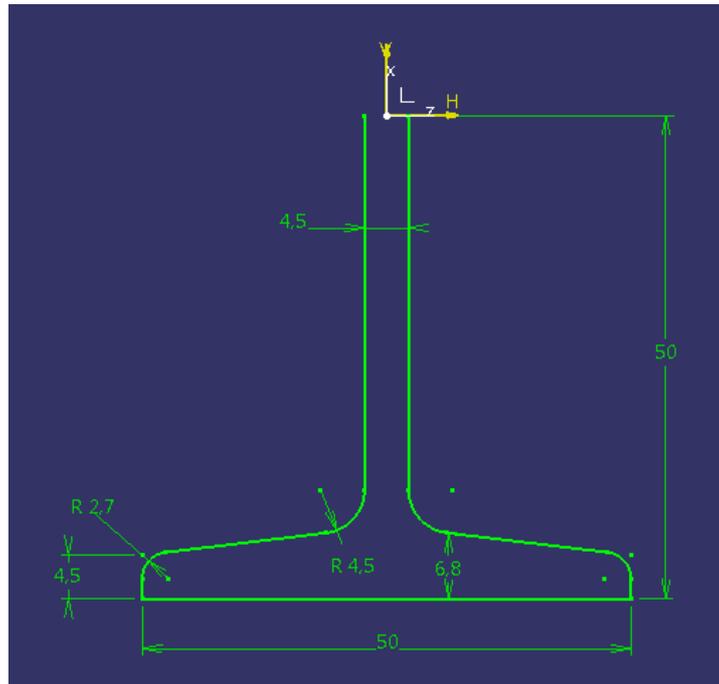
Se trata en este momento de dibujar la geometría de la pieza a desarrollar introduciendo restricciones geométricas y de cota hasta conseguir la geometría deseada mediante los iconos de la barra de herramientas que encontramos a nuestra derecha, que tiene las mismas funciones que cualquier otro programa de CAD:



Cuando partes de la geometría de la pieza se tornan de color verde, indica que esa parte de la geometría está totalmente restringida y no se va a modificar su geometría bajo ningún concepto. Se trata pues de lograr la geometría deseada totalmente restringida, es decir, consiguiendo que esté toda ella en color verde.



En mi caso particular, puesto que la sección del perfil es simétrica respecto a los dos ejes principales, dibujaré solamente un cuarto de perfil y después lograré la sección completa mediante un doble Mirror , uno respecto al eje vertical y otro respecto al eje horizontal.

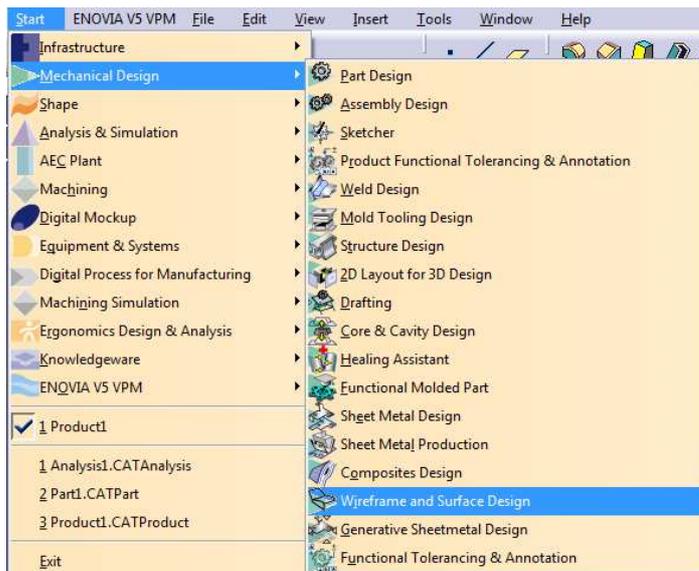
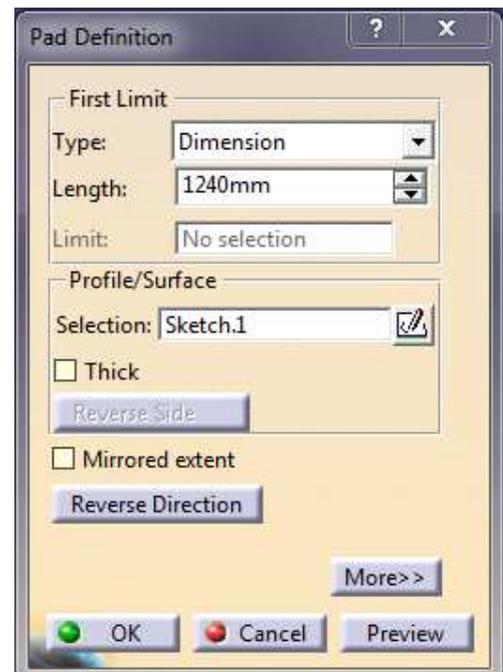




Una vez obtenida la geometría deseada completamente restringida, salimos del área de trabajo del sketch mediante la barra de herramientas situada a la derecha haciendo clic en el icono EXIT WORKBENCH



Sin abandonar el módulo Part Design hacemos clic en el icono PAD de la barra de herramientas con el fin de extruir nuestra sección y lograr así un perfil en tres dimensiones. Al hacer clic en el icono PAD se nos abre una ventana la cual nos pide las dimensiones de nuestra pieza. Se las introducimos teniendo en cuenta el criterio de ejes y pulsamos OK.



Vamos ahora a crear tres superficies independientes que posteriormente asociaremos un mallado más pequeño para una mayor precisión de discretización con el fin de contener en el interior de ellas nodos y tetraedros suficientes para poder establecer la presión de carga y las restricciones de los apoyos.



Una de estas superficies es para la aplicación de la presión de carga ya que en el ensayo mecánico a flexión la carga no se aplica sobre la superficie total de la cara superior sino que se ejerce en una pequeña región delimitada por el contacto entre el rodillo circular del elemento que aplica la presión de carga y la superficie superior plana del perfil. CATIA no nos permite aplicar la carga en una parte de una superficie sino que sólo nos acepta realizarla en la superficie completa. Por ello debemos crear una superficie independiente. La simplificación que vamos a realizar de este sistema a efectos prácticos es la delimitación de una superficie rectangular mediante un sketch cuyas dimensiones serán el ancho total de la cara superior del perfil y un espesor mínimo pero que permita que en su interior se contengan suficientes tetraedros y nodos completos para la valoración de la misma, este espesor tiene el valor de 1mm.

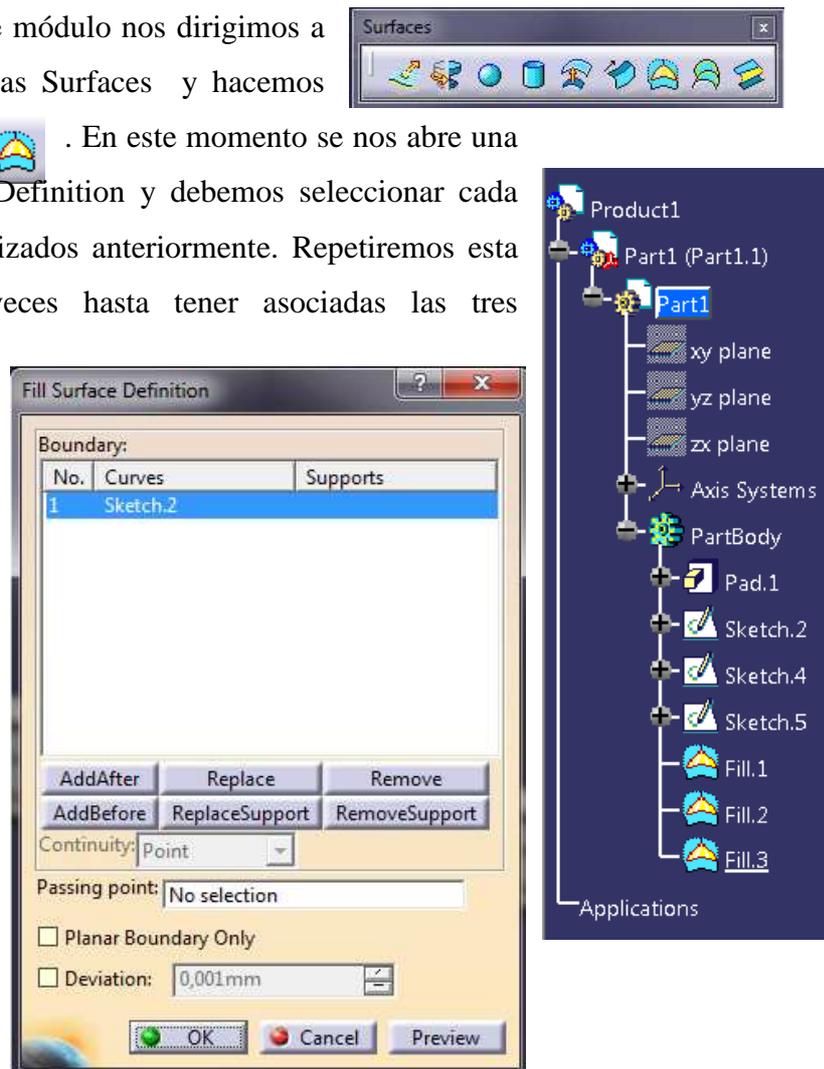
La simplificación de las superficies independiente para la aplicación de los apoyos se realiza por los mismos motivos ya que CATIA en una misma superficie (cara inferior del perfil) no nos permite establecer regiones parciales para establecer dos tipos de apoyo. Para ello tenemos que crear dos superficies independientes mediante sketches con las características geométricas anteriormente comentadas. La distancia del apoyo derecho al final derecho del perfil es de 122 mm, la del apoyo izquierdo al final izquierdo del perfil es 193 mm y la distancia entre apoyos es de 1.000 mm, haciendo un total de 1.315 mm de longitud del perfil IPN 80.



Una vez creadas estas tres superficies, nos dirigimos al menú principal y realizamos la siguiente acción:

Start → Wireframe and Surface Design

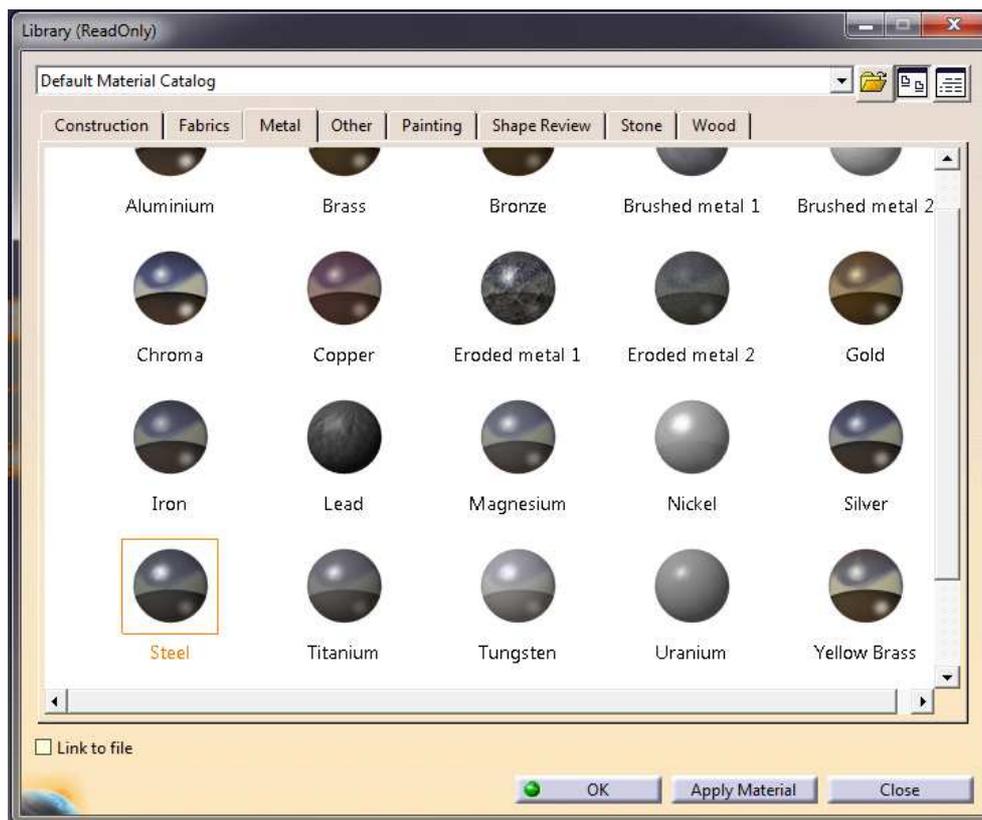
Una vez en este módulo nos dirigimos a la barra de herramientas Surfaces y hacemos clic en el icono FILL . En este momento se nos abre una ventana: Fill Surface Definition y debemos seleccionar cada uno de los sketch realizados anteriormente. Repetiremos esta misma acción tres veces hasta tener asociadas las tres superficies. El árbol de operaciones debería ser semejante al mostrado a la derecha.



El siguiente paso es aplicar el material del que está compuesto nuestro perfil. En mi caso particular es Acero S275. Para ello y teniendo seleccionado la rama PartBody del árbol que se genera a nuestra izquierda, mediante el icono APPLY MATERIAL



de la barra de herramientas situada en la parte inferior podemos realizar esta operación. Al hacer clic sobre este icono se nos abre una ventana de elección de material. Es una librería organizada por tipos de material en pestañas: construcción, sintéticos, metales, pinturas, piedra y madera. Nos dirigimos al grupo adecuado y elegimos el material genérico pues luego vamos a poder cambiar las cualidades que se obtienen por defecto.





Si deseamos cambiar las propiedades que se nos imponen por defecto sólo hay que hacer doble clic sobre el tipo de material elegido y se nos abre una ventana donde podemos modificar estas propiedades. Las características del acero de mis perfiles son:

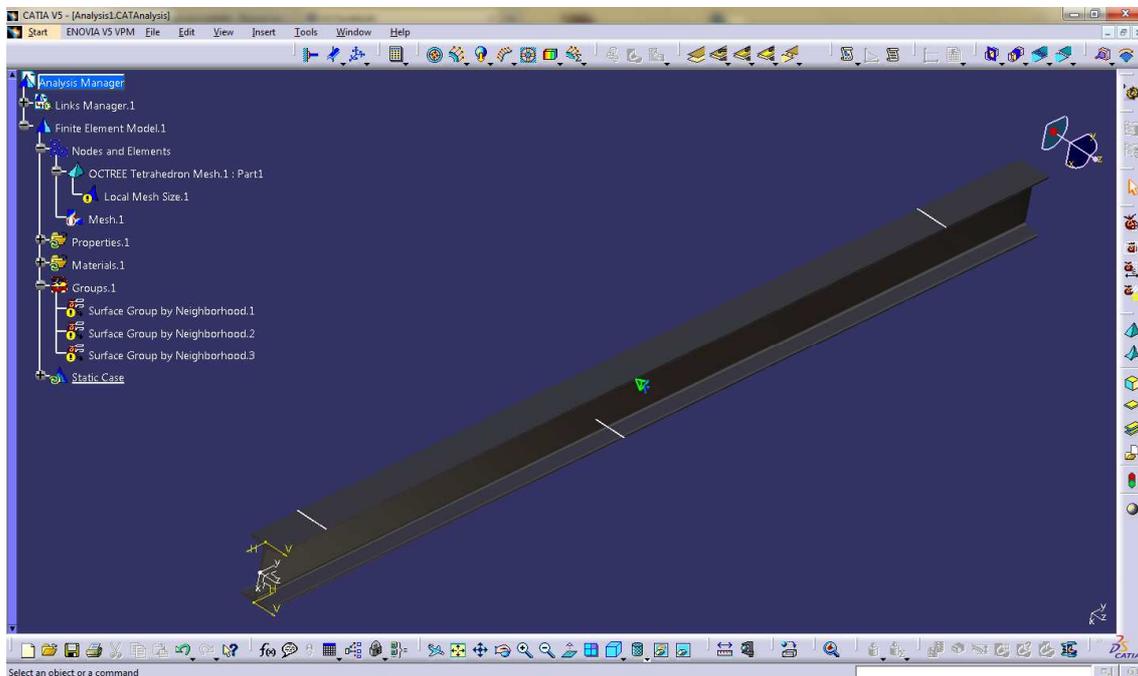
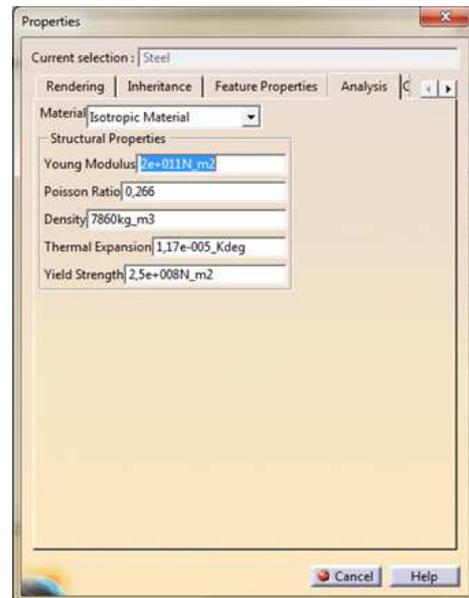
Módulo de Young (E): $2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

Densidad: 7860 kg/m^3

Módulo de Rigidez(G): 81.000 N/mm^2

Coefficiente de Poisson (ν): 0,3

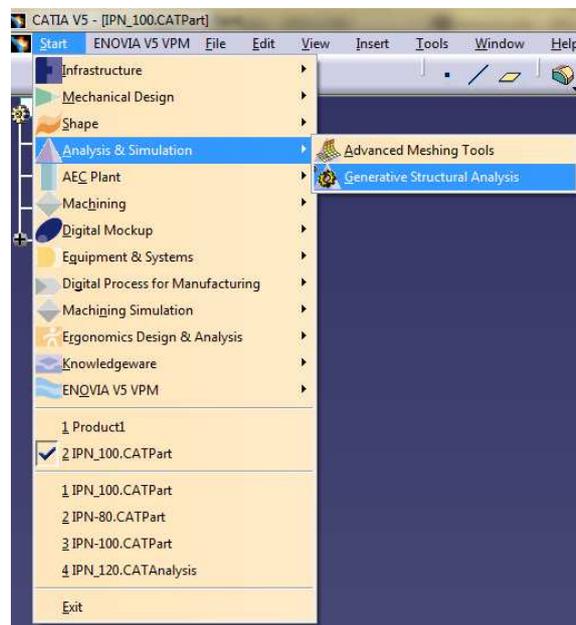
Una vez modificados los valores hacemos clic en OK.





Ya tengo el perfil con el material definido y todos los sketches creados para aplicar la carga de presión y las restricciones de los apoyos. Por tanto ahora me dirijo al módulo de Análisis y Simulación. Para ello la ruta es la siguiente:

Start → Analysis & Simulation → Generative Structural Analysis



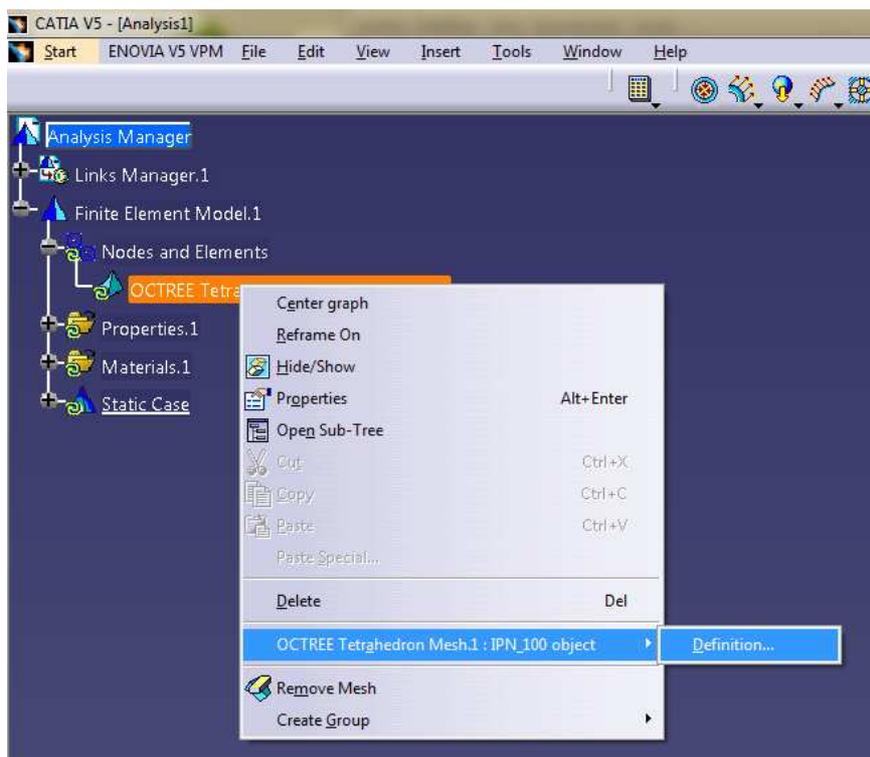
Al iniciar el módulo de Simulación (GSA) nos aparece una ventana que nos pide el tipo de análisis que vamos a realizar. En nuestro caso se trata de un análisis estático. Seleccione Static Analysis y hago clic en OK.



Al iniciar este módulo de análisis nos aparece un árbol distinto al del módulo Part Design. El siguiente paso es discretizar el perfil (método de elementos finitos), esto lo conseguimos mediante el mallado del perfil. Para este módulo, CATIA V5, ya nos

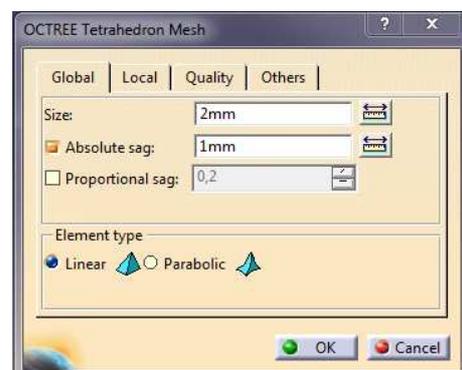


impone un tipo de malla por defecto. Vamos a modificar las características de esa malla y a asociarla a nuestro perfil. Para ello desplegamos el árbol de la izquierda en su rama Nodes and Elements. Nos aparece una rama que se llama: OCTREE Tetrahedron Mesh. Hacemos clic con el botón derecho del ratón sobre ella y seleccionamos OCTREE Tetrahedron Mesh → Definition.



Nos aparece la siguiente ventana para que determinemos las características de los tetraedros del mallado. En mi caso haré malla formada por tetraedros lineales:

Size: tamaño global del tetraedro que tendrá un valor de 9 mm. Este dato ha sido extraído del análisis de SolidWorks tras una serie de pruebas



ensayo/error con la condición de obtener el punto óptimo entre precisión en los resultados obtenidos y el requerimiento de recursos técnicos requeridos al PC.

Absolute sag: tolerancia del lado del tetraedro. Tendrá un valor de 0.45 mm.

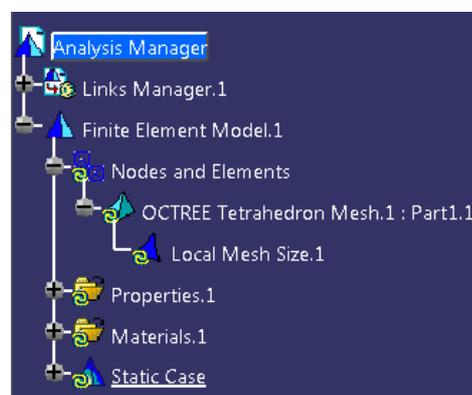


En este momento tenemos que realizar una malla específica para esas superficies que hemos creado con el fin de aplicar la presión ejercida y de situar los apoyos. Para ello nos dirigimos a la barra de Model Manager y hacemos clic sobre el icono LOCAL MESH SIZE .



La realización de este mallado de mayor precisión en las superficies creadas para la aplicación de la carga y las restricciones de los apoyos es debido a que si no realizásemos esta malla específica, los tetraedros (9 mm) serían de un tamaño superior al ancho de estas superficies (1 mm) y se saldrían fuera de los límites de estas y la aplicación de la carga y los apoyos no se realizarían según la simplificación establecida para el contacto entre los rodillos de la máquina de ensayo y las superficies planas de la cara del perfil. Debido a que estas superficies independientes tienen un espesor muy pequeño debemos realizar una discretización acorde a esas características. Al realizarla, conseguimos introducir dentro de las superficies los suficientes nodos y tetraedros para su correcta valoración.

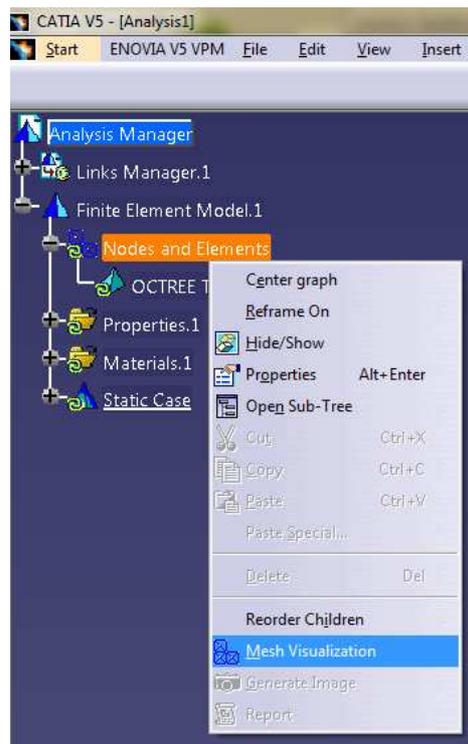
Al hacer clic sobre el icono LOCAL MESH SIZE nos aparece una ventana en la que en el apartado Supports debemos seleccionar la cara superior del perfil. En el apartado Value introducimos 2,54 mm. En el árbol de operaciones se nos crea una rama específica para esta malla local. Desde esa rama y haciendo clic con el botón derecho podremos cambiar las características del mallado.



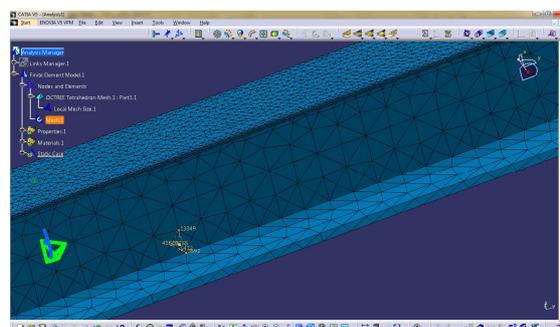


Ahora ya tenemos discretizado el perfil con una malla que se adecua a nuestras necesidades. En principio no nos muestra el mallado realizado. Para ello debemos hacer clic con el botón derecho del ratón sobre la rama del árbol de la izquierda denominada:

Nodes and Elements → Mesh Visualization



A continuación nos sale una ventana que nos dice que la malla tiene que ser actualizada y que esta operación va a llevar un tiempo. Hacemos clic en Aceptar. Y ahora ya se nos muestra la malla.

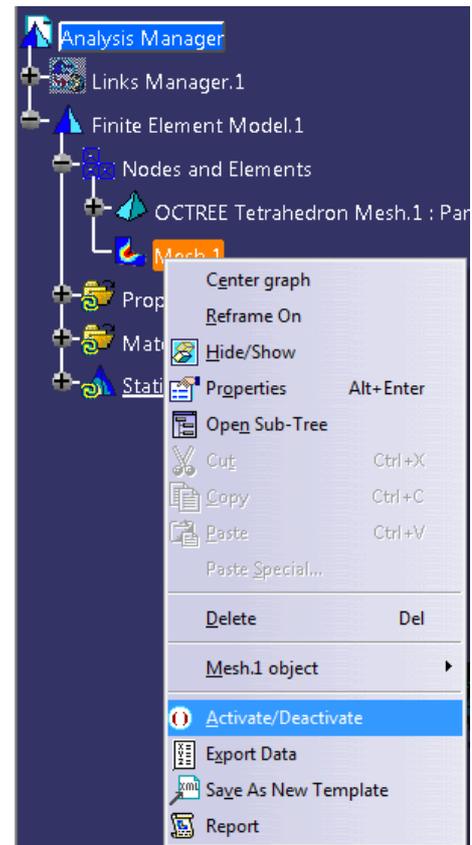




Para poder continuar con el resto de restricciones debemos desactivar la malla. Para ello hacemos clic con el botón derecho en la rama Mesh del árbol de operaciones y seleccionamos Activate/Desactivate.

Esta es una operación muy importante puesto que si no desactivamos la visibilidad de la malla, muchas de las operaciones habituales no están disponibles por no coincidir con los nodos creados a partir de los tetraedros elementares que conforman la malla.

Podemos activarla en cualquier momento siguiendo el proceso inverso. Aunque no se muestre, la malla ya está asociada a nuestra estructura.



Ahora vamos a crear un grupo por cercanía para esos sketch que hemos realizado para aplicar la presión de carga y situar los apoyos. Para realizar la operación nos dirigimos a la barra de herramientas Groups y seleccionamos el icono GROUPS BY NEIGHBORHOOD .

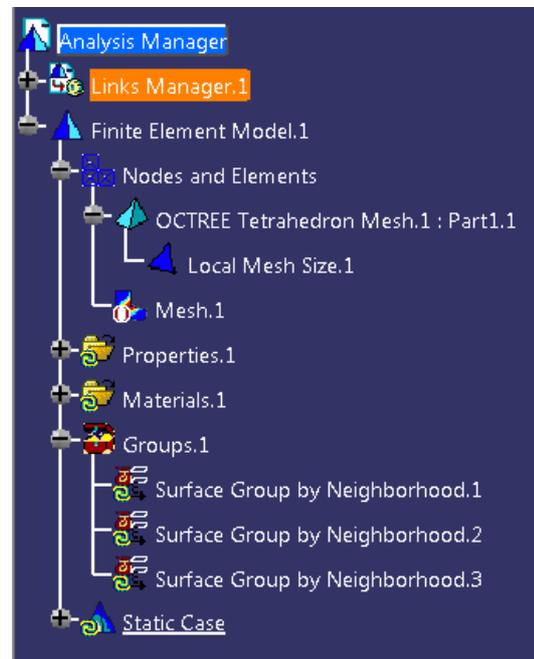


A continuación nos aparecerá una ventana y en su apartado Supports seleccionamos en el árbol de operaciones la superficie creada para aplicar la carga. Realizaremos este proceso dos veces más para los dos apoyos.





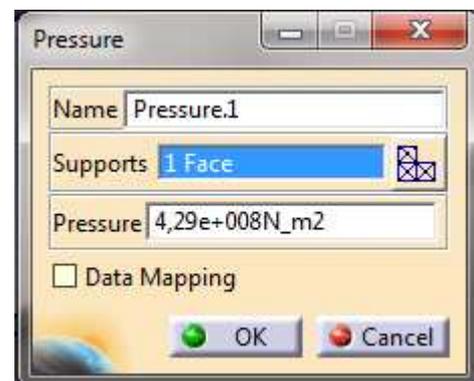
A estas alturas del proceso el árbol de operaciones debería tener la morfología de la figura de la derecha. Es importante haber creado los sketch para aplicar la presión de carga y las restricciones de los apoyos individualmente. Y posteriormente haberlos asociado uno a uno a un grupo de cercanía. Para verificar estas operaciones basta con visualizar el árbol de operaciones y verificar que contiene tres grupos de cercanía, y que cada uno de ellos está asociado a un elemento de los descritos anteriormente.



Es el momento de aplicar la presión. Nos dirigimos a la barra de herramientas Loads y hacemos clic en el icono de PRESSURE



Nos aparecerá la ventana de la derecha. En la cual en el apartado Supports debemos seleccionar el grupo por cercanía creado anteriormente en la cara superior del perfil, y en el apartado Presión la fuerza que queremos ejercer.



Por último aplicamos las restricciones de apoyos. Para ello nos dirigimos a la barra de herramientas Restraints y seleccionamos el icono

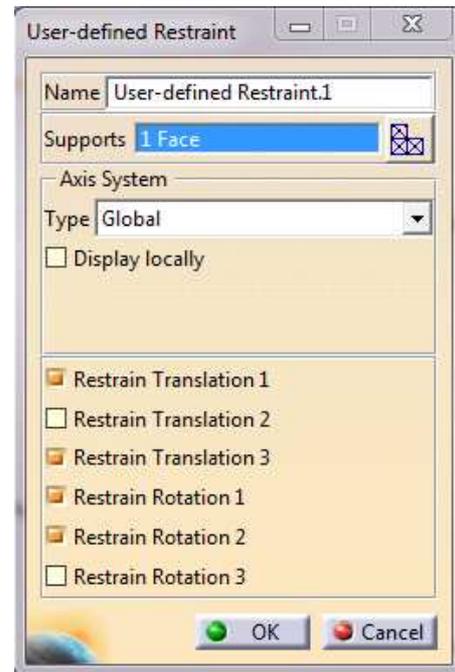




Nos aparecerá una ventana y en el apartado Supports seleccionamos el segundo grupo por cercanía y seleccionamos las restricciones de rotación y desplazamiento que nos interesen. Repetimos este paso para aplicar las restricciones del otro apoyo. Yo tengo un apoyo fijo y otro móvil:

Apoyo fijo: restrinjo las tres translaciones y sólo permito la rotación en el eje perpendicular a la cara frontal.

Apoyo móvil: restrinjo todas las translaciones excepto la del eje longitudinal del perfil y sólo permito la rotación en el eje perpendicular a la cara frontal.



Están definidos todos los parámetros necesarios para realizar nuestra simulación. Sólo nos queda decir a CATIA que la realice. Para ello, hacemos clic en el icono . A continuación nos aparecerá una ventana llamada Compute donde se nos indica si queremos computar todo. Hacemos clic en OK, y una vez finalizado el cálculo, generamos las imágenes que nos interesan (deformaciones, desplazamientos unitarios y tensiones de Von Misses) y extraemos los valores obtenidos.

Imágenes de los resultados obtenidos en la simulación

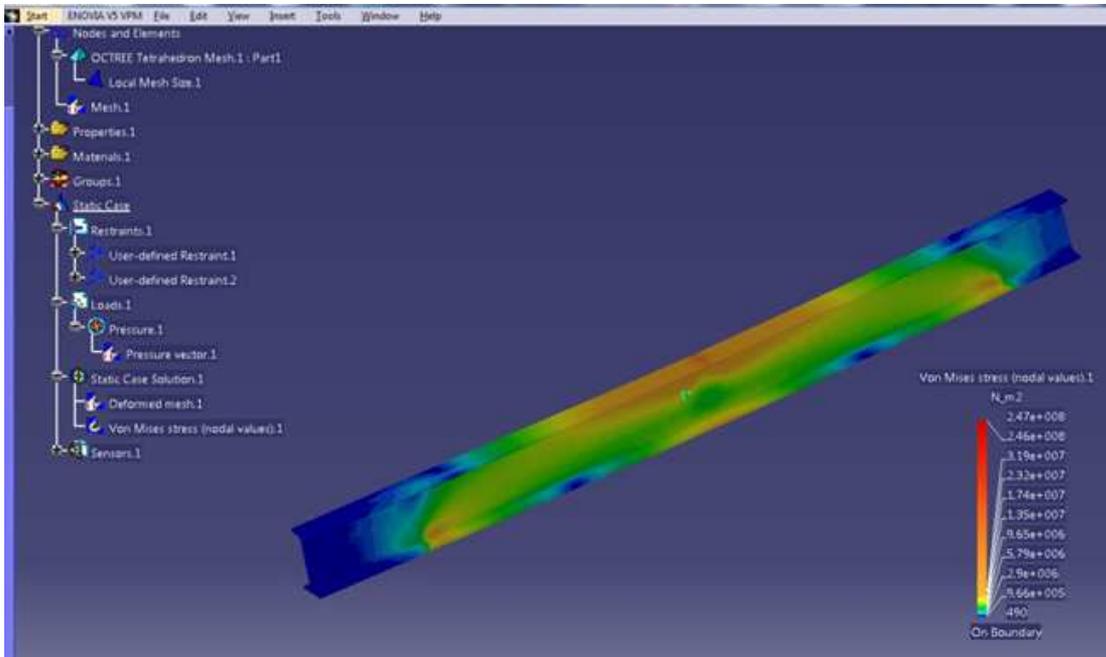


Figura 18. Tensión de Von Mises en perfil IPN 80 a 9.000 N de carga.

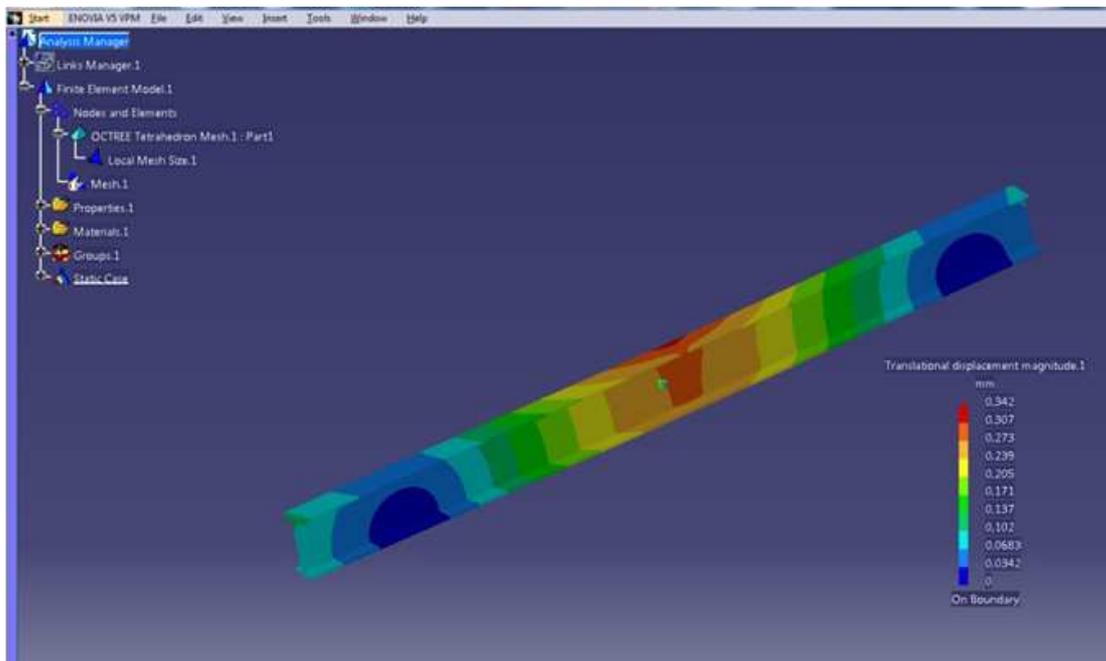


Figura 19. Desplazamientos perfil IPN 80 a 9.000 N de carga mediante CATIA.

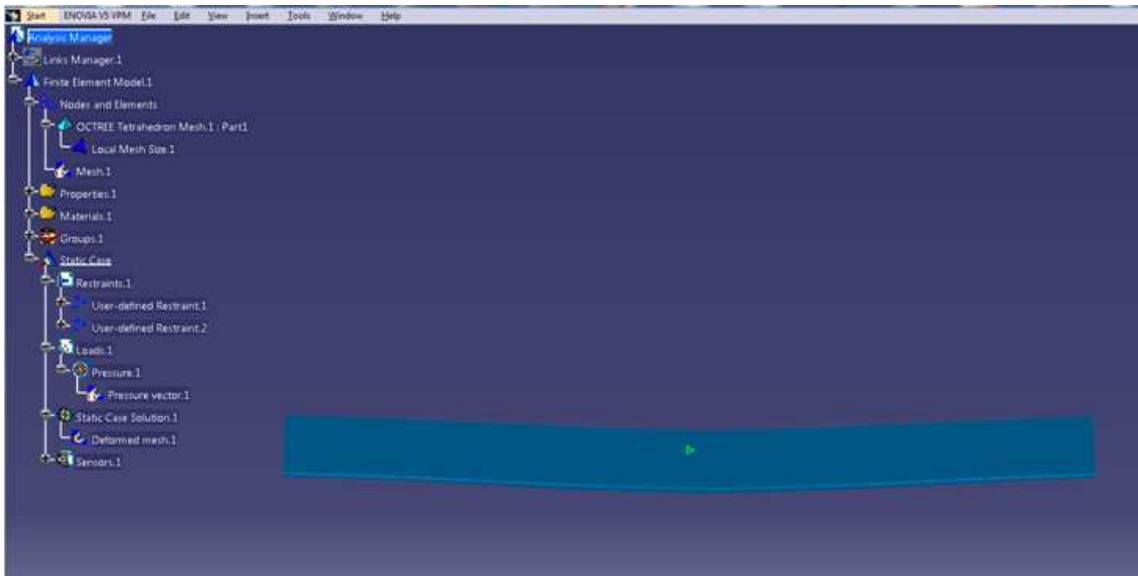


Figura 20. Deformada de perfil IPN 80 a 9.000 N de carga.

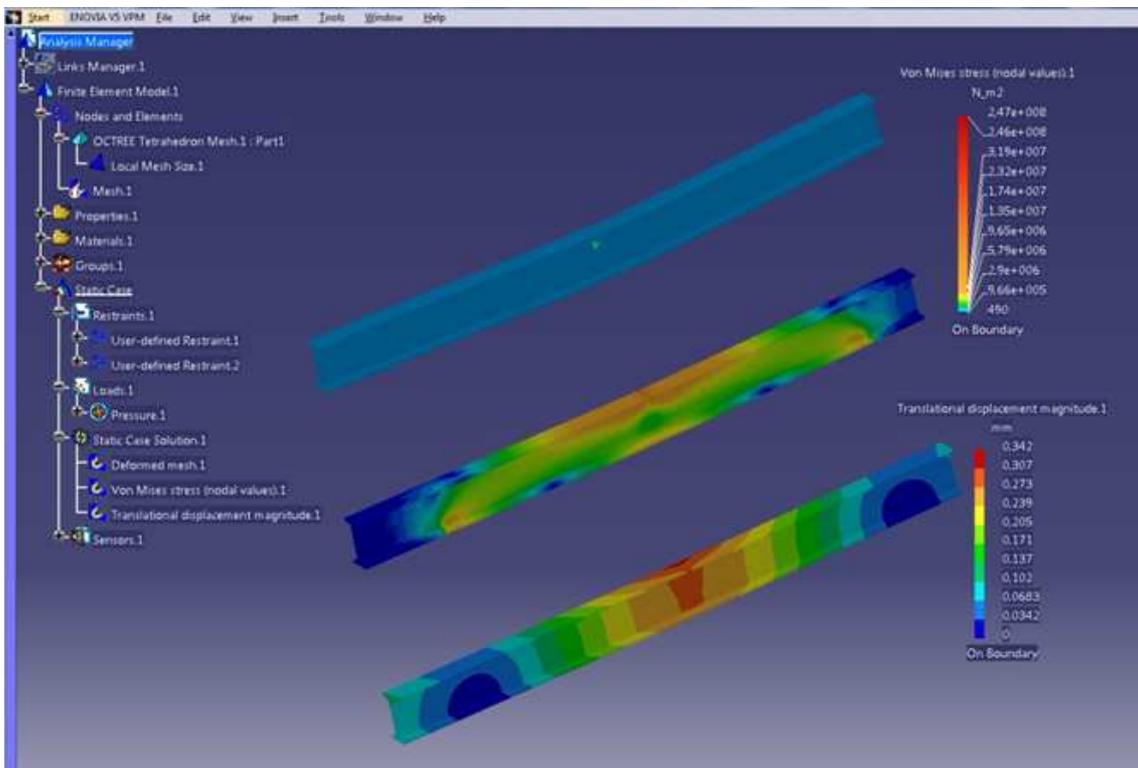


Figura 21. Deformada, tensión de Von Mises y desplazamientos a 9.000 N.

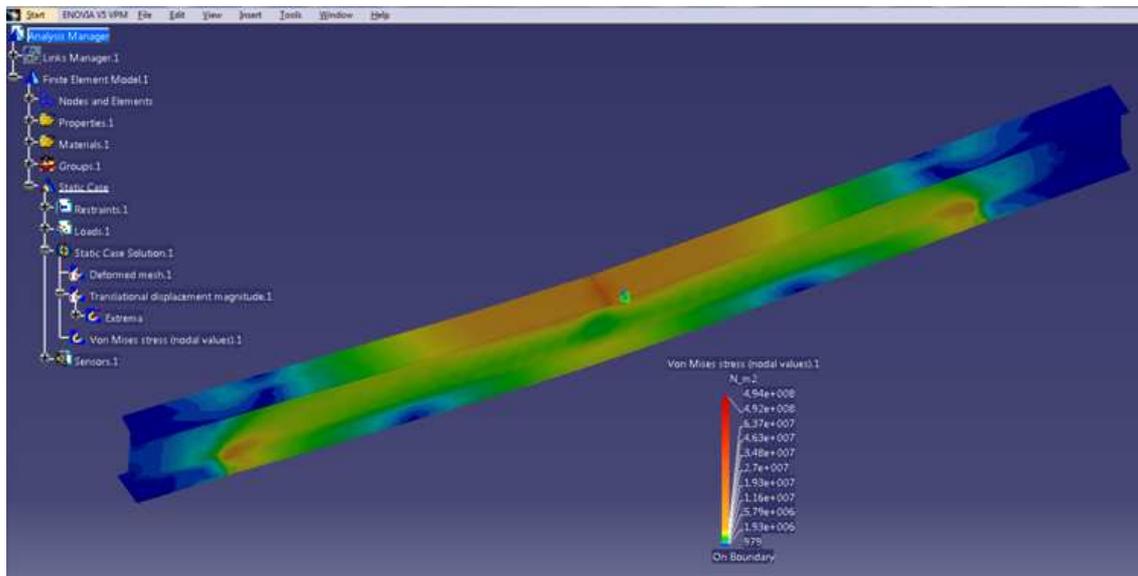


Figura 22. Tensión de Von Mises en perfil IPN 80 a 18.000 N de carga.

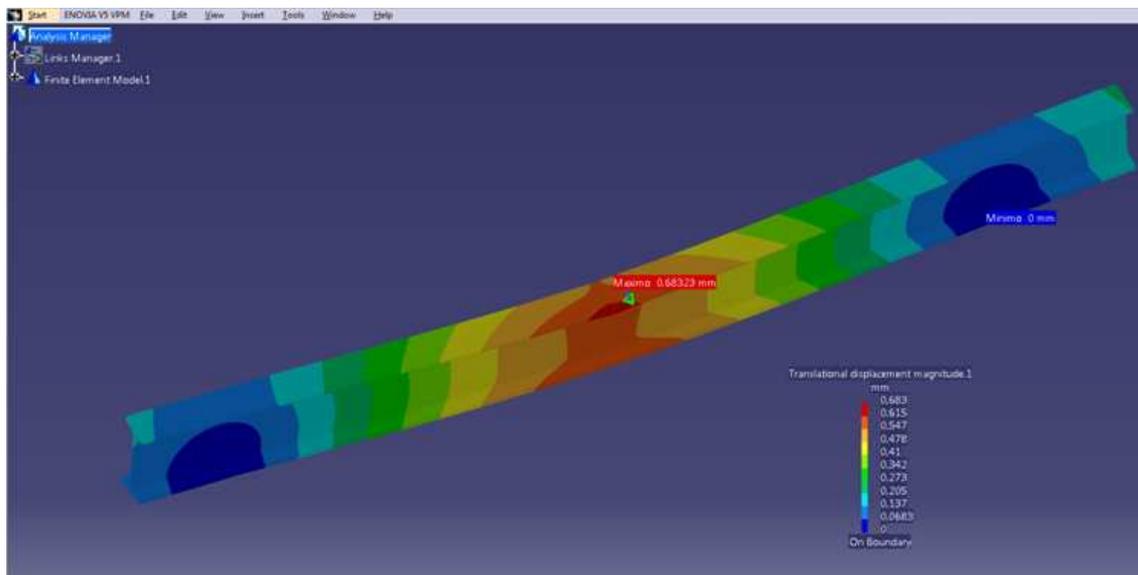


Figura 23. Desplazamientos perfil IPN 80 a 18.000 N de carga en CATIA.

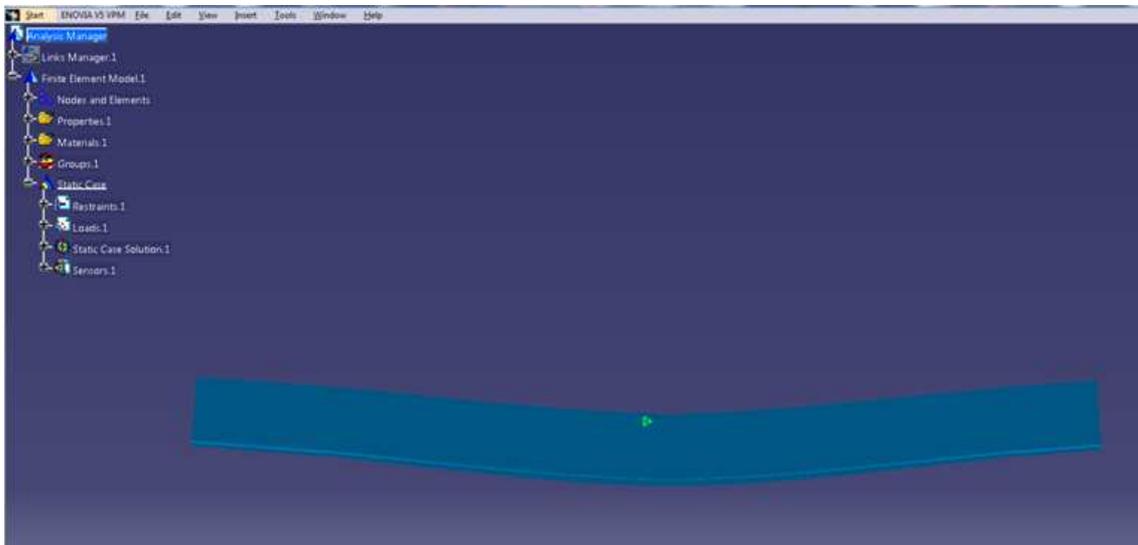


Figura 24. Deformada en perfil IPN 80 a 18.000 N de carga.

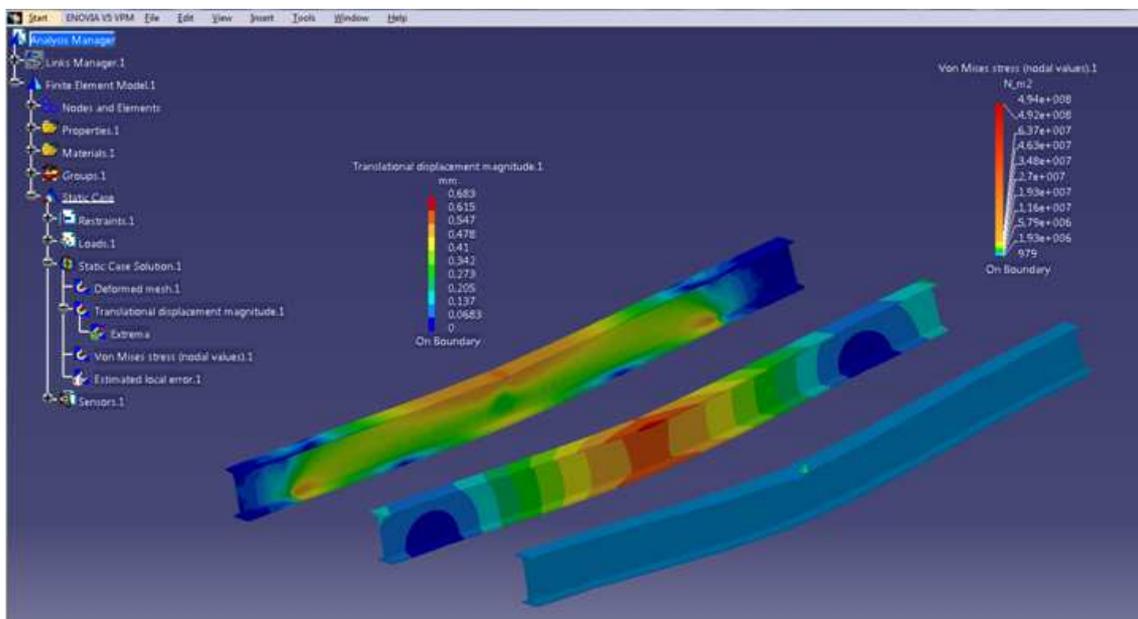


Figura 25. Deformada, tensión de Von Mises y desplazamientos a 18.000 N .



4.3.5 ANÁLISIS Y SIMULACIÓN MEDIANTE SOLIDWORKS

En el presente apartado me propongo explicar detalladamente el proceso seguido para llegar a poder realizar la simulación bajo el software de SOLIDWORKS en el que, una vez diseñada nuestra pieza, el asesor de estudios nos guiará en todo el recorrido hasta obtener el perfil de la deformada, tensiones y desplazamientos unitarios. Los pasos generales a seguir son los siguientes:

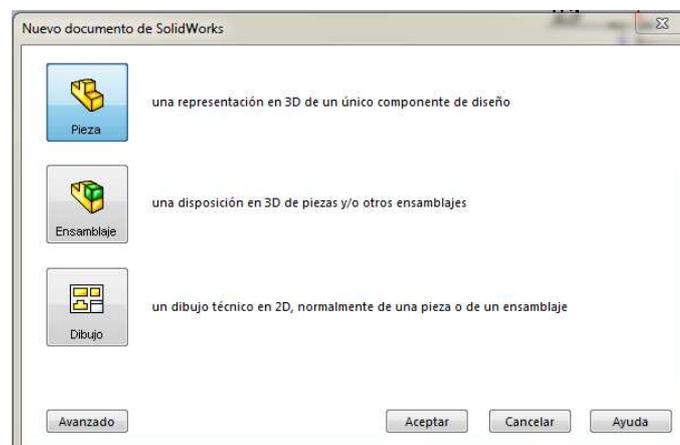
1. Generar la estructura.

- 1.1 Dibujo la geometría de la sección imponiendo restricciones.
- 1.2 Extruyo la sección para lograr un perfil en 3D.
- 1.3 Aplico el material correspondiente.

2. Asesor de estudios.

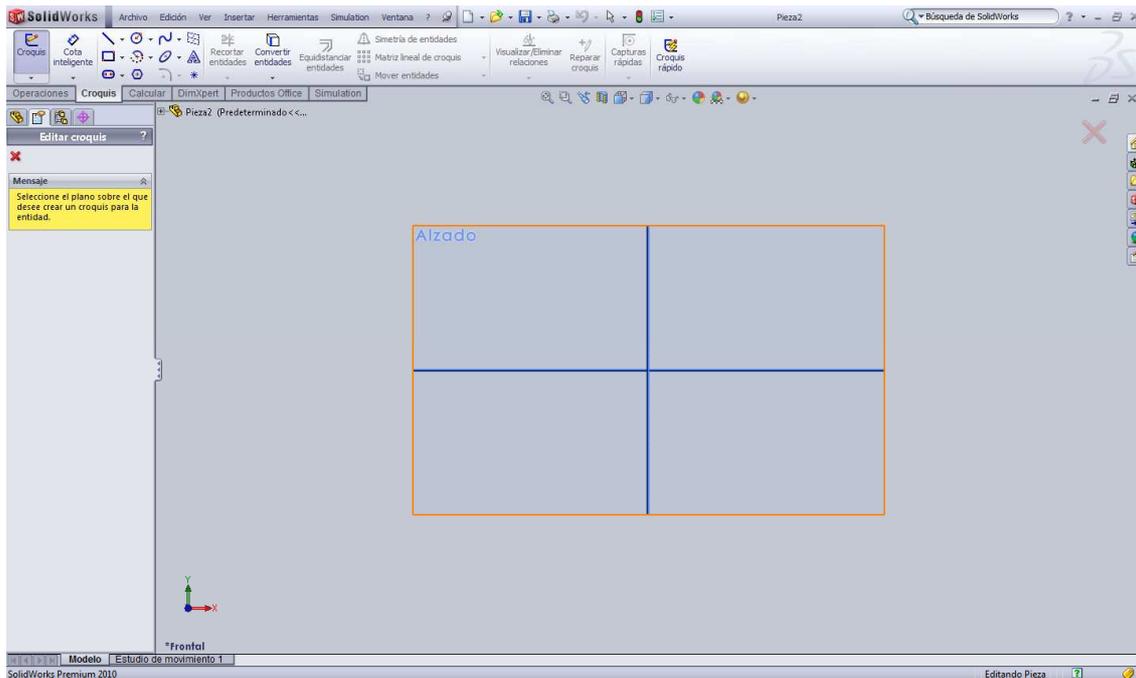
- 2.1 Impongo las restricciones de fuerza aplicada.
- 2.2 Establezco los apoyos con sus restricciones.
- 2.3 Especifico las características del mallado.
- 2.4 Efectúo la simulación.

Para comenzar con el proceso, iniciamos SolidWorks y hacemos clic en Nuevo. Nos aparecerá la siguiente ventana en la que seleccionaremos Pieza:



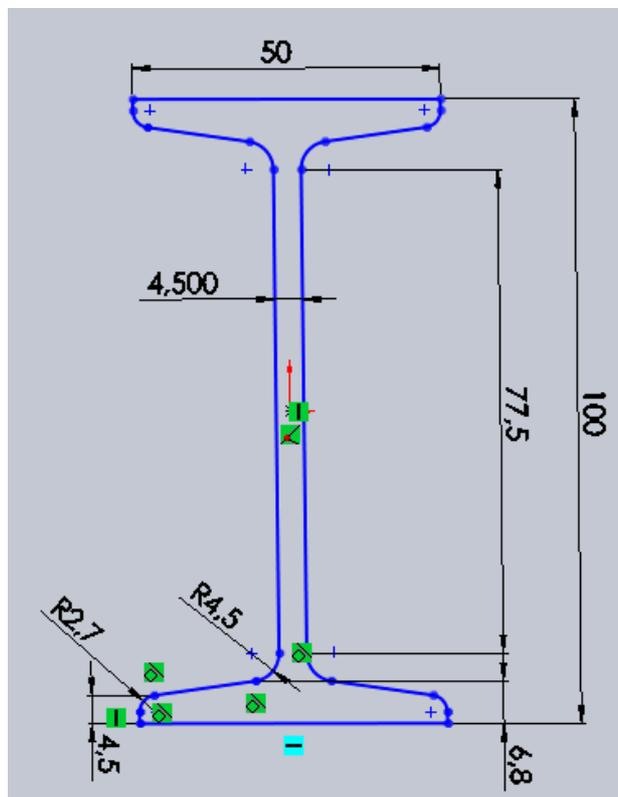
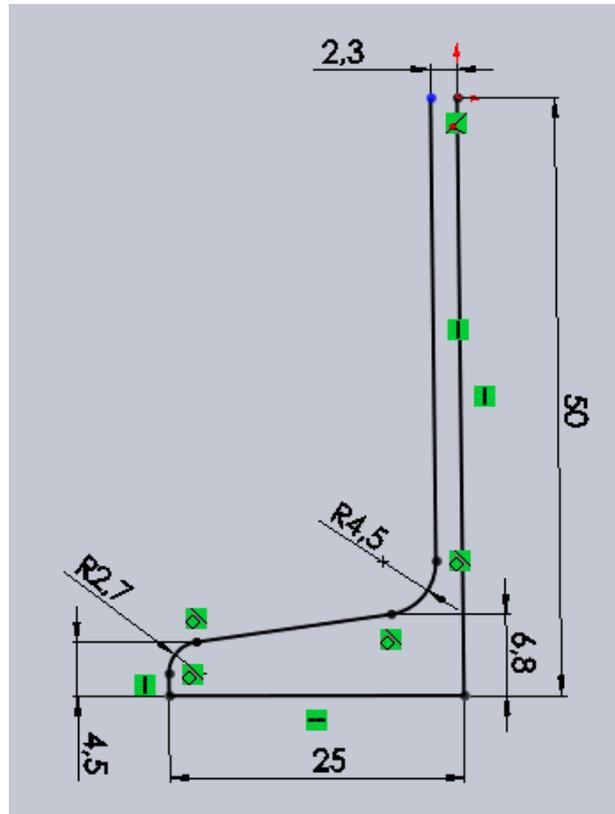


En un principio se nos abre una ventana vacía, debemos hacer clic en la pestaña de Croquis con el fin de dibujar el boceto de nuestra pieza para después poder extruirla. Nos aparecerá la siguiente ventana donde nosotros diseñaremos nuestra pieza mediante las herramientas de línea, arco, cotas...



Se trata en este momento de dibujar la geometría de la pieza a desarrollar introduciendo restricciones geométricas y de cota hasta conseguir la geometría deseada mediante los iconos de la barra de herramientas que encontramos en la pestaña Croquis, que tiene las mismas funciones que cualquier otro programa de CAD.

Fijándonos en la barra de información de abajo, podemos encontrar datos acerca del estado de restricción de nuestro boceto. A diferencia de CATIA, el boceto no se torna de color verde al estar completamente restringido sino que en este dato podemos encontrarnos con dos opciones: Insuficientemente definido/ Completamente restringido. Esto marcará la imposibilidad de que nuestro boceto se vea modificado bajo ninguna condición.





Para dejar el boceto y guardar los cambios realizados debemos hacer clic en el botón Salir del Croquis.



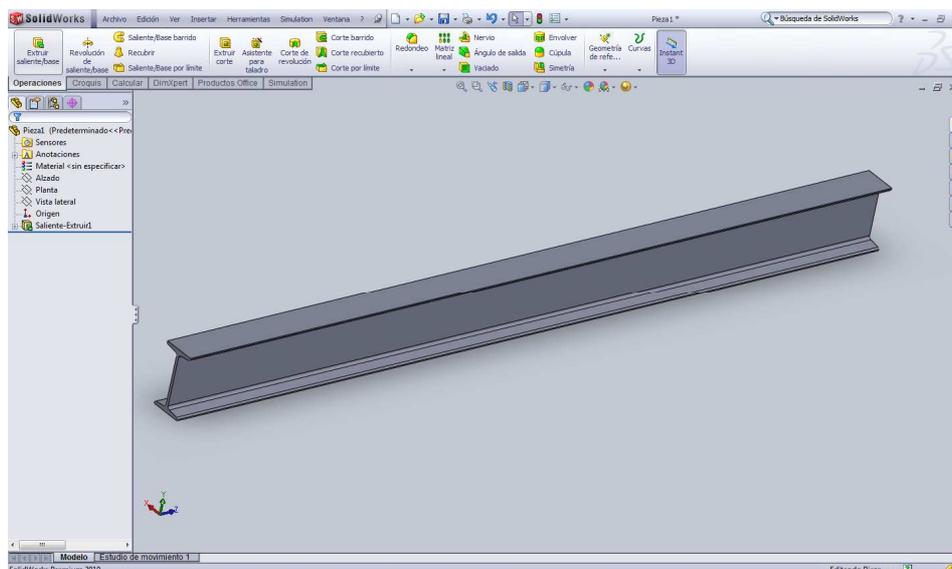
A continuación extruiremos el boceto para lograr una pieza en 3D y así empezar a aplicar restricciones de carga y de apoyos. Este paso lo realizaremos haciendo clic en el botón de la pestaña de Operaciones,



A continuación nos aparece la ventana de la derecha, por defecto viene seleccionado el croquis puesto que no hay más elementos para extruir y en esa ventana debemos especificar la longitud que deseamos extruir así como la dirección o direcciones de extrusión. Cuando hayamos introducido todos los datos hacemos clic en el aspa verde.



En la imagen de abajo se muestra el resultado obtenido hasta este momento del proceso.





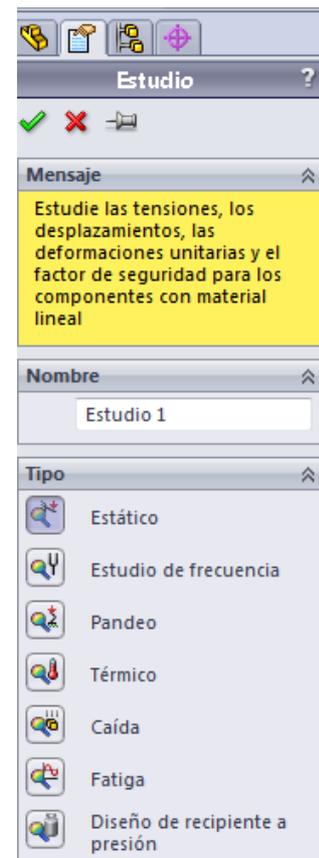
Nos disponemos ahora a efectuar las restricciones de material, aplicación de cargas y restricción de apoyos. Para ello nos vamos a dejar guiar por el módulo Simulation, la ruta a seguir es la siguiente:

Simulation → Estudio



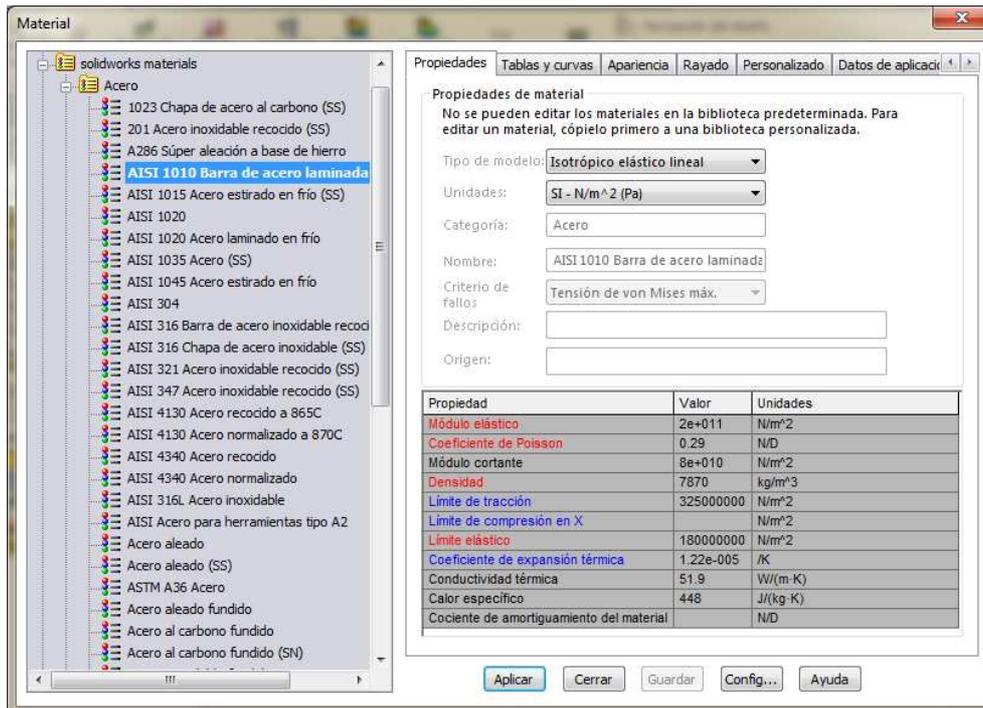
En la barra de la izquierda nos aparecerá la ventana que hemos representado a la derecha. En ella debemos seleccionar la clase de estudio a realizar. En nuestro caso será un estudio estático.

A partir de este momento se nos activa la pestaña Simulación. Este será nuestro nuevo entorno de trabajo. La barra de tareas abajo representada es la que vamos a utilizar aplicación por aplicación hasta llegar a tener todo preparado para realizar la simulación final.

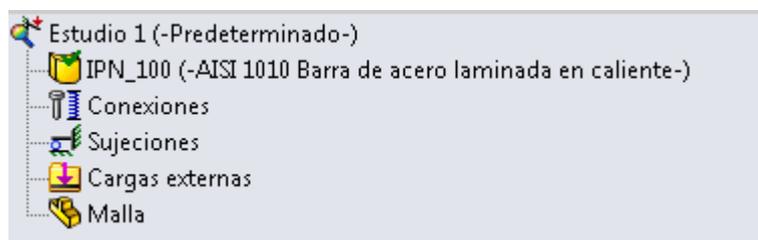




El primer paso a realizar es aplicar el material específico de nuestra pieza. Para ello hacemos clic en el botón Aplicar Material de la nueva barra de herramientas y en la biblioteca que se abre seleccionamos el material.

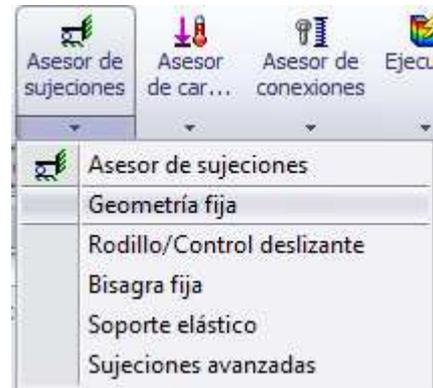


Para comprobar que la aplicación del material se ha efectuado correctamente observamos módulo Simulation y nos cercioramos de que en la fase de la pieza se ha añadido entre paréntesis el material que nosotros hemos seleccionado en la biblioteca. En este árbol se van a ir añadiendo las restricciones que nosotros vamos a ir aumentando.

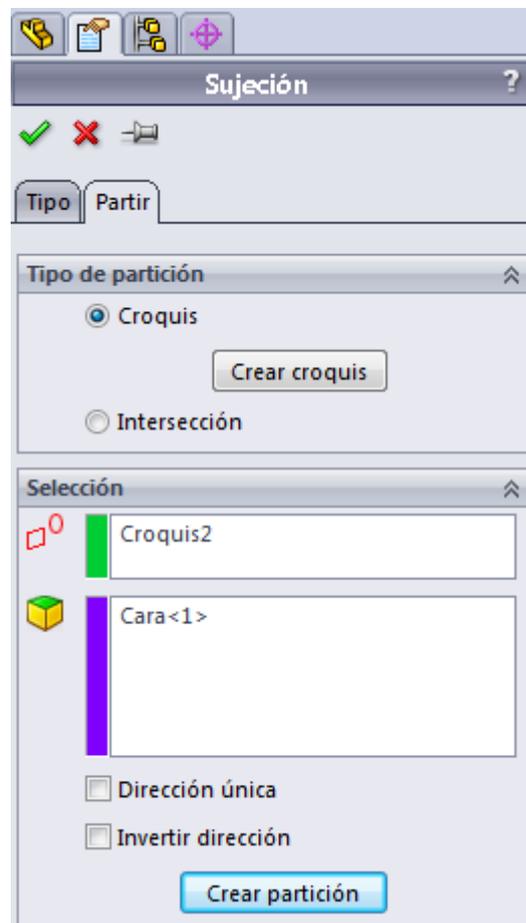




Siguiendo el desarrollo que nos marca el módulo Simulation, vamos a imponer ahora las restricciones de apoyos. Para ello hacemos clic en el botón Asesor de sujeciones de la barra de herramientas y después seleccionamos el tipo de apoyo a aplicar.

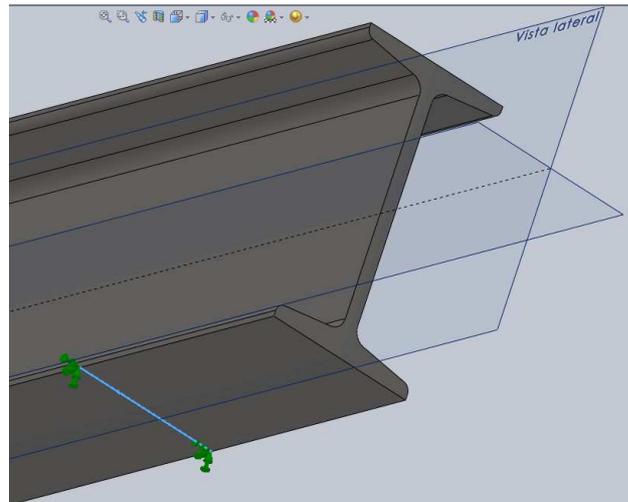


Al hacer clic sobre un tipo de apoyo, se nos abre en el asesor de estudio una ventana específica para la aplicación a utilizar y que nos guiará en el proceso de determinación de la misma. En el caso de los apoyos, puesto que no queremos que ocupen toda una cara sino simplemente una porción pequeña dentro de la misma, debemos seleccionar la pestaña Partir que se indica en este asesor. Una vez activada se nos abre la ventana de la derecha donde debemos seleccionar Crear Corquis, y especificamos la geometría donde vamos a aplicar la restricción de apoyo y hacemos clic en crear partición.



Realizamos estos mismos pasos para aplicar las restricciones del segundo apoyo.

Podremos observar entonces en el árbol general de proceso que se van añadiendo las restricciones que vamos aumentando, pudiendo en cualquier momento cambiar las características individuales de cualquier operación haciendo doble clic sobre ella y modificando sus parámetros.



Siguiendo la pauta marcada por el asesor de estudio, vamos ahora a restringir la aplicación de la carga. Para ello y siendo el proceso muy similar al de aplicar las restricciones de apoyos, nos dirigimos a la barra de herramientas y hacemos clic en el botón Asesor de Cargas



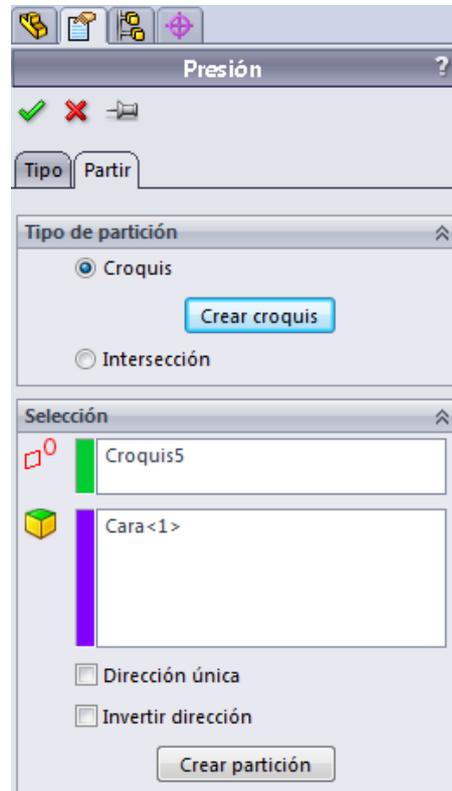
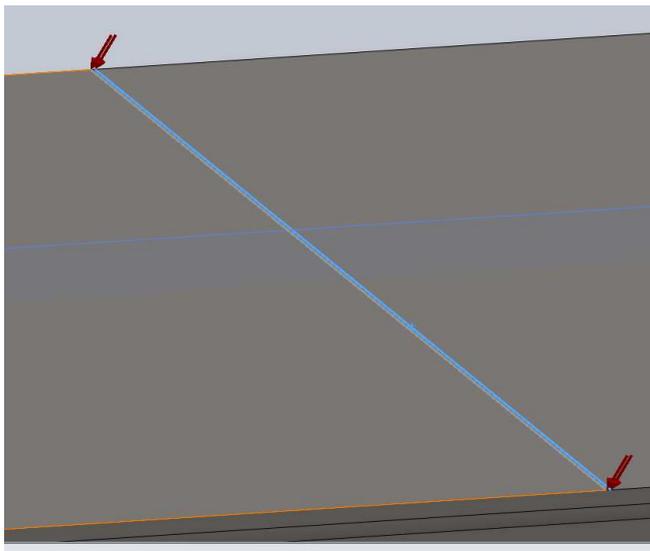
A continuación se nos abrirá una ventana de similares características a la anterior y en ella, debemos igualmente crear un croquis para delimitar la zona de aplicación de la carga.





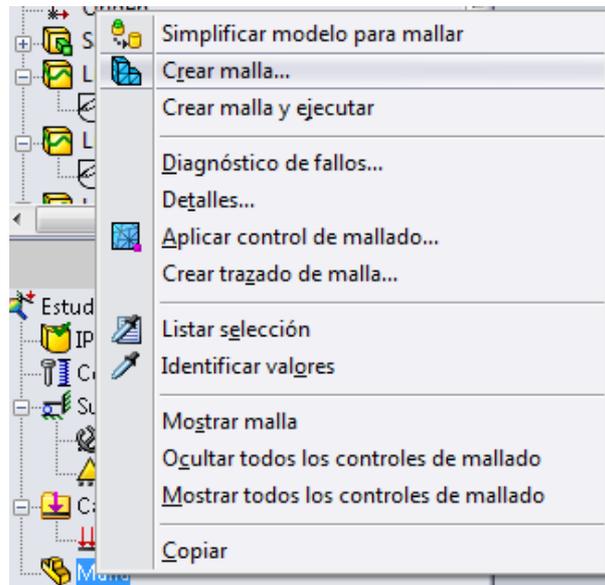
En nuestro caso vamos a aplicar una presión en la cara superior y en dirección normal a dicha superficie de valor máximo para conseguir los valores de la deformada y por tanto de la flecha en los últimos estados de nuestro estudio. Para ello dividiremos la fuerza puntual aplicada entre la superficie de aplicación de la carga para transformarla a presión.

Una vez hemos creado el croquis para aplicar la carga hacemos clic en el botón crear partición y abandonamos el croquis para guardar los cambios efectuados.





Para finalizar la pauta mostrada por el asesor de estudios sólo nos es necesario discretizar el modelo mediante un mallado. Para llevar a cabo esta operación hacemos clic con el botón derecho sobre la rama Malla de árbol de operaciones y del menú de opciones que se nos presentan, seleccionamos Crear malla para efectuar el mallado según las características propias a nuestras necesidades.



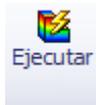
A continuación se nos abre la ventana de la derecha mediante la cual y de una forma muy simple y funcional, se nos permite editar nuestro nivel de mallado para un mayor o menor nivel de exactitud con las operaciones matemáticas y requerimiento de capacidad que eso conlleva. Una vez establecido el criterio de mallado a efectuar, hacemos clic en el aspa verde.

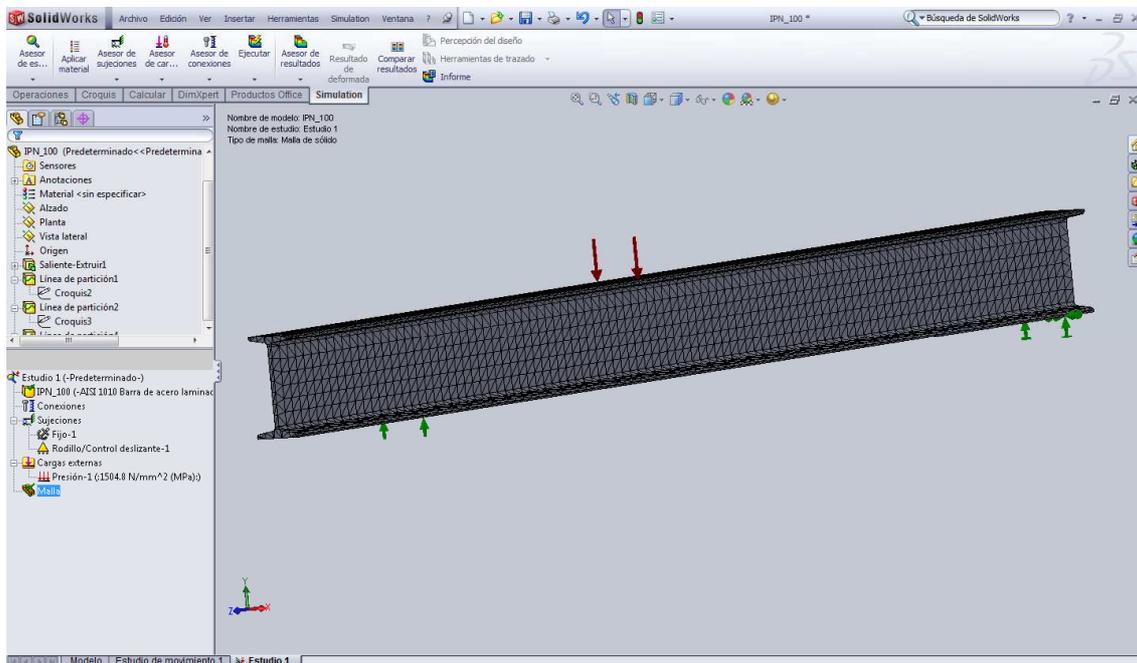


El dato definitivo de optimización de mallado ha sido extraído tras una serie de pruebas ensayo/error con la condición de obtener el punto óptimo entre precisión en los resultados obtenidos y el requerimiento de recursos técnicos requeridos al PC. He realizado varios mallados aumentando la precisión del mallado hasta obtener unos resultados cuya tolerancia en relación a los recursos informáticos consumidos eran



suficientes para mis necesidades. Estos datos han sido un tamaño global de tetraedro de 9 mm con una precisión de 0.45 mm.

En este momento del proceso y teniendo ya todos los parámetros definidos, deberíamos tener una situación muy similar a la que se muestra a continuación. Sólo resta ya hacer clic en el botón Ejecutar  de la barra de herramientas y estudiar los resultados.



Imágenes de los resultados obtenidos en la simulación

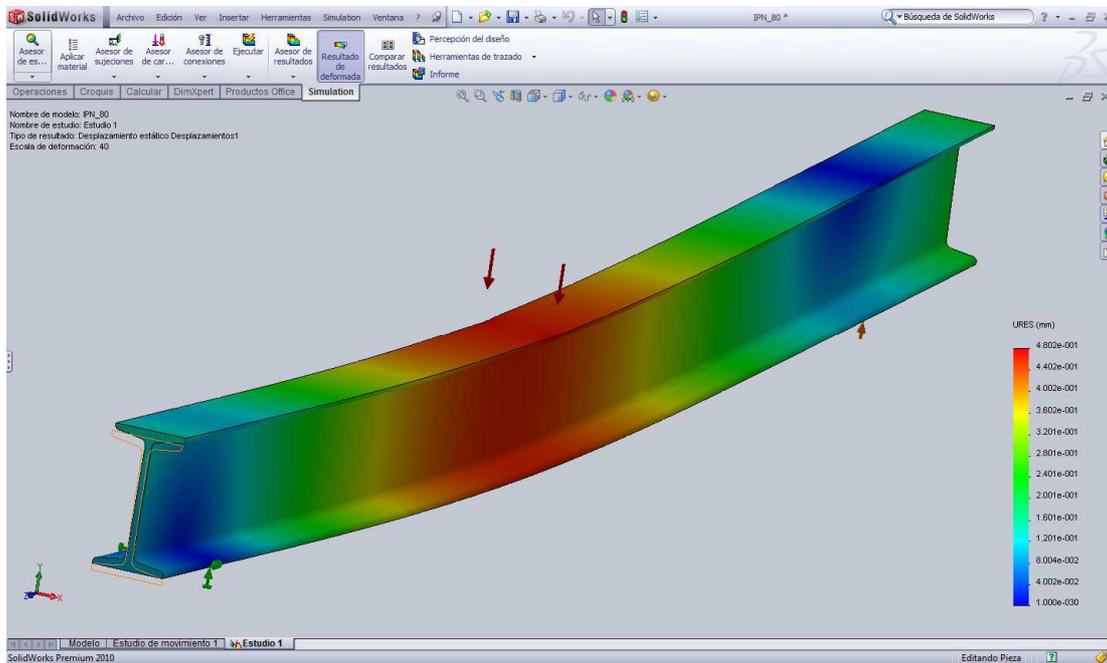


Figura 26. Distribución de desplazamientos en perfil IPN 80 mediante simulación.

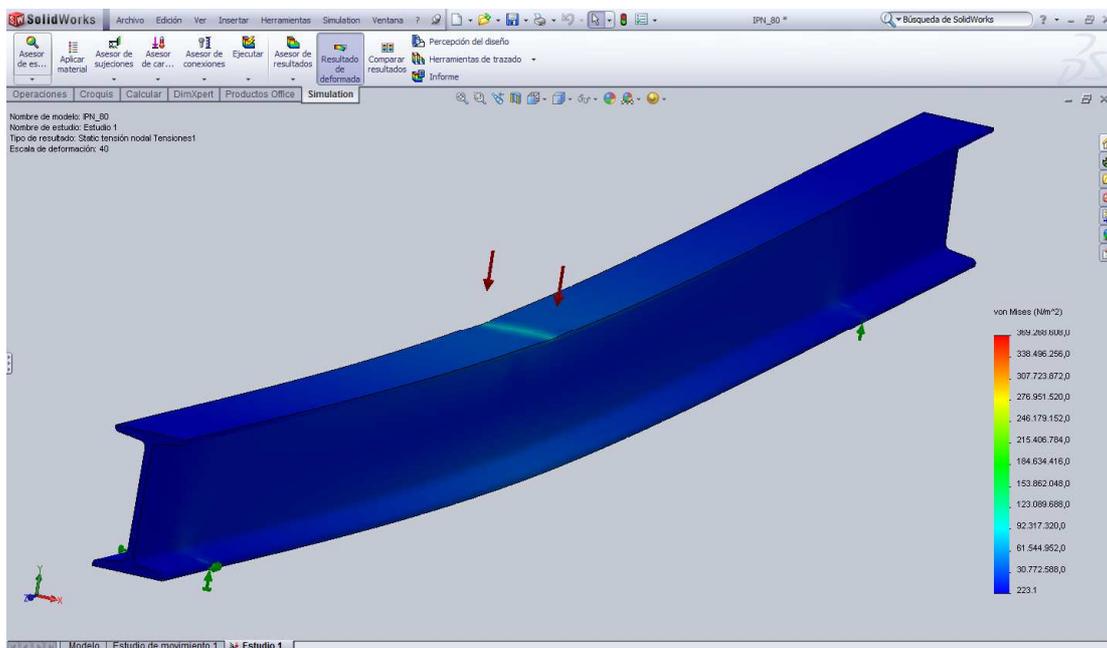


Figura 27. Tensión de Von Mises en perfil IPN 80 mediante simulación.

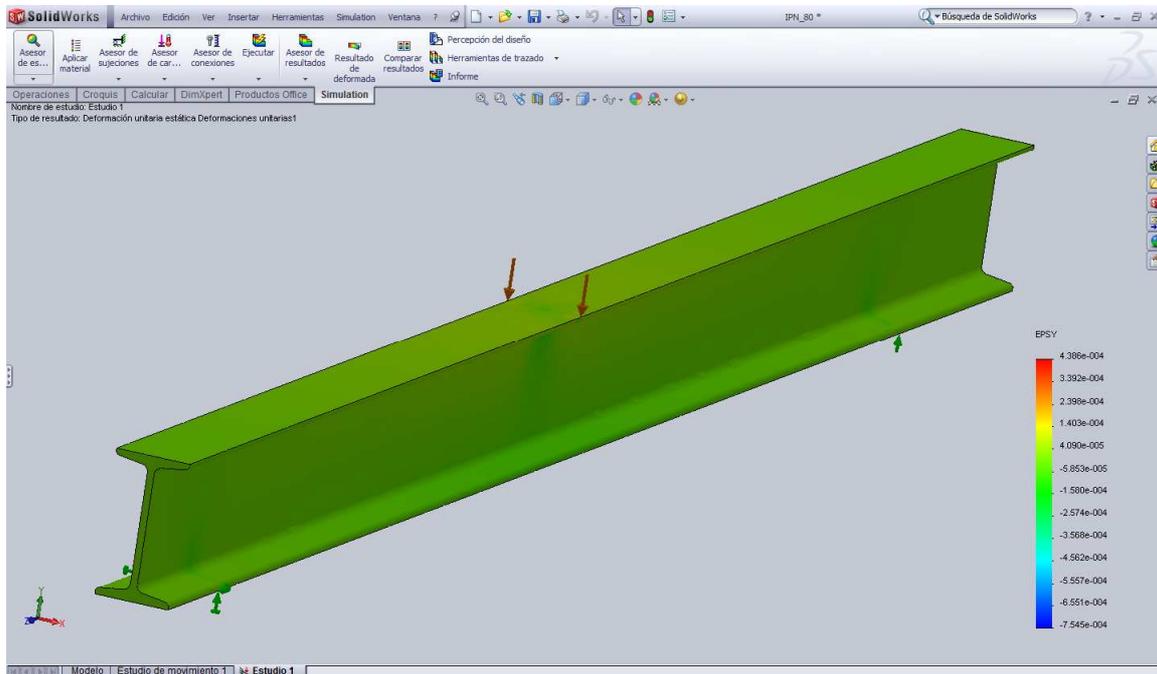


Figura 28. Deformación unitaria en la dirección “y” de perfil IPN 80.



4.3.6 RESULTADOS OBTENIDOS

Con el fin de obtener un mayor rango de comparación he simulado el perfil para cada uno de los fines de rampa que se establecieron en el desarrollo del ensayo mecánico a flexión. Consigo así una cantidad de datos mucho mayor y una mayor continuidad ya que obtengo las deformaciones de flecha para cada uno de las situaciones de carga aplicada.

Con el objetivo de poder comprobar si la desviación cometida entre el modelo simulado y el analítico es constante a lo largo de toda la longitud del perfil, o si por el contrario varía más en unas regiones que en otras, extraigo mediante el procesamiento de los datos obtenidos de deformada total a través del identificador de valores en los nodos del mallado, las deformaciones de flecha a unas distancias de los apoyos que considero suficiente para valorar esta desviación.

Además para corroborar que la estructura, debido a su característica disposición de cargas y apoyos, trabaja simétricamente, me dispongo a obtener los datos a diferentes distancias de los apoyos pero con simetría respecto al centro del vano. Estudiando el resultado de estos datos podré conocer el comportamiento mecánico de la viga.

A continuación mostraré los datos obtenidos en las hipótesis fijadas y posteriormente compararé estos datos con los teóricos para poder extraer mis propias conclusiones.



Perfil IPN 80

CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)
	200	0,0899		200	0,3597		200	0,6295
	300	0,1239		300	0,4956		300	0,8671
	400	0,1456		400	0,5824		400	1,0192
1000	500	0,1539	4000	500	0,6156	7000	500	1,0773
	600	0,1442		600	0,5768		600	1,0094
	700	0,1209		700	0,4836		700	0,8463
	800	0,0877		800	0,3511		800	0,6144
	200	0,1798		200	0,4496		200	0,7194
	300	0,2478		300	0,6196		300	0,9915
	400	0,2912		400	0,7280		400	1,1648
	500	0,3078	5000	500	0,7695	8000	500	1,2312
	600	0,2884		600	0,7210		600	1,1536
	700	0,2418		700	0,6045		700	0,9672
	800	0,1756		800	0,4389		800	0,7022
	200	0,2697		200	0,5395		200	0,8093
	300	0,3717		300	0,7436		300	1,1151
	400	0,4368		400	0,8736		400	1,3104
	500	0,4617	6000	500	0,9234	9000	500	1,3851
	600	0,4326		600	0,8563		600	1,2978
	700	0,3627		700	0,7254		700	1,0881
	800	0,2633		800	0,5266		800	0,7901

Tabla 13. Distribución de flecha perfil IPN 80 mediante Simulación.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)	CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA (mm)
	200	0,8994		200	1,1690		200	1,4388
	300	1,2390		300	1,6107		300	1,9824
	400	1,4560		400	1,8928		400	2,3296
10000	500	1,5390	13000	500	1,9953	16000	500	2,3580
	600	1,4420		600	1,8746		600	2,2972
	700	1,2090		700	1,5717		700	1,9344
	800	0,8775		800	1,1411		800	1,4044
	200	0,9892		200	1,2590		200	1,5288
	300	1,3629		300	1,7346		300	2,1063
	400	1,6016		400	2,0384		400	2,4752
11000	500	1,6929	14000	500	2,1342	17000	500	2,5125
	600	1,5862		600	2,0188		600	2,4514
	700	1,3299		700	1,6926		700	2,0553
	800	0,9655		800	1,2289		800	1,4921
	200	1,0791		200	1,3489		200	1,6187
	300	1,4868		300	1,8585		300	2,2302
	400	1,7472		400	2,1840		400	2,6208
12000	500	1,8453	15000	500	2,2593	18000	500	2,6693
	600	1,7304		600	2,1630		600	2,5956
	700	1,4508		700	1,8135		700	2,1762
	800	1,0533		800	1,3164		800	1,5801

Tabla 14. Distribución de flecha en perfil IPN 80 mediante Simulación(II).

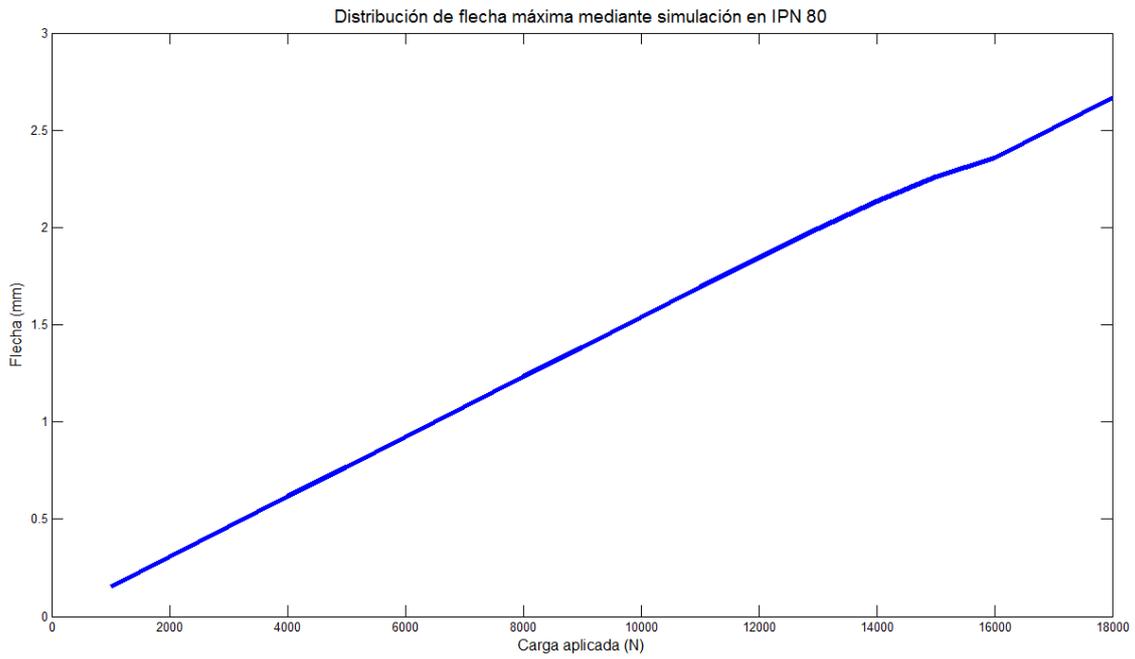


Figura 29. Representación de flecha máxima simulada en IPN 80.



Comparación entre datos teóricos y obtenidos mediante simulación

CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA SIMULACION (mm)	FLECHA TEORICA (mm)	ERROR
1000	200	0,0899	0,072	25%
	300	0,1239	0,101	23%
	400	0,1456	0,120	21%
	500	0,1539	0,128	20%
	600	0,1442	0,120	20%
	700	0,1209	0,101	20%
	800	0,0877	0,072	22%
	2000	200	0,1798	0,145
300		0,2478	0,202	23%
400		0,2912	0,241	21%
500		0,3078	0,255	21%
600		0,2884	0,241	20%
700		0,2418	0,202	20%
800		0,1756	0,145	21%
3000		200	0,2697	0,217
	300	0,3717	0,303	23%
	400	0,4368	0,361	21%
	500	0,4617	0,383	21%
	600	0,4326	0,361	20%
	700	0,3627	0,303	20%
	800	0,2633	0,217	21%
	4000	200	0,3597	0,290
300		0,4956	0,404	23%
400		0,5824	0,481	21%
500		0,6156	0,510	21%
600		0,5768	0,481	20%
700		0,4836	0,404	20%
800		0,3511	0,290	21%
5000		200	0,4496	0,362
	300	0,6196	0,505	23%
	400	0,7280	0,602	21%
	500	0,7695	0,638	21%
	600	0,7210	0,602	20%
	700	0,6045	0,505	20%
	800	0,4389	0,362	21%

Tabla 15. Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA SIMULACIÓN (mm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	ERROR
	200	0,5395	0,435	24%
	300	0,7436	0,606	23%
	400	0,8736	0,722	21%
6000	500	0,9234	0,765	21%
	600	0,8563	0,722	19%
	700	0,7254	0,606	20%
	800	0,5266	0,435	21%
	200	0,6295	0,505	25%
	300	0,8671	0,707	23%
	400	1,0192	0,843	21%
7000	500	1,0773	0,893	21%
	600	1,0094	0,843	20%
	700	0,8463	0,707	20%
	800	0,6144	0,505	22%
	200	0,7194	0,579	24%
	300	0,9915	0,808	23%
	400	1,1648	0,963	21%
8000	500	1,2312	1,020	21%
	600	1,1536	0,963	20%
	700	0,9672	0,808	20%
	800	0,7022	0,579	21%
	200	0,8093	0,652	24%
	300	1,1151	0,909	23%
	400	1,3104	1,083	21%
9000	500	1,3851	1,148	21%
	600	1,2978	1,083	20%
	700	1,0881	0,909	20%
	800	0,7901	0,652	21%
	200	0,8994	0,724	24%
	300	1,2390	1,010	23%
	400	1,4560	1,204	21%
10000	500	1,5390	1,275	21%
	600	1,4420	1,204	20%
	700	1,2090	1,010	20%
	800	0,8775	0,724	21%

Tabla 16. Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80 (II).



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA SIMULACIÓN (mm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	ERROR
	200	0,9892	0,797	24%
	300	1,3629	1,111	23%
	400	1,6016	1,324	21%
11000	500	1,6929	1,403	21%
	600	1,5862	1,324	20%
	700	1,3299	1,111	20%
	800	0,9655	0,797	21%
	200	1,0791	0,869	24%
	300	1,4868	1,212	23%
	400	1,7472	1,444	21%
12000	500	1,8453	1,530	21%
	600	1,7304	1,444	20%
	700	1,4508	1,212	20%
	800	1,0533	0,869	21%
	200	1,1690	0,942	24%
	300	1,6107	1,313	23%
	400	1,8928	1,565	21%
13000	500	1,9953	1,658	20%
	600	1,8746	1,565	20%
	700	1,5717	1,313	20%
	800	1,1411	0,942	21%
	200	1,2590	1,014	24%
	300	1,7346	1,414	23%
	400	2,0384	1,685	21%
14000	500	2,1342	1,785	20%
	600	2,0188	1,685	20%
	700	1,6926	1,414	20%
	800	1,2289	1,014	21%
	200	1,3489	1,086	24%
	300	1,8585	1,515	23%
	400	2,1840	1,806	21%
15000	500	2,2593	1,913	18%
	600	2,1630	1,806	20%
	700	1,8135	1,515	20%
	800	1,3164	1,086	21%

Tabla 17. Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80 (III).



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA SIMULACIÓN (mm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	ERROR
	200	1,4388	1,159	24%
	300	1,9824	1,616	23%
	400	2,3296	1,926	21%
16000	500	2,3580	2,040	16%
	600	2,2972	1,926	19%
	700	1,9344	1,616	20%
	800	1,4044	1,159	21%
	200	1,5288	1,231	24%
	300	2,1063	1,717	23%
	400	2,4752	2,046	21%
17000	500	2,5125	2,168	16%
	600	2,4514	2,046	20%
	700	2,0553	1,717	20%
	800	1,4921	1,231	21%
	200	1,6187	1,304	24%
	300	2,2302	1,818	23%
	400	2,6208	2,167	21%
18000	500	2,6693	2,295	16%
	600	2,5956	2,167	20%
	700	2,1762	1,818	20%
	800	1,5801	1,304	21%

Tabla 18. Comparación entre flecha teórica y mediante simulación perfil IPN 80 (IV).

En las distintas tablas de comparación de los datos extraídos mediante análisis analítico y mediante simulación observamos que hay una correspondencia constante con una desviación típica del 20%. En principio parece un error demasiado alto pero hay que tener en cuenta que estamos hablando de pequeñas deformaciones en perfiles cuyas características mecánicas no están determinadas mediante un ensayo de probeta en el que se podría extraer las capacidades técnicas con precisión para posteriormente modificar las características específicas del acero elegido y conseguir así una mayor exactitud en la simulación. Esta opción no ha sido posible realizarla por las imposibilidades que me imponen los prestamistas del material, ya que tengo que



devolver los perfiles en el estado original. No obstante, podemos concluir que los resultados teóricos y los extraídos mediante simulación siguen una misma proporcionalidad que era de esperar pues se basan en las mismas leyes de la Resistencia de Materiales y del Medio Continuo.

En cuanto a la hipótesis inicial de que la estructura trabajaría simétrica respecto al centro del vano, vemos que no se cumple estrictamente aunque si existe una clara evidencia de que ambas partes trabajan muy parecido, por no decir que existe simetría ya que las variaciones son mínimas. Esto se debe a que he supuesto un apoyo fijo y el otro móvil, por lo que al variar las restricciones de traslación, esto produce que las tensiones varíen ligeramente, efecto que se traduce en que por tanto el perfil no trabaje perfectamente simétrico.

Por otra parte vemos que las desviaciones son constantes a lo largo de toda la longitud del perfil para cada hipótesis de carga. Ello refleja que la proporcionalidad entre la deformación teórica y la obtenida mediante simulación es constante a lo largo de toda la longitud del perfil. No existen regiones del perfil donde la desviación sea claramente menos, sino que por el contrario se mantiene dentro de un rango constante y no se aprecian variaciones significativas de una región a otra.



4.4 TRATAMIENTO DE IMAGEN CON MATLAB

La implementación de algoritmos en visión por computador resulta muy costoso en tiempo ya que se requiere de la manipulación de punteros, gestión de memoria, etc. Desarrollarlo en lenguaje C++ (que por sus características compartidas de alto y bajo nivel lo hacen el más apropiado para la implementación de algoritmos de visión computacional) supondría la inversión de tiempo y sin la seguridad de que lo queremos implementar funcionará. Además utilizar C++ para el periodo de prueba exige un tiempo normal de corrección de errores debidos al proceso de implementación del algoritmo, es decir errores programáticos efectuados por ejemplo al momento de multiplicar dos matrices, etc. Todos estos problemas pueden ser resueltos si la implementación de prueba es realizada en MATLAB utilizando su toolbox de procesamiento de imágenes. Con ello el tiempo de implementación se convierte en el mínimo con la confianza de utilizar algoritmos científicamente probados y robustos. El toolbox de procesamiento de imágenes contiene un conjunto de funciones de los algoritmos más conocidos para trabajar con imágenes binarias, transformaciones geométricas, morfología y manipulación de color que junto con las funciones ya integradas en MATLAB permite realizar análisis y transformaciones de imágenes en el dominio de la frecuencia (transformada de Fourier y Wavelets).

Además MATLAB es un programa de cálculo creado especialmente para trabajar con matrices, y como se mostrará a continuación, las imágenes no son más que matrices de unas ciertas dimensiones. MATLAB es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos, es al mismo tiempo un entorno y un lenguaje de programación.

Otro punto fuerte para la utilización de MATLAB es que ya cuenta con un módulo propio de procesamiento de imagen que sin duda resulta útil a la hora de trabajar en este campo. El numero de funciones que implementa el toolbox para el procesamiento de imagen es muy diverso, sin contar la múltiple oferta de funciones ya



generada por otros usuarios y disponibles a través del Internet. Sin embargo, también permite construir nuestras propias herramientas, creando fácilmente nuestras propias funciones y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código MATLAB, los podemos agrupar en Toolbox (también llamadas librerías): colección especializada de M-archivos para trabajar en clases particulares de problema, como el tratado en el presente Trabajo Fin de Carrera.

En MATLAB una imagen en escala de grises es representada por medio de una matriz de $(m \times n)$ elementos en donde n representa el número de píxeles de ancho y m el número de píxeles de largo, donde cada elemento de la matriz de la imagen tiene un valor de 0 (negro) a 255 (blanco).

La representación de una imagen de color RGB es algo más complicada ya que está representada por una matriz tridimensional $(m \times n \times p)$, donde m y n tienen la misma significación que para el caso de las imágenes de escala de grises mientras que p representa el plano, que para RGB puede ser 1 para el rojo, 2 para el verde y 3 para el azul. Los formatos que soporta MATLAB son: TIFF, JPEG, GIF, BMP, PNG, XWD.

Los elementos que constituyen una imagen en MATLAB tienen el formato entero uint8, que es un tipo de dato que puede variar de 0 a 255, sin poder soportar decimales ni valores que salgan fuera de ese rango.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

- Computación numérica para obtener rápidamente resultados precisos.
- Gráficos para visualizar y analizar los datos.
- Lenguaje y entorno de programación interactivos.
- Herramientas para construir GUI a medida.
- Integración con aplicaciones externas.



- Posibilidad de importar datos desde archivos y dispositivos externos y de usar archivos E/S de bajo nivel.
- Conversión de aplicaciones MATLAB a C y C++ mediante Compiler.

Este amplio conjunto de prestaciones hacen de MATLAB la base ideal para el desarrollo de soluciones a problemas técnicos.

En el presente Trabajo Fin de Carrera me propongo extraer datos de comparación mediante la determinación de la flecha a través de un programa informático de procesamiento de imagen para conocer el grado de maduración de la tecnología de procesamiento de imagen con el fin de conocer el orden de continuidad y precisión en los resultados que se pueden esperar de esta tecnología aún hoy en sus inicios de crecimiento y desarrollo.

El material necesario para obtener estos resultados serán unas fotografías tomadas durante el desarrollo del ensayo mecánico a flexión con el fin de comparar posteriormente los resultados obtenidos y conocer las desviaciones de la tecnología de procesamiento de imagen con este método. El programa desarrollado está enfocado al procesamiento de imágenes provenientes de vigas biapoyadas y con la aplicación de una carga puntual central entre apoyos; en la toma de imágenes se deben seguir unas normas previas para su posterior correcto funcionamiento:

- La toma de la fotografía debe tomarse paralela a la extensión de la viga, con la distancia adecuada para evitar efectos de “ojo de pez”.
- Debe de tener un contraste adecuado la fotografía, ya que el programa la convertirá a escala de grises posteriormente.
- La cámara fotográfica debe poseer una resolución de al menos 5 Megapíxeles para que la precisión sea óptima, para resoluciones menores, el programa



funciona igualmente pero con mayor margen de error. Debido a la gran cantidad de píxeles con los que trabaja, el tiempo de ejecución del programa depende en gran medida de la potencia del microprocesador del computador. Debido a esto y a su gran precisión al comprobar píxel a píxel, exige una gran potencia de cálculo que no toda computadora puede conseguir.

- Es necesario medir o conocer la longitud entre los apoyos de la viga deformada, dato que será pedido en la ejecución del programa.

Con el fin de cumplir con la mayor precisión posible con estas hipótesis de partida a la hora de tomar las fotografías que posteriormente procesaremos, decido pintar los perfiles de blanco para que contrasten bien con el fondo de telas de color que sitúo estratégicamente para tal efecto. En una primera prueba en el ensayo mecánico a flexión se habían colocado unos trozos de material negro entre los apoyos y el perfil y entre el rodillo encargado de aplicar la fuerza con el fin de obtener el punto exacto de contacto entre ambas superficies. Esta opción hubo que desecharla ya que la compresión de este material alteraba la veracidad de los resultados obtenidos.

Las fotografías a procesar con el programa serán de la máxima calidad posible con el objetivo de conseguir la mayor precisión. Trabajaremos con fotografías de 10, 12 y 14 megapíxeles que nos otorgarán una resolución de (3872 x 2592), (4000 x 3000) y (4252 x 3264) píxeles respectivamente. Por lo tanto, en un metro de distancia entre apoyos estaremos trabajando con una precisión de 0.258, 0.25 y 0.235 mm.

Sería deseable contar con cámaras fotográficas de una resolución tal que nos permitieran trabajar con precisiones por debajo de la décima de milímetro para poder considerar óptimo para el cálculo de flechas y pequeñas deformaciones ya que trabajamos en rangos muy próximos a la precisión otorgada por las resoluciones de las actuales cámaras convencionales y eso supondrá un gran problema a la hora de obtener continuidad y precisión en los resultados obtenidos pues la diferencia de un píxel



significará doblar el resultado teórico. Existen tecnologías como los escáneres u otro tipo de cámaras fotográficas que ya hoy en día pueden cumplir con estas características y ser una buena alternativa para el testado y desarrollo de esta tecnología de procesamiento de imagen. No he tenido acceso a su utilización pero con los resultados obtenidos a través de las cámaras convencionales nos podemos hacer una idea clara de la potencia y continuidad de esta tecnología y podremos extrapolar los resultado a la utilización de estas máquinas con mayor resolución y precisión.

Una vez tomadas estas fotografías se tratarán mediante un procesamiento de imagen que describiremos a continuación con el fin de obtener un método automático de obtención de deformaciones de flecha a lo largo de toda la longitud del perfil a tratar. La característica de ser un proceso automático es una ventaja para que aquellas personas que no se manejan en el software CAD puedan obtener los resultados de deformaciones de flecha por un método alternativo como es el procesamiento de imagen mediante una simple fotografía.

ETAPAS DEL PROGRAMA DE PROCESAMIENTO DE IMAGEN

El objetivo final del programa de “Programa de procesamiento de imagen” desarrollado en MATLAB es lograr extraer de la imagen a tratar, una matriz lógica unidimensional con el fin de facilitar su procesamiento y extracción de datos de flecha. Una imagen binaria es una matriz lógica en la cual cada píxel puede tener sólo uno de dos valores posibles 1 o 0. Como es lógico suponer una imagen en esas condiciones es mucho más fácil encontrar y distinguir características estructurales.



Para lograr obtener dichos resultados el proceso comenzará con la toma de las fotografías con las características anteriormente descritas. Una vez obtenidas y mediante una interfaz, el programa nos indicará que introduzcamos los datos particulares de nuestro ensayo como son:

1. Tipo de perfil.
2. Longitud entre apoyos (m).
3. Imagen a analizar.

Con estos tres datos el programa mediante el procesamiento de la imagen nos producirá unos datos generales como son:

1. Fuerza puntual aplicada en el centro del vano (N).
2. Momento flector máximo (N*m).
3. Flecha máxima (m).

Estos datos además de conocer la flecha máxima nos permiten conocer las solicitaciones máximas a que está sometido el perfil y con las cuales podríamos ya verificar si el comportamiento mecánico de nuestro perfil se adecua a los teóricamente esperado o si por el contrario no está trabajando como se esperaba. No obstante, el programa nos va a ofrecer de forma automática los gráficos de los diagramas de esfuerzo y una gráfica de comparación entre la flecha teórica y la flecha medida mediante el procesamiento de imagen a lo largo de toda la longitud (L) del perfil con el fin de verificar si el comportamiento mecánico se adecua por igual en todas las regiones a lo largo de la longitud del perfil o si se produce por zonas diferenciadas.

Una vez introducidos todos los datos requeridos por el programa para comenzar el proceso hacemos clic en calcular. Paso a continuación a desmenuzar con detalle los pasos realizados automática e internamente por el programa para la obtención de los resultados.



El primer paso que realiza el programa en el procesamiento de imagen es analizar la imagen en color y tomar el primer canal de los tres disponibles RGB. Con ello obtengo una imagen en escala de grises que es representada por medio de una matriz de $(m \times n)$ elementos en donde n representa el número de píxeles de ancho y m el número de píxeles de largo, donde cada elemento de la matriz de la imagen tiene un valor de 0 (negro) a 255 (blanco). Paso a continuación a mostrar la secuencia de los resultados obtenidos hasta este momento:



Figura 30. Imagen a tratar en color.

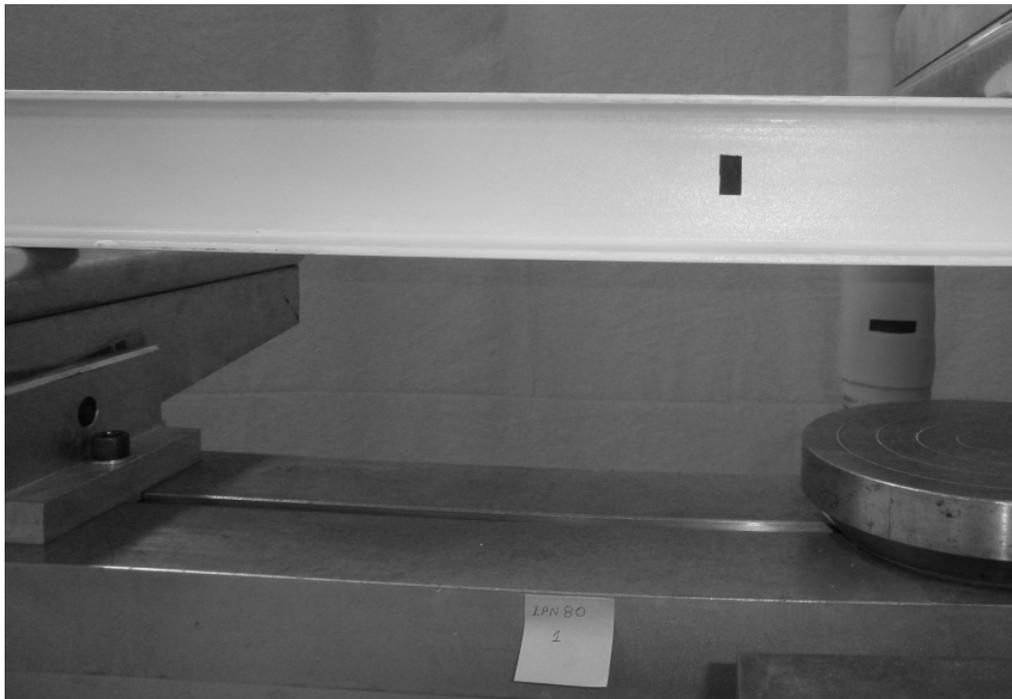


Figura 31. Imagen procesada en escala de grises.

El siguiente paso realizado automáticamente por el programa para obtener una imagen binaria a partir de la imagen en escala de grises es la utilización de un filtro del toolbox de procesamiento de imagen de MATLAB basado en la segmentación por umbral. Es decir, elijo un valor límite a partir del cual todos los valores de intensidades mayores serán codificados como 1 (perfil), mientras que los que estén por debajo serán codificados como 0 (ausencia de perfil). El valor límite del filtro basado en la segmentación por umbral lo he conseguido a base de prueba y error optimizando ese valor para obtener resultados óptimos en la mayoría de los perfiles a tratar. He utilizado un valor de umbral del 0.995. Una vez llegados a este paso, he configurado el programa de procesamiento de imagen para que discrimine zonas que cumplan con las características de umbral pero que no son parte estructural del perfil. Esta característica la he introducido en el programa mediante un algoritmo que elimina las zonas que están por debajo de un porcentaje del espesor medio de la viga con el fin de evitar zonas de imperfección en la matriz lógica final. El valor de este porcentaje lo he testado con el



mismo procedimiento de ensayo/error que el del umbral, obteniendo un valor de discriminación de 0.8.

Paso a mostrar la imagen procesada en la etapa final del procesamiento de imagen, una matriz lógica en la cual es mucho más fácil encontrar y distinguir características estructurales:

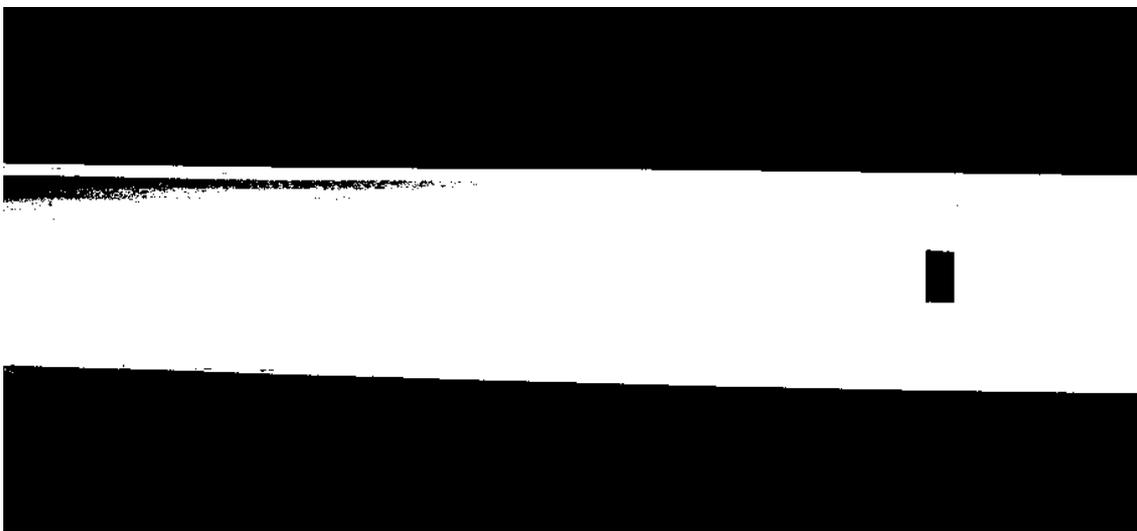


Figura 32. Imagen en la etapa final del procesamiento de imagen.

A continuación mostraré en imágenes un ejemplo de los resultados obtenidos y que el programa nos proporciona automáticamente para cada ensayo:

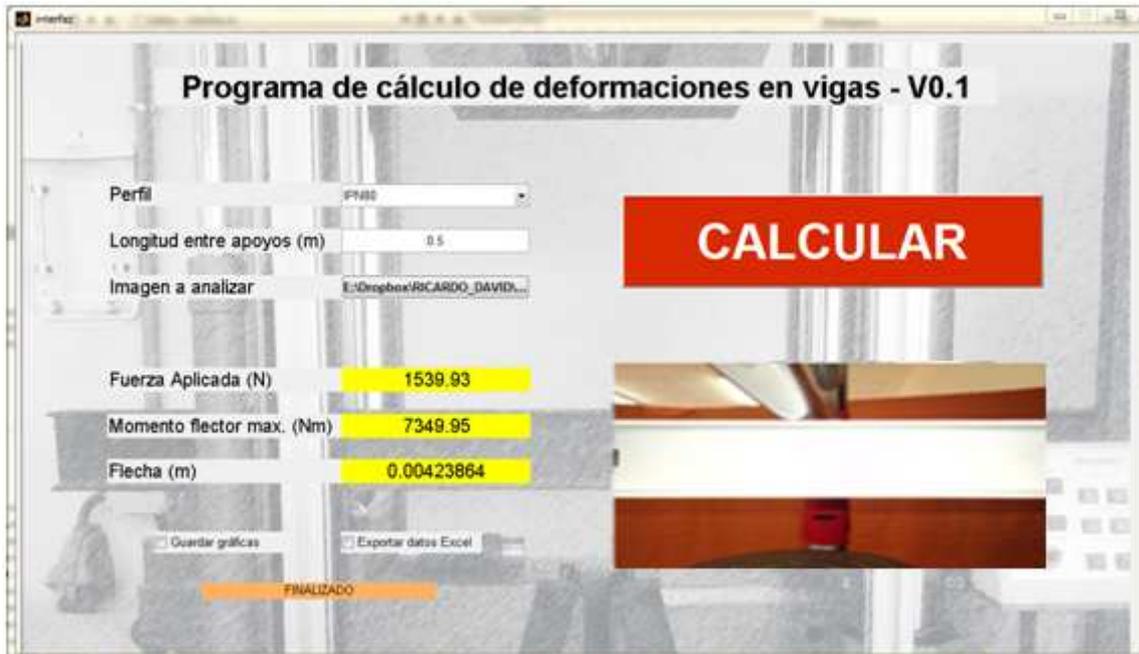


Figura 33. Resultados generales en la interfaz.

DIAGRAMAS DE ESFUERZOS

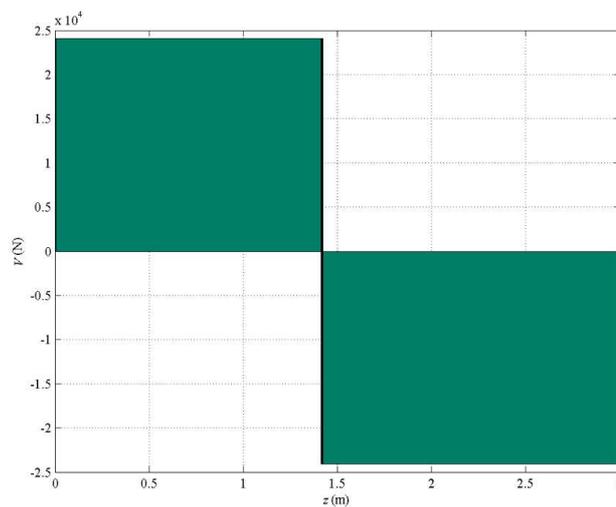


Figura 34. Diagrama de esfuerzos cortantes.

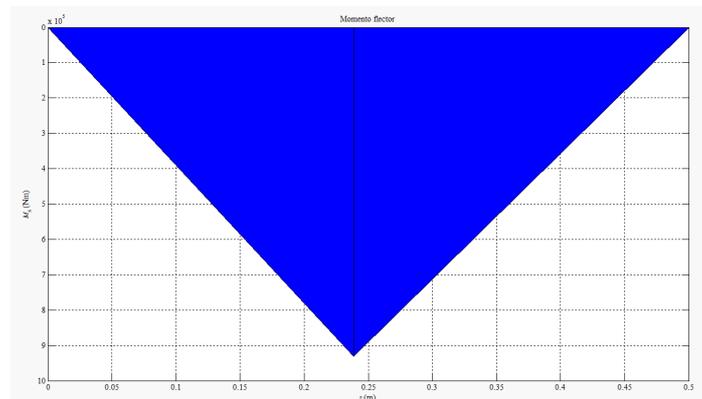


Figura 35. Diagrama de momento flector.

Con estas dos representaciones, *figura 27* y *figura 28*, nos podemos hacer una idea de cómo está trabajando el perfil y comprobamos que trabaja como era de esperar teóricamente ya que los diagramas tienen la misma forma que los expresados bajo la Teoría de la Resistencia de Materiales mostrados en el apartado de cálculo analítico.

A continuación muestro la gráfica comparativa que nos ofrece el programa entre la flecha teórica y la medida mediante el procesamiento de imagen a lo largo de toda la longitud (L) del perfil. Podemos comprobar que el programa obliga a que el punto de máxima flecha ambas coincidan ya que es del dato de partida para que el programa extrapole este dato al resto del perfil. Comprobamos que hay desviaciones significativas en toda la longitud de perfil. Cabe señalar que a pesar de la escasa precisión que nos otorgan las cámaras con las que estoy trabajando, la continuidad de la flecha a lo largo del perfil es de la forma que cabe esperar teóricamente, lo que nos da una idea de la potencia de la tecnología de procesamiento de imagen y cómo si extrapolamos a precisiones por debajo de la décima de milímetro podríamos considerarlo un método confiable, automático y sencillo para la obtención de tales resultados.

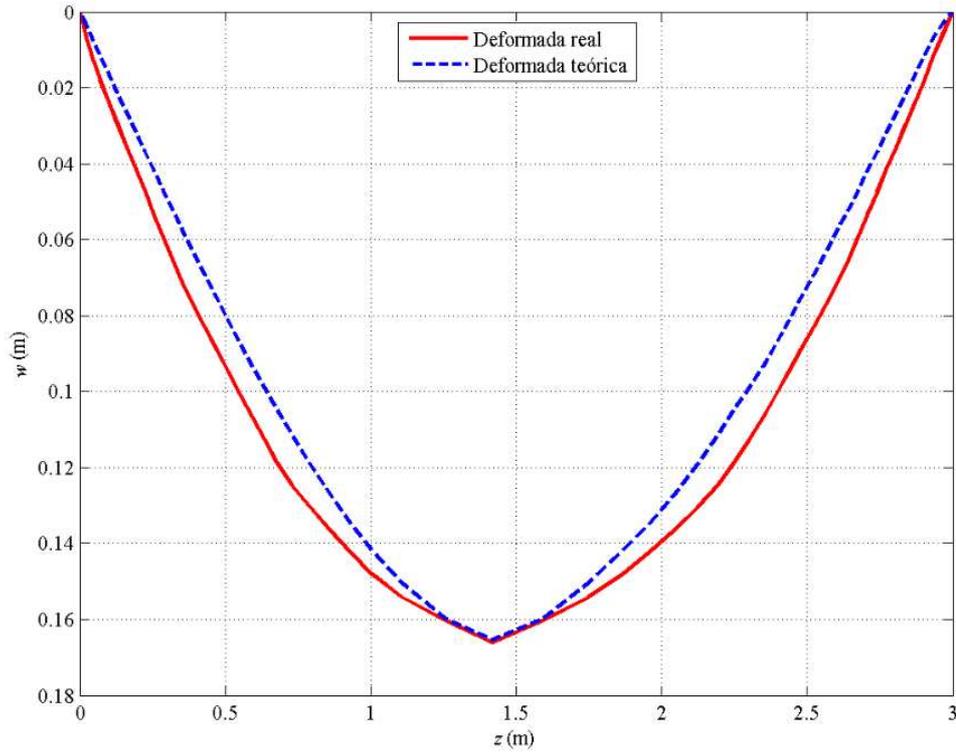


Figura 36. Comparación entre flecha teórica y procesada.

Para conocer los pormenores de cómo se realiza el proceso de medición de los incrementos de flecha por columna véase el *anexo B*, en el cual encontrarán el algoritmo del programa comentado paso a paso.

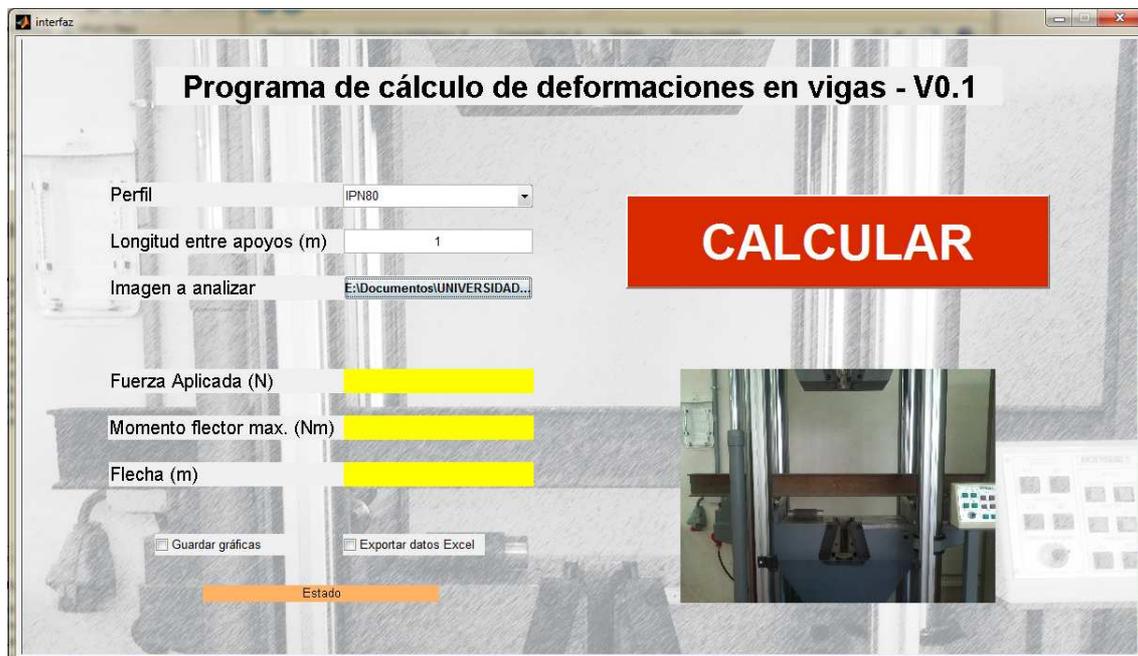


Figura 37. Interfaz del programa de procesamiento de imagen.

4.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS

4.4.1.1 MÉTODO INDIRECTO

En el proceso de extracción de datos mediante un método indirecto trabajaremos con las imágenes tomadas de la *cámara 1*, cuya imagen representativa es la que sigue:



Figura 38. Imagen representativa obtenida con la cámara 1.

La escasa longitud de viga captada por esta cámara hace imposible conocer la flecha total mediante el procesamiento de la imagen pues no tenemos la imagen de la viga completa entre apoyos. En la imagen de la *figura 38* se aprecian dos marcas negras centradas en los bordes de la misma. Fueron colocadas en esa situación para posteriormente poder introducir esa distancia y que el programa de procesamiento de imagen pueda obtener el valor cuantitativo de un píxel.

Para obtener los resultados mediante este método y debido a las características de cercanía de la cámara al perfil en la toma de la fotografía se producen en estas el fenómeno de distorsión de barril así como una descompensación de nivel debido a que



esta cámara se situó sobre un trípode pequeño con poca estabilidad debido a las peculiares características de la disposición de los elementos propios de la máquina de ensayo. Para solucionar estos problemas creados por las restricciones de la máquina de ensayo realizo un pretratamiento de la imagen mediante el software PhotoShop en el que corrijo los defectos propios de una lente con gran angular en las características de disposición comentadas y nivelo la línea superior de la vista frontal del perfil mostrada en la *figura 38*.

Pre-procesamiento de imagen mediante PhotoShop

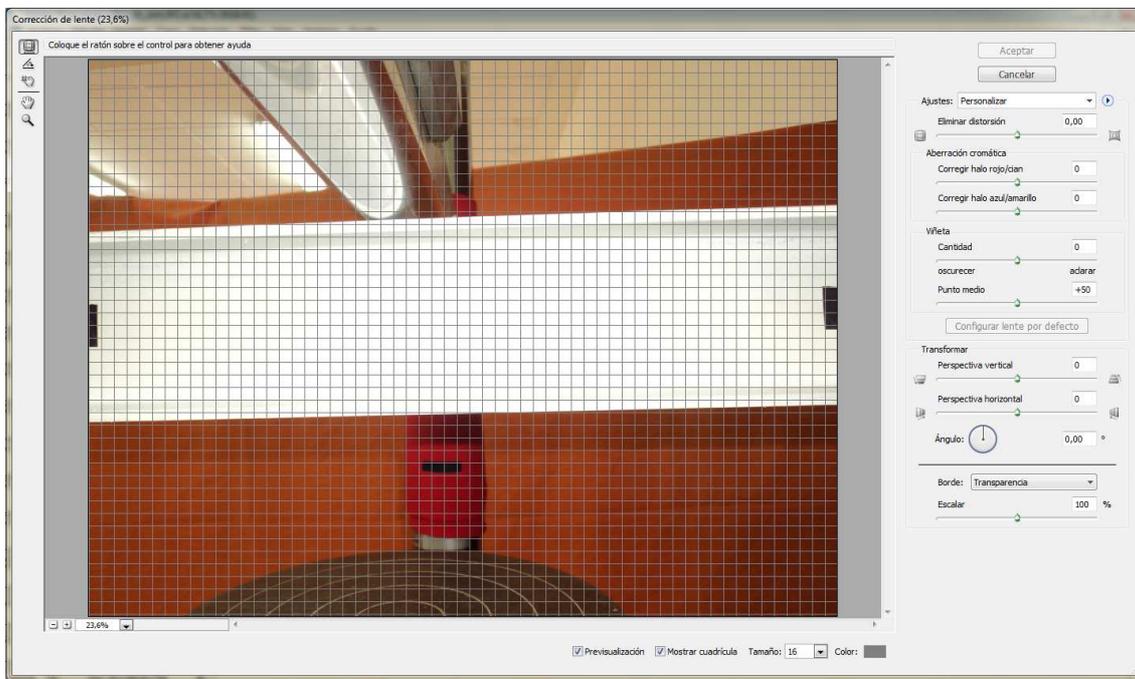


Figura 39. Pre-procesamiento de imagen mediante PhotoShop .

Como se puede apreciar en la figura 39, la imagen tomada a través de la cámara 1 en el ensayo de flexión se encuentra ligeramente inclinada debido a los inconvenientes comentados. Corregí ese problema jugando con los valores de los distintos comandos que se encuentran en la barra de herramientas de la derecha como: grado de distorsión, perspectiva horizontal y ángulo, hasta conseguir un resultado óptimo. Los valores que



apliqué automáticamente a todas las fotografías con el fin de que todas tuviesen los mismos valores origen fueron:

- Eliminar distorsión: -7.34
- Perspectiva horizontal: -7
- Ángulo: 358.53

Obteniendo como resultado una orientación y una corrección de la distorsión de barril producida por el gran angular de la cámara como se muestra a continuación:

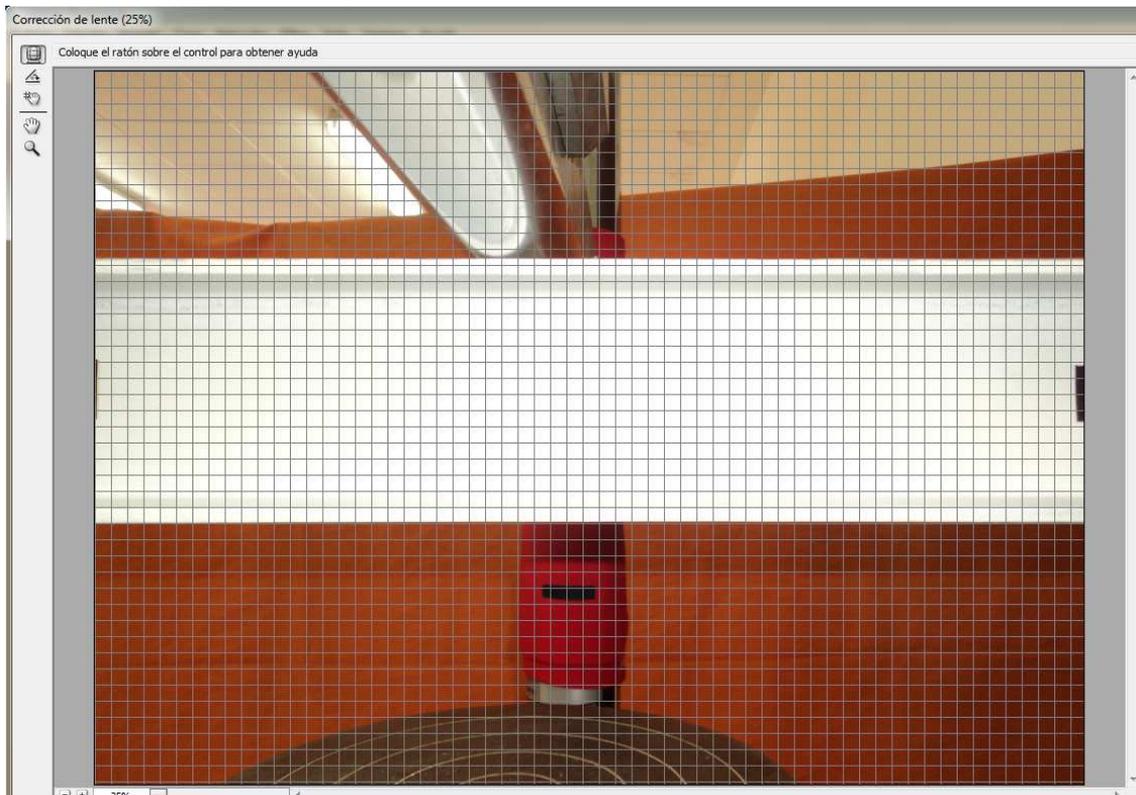


Figura 40. Pre- procesamiento de imagen mediante PhotoShop (II).



Procedimiento a seguir para el cálculo de la flecha procesada indirecta

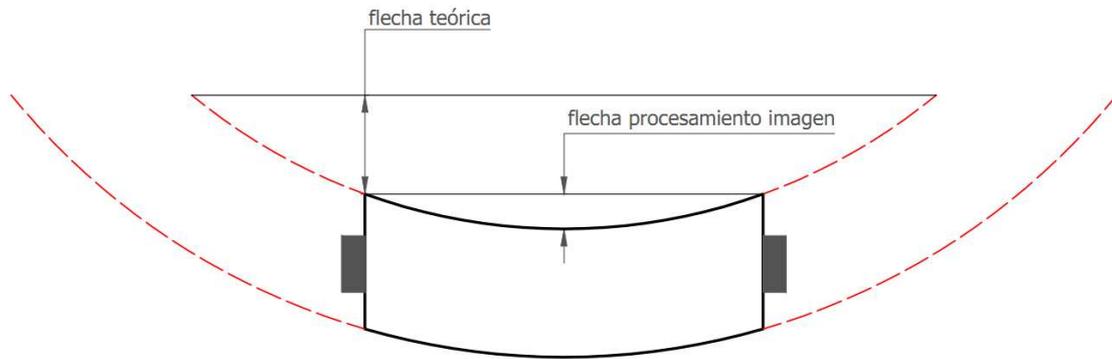


Figura 41. Esquema representativo del método de procesamiento indirecto.

Lo que haremos será medir la flecha entre las marcas (flecha procesamiento de imagen mostrada en la *figura 41*) negras situadas para tal efecto y añadirle la flecha teórica en la situación de la marca para conjuntamente formar la flecha indirecta. Con ello obtendremos el valor total de la flecha que tendrá una componente teórica y otra propia del desarrollo de procesamiento de imagen:



$$F_{indirecta} = F_{parcial} + F_{matlab} \quad (33)$$

CARGA (N)	TEÓRICO PARCIAL	MATLAB	FLECHA INDIRECTA
1000	0,101	0,488	0,589
2000	0,202	0,503	0,705
3000	0,303	0,536	0,839
4000	0,404	0,682	1,086
5000	0,505	0,714	1,219
6000	0,606	0,786	1,392
7000	0,707	0,796	1,503
8000	0,808	0,804	1,612
9000	0,909	0,81	1,719
10000	1,01	0,922	1,932
11000	1,111	0,929	2,04
12000	1,212	0,929	2,141
13000	1,313	0,946	2,259
14000	1,414	0,951	2,365
15000	1,515	0,965	2,48
16000	1,616	1,045	2,661
17000	1,717	1,163	2,88
18000	1,818	1,298	3,116

Tabla 19. Flecha indirecta perfil IPN 80.

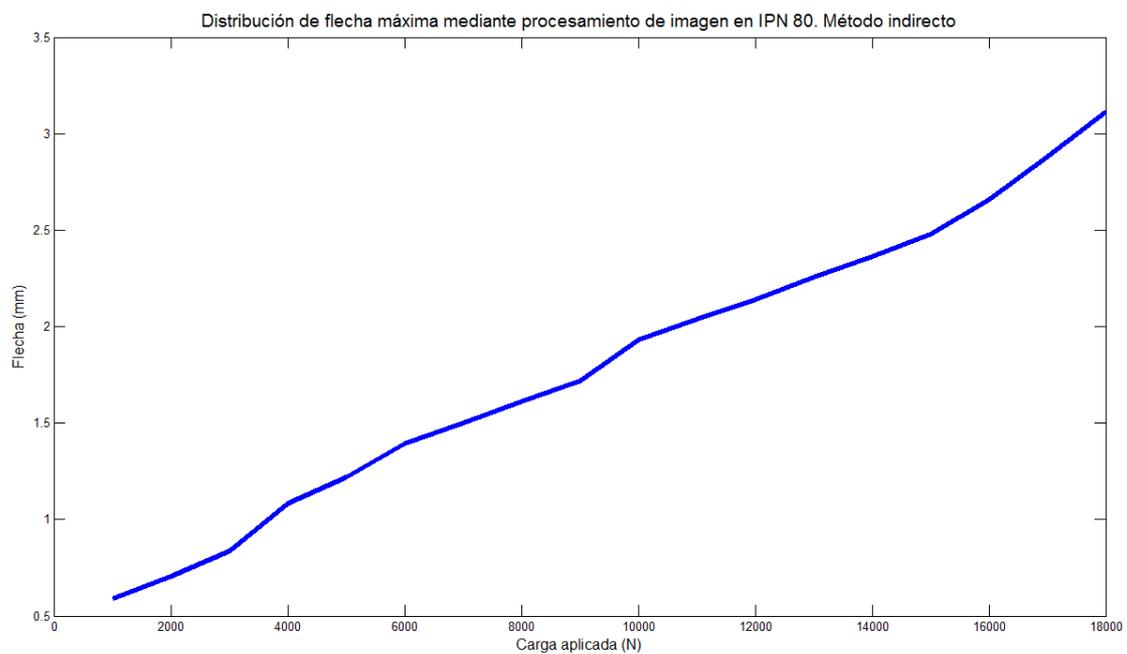


Figura 42. Representación flecha procesamiento imagen en IPN 80. Método indirecto.



Como podemos observar a partir de los datos representados en la *tabla 19*, la flecha parcial medida por el programa de procesamiento de imagen cuando la carga no es significativa triplica a la flecha teórica parcial que tiene lugar en la marca negra. Esto nos da una idea de la imprecisión del procesamiento de imagen cuando las deformaciones son de una precisión muy inferior a la que nos confieren las máquinas fotográficas convencionales. No obstante, y una vez que la deformación se vuelve significativa debido al aumento de la carga aplicada, empezamos a obtener valores más cercanos a la realidad. Esto se debe a que aunque la precisión de un píxel no sea muy buena, ya tenemos un margen para trabajar y se puede apreciar que se obtienen resultados cuantitativamente más cercanos a la teoría. Ello se debe a que ya no todo depende de la vinculación de un único píxel a 0 ó 1 en el procesamiento de imagen mediante segmentación por umbral, sino que ya entran en juego un grupo de píxeles de los cuales uno es un porcentaje, sin representar su totalidad.



4.4.1.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

CARGA (N)	TEÓRICO PARCIAL	MATLAB	FLECHA INDIRECTA	TEÓRICO	ERROR
1000	0,101	0,488	0,589	0,128	360%
2000	0,202	0,503	0,705	0,255	176%
3000	0,303	0,536	0,839	0,383	119%
4000	0,404	0,682	1,086	0,51	113%
5000	0,505	0,714	1,219	0,638	91%
6000	0,606	0,786	1,392	0,765	82%
7000	0,707	0,796	1,503	0,893	68%
8000	0,808	0,804	1,612	1,02	58%
9000	0,909	0,81	1,719	1,148	50%
10000	1,01	0,922	1,932	1,275	52%
11000	1,111	0,929	2,04	1,403	45%
12000	1,212	0,929	2,141	1,53	40%
13000	1,313	0,946	2,259	1,658	36%
14000	1,414	0,951	2,365	1,785	32%
15000	1,515	0,965	2,48	1,913	30%
16000	1,616	1,045	2,661	2,04	30%
17000	1,717	1,163	2,88	2,168	33%
18000	1,818	1,298	3,116	2,295	36%

Tabla 20. Comparación entre método indirecto y flecha máxima teórica.

Como era esperado tras la observación de los resultados obtenidos del procesamiento de imagen, observamos que con cargas pequeñas se producen flechas insignificantes y ello produce que la conversión de un píxel en 1 (perfil) ó en 0 (ausencia de perfil) lo signifique todo y por ello obtenemos inicialmente desviaciones tan elevadas.

A medida que aumentamos la carga aplicada se producen deformaciones significativas del orden de los milímetros, donde aunque la precisión con la que trabajo



no es muy buena, entramos en una región de trabajo con posibilidades de obtención de resultados cercanos a los teóricos produciéndose una desviación del orden del 40%. Esto es debido a que ya no es sólo un píxel el que varía de posición, son un grupo de píxeles y entonces la conversión de uno de ellos en 0 ó 1 deja de tener el peso predominante para marcar simplemente un grado de desviación.

CARGA (N)	TEÓRICO PARCIAL	MATLAB	FLECHA INDIRECTA	REAL	ERROR
1000	0,101	0,488	0,589	0,137	330%
2000	0,202	0,503	0,705	0,293	141%
3000	0,303	0,536	0,839	0,421	99%
4000	0,404	0,682	1,086	0,537	102%
5000	0,505	0,714	1,219	0,691	76%
6000	0,606	0,786	1,392	0,832	67%
7000	0,707	0,796	1,503	0,965	56%
8000	0,808	0,804	1,612	1,103	46%
9000	0,909	0,81	1,719	1,231	40%
10000	1,01	0,922	1,932	1,382	40%
11000	1,111	0,929	2,04	1,507	35%
12000	1,212	0,929	2,141	1,651	30%
13000	1,313	0,946	2,259	1,792	26%
14000	1,414	0,951	2,365	1,918	23%
15000	1,515	0,965	2,48	2,061	20%
16000	1,616	1,045	2,661	2,189	22%
17000	1,717	1,163	2,88	2,329	24%
18000	1,818	1,298	3,116	2,446	27%

Tabla 21. Comparación entre método indirecto y flecha máxima real.

Observamos que se producen inicialmente unos errores grandes en relación al valor teórico y real en el ensayo. Ello se debe principalmente a que al ser la carga aplicada tan pequeña, produce deformaciones que debido a la precisión con la que



estamos trabajando no es posible apreciarla en una diferencia de píxeles cuantitativa y ello produce unos errores tan exagerados.

A medida que aumentamos la carga aplicada y por tanto se va haciendo mayor la deformación, empieza a ser posible apreciar en medida de píxeles ese incremento de flecha y por tanto el error se estabiliza. Es un error absoluto bastante alto pero debemos tener en cuenta que estamos tratando deformaciones del orden de 2 mm en un perfil de 1 metro de longitud. En vigas mayores se producirían deformaciones mayores y obtendríamos errores menores.

4.4.1.2 MÉTODO DIRECTO

En el proceso de extracción de datos mediante un método indirecto trabajaremos con las imágenes tomadas de la *cámara 2*, cuya imagen representativa es la que sigue:



Figura 43. Imagen representativa obtenida mediante cámara 2.



A pesar de que en la imagen da la sensación de que el perfil está inclinado hacia la derecha, es un efecto óptico puesto que la cámara se situó sobre un trípode con regulación por nivel. Sin embargo, aunque este error no exista, sí tenemos nuevamente el efecto de distorsión de barril propio del gran angular que luego comentaré cómo soluciono ese problema. En la *figura 43* vemos la mitad del perfil ensayado y por tanto sólo podremos valorar los datos hasta esta ubicación.

Con el fin de extraer los datos mediante este método directo, vamos a realizar un pre-tratamiento muy simple que consiste en cortar la fotografía por el punto de tangencia entre el rodillo superior y el perfil. Este hecho lo he realizado por el punto que me ha parecido correcto ya que no tengo manera de calcularlo exactamente debido a la perspectiva de la fotografía. Es un hecho que no tiene gran relevancia pues los valores de flecha a una pequeña distancia del centro del vano es muy próxima a los valores de flecha máxima que se producen en este punto. Con el programa de procesamiento de imagen obtenemos una matriz lógica que voy a esquematizar como sigue:

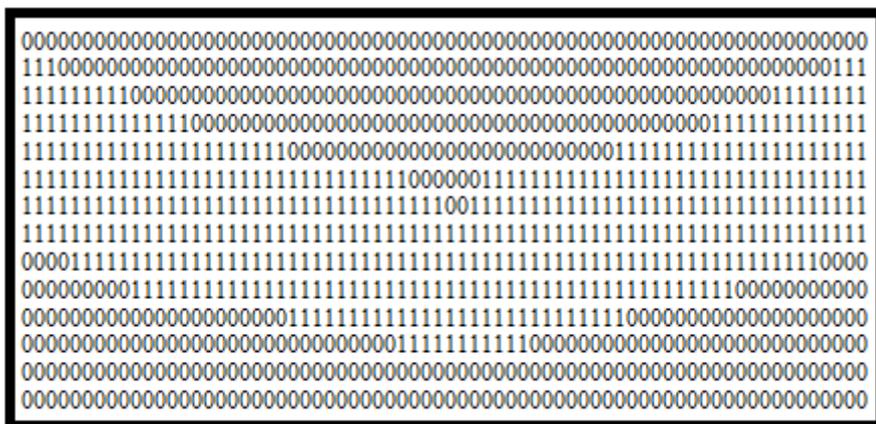


Figura 44. Esquema de matriz lógica.

Con el objetivo de solucionar el problema de la distorsión de barril decido aplicar un factor de corrección basado en el tamaño de píxel por columna. Este factor de corrección lo efectúo en base a la suma del número de 1 por columna ya que esta



medida es constante y lo que hago es dividir el número de unos por columna que hay de perfil entre 80 mm para obtener el valor del píxel por columna.

Para obtener los valores numéricos de la flecha en los puntos deseados a lo largo del perfil trabajo con el vector “wadimensional” que me proporciona el programa de procesamiento de imagen. Este vector me informa de la suma de ceros que tengo en cada columna contados a partir del punto máximo del perfil, es decir, del primer uno que encuentra contando por filas. Nos indicaría la cantidad de ceros por columna mostrados en color rojo en la *figura 45*. Por tanto, extrayendo este vector y multiplicando componente a componente por el factor de corrección del valor de píxel por columna con el que trabaja el programa de procesamiento de imagen obtengo las flechas a lo largo de toda la longitud (L) del perfil. Como sería imposible evaluar los 3233 píxeles que genera el programa y he decidido trabajar con las distancias al apoyo de 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, extraigo de este vector producto las componentes (1292, 1938, 2584, 3233) y estos serán los valores de la flecha en los puntos mencionados.



Figura 45. Representación de la información del vector “wadimensional”



Muestro a continuación los resultados obtenidos mediante este método directo:

CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA MATLAB (mm)
1000	200	0,0000
	300	0,0000
	400	0,0000
	500	0,0000
2000	200	0,0000
	300	0,0000
	400	-0,1406
	500	0,1411
3000	200	0,0000
	300	0,0000
	400	0,0000
	500	0,1411
4000	200	0,2899
	300	0,2842
	400	0,4218
	500	0,7054
5000	200	0,2899
	300	0,4263
	400	0,4218
	500	0,7054
6000	200	0,7247
	300	0,8526
	400	0,9842
	500	0,1411

Tabla 22. Distribución de flecha procesada en perfil IPN 80. Método directo.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA MATLAB (mm)
7000	200	0,2899
	300	0,2842
	400	0,4218
	500	0,7054
8000	200	0,2899
	300	0,4263
	400	0,4218
	500	0,7054
9000	200	0,7247
	300	0,8526
	400	0,9842
	500	0,1411
10000	200	0,4348
	300	0,5684
	400	0,7030
	500	0,8465
11000	200	0,4000
	300	0,6000
	400	0,7000
	500	1,1000
12000	200	0,1000
	300	1,3000
	400	1,4000
	500	1,3000

Tabla 23. Distribución de flecha procesada en perfil IPN 80. Método directo (II).



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA MATLAB (mm)
13000	200	1,0000
	300	1,3000
	400	1,4000
	500	1,3000
14000	200	0,6000
	300	0,9000
	400	1,0000
	500	1,4000
15000	200	0,7000
	300	1,0000
	400	1,1000
	500	1,4000
16000	200	0,9000
	300	1,1000
	400	1,4000
	500	1,6000
17000	200	4,6000
	300	4,8000
	400	5,1000
	500	5,5000
18000	200	1,2000
	300	1,6000
	400	1,8000
	500	2,1000

Tabla 24. Distribución de flecha procesada en perfil IPN 80. Método directo (III).

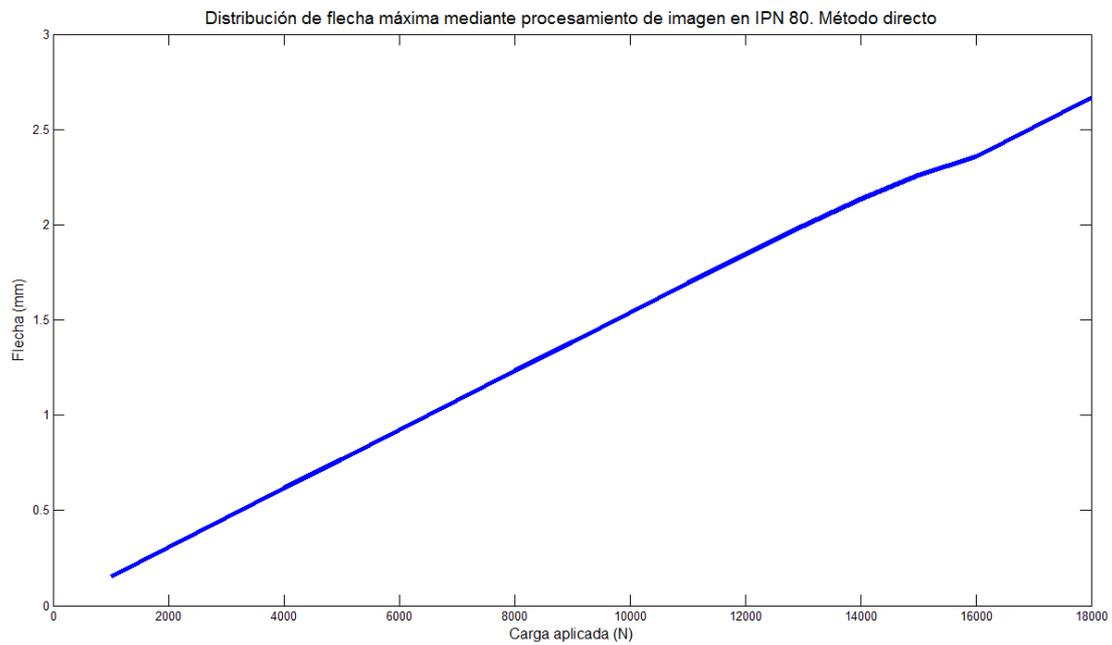


Figura 46. Representación de flecha máxima procesada en IPN 80. Método directo.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA MATLAB (mm)	ERROR
1000	200	0,072	0,0000	7%
	300	0,101	0,0000	10%
	400	0,120	0,0000	12%
	500	0,128	0,0000	13%
2000	200	0,145	0,0000	15%
	300	0,202	0,0000	20%
	400	0,241	-0,1406	38%
	500	0,255	0,1411	11%
3000	200	0,217	0,0000	22%
	300	0,303	0,0001	30%
	400	0,361	0,0001	36%
	500	0,283	0,1411	14%
4000	200	0,29	0,2899	0%
	300	0,404	0,2842	12%
	400	0,481	0,4218	6%
	500	0,51	0,7054	20%
5000	200	0,362	0,2899	7%
	300	0,505	0,4263	8%
	400	0,602	0,4218	18%
	500	0,638	0,7054	7%
6000	200	0,435	0,7247	29%
	300	0,606	0,8526	25%
	400	0,722	0,9842	26%
	500	0,765	0,1411	62%
7000	200	0,507	0,2899	22%
	300	0,707	0,2842	42%
	400	0,843	0,4218	42%
	500	0,893	0,7054	19%
8000	200	0,579	0,2899	29%
	300	0,808	0,4263	38%
	400	0,963	0,4218	54%
	500	1,02	0,7054	31%
9000	200	0,652	0,7247	7%
	300	0,909	0,8526	6%
	400	1,083	0,9842	10%
	500	1,148	0,1411	101%

Tabla 25. Comparación entre flecha teórica y procesada en perfil IPN 80.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA MATLAB (mm)	ERROR
10000	200	0,724	0,4348	29%
	300	1,010	0,5684	44%
	400	1,204	0,7030	50%
	500	1,275	0,8465	43%
11000	200	0,797	0,4000	40%
	300	1,111	0,6000	51%
	400	1,324	0,7000	62%
	500	1,403	1,1000	30%
12000	200	0,869	0,1000	77%
	300	1,212	1,3000	9%
	400	1,444	1,4000	4%
	500	1,53	1,3000	23%
13000	200	0,942	1,0000	6%
	300	1,313	1,3000	1%
	400	1,565	1,4000	17%
	500	1,658	1,3000	36%
14000	200	1,014	0,6000	41%
	300	1,414	0,9000	51%
	400	1,685	1,0000	69%
	500	1,785	1,4000	39%
15000	200	1,086	0,7000	39%
	300	1,515	1,0000	52%
	400	1,806	1,1000	71%
	500	1,913	1,4000	51%
16000	200	1,159	0,9000	26%
	300	1,616	1,1000	52%
	400	1,926	1,4000	53%
	500	2,04	1,6000	44%
17000	200	1,231	4,6000	337%
	300	1,717	4,8000	308%
	400	2,046	5,1000	305%
	500	2,168	5,5000	333%
18000	200	1,304	1,2000	10%
	300	1,818	1,6000	22%
	400	2,167	1,8000	37%
	500	2,295	2,1000	20%

Tabla 26. Comparación entre flecha teórica y procesada en perfil IPN 80 (II).



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA SIMULACIÓN (mm)	FLECHA MATLAB (mm)	ERROR
1000	200	0,0899	0,0000	9%
	300	0,1239	0,0000	12%
	400	0,1456	0,0000	15%
	500	0,1539	0,0000	15%
2000	200	0,1798	0,0000	18%
	300	0,0000	0,0000	0%
	400	0,2912	-0,1406	43%
	500	0,3078	0,1411	17%
3000	200	0,2697	0,0001	27%
	300	0,3717	0,0001	37%
	400	0,4368	0,0001	44%
	500	0,4617	0,1411	32%
4000	200	0,3597	0,2899	7%
	300	0,4956	0,2842	21%
	400	0,5824	0,4218	16%
	500	0,6156	0,7054	9%
5000	200	0,4496	0,2899	16%
	300	0,6196	0,4263	19%
	400	0,7280	0,4218	31%
	500	0,7695	0,7054	6%
6000	200	0,5395	0,7247	19%
	300	0,7436	0,8526	11%
	400	0,8736	0,9842	11%
	500	0,9234	0,1411	78%
7000	200	0,6295	0,2899	34%
	300	0,8671	0,2842	58%
	400	1,0192	0,4218	60%
	500	1,0773	0,7054	37%
8000	200	0,7194	0,2899	43%
	300	0,9915	0,4263	57%
	400	1,1648	0,4218	74%
	500	1,2312	0,7054	53%
9000	200	0,8093	0,7247	8%
	300	1,1151	0,8526	26%
	400	1,3104	0,9842	33%
	500	1,3851	0,1411	124%

Tabla 27. Comparación entre flecha simulada y procesada en perfil IPN 80.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA SIMULACIÓN (mm)	FLECHA MATLAB (mm)	ERROR
10000	200	0,8994	0,4348	46%
	300	1,2390	0,5684	67%
	400	1,4560	0,7030	75%
	500	1,5390	0,8465	69%
11000	200	0,9892	0,4000	59%
	300	1,3629	0,6000	76%
	400	1,6016	0,7000	90%
	500	1,6929	1,1000	59%
12000	200	1,0791	0,1000	98%
	300	1,4868	1,3000	19%
	400	1,7472	1,4000	35%
	500	1,8453	1,3000	55%
13000	200	1,1690	1,0000	17%
	300	1,6107	1,3000	31%
	400	1,8928	1,4000	49%
	500	1,9953	1,3000	70%
14000	200	1,2590	0,6000	66%
	300	1,7346	0,9000	83%
	400	2,0384	1,0000	104%
	500	2,1342	1,4000	73%
15000	200	1,3489	0,7000	65%
	300	1,8585	1,0000	86%
	400	2,1840	1,1000	108%
	500	2,2593	1,4000	86%
16000	200	1,4388	0,9000	54%
	300	1,9824	1,1000	88%
	400	2,3296	1,4000	93%
	500	2,3580	1,6000	76%
17000	200	1,5288	4,6000	307%
	300	2,1063	4,8000	269%
	400	2,4752	5,1000	262%
	500	2,5125	5,5000	299%
18000	200	1,6187	1,2000	42%
	300	2,2302	1,6000	63%
	400	2,6208	1,8000	82%
	500	2,6693	2,1000	57%

Tabla 28. Comparación entre flecha simulada y procesada en perfil IPN 80 (II).



La observación de las *tablas 25, 26, 27 y 28* nos puede llevar a hacernos una idea de que las desviaciones mediante este método son alternativas debido a los distintos porcentajes de error. Eso es incorrecto ya que los datos de desviación hay que compararlos para una misma distancia al apoyo. De esta manera observamos que la desviación sigue una continuidad más que aceptable aún teniendo en determinados momentos puntos de desviaciones exageradas. Hay que decir que estamos trabajando en unas condiciones y con una precisión que no son las recomendadas. Estoy seguro de que a la luz de los resultados manejados estos serían problemas que se solucionarían simplemente con la posibilidad de obtener unas fotografías en unas condiciones de situación óptima sin tener que recurrir a otro método que el desarrollo normal del programa de procesamiento de imagen.

Lo más importante para obtener una idea de la potente tecnología de procesamiento de imagen es observar cómo la flecha mediante este método se distribuye de forma proporcional a los valores teóricos, es decir, aumenta cuando tienen que aumentar y no lo hace de cualquier forma sino que lo hace proporcionalmente aunque la desviación sea mayor o menor.

También hay que comentar que los datos han sido extraídos en columnas específicas en intervalos de 100 mm ante la imposibilidad de procesar todos los datos. Mediante el desarrollo del programa general de procesamiento de imagen, sin tener que acudir a ningún método específico, obtendríamos una gráfica con la representación con los resultados de todas las columnas y desviaciones exageradas puntuales serían solventadas por la continuidad de la gráfica.



4.4.2 RESULTADOS GENERALES

CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA SIMULACIÓN (mm) / Desv. (%)	FLECHA MATLAB (mm) / Desv. (%)
1000	200	0,072	0,0899 / 25%	0 / -100%
	300	0,101	0,1239 / 23%	0 / -100%
	400	0,120	0,1456 / 21%	0 / -100%
	500	0,128	0,1539 / 20%	0 / -100%
2000	200	0,145	0,1798 / 24%	0 / -100%
	300	0,202	0,2315 / 15%	0 / -100%
	400	0,241	0,2912 / 21%	0,1406 / -158%
	500	0,255	0,3078 / 21%	0,1411 / -45%
3000	200	0,217	0,2697 / 24%	0 / -100%
	300	0,303	0,3717 / 23%	0 / -100%
	400	0,361	0,4368 / 21%	0 / -100%
	500	0,283	0,4617 / 63%	0,1411 / -50%
4000	200	0,29	0,3597 / 24%	0,2899 / 0%
	300	0,404	0,4956 / 23%	0,2842 / -30%
	400	0,481	0,5824 / 21%	0,4218 / -12%
	500	0,51	0,6156 / 21%	0,7054 / 38%
5000	200	0,362	0,4496 / 24%	0,2899 / -20%
	300	0,505	0,6196 / 23%	0,4263 / -16%
	400	0,602	0,7280 / 21%	0,4218 / -30%
	500	0,638	0,7695 / 21%	0,7054 / 11%
6000	200	0,435	0,5395 / 24%	0,7247 / 67%
	300	0,606	0,7436 / 23%	0,8526 / 41%
	400	0,722	0,8736 / 21%	0,9842 / 36%
	500	0,765	0,9234 / 21%	0,1411 / -82%
7000	200	0,507	0,6295 / 24%	0,2899 / -43%
	300	0,707	0,8671 / 23%	0,2842 / -60%
	400	0,843	1,0192 / 21%	0,4218 / -50%
	500	0,893	1,0773 / 21%	0,7054 / -21%
8000	200	0,579	0,7194 / 24%	0,2899 / -50%
	300	0,808	0,9915 / 23%	0,4263 / -47%
	400	0,963	1,1648 / 21%	0,4218 / -56%
	500	1,02	1,2312 / 21%	0,7054 / -31%
9000	200	0,652	0,8093 / 24%	0,7247 / 11%
	300	0,909	1,1151 / 23%	0,8526 / -6%
	400	1,083	1,3104 / 21%	0,9842 / -9%
	500	1,148	1,3851 / 21%	0,1411 / -81%

Tabla 29. Comparación de flecha teórica, simulada y procesada en perfil IPN 80.



CARGA (N)	DISTANCIA AL APOYO (mm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA SIMULACIÓN (mm) / Desv.(%)	FLECHA MATLAB (mm) / Desv.(%)
10000	200	0,724	0,8994 / 24%	0,4348 / -40%
	300	1,010	1,2390 / 23%	0,5684 / -44%
	400	1,204	1,4560 / 21%	0,7030 / -42%
	500	1,275	1,5390 / 21%	0,8465 / -34%
11000	200	0,797	0,9892 / 24%	0,40 / -50%
	300	1,111	1,3629 / 23%	0,60 / -46%
	400	1,324	1,6016 / 21%	0,70 / -47%
	500	1,403	1,6929 / 21%	1,10 / -22%
12000	200	0,869	1,0791 / 24%	0,10 / -88%
	300	1,212	1,4868 / 23%	1,30 / 7%
	400	1,444	1,7472 / 21%	1,40 / -3%
	500	1,53	1,8453 / 21%	1,30 / -15%
13000	200	0,942	1,1690 / 24%	1,0 / 6%
	300	1,313	1,6107 / 23%	1,30 / -1%
	400	1,565	1,8928 / 21%	1,40 / -11%
	500	1,658	1,9953 / 20%	1,30 / -22%
14000	200	1,014	1,2590 / 24%	0,60 / -41%
	300	1,414	1,7346 / 23%	0,90 / -36%
	400	1,685	2,0384 / 21%	1,0 / -41%
	500	1,785	2,1342 / 20%	1,40 / -22%
15000	200	1,086	1,3489 / 24%	0,70 / -36%
	300	1,515	1,8585 / 23%	1,0 / -34%
	400	1,806	2,1840 / 21%	1,10 / -39%
	500	1,913	2,2593 / 18%	1,40 / -27%
16000	200	1,159	1,4388 / 24%	0,90 / -22%
	300	1,616	1,9824 / 23%	1,10 / -32%
	400	1,926	2,3296 / 21%	1,40 / -27%
	500	2,04	2,3580 / 16%	1,60 / -22%
17000	200	1,231	1,5288 / 24%	4,60 / 274%
	300	1,717	2,1063 / 23%	4,80 / 180%
	400	2,046	2,4752 / 21%	5,1 / 149%
	500	2,168	2,5125 / 16%	5,5 / 154%
18000	200	1,304	1,6187 / 24%	1,2 / -8%
	300	1,818	2,2302 / 23%	1,6 / -12%
	400	2,167	2,6208 / 21%	1,8 / -17%
	500	2,295	2,6693 / 16%	2,1 / -8%

Tabla 30. Comparación de flecha teórica, simulada y procesada en perfil IPN 80 (II).

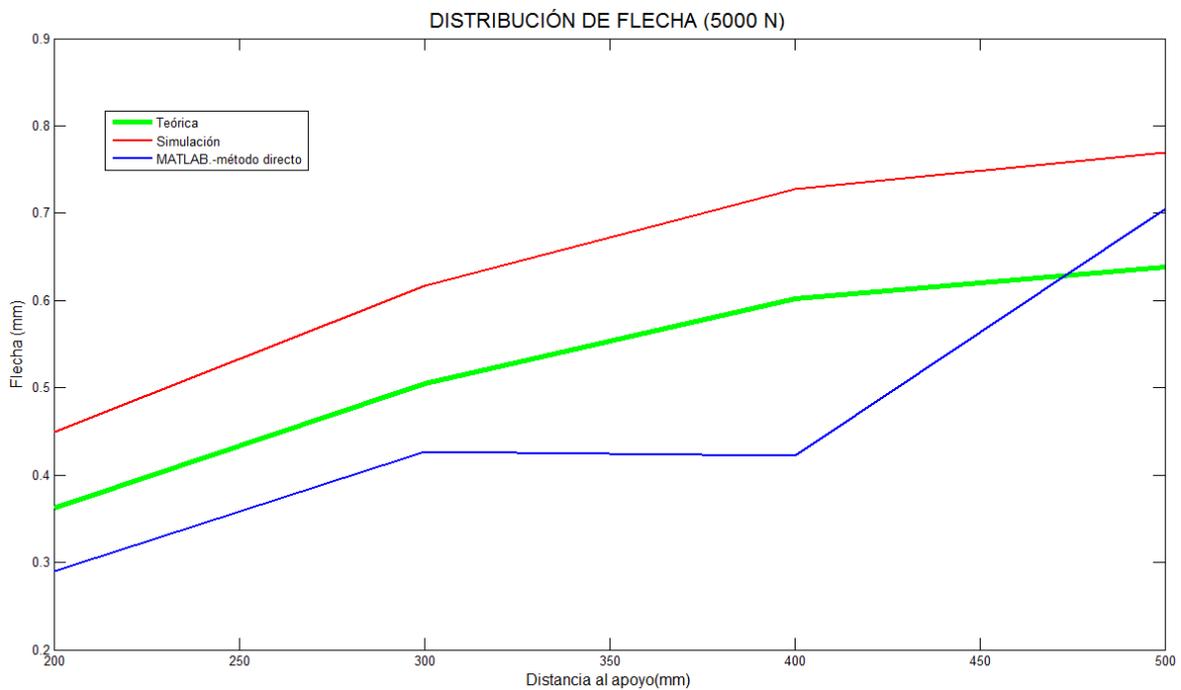


Figura 47. Distribución de flecha a lo largo del perfil IPN 80 a 5.000 N de carga.

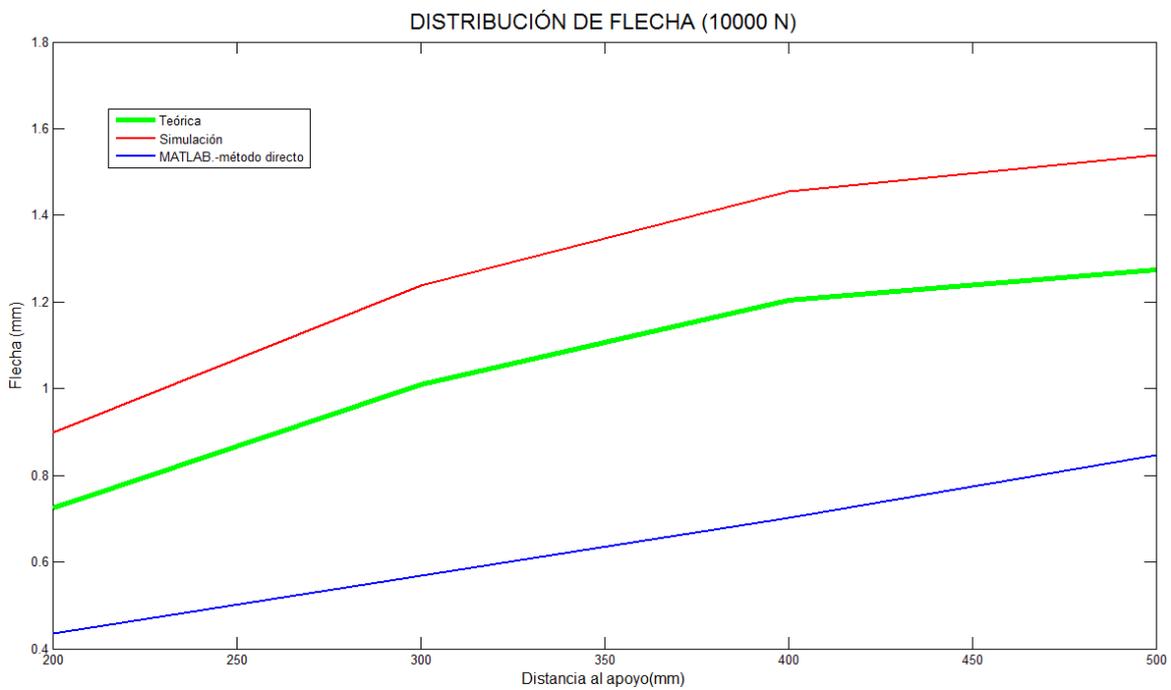


Figura 48. Distribución de flecha a lo largo del perfil IPN 80 a 10.000 N de carga.

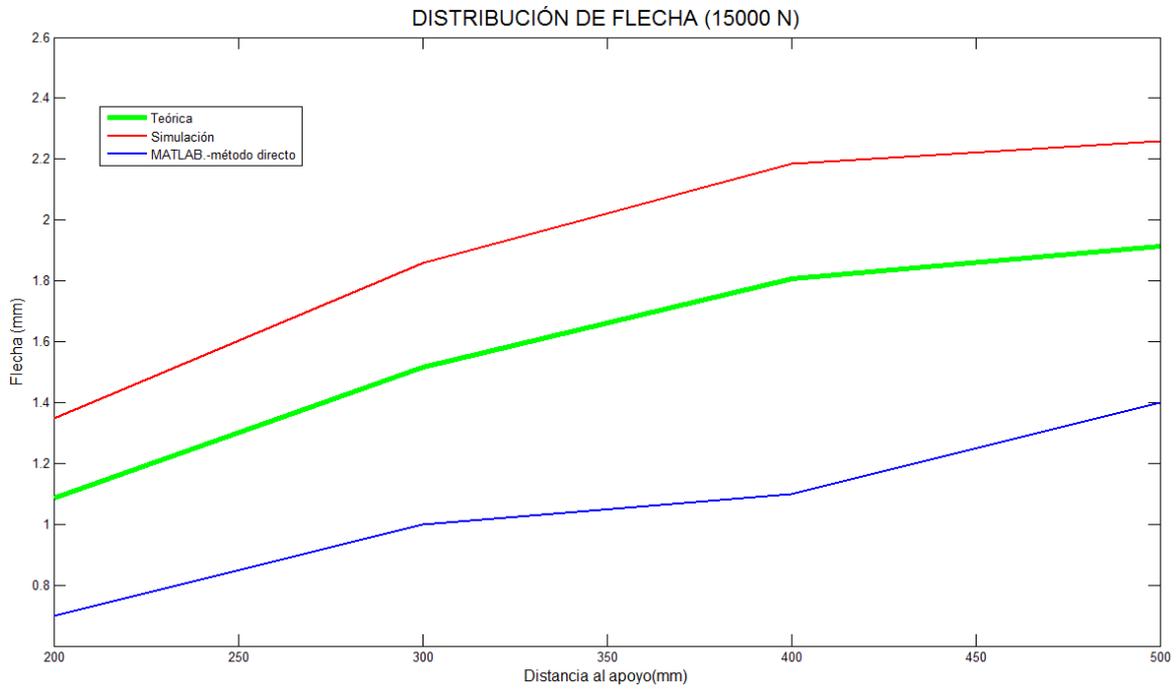


Figura 49. Distribución de flecha a lo largo del perfil IPN 80 a 15.000 N de carga.

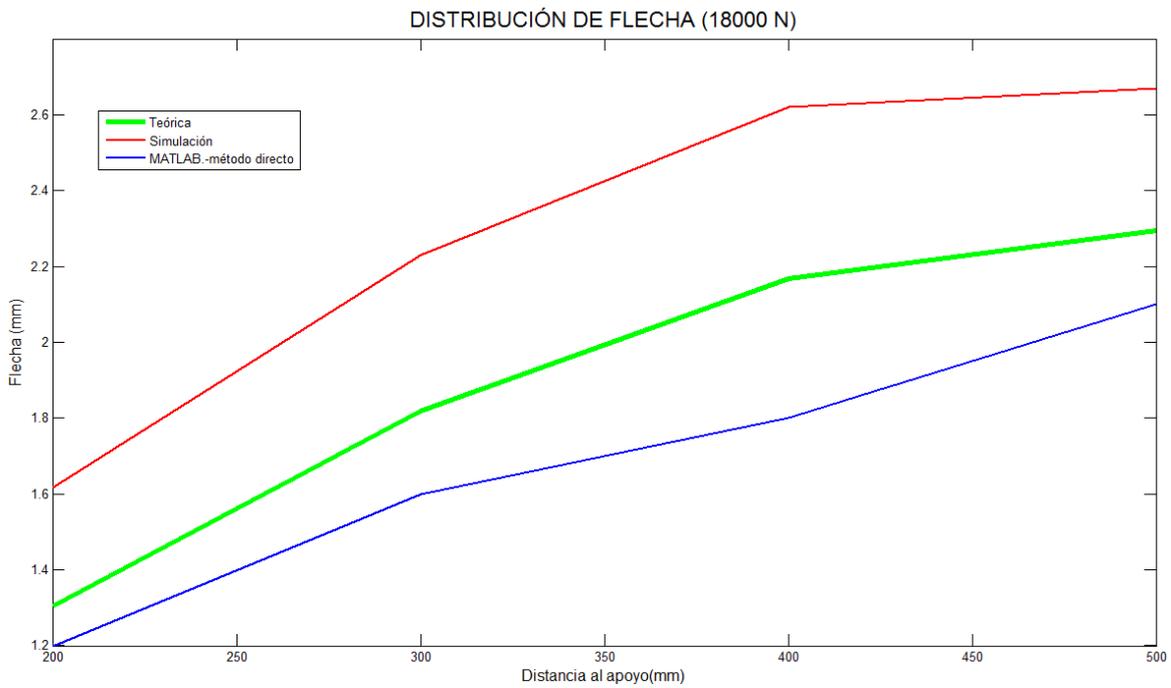


Figura 50. Distribución de flecha a lo largo del perfil IPN 80 a 18.000 N de carga.



CARGA (N)	TEÓRICA (mm)	REAL (mm) / Desv. (%)	SIMULACIÓN (mm) / Desv. (%)	MATLAB 1 (mm) / Desv. (%)	MATLAB 2 (mm) / Desv. (%)
1000	0,128	0,137 / 7%	0,1539 / 20%	0,589 / 360%	0 / -100%
2000	0,255	0,293 / 15%	0,3078 / 21%	0,705 / 176%	0,1411 / -45%
3000	0,383	0,421 / 10%	0,4617 / 21%	0,839 / 119%	0,1411 / -63%
4000	0,51	0,537 / 5%	0,6156 / 21%	1,086 / 113%	0,7054 / 38%
5000	0,638	0,691 / 8%	0,7695 / 21%	1,219 / 91%	0,7054 / 11%
6000	0,765	0,832 / 9%	0,9234 / 21%	1,392 / 82%	0,1411 / -82%
7000	0,893	0,965 / 8%	1,0773 / 21%	1,503 / 68%	0,7054 / -21%
8000	1,02	1,103 / 8%	1,2312 / 21%	1,612 / 58%	0,7054 / -31%
9000	1,148	1,231 / 7%	1,3851 / 21%	1,719 / 50%	0,1411 / -88%
10000	1,275	1,382 / 8%	1,539 / 21%	1,932 / 52%	0,8465 / -34%
11000	1,403	1,507 / 7%	1,6929 / 21%	2,04 / 45%	1,1 / -22%
12000	1,53	1,651 / 8%	1,8453 / 21%	2,141 / 40%	1,3 / -15%
13000	1,658	1,792 / 8%	1,9953 / 20%	2,259 / 36%	1,4 / -16%
14000	1,785	1,981 / 11%	2,1342 / 20%	2,365 / 32%	1,4 / -22%
15000	1,913	2,061 / 8%	2,2593 / 18%	2,48 / 30%	1,4 / -27%
16000	2,04	2,189 / 7%	2,358 / 16%	2,661 / 30%	1,6 / -22%
17000	2,168	2,329 / 7%	2,5125 / 16%	2,88 / 33%	5,5 / 154%
18000	2,295	2,446 / 7%	2,6693 / 16%	3,116 / 36%	2,1 / -8%

Tabla 31. Comparación de flecha máxima teórica, real, simulada y procesada por método indirecto y directo.

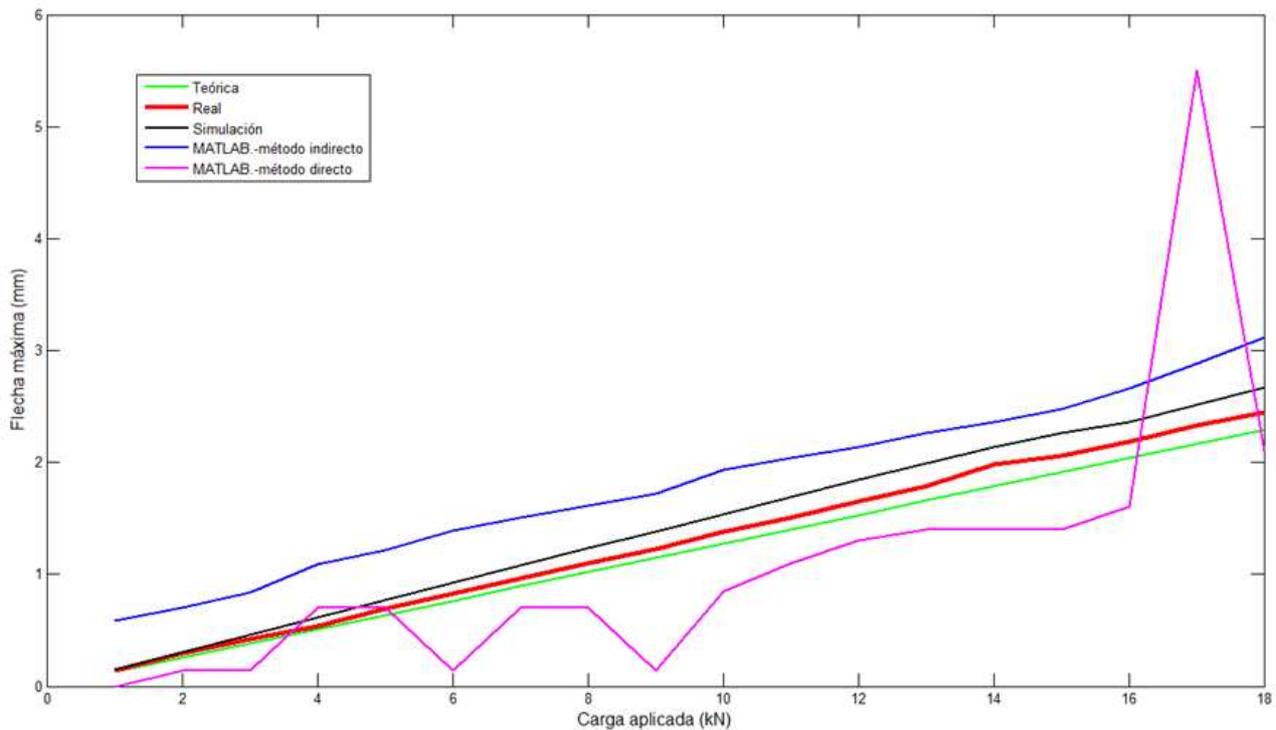


Figura 51. Gráfica de comparación de flecha máxima.

En la *figura 51* podemos observar que los métodos testados en la actualidad tienen una muy buena precisión con una exactitud más que aceptable.

Sin embargo, fijándonos en el desarrollo de los métodos de procesamiento de imagen mediante MATLAB vemos que no existe esa precisión. Mediante el método indirecto obtenemos unos resultados más cercanos a la realidad aunque la desviación respecto de la flecha máxima teórica es mayor que en el resto de los métodos de análisis.

Mediante el método directo de procesamiento de análisis se aprecia a simple vista que no tiene buena precisión y que se aleja puntualmente de los valores teóricos. A pesar de ello, cabe señalar que a medida que vamos aumentando la carga, alrededor de los 10.000 N, empezamos a obtener unos resultados más constantes y que no difieren en exceso de los teóricos. Lo más reseñable es que a partir de este punto de carga donde las



deformaciones son del orden del milímetro, obtenemos una secuencia ascendente. La gráfica puede llevarnos a error ya que en el punto de carga de los 15.000 N se produce un resultado muy exagerado que no debería tenerse en cuenta pues sería rápidamente reconocible además de que es un resultado aislado. Como podemos observar, a medida que aumentamos la carga y las deformaciones se van haciendo más pronunciadas, los resultados obtenidos mediante procesamiento de imagen son mucho mejores.



5. CONCLUSIONES

Actualmente los métodos de simulación por computadora ya están muy desarrollados y son métodos de confianza y de gran uso a la hora de conocer el comportamiento mecánico de una estructura previamente a su ejecución. Son métodos muy testados y cuyos resultados se aproximan mucho a los valores teóricos, además de proporcionar gran cantidad de variedad tanto en las estructuras a simular como en las hipótesis de carga a aplicar.

Hoy en día y aplicada a medida de deformaciones tan pequeñas, la tecnología de procesamiento de imagen no es una tecnología de confianza pues las resoluciones de las cámaras convencionales actuales nos ofrecen una resolución insuficiente para trabajar a este grado de detalle. Sin embargo, existen en el mercado máquinas capaces de otorgar precisiones por debajo de la décima de milímetro como escáneres con los que trabajaríamos en niveles donde la diferencia de un píxel no lo significase todo, pudiendo en este caso considerar la tecnología de procesamiento de imagen como una opción más para solucionar problemas de muy variadas características.

En un plazo corto de tiempo puede ser una tecnología útil para aquellos usuarios que no se manejan con comodidad dentro de los programas de CAD, pues tendrán en esta tecnología una alternativa simple y eficaz para obtener y poder procesar los resultados de deformaciones de flecha.

Después de haber realizado este estudio, estoy en disposición de afirmar que los métodos de simulación son una herramienta confiable y que la tecnología de procesamiento de imágenes es una tecnología potente que está en desarrollo y de la cual podemos esperar grandes aplicaciones.



6. BIBLIOGRAFÍA

Libro: BUSTAMANTE FIALHO, Arivelto, SolidWorks Premium 2009. Teoría e Práctica no Desenvolvimento de Produtos Industriais. Plataforma para projetos CAD/CAE/CAM, Érica LTDA. São Paulo, 2009, ISBN: 978-85-365-0249-6.

Libro: BUSTAMANTE FIALHO, Arivelto, Cosmos. Plataforma CAE do SolidWorks,, Érica LTDA. São Paulo, 2008. ISBN: 978-85-365-0214-4.

Libro: BLANCHET, GÉRARD y CHARBIT, MAURICE, Digital Signal and Image Processing using MATLAB, Iste, 2001.

Libro: BRIAN R. Hunt, RONALD L. Lipsman Y JONATHAN M. Rosemberg, A Guide to MATLAB for Beginners and Experienced Users, Cambridge, 2005.

Libro: CARRERA AMURIZA, ANA R. Y MARTÍNEZ NEBREDA, MARGARITA, Introducción a MATLAB y a la Creación de Interfaces Gráficas, Universidad del País Vasco, 2004.

Libro: DEL RIO CIDONCHA, M.G., GUINEA PEÑATE, M., MARTINEZ LOMAS, M.E., MARTINEZ PALACOS, J. y PÉREZ DÍAS, S., El Libro de Catia V6. Módulos Part Design, Wireframe & Surface Design, Assembly Design y Drafting, Tébar, Madrid, 2011, ISBN: 978-84-7360-345-4.

Libro: GARRIDO, J.A. y FOCES, Resistencia de Materiales, Universidad de Valladolid, 1999, ISBN: 978-84776-243-18.

Libro: ODEN J.T., y RIPPERGER, E. A., Mechanics of Elastic Structures, McGraw Hill, 1981.



Libro: PÉREZ LÓPEZ, César, MATLAB a Través de Ejemplos, Garceta Grupo Editorial, 2011, ISBN: 978-84-928-1243-1.

Libro: TIMOSHENKO, S., Resistencia de Materiales, Espasa-Calpe S.A. Madrid, 1957, ISBN: 978-84314-023-10: pp. 129-162.

Libro: ZAMANI, NADER G., Catia V5. FEA Tutorials. Release 20., Schroff Development Corporation Publications, Mission (USA), ISBN: 978-1-58503-654-7.

Publicación Web: Aprenda MATLAB 7.0 como si estuviera en primero.
<<http://etsii.upm.es/ayudainf/Matlab70/matlab70primero.pdf>>

Publicación Web: MATLAB: Introducción al procesamiento de imágenes.
<<http://informatica.uv.es/iiguia/VC/tutorial.pdf>>

Publicación Web: Curso Online de Visión Artificial.
<http://www.wiphala.net/courses/imagen/KAS_IMG/2009-I/index.html>

Publicación Web: Comandos de MATLAB utilizados en el procesamiento de imágenes.
<<http://iaci.unq.edu.ar.pdf>>

Publicación Web: Introducción al Tratamiento de Imágenes.
<http://www.pucp.edu.pe/rpo/pdfs/Curs_Farcy.pdf>

Publicación Web: Teorías de falla bajo cargas estáticas.
<<http://dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Teorasdefallabajocargasestticas.pdf>>

Publicación Web: Ensayo. Construcción de estructuras en acero.
<<http://www.slideshare.net/EddHP/ensayo-construccin-de-estructuras-de-acero-4404531>>



Foro: MATLAB: Procesamiento de Imágenes.

<http://www.lawebdelprogramador.com/foros/Matlab/893978-Procesamiento_de_imagenes_en_matlab.html>

Foro: Programación con MATLAB.

<<http://www.programacion.com/foros/matlab>>

Foro: Procesamiento digital de imágenes.

<<http://www.laneros.com/f67/procesamiento-digital-de-imagenes-medio-de-matlab-7-0-a-96292/>>

Foro: Interfaz Gráfica con MATLAB.

<<http://www.forosdeelectronica.com/f26/interfaz-matlab-52399/>>

Foro: Interfaz Gráfica con MATLAB.

<<http://fcmsanmarcos.foroactivo.com/t35-manual-de-interfaz-grafica-de-usuario-en-matlab>>

Página Web: Código Técnico de la Edificación. DB-SE-A: Acero.

<<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/dbse/se3/>>

Página Web: Teoría de fallas.

<<http://www.mitecnologico.com/iem/Main/TeoriaDeFallas>>

Página Web: Tensión de Von Misses en una viga.

<<http://www.construccion.uniovi.es/escal3d/manuales/Comesc/hoja4.html>>

Página Web: Estructuras metálicas.

<http://www.construmatica.com/construpedia/Estructuras_Met%C3%A1licas>



Página Web: Patología de la edificación. Estructuras metálicas.

< http://es.wikibooks.org/Patología_de_la_edificación/Estructuras_metálicas/Aceros/>

Página Web: Computadoras: Historia.

< <http://www.jimenez-ruiz.es/ernesto/II/Historia/historia.html>>

Página Web: Procesamiento de imágenes con MATLAB.

< <http://es.scribd.com/doc/23371/Procesamiento-de-imagenes-con-Matlab>>

Página Web: Tratamiento Digital de Imágenes.

< <http://www.iit.upcomillas.es/palacios/dip/>>

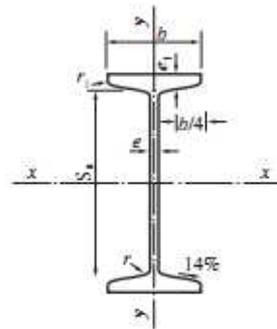
Página Web: Procesamiento digital de imágenes con MATLAB.

< <http://www.slideshare.net/lonely113/procesamiento-digital-de-imagenes-con-matlab>>

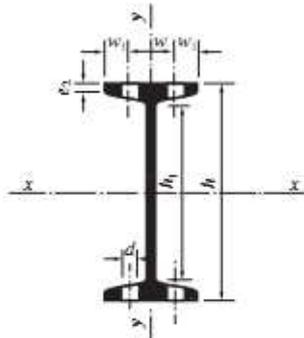


ANEXO A. TABLAS DE PERFILES LAMINADOS.

DOBLE T PERFIL NORMAL (IPN)



IPN	Dimensiones (mm)						Sección A cm ²	Peso P kg/m	Referido al eje x-x		
	h	b	e=r	e ₁	r ₁	h ₁			I _x cm ⁴	W _x cm ³	i _x cm
80	80	42	3,9	5,9	2,3	59	7,58	5,95	77,8	19,5	3,20
100	100	50	4,5	6,8	2,7	75	10,6	8,32	171	34,2	4,01
120	120	58	5,1	7,7	3,1	92	14,2	11,1	328	54,7	4,81
140	140	66	5,7	8,6	3,4	109	18,3	14,4	573	81,9	5,61
160	160	74	6,3	9,5	3,8	125	22,8	17,9	935	117	6,40
180	180	82	6,9	10,4	4,1	142	27,9	21,9	1.450	161	7,20
200	200	90	7,5	11,3	4,5	159	33,5	26,3	2.140	214	8,00
220	220	98	8,1	12,2	4,9	175	39,6	31,1	3.060	278	8,80
240	240	106	8,7	13,1	5,2	192	46,1	36,2	4.250	354	9,59
260	260	113	9,4	14,1	5,6	208	53,4	41,9	5.740	442	10,4
280	280	119	10,1	15,2	6,1	225	61,1	48,0	7.590	542	11,1
300	300	125	10,8	16,2	6,5	241	69,1	54,2	9.800	653	11,9
320	320	131	11,5	17,3	6,9	257	77,8	61,1	12.510	782	12,7
340	340	137	12,2	18,3	7,3	274	86,8	68,1	15.700	923	13,5
360	360	143	13,0	19,5	7,8	290	97,1	76,2	19.610	1.090	14,2
380	380	149	13,7	20,5	8,2	306	107	84,0	24.010	1.260	15,0
400	400	155	14,4	21,6	8,6	323	118	92,6	29.210	1.460	15,7
450	450	170	16,2	24,3	9,7	363	147	115	45.850	2.040	17,7
500	500	185	18,0	27,0	10,8	404	180	141	68.740	2.750	19,6
550	550	200	19,0	30,0	11,9	444	213	167	99.180	3.610	21,6
600	600	215	21,6	32,4	13,0	485	254	199	139.000	4.630	23,4

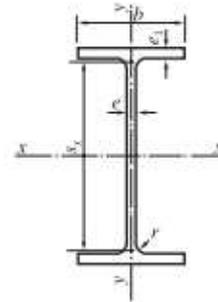


- A = Área de la sección
- I = Momento de inercia
- W = Módulo resistente
- $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ = Radio de giro
- S_x = Momento estático de media sección
- $s_x = \frac{I_x}{S_x}$ = Distancia entre los centros de compresión y tracción
- η = Rendimiento
- u = Superficie lateral por metro lineal

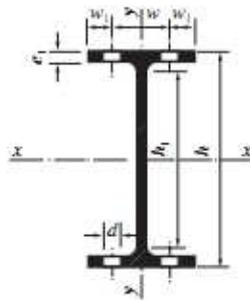
Referido al eje y-y			w mm	w ₁ mm	Ø d mm	e ₂ mm	S _x cm ³	s _x cm	η = W _x /P	u m ² /m	IPN
I _y cm ⁴	W _y cm ³	i _y = i cm									
6,29	3,00	0,91	22	10	—	4,43	11,4	6,84	3,28	0,304	80
12,2	4,88	1,07	28	12	—	5,05	19,9	8,57	4,11	0,370	100
21,5	7,41	1,23	32	14	—	5,67	31,8	10,3	4,91	0,439	120
35,2	10,7	1,40	34	16	11	6,29	47,7	12,0	5,70	0,502	140
54,7	14,8	1,55	40	18	11	6,91	68,0	13,7	6,54	0,575	160
81,3	19,8	1,71	44	19	13	7,53	93,4	15,5	7,35	0,640	180
117	26,0	1,87	48	22	13	8,15	125	17,2	8,14	0,709	200
162	33,1	2,02	52	23	13	8,77	162	18,9	8,94	0,775	220
221	41,7	2,20	56	25	17	9,39	206	20,6	9,78	0,844	240
288	51,0	2,32	60	27,5	17	10,15	257	22,3	10,5	0,906	260
364	61,2	2,45	62	28,5	17	11,04	316	24,0	11,3	0,966	280
451	72,2	2,56	64	30,5	21	11,83	381	25,7	12,0	1,030	300
555	84,7	2,67	70	30,5	21	12,72	457	27,4	12,8	1,091	320
674	98,4	2,80	74	31,5	21	13,51	540	29,1	13,6	1,152	340
818	114	2,90	76	34,5	23	14,50	638	30,7	14,3	1,208	360
975	131	3,02	82	34,5	23	15,29	741	32,4	15,1	1,266	380
1.160	149	3,13	86	35,5	23	16,18	857	34,1	15,8	1,330	400
1.730	203	3,43	94	39	25	18,35	1.200	38,3	17,7	1,478	450
2.480	268	3,72	100	42,5	28	20,53	1.620	42,4	19,5	1,626	500
3.490	349	4,02	110	45	28	23,00	2.120	46,8	21,6	1,797	550
4.670	434	4,30	120	47,5	28	24,88	2.730	50,9	23,2	1,924	600



DOBLE T PERFIL EUROPEO (IPE)



IPE	Dimensiones (mm)						Sección A cm ²	Peso P kg/m	Referido al eje x-x:		
	h	b	e	e ₁	r ₁	h ₁			I _x cm ⁴	W _x cm ³	i _x cm
80	80	46	3,8	5,2	5	59	7,64	6,00	80,1	20,0	3,24
100	100	55	4,1	5,7	7	74	10,3	8,10	171	34,2	4,07
120	120	64	4,4	6,3	7	93	13,2	10,4	318	53,0	4,90
140	140	73	4,7	6,9	7	112	16,4	12,9	541	77,3	5,74
160	160	82	5,0	7,4	9	127	20,1	15,8	869	109	6,58
180	180	91	5,3	8,0	9	146	23,9	18,8	1.320	146	7,42
200	200	100	5,6	8,5	12	159	28,5	22,4	1.940	194	8,26
220	220	110	5,9	9,2	12	177	33,4	26,2	2.770	252	9,11
240	240	120	6,2	9,8	15	190	39,1	30,7	3.890	324	9,97
270	270	135	6,6	10,2	15	219	45,9	36,1	5.790	429	11,2
300	300	150	7,1	10,7	15	248	53,8	42,2	8.360	557	12,5
330	330	160	7,5	11,5	18	271	62,6	49,1	11.770	713	13,7
360	360	170	8,0	12,7	18	298	72,7	57,1	16.270	904	15,0
400	400	180	8,6	13,5	21	331	84,5	66,3	23.130	1.160	16,5
450	450	190	9,4	14,6	21	378	98,8	77,6	33.740	1.500	18,5
500	500	200	10,2	16,0	21	426	116	90,7	48.200	1.930	20,4
550	550	210	11,1	17,2	24	467	134	106	67.120	2.440	22,3
600	600	220	12,0	19,0	24	514	156	122	92.080	3.070	24,3

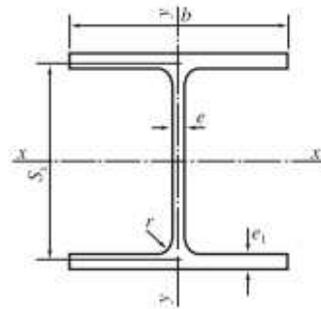


- A = Área de la sección
- I = Momento de inercia
- W = Módulo resistente
- $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ = Radio de giro
- $S_x =$ Momento estático de media sección
- $s_x = \frac{I_x}{S_x}$ = Distancia entre los centros de compresión y tracción
- η = Rendimiento
- u = Perímetro

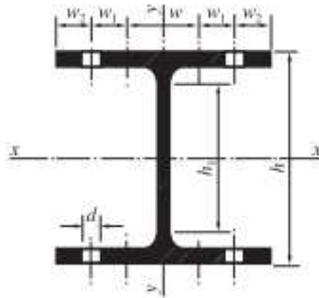
Referido al eje y-y			w mm	w ₁ mm	∅ d mm	S _x cm ³	s _x cm	η = W _x /P	u m ² /m	IPE
I _y cm ⁴	W _y cm ³	i _y cm								
8,49	3,69	1,05	25	10,5	6,4	11,6	6,90	3,34	0,328	80
15,9	5,79	1,24	30	12,5	8,4	19,7	8,68	4,22	0,400	100
27,7	8,65	1,45	35	14,5	8,4	30,4	10,5	5,11	0,475	120
44,9	12,3	1,65	40	16,5	11	44,2	12,3	6,00	0,551	140
68,3	16,7	1,84	44	19	13	61,9	14,0	6,89	0,623	160
101	22,2	2,05	48	21,5	13	83,2	15,8	7,78	0,698	180
142	28,5	2,24	52	24	13	110	17,6	8,69	0,768	200
205	37,3	2,48	58	26	17	143	19,4	9,62	0,848	220
284	47,3	2,69	65	27,5	17	183	21,2	10,6	0,922	240
420	62,2	3,02	72	31,5	21	242	23,9	11,9	1,041	270
604	80,5	3,35	80	35	23	314	26,6	13,2	1,159	300
788	98,5	3,55	85	37,5	25	402	29,3	14,5	1,254	330
1.040	123	3,79	90	40	25	510	31,9	15,8	1,353	360
1.320	146	3,95	95	42,5	28	654	35,4	17,4	1,467	400
1.680	176	4,12	100	45	28	851	39,7	19,3	1,605	450
2.140	214	4,31	110	45	28	1.100	43,9	21,3	1,744	500
2.670	254	4,45	115	47,5	28	1.390	48,2	23,1	1,877	550
3.390	308	4,66	120	50	28	1.760	52,4	25,1	2,015	600



DOBLE T ALA ANCHA. SERIE MEDIA (HEB)



HEB	Dimensiones (mm)						Sección A cm ²	Peso P kg/m	Referido al eje x-x'		
	h	b	e	e ₁	r	h ₁			I _z cm ⁴	W _z cm ³	i _z cm
100	100	100	6	10	12	56	26,0	20,4	450	89,9	4,16
120	120	120	6,5	11	12	74	34,0	26,7	864	144	5,04
140	140	140	7	12	12	92	43,0	33,7	1.510	216	5,93
160	160	160	8	13	15	104	54,3	42,6	2.490	311	6,78
180	180	180	8,5	14	15	122	65,3	51,2	3.830	426	7,66
200	200	200	9	15	18	134	78,1	61,3	5.700	570	8,54
220	220	220	9,5	16	18	152	91,0	71,5	8.090	736	9,43
240	240	240	10	17	21	164	106	83,2	11.260	938	10,3
260	260	260	10	17,5	24	177	118	93,0	14.920	1.150	11,2
280	280	280	10,5	18	24	196	131	103	19.270	1.380	12,1
300	300	300	11	19	27	208	149	117	25.170	1.680	13,0
320	320	300	11,5	20,5	27	225	161	127	30.820	1.930	13,8
340	340	300	12	21,5	27	243	171	134	36.660	2.160	14,6
360	360	300	12,5	22,5	27	261	181	142	43.190	2.400	15,5
400	400	300	13,5	24	27	298	198	155	57.680	2.880	17,1
450	450	300	14	26	27	344	218	171	79.890	3.550	19,1
500	500	300	14,5	28	27	390	239	187	107.200	4.290	21,2
550	550	300	15	29	27	438	254	199	136.700	4.970	23,2
600	600	300	15,5	30	27	486	270	212	171.000	5.700	25,2

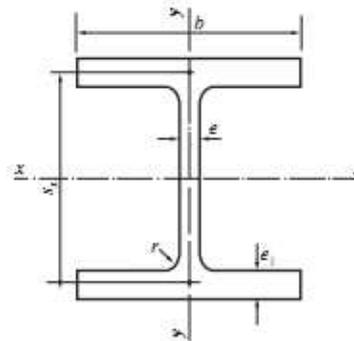


- A = Área de la sección
- I = Momento de inercia
- W = Módulo resistente
- $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ = Radio de giro
- S_z = Momento estático de media sección
- $s_z = \frac{I_z}{S_z}$ = Distancia entre los centros de compresión y tracción
- η = Rendimiento
- u = Perímetro

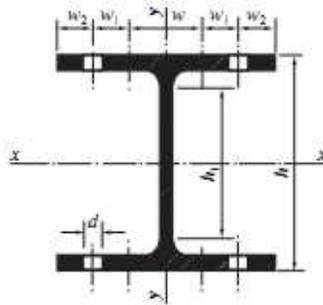
Referido al eje y-y			w	w ₁	w ₂	Ø d mm	S _z cm ³	s _z cm	η = W _z /P	u m ² /m	HEB
I _y cm ⁴	W _y cm ³	i _y cm									
167	33,5	2,53	53	—	22,5	13	52,1	8,63	4,41	0,567	100
318	52,9	3,06	65	—	27,5	17	82,6	10,5	5,39	0,686	120
550	78,5	3,58	75	—	32,5	21	123	12,3	6,41	0,805	140
889	111	4,05	85	—	37,5	23	177	14,1	7,30	0,918	160
1.360	151	4,57	100	—	40	25	241	15,9	8,32	1,04	180
2.000	200	5,07	110	—	45	25	321	17,7	9,30	1,15	200
2.840	258	5,59	120	—	50	25	414	19,6	10,3	1,27	220
3.920	327	6,08	90	35	40	25	527	21,4	11,3	1,38	240
5.130	395	6,58	100	40	40	25	641	23,3	12,4	1,50	260
6.590	471	7,09	110	45	40	25	767	25,1	13,4	1,62	280
8.560	571	7,58	120	50	40	25	934	26,9	14,4	1,73	300
9.240	616	7,57	120	50	40	25	1.070	28,7	15,2	1,77	320
9.690	646	7,53	120	50	40	25	1.200	30,4	16,1	1,81	340
10.140	676	7,49	120	50	40	25	1.340	32,2	16,9	1,85	360
10.820	721	7,40	120	50	40	25	1.620	35,7	18,6	1,93	400
11.720	781	7,33	120	50	40	25	1.990	40,1	20,8	2,03	450
12.620	842	7,27	120	45	45	28	2.410	44,5	22,9	2,12	500
13.080	872	7,17	120	45	45	28	2.800	48,9	25,0	2,22	550
13.530	902	7,08	120	45	45	28	3.210	53,2	26,9	2,32	600



DOBLE T ALA ANCHA. SERIE LIGERA (HEA)



HEA	Dimensiones (mm)						Sección A cm ²	Peso P kg/m	Referido al eje x-x		
	h	b	e	e ₁	r	h ₁			I _x cm ⁴	W _x cm ³	i _x cm
100	96	100	5	8	12	56	21,2	16,7	349	72,8	4,06
120	114	120	5	8	12	74	25,3	19,9	606	106	4,89
140	133	140	5,5	8,5	12	92	31,4	24,7	1.030	155	5,73
160	152	160	6	9	15	104	38,8	30,4	1.670	220	6,57
180	171	180	6	9,5	15	122	45,3	35,5	2.510	294	7,45
200	190	200	6,5	10	18	134	53,8	42,3	3.690	389	8,28
220	210	220	7	11	18	152	64,3	50,5	5.410	515	9,17
240	230	240	7,5	12	21	164	76,8	60,3	7.760	675	10,11
260	250	260	7,5	12,5	24	177	86,8	68,2	10.450	836	11,0
280	270	280	8	13	24	196	97,3	76,4	13.670	1.010	11,9
300	290	300	8,5	14	27	208	113	88,3	18.260	1.260	12,7
320	310	300	9	15,5	27	225	124	97,6	22.930	1.480	13,6
340	330	300	9,5	16,5	27	243	133	105	27.690	1.680	14,4
360	350	300	10	17,5	27	261	143	112	33.090	1.890	15,2
400	390	300	11	19	27	298	159	125	45.070	2.310	16,8
450	440	300	11,5	21	27	344	178	140	63.720	2.900	18,9
500	490	300	12	23	27	390	198	155	86.970	3.550	21,0
550	540	300	12,5	24	27	438	212	166	111.900	4.150	23,0
600	590	300	13	25	27	486	226	178	141.200	4.790	25,0



- A = Área de la sección
- I = Momento de inercia
- W = Módulo resistente
- $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ = Radio de giro
- S_z = Momento estático de media sección
- $s_z = \frac{I_z}{S_z}$ = Distancia entre los centros de compresión y tracción
- η = Rendimiento
- u = Perímetro

Referido al eje y-y			w	w ₁	w ₂	∅ d mm	S _z cm ³	s _z cm	η = W _z /P	u m ² /m	HEA
I _y cm ⁴	W _y cm ³	i _y cm									
134	26,8	2,51	55	—	22,5	13	41,5	8,41	4,36	0,561	100
231	38,5	3,02	65	—	27,5	17	59,7	10,1	5,33	0,677	120
389	55,6	3,52	75	—	32,5	21	86,7	11,9	6,28	0,794	140
616	76,9	3,98	85	—	37,5	23	123	13,6	7,24	0,906	160
925	103	4,52	100	—	40	25	162	15,5	8,28	1,02	180
1.340	134	4,98	110	—	45	25	215	17,2	9,20	1,14	200
1.950	178	5,51	120	—	50	25	284	19,0	10,2	1,26	220
2.770	231	6,00	90	35	40	25	372	20,9	11,2	1,37	240
3.670	282	6,50	100	40	40	25	460	22,7	12,3	1,48	260
4.760	340	7,00	110	45	40	25	556	24,6	13,2	1,60	280
6.310	421	7,47	120	50	40	25	692	26,4	14,3	1,72	300
6.990	466	7,51	120	50	40	25	814	28,2	15,2	1,76	320
7.440	496	7,46	120	50	40	25	925	29,9	16,0	1,79	340
7.890	526	7,43	120	50	40	25	1.040	31,7	16,9	1,83	360
8.560	571	7,34	120	50	40	25	1.280	35,2	18,5	1,91	400
9.470	631	7,29	120	50	45	25	1.610	39,6	20,7	2,01	450
10.370	691	7,24	120	45	45	28	1.970	44,1	22,9	2,11	500
10.820	721	7,15	120	45	45	28	2.310	48,4	25,0	2,21	550
11.270	751	7,05	120	45	45	28	2.680	52,8	26,9	2,31	600



ANEXO B. ALGORITMO DEL PROGRAMA

```
function varargout = interfaz(varargin)

% INTERFAZ M-file para interfaz.fig

% Comienzo del código de iniciación.

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @interfaz_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @interfaz_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% Fin del código de inicialización.

% Función que se ejecuta inmediatamente una vez que la interfaz es
visible.

function interfaz_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

background = imread('Fondo de pantalla 2.jpg');
axes(handles.background);
axis off;
imshow(background);
handles.output = hObject;
guidata(hObject,handles);
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

%Para continuar el proceso la función espera a que el usuario
introduzca los valores en los campos predeterminados.

function varargout = interfaz_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

% Función que se encarga de tomar los valores estipulados del perfil
```



```
% seleccionado mediante una biblioteca de perfiles.

function Perfil_val_Callback(hObject, eventdata, handles)

fun = get(hObject, 'Value');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%   BIBLIOTECA DE PERFILES
%
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if fun == 2

    Perfil = 'IPN80';

elseif fun == 3

    Perfil = 'IPN100';

elseif fun == 4

    Perfil = 'IPN120';

elseif fun == 5

    Perfil = 'IPN140';

elseif fun == 6

    Perfil = 'IPN160';

elseif fun == 7

    Perfil = 'IPN180';

elseif fun == 8

    Perfil = 'IPN200';

elseif fun == 9

    Perfil = 'IPN220';

elseif fun == 10

    Perfil = 'IPN240';

elseif fun == 11
```



```
    Perfil = 'IPN260';  
elseif fun == 12  
    Perfil = 'IPN280';  
elseif fun == 13  
    Perfil = 'IPN300';  
elseif fun == 14  
    Perfil = 'IPN320';  
elseif fun == 15  
    Perfil = 'IPN340';  
  
elseif fun == 16  
    Perfil = 'IPN360';  
elseif fun == 17  
    Perfil = 'IPN380';  
elseif fun == 18  
    Perfil = 'IPN400';  
elseif fun == 19  
    Perfil = 'IPN425';  
elseif fun == 20  
    Perfil = 'IPN450';  
elseif fun == 21  
    Perfil = 'IPN475';  
elseif fun == 22  
    Perfil = 'IPN500';  
elseif fun == 23
```



```

        Perfil = 'IPN550';

elseif fun == 24

        Perfil = 'IPN600';

else

end

set(handles.PerfilTipo,'String',Perfil);

function Perfil_val_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% Función que trata la longitud entre apoyos para obtener el valor
% específico de cada píxel y también para obtener la elástica teórica
% y poder
% compararla posteriormente con la real.

function Longitud_val_Callback(hObject, eventdata, handles)
L = str2double(get(hObject,'String'));

function Longitud_val_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% Función que se ejecuta para la selección de la imagen a tratar
% indicando
% la disposición del archivo mediante una ventana emergente.

function Examinar_Callback(hObject, eventdata, handles)
[FileName DesIm] = uigetfile({'*.tif;*.tiff;*.jpg;*.jpeg'},
'Seleccionar archivo');
set(handles.Examinar,'String',[DesIm,FileName])

if isequal(FileName,0)
    return
else

        ImagenCal = imread(strcat(DesIm,FileName));
        axes(handles.ImagenCal);
        axis off;
        imshow(ImagenCal);
    
```



end

%Función que nos permite guardar los diagramas que nos ofrece el programa.

```
function saveimage_Callback(hObject, eventdata, handles)
graficas = get(hObject, 'Value');
```

% Función que nos permite exportar los datos obtenidos a excel.

```
function exportexcel_Callback(hObject, eventdata, handles)
excel = get(hObject, 'Value');
```

% Función que ejecuta el programa propiamente dicho.

```
function Calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
L = str2double(get(handles.Longitud_val, 'String'));
Perfil = get(handles.PerfilTipo, 'String');
```

E = 210e9; %Pa

```
set(handles.Estado, 'String', 'Procesando imagen')
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
%
%   PROCESAMIENTO DE IMAGEN
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

%Obtención de una imagen en escala de grises a partir de una imagen a color.

```
MatIm = double(imread(strcat(get(handles.Examinar, 'String'))));
MatIm = MatIm(:,:,1);
```

```
figure(1)
imshow(MatIm,[0 255])
set(gca, 'FontName', 'times')
title('Imagen viga')
```

%Segmentación de la imagen mediante discernimiento por umbral.
%Obtención de una matriz lógica donde el valor 1 representa viga y el valor
%0 la ausencia de viga.



```
MatCal = MatIm >= max(max(MatIm))*0.995;

%Procesamos el número de 1 que hay en cada columna y obtengo un vector
%auxiliar.

for Z1i = 1: length(MatCal(1,:));

    NumEl(Z1i) = sum(MatCal(:,Z1i));

end

%A partir del vector auxiliar anterior creo otro en función de si
hay
%algún unos en la columna o no (si existe viga o no).

for Z2i = 1: length(NumEl);

    if NumEl(Z2i) ~= 0

        NP(Z2i) = 1;

    else

        NP(Z2i) = 0;

    end

end

%Obtengo en píxel la anchura promedio de la viga.

MedEl = sum(NumEl)/sum(NP);

%Elimino aquellas columnas cuyo número de píxeles del vector anterior
esté
%por debajo del 80%. El motivo de hacer esto es para evitar un efecto
borde
%indeseado.

for Z3i = 1: length(NumEl);

    if NumEl(Z3i) <= 0.95*MedEl;
```



```
MatCal(:,Z3i) = zeros(1,length(MatCal(:,1)));

else

end

end

%He convertido la imagen a una matriz lógica mediante el proceso y
%segmentación de imagen y ahora la muestro para saber que es lo que
estamos
%procesando.

figure(2)
imshow(MatCal,[0 1])
set(gca,'FontName','times')
title('Imagen tratada')

set(handles.Estado,'String','Hallando deformada')

%Establezco el origen de coordenadas. Para ello mido la distancia
%verticalmente entre el origen y la columna que estoy trabajando y
obtengo
%el número de píxel por columna de flecha, midiendo la diferencia que
hay
%entre la columna en la que trabajo y la anterior.

Neutro= 0;

for Y1i = 1:length(MatCal(:,1));

    Neutro = Neutro+1;

    if any(MatCal(Y1i,:) > 0)

        break

    else

    end

end

for Z4i = 1:length(MatCal(1,:));

    Fila = 0;

    for Y2i = 1:length(MatCal(:,1));

        Fila = Fila+1;
```



```
    if MatCal(Y2i,Z4i) > 0;

        wadimensional(Z4i) = Fila-Neutro;

        break

    else

        wadimensional(Z4i) = 0;

    end

end

end

for wadi = 1:length(wadimensional);

    if wadi == 1;

        wadvect(wadi) = 0;

    else

        wadvect(wadi) = wadimensional(wadi)-wadimensional(wadi-1);

    end

end

end

%Obtengo la dimensión cuantitativa del píxel a partir de la distancia
entre
%apoyos y establezco esa distancia en los ejes.

[I,h] = IPN(Perfil);

for hi = 1:length(MatCal(1,:));

    PixValVect(hi) = h/sum(MatCal(:,hi)) ;

end

LongPixel = L/length(find(wadimensional>0));
w = PixValVect.*wadimensional;
z = LongPixel*(1:length(MatCal(1,:)));
```



```
%Creo unos vectores auxiliares wvect1 y zvect1 con los que guardo sólo
las
%posiciones por columna en las que hay viga. Ahora y usando la
diferencia
%entre una columna y la anterior establezco las posiciones en las
cuales no
%hay cambio de flecha.

wvect1 = w(find(wadvect~=0));
zvect1 = z(find(wadvect~=0));

%Ahora para que no haya escalones y la curva sea más suave establezco
un
%sistema centrado tomando la posición media de cada escalón.
%En los bordes uso esquema descentrado.
%obtengo un vector compuesto por los puntos medios de cada escalón.

for zvi = 1:length(zvect1);

    if zvi == 1;

        zvect(zvi) = zvect1(zvi);

    else

        zvect(zvi) = (zvect1(zvi)+zvect(zvi-1))/2;

    end

end

%Establezco el origen en el eje z.

zvect(zvi+1) = zvect1(zvi);

zrest = zvect(1);

for zejei = 1:length(zvect);

    zvect(zejei) = zvect(zejei)-zrest;

end

%Obligo a que el vectores wvect1 tenga valor 0 en los extremos ya que
por
%definición la flecha en los apoyos no cambia.

pos1 = (1:length(wvect1))+1;

wvect(1) = 0;
```



```

wvect(pos1) = wvect1;
wvect(length(wvect1)+1) = 0;

%Llamo a la función IPN para obtener el momento de inercia y obtengo la
F
%máxima para el punto de flecha máxima.

F = max(wvect)*48*E*I/L^3;

for weli = 1:length(zvect)

    if zvect(weli) <= L/2

        well(weli) = F*zvect(weli)*L^2/(16*E*I)*(1-
4*(zvect(weli))^2/(3*L^2));

    else
    break
    end
end

%Obtengo la elástica teórica y trazo la curva de la elástica real y
teórica
%para poder comparar.

wel = [well,flipplr(well(1:length(well)-1))];

axes1 = axes('Parent',figure(3),'YDir','reverse');
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

[wmax,poswmax] = max(wel);

set(handles.FlechaVal,'String',wmax)

figure(3)
set(gca,'FontName','times')
plot(zvect,wvect,'-r','LineWidth',2)
hold on
plot(zvect,wel,'--b','LineWidth',2)
xlim([0 L])
set(gca,'FontName','times')
title('Elástica')
set(gca,'FontName','times')
xlabel('\itz \rm(m)')
ylabel('\itw \rm(m)')
legend('Deformada real','Deformada teórica','location','north')
hold off

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%
%   Obtención de la distribución de fuerza cortante
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

set(handles.Estado,'String','Hallando f. cortante')

Ra = F/2;
Rb = Ra;

figure(4)
set(gca,'FontName','times')
colormap summer
plot([0,0],[0,Ra],'-k','LineWidth',2)
grid on
hold on
area([0,zvect(poswmax)],[Ra,Ra])
plot([zvect(poswmax),zvect(poswmax)],[Ra,Ra-F],'-k','LineWidth',2)
area([zvect(poswmax),L],[Ra-F,Ra-F])
plot([L,L],[Ra-F,Ra-F+Rb],'-k','LineWidth',2)
plot([0,L],[0,0],'-k')
hold off
set(gca,'FontName','times')
title('Fuerza cortante')
set(gca,'FontName','times')
xlabel('\itz \rm(m)')
ylabel('\itV \rm(N)')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%
%   Obtención de la distribución de momento flector
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

set(handles.Estado,'String','Hallando m. flector')

Mmax = F*zvect(poswmax);

axes2 = axes('Parent',figure(5),'YDir','reverse');
box(axes2,'on');
grid(axes2,'on');
hold(axes2,'all');

figure(5)
set(gca,'FontName','times')
colormap winter
area([0,zvect(poswmax)],[0,Mmax])
hold on
area([zvect(poswmax),L],[Mmax,0])

```



```

xlim([0,L])
hold off
set(gca,'FontName','times')
title('Momento flector')
set(gca,'FontName','times')
xlabel('\itz \rm(m)')
ylabel('\itM_x \rm(Nm)')

set(handles.FuerzaVal,'String',F)
set(handles.MomentoVal,'String',Mmax)
set(handles.FlechaVal,'String',wmax)

if get(handles.saveimage,'Value') == 1;

    set(handles.Estado,'String','Exportando resultados')

    saveas(figure(1),'Imagen BN.tif');
    saveas(figure(2),'Imagen Procesada.tif');
    saveas(figure(3),'Deformada.tif');
    saveas(figure(4),'Fuerza Cortante.tif');
    saveas(figure(5),'Momento Flector.tif');

else

end

if get(handles.exportexcel,'Value') == 1;

    set(handles.Estado,'String','Exportando resultados')

    Inputs = {'Inputs'};

    xlswrite('Resultados',Inputs,'Inputs','A1');

    Inputs1 = {'Perfil';
               'Distancia entre apoyos (m)'};

    Perfill = {Perfil};

    xlswrite('Resultados',Inputs1,'Inputs','A3');
    xlswrite('Resultados',Perfill,'Inputs','B3');
    xlswrite('Resultados',L,'Inputs','B4');

    Resultados = {'Resultados'};

    xlswrite('Resultados',Resultados,'Resultados','A1');

    Resultados1 = {'F (N)';
                   'Ra (N)';
                   'Rb (N)';
                   'Mmax (N·m)';
                   'ymax (m)'};

```



```
xlswrite('Resultados',Resultados1,'Resultados','A3');  
xlswrite('Resultados',F,'Resultados','B3');  
xlswrite('Resultados',Ra,'Resultados','B4');  
xlswrite('Resultados',Rb,'Resultados','B5');  
xlswrite('Resultados',Mmax,'Resultados','B6');  
xlswrite('Resultados',wmax,'Resultados','B7');  
  
else  
  
end  
  
set(handles.Estado,'String','FINALIZADO')
```