



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

**Evaluación del endurecimiento
por deformación, sobrerresistencia
y ductilidad del acero inoxidable
en el diseño sísmico**

Trabajo realizado por:

Itzel Marena Almache Vera

Dirigido por:

Esther Real Saladrigas

Isabel González de León

Elide Nastri (Externa)

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, **Mayo 2021**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarnos la salud, sabiduría y cuidados a lo largo de este camino a pesar de estos momentos históricos de pandemia que se están viviendo, permitiéndome finalizar este proyecto y lograr este objetivo en mi vida.

Mi más sincero y especial agradecimiento a mis tutoras del proyecto de investigación Esther Real e Isabel González, por permitirme ser partícipe de esta investigación y de este grupo de investigadoras, siendo este un mundo desconocido para mí; pero gracias a su ayuda me han podido guiar, brindándome sus conocimientos, herramientas, su apoyo y constante seguimiento en todo el desarrollo del proyecto, logrando finalizar este proyecto; haciendo así que me interese en el acero inoxidable y la investigación. ¡Muchas Gracias!

A Elide Nastri profesora de la Universidad de Salerno, Fisciano (UNISA) por su ayuda brindándome sus conocimientos y herramientas en el desarrollo del proyecto.

A Itsaso Arrayago investigadora de la Universitat Politècnica de Catalunya por ser un soporte externo brindándome sus conocimientos, herramientas y ser guía en todo el desarrollo del proyecto.

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto BIA2016-75678-R AEI/FEDER, UE “Comportamiento estructural de pórticos de acero inoxidable. Seguridad frente a acciones accidentales de sismo y fuego”, por lo que hago extensible mi agradecimiento a MINECO (España).

A mis Padres Rodrigo y Kenia por el gran esfuerzo que realizaron que a pesar de los momentos difíciles en el mundo han trabajado muy fuerte para que yo pueda lograr este máster, por ser siempre el pilar fundamental de mi vida, guiar cada paso de ella, y brindarme su ayuda para lograr este objetivo. ¡Muchas Gracias!

A mis hermanos Elian y Nazly por estar siempre conmigo, apoyándome y entender el esfuerzo que nuestros padres realizan.

A mis tíos Rocio, Henry y Byron por siempre estar pendientes y brindarme ese cariño tan inmenso.

A mi abuelita Luz “mamita” que siempre está presente, pendiente y preocupándose de mi en cada proceso de mi vida. ¡Muchas Gracias!

A todos mis familiares por brindarme su apoyo en todo este camino, en especial a mi abuelita Inés.

RESUMEN

El creciente uso del acero inoxidable como material estructural debido a sus excelentes características estéticas, a su resistencia a la corrosión y a sus buenas propiedades mecánicas, está motivando la investigación del comportamiento de este material ante cargas sísmicas. Así, sus propiedades de endurecimiento por deformación y ductilidad son un punto clave de análisis para diseños sismorresistentes y es necesario profundizar en su conocimiento para obtener estructuras seguras ante acciones sísmicas.

El objetivo principal de este Trabajo es la caracterización de la respuesta cíclica de secciones transversales huecas en acero inoxidable austenítico sometidas a flexión. Así, el presente Trabajo propone expresiones analíticas sencillas que definen las capacidades de rotación plástica y última, y estudia el momento último que es capaz de alcanzar una sección bajo estas condiciones de carga.

La obtención de las expresiones analíticas se ha basado en resultados numéricos de 40 vigas a flexión de sección robusta. Estos modelos numéricos fueron validados previamente con resultados experimentales del Proyecto PINOX. La investigación incluye un estudio de la idoneidad de los distintos modelos de material presentes en la literatura para simular numéricamente el comportamiento del acero inoxidable bajo cargas cíclicas. Los resultados obtenidos se han representado mediante skeleton curves, tal y como recomiendan las normativas correspondientes. Por último, se propone un factor de ajuste de las expresiones propuestas que aumentan su fiabilidad.

ABSTRACT

The increasing use of stainless steel as a structural material due to its excellent aesthetic characteristics, its resistance to corrosion and its good mechanical properties, it is motivating the investigation of the behaviour of this material under seismic loads. Thus, its properties of deformation hardening, and ductility are a key point of analysis for earthquake resistant designs, and it is necessary to deepen their knowledge to obtain safe structures against seismic actions.

The main objective of this work is the characterization of the cyclic response of hollow cross sections in austenitic stainless steel subjected to bending. Thus, this work proposes simple analytical expressions that define the plastic and ultimate rotation capacities and studies the last moment that a section is capable of reaching under these load conditions.

The obtaining of the analytical expressions has been based on numerical results of 40 bending beams of robust section. These numerical models were previously validated with experimental results from the PINOX Project. The research includes a study of the suitability of the different material models present in the literature to numerically simulate the behaviour of stainless steel under cyclical loads. The results obtained have been represented by skeleton curves, as recommended by the corresponding regulations. Finally, an adjustment factor of the proposed expressions is proposed that increases their reliability.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	11
1.1 Introducción	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo General	12
1.2.2 Objetivos Específicos.....	12
1.3 Metodología	12
1.4 Contenido del Trabajo.....	15
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	16
2.1 Acero Inoxidable.....	16
2.1.1 Tipos de Acero Inoxidable	16
2.1.2 Respuesta Básica del Acero Inoxidable Curva Tensión-Deformación	17
2.1.3 Determinación del Límite Elástico del Acero Inoxidable.....	18
2.2 Plasticidad	19
2.2.1 Endurecimiento por Deformación.....	19
2.3 Modelo Material.....	22
2.3.1 Modelo Ramberg-Osgood	22
2.3.1 Modelo Chaboche	26
2.3.2 Continuous Strength Method.....	30
CAPÍTULO 3: ELABORACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y SU VALIDACIÓN.....	32
3.1 Reproducción de los Ensayos Estáticos a Flexión PINOX	32
3.1.1 Caracterización del Material PINOX	32
3.1.2 Características Geométricas de las Vigas PINOX y Configuración del Ensayo 4PB.....	34
3.2.1. Modelo Numérico del Ensayo PINOX.....	36
3.1.1 Análisis de Resultados y Validación del Modelo Numérico PINOX	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DEL MODELO DE MATERIAL BAJO CONDICIONES CÍCLICAS.....	46
4.1 Protocolos de Carga Cíclicos.....	46

4.2	Estudio Numérico del Modelo de Material en Análisis Cíclicos	48
4.2.1	Modelos Numéricos	48
4.3	Modelos de Material Estudiados.....	49
4.4	Resultados de los Análisis Cíclicos del Material.	56
4.5	Selección del Modelo del Material para Análisis Cíclicos.....	58
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS CÍCLICO VIGAS DE SECCIÓN ROBUSTA. ESTUDIO PARAMÉTRICO.....		59
5.1	Características Geométricas.....	59
5.1.1	Características de la Esbeltez Local	60
5.2	Modelo Numérico	62
5.2.1	Modelo de Material.....	62
5.2.2	Protocolo de Carga	63
5.2.3	Modelo Parametrizado.....	64
5.3	Skeleton Curves.....	67
5.4	Determinación del Momento Último y Capacidad de Rotación Plástica.	73
5.5	Clasificación de la Sección Según su Ductilidad	76
CAPÍTULO 6: OBTENCIÓN DE LAS EXPRESIONES ANALÍTICAS PARA CARACTERIZAR RÓTULAS PLÁSTICAS.		80
6.1	Estimación de Momento Último	80
6.1.1	Momento Último Modelo Numérico	80
6.1.2	Momento Continuous Strength Method	80
6.2	Obtención de las Expresiones Analíticas de Rotación.....	83
6.2.1	Determinación de la Expresión Analítica Capacidad Última de Rotación	83
6.2.1	Determinación de la Expresión Analítica Capacidad Plástica de Rotación	84
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS PARAMÉTRICOS		86
7.1	Análisis Estimación Momento Último	86
7.1	Análisis de la Clasificación de la Sección Transversal.....	87
7.2	Análisis de Estimación de las Expresiones Analíticas	88
7.3	Análisis de Clasificación de las Secciones Según su Ductilidad	91
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		92
8.1	Recomendaciones para Futuras Líneas de Investigación.....	93
BIBLIOGRAFÍA.....		94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Metodología utilizada en este Trabajo	14
Figura 2.1. Comportamiento curva tensión-deformación acero inoxidable (SCI, 2017)	18
Figura 2.2. Definición de la resistencia correspondiente a una deformación remanente del 0.2% (SCI, 2017)	18
Figura 2.3. Carga uniaxial de una barra elastoplástica: endurecimiento cuando $H > 0$, perfecto plasticidad cuando $H = 0$, y ablandamiento cuando $H < 0$ (Borja, 2013)	19
Figura 2.4. Representación del deslizamiento y la rotación del cristal resultante de la deformación (Black, 2012)	20
Figura 2.5. Efecto de Bauschinger (Oliver, 2002)	20
Figura 2.6. Endurecimiento isotrópico (Borja, 2013)	21
Figura 2.7. Endurecimiento Cinemático (Borja, 2013)	21
Figura 2.8. Endurecimiento combinado (Borja, 2013)	22
Figura 2.9. Mirambel y Real - modelo material de dos etapas (curva tensión- deformación) (Arrayago et al., 2015)	23
Figura 2.10. Principales parámetros del modelo del material (SCI, 2017)	26
Figura 2.11. Calibración endurecimiento isotrópico (Nip et al., 2010)	28
Figura 2.12. Calibración endurecimiento cinemático (Nip et al., 2010)	29
Figura 2.13. Modelo de material para el CSM, bilineal con endurecimiento lineal (SCI, 2017) ...	30
Figura 3.1. Mediciones curvas tensión-deformación para zonas planas y esquinas "coupon test" (Arrayago et al., 2020)	33
Figura 3.2. Esquema "Four Point Bending Test" (Arrayago et al., 2020)	34
Figura 3.3. Curvas experimentales carga-flecha en la mitad del vano para vigas de acero inoxidable austeníticas (Arrayago et al., 2020)	35
Figura 3.4. Modelo FEM para "Four Point Bending Test"	36
Figura 3.5. Modelo numérico "Four Point Bending Test" para la viga RHS1-PINOX	37
Figura 3.6. Ejemplo partes Flat (F) y Corner (Co) sección rectangular hueca	38
Figura 3.7. Modelo Material Ramberg-Osgood para la viga RHS1	40
Figura 3.8. Modelo Material Ramberg-Osgood viga RHS2	40
Figura 3.9. Modelo material Ramberg-Osgood viga RHS3	41
Figura 3.10. Diagrama momento curvatura Viga RHS1	43
Figura 3.11. Diagrama momento curvatura Viga RHS2	43
Figura 3.12. Diagrama momento curvatura Viga RHS3	44
Figura 4.1. Tipos de protocolo de carga análisis cíclico (Chacón et al., 2020)	46
Figura 4.2. Protocolo de carga AISC, aplicado a los modelos numéricos	48
Figura 4.3. Modelo numérico de la viga RHS2 en ABAQUS (2014)	49
Figura 4.4. Modelos de material análisis cíclico	50
Figura 4.5. Configuración ABAQUS tercer modelo material Ramberg-Osgood	51
Figura 4.6. Curva tensión deformación para vigas RHS1, RHS2, RHS3	52
Figura 4.7. Configuración ABAQUS primer modelo material Ramberg-Osgood	52

Figura 4.8. Configuración ABAQUS segundo modelo material Ramberg-Osgood	53
Figura 4.9. Configuración modelo Chaboche Nip et al. (2010)	55
Figura 4.10. Configuración modelo Chaboche Otros Autores	55
Figura 4.11. Diagrama momento-curvatura viga RHS1- ensayo cíclico curvatura Ec. (36)	56
Figura 4.12. Diagrama momento-curvatura viga RHS2- ensayo cíclico curvatura Ec. (36)	57
Figura 4.13. Diagrama momento-curvatura viga RHS3- ensayo cíclico curvatura Ec. (36)	57
Figura 4.14. Modelo material Ramberg-Osgood endurecimiento combinado (Fang et al., 2018)	58
Figura 5.1. Esquema secciones transversales en estudio	59
Figura 5.2. Curva tensión - deformación plástica para el análisis paramétrico	63
Figura 5.3. Protocolo de carga AISC - estudio paramétrico	63
Figura 5.4. Archivo INP - estudio paramétrico	64
Figura 5.5. Esquema para análisis de vigas	66
Figura 5.6. Skeleton curve grupo 1- $Habaqus = 72mm$; $Babaqus = 60mm$	68
Figura 5.7. Skeleton curve grupo 2- $Habaqus = 84 mm$; $Babaqus = 70mm$	69
Figura 5.8. Skeleton curve grupo Grupo 3- $Habaqus = 96mm$; $Babaqus = 80mm$	69
Figura 5.9. Skeleton curve grupo 4- $Habaqus = 108mm$; $Babaqus = 90mm$	70
Figura 5.10. Skeleton curve grupo 5- $Habaqus = 90mm$; $Babaqus = 60mm$	70
Figura 5.11. Skeleton curve grupo 6- $Habaqus = 60mm$; $Babaqus = 60mm$	71
Figura 5.12. Skeleton curve grupo 7- $Habaqus = 70mm$; $Babaqus = 70mm$	71
Figura 5.13. Skeleton curve grupo 8- $Habaqus = 90mm$; $Babaqus = 90mm$	72
Figura 5.14. Skeleton curve grupo 9- $Habaqus = 120mm$; $Babaqus = 120mm$	72
Figura 5.15. Skeleton curve grupo 10- $Habaqus = 150mm$; $Babaqus = 150mm$	73
Figura 5.16. Definición rotación plástica (CEN, 2020)	74
Figura 5.17. Esquema determinar las rotaciones plástica y elástica	74
Figura 6.1. Esquema manejo de resultados estudio paramétrico	80
Figura 6.2. Análisis de la expresión analítica - rotación última	84
Figura 6.3. Análisis de la expresión analítica - plástica	85
Figura 7.1. Esquema de Análisis ensayo numérico "Four Point Bending Test"	86
Figura 7.2. Comparación de los momentos últimos numéricos y momentos CSM	87
Figura 7.3. Ecuaciones de rotación propuestas	89
Figura 7.4. Análisis de fiabilidad de la expresión analítica - rotación última	90
Figura 7.5. Análisis de fiabilidad de la expresión analítica - rotación plástica	90
Figura 7.6. Clasificación ductilidad	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valor n aceros inoxidables (SCI, 2017).....	25
Tabla 2.2 Coeficientes para el modelo material CSM (SCI, 2017)	30
Tabla 3.1.Parámetros característicos del material obtenido de tracción "coupon test" (Arrayago et al., 2020).....	34
Tabla 3.2.Medidas geométricas del espécimen ensayadas (Arrayago et al., 2020)	35
Tabla 3.3.Resultados experimentales "Four Point Bending Test" (Arrayago et al., 2020)	36
Tabla 3.4.Parámetros weighted average característicos del material obtenido de tracción.....	39
Tabla 3.5.Valores máximos de las vigas.....	44
Tabla 4.1.Protocolo de carga AISC 341(2005)	47
Tabla 4.2.Paramétros Chaboche Nip at al. (2010) y promedio utilizado en este Trabajo	54
Tabla 4.3.Parámetros Chaboche Otros Autores(Chacón et al., 2020) y promedio utilizado en este Trabajo.....	54
Tabla 5.1.Dimensiones de la sección transversal vigas en estudio.....	59
Tabla 5.2.Características de esbeltez local	61
Tabla 5.3.Propiedades del material (Arrayago et al., 2017b)	62
Tabla 5.4.Calculo dimensiones geométricas INP parametrizado	64
Tabla 5.5.Dimensiones de las secciones – ABAQUS.....	65
Tabla 5.6.Tiempo correspondiente al primer ciclo	68
Tabla 5.7.Resumen momentos y rotaciones -Muestra de vigas.....	75
Tabla 5.8.Classificación de la sección según su ductilidad	77
Tabla 5.9.Ductilidad y clasificación vigas	78
Tabla 6.1.Características básicas modelo material CSM	81
Tabla 6.2.Resultados curva base modelo material CSM.....	82
Tabla 7.1.Rangos relación momentos últimos	86
Tabla 7.2.Classificación de la sección transversal	87
Tabla 7.3.Parámetros estadísticos de las expresiones.....	89

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El acero inoxidable es un material estructural en creciente demanda debido a sus características estéticas, a su resistencia a la corrosión y a sus buenas propiedades mecánicas. Además, es un material con un alto valor residual, atributo de especial interés en una sociedad que aspira a ser más sostenible.

El interés suscitado por el acero inoxidable ha fomentado el estudio de su comportamiento estructural, la caracterización del material y la propuesta de expresiones de diseño eficientes. Como resultado, las normativas de diseño de acero inoxidable han experimentado una gran especialización en las últimas décadas y cada vez abarcan más campos. Así, la mayoría de ellas incorporan capítulos sobre la clasificación de la sección transversal, el diseño de elementos estructurales, la propuesta de metodologías de diseño específicas de metales con una alta ductilidad y endurecimiento por deformación, entre otros. No obstante, el acero inoxidable es un material relativamente nuevo, por lo que muchos aspectos necesitan ser investigados con mayor profundidad, como el comportamiento global de la estructura ante diversas acciones.

El departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya es un referente de investigación del acero inoxidable desde hace más de dos décadas. Prueba de ello es la concesión por parte de MINECO del Proyecto BIA2016-75678-R, AEI/FEDER, UE “Comportamiento estructural de pórticos de acero inoxidable. Seguridad frente a acciones accidentales de sismo y fuego (PINOX)” (2017-2021), que se está desarrollando en la actualidad y en el que, entre otras cosas, se ha ensayado por primera vez en laboratorio el comportamiento estructural de pórticos de acero inoxidable bajo cargas verticales y horizontales.

El presente Trabajo Final de Máster se enmarca en las investigaciones realizadas en el proyecto PINOX y se centra en la caracterización de las rótulas plásticas bajo acciones cíclicas. Esta caracterización constituye un primer paso necesario en la elaboración de las normativas de diseño cíclico para acero inoxidable estructural. El Trabajo se ha realizado en colaboración con el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Salerno, especialistas en investigación y diseño de estructuras metálicas sometidas a fuerzas sísmicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades de endurecimiento por deformación y ductilidad en la formación de rótulas plásticas en vigas de acero inoxidable austenítico de sección transversal hueca sometidas a cargas cíclicas, y proponer expresiones analíticas de la rotación plástica y la rotación última de acuerdo con la normativa europea prEN 1993-1-4 (2021) y prEN 1998-1-2 (2020).

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1) Estudiar las normativas europeas de acero inoxidable actuales, así como investigaciones publicadas de interés para el TFM, para conocer el comportamiento estructural del material y las expresiones de diseño propuestas hasta la fecha.
- 2) Estudiar las normativas europeas y americanas de diseño sísmico para acero al carbono.
- 3) Realizar y validar modelos numéricos de vigas sometidas a cargas puntuales en elementos finitos FE tipo shell, utilizando el programa de cálculo estructural ABAQUS (2014), teniendo en cuenta los diferentes modelos del material en ensayos monotónicos y cíclicos.
- 4) Comparar las diferentes teorías sobre el material modelo del acero inoxidable y seleccionar el mejor para utilizar en los análisis numéricos cíclicos.
- 5) Tomar una muestra representativa de vigas de sección robusta, realizar un estudio paramétrico y obtener los diferentes valores de rotación y momento.
- 6) Dibujar las skeleton curves, evaluar los resultados obtenidos y clasificar las secciones de acuerdo con las clases de ductilidad propuestas en las normas de diseño sísmico europeas y americanas.
- 7) Proponer expresiones analíticas sencillas que permitan estimar las capacidades de rotación plástica y rotación última en función de la sección transversal en vigas de acero inoxidable austenítico de sección hueca sometidas a cargas cíclicas.

1.3 Metodología

A continuación, se presenta la metodología aplicada en el desarrollo de este Trabajo:

- ❖ Primero, leer la información publicada en manuales de diseño de acero

inoxidable, normativas e investigaciones en la materia, para conocer el comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable, sus principales características y las reglas de diseño actuales.

- ❖ Segundo, validar el modelo numérico que se empleará en el estudio paramétrico mediante la comparación de su comportamiento con resultados experimentales.
- ❖ Tercero, analizar el modelo del material a través de la respuesta monotónica y la respuesta cíclica en el modelo numérico y determinar qué tipo de modelo del material que se utilizará en todas las vigas robustas para el comportamiento cíclico.
- ❖ Cuarto, definir la muestra de vigas robustas y el protocolo de carga sísmica, realizar el estudio paramétrico y obtener las características mecánicas con un modelo numérico paramétrico para cada viga.
- ❖ Quinto, realizar las curvas “Skeleton curve” y obtener la rotación plástica, elástica y última, el momento último y la clase de ductilidad de las secciones transversales de acuerdo con las normativas europeas prEN 1998-1-2 (2020) y americana AISC 341 (2010).
- ❖ Sexto, obtener la expresión analítica de la rotación plástica y última, en función de la esbeltez.
- ❖ Séptimo, analizar la fiabilidad de las expresiones, resultados y conclusiones.

A continuación, en la Figura 1.1. se presenta el diagrama de flujo del desarrollo del proyecto de investigación.

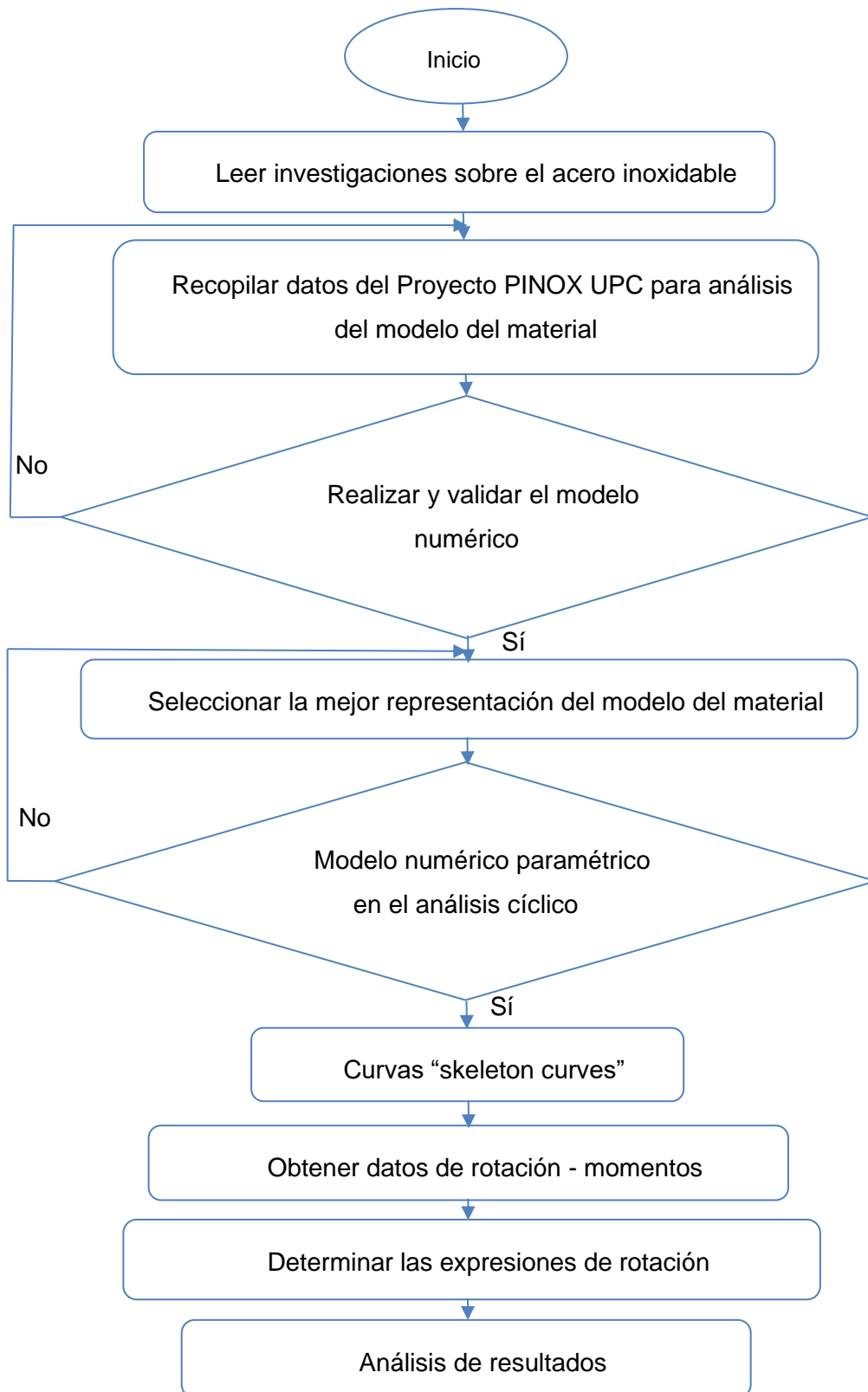


Figura 1.1. Metodología utilizada en este Trabajo

1.4 Contenido del Trabajo

Este Trabajo cuenta con ocho Capítulos en los que se detalla la información necesaria para alcanzar los objetivos que se están planteando.

En el Capítulo 1 se expone la información básica sobre la estructura del presente Trabajo Final de Máster, esto es la introducción, los objetivos y la metodología.

En el Capítulo 2 se recopila la información encontrada en la literatura relevante para procedimiento de la investigación de este Trabajo. Se incluye la definición de acero inoxidable, las propiedades mecánicas, la plasticidad del material y los tipos de endurecimiento por deformación, finalmente las diferentes teorías sobre la respuesta del material monotónica y cíclica.

En el Capítulo 3 se explica la elaboración de un modelo numérico en ABAQUS (2014), y su validación con resultados obtenidos de ensayos experimentales de vigas austeníticas a flexión de la campaña PINOX.

En el Capítulo 4 se analizan los resultados numéricos obtenidos para una viga austenítica sometida a flexión y carga dinámica con distintos modelos de material y se selecciona el mejor de ellos.

En el Capítulo 5 se muestran las características del estudio paramétrico de viga robustas, incluyendo el protocolo de carga aplicado, se dibujan las skeleton curves y se exponen los resultados numéricos obtenidos: rotaciones elásticas, rotaciones plásticas, rotaciones últimas, momentos últimos.

En el Capítulo 6 se presentan las expresiones analíticas para estimar la capacidad de rotación plástica y la rotación última en vigas de acero inoxidable cuando están sometidas a cargas sísmicas.

En el Capítulo 7 se expone el estudio de fiabilidad de las expresiones analíticas propuestas.

Por último, en el Capítulo 8 se recogen las conclusiones y se aportan recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este Capítulo se presenta los criterios y definiciones necesarias para entender el comportamiento estructural del acero inoxidable, esto es, la definición del material, tipos de aceros inoxidables, los modelos del material y tipos de análisis. Además, se añaden conceptos básicos del comportamiento de los metales bajo acciones sísmicas.

2.1 Acero Inoxidable

De acuerdo al Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural (2017) el acero inoxidable es un material de construcción especial, ya que es resistente a la corrosión y al calor, que contiene un mínimo de 10,5% de cromo, este material al ser expuesto al aire o al ambiente de corrosión puede formar una capa transparente y fuertemente adherida de óxido rico en cromo llamada “capa pasiva”. Se conoce una gran variedad de tipos de acero inoxidable con diferentes cantidades de cromo y de otros elementos químicos en aleación, dando diferentes comportamientos en la resistencia mecánica y corrosión. Al ser un material relativamente costoso, es importante seleccionar el tipo de acero inoxidable adecuado para cada uso.

El acero inoxidable presenta, además de su alta resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas como alta ductilidad, considerable endurecimiento por deformación monótona y cíclica, por lo que tiene un buen comportamiento para soportar cargas estáticas o accidentales debidas a eventos sísmicos y de fuego (Baddoo, 2008).

2.1.1 Tipos de Acero Inoxidable

Los aceros inoxidables se clasifican en cinco grandes grupos en función a su composición química, es decir la cantidad de cromo y otros elementos químicos que se encuentran presentes; los cuales mejoran las propiedades mecánicas y su comportamiento, teniendo así aceros inoxidables austeníticos, ferríticos, dúplex, martensíticos y por endurecimiento por precipitación, siendo los tres primeros los más utilizados en construcción.

A continuación se resumen las características principales de los aceros inoxidables austeníticos, ferríticos y dúplex, de acuerdo con la información recogida en el Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural (2017):

➤ Aceros inoxidables austeníticos

Es un tipo de acero inoxidable cuyo contenido en cromo oscila entre el 17 y el 18% y el de níquel entre el 8 y el 11%. Tiene una estructura atómica cúbica centrada y presenta resistencia a la corrosión y una gran ductilidad. Son fáciles de conformar y son

fácilmente soldables, además tienen mejor tenacidad. Cuando se trabaja en frío su resistencia mejora, lo que no sucede con el tratamiento térmico. Aumentando los niveles de cromo y con adiciones de molibdeno y nitrógeno se mejora su resistencia a la corrosión. Los aceros inoxidable austeníticos son los más utilizados en aplicaciones de edificación y construcción.

➤ Aceros inoxidable ferríticos

Contiene entre el 10.5 y el 18% de cromo y no contienen prácticamente nada níquel. Son muy parecidos al acero al carbono, y tienen menos resistencia a la corrosión, menos ductilidad y menos soldabilidad que el acero inoxidable austenítico. El conformado y manipulación son muy parecidas a las del acero al carbono S355. Se usa en ambientes interiores o ambientes exteriores con condiciones ambientales suaves, tienen una buena resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión y su resistencia a la corrosión se aumenta al añadirle molibdeno. Una de las aplicaciones de uso es para chapas ligeras galvanizadas de espesores iguales o menores a 4mm.

➤ Aceros inoxidable dúplex

Se los conoce como aceros austeníticos-ferríticos debido a que presentan una microestructura mixta entre austeníticos y ferríticos. Su composición varía entre 20-26 % de cromo, 1-8% de níquel, 0.05- 5% de molibdeno y 0.05- 0.3% de nitrógeno. Son más resistentes y permiten el uso de secciones transversales más pequeñas, ayudando a tener estructuras más ligeras, como en puentes o estructuras offshore. Además de su gran resistencia a los ambientes corrosivos, también tienen gran ductilidad, aunque no comparable con la de los aceros inoxidable austeníticos. Son soldables y tienen buena resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión.

2.1.2 Respuesta Básica del Acero Inoxidable Curva Tensión-Deformación

El Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural (2017) señala que el acero inoxidable tiene un comportamiento tensión-deformación muy diferente al del acero al carbono. Mientras que en el acero al carbono el comportamiento tensión-deformación se puede definir con una parte lineal hasta el límite elástico definido y luego una zona plana antes de ocurrir el endurecimiento por deformación, el acero inoxidable presenta un comportamiento no lineal, siendo redondeado desde el inicio por lo que es difícil determinar cuál es el límite elástico. En la Figura 2.1. se muestra la curva tensión-deformación de los principales tipos de acero inoxidable estructurales hasta el 0.75% y hasta conseguir la rotura del material. También se ha incluido la curva del acero al carbono S355. Como se puede observar, la curva para los aceros ferríticos se encuentra entre la curva del acero austenítico y el acero al carbono, es menos redondeada y tiene

un comportamiento no tan no lineal a comparación a los austeníticos y los dúplex. Además, se puede observar la gran ductilidad de los aceros inoxidable austeníticos, que permite la absorción de los impactos evitando la fractura y además de un endurecimiento por deformación (SCI, 2017).

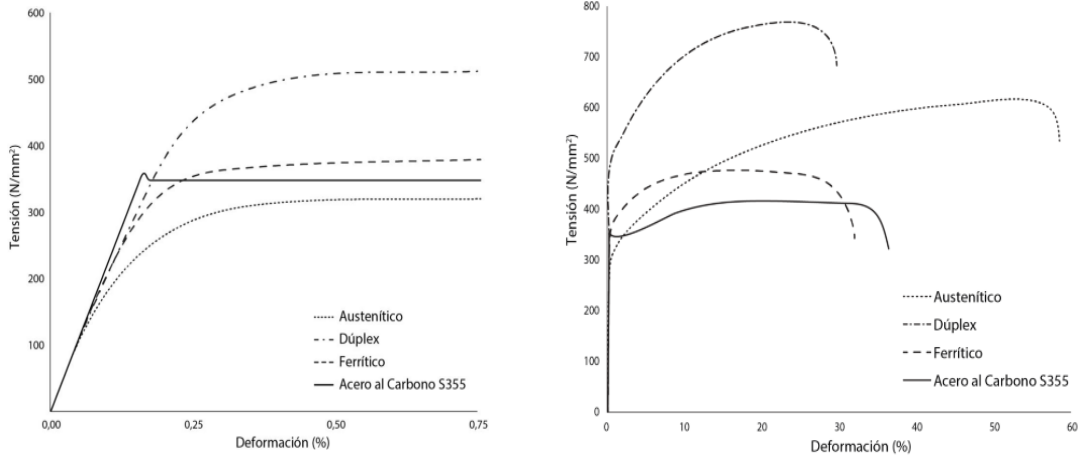


Figura 2.1. Comportamiento curva tensión-deformación acero inoxidable (SCI, 2017)

2.1.3 Determinación del Límite Elástico del Acero Inoxidable

De acuerdo con el Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural (2017) y tal y como se muestra en la Figura 2.2., el límite elástico al 0.2% se conoce como el valor de deformación remanente en función de una resistencia de prueba convencionalmente la deformación del 0.2%.

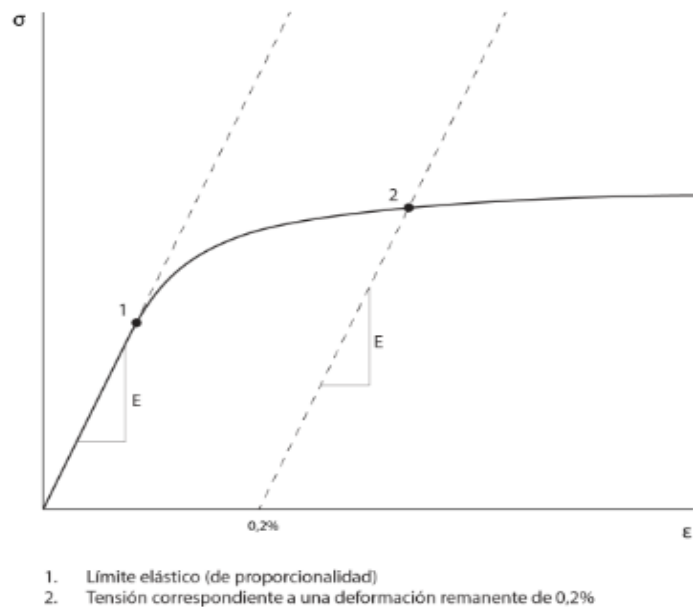


Figura 2.2. Definición de la resistencia correspondiente a una deformación remanente del 0.2% (SCI, 2017)

2.2 Plasticidad

De acuerdo con Borja (2013) se conoce como plasticidad a los efectos de un material, que al aplicar una carga este presenta una deformación irreversible, de tal manera que cuando se quita la carga sólo una fracción se recupera; produciendo cambios a la estructura inicial; este comportamiento plástico se debe a dislocaciones de cristales en estructuras cristalinas. Los materiales como el acero pueden experimentar diferentes comportamientos al deformarse; como el comportamiento de deformación reversible y el comportamiento de deformación irreversible, definidos como rango elástico y rango plástico respectivamente, como se muestra en la Figura 2.3.

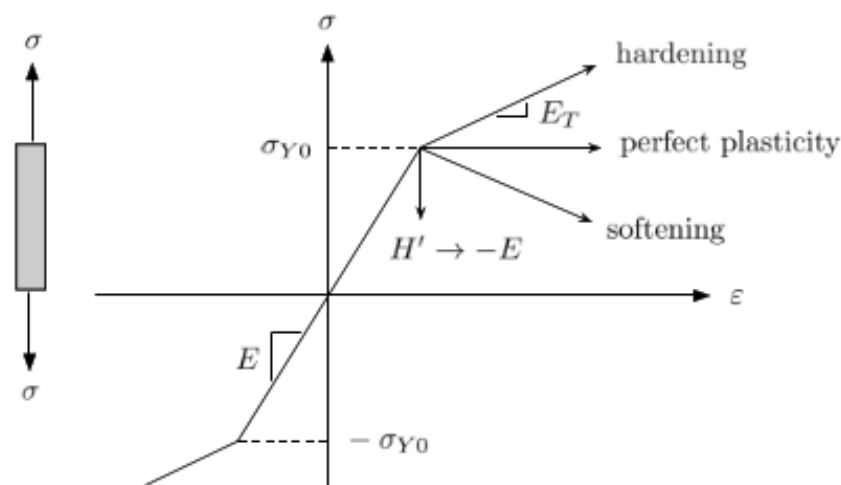


Figura 2.3. Carga uniaxial de una barra elastoplástica: endurecimiento cuando $H > 0$, perfecta plasticidad cuando $H = 0$, y ablandamiento cuando $H < 0$ (Borja, 2013)

La plasticidad es una propiedad mecánica importante en el ámbito del diseño estructural sísmico, ya que esta permite definir la capacidad de los materiales para deformarse plásticamente, siendo esta deformación asociada a la disipación de energía en los elementos.

2.2.1 Endurecimiento por Deformación

Según Black y Kohser (2012) el endurecimiento por deformación o endurecimiento por trabajo es un fenómeno que se observa cuando el material se ha deformado de manera plástica y aumenta su resistencia. En los metales la deformación plástica ocurre a través del movimiento de dislocaciones (Figura 2.4.), estas a medida que se mueven, es más probable que se encuentren e interactúen con otras dislocaciones u efectos cristalinos lo cual produce una resistencia adicional al movimiento.

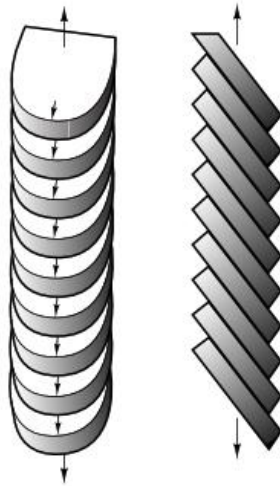


Figura 2.4. Representación del deslizamiento y la rotación del cristal resultante de la deformación (Black, 2012)

2.2.1.1 Efecto de Bauschinger

Este efecto ocurre cuando el material ya ha sufrido deformaciones plásticas en tracción y se somete a una carga invertida. Cuando esto ocurre, se observa que la tensión de fluencia en compresión disminuye con respecto a tensión de fluencia de tracción y viceversa como se ilustra en la Figura 2.5. A este fenómeno se lo conoce como efecto de Bauschinger (Oliver, 2002).

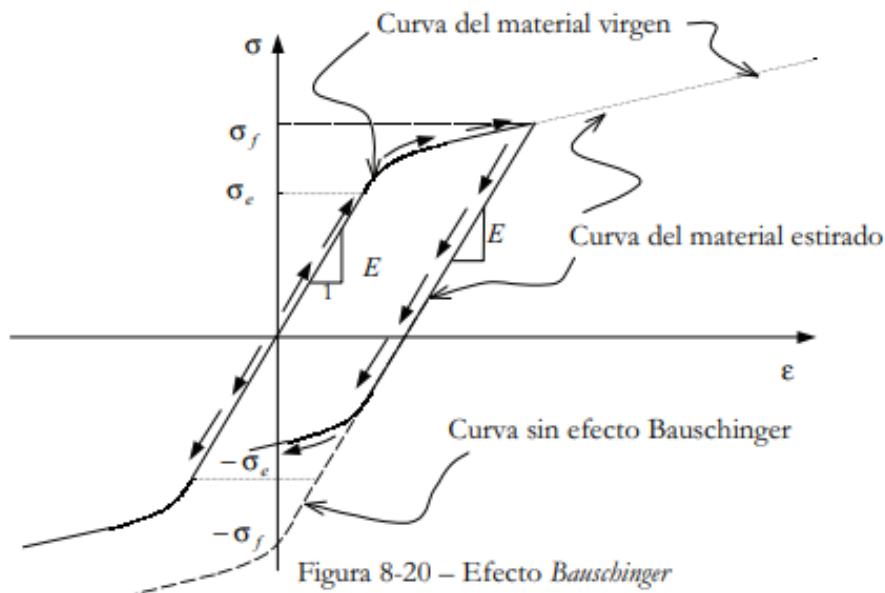


Figura 2.5. Efecto de Bauschinger (Oliver, 2002)

El mecanismo detrás del efecto Bauschinger se atribuye a un tipo particular de tensiones residuales que se forman en los límites del grano de los policristalinos, y está relacionado con la estructura de dislocación en un metal trabajado en frío (Borja, 2013).

2.2.1.2 Endurecimiento Isotrópico

La ley del endurecimiento isotrópico involucra que el límite elástico en compresión aumenta en la misma cantidad que el límite elástico en tracción. Esto significa que, por cada cambio incremental del límite elástico, el rango de la región elástica cambia en dos veces, como se muestra en la Figura 2.6. y, por lo tanto, este endurecimiento no puede adoptar la respuesta hiperestática de un material sometido a cargas cíclicas (Borja, 2013).

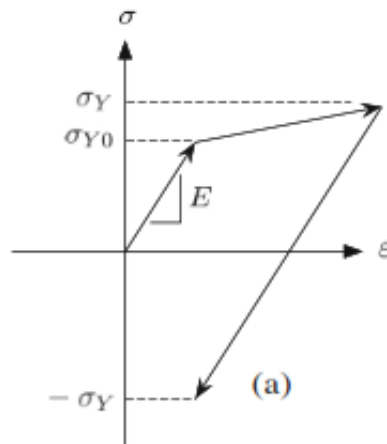


Figura 2.6. Endurecimiento isotrópico (Borja, 2013)

2.2.1.3 Endurecimiento Cinemático

Borja (2013) señala que el endurecimiento cinemático consiste en que por cada cambio incremental del límite elástico en tracción hay un cambio incremental del límite elástico en compresión y viceversa, mientras que en la zona elástica no cambia y simplemente se traslada, como se muestra en la Figura 2.7. En este endurecimiento se tiene en cuenta el efecto de Bauschinger. Para capturar la respuesta del endurecimiento cinemático se introduce el concepto de backstress, cuya formulación se da más adelante.

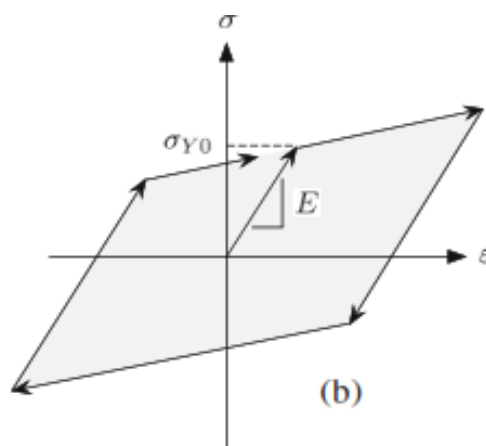


Figura 2.7. Endurecimiento Cinemático (Borja, 2013)

2.2.1.4 Endurecimiento Combinado

El análisis de un endurecimiento combinado permite describir el comportamiento cíclico del material, teniendo en cuenta el endurecimiento isotrópico y cinemático. En la Figura 2.8. se muestra la participación de los dos endurecimientos en un material (Borja, 2013).

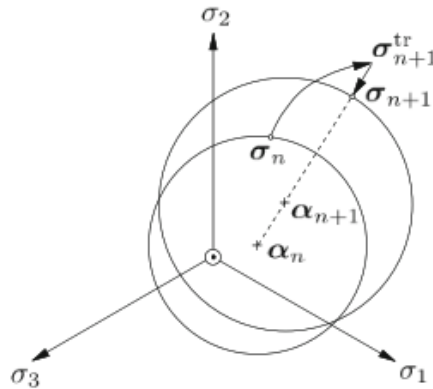


Figura 2.8. Endurecimiento combinado (Borja, 2013)

2.3 Modelo Material

A lo largo de las últimas décadas diferentes teorías han tratado de proponer expresiones analíticas que describan el comportamiento no lineal de la curva tensión-deformación del acero inoxidable, ya sea bajo cargas monotónicas o cargas sísmicas. A continuación, se exponen los principales modelos de material propuestos hasta la fecha.

2.3.1 Modelo Ramberg-Osgood

El modelo de Ramberg-Osgood es la representación para una respuesta monotónica. Este modelo surge a partir de la propuesta realizada por Ramberg y Osgood (1943) en la que se planteó un modelo de material para aluminio, aunque también funciona para aleaciones como el acero inoxidable. Originalmente, el modelo de material de Ramberg-Osgood describe la relación no lineal entre las tensiones y deformación de los metales hasta el límite elástico ($f_{0.2}$) teniendo en cuenta solo tres parámetros como se muestra en la Ec. (1).

$$\varepsilon = \frac{f}{E_0} + K \left(\frac{f}{E_0} \right)^n ; f < f_{0.2} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

ε Deformación ingenieril

E_0	Módulo de elasticidad
K y n	Grado de redondez del material
f	Tensión ingenieril

Hill (1944) aportó valores al modelo de Ramberg y Osgood (1943) que consistieron en la definición de las variable K y n , como se observa en las Ec. (2) y Ec. (3)

$$\varepsilon = \frac{f}{E_0} + 0.02 \left(\frac{f}{f_{0.2}} \right)^n \quad \text{Ec. (2)}$$

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{f_{0.2}}{f_{0.1}}\right)} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$f_{0.1}$ La tensión a una deformación remante del 0.1%

Mirambell y Real (2000) propusieron la definición de la curva tensión-deformación en dos etapas, ya que el modelo planteado por Hill (1944) solo funcionaba para valores menores al límite elástico. Tal y como se observa en la Figura 2.9, donde se representa los principales parámetros del modelo material de Ramberg-Osgood de dos tramos propuesto por Mirambell y Real (2000), el modelo presenta un primer tramo, idéntico al de Hill (1944) y, para deformaciones superiores a 0.2%, una segunda curva.

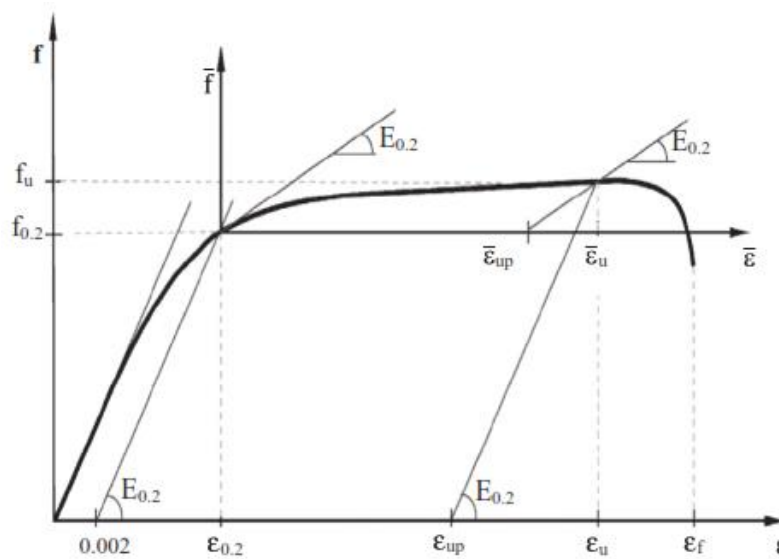


Figura 2.9. Mirambell y Real - modelo material de dos etapas (curva tensión- deformación) (Arrayago et al., 2015)

Las expresiones propuestas para la segunda etapa del modelo de Ramberg-Osgood de Mirambell y Real (2000) se presentan en las Ec. (4) y Ec. (5).

$$\varepsilon = \frac{(f - f_{0.2})}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{f_u - f_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{f - f_{0.2}}{f_u - f_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \quad ; f > f_{0.2} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n / \left(\frac{E_0}{f_{0.2}} \right)} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

$E_{0.2}$	Módulo de elasticidad
m	Grado de redondez para $f > f_{0.2}$
f_u	Tensión de última
$\varepsilon_{0.2}$	Deformación en el límite elástico

Rasmussen (2003) simplificó la expresión propuesta por Mirambell y Real (2000) pasando de seis parámetros a tres, ya que propuso expresiones analíticas para determinar la tensión última (f_u), la deformación última (ε_u), la deformación en el límite elástico ($\varepsilon_{0.2}$) y el coeficiente adicional de endurecimiento por deformación para altas deformaciones (m). Estas expresiones fueron incluidas en el anejo C del prEN 1993-1-4 (2006).

$$\varepsilon = \frac{(f - f_{0.2})}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{f - f_{0.2}}{f_u - f_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \quad ; f > f_{0.2} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\frac{f_{0.2}}{f_u} = \begin{cases} 0.2 + 185 \left(\frac{f_{0.2}}{E_0} \right) & ; \text{ para acero inoxidable austenítico y dúplex} \\ 0.2 + 185 \left(\frac{f_{0.2}}{E_0} \right) & ; \text{ para aleaciones de acero inoxidable} \\ 1 - 0.0375(n - 5) & \end{cases} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_{0.2}}{f_u} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\varepsilon_{0.2} = \frac{f_{0.2}}{E_0} + 0.002 \quad \text{Ec. (9)}$$

$$m = 1 + 3.5 \left(\frac{f_{0.2}}{f_u} \right) \quad \text{Ec. (10)}$$

Posteriormente se han realizado estudios para calibrar mejor estos parámetros, incluyendo también a los aceros inoxidable ferríticos (Arrayago, et al., 2015), cuyos resultados se han incluido el Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural (2017), y la nueva versión prEN 1993-1-4 (2021). Dicho modelo de material es el utilizado en la actualidad y en el presente Trabajo:

$$\varepsilon = \frac{f}{E} + 0.002 \left(\frac{f}{E_0} \right)^n \quad \text{para } f \leq f_y \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\varepsilon = 0.002 + \frac{f_y}{E} + \frac{(f - f_y)}{E_y} + \varepsilon_u \left(\frac{f - f_y}{f_u - f_y} \right)^m \quad \text{para } f > f_y \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

- f La tensión ingenieril
- ε La deformación ingenieril
- E Módulo de elasticidad
- f_y La tensión Limite elástico
- f_u La tensión última
- n Término a definirse a partir de las propiedades del material Ec. (13) o mediante los valores de la Tabla 2.1.

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{f_y}{R_{p0.05}}\right)} \quad \text{Ec. (13)}$$

$R_{p0.05}$ Tensión a la deformación remanente del 0.05%

Tabla 2.1. Valor n aceros inoxidables (SCI, 2017)

Grado de Acero	Coficiente n
Ferrítico	14
Austenítico	7
Dúplex	8

E_y El módulo tangente de la curva tensión-deformación correspondiente al límite elástico Ec. (5)

ε_u Deformación ultima correspondiente a la resistencia ultima f_u

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad \text{Para aceros inoxidables austeníticos y dúplex} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$\varepsilon_u = 0.6 \left[1 - \frac{f_y}{f_u} \right] \quad \text{Para aceros inoxidables ferríticos} \quad \text{Ec. (15)}$$

El valor de m se determina mediante la Ec. (16).

$$m = 1 + 2.8 \left(\frac{f_y}{f_u} \right) \quad \text{Ec. (16)}$$

Cuando el valor de f_y sea conocido, f_u puede estimarse con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{f_y}{f_u} = 0.2 - 185 \frac{f_y}{E} \quad \text{Para aceros inoxidables austeníticos y dúplex} \quad \text{Ec. (17)}$$

$$\frac{f_y}{f_u} = 0.46 - 145 \frac{f_y}{E} \quad \text{Para aceros inoxidables ferríticos} \quad \text{Ec. (18)}$$

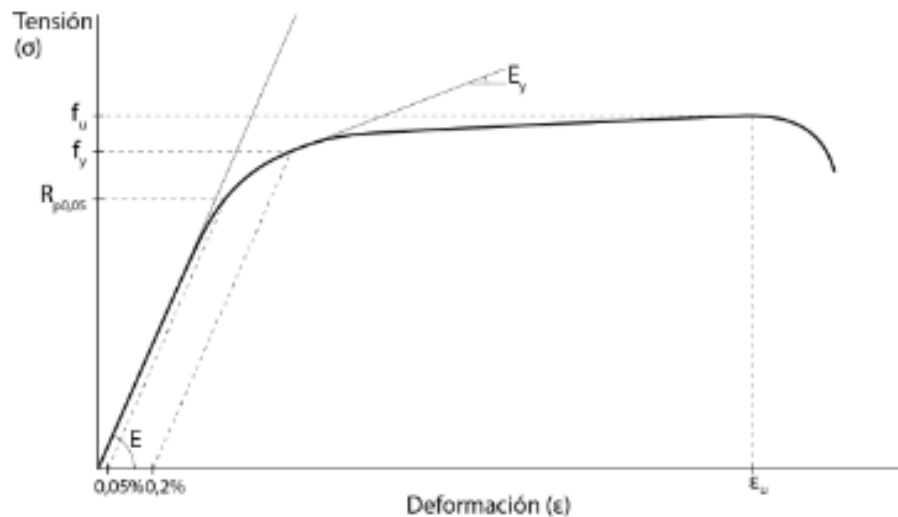


Figura 2.10. Principales parámetros del modelo del material (SCI, 2017)

2.3.1 Modelo Chaboche

El modelo material de Chaboche (1986) es idóneo para representar la respuesta cíclica de los materiales como el acero inoxidable, debido a que es un modelo no lineal con un endurecimiento combinado isotrópico y cinemático (Nip et al. (2010) el cual permite representar los efectos de Bauschinger.

A continuación se presenta la descripción del modelo en la que se detalla cada una de las componentes de endurecimiento isotropico y cinemático.

- Componente isotrópica

El endurecimiento isotrópico define el cambio del tamaño de la superficie de plastificación (σ^0), como función de la deformación plástica equivalente ε^p expresada en la Ec. (19).

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty(1 - e^{-b_{iso}\varepsilon^p}) \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde:

$\sigma|_0$ Tensión de plastificación a una deformación plástica equivalente cero (definido al 0.01% tensión de prueba)

Q_∞ Cambio máximo en el tamaño de superficie de plastificación

b_{iso} Velocidad con la que cambia el tamaño de la superficie de plastificación a medida que la deformación plástica aumenta.

Para conocer el tamaño de la superficie de plastificación (σ_i^0) y la deformación plástica ε_i^p correspondiente al i-ésimo ciclo se define mediante la Ec. (20),y Ec. (21) respectivamente.

$$\sigma_i^0 = \frac{\sigma_i^t - \sigma_i^c}{2} \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde:

σ_i^t Tensión máxima a tracción en el rango elástico

σ_i^c Tensión máxima a compresión en el rango elástico

$$\varepsilon_i^p = \frac{1}{2}(4i - 3) \Delta\varepsilon_p \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde:

$\Delta\varepsilon_p$ Rango de deformación plástica acorde la Ec. (22)

$$\Delta\varepsilon_p \approx \Delta\varepsilon - 2\sigma_1^t/E \quad \text{Ec. (22)}$$

En la Figura 2.11. se observa las variables mencionadas de las componentes de

análisis para la calibración isotrópica.

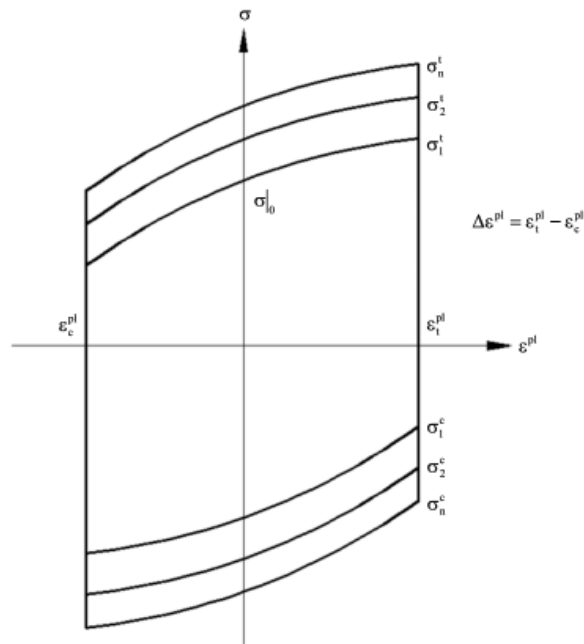


Figura 2.11. Calibración endurecimiento isotrópico (Nip et al., 2010)

Se utiliza una serie de valores $(\sigma_i^0, \varepsilon_i^p)$ para la obtención de los parámetros Q_∞ y b_{iso} , incluyendo σ_0 a la deformación plástica equivalente cero. La manera más sencilla de obtener estos parámetros es a partir de un ciclo estabilizado de un experimento cíclico simétrico controlado por deformación.

- Componente Cinemática

El cambio del Backstress (α) se define de acuerdo con la componente cinemática como se muestra en el modelo de la Ec. (23). Backstress es la coordenada de tensión de un punto a mitad del camino entre la tensión de plastificación en tracción y la tensión de plastificación en compresión.

$$\alpha = \frac{C_{kin}}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \varepsilon^p}) + \alpha_1 e^{-\gamma \varepsilon^p} \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde:

C_{kin}, γ Constantes que se pueden calibrar mediante prueba datos de un ciclo estabilizado.

$\frac{C_{kin}}{\gamma}$ Máxima variación en Backstress y γ determina la velocidad a la que varía el backstress a medida que aumenta la deformación plástica

Para los pares de puntos $(\sigma_i, \varepsilon_i^p)$ se desplazan o cambian siguiendo la Ec. (24).

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i + \frac{\sigma_i}{E} - \varepsilon_p^0 \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde:

ε_i^p Deformación plástica

ε_p^0 Es el valor de la deformación plástica cuando la curva cruza el eje de deformación

Si $\varepsilon_i^p = 0$ para cada par de valores $(\sigma_i, \varepsilon_i^p)$ el valor obtenido α_i se obtiene mediante la Ec. (25)

$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma^s \quad \text{Ec. (25)}$$

Donde:

σ^s Promedio del primer y el último punto de datos σ_1 y σ_n para un ciclo respectivamente (Figura 2.12.)

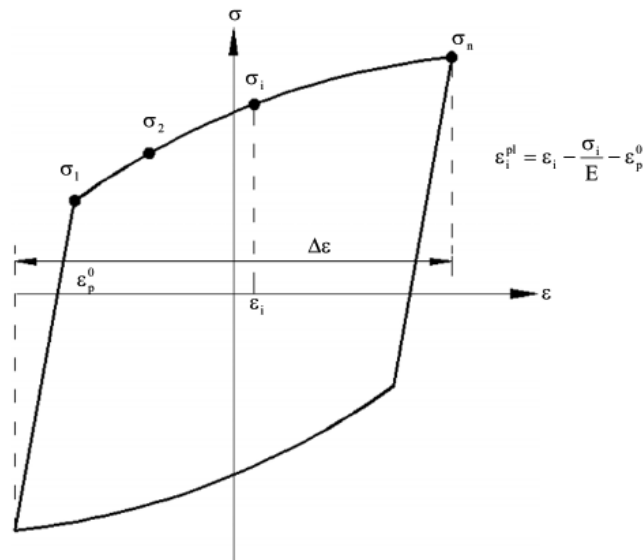


Figura 2.12. Calibración endurecimiento cinemático (Nip et al., 2010)

Se utiliza una serie de valores $(\alpha_i, \varepsilon_i^p)$ para el ajuste de datos y los parámetros C_{kin} y γ pueden ser obtenidos mediante la Ec. (23).

2.3.2 Continuous Strength Method

El Continuous Strength Method (CSM) es un método de cálculo basado en la deformación de la sección que tiene en cuenta la ductilidad y reserva de resistencia ganada durante el endurecimiento por deformación o strain-hardening (SCI, 2017). El CSM está basado en el modelo bilineal con endurecimiento lineal mostrado en la Figura 2.13.:

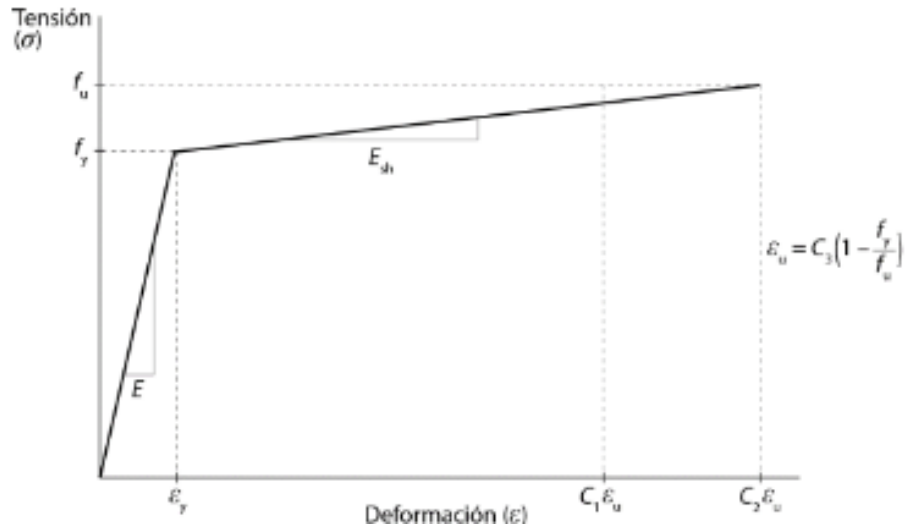


Figura 2.13. Modelo de material para el CSM, bilineal con endurecimiento lineal (SCI, 2017)

El módulo elasticidad de la rama de endurecimiento se define por la Ec. (26), mientras que los valores de los tres coeficientes C1, C2, C3 se muestran en la Tabla 2.2.

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad \text{Ec. (26)}$$

Tabla 2.2 Coeficientes para el modelo material CSM (SCI, 2017)

Acero Inoxidable	C ₁	C ₂	C ₃
Austenítico	0.10	0.16	1.00
Dúplex	0.10	0.16	1.00
Ferrítico	0.40	0.45	0.60

En el CSM, la determinación de las diferentes resistencias y de la esbeltez seccional viene dada por la definición de la curva base del CSM que proporciona la relación entre la capacidad de deformación normalizada de las secciones transversales $\frac{\varepsilon_{CSM}}{\varepsilon_y}$. De acuerdo con prEN 1993-1-4 (2021), la curva base con la Ec. (27) si el modelo material que hemos usado en nuestros análisis es el de Ramberg-Osgood de dos tramos.

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{0,25}{\bar{\lambda}_{p,cs}^{3,6}} + \frac{0,002}{\varepsilon_y} & \text{para } \bar{\lambda}_{p,cs} \leq 0,68 \\ \left(1 - \frac{0,222}{\bar{\lambda}_{p,cs}^{1,050}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_{p,cs}^{1,050}} + \frac{0,002 \left(\frac{f}{f_y}\right)^n}{\varepsilon_y} & \text{para } 0,68 < \bar{\lambda}_{p,cs} < 1,00 \end{cases} \quad \text{Ec. (27)}$$

Donde:

$\bar{\lambda}_{p,cs}$ Esbeltez seccional de las secciones formadas por chapas

La esbeltez seccional se calcula con la Ec. (28), donde $f_{cr,p}$ es la tensión crítica ideal de abolladura del panel más esbelto.

$$\bar{\lambda}_{p,cs} = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}} \quad \text{Ec. (28)}$$

En el caso de RHS, la tensión crítica ideal de abolladura del panel más esbelto ($f_{cr,p}$) puede estimarse con la Ec. (29), o numéricamente mediante el software CUFSM (2010).

$$f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} \quad \text{Ec. (29)}$$

Donde:

\bar{b} Ancho del panel

t Espesor de la chapa del panel

ν Coeficiente de Poisson para acero

k_σ Coeficiente de abolladura del panel correspondiente a una distribución de tensiones ψ y condiciones de contorno determinadas.

CAPÍTULO 3: ELABORACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y SU VALIDACIÓN

En este Capítulo se detallan las características de los análisis numéricos que se realizaron antes del estudio paramétrico. Estos análisis numéricos se llevaron a cabo en vigas a flexión sometidas a cargas estáticas. Así, en primer lugar, se reprodujeron en el software de cálculo ABAQUS (2014) tres de los cuatro ensayos de vigas a flexión bajo dos cargas estáticas puntuales que formaron parte de la campaña experimental del proyecto PINOX. Esta actividad perseguía un doble objetivo: familiarizarse con ABAQUS (2014) y validar el modelo que posteriormente se utiliza en el estudio paramétrico.

3.1 Reproducción de los Ensayos Estáticos a Flexión PINOX

La validación del modelo numérico de elementos finitos (FE) utilizado en el estudio paramétrico, así como el análisis y selección del modelo del material más adecuado para el análisis cíclico, se realizó mediante la simulación numérica de los ensayos de vigas sometidas a cargas puntuales estáticas equidistantes, en adelante “Four Point Bending Test” o simplemente 4BP, realizados en la campaña experimental del proyecto PINOX.

La información y resultados obtenidos de campaña experimental de elementos estructurales que se realizó se encuentra publicada en el artículo “Tests on stainless steel frames. Part I: Preliminary tests and experimental set-up” (Arrayago et al., 2020). Concretamente, en los apartados 2.1 y 2.3 se exponen los resultados de los ensayos de caracterización de material y comportamiento a flexión de vigas 4PB, respectivamente, utilizados en este Trabajo.

En la campaña experimental PINOX se analizaron elementos estructurales y pórticos con cuatro tipos de secciones transversales. Como el presente Trabajo está centrado en la caracterización de rótulas plásticas, solo son de interés aquellas secciones transversales clase 1 a flexión, conforme la clasificación de sección transversal propuesta por prEN 1993-1-4 (2021). Por tanto, en esta sección no se incorporan los resultados correspondientes a los ensayos de secciones clase 4.

3.1.1 Caracterización del Material PINOX

La campaña experimental del proyecto PINOX se realizó en acero inoxidable austenítico 1.4031. La caracterización del material austenítico empleado en el proyecto PINOX se realizó mediante ensayos de probetas “coupon tests” a tracción, tal y como detalla Arrayago et al. (2020). Las probetas se extrajeron directamente de los perfiles

huecos austeníticos, tanto de las esquinas curvadas o “corner” como de la parte plana o “flat”. La Figura 3.1. muestran las curvas tensión-deformación obtenidas para cada uno de los ensayos de “coupon tests” flat (F) y corner (Co) extraídos de los perfiles con secciones transversales RHS1, RHS2 y RHS3.

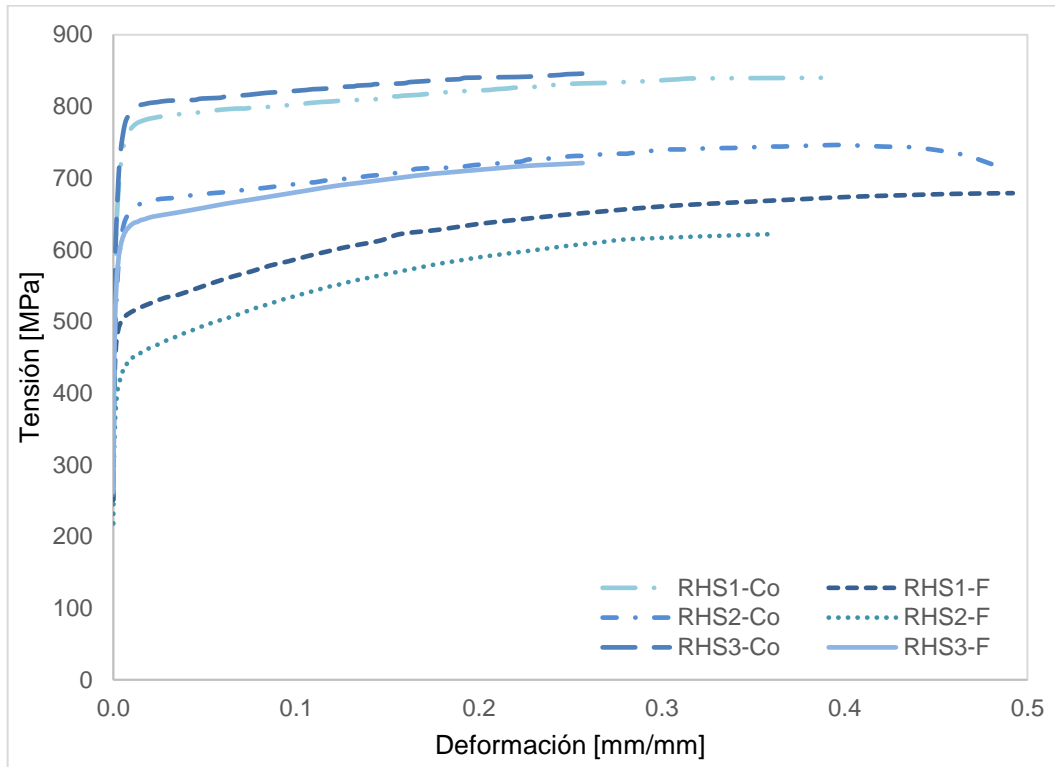


Figura 3.1. Mediciones curvas tensión-deformación para zonas planas y esquinas "coupon test" (Arrayago et al., 2020)

De las curvas tensión-deformación representadas en la Figura 3.1. se obtuvieron los parámetros necesarios para definir el comportamiento tensión-deformación del material de acuerdo con el modelo de material de Ramberg-Osgood de dos tramos (Arrayago et al., 2015) definido en las Ec. (11) y Ec. (12). Estos parámetros están resumidos en la Tabla 3.1. donde E es el módulo de Young, $f_{0.05}$ es la tensión correspondiente al 0.05% de la deformación plástica, $f_{0.2}$ es el límite elástico, f_u y ϵ_u son la tensión y deformación última, respectivamente, y n y m son los parámetros que hacen referencia al grado de no linealidad de la curva tenso-deformacional para bajas y altas deformaciones, respectivamente.

Tabla 3.1. Parámetros característicos del material obtenido de tracción "coupon test" (Arrayago et al., 2020)

Espécimen	E [MPa]	$f_{0.05}$ [MPa]	$f_{0.2}$ [MPa]	f_u [MPa]	ϵ_u [mm/mm]	n	m
RHS1-F	185778	396	479	679	0.39	7.05	2.55
RHS2-F	183098	332	398	622	0.36	7.11	2.33
RHS3-F	197066	526	563	721	0.26	7.02	3.82
RHS1-Co	185360	374	635	840	0.34	5.40	7.89
RHS2-Co	181345	384	539	746	0.45	5.55	7.02
RHS3-Co	172619	454	652	856	0.32	5.52	7.74

3.1.2 Características Geométricas de las Vigas PINOX y Configuración del Ensayo 4PB

El estudio de la capacidad de resistencia a flexión de los elementos estructurales se realizó mediante ensayos estáticos "Four Point Bending Test" (4PB). La configuración del ensayo se muestra en la Figura 3.2. La longitud entre apoyos fue de 1500 mm, y las cargas se aplicaron a una distancia de 510 mm de los soportes. Las cargas puntuales fueron aplicadas con una máquina hidráulica cuya capacidad fue 1000 kN, mediante desplazamiento controlado, para garantizar los resultados y duración. Las secciones de viga donde se aplicaron las cargas fueron macizadas para evitar la abolladura de la sección en los puntos de carga, fenómeno conocido como Web Crippling.



Figura 3.2. Esquema "Four Point Bending Test" (Arrayago et al., 2020)

La Tabla 3.2. presenta las características geométricas de las secciones huecas transversales de las vigas ensayadas relevantes para este Trabajo, donde H es la altura

de la sección, B es el ancho, t es el espesor de la sección y R_{ext} es el radio exterior. Además, la Tabla 3.2. incorpora las dimensiones totales de los elementos (L). Por último, la clase de sección de las secciones y las esbelteces locales también son recogidas en la Tabla 3.2., de acuerdo con la clasificación y fórmulas publicadas en prEN 1993-1-4 (2021).

Las esbelteces locales fueron calculadas como $\bar{\lambda}_{p,i} = \sqrt{f_y/f_{cr,p}}$ donde $f_{cr,p}$ es el valor de la tensión crítica ideal de abolladura de la sección transversal cuando está sometida a un momento obtenida mediante el programa CUFSM (2010).

Tabla 3.2. Medidas geométricas del espécimen ensayadas (Arrayago et al., 2020)

Sección Transversal	Clase sección transversal	Esbeltez local $\bar{\lambda}_p$ en flexión	H [mm]	B [mm]	t [mm]	R_{ext} [mm]	L [mm]
RHS1	1	0.27	120.0	80.0	6.00	20.10	1700.50
RHS2	1	0.42	99.8	80.2	3.90	12.60	1700.00
RHS3	1	0.32	120.1	41.1	3.90	12.10	1700.50

La Figura 3.3 muestra las curvas carga-flecha de las vigas ensayadas.

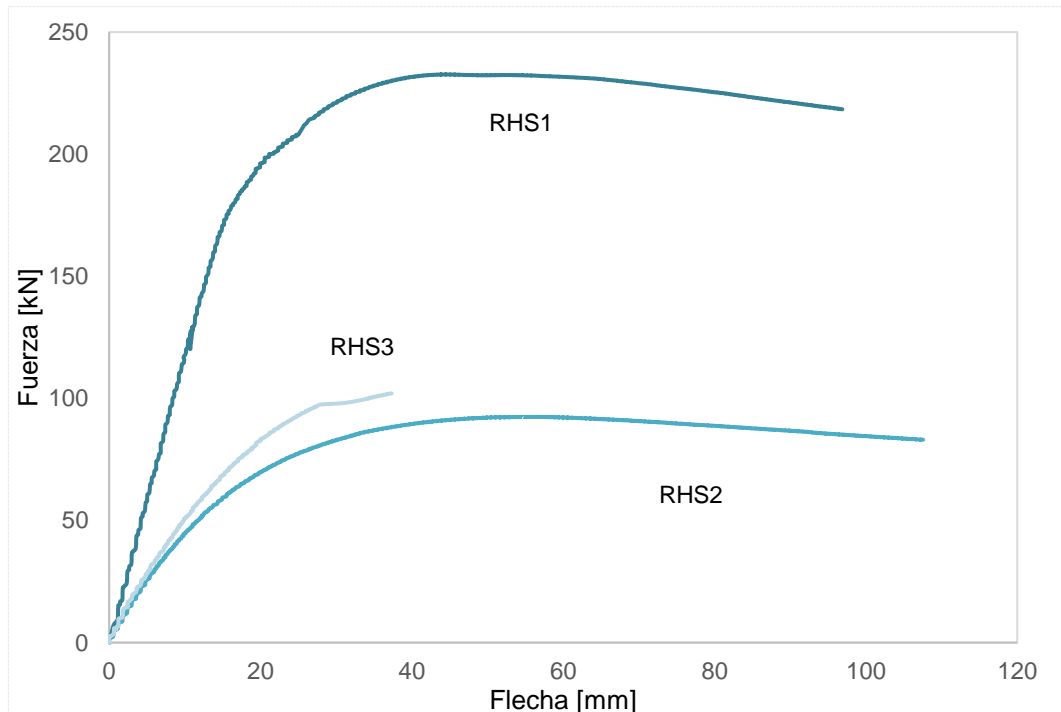


Figura 3.3. Curvas experimentales carga-flecha en la mitad del vano para vigas de acero inoxidable austeníticas (Arrayago et al., 2020)

Los resultados obtenidos de los ensayos 4PB se resumen en la Tabla 3.3., donde F_u es la carga última, d_u es la flecha máxima, medida en la sección central, y M_u es el

momento último, calculado como F_{ux} distancia al soporte. También se muestran los ratios entre momento último M_u y el momento elástico M_{el} y momento plástico M_p .

Tabla 3.3. Resultados experimentales "Four Point Bending Test" (Arrayago et al., 2020)

Espécimen	F_u [kN]	d_u [mm]	M_u [kNmm]	$\frac{M_u}{M_{el}}$	$\frac{M_u}{M_{pl}}$
RHS1-B	232.6	44.5	50.3	2.02	1.32
RHS2-B	92.4	56.4	23.6	1.60	1.22
RHS3-B	105.6	46.8	26.9	1.68	1.15

3.2.1. Modelo Numérico del Ensayo PINOX

Esta investigación está basada en resultados numéricos extraídos de modelos de elementos finitos (FE) realizados en el software ABAQUS (2014). La ventaja del uso de modelos de FE es evidente: una vez validado el modelo mediante la comparación de sus resultados con resultados experimentales, se puede repetir el ensayo ininidad de veces "a coste cero" cambiando ciertos parámetros y de esta forma conocer la influencia de estos en el comportamiento estructural.

En este Trabajo, los FE utilizados son tipo shell, concretamente los 4SR de acuerdo con la biblioteca de ABAQUS (2014). Se ha comprobado que los elementos tipos shell son óptimos para reproducir el comportamiento real de un elemento estructural de acero inoxidable (Theofanous and Gardner, 2009; Arrayago et al., 2017a).

Así, con ayuda de las herramientas de dibujo disponibles en ABAQUS (2014), se modelaron 3 vigas de sección hueca de longitud y disposición de cargas representadas en la Figura 3.4.

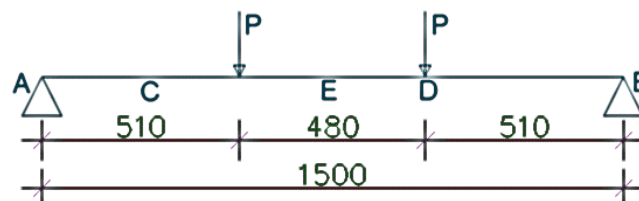


Figura 3.4. Modelo FEM para "Four Point Bending Test"

Las secciones transversales se dibujaron conforme a las dimensiones recogidas en la Tabla 3.2. Es importante dibujar las dimensiones de las secciones a eje de espesor, puesto que el espesor se coloca por defecto en el centro de cada cara. Mediante la opción Datum Plane se limitaron las superficies de apoyo y aplicación de carga. Estas superficies fueron cuadradas, esto es, de lado $H-2R_{ext}$. En centro de estas superficies se dispuso un Reference Point, enlazado a las mismas mediante la opción Coupling-Tie. En los Reference Points del apoyo se asignaron las restricciones correspondientes

(las rotaciones fuera de plano y los movimientos verticales y horizontales fueron impedidos), mientras que en los Reference Points de carga se aplicó un desplazamiento impuesto. Es de resaltar que para evitar el Web Crippling en estos puntos, el esquema de cargas se alteró un poco con respecto al del laboratorio, y las cargas se aplicaron desde la cara inferior. Para terminar de referenciar todos los puntos importantes a lo largo de viga, se añadió un Reference Point en la sección central. Por último, los modelos fueron discretizados en una malla de 10mm de espesor, aproximadamente. El tamaño de la malla lo determinó un estudio de convergencia de malla, donde se valoró la precisión de los resultados respecto al tiempo de análisis. La Figura 3.5. muestra el modelo numérico de la viga RHS1 antes de ser analizado.

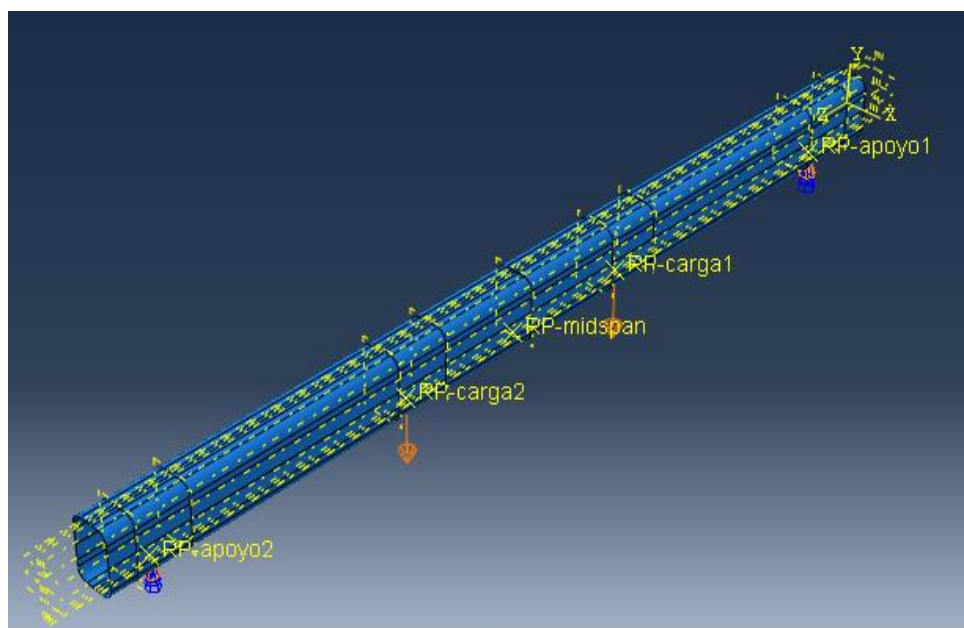


Figura 3.5. Modelo numérico "Four Point Bending Test" para la viga RHS1-PINOX

Respecto al método de análisis, los modelos se analizaron siguiendo un Analysis Static Risk (ABAQUS, 2014) mediante control de desplazamiento.

Para reproducir realísticamente se llevó a cabo un análisis teniendo en cuenta la no linealidad del material y la no linealidad geométrica y con imperfecciones iniciales, conocido como GMNIA. Respecto a las imperfecciones iniciales, en un análisis GMNIA de un elemento estructural es necesario tener en cuenta las imperfecciones geométricas locales, del elemento y las tensiones residuales, de acuerdo con prEN 1993-1-14 (2020). No obstante, en el comportamiento de vigas a flexión, las imperfecciones locales y del elemento no influyen por lo que no fueron incluidas en los modelos numéricos.

En cuanto a las tensiones residuales, hay de dos tipos, de membrana y de flexión. En secciones SHS y RHS conformadas en frío se ha demostrado que los efectos residuales de membrana son de baja magnitud, y por tanto despreciables en una

respuesta estructural, mientras que las tensiones residuales de flexión sí deben tenerse en cuenta. En este Trabajo, estas tensiones residuales de flexión se consideran introducidas implícitamente en el análisis, ya que el modelo de material utilizado está definido con los parámetros resultantes de analizar “coupon tests” cortados directamente de los perfiles, como se ha explicado en el apartado 3.1.1.

Respecto al modelo de material, como se comentó en la Sección 3.1.1 de este Trabajo, se ha definido la no linealidad del material siguiendo la expresión de Ramberg-Osgood de dos tramos (Arrayago et al., 2015). Así, el material del modelo se definió insertando un conjunto de valores tensión-deformación obtenidos de la Ec. (11) y Ec (12). Se supuso que el endurecimiento del material era de tipo isotrópico, ya que las vigas fueron sometidas a cargas monotónicas. Es importante recordar que en ABAQUS (2014) la rama plástica del acero inoxidable se define en términos de tensión-deformación plástica. La deformación plástica se calcula con la Ec. (30).

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \frac{f_y}{E} \quad \text{Ec. (30)}$$

En una simulación rigurosa del comportamiento estructural del acero inoxidable es aconsejable diferenciar entre la parte curva (corner) y la parte plana (flat) de la sección transversal y asignar a cada una el material correspondiente. Así, según Gardner y Nethercot (2004), la parte curva de la sección comprende el radio de dos veces el espesor de la pared, tal y como se muestra la Figura 3.6.

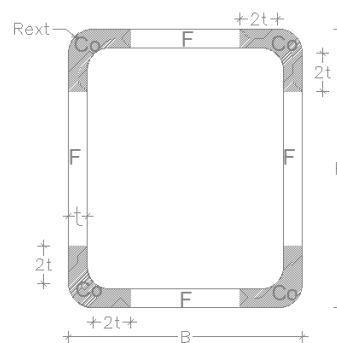


Figura 3.6. Ejemplo partes Flat (F) y Corner (Co) sección rectangular hueca

No obstante, es muy común asignar un único material a toda la sección. Este modelo material se calcula con parámetros medios o weighted average de módulo de elasticidad (E), límite de elástico (f_y), y grado de redondez (n y m). El valor de estos parámetros, como su propio nombre indica, se obtienen haciendo una media ponderada con respecto al área plana o flat (f) y curva o corner (Co), tal y como muestran en las Ec. (31), Ec. (32), Ec. (33) y Ec. (34).

$$E = E_F \frac{A_F}{A_{total}} + E_{Co} \frac{A_{Co}}{A_{total}} \quad \text{Ec. (31)}$$

$$f_y = f_{yF} \frac{A_F}{A_{total}} + f_{yCo} \frac{A_{Co}}{A_{total}} \quad \text{Ec. (32)}$$

$$n = n_F \frac{A_F}{A_{total}} + n_{Co} \frac{A_{Co}}{A_{total}} \quad \text{Ec. (33)}$$

$$m = m_F \frac{A_F}{A_{total}} + m_{Co} \frac{A_{Co}}{A_{total}} \quad \text{Ec. (34)}$$

Donde:

E_F y E_{Co}	Módulo de elasticidad flat y corner
f_{yF} y f_{yCo}	Límite de fluencia flat y corner
n_F y n_{Co}	Grado de redondez flat y corner para $f \leq f_y$
m_F y m_{Co}	Grado de redondez flat y corner para $f > f_y$
A_F	Área flat de la sección transversal ver Figura 3.6.
A_{Co}	Área corner de la sección transversal ver Figura 3.6.
A_{total}	Área total de la sección transversal

Así, teniendo en cuenta la geometría de las secciones transversales utilizadas (Tabla 3.2.) y los parámetros flat y corner (Tabla 3.1.), se han calculado los parámetros weighted average necesarios para la definición del modelo material de Ramberg-Osgood de las vigas PINOX. Estos parámetros se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Parámetros weighted average característicos del material obtenido de tracción

Sección	E	$f_{0.2}$	f_u	ϵ_u	n	m	$E_{0.2}$
Transversal	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]			[MPa]
RHS1	185533	571	774	0.36	6.08	5.68	38062
RHS2	182403	454	671	0.40	6.49	4.19	29838
RHS3	186406	602	780	0.29	6.37	5.53	37982

Las Figuras 3.7., 3.8. y 3.9., muestran las curvas tensión-deformación con el modelo de material Ramberg-Osgood para diferentes parámetros del material (flat, corner y

weighted average) para las vigas RHS1, RHS2 y RHS3, respectivamente.

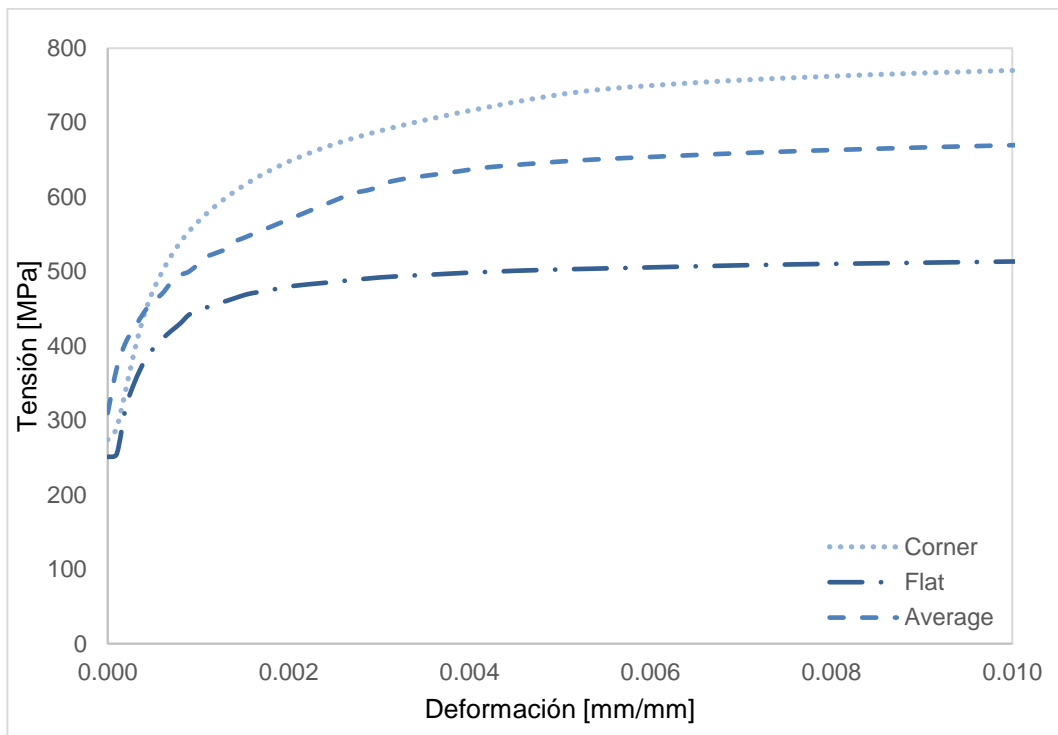


Figura 3.7. Modelo Material Ramberg-Osgood para la viga RHS1

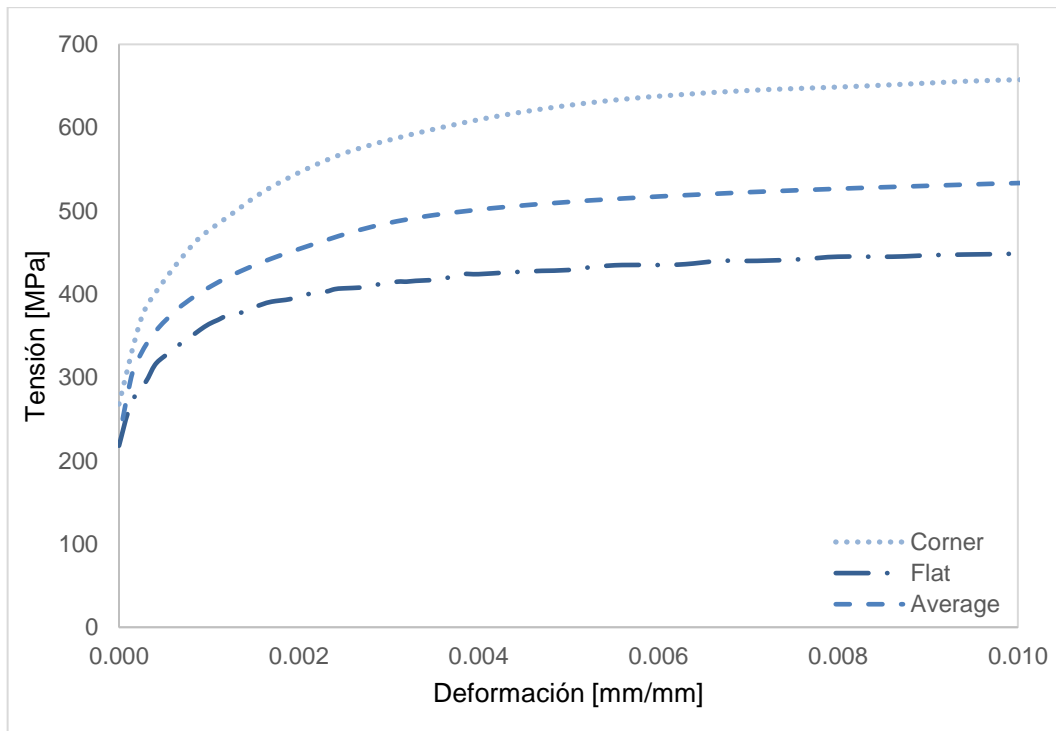


Figura 3.8. Modelo Material Ramberg-Osgood viga RHS2

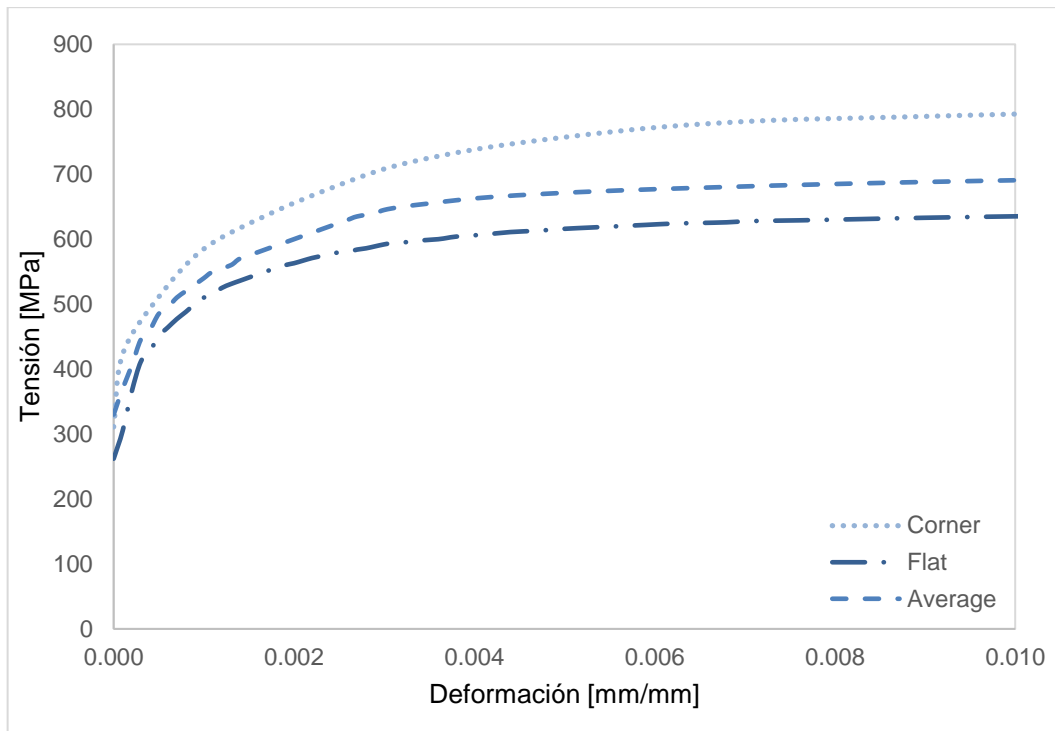


Figura 3.9. Modelo material Ramberg-Osgood viga RHS3

3.1.1 Análisis de Resultados y Validación del Modelo Numérico PINOX

En este apartado se validan los modelos FE descritos en el apartado anterior. La validación se realiza comparando los resultados numéricos obtenidos en análisis GMNIA, que consideran la no linealidad del material y geométrica y las imperfecciones geométricas iniciales, con los resultados experimentales de la campaña PINOX. En este Trabajo, se han comparado los resultados momento-curvatura.

Los modelos FE de vigas se analizaron dos veces, una suponiendo que la sección transversal presentaba materiales distintos (el material flat asociado a la parte plana o flat y corner a la parte curvada o corner), y otra asignando a toda la sección transversal el mismo material (weighted average).

Una vez analizados los dos modelos numéricos "Four Point Bending Test" para cada viga, se extrajeron del archivo de extensión. ODB (ABAQUS, 2014) los resultados relevantes para su comparación con los experimentales: cargas aplicadas, flechas el centro del vano y puntos de carga, y deformaciones máximas en la sección central.

De igual manera que en los ensayos experimentales, el momento en la sección central de la viga simplemente apoyada se obtuvo aplicando la Ec. (35):

$$M = \frac{d(P_T)}{2} \quad \text{Ec. (35)}$$

Donde:

M	Momento aplicado
d	Distancia del apoyo a la carga aplicada
P_T	Carga total aplicada

Por otro lado, la curvatura en el centro de viga se estimó de dos maneras. De acuerdo con Rasmussen y Hancock (1993), la curvatura de una viga biapoyada sometida a dos cargas puntuales puede estimarse utilizando la Ec. (36):

$$\kappa = \frac{8(u_2 - u_{av})}{4(u_2 - u_{av})^2 + L^{*2}} \quad \text{Ec. (36)}$$

Donde:

κ	Curvatura
u_2	Deflexión en la mitad del vano
u_{av}	Deflexión promedio entre las deflexiones de las cargas aplicadas
L^*	Distancia entre cargas aplicadas

Además, tal y como explica Real y Mirambell (2005), la curvatura en una sección a flexión es la ratio entre la deformación máxima de la fibra y su semicanto como se muestra en la Ec. (37).

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{y_{max}} \quad \text{Ec. (37)}$$

Donde

κ	Curvatura
ε	Deformación (Análisis Numérico, output E11)
y_{max}	Distancia del eje a la fibra más alejada comprimida o traccionada

Las Figuras 3.10,3.11 y 3.12 se observan las gráficas momento-curvatura para las

vigas RHS1, RHS2 y RHS3, respectivamente, donde se encuentra el ensayo experimental y los dos análisis numéricos realizados con el modelo de material Ramberg-Osgood (FE con material flat y corner (F-Co) y FE con un solo material weighted average (AVG)). Además, también se han dibujado los resultados de la curvatura en el centro de viga utilizando la Ec. (36) o utilizando la Ec. (37).

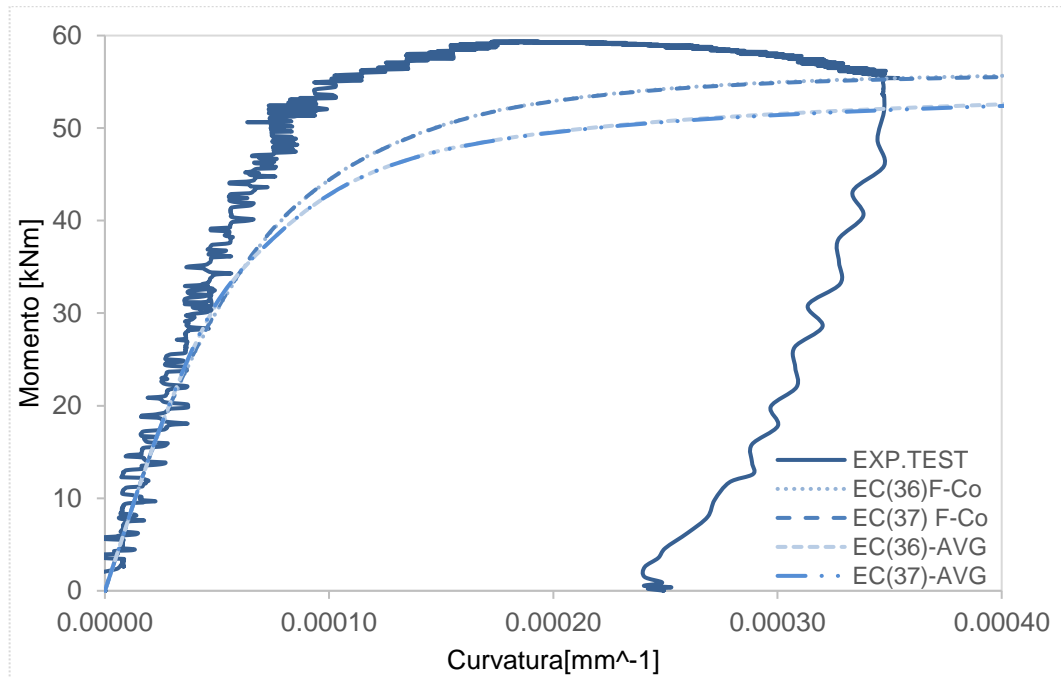


Figura 3.10. Diagrama momento curvatura Viga RHS1

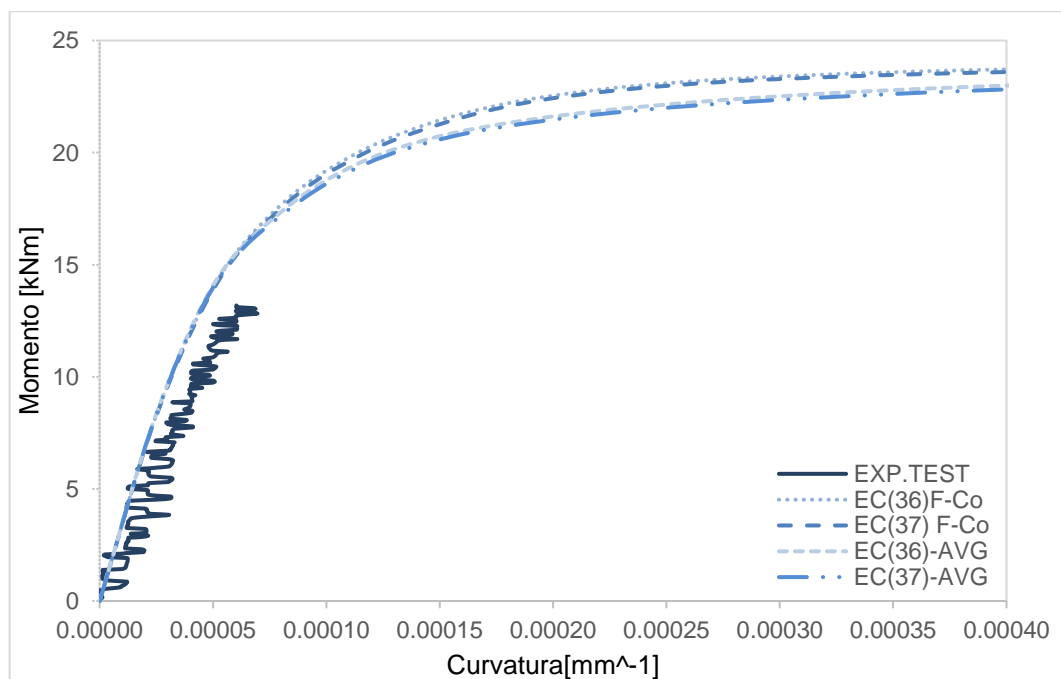


Figura 3.11. Diagrama momento curvatura Viga RHS2

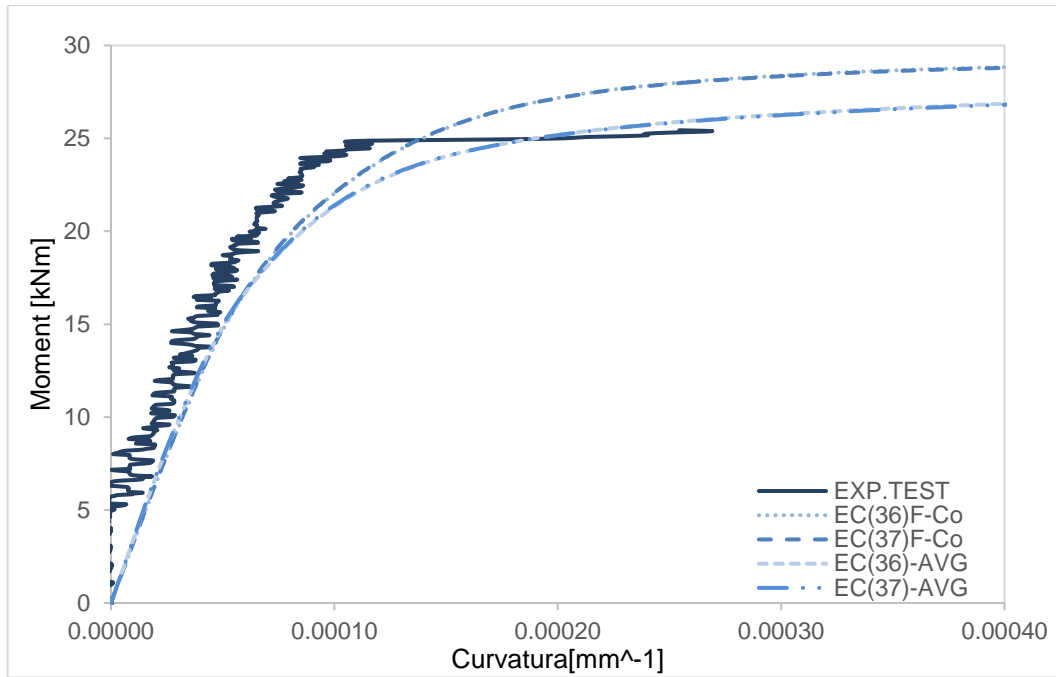


Figura 3.12. Diagrama momento curvatura Viga RHS3

En la Tabla 3.5. se muestran las curvaturas y los momentos máximos alcanzados para cada viga RHS1, RHS2 y RHS3, y se comparan con los resultados experimentales.

Tabla 3.5. Valores máximos de las vigas

Viga RHS1 (MÁXIMO)					
Tipo de Análisis	Pu [kN]	Mu [kNm]	du [mm]	X Ec. (36) [mm ⁻¹]	X Ec. (37) [mm ⁻¹]
Exp.Test	232.64	59.32	44.81	0.00018	
Num.Test F-C	220.07	56.12	103.14	0.00068	0.00098
Num.Test AVG	213.54	54.45	133.29	0.00089	0.00120
Viga RHS2 (MÁXIMO)					
Tipo de Análisis	Pu [kN]	Mu [kNm]	du [mm]	X Ec. (36) [mm ⁻¹]	X Ec. (37) [mm ⁻¹]
Exp.Test	92.43	23.57	516.53	0.00342	
Num.Test F-C	93.53	23.85	84.22	0.00052	0.00066
Num.Test AVG	91.34	23.29	84.17	0.00052	0.00060
Viga RHS3 (MÁXIMO)					
Tipo de Análisis	Pu [kN]	Mu [kNm]	du [mm]	X Ec. (36) [mm ⁻¹]	X Ec. (37) [mm ⁻¹]
Exp.Test	105.61	26.92	546.22	0.00064	
Num.Test F-C	115.93	29.56	122.92	0.00084	0.00097
Num.Test AVG	112.29	28.63	158.84	0.00108	0.00113

Como se observa en la Tabla 3.5., los valores obtenidos difieren muy poco de los experimentales, quedando validado el modelo numérico. Como era de esperar, los resultados de los modelos F-Co y los modelos weighted average son muy parecidos, por lo que en el estudio paramétrico es preferible utilizar un único material. Tampoco se aprecian diferencias debidas al cálculo de las curvaturas por el Ec. (36) y la Ec. (37); por lo que es preferible estimar las curvaturas mediante la Ec. (36), mucho más sencilla y ampliamente validada en otras investigaciones.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DEL MODELO DE MATERIAL BAJO CONDICIONES CÍCLICAS

El modelo material de Ramberg-Osgood con endurecimiento isotrópico, utilizado habitualmente en ensayos monotónicos, no refleja el comportamiento tensión-deformación real del acero inoxidable cuando está sometido a cargas cíclicas (Chaboche, 1986). Es por eso que en este Capítulo se comparan los resultados obtenidos de asignar diferentes modelos de material en las vigas detalladas anteriormente y someterla a fuerzas de tracción y deformación según el protocolo de carga definido por la norma americana AISC 341 (2005). El objetivo es seleccionar el modelo de material más adecuado para el estudio de las capacidades de rotación plástica del acero inoxidable bajo condiciones sísmicas.

4.1 Protocolos de Carga Cíclicos

En los análisis cíclicos es importante definir qué protocolo de carga se va a utilizar. Existen tres tipos de protocolos para realizar estos ensayos cíclicos: companion method, multiple step-method e incremental step method. Las características de cada uno de estos protocolos se resumen en la Figura 4.1.

Companion test	Multi step	Incremental step
<ul style="list-style-type: none"> •se caracteriza por ensayar probetas con una amplitud fija hasta llegar al fallo •Largos tiempos de ensayo •resultados ambiguos •gran cantidad de "coupon" 	<ul style="list-style-type: none"> •Se caracteriza por ensayar una sola probeta •Amplitud constante hasta que se establezca y luego aumentar la amplitud procesose repite hasta conseguir las curvas cíclicas •Ideal para estudios de ingeniería sísmica •Se construye la curva stress strain con un solo "coupon" •se limita al uso de grandes amplitudes •las probetas pueden fallar prematuramente 	<ul style="list-style-type: none"> •Una sola muestra se somete a bloques repetido de ciclos que aumentan cada ciclo hasta que se registra una determinada amplitud de deformación y luego disminuye hasta el punto de partida •se construye la curva tensión deformación con una sola muestra •Fallos prematuros •no recomendado ,puede desviar resultados de la verdadera curva tensión deformación

Figura 4.1. Tipos de protocolo de carga análisis cíclico (Chacón et al., 2020)

De entre todos los protocolos de carga recogidos, el Multiple step method es el más adecuado para simular la acción sísmica. El protocolo de carga multi-sept consiste en la aplicación de fuerzas de tracción-compresión con amplitudes crecientes hasta el fallo

de la probeta.

La normativa europea prEN 1998-1-2 (2020) no especifica la frecuencia y amplitud de esos ciclos de carga y descarga. En cambio, la normativa americana AISC 341 (2005), en su anexo S “Qualifying Cyclic Tests Of Beam-To-Column And Link-To-Column Connections” sí da directrices concretas de cómo aplicar un protocolo de tipo multi-step. El protocolo de carga definido por el AISC 341 (2005) ha sido utilizado en numerosos análisis experimentales y numéricos ya que es muy sencillo de aplicar, entre ellos, los análisis de elementos estructurales de acero inoxidable llevados a cabo recientemente por Fang et al. (2018).

En el protocolo de carga de AISC 341 (2005) los ciclos van aumentando en función de la rotación del ángulo en los apoyos de los elementos flexocomprimidos analizados, tal y como se recoge en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Protocolo de carga AISC 341(2005)

Paso	Cantidad de ciclos	Ángulo de deriva
1	6 ciclos	$\theta = 0.00375$
2	6 ciclos	$\theta = 0.005$
3	4 ciclos	$\theta = 0.0075$
4	4 ciclos	$\theta = 0.01$
5	2 ciclos	$\theta = 0.015$
6	2 ciclos	$\theta = 0.02$
7	2 ciclos	$\theta = 0.03$
8	2 ciclos	$\theta = 0.04$

Se continua el incremento de
 $\theta = 0.01$ con dos ciclos de carga para cada paso.

En un ensayo 4PB como el del presente Trabajo, la imposición de la rotación del ángulo es más compleja que la imposición de un desplazamiento vertical, conocida como amplitud de ciclo. La amplitud con la que se definió el protocolo de carga

introducido en ABAQUS (2014) se calculó en función de la rotación de la pieza de acuerdo con la Ec. (38):

$$Amp = l * \theta \quad Ec. (38)$$

Donde:

Amp Amplitud del ciclo

l Distancia entre el apoyo y la carga aplicada, ver Figura 3.4

El tiempo se ha calculado con una variación de 0.8 para cada ciclo. En la Figura 4.2., se muestra el protocolo de carga adaptado a las variables amplitud-tiempo aplicado a los modelos numéricos.

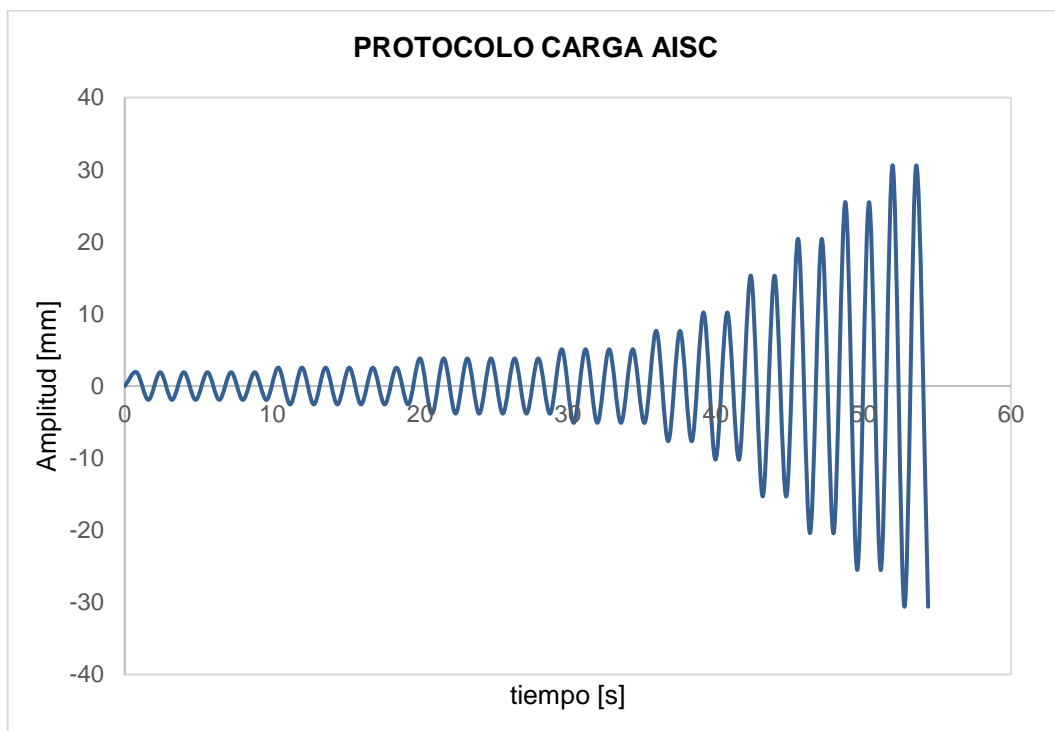


Figura 4.2. Protocolo de carga AISC, aplicado a los modelos numéricos

4.2 Estudio Numérico del Modelo de Material en Análisis Cíclicos

Con el fin de obtener una representación adecuada del comportamiento del acero inoxidable en análisis sísmicos, se analizaron los resultados numéricos de vigas con diferentes modelos material sometidas al protocolo de carga AISC 341 (2005).

4.2.1 Modelos Numéricos

Los modelos numéricos utilizados en este apartado fueron los validados en la Sección 2, es decir, vigas biapoyadas en FE shell (ABQUS, 2014) con dos cargas

aplicadas simétricas siguiendo el esquema conocido como 4PB de sección transversal hueca RHS1, RHS2 y RHS3, recogidas en la Tabla 3.2.

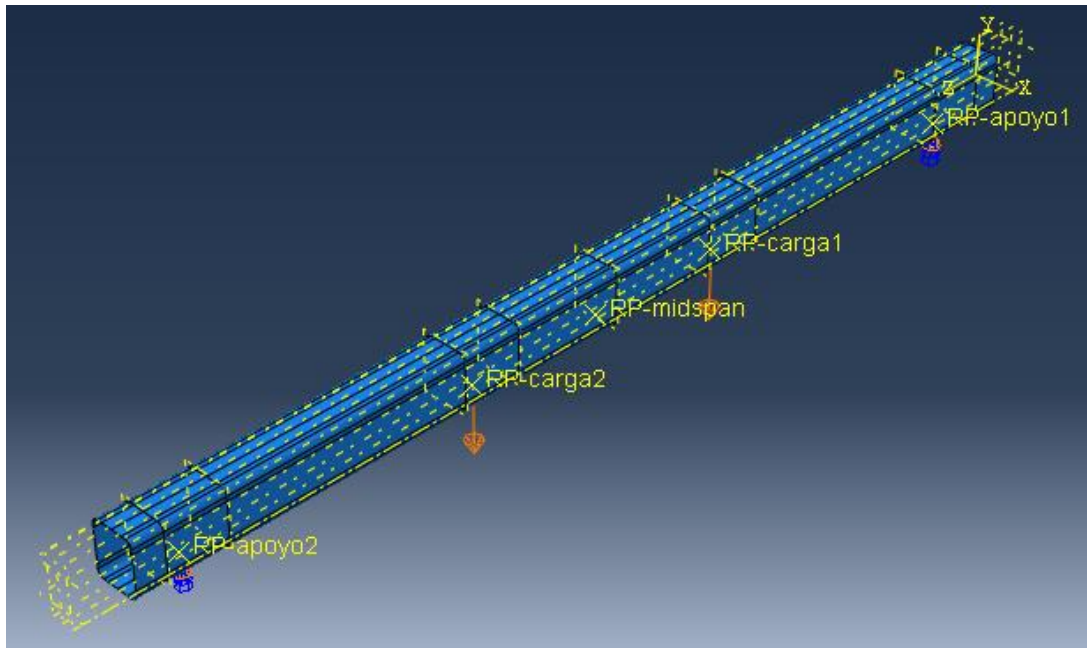


Figura 4.3. Modelo numérico de la viga RHS2 en ABAQUS (2014)

Las cargas fueron aplicadas como desplazamientos verticales impuestos. Los modelos se analizaron siguiendo un Analysis Static General (ABAQUS, 2014). El protocolo de carga del AISC 341 (2005) se aplicó imponiendo un desplazamiento vertical en los dos sentidos en los puntos de carga con las amplitudes obtenidas de la Ec. (38).

4.3 Modelos de Material Estudiados

Los análisis numéricos de las vigas RHS1, RHS2 y RHS3 se realizaron suponiendo modelos de material Ramberg-Osgood (Arrayago et al., 2015) y distintos tipos de endurecimiento y modelos de material de Chaboche (1986) fueron comparados para evaluar el mejor modelo de material para ensayos cíclicos. La Figura 4.4. resume los modelos de material estudiados. A las secciones trasversales de los modelos numéricos se les asignó un único material weighted average, no distinguiendo entre la parte plana y las esquinas de la sección transversal (Gardner y Nethercot, 2004).

Es importante definir la curva tensión deformación plástica en ABAQUS (2014) con intervalos pequeños, especialmente en ensayos cíclicos, ya que intervalos grandes en las curvas de tensión-deformación podrían causar la no convergencia del análisis de vigas.

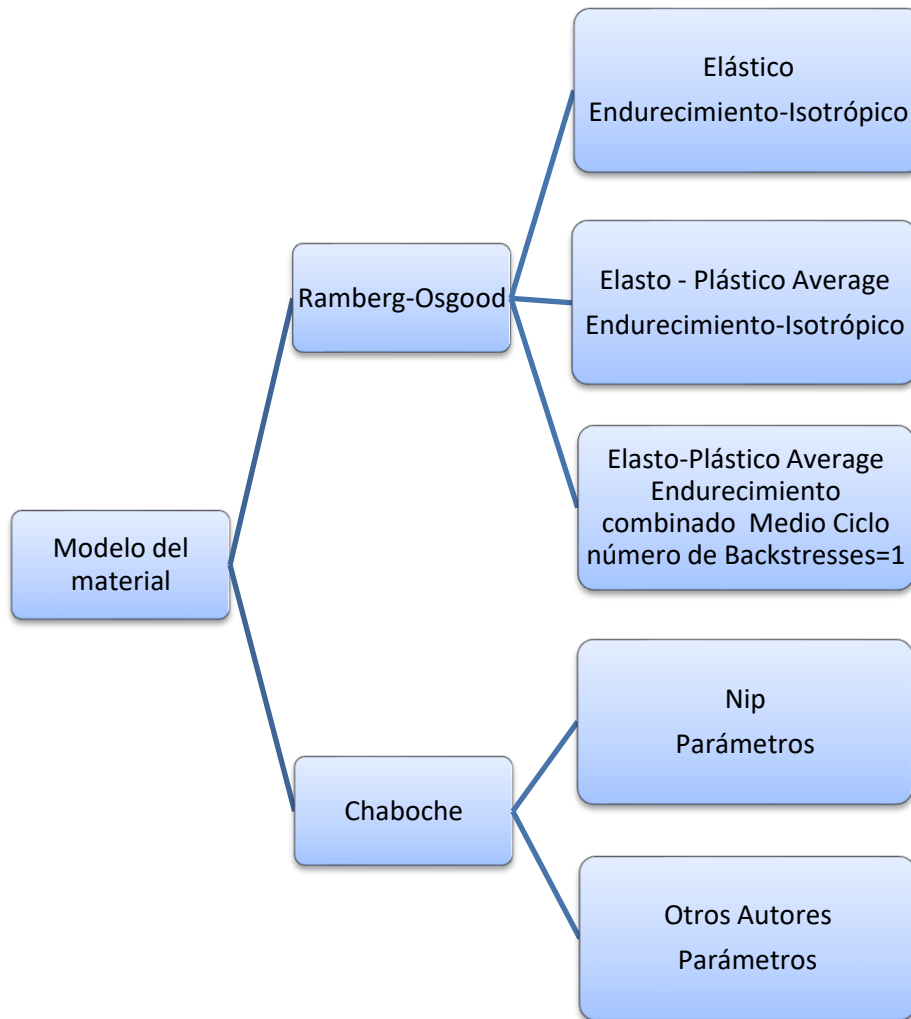
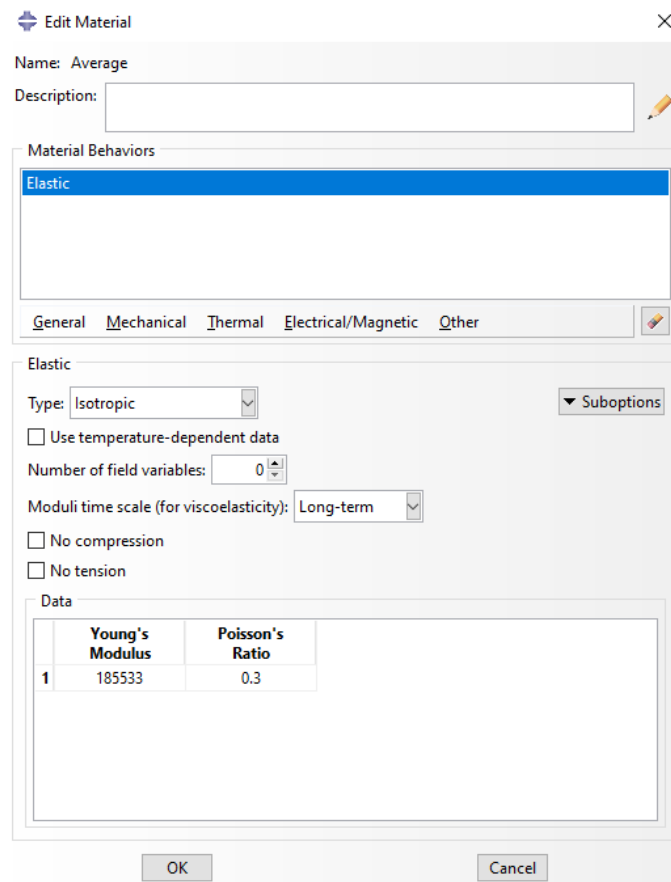


Figura 4.4. Modelos de material análisis cíclico

A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los modelos presentados para el análisis del material

- Modelo Ramberg-Osgood - Elástico

Este modelo se analizó por razones comparativas, pero no puede ser considerado un modelo válido en análisis cíclicos. En este modelo solo definió la rama elástica del material. En la Figura 4.5. se observa la configuración del material que se usó en el modelamiento numérico.



Edit Material

Name: Average

Description:

Material Behaviors

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	185533	0.3

OK Cancel

Figura 4.5. Configuración ABAQUS tercer modelo material Ramberg-Osgood

- Modelo Ramberg-Osgood - Elasto plástico-endurecimiento isotrópico

Este modelo de material es el mismo que se usó en la parte del análisis estático modelo material Ramberg-Osgood calculado con parámetros weighted average, definiendo las características parte elástica, mientras que a la rama plástica se le asigna un endurecimiento isotrópico. Igualmente, no se considera válido para un análisis cíclico, y por tanto solo se estudia aquí por razones comparativas. En la Figura 4.6. se observa la curva tensión-deformación para las tres vigas en estudio RHS1, RHS2 y RHS3 utilizadas en este modelo.

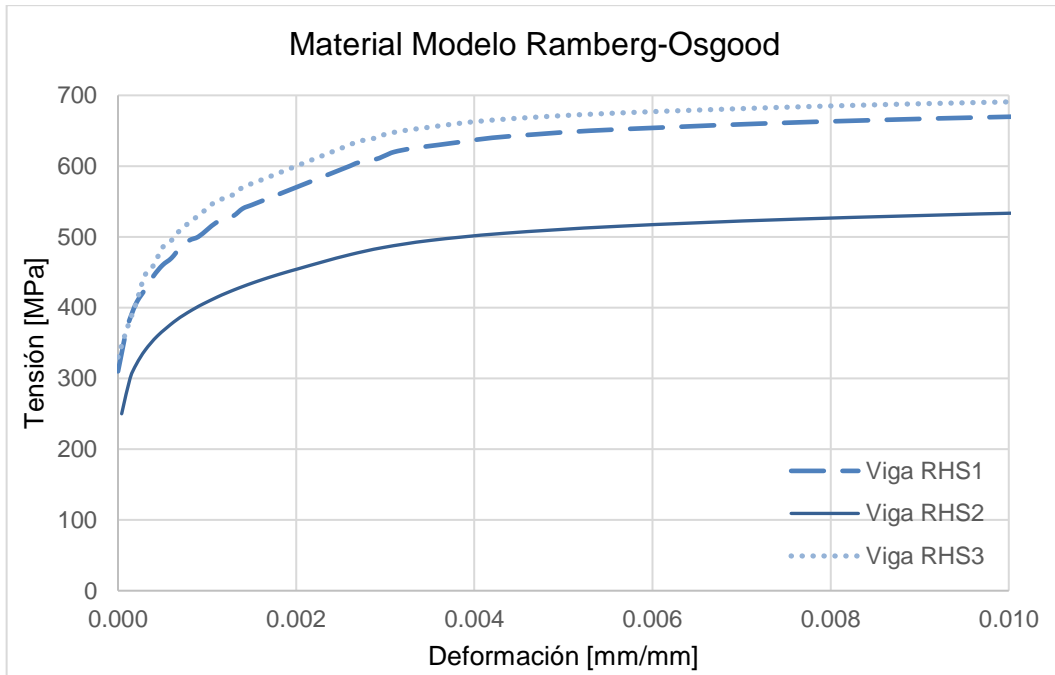


Figura 4.6. Curva tensión deformación para vigas RHS1, RHS2, RHS3

En la Figura 4.7. se observa la configuración del material que se usó en el modelamiento numérico.

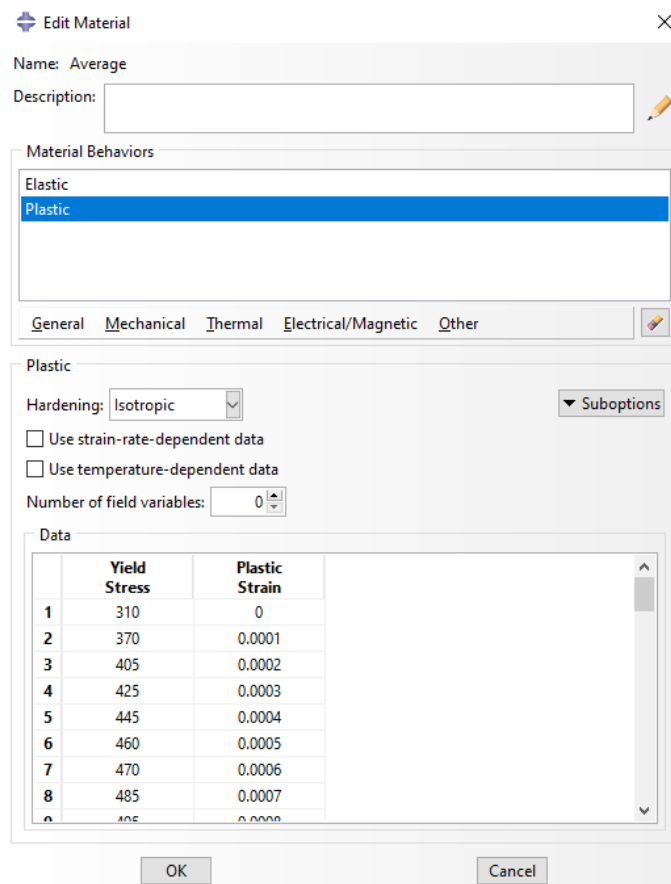


Figura 4.7. Configuración ABAQUS primer modelo material Ramberg-Osgood

- Modelo Ramberg-Osgood - Elasto plástico-endurecimiento combinado - medio ciclo – número de backstresses=1

Modelo con las características elásticas y la curva de valores plásticos idénticas al anterior, pero con el endurecimiento de la rama plástica definido como combinado de medio ciclo y número de backstresses=1. En la Figura 4.8 se observa la configuración del software del material que se usó en el modelamiento numérico.

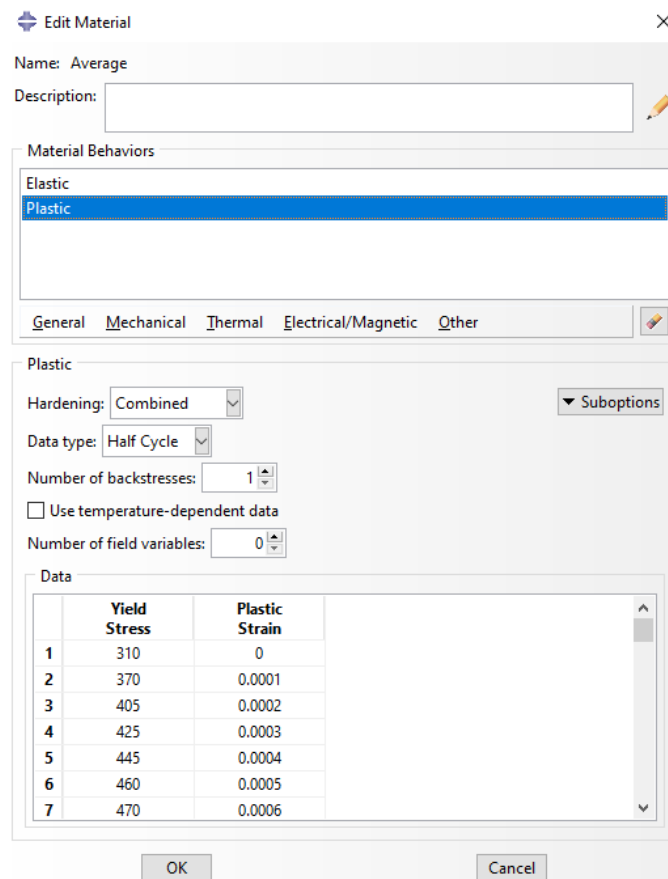


Figura 4.8. Configuración ABAQUS segundo modelo material Ramberg-Osgood

- Modelo Material Chaboche

Como se ha mencionado en el Capítulo 2 de este Trabajo, el modelo de Chaboche define mediante parámetros la configuración de los endurecimientos isotrópico y cinemáticos. Estos parámetros son complejos de obtener y dependen de la rigurosidad de los ensayos experimentales.

Dado que este Trabajo no contempla el ensayo de probetas de material bajo cargas cíclicas y posterior análisis de los resultados experimentales, todo ello necesario para definir los parámetros de Chaboche de nuestro material, se han tomado modelos de Chaboche publicados en otras investigaciones. Así, en la Tabla 4.2. y 4.3. se muestra un resumen de los modelos de Chaboche para acero inoxidable austeníticos

recopilados de las publicaciones de Nip et al. (2010) y Chacón et al. (2020) respectivamente. Cabe destacar que el grado austenítico del material ensayado por Nip et al. (2010) es idéntico al nuestro (EN 1.4301), por lo que es de esperar que, en caso de que pudiéramos hacer ensayos de nuestro material, obtendríamos parámetros de Chaboche muy similares.

Tabla 4.2. Parámetros Chaboche Nip et al. (2010) y promedio utilizado en este Trabajo

Estudios Previos	Grado de Acero EN	E (N/mm ²)	Límite Elástico (N/mm ²)	Endurecimiento combinado- Parámetros Chaboche					
				Amp	$\sigma/0^*$	$Q\infty^*$	b	Ck*	γk
K.H.Nip et al.	1.4301	201300	419	1	224.5	431.5	0.162	175450	420.5
		197730	483	3	236.8	516.8	1.165	82675	185.5
	1.4307	197960	552	5	246	418.4	2.164	88520	179.6
		191690	538	7	224.5	593.5	1.762	125600	215.5
Promedio		197170	498	4.0	232.9	490.0	1.314	118061.2	250.27

Tabla 4.3. Parámetros Chaboche Otros Autores(Chacón et al., 2020) y promedio utilizado en este Trabajo

Previos estudios	Grado Acero EN	E (N/mm ²)	Límite elástico (N/mm ²)	Endurecimiento combinado- Parámetros Chaboche					
				Amp	$\sigma/0^*$	$Q\infty^*$	b	Ck*	γk
A.Dutta et al.	1.4404	200000		0.6	225	60	9.71	42096	594.5
S.Chandra Roy et al.	1.4404			0.5	211	42.3	21.6	57805	619.0
Y.Q.Wang et al.	1.4401	209500	356.5	0.4	234	77	10.5	56760	420
Promedio		204750	356.5	0.50	223.33	59.7	13.9	52220.3	544.5

En las siguientes Figuras 4.9. y 4.10. se muestra la configuración del material en el software ABAQUS (2014) utilizando los parámetros de Chaboche promedio de los valores proporcionados por Nip et al. (2010) y los parámetros de Chaboche promedio proporcionados por otros autores, respectivamente.

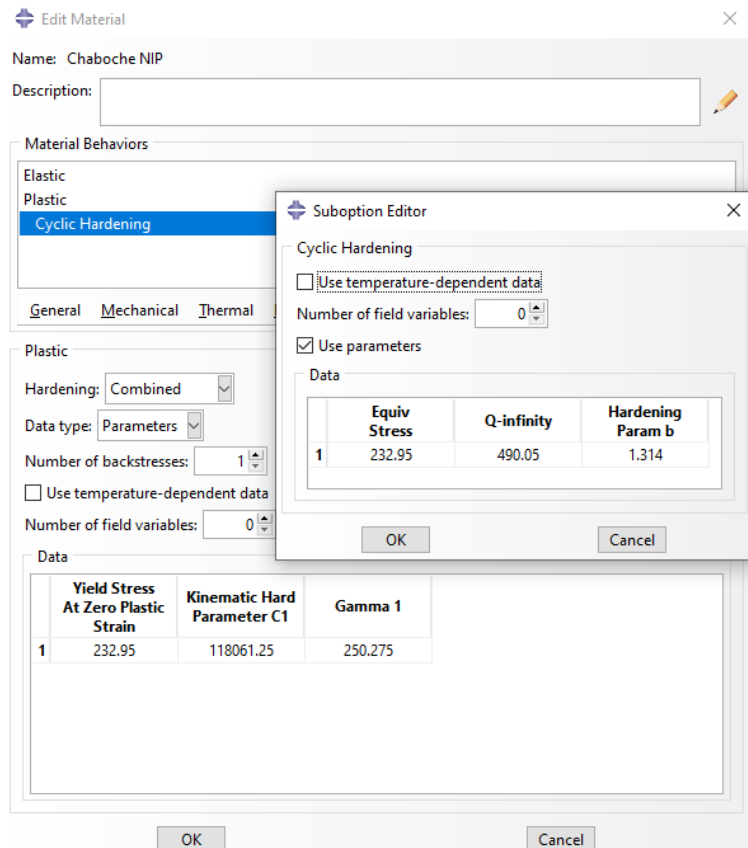


Figura 4.9. Configuración modelo Chaboche Nip et al. (2010)

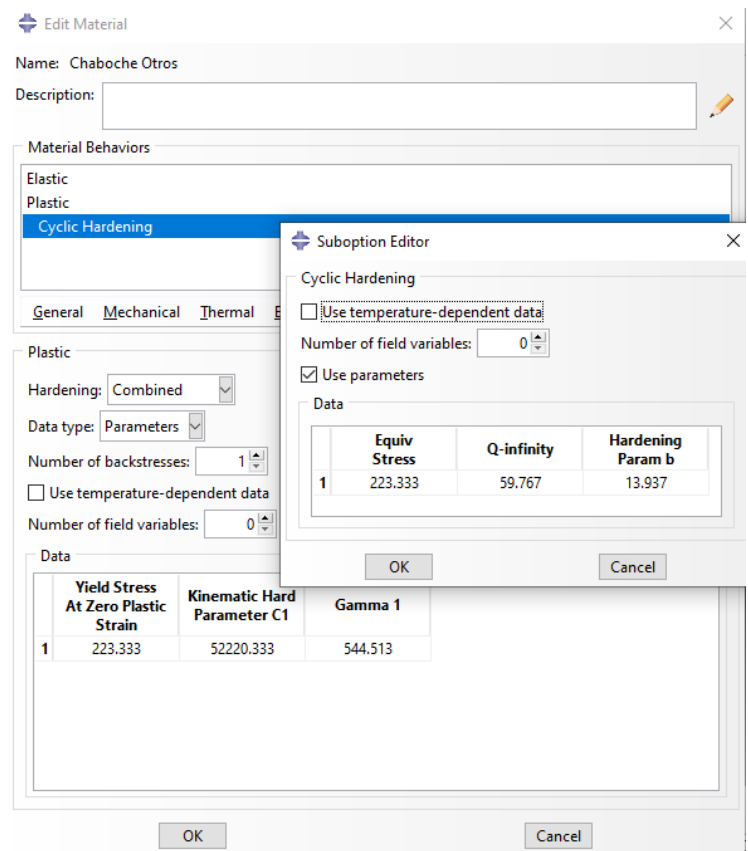


Figura 4.10. Configuración modelo Chaboche Otros Autores

4.4 Resultados de los Análisis Cíclicos del Material.

Una vez analizados los modelos numéricos con cada uno de los modelos materiales definidos y suponiendo que el protocolo de carga es el definido en AISC 341 (2005), se extraen los resultados numéricos necesarios para elaborar de estas gráficas momento-curvatura, esto es, los valores de las cargas aplicadas, flechas y deformaciones. El momento se obtuvo a través de la Ec. (35), mientras que la curvatura en el centro de vano se estimó aplicando la Ec. (36), ya que en el Capítulo 3 se comprobó que daba estimaciones parecidas a la Ec. (37) y era más fácil de aplicar. Así, las Figuras 4.11., 4.12. y 4.13. muestran las gráficas para los diferentes modelos estudiados elasto plástico cíclico, elástico cíclico, Chaboche NIP cíclico, Chaboche Otros cíclico, y elasto plástico-medio ciclo-número de backstresses=1cíclico, para cada una de las vigas RHS1, RHS2 y RHS3 respectivamente.

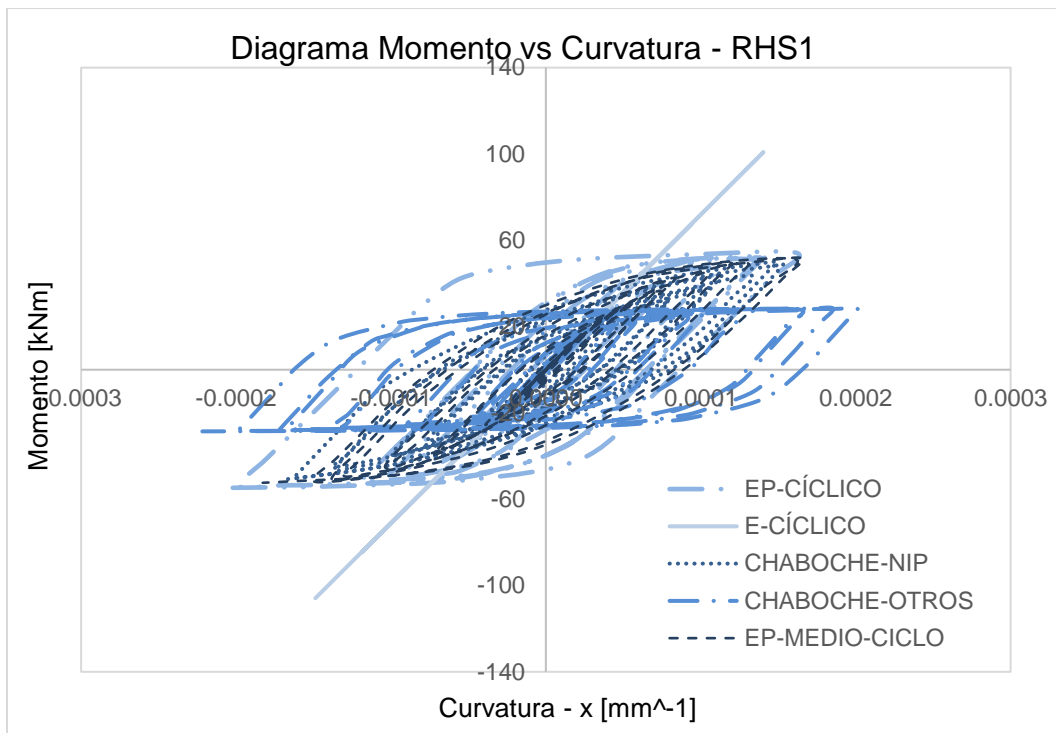


Figura 4.11. Diagrama momento-curvatura viga RHS1- ensayo cíclico curvatura Ec. (36)

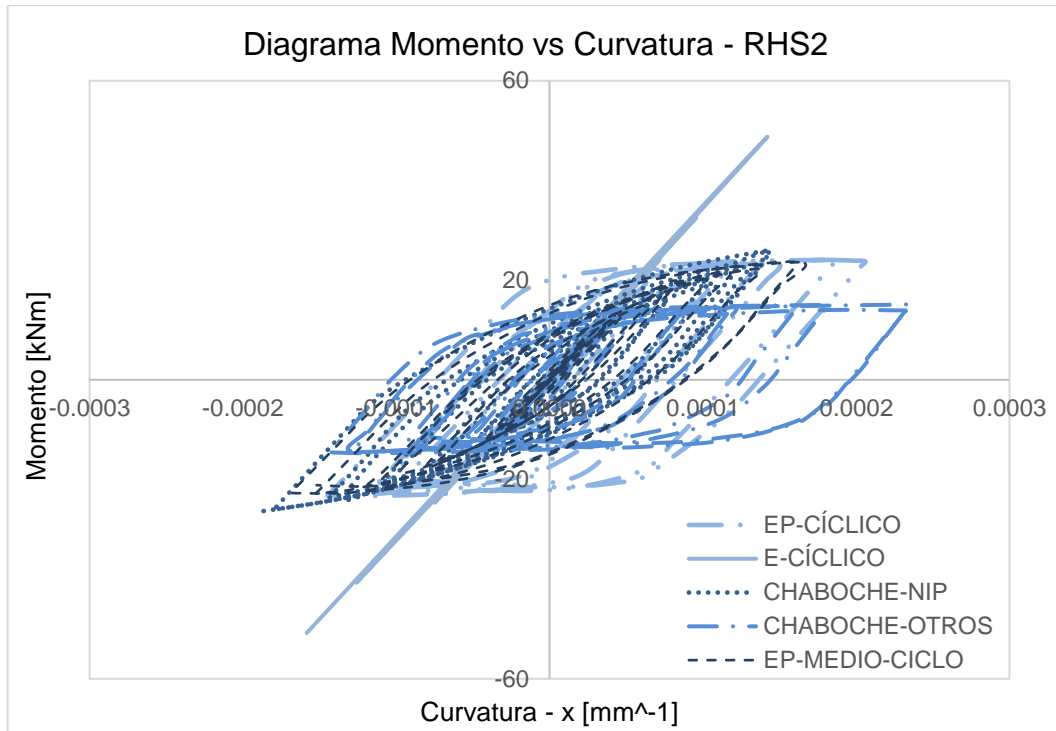


Figura 4.12. Diagrama momento-curvatura viga RHS2- ensayo cíclico curvatura Ec. (36)

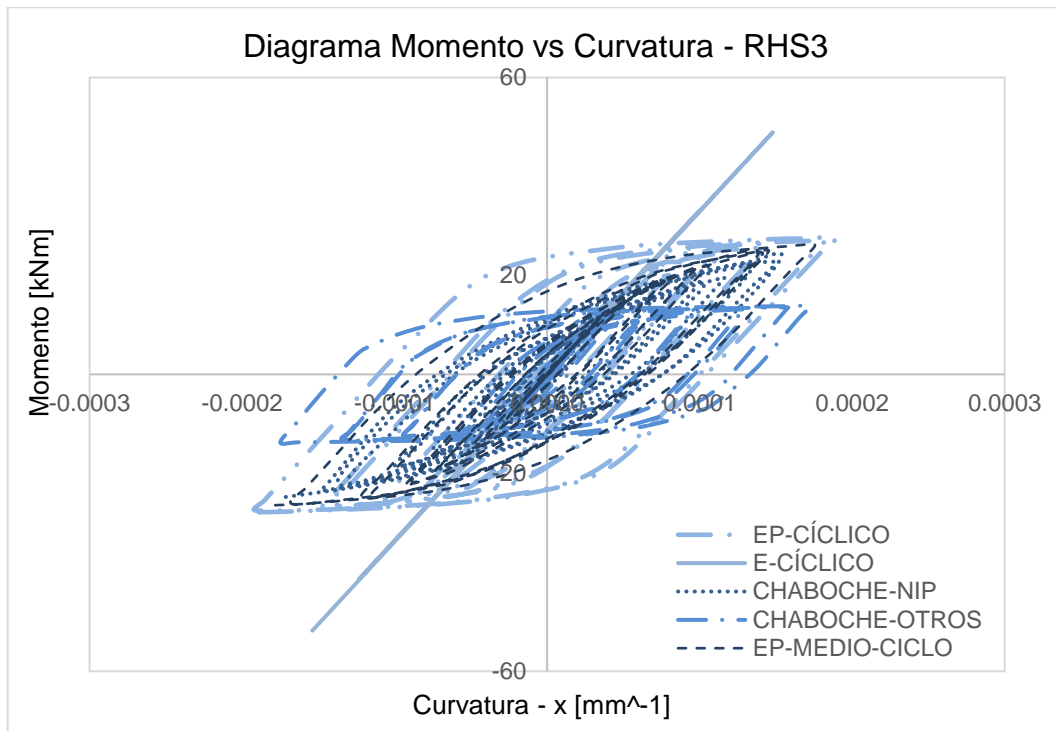


Figura 4.13. Diagrama momento-curvatura viga RHS3- ensayo cíclico curvatura Ec. (36)

4.5 Selección del Modelo del Material para Análisis Cíclicos

El modelo de material idóneo para el análisis cíclico es el modelo de Chaboche, de acuerdo con el Capítulo 2. Sin embargo, para definir con rigor el comportamiento del material de acero inoxidable que estamos utilizando es aconsejable ensayar varios “coupon tests” y obtener estos parámetros. Nip et al. (2010) investigaron un acero inoxidable austenítico del mismo grado que el nuestro, por lo que podemos suponer que el modelo de Chaboche propuesto por ellos es válido en este Trabajo. No obstante, se puede observar que en las Figuras 4.11., 4.12., y 4.13. que las curvas momento-curvatura del modelo de material de Chaboche NIP son similares a las del modelo del material de Ramberg-Osgood con un endurecimiento combinado de medio ciclo (curva EP-Medio ciclo, en la Figura); por lo que es preferible utilizar este último modelo de material en nuestro estudio paramétrico.

Además, el uso de modelos de material Ramberg-Osgood con endurecimiento combinado ha sido utilizado recientemente para reproducir numéricamente el comportamiento cíclico observado en elementos austeníticos sujetos a análisis de push-over con excelentes resultados, tal y como se observa en la Figura 4.14. (Fang et al., 2018), y es adecuado cuando el número de ciclos del análisis es limitado (ABAQUS, 2014).

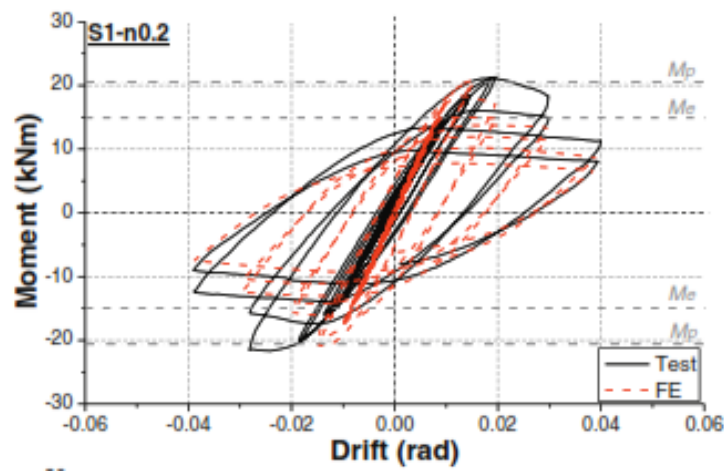


Figura 4.14. Modelo material Ramberg-Osgood endurecimiento combinado (Fang et al., 2018)

Por lo tanto, en este Trabajo se estudiará el comportamiento de rótulas plásticas en vigas austeníticas de sección hueca sujetas a acciones cíclicas suponiendo **modelo de material Ramberg-Osgood con endurecimiento combinado de medio ciclo con número de backstresses=1**.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS CÍCLICO VIGAS DE SECCIÓN ROBUSTA. ESTUDIO PARAMÉTRICO.

En este Capítulo se estudia el comportamiento sísmico de muestra representativa de vigas biapoyadas RHS y SHS de acero inoxidable tipo austenítico sometidas a un análisis numérico cíclico. Las vigas fueron ensayadas a momento, siguiendo el esquema “Four Point Bending Test”. Los diagramas momento–rotación y las skeleton curves obtenidas de los ensayos numéricos, permitieron la definición de las rotaciones plásticas, y momento último, así como la clasificación de ductilidad de las secciones.

5.1 Características Geométricas

Este estudio paramétrico se realizó a un grupo de 40 de vigas con diferentes características geométricas, usando el mismo material. En la Figura 5.1. se muestra de manera esquemática las secciones estudiadas rectangulares (RHS) y cuadradas (SHS).

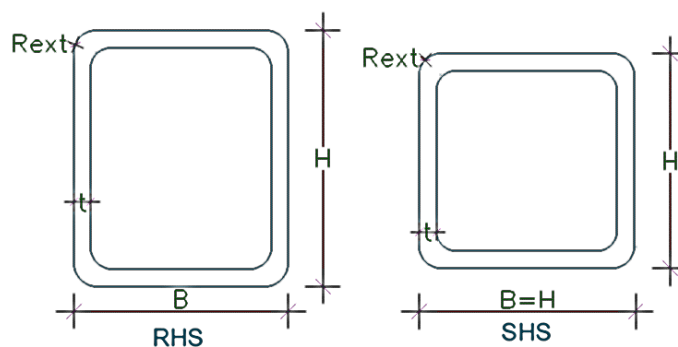


Figura 5.1. Esquema secciones transversales en estudio

En la Tabla 5.1., se encuentra las características de cada sección de la muestra de vigas, detallando el tipo de sección, tipo de ensayo, familia de acero inoxidable, y las dimensiones de altura (H), ancho (B), espesor (t) y el radio externo (R_{ext}).

Tabla 5.1. Dimensiones de la sección transversal vigas en estudio

Número	Tipo Sección Transversal	Tipo ensayo	Familia Acero Inox.	H [mm]	B [mm]	t [mm]	R_{ext} [mm]
1	RHS	4BP	Austenítico	74.0	62.0	2.0	7.5
2	RHS	4BP	Austenítico	75.0	63.0	3.0	8.0
3	RHS	4BP	Austenítico	76.0	64.0	4.0	8.5
4	RHS	4BP	Austenítico	77.0	65.0	5.0	9.0
5	RHS	4BP	Austenítico	78.0	66.0	6.0	9.5
6	RHS	4BP	Austenítico	87.0	73.0	3.0	8.0
7	RHS	4BP	Austenítico	88.0	74.0	4.0	8.5

8	RHS	4BP	Austenítico	89.0	75.0	5.0	9.0
9	RHS	4BP	Austenítico	90.0	76.0	6.0	9.5
10	RHS	4BP	Austenítico	99.0	83.0	3.0	8.0
11	RHS	4BP	Austenítico	100.0	84.0	4.0	8.5
12	RHS	4BP	Austenítico	101.0	85.0	5.0	9.0
13	RHS	4BP	Austenítico	102.0	86.0	6.0	9.5
14	RHS	4BP	Austenítico	111.0	93.0	3.0	8.0
15	RHS	4BP	Austenítico	112.0	94.0	4.0	8.5
16	RHS	4BP	Austenítico	113.0	95.0	5.0	9.0
17	RHS	4BP	Austenítico	114.0	96.0	6.0	9.5
18	RHS	4BP	Austenítico	92.0	62.0	2.0	7.5
19	RHS	4BP	Austenítico	93.0	63.0	3.0	8.0
20	RHS	4BP	Austenítico	94.0	64.0	4.0	8.5
21	RHS	4BP	Austenítico	95.0	65.0	5.0	9.0
22	RHS	4BP	Austenítico	96.0	66.0	6.0	9.5
23	SHS	4BP	Austenítico	62.0	62.0	2.0	7.5
24	SHS	4BP	Austenítico	63.0	63.0	3.0	8.0
25	SHS	4BP	Austenítico	64.0	64.0	4.0	8.5
26	SHS	4BP	Austenítico	65.0	65.0	5.0	9.0
27	SHS	4BP	Austenítico	66.0	66.0	6.0	9.5
28	SHS	4BP	Austenítico	73.0	73.0	3.0	8.0
29	SHS	4BP	Austenítico	74.0	74.0	4.0	8.5
30	SHS	4BP	Austenítico	75.0	75.0	5.0	9.0
31	SHS	4BP	Austenítico	76.0	76.0	6.0	9.5
32	SHS	4BP	Austenítico	93.0	93.0	3.0	8.0
33	SHS	4BP	Austenítico	94.0	94.0	4.0	8.5
34	SHS	4BP	Austenítico	95.0	95.0	5.0	9.0
35	SHS	4BP	Austenítico	96.0	96.0	6.0	9.5
36	SHS	4BP	Austenítico	124.0	124.0	4.0	8.5
37	SHS	4BP	Austenítico	125.0	125.0	5.0	9.0
38	SHS	4BP	Austenítico	126.0	126.0	6.0	9.5
39	SHS	4BP	Austenítico	155.0	155.0	5.0	9.0
40	SHS	4BP	Austenítico	156.0	156.0	6.0	9.5

5.1.1 Características de la Esbeltez Local

La caracterización del comportamiento de las secciones transversales se hará en función de la esbeltez local, tal y como propone el Continuous Strength Method (CSM)

(Afshan & Gardner, 2013).

Las esbelteces locales fueron calculadas como $\bar{\lambda}_{p,cs} = \sqrt{f_y/f_{cr,p}}$ donde $f_{cr,p}$ es el valor de la tensión crítica ideal de abolladura de la sección transversal cuando está sometida a un momento obtenida mediante el programa CUFSM (2010) y f_y es el límite elástico, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Características de esbeltez local

Número	Cross-Section Type	$f_{aplicada}$ [MPa]	Factor Carga CUFSM	f_{cr} [MPa]	f_y [kNm]	$\bar{\lambda}_{p,cs}$ (M_{el})
1	RHS	100	11.39	1139	417	0.60
2	RHS	100	24.19	2419	417	0.42
3	RHS	100	41.67	4167	417	0.32
4	RHS	100	63.48	6348	417	0.26
5	RHS	100	89.13	8913	417	0.22
6	RHS	100	17.44	1744	417	0.49
7	RHS	100	30.27	3027	417	0.37
8	RHS	100	46.41	4641	417	0.30
9	RHS	100	65.60	6560	417	0.25
10	RHS	100	13.19	1319	417	0.56
11	RHS	100	23.01	2301	417	0.43
12	RHS	100	35.42	3542	417	0.34
13	RHS	100	50.29	5029	417	0.29
14	RHS	100	10.33	1033	417	0.64
15	RHS	100	18.09	1809	417	0.48
16	RHS	100	27.93	2793	417	0.39
17	RHS	100	39.77	3977	417	0.32
18	RHS	100	11.11	1111	417	0.61
19	RHS	100	23.53	2353	417	0.42
20	RHS	100	40.54	4054	417	0.32
21	RHS	100	61.84	6184	417	0.26
22	RHS	100	87.03	8703	417	0.22
23	SHS	100	11.58	1158	417	0.60
24	SHS	100	24.65	2465	417	0.41
25	SHS	100	42.46	4246	417	0.31
26	SHS	100	64.58	6458	417	0.25
27	SHS	100	90.51	9051	417	0.21

28	SHS	100	17.73	1773	417	0.48
29	SHS	100	30.84	3084	417	0.37
30	SHS	100	47.19	4719	417	0.30
31	SHS	100	66.72	6672	417	0.25
32	SHS	100	10.52	1052	417	0.63
33	SHS	100	18.42	1842	417	0.48
34	SHS	100	28.44	2844	417	0.38
35	SHS	100	40.49	4049	417	0.32
36	SHS	100	10.18	1018	417	0.64
37	SHS	100	14.96	1496	417	0.53
38	SHS	100	22.61	2261	417	0.43
39	SHS	100	10.59	1059	417	0.63
40	SHS	100	13.82	1382	417	0.55

5.2 Modelo Numérico

El estudio paramétrico se realizó mediante modelos numéricos de vigas desarrolladas con elementos S4R (ABAQUS, 2014). La configuración del ensayo numérico coincidió con el ensayo de laboratorio descrito en la Figura 3.2. A continuación, se detallan las características del modelo numérico utilizado en el estudio paramétrico.

5.2.1 Modelo de Material

El modelo del material utilizado en este estudio paramétrico es el modelo de material Ramberg-Osgood de medio ciclo y un endurecimiento combinado con número de backstresses=1, tal y como se detalla en el Capítulo 4 de este Trabajo.

Para desarrollo del modelo de Ramberg-Osgood, se ha utilizado los parámetros publicados por Arrayago et al. (2017b) y presentados en la Tabla 5.3, donde E el módulo de elasticidad, $f_{0.2}$ el límite elástico, f_u la tensión ultima, ϵ_y la deformación elástica, ϵ_u la deformación ultima y ϵ la deformación unitaria (coeficiente Ec. (39)).

$$\epsilon = \left(\frac{235}{f_{0.2}} \frac{E}{210\,000} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. (39)}$$

Tabla 5.3. Propiedades del material (Arrayago et al., 2017b)

E	$f_{0.2}$	f_u	ϵ_y	ϵ_u	ϵ
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm/mm]	[mm/mm]	
197824	417	651	0.0021	0.360	0.73

Es importante recordar que ABAQUS trabaja con deformaciones plásticas. En la

Figura 5.2. se presenta la curva tensión-deformación plástica (Ramberg-Osgood) usada para el modelamiento numérico.

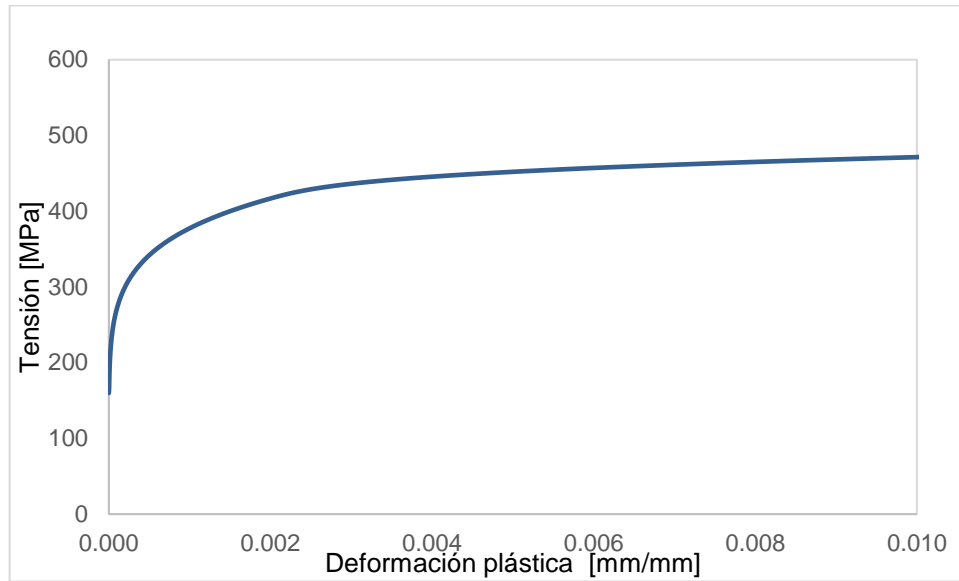


Figura 5.2. Curva tensión - deformación plástica para el análisis paramétrico

5.2.2 Protocolo de Carga

El protocolo de carga que se usó fue el propuesto por el AISC 341 (2005) y mostrado en la Tabla 4.1. La carga se aplicó imponiendo un desplazamiento en los puntos de carga. La amplitud de ese desplazamiento se calculó mediante la Ec. (38), teniendo en cuenta para la distancia entre el apoyo y la carga es de 510 mm. La Figura 5.3. muestra el protocolo de carga usado para el análisis. Cabe destacar que los ciclos se aplicaron hasta conseguir el fallo local de los elementos.

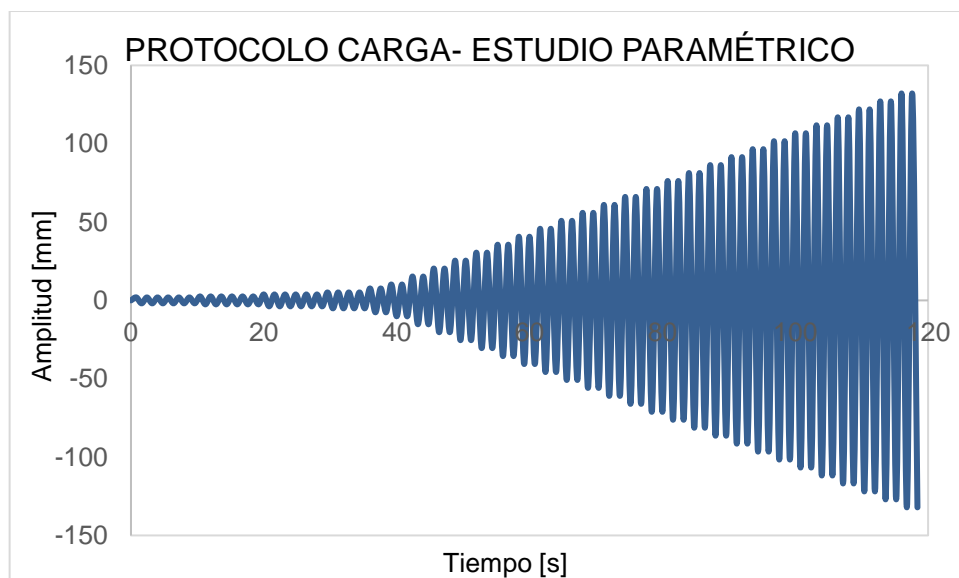


Figura 5.3. Protocolo de carga AISC - estudio paramétrico

5.2.3 Modelo Parametrizado

Debido a la gran cantidad de vigas estudiadas, se utilizó un archivo parametrizado de extensión INP (ABAQUS, 2014) mostrado en la Figura 5.4., en el cual se podían modificar fácilmente las dimensiones de la sección transversal.

```

|*Heading
PARAMETRIC MODEL CONTINUOUS BEAM
*restart, write
*****
***PARAMETER DEFINITION****
*****
*PARAMETER
*PARAMETER
H=          72      #height of the cross-section
B=          60      #width of the cross-section
R=          6.5     #external radii
t=          2       #thickness of the cross-section
a=          1.2     #aspect ratio
L1=         230     #distance from load to midspan
L=          800     #total model length
eH=         8       #number of elements in H
eB=         4       #number of elements in B
##### Intermediate geometrical parameters #####
#####
L2=L-L1-100
eL1=L1/10
eL2=L2/10
eL=eL1+eL2+6
H=a*B
e0=t/10
##### Definition of the first lateral section #####
#####

```

Figura 5.4. Archivo INP - estudio paramétrico

Es importante destacar que las medidas introducidas en el archivo INP son a eje de espesor. Para definir correctamente las medidas geométricas de las secciones estudiadas se utilizaron las Ec. (40), Ec. (41) y Ec. (42) presentadas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Cálculo dimensiones geométricas INP parametrizado

Cálculo dimensiones Geométricas INP-(Ecuaciones)	
$H_{abaqus} = H - t$	<i>Ec. (40)</i>
$B_{abaqus} = B - t$	<i>Ec. (41)</i>
$R_{ext_abaqus} = R_{ext} - \frac{t}{2}$	<i>Ec. (42)</i>

En la Tabla 5.5. se muestran las dimensiones ingresadas en el archivo INP para cada viga.

Tabla 5.5. Dimensiones de las secciones – ABAQUS

Dimensiones -ABAQUS						
Número	CROSS-SECTION TYPE	H [mm]	B [mm]	t [mm]	R _{ext} [mm]	h/b
1	RHS	72.0	60.0	2.0	6.5	1.20
2	RHS	72.0	60.0	3.0	6.5	1.20
3	RHS	72.0	60.0	4.0	6.5	1.20
4	RHS	72.0	60.0	5.0	6.5	1.20
5	RHS	72.0	60.0	6.0	6.5	1.20
6	RHS	84.0	70.0	3.0	6.5	1.20
7	RHS	84.0	70.0	4.0	6.5	1.20
8	RHS	84.0	70.0	5.0	6.5	1.20
9	RHS	84.0	70.0	6.0	6.5	1.20
10	RHS	96.0	80.0	3.0	6.5	1.20
11	RHS	96.0	80.0	4.0	6.5	1.20
12	RHS	96.0	80.0	5.0	6.5	1.20
13	RHS	96.0	80.0	6.0	6.5	1.20
14	RHS	108.0	90.0	3.0	6.5	1.20
15	RHS	108.0	90.0	4.0	6.5	1.20
16	RHS	108.0	90.0	5.0	6.5	1.20
17	RHS	108.0	90.0	6.0	6.5	1.20
18	RHS	90.0	60.0	2.0	6.5	1.50
19	RHS	90.0	60.0	3.0	6.5	1.50
20	RHS	90.0	60.0	4.0	6.5	1.50
21	RHS	90.0	60.0	5.0	6.5	1.50
22	RHS	90.0	60.0	6.0	6.5	1.50
23	SHS	60.0	60.0	2.0	6.5	1.00
24	SHS	60.0	60.0	3.0	6.5	1.00
25	SHS	60.0	60.0	4.0	6.5	1.00
26	SHS	60.0	60.0	5.0	6.5	1.00
27	SHS	60.0	60.0	6.0	6.5	1.00
28	SHS	70.0	70.0	3.0	6.5	1.00
29	SHS	70.0	70.0	4.0	6.5	1.00
30	SHS	70.0	70.0	5.0	6.5	1.00
31	SHS	70.0	70.0	6.0	6.5	1.00

32	SHS	90.0	90.0	3.0	6.5	1.00
33	SHS	90.0	90.0	4.0	6.5	1.00
34	SHS	90.0	90.0	5.0	6.5	1.00
35	SHS	90.0	90.0	6.0	6.5	1.00
36	SHS	120.0	120.0	4.0	6.5	1.00
37	SHS	120.0	120.0	5.0	6.5	1.00
38	SHS	120.0	120.0	6.0	6.5	1.00
39	SHS	150.0	150.0	5.0	6.5	1.00
40	SHS	150.0	150.0	6.0	6.5	1.00

Teniendo en cuenta las dimensiones de altura y base resumidas en la Tabla 5.5., el estudio paramétrico se puede dividir en cinco grupos de RHS y cinco grupos de SHS, mostrados en la Figura 5.5. Esta clasificación de secciones facilitará las comparaciones de los resultados obtenidos.

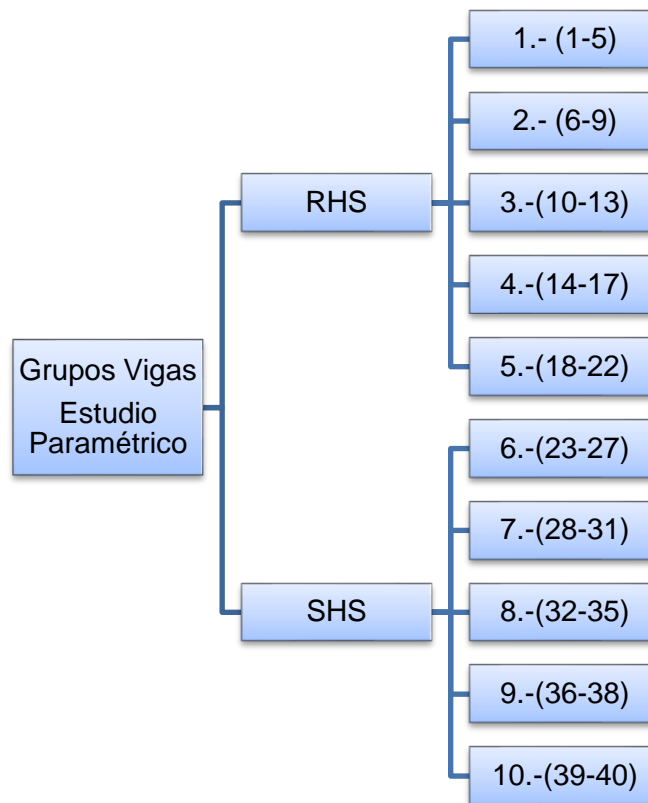


Figura 5.5. Esquema para análisis de vigas

Una vez configurado el estudio paramétrico, se analizó cada viga hasta su fallo mediante un análisis GMNIA. Seguidamente, se extrajeron los resultados necesarios del archivo con extensión ODB (ABAQUS, 2014), esto es, la carga aplicada y la flecha en el punto de carga, y se dibujaron las gráficas “skeleton curves”.

5.3 Skeleton Curves

Las skeleton curves son una representación clara de la rigidez inicial, la resistencia última y las tendencias de degradación post-límite de las probetas durante el proceso de carga (Fang et al., 2018). De acuerdo con Fang et al. (2018), las skeleton curves son curvas momento-rotación obtenidas conectando todos los puntos máximos de rotación de todos los ciclos. No obstante, según la cláusula 11.9.4 (9) del prEN 1998-1-2 (2020), la capacidad de rotación de una sección debe evaluarse conforme a la curva envolvente de los valores momento-rotación obtenidos en el primer ciclo.

En este Trabajo las skeleton curves se dibujaron de acuerdo con la normativa europea. Así, en el primer ciclo de cada amplitud se obtuvieron los valores de momentos y rotaciones. Los momentos fueron calculados utilizando la Ec. (44) y las rotaciones utilizando la Ec. (43). Los primeros ciclos de cada amplitud se determinaron mediante la variable Tiempo o Time, de acuerdo la Tabla 5.6. Por ejemplo, en los valores de momento-rotación en el step correspondiente al Time=12s eran los valores momento-rotación del primer ciclo de la amplitud 3. Por convergencia, en algunas ocasiones los valores momento-rotación no coincidían con los tiempos determinados para el primer ciclo de cada amplitud; en esos casos, la rotación se obtuvo interpolando entre los valores de momentos-rotaciones cercanos.

$$\theta = \frac{\delta}{d} \quad \text{Ec. (43)}$$

$$M = P(d) \quad \text{Ec. (44)}$$

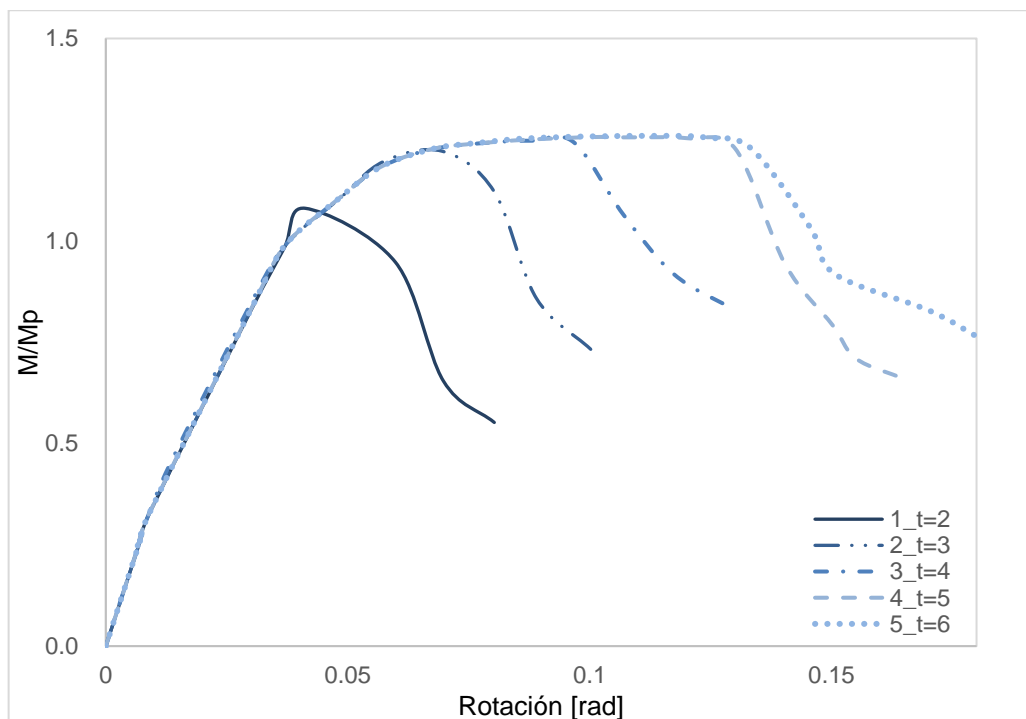
Donde:

θ	Rotación (Drift)
d	Distancia del apoyo a la carga aplicada
δ	Flecha
M	Momento aplicado
P	Carga total aplicada

Tabla 5.6. Tiempo correspondiente al primer ciclo

Número de amplitud	Time [s] para el primer ciclo de cada amplitud	Número de amplitud	Time [s] para el primer ciclo de cada amplitud	Número de amplitud	Time [s] para el primer ciclo de cada amplitud
1	0	11	53.6	21	85.6
2	2.4	12	56.8	22	88.8
3	12	13	60	23	92
4	21.6	14	63.2	24	95.2
5	31.2	15	66.4	25	98.4
6	37.6	16	69.6	26	101.6
7	40.8	17	72.79	27	104.8
8	44	18	76	28	108
9	47.2	19	79.2	29	111.2
10	50.4	20	82.4	30	114.4

Las Figuras 5.6. al 5.10. presentan las skeleton curves para los perfiles de sección rectangular hueca RHS estudiados. Las figuras 5.11. al 5.15. son las skeleton curves para los perfiles de sección cuadrada SHS, definidos en la Tabla 5.1. Como puede verse, los valores de momento asociados al primer ciclo de cada amplitud están normalizados respecto al momento plástico de la sección.


 Figura 5.6. Skeleton curve grupo 1- $H_{abaqus} = 72mm$; $B_{abaqus} = 60mm$

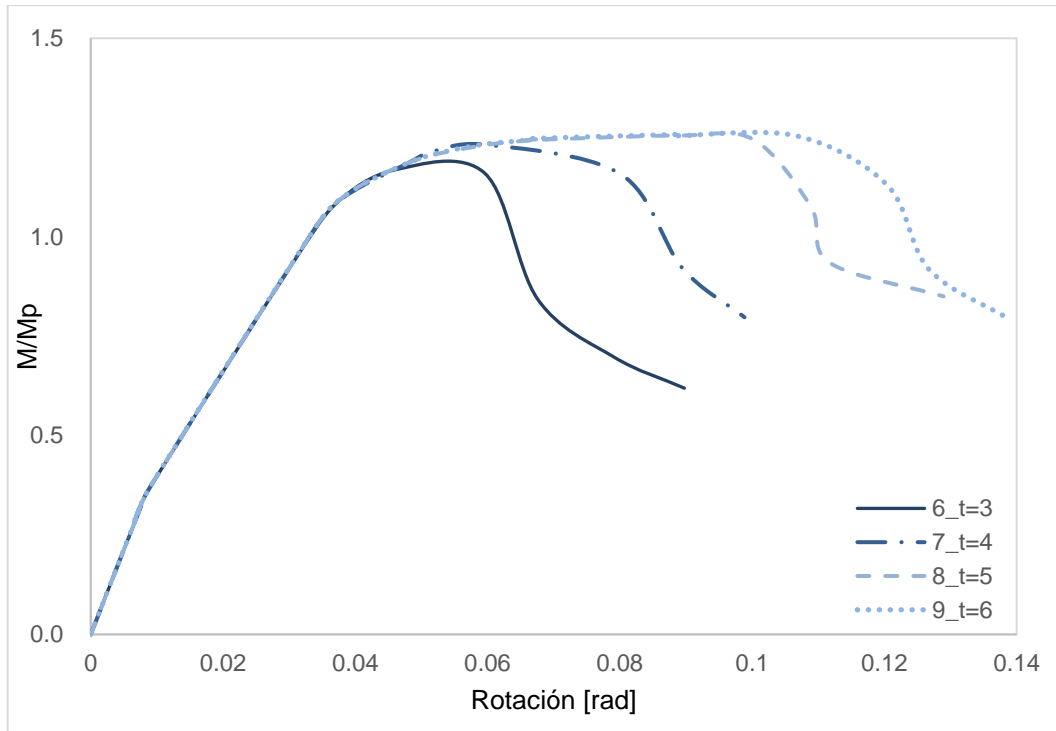


Figura 5.7. Skeleton curve grupo 2- $H_{abaqus} = 84 \text{ mm}$; $B_{abaqus} = 70 \text{ mm}$

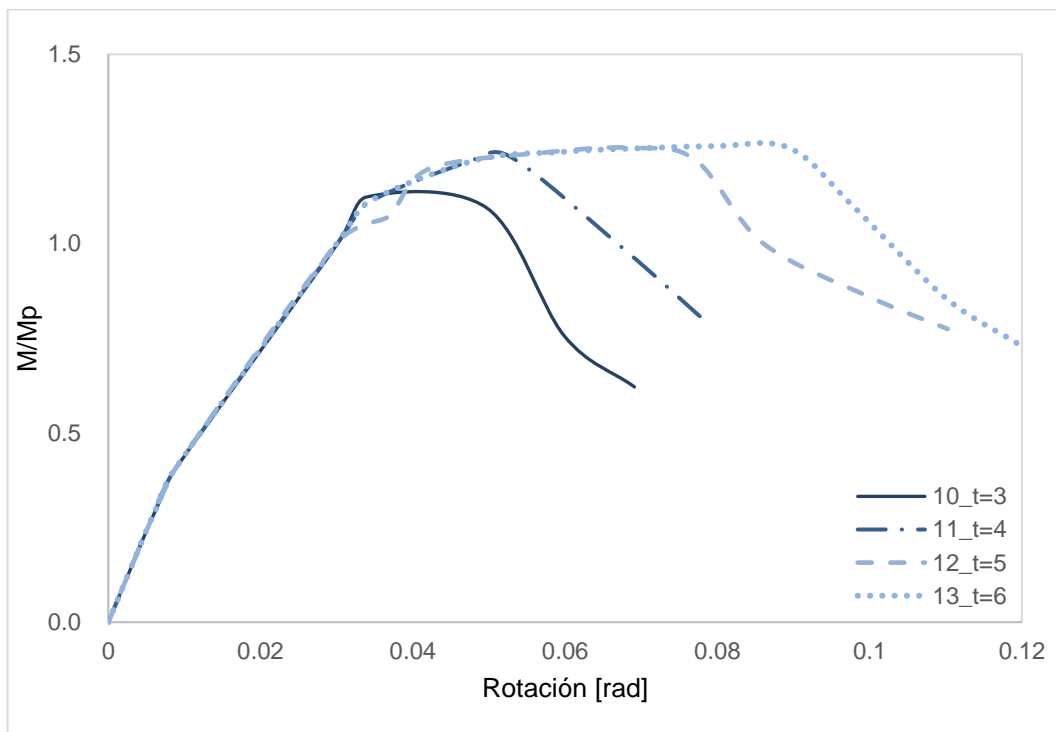


Figura 5.8. Skeleton curve grupo Grupo 3- $H_{abaqus} = 96 \text{ mm}$; $B_{abaqus} = 80 \text{ mm}$

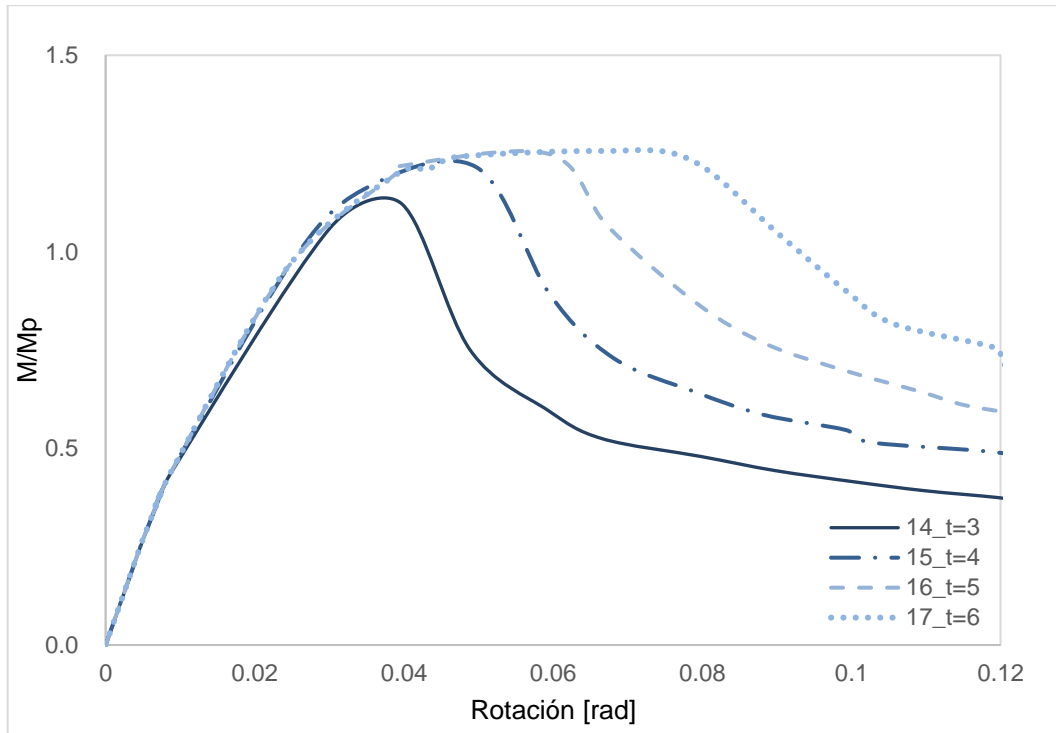


Figura 5.9. Skeleton curve grupo 4- $H_{abaqus} = 108mm$; $B_{abaqus} = 90mm$

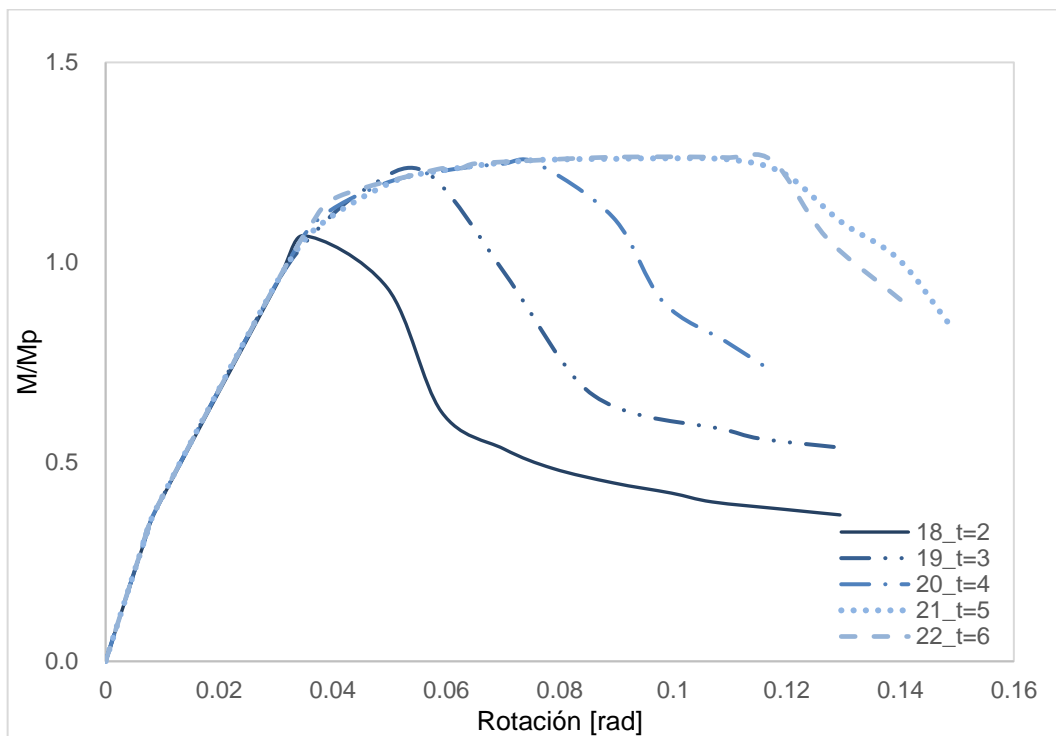


Figura 5.10. Skeleton curve grupo 5- $H_{abaqus} = 90mm$; $B_{abaqus} = 60mm$

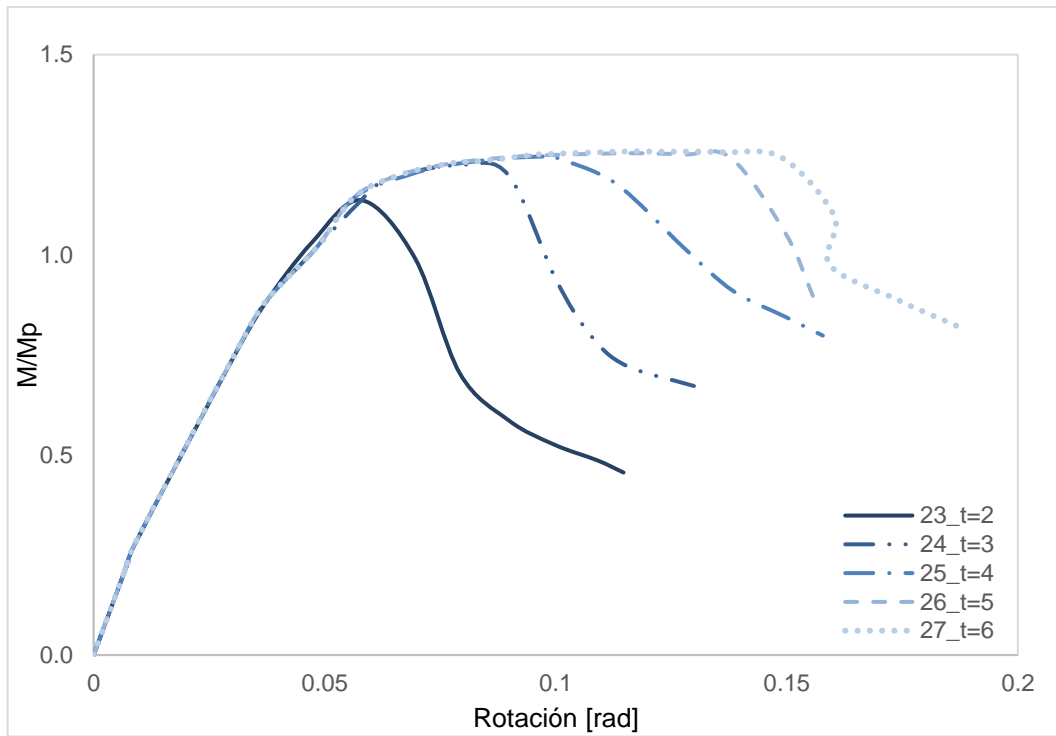


Figura 5.11. Skeleton curve grupo 6- $H_{abaqus} = 60mm$; $B_{abaqus} = 60mm$

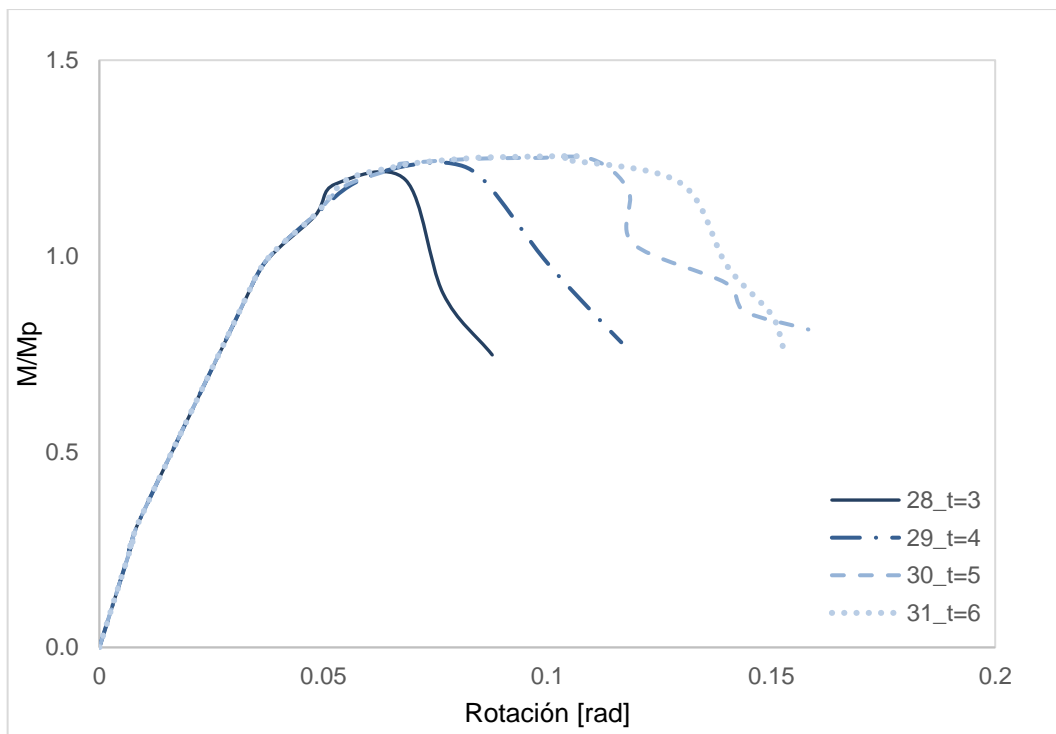


Figura 5.12. Skeleton curve grupo 7- $H_{abaqus} = 70mm$; $B_{abaqus} = 70mm$

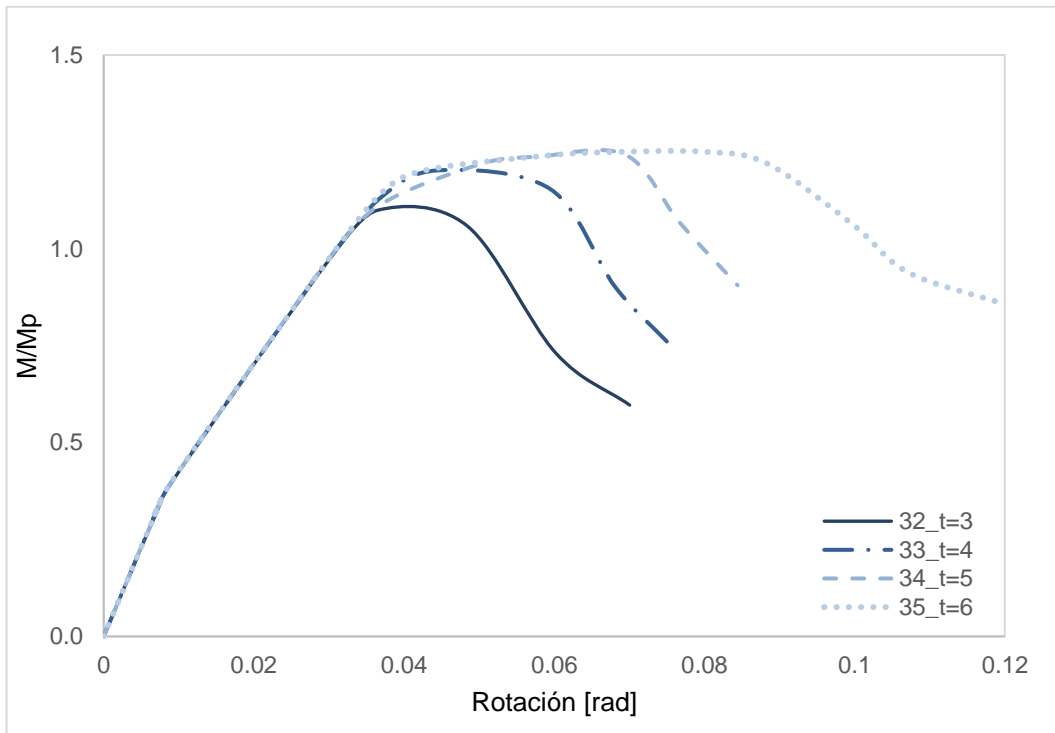


Figura 5.13. Skeleton curve grupo 8- $H_{abaqus} = 90mm$; $B_{abaqus} = 90mm$

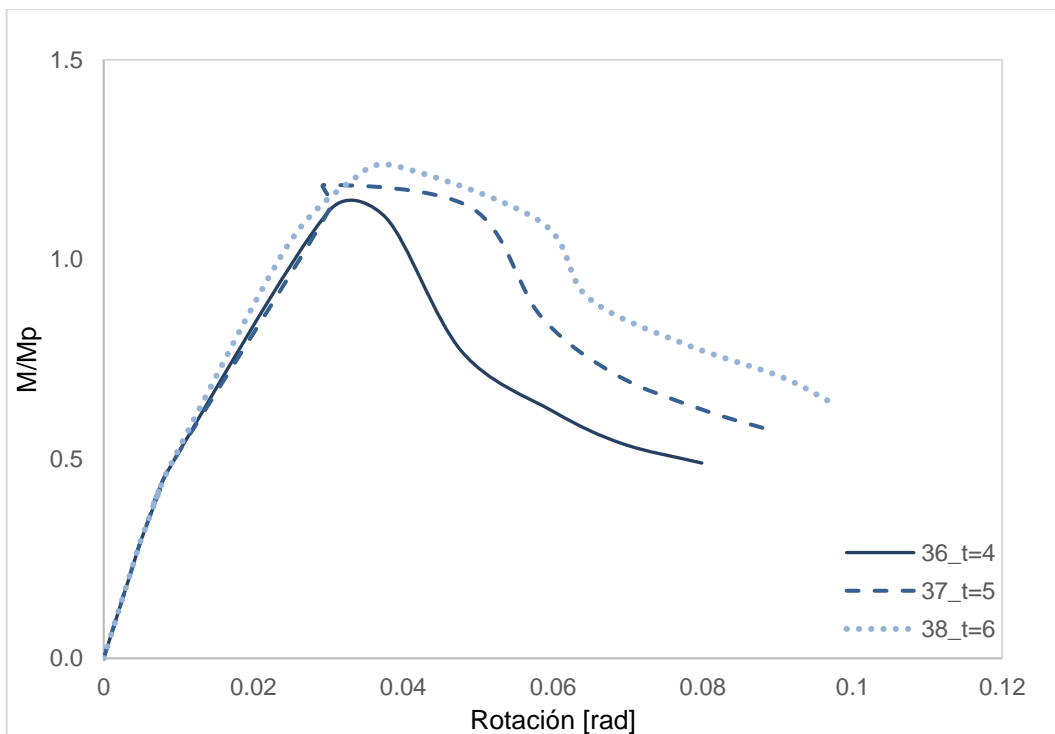


Figura 5.14. Skeleton curve grupo 9- $H_{abaqus} = 120mm$; $B_{abaqus} = 120mm$

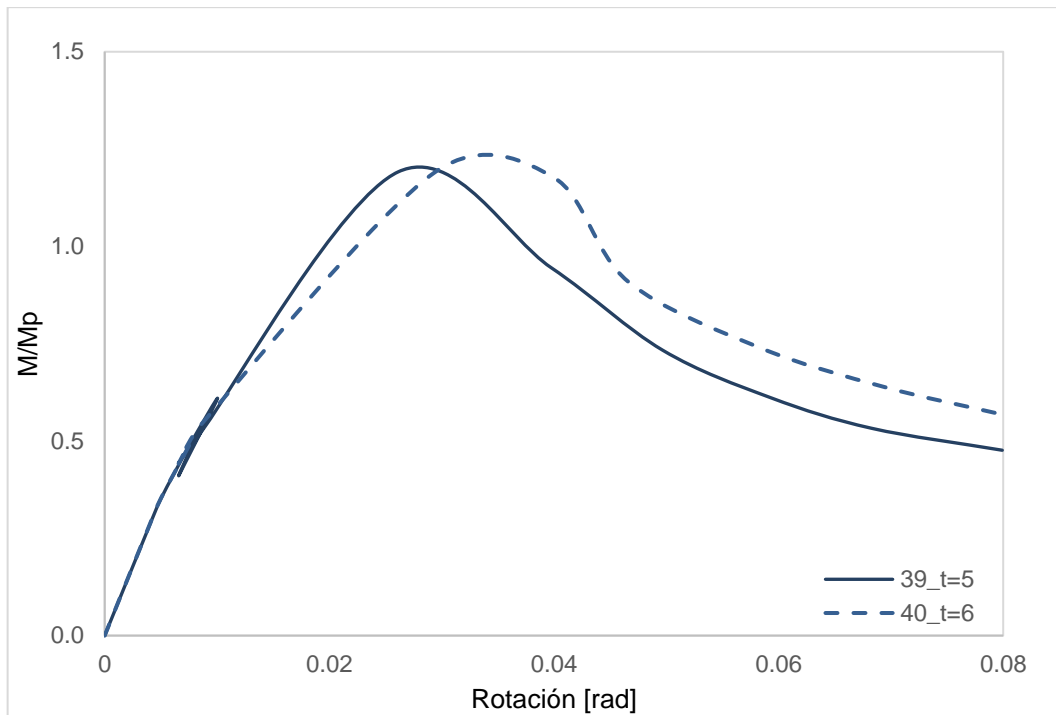


Figura 5.15. Skeleton curve grupo 10- $H_{abaqus} = 150mm$; $B_{abaqus} = 150mm$

5.4 Determinación del Momento Último y Capacidad de Rotación Plástica.

La rotación plástica o capacidad de rotación plástica se define mediante la resta entre la rotación última y rotación elástica según prEN 1998-1-2 (2020) apartado 11.9.4 (9):

$$\theta_p = \theta_u - \theta_e \quad \text{Ec. (45)}$$

Donde:

θ_p Rotación plástica

θ_u Rotación última

θ_y Rotación elástica

La Figura 5.16., publicada en el prEN1998-1-2 (2020), representa la definición de la rotación plástica.

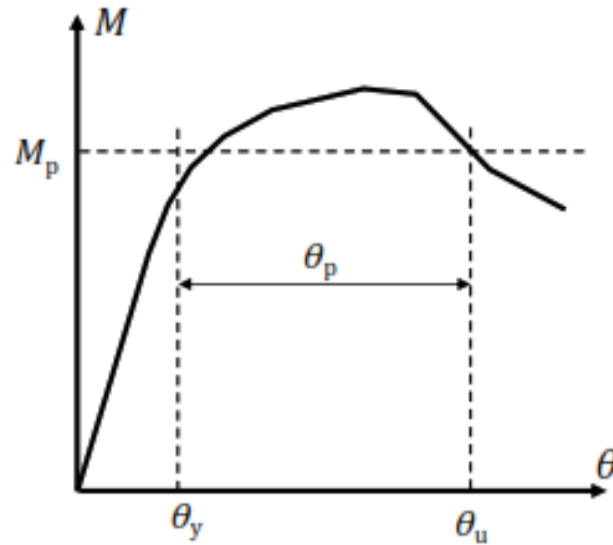


Figura 5.16. Definición rotación plástica (CEN, 2020)

La obtención de las rotaciones elásticas, últimas y plásticas se hizo teniendo en cuenta lo representado en la Figura 5.16. Como se muestra en la Figura 5.17, la rotación elástica coincide con el punto B, intersección de la pendiente inicial con el momento plástico, ya que es difícil estimar el momento elástico en acero inoxidable (Punto B). La rotación última es la intersección de la curva momento-capacidad de rotación con el momento plástico (Punto A). La capacidad de rotación plástica es la diferencia entre el punto A y el punto B.

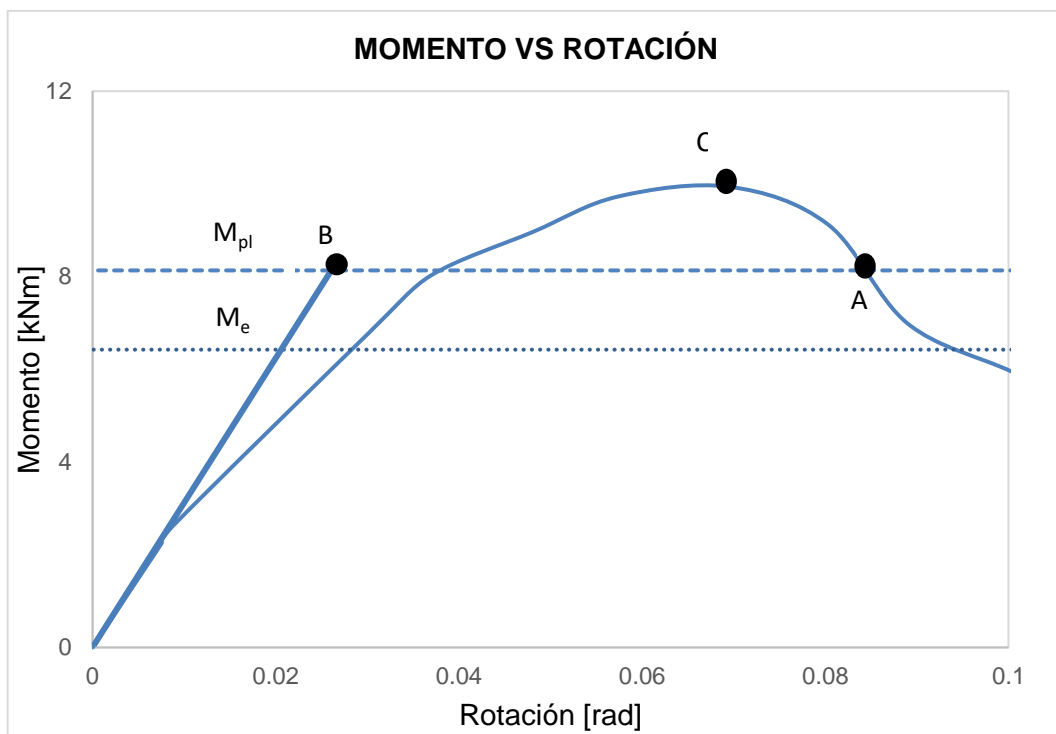


Figura 5.17. Esquema determinar las rotaciones plástica y elástica

La Tabla 5.7. resume los puntos más característicos de cada skeleton curve, donde el M_{el} es el momento elástico calculado conforme a la Ec. (46), M_{pl} es el momento plástico calculado conforme la Ec. (47), M_u es el momento máximo (Punto C en la Figura 5.17.), y Θ_y es la rotación elástica, Θ_u la rotación última y Θ_p rotación plástica (la diferencia de las dos), respectivamente.

$$M_{el} = W_{el}f_{0.2} \quad \text{Ec. (46)}$$

Donde:

M_{el} Momento elástico de la sección

W_{el} Módulo elástico $W_{el} = \frac{I}{H/2}$

$f_{0.2}$ Límite elástico del material

$$M_{pl} = W_{pl}f_{0.2} \quad \text{Ec. (47)}$$

Donde:

M_{pl} Momento plástico de la sección

W_{pl} Módulo elástico $W_{pl} = A d_y$

$f_{0.2}$ Límite elástico del material

Tabla 5.7. Resumen momentos y rotaciones -Muestra de vigas

Número	$M_{y,el}$ [kNm]	$M_{y,pl}$ [kNm]	M_u [kNm]	Θ_y [Rad]	Θ_p [Rad]	Θ_u [Rad]
1	4.34	5.42	5.86	0.0274	0.0252	0.0526
2	6.42	8.13	9.94	0.0273	0.0571	0.0843
3	8.46	10.85	13.53	0.0272	0.0844	0.1116
4	10.44	13.57	17.05	0.0272	0.1111	0.1384
5	12.38	16.29	20.52	0.0272	0.1199	0.1471
6	9.01	11.17	13.06	0.0235	0.0401	0.0636
7	11.88	14.90	18.37	0.0235	0.0629	0.0864

8	14.69	18.63	23.39	0.0235	0.0870	0.1104
9	17.44	22.37	28.14	0.0235	0.1009	0.1243
10	12.01	14.69	16.49	0.0208	0.0318	0.0526
11	15.86	19.59	24.10	0.0207	0.0461	0.0668
12	19.64	24.50	30.69	0.0207	0.0654	0.0861
13	23.34	29.40	36.98	0.0207	0.0821	0.1028
14	15.44	18.69	20.97	0.0187	0.0240	0.0427
15	20.41	24.92	30.31	0.0187	0.0376	0.0563
16	25.29	31.16	38.93	0.0186	0.0526	0.0713
17	30.09	37.40	47.00	0.0186	0.0745	0.0931
18	5.94	7.45	7.94	0.0226	0.0196	0.0423
19	8.82	11.18	13.69	0.0225	0.0463	0.0688
20	11.64	14.91	18.64	0.0225	0.0716	0.0941
21	14.40	18.65	23.49	0.0225	0.1176	0.1401
22	17.11	22.39	28.29	0.0224	0.1097	0.1321
23	3.37	4.22	4.79	0.0321	0.0368	0.0689
24	4.98	6.33	7.75	0.0320	0.0656	0.0976
25	6.54	8.44	10.52	0.0320	0.0974	0.1294
26	8.06	10.55	13.23	0.0320	0.1198	0.1518
27	9.54	12.67	15.94	0.0320	0.1275	0.1595
28	7.02	8.70	10.38	0.0276	0.0464	0.0740
29	9.23	11.60	14.34	0.0275	0.0712	0.0988
30	11.39	14.50	18.13	0.0275	0.0981	0.1256
31	0.30	17.41	21.85	0.0275	0.1114	0.1389
32	12.09	14.56	16.01	0.0218	0.0287	0.0505
33	15.96	19.42	23.35	0.0217	0.0430	0.0647
34	19.74	24.28	30.17	0.0217	0.0582	0.0799
35	23.46	29.14	36.43	0.0217	0.0818	0.1035
36	29.40	34.90	39.15	0.0169	0.0239	0.0409
37	36.46	43.63	51.76	0.0168	0.0367	0.0535
38	43.41	52.37	64.67	0.0168	0.0447	0.0615
39	58.19	68.62	81.74	0.0147	0.0220	0.0367
40	69.39	82.35	98.06	0.0147	0.0297	0.0443

5.5 Clasificación de la Sección Según su Ductilidad

Determinado el valor de la rotación plástica para cada sección, se procede a la clasificación de cada viga conforme a las normativas europea prEN 1998-1-2 (2020) y

americana AISC 341 (2010).

Según la norma prEN 1998-1-2 (2020), las secciones se dividen en clase de ductilidad alta (DC3) y media (DC2) si sus capacidades de rotación son superiores a 0.03 rad y a 0.02 rad, respectivamente. Por otro lado, el código AISC 341 (2010) también clasifica las secciones según la capacidad de rotación, si es superior a 0.02 rad para el caso de pórticos de momento intermedios (IMF) y 0.04 rad en pórticos de momento especiales (SMF).

En la Tabla 5.8. se muestra los rangos de clasificación establecidos en cada norma. En este Trabajo, las vigas que han desarrollado capacidades de rotación inferiores a 0.02 rad se han clasificado bajo el apelativo “Falso”.

Tabla 5.8. Clasificación de la sección según su ductilidad

Normativa	Capacidad de rotación [rad]		Clasificación
prEN 1998-1-2 (2020)	0.02	DC2	Clase de ductilidad media
11.9.4 (9)	0.03	DC3	Clase de ductilidad alta
AISC 341 (2010)	0.02	IMF	Pórticos de momento Intermedios
E2.6b y E3.6b	0.04	SMF	Pórticos de momento especiales
	Falso		No pertenece a ninguna clase mencionada

La ductilidad puede expresarse como la ratio entre la rotación última y la rotación elástica (Fang et al., 2018), tal y como como se muestra en la Ec. (48)

$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad \text{Ec. (48)}$$

A continuación, en la Tabla 5.9. se muestran los resultados de la ductilidad y clasificación de cada una de las vigas en estudio.

Tabla 5.9. Ductilidad y clasificación vigas

Número	Sección Transversal	Ductilidad μ	Clasificación	
			prEN1998-1-2 (2020)	AISC341 (2010)
1	RHS	1.9	DC2	IMF
2	RHS	3.1	DC3	SMF
3	RHS	4.1	DC3	SMF
4	RHS	5.1	DC3	SMF
5	RHS	5.4	DC3	SMF
6	RHS	2.7	DC3	SMF
7	RHS	3.7	DC3	SMF
8	RHS	4.7	DC3	SMF
9	RHS	5.3	DC3	SMF
10	RHS	2.5	DC3	IMF
11	RHS	3.2	DC3	SMF
12	RHS	4.2	DC3	SMF
13	RHS	5.0	DC3	SMF
14	RHS	2.3	DC2	IMF
15	RHS	3.0	DC3	IMF
16	RHS	3.8	DC3	SMF
17	RHS	5.0	DC3	SMF
18	RHS	1.9	FALSO	FALSO
19	RHS	3.1	DC3	SMF
20	RHS	4.2	DC3	SMF
21	RHS	6.2	DC3	SMF
22	RHS	5.9	DC3	SMF
23	SHS	2.1	DC3	IMF
24	SHS	3.0	DC3	SMF
25	SHS	4.0	DC3	SMF
26	SHS	4.7	DC3	SMF
27	SHS	5.0	DC3	SMF
28	SHS	2.7	DC3	SMF
29	SHS	3.6	DC3	SMF
30	SHS	4.6	DC3	SMF
31	SHS	5.1	DC3	SMF
32	SHS	2.3	DC2	IMF
33	SHS	3.0	DC3	SMF

34	SHS	3.7	DC3	SMF
35	SHS	4.8	DC3	SMF
36	SHS	2.4	DC2	IMF
37	SHS	3.2	DC3	IMF
38	SHS	3.7	DC3	SMF
39	SHS	2.5	DC2	IMF
40	SHS	3.0	DC2	IMF

CAPÍTULO 6: OBTENCIÓN DE LAS EXPRESIONES ANALÍTICAS PARA CARACTERIZAR RÓTULAS PLÁSTICAS.

El análisis de los resultados numéricos obtenidos permite la formulación de expresiones analíticas que caractericen los puntos más representativos las curvas momento-rotación de una sección transversal austenítica bajo cargas verticales. Estos puntos son el momento último y las capacidades de rotación plástica y última. La Figura 6.1 esquematiza el procedimiento de análisis y definición de las expresiones seguido y detallado en este Capítulo.

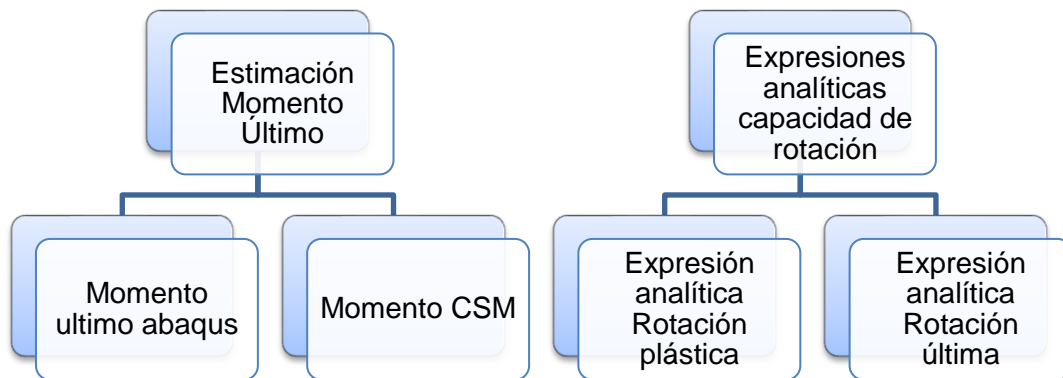


Figura 6.1. Esquema manejo de resultados estudio paramétrico

6.1 Estimación de Momento Último

La estimación del momento último se realizó con la comparación del momento resistente obtenido por el método CSM. El método CSM permite tener en cuenta la ductilidad y reserva de resistencia ganada durante el endurecimiento por deformación (strain-hardening) del material. Por tanto, el momento CSM (M_{CSM}) muestra capacidades superiores que el momento plástico M_{pl} para secciones compactas. En este punto se compararon los momentos últimos numéricos con el momento CSM con el objetivo de determinar si era posible estimar el momento último M_u de sección austenítica sometida a cargas cíclicas con la expresión del M_{CSM} .

6.1.1 Momento Último Modelo Numérico

Los valores de momento último obtenidos en el estudio paramétrico fueron presentados en la Tabla 5.7. de este Trabajo (columna M_u).

6.1.2 Momento Continuous Strength Method

El cálculo del momento CSM se obtuvo mediante la Ec. (49) publicada en prEN 1993-1-4 (2021).

$$M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \left[1 + \frac{E_{sh} W_{el}}{E W_{pl}} \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^\alpha \right] \quad Ec. (49)$$

Donde:

W_{pl}	Módulo de sección plástico
W_{el}	Módulo de sección elástico
f_y	Límite de fluencia
E_{sh}	Módulo de endurecimiento por deformación
E	Módulo de elasticidad
$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y}$	Capacidad de deformación (Ec. (27))
α	Parámetro de flexión CSM

La Tabla 6.1. resume los valores de los parámetros de los que depende el momento resistente CSM para el modelo de material utilizado en este Trabajo, donde f_u tensión última, f_y límite fluencia, C_2 y C_1 coeficientes CSM para austenítico, ε_u deformación última, ε_y deformación elástica, E_{sh} módulo de la rama de endurecimiento por deformación, E módulo de elasticidad y α parámetro CSM a flexión.

Tabla 6.1. Características básicas modelo material CSM

Característica	Valor	Unidades
f_u	651	[MPa]
f_y	417	[MPa]
C_2	0.16	-
ε_u	0.36	-
ε_y	0.0021	-
E_{sh}	4216.216	[MPa]
C_1	0.1	-
E	197824	[MPa]
α	2	-

En la Tabla 6.2. se muestran los momentos resistentes CSM determinados con las Ec. (49). La Tabla 6.2 también refleja los momentos últimos predichos en los análisis numéricos.

Tabla 6.2. Resultados curva base modelo material CSM

Número	Sección Transversal	λ (M_{ei})	$\epsilon_{csm}/\epsilon_y$	M_{csm} [kNm]	M_u [kNm]
1	RHS	0.600	2.52	5.39	5.86
2	RHS	0.415	6.88	8.90	9.94
3	RHS	0.316	15.00	13.36	13.53
4	RHS	0.256	15.00	16.67	17.047
5	RHS	0.216	15.00	19.96	20.52
6	RHS	0.489	4.24	11.67	13.06
7	RHS	0.371	9.82	17.10	18.37
8	RHS	0.300	15.00	23.00	23.39
9	RHS	0.252	15.00	27.55	28.14
10	RHS	0.562	2.94	14.88	16.49
11	RHS	0.426	6.37	21.31	24.10
12	RHS	0.343	12.72	29.37	30.69
13	RHS	0.288	15.00	36.34	36.98
14	RHS	0.635	2.23	18.45	20.97
15	RHS	0.480	4.46	26.21	30.31
16	RHS	0.386	8.63	35.19	38.93
17	RHS	0.324	15.00	46.35	47.00
18	RHS	0.612	2.41	7.37	7.94
19	RHS	0.421	6.59	12.18	13.69
20	RHS	0.3206	15.00	18.37	18.64
21	RHS	0.260	15.00	22.93	23.49
22	RHS	0.219	15.00	27.47	28.29
23	SHS	0.600	2.53	4.19	4.79
24	SHS	0.411	7.08	6.94	7.75
25	SHS	0.313	15.00	10.38	10.52
26	SHS	0.254	15.00	12.95	13.23
27	SHS	0.215	15.00	15.50	15.94
28	SHS	0.485	4.34	9.11	10.38
29	SHS	0.368	10.13	13.37	14.34
30	SHS	0.297	15.00	17.89	18.13
31	SHS	0.250	15.00	21.42	21.85
32	SHS	0.630	2.28	14.41	16.01

33	SHS	0.476	4.58	20.47	23.35
34	SHS	0.383	8.88	27.54	30.17
35	SHS	0.3208	15.00	36.12	36.43
36	SHS	0.640	2.20	34.52	39.15
37	SHS	0.528	3.45	44.93	51.76
38	SHS	0.429	6.20	56.95	64.67
39	SHS	0.627	2.29	68.23	81.74
40	SHS	0.549	3.12	84.14	98.06

6.2 Obtención de las Expresiones Analíticas de Rotación

En este apartado se detalla el procedimiento seguido para definir las expresiones analíticas de rotación última y rotación plástica en función de la esbeltez.

6.2.1 Determinación de la Expresión Analítica Capacidad Última de Rotación

La obtención de la expresión analítica que definirá la capacidad última de rotación de las piezas se realizó en función de la gráfica rotación última-esbeltez de la sección mostrada en la Figura 6.2.

La gráfica rotación última-esbeltez de la sección muestra una nube de puntos bastante concentrada, con una tendencia que puede aproximarse mediante una expresión analítica de tipo exponencial. Así, la expresión analítica exponencial resultante es Ec. (50):

$$\theta_u = 0.2692e^{-2.94\lambda} \quad \text{Ec. (50)}$$

Donde:

θ_u	Rotación última
λ	Esbeltez de la pieza

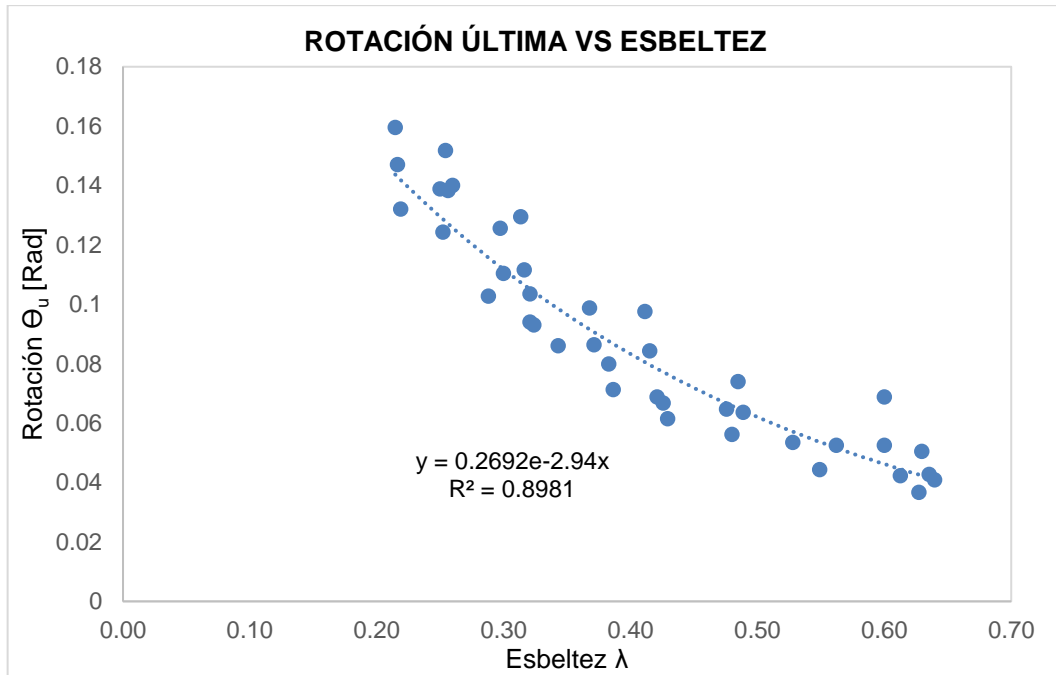


Figura 6.2. Análisis de la expresión analítica - rotación última

6.2.1 Determinación de la Expresión Analítica Capacidad Plástica de Rotación

La expresión analítica que definirá la capacidad plástica de rotación de las piezas fue obtenida a partir de la nube de puntos de la gráfica rotación plástica-esbeltez local mostrada en la Figura 6.3. Nuevamente, la tendencia de los datos numéricos puede aproximarse a una expresión analítica de tipo exponencial cuyos valores están definidos en la Ec. (51):

$$\theta_p = 0.2833e^{-3.96\lambda} \quad \text{Ec. (51)}$$

Donde:

- θ_p Rotación Plástica
- λ Esbeltez de la pieza

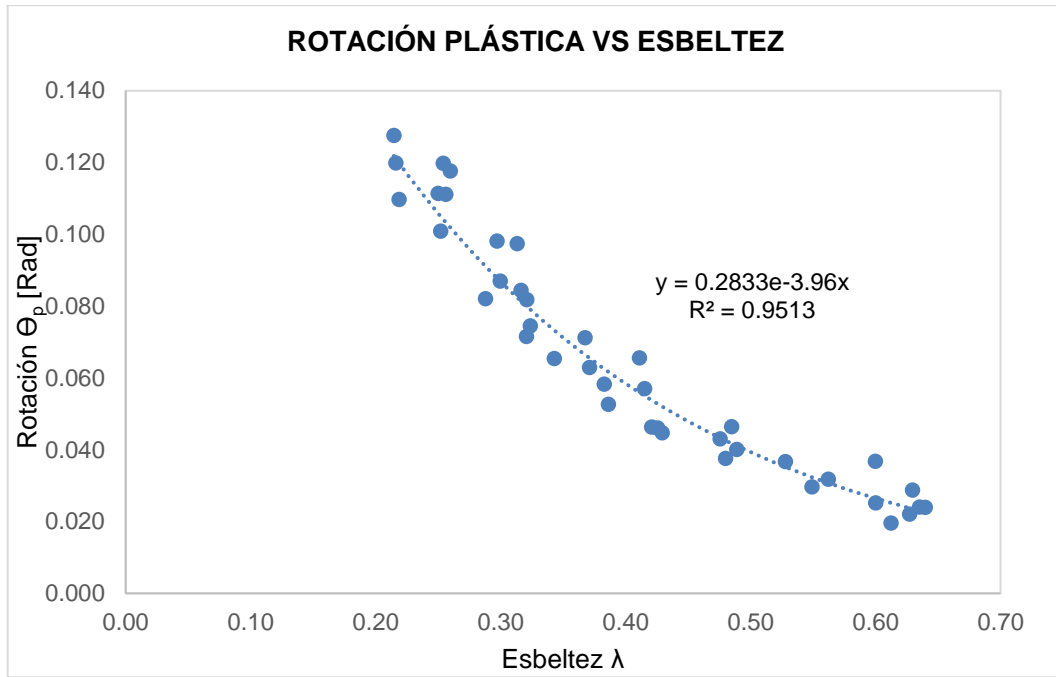


Figura 6.3. Análisis de la expresión analítica - plástica

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS PARAMÉTRICOS

En este Capítulo se analizan los resultados obtenidos en el estudio paramétrico llevado a cabo en este Trabajo. En la Figura 7.1 se esquematiza las valoraciones recogidas en este Capítulo.

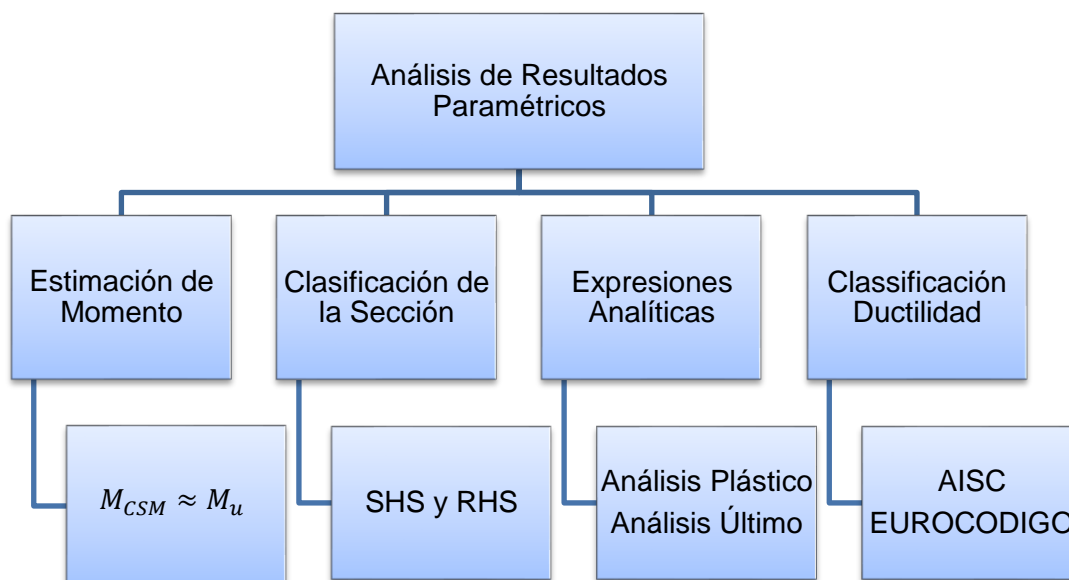


Figura 7.1. Esquema de Análisis ensayo numérico "Four Point Bending Test"

7.1 Análisis Estimación Momento Último

Los momentos últimos numéricos M_u pueden ser aproximados a los momentos CSM M_{CSM} . La Tabla 7.1 recoge la relación de los momentos últimos numéricos y los momentos CSM. Es importante enfatizar que todas las ratios se encuentran sobre el valor de 1, es decir, los momentos últimos alcanzados en los análisis numéricos son mayores al momento CSM.

Tabla 7.1. Rangos relación momentos últimos

Momento último	Rango aproximado
M_u/M_{CSM}	1.01-1.20

Para tener una mejor visualización de los resultados se realizó la gráfica de la Figura 7.2. la relación de los momentos-esbeltez local de la sección. Para esbelteces locales menores que 0.32 el M_{CSM} da buenas estimaciones del momento último, siendo más conservadoras a medida que aumenta la esbeltez local de la sección. Aun así, tal y como se ha mencionado, considerar que el momento último de una rótula austenítica sometida a cargas cíclicas es igual al momento M_{CSM} es acertado y del lado de la seguridad.

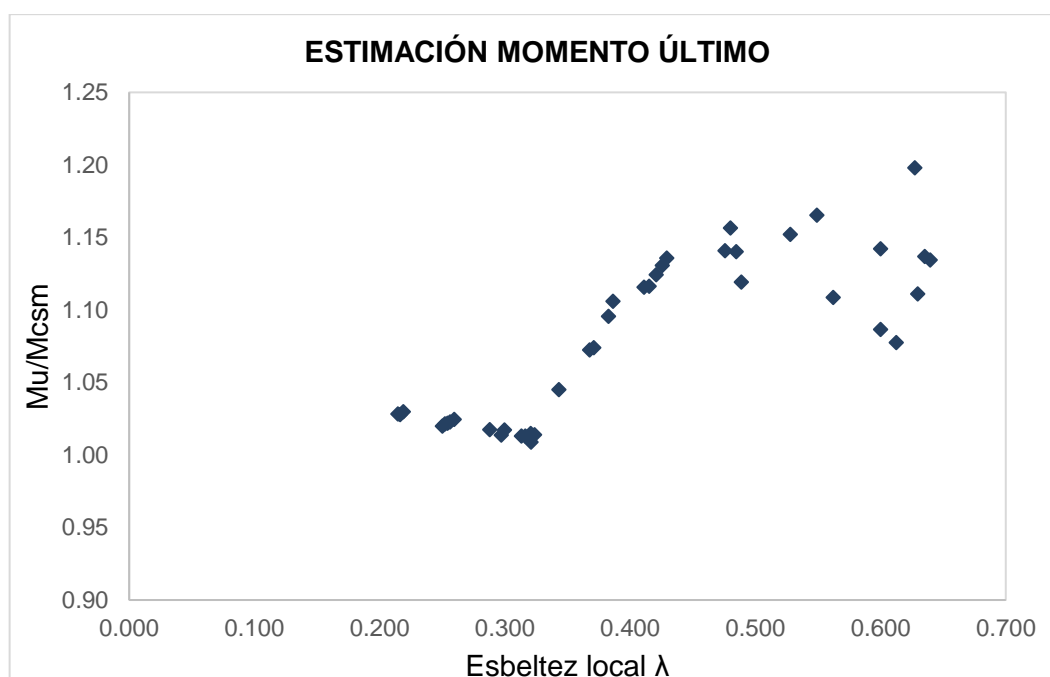


Figura 7.2. Comparación de los momentos últimos numéricos y momentos CSM

7.1 Análisis de la Clasificación de la Sección Transversal

En el análisis de la clasificación de la sección transversal de acuerdo prEN 1993-1-4 (2021) y el Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural (2017) se observó que en la muestra estudiada existen vigas cuya ala es de tipo clase 4, marcadas en rojo en la Tabla 7.2, y que, por tanto, su clasificación correspondería a Clase 4. Teóricamente, las secciones clase 4 abollan antes de alcanzar el M_{el} . No obstante, el momento último de estas vigas es mayor al momento plástico. Esto se debe a que las almas, que son de clase 1, le dan una aportación de resistencia a la sección, siendo estas capaces de llegar a un momento más allá del momento plástico y comportándose como secciones de clase 1 o 2.

Tabla 7.2. Clasificación de la sección transversal

Número	Sección Transversal	$M_{y,el}$	$M_{y,pl}$	M_u	Ala		Alma	
		[kNm]	[kNm]	[kNm]	c/et	Clase	c/et	Clase
1	RHS	4.34	5.42	5.86	38.4	4	46.7	1
2	RHS	6.42	8.13	9.94	24.7	1	30.2	1
3	RHS	8.46	10.85	13.53	17.8	1	22.0	1
4	RHS	10.44	13.57	17.05	13.7	1	17.0	1
5	RHS	12.38	16.29	20.52	11.0	1	13.7	1
6	RHS	9.01	11.17	13.06	29.3	1	35.7	1

7	RHS	11.88	14.90	18.37	21.3	1	26.1	1
8	RHS	14.69	18.63	23.39	16.5	1	20.3	1
9	RHS	17.44	22.37	28.14	13.3	1	16.5	1
10	RHS	12.01	14.69	16.49	33.9	2	41.2	1
11	RHS	15.86	19.59	24.10	24.7	1	30.2	1
12	RHS	19.64	24.50	30.69	19.2	1	23.6	1
13	RHS	23.34	29.40	36.98	15.6	1	19.2	1
14	RHS	15.44	18.69	20.97	38.4	4	46.7	1
15	RHS	20.41	24.92	30.31	28.1	1	34.3	1
16	RHS	25.29	31.16	38.93	22.0	1	26.9	1
17	RHS	30.09	37.40	47.00	17.8	1	22.0	1
18	RHS	5.94	7.45	7.94	38.4	4	59.0	1
19	RHS	8.82	11.18	13.69	24.7	1	38.4	1
20	RHS	11.64	14.91	18.64	17.8	1	28.1	1
21	RHS	14.40	18.65	23.49	13.7	1	22.0	1
22	RHS	17.11	22.39	28.29	11.0	1	17.8	1
23	SHS	3.37	4.22	4.79	38.4	4	38.4	1
24	SHS	4.98	6.33	7.75	24.7	1	24.7	1
25	SHS	6.54	8.44	10.52	17.8	1	17.8	1
26	SHS	8.06	10.55	13.23	13.7	1	13.7	1
27	SHS	9.54	12.67	15.94	11.0	1	11.0	1
28	SHS	7.02	8.70	10.38	29.3	1	29.3	1
29	SHS	9.23	11.60	14.34	21.3	1	21.3	1
30	SHS	11.39	14.50	18.13	16.5	1	16.5	1
31	SHS	0.30	17.41	21.85	13.3	1	13.3	1
32	SHS	12.09	14.56	16.01	38.4	4	38.4	1
33	SHS	15.96	19.42	23.35	28.1	1	28.1	1
34	SHS	19.74	24.28	30.17	22.0	1	22.0	1
35	SHS	23.46	29.14	36.43	17.8	1	17.8	1
36	SHS	29.40	34.90	39.15	38.4	4	38.4	1
37	SHS	36.46	43.63	51.76	30.2	1	30.2	1
38	SHS	43.41	52.37	64.67	24.7	1	24.7	1
39	SHS	58.19	68.62	81.74	38.4	4	38.4	1
40	SHS	69.39	82.35	98.06	31.6	1	31.6	1

7.2 Análisis de Estimación de las Expresiones Analíticas

Una vez definidas las expresiones analíticas obtenidas en el estudio paramétrico, es

importante el análisis de estas y realizar su corrección para obtener un buen grado de fiabilidad. En la Figura 7.3. se detallan cada una de las expresiones analíticas obtenidas en el Capítulo 6 de este Trabajo.

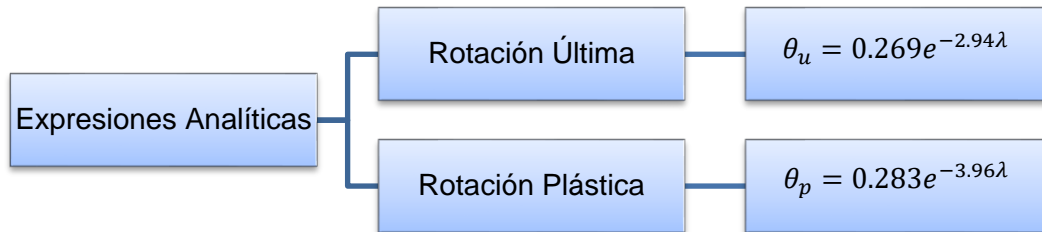


Figura 7.3. Ecuaciones de rotación propuestas

Para ello se realiza el análisis estadístico de las expresiones analíticas con los resultados numéricos, similar al publicado por Nastri y Piluso (2020). Para ello, se calcula el factor necesario para que estas expresiones analíticas tengan un grado de fiabilidad mayor.

En la Tabla 7.3. se observan los factores de ajuste (γ_{rd}) de las expresiones analíticas calculados con una distribución normal, junto a los parámetros necesarios para calcular esos factores, esto es el promedio de la relación entre las rotaciones obtenidas numérica y analíticamente ($\Theta_{num} / \Theta_{ana}$) y la desviación estándar.

Tabla 7.3. Parámetros estadísticos de las expresiones

Expresión Analítica Vigas	Muestra	Promedio $\frac{\Theta_{num}}{\Theta_{ana}}$	Desviación estándar	Factor de ajuste γ_{rd}
Rotación Última	40	1.01	0.137	1.23
Rotación Plástica	40	1.02	0.120	1.21

Por tanto, las expresiones analíticas de rotación última y rotación plástica respecto a la esbeltez local con una fiabilidad del 95% vienen dadas por las Ec.(52) y Ec.(53), respectivamente.

$$\theta_u = \frac{1}{1.23} 0.269e^{-2.94\lambda} = 0.219e^{-2.94\lambda} \quad \text{Ec. (52)}$$

$$\theta_p = \frac{1}{1.21} 0.283e^{-3.96\lambda} = 0.234e^{-3.96\lambda} \quad \text{Ec. (53)}$$

En las siguientes Figuras 7.4 y 7.5. se muestran las gráficas del análisis de fiabilidad teniendo que los valores obtenidos con el factor de ajuste ya se encuentran en la zona marcada como segura con una fiabilidad del 95% y un error del 5%.

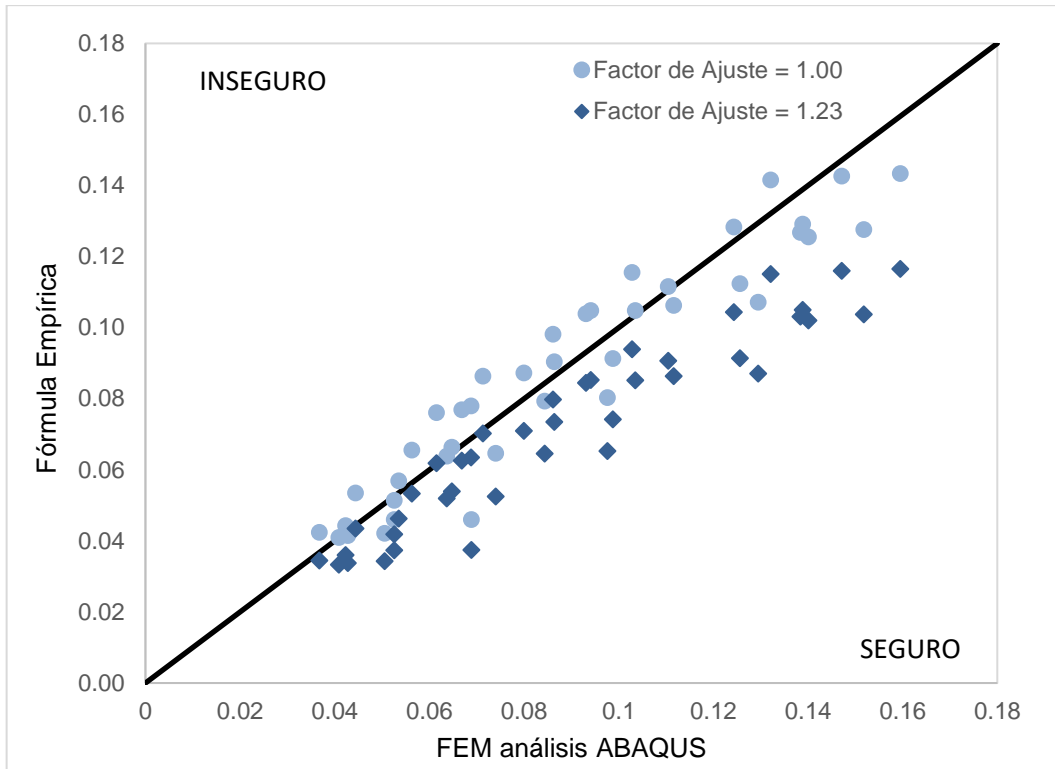


Figura 7.4. Análisis de fiabilidad de la expresión analítica - rotación última

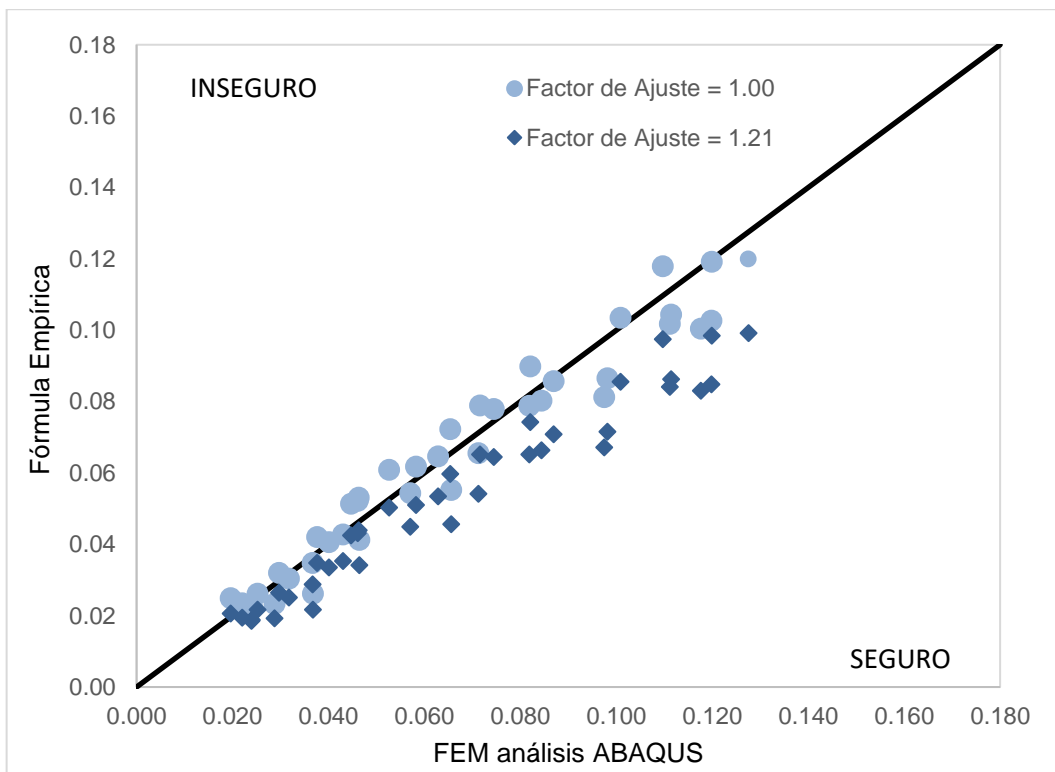


Figura 7.5. Análisis de fiabilidad de la expresión analítica - rotación plástica

7.3 Análisis de Clasificación de las Secciones Según su Ductilidad

Se presenta una comparación de la clasificación de las secciones según su ductilidad de acuerdo con la norma América AISC 341 (2010) y europea prEN 1998-1-2 (2020). Como se ha mencionado en el Capítulo 5, existen diferentes rangos y cada uno de estos dependen de la capacidad de rotación de la pieza para darles así la denominación según corresponda. En la Figura 7.6. se observa un resumen de los resultados ya obtenidos en el desarrollo del proyecto. Cabe destacar que el rango de clasificación es un poco más estricto en la norma americana, ya que solo 29 vigas pertenecen a la categoría de más ductilidad SMF, frente a las 33 vigas de la categoría europea superior DC3. Además, para ambas normativas existe una viga que no se clasifica en ninguna de las clases (la viga número 18), a pesar de que su momento último llega más allá del momento plástico.

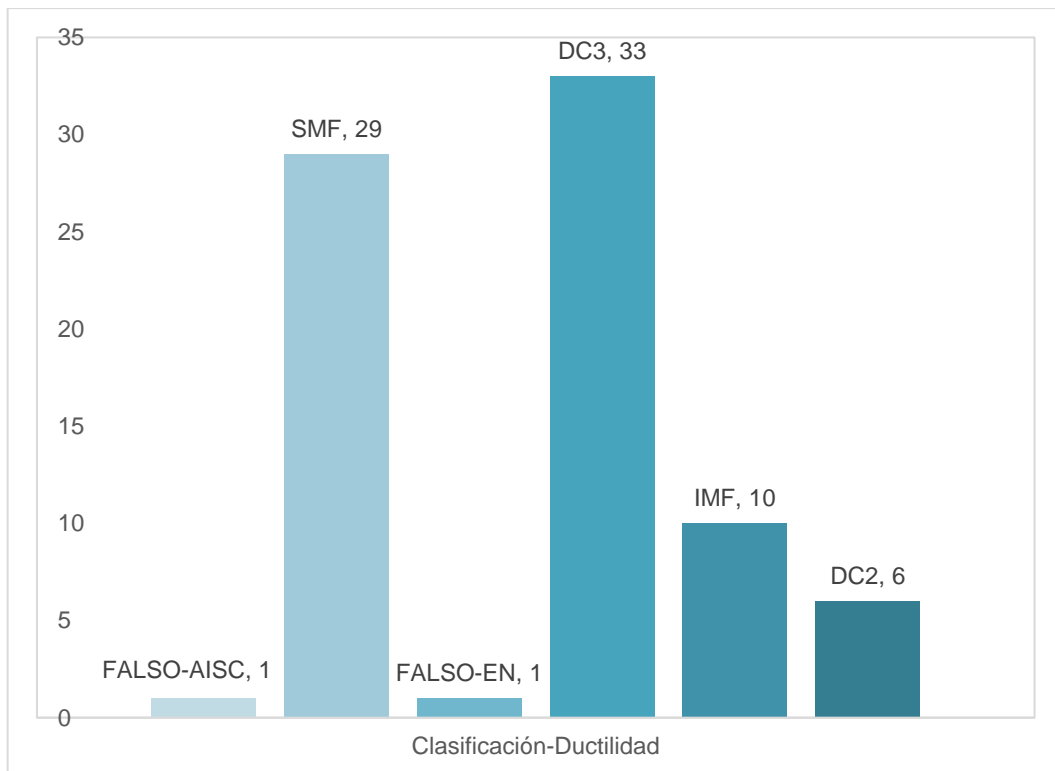


Figura 7.6. Clasificación ductilidad

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este Capítulo presenta las conclusiones en las que se recoge los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto de investigación encontrando así los puntos importantes del análisis del comportamiento del material y del estudio paramétrico para el diseño sismorresistente, y finalmente se proporciona recomendaciones de futuras líneas de investigación.

- 1) El conocimiento y caracterización de las estructuras de acero inoxidable bajo acciones sísmicas es necesario para procurar diseños más efectivos y seguros. En este Trabajo Final de Máster se han propuesto expresiones analíticas que permiten estimar la rotación última y la rotación plástica de secciones transversales austeníticas sometidas a cargas cíclicas, de acuerdo con el marco europeo prEN 1993-1-4 (2021) y prEN 1998-1-2 (2020).
- 2) Las expresiones propuestas se han basado en un estudio numérico de 40 vigas tubulares de sección RHS y SHS sometidas a flexión modelizadas con elementos finitos tipo Shell (ABAQUS, 2014) y analizadas atendiendo a los requerimientos GMNIA (prEN 1994-1-14, 2020).
- 3) La correcta caracterización del comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable bajo cargas cíclicas es fundamental para la validación de los modelos numéricos usados. Es por ello que en este Trabajo se han valorado las distintas modelaciones de material recogidas en la literatura. La comparación de los resultados ha demostrado que se consiguen comportamientos muy realistas con el modelo de material de Ramberg-Osgood con endurecimiento combinado. El protocolo de carga escogido fue el AISC 341 (2005) porque está bien definido y es de fácil aplicación.
- 4) Los resultados numéricos obtenidos se utilizaron para dibujar las curvas “skeleton” que relacionan los momentos con su rotación. A partir de estas skeleton curves se determinaron las rotaciones última y elástica, de acuerdo con la normativa prEN 1998-1-2 (2020), quedando definida la capacidad de rotación plástica como la diferencia entre la rotación última y la elástica. Además, estas rotaciones se clasificaron en función de su ductilidad atendiendo a los criterios propuestos en las normativas europea prEN 1998-1-2 (2020) y americana AISC 341 (2010).
- 5) De acuerdo con las rotaciones numéricas de las 40 vigas, se propusieron expresiones exponenciales en función de la esbeltez local de la sección para estimar las capacidades de rotación plástica y última. Estas expresiones fueron ajustadas para que tuvieran una fiabilidad del 95%.

- 6) A pesar de que algunas de las secciones estudiadas tenían alas clase 4 de acuerdo con prEN 1993-1-4 (2021), todos los momentos últimos numéricos obtenidos fueron superiores a M_{pl} . De hecho, los momentos últimos numéricos alcanzados fueron similares a los M_{csm} . Esto pone de manifiesto la aportación de resistencia de las almas a las alas y la posible conveniencia de una nueva clasificación de secciones cuando estas están sometidas a cargas cíclicas.

8.1 Recomendaciones para Futuras Líneas de Investigación

El presente Trabajo pretende sentar una base para la caracterización de las rótulas plásticas bajo acciones sísmicas. Como línea de investigación inmediata se propone la definición de expresiones analíticas que estimen las rotaciones plásticas en perfiles tubulares ferríticos y dúplex, así como en perfiles de secciones abiertas.

BIBLIOGRAFÍA

- ABAQUS. (2014). *ABAQUS/Standard User's Manual Volumes I-III and ABAQUS CAE Manual*, Dassault Systemes Simulia Corporation. ABAQUS Inc.,.
- Afshan, S., & Gardner, L. (2013). The continuous strength method for structural stainless steel design. *Thin-Walled Structures*, 68, 42–49.
- AISC 341. (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (Including Supplement No. 1). *American Institute of Steel Construction*, 334.
- AISC 341-10 - American Institute of Steel Construction. (2010). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, 1, 402.
- Arrayago, I., Rasmussen, K. J. R., & Real, E. (2017a). Full slenderness range DSM approach for stainless steel hollow cross-section columns and beam-columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 246–263.
- Arrayago, I., Real, E., & Mirambell, E. (2017b). Design of stainless-steel continuous beams with tubular cross-sections. *Engineering Structures*, 151, 422–431.
- Arrayago, I., Real, E., & Gardner, L. (2015). Description of stress-strain curves for stainless steel alloys. *Materials and Design*, 87, 540–552.
- Arrayago, Itsaso, González-de-León, I., Real, E., & Mirambell, E. (2020). Tests on stainless steel frames. Part I: Preliminary tests and experimental set-up. *Thin-Walled Structures*, 157.
- Baddoo, N. R. (2008). Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1199–1206.
- Black, J. T., & Kohser, R. A. (2012). DeGarmo's MATERIALS AND PROCESSES IN MANUFACTURING ELEVENTH EDITION. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). John Wiley & Sons.
- Borja, R. I. (2013). *Plasticity : modeling & computation* (p. 255). California:Springer.
- Chaboche, J. L. (1986). Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of Plasticity*, 2(2), 149.
- Chacón, R. A., de Marco, M. D., Real, E., & Arrayago, I. (2020). An experimental study on the cyclic response of austenitic stainless steel. *Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Steel Structures, ICASS 2018*.
- European Committee for Standardization (CEN). (2006). *EN, 1993-1-4, Eurocode 3:*

Design of Steel Structures — Part 1–4: General Rules — Supplementary Rules for Stainless Steels. Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization (CEN). (2021). *prEN 1993-1-4. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-4: General Rules. Supplementary Rules for Stainless Steels*. Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization (CEN). (2020). *prEN 1993-1-14. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-14: Design assisted by infinite element analysis*, Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization (CEN). (2020). *prEN 1998-1-2. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1-: Rules for new buildings*. Brussels, Belgium.

Fang, C., Zhou, F., & Luo, C. (2018). Cold-formed stainless steel RHSs/SHSs under combined compression and cyclic bending. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 9–22.

Gardner, L., & Nethercot, D. A. (2004). Numerical modeling of stainless steel structural components - A consistent approach. *Journal of Structural Engineering*, 130(10), 1586.

Hill, H. N. (1944). Determination of stress-strain relations from the offset yield strength values, Technical Note No. 927. *National Advisory Committee for Aeronautics*, No. 927.

Li, Z., & Schafer, B. W. (2010). Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: Conventional and constrained finite strip methods. *20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures - Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*, 17.

Mirambell, E., & Real, E. (2000). On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, 54(1), 109.

Nastri, E., & Piluso, V. (2020). The influence of strain-hardening on the ultimate behaviour of aluminium RHS-beams under moment gradient. *Thin-Walled Structures*, 157.

Nip, K. H., Gardner, L., Davies, C. M., & Elghazouli, A. Y. (2010). Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel. *Journal of Constructional Steel*

- Oliver, X., & Agelet de Saracibar, C. (2010). *Mecánica de los medios continuos para ingenieros*. Barcelona: Edicions UPC.
- Ramberg, W., & Osgood, W. R. (1943). Description of stress-strain curves by three parameters. *National Advisory Committee For Aeronautics*, Technical Note No. 902.
- Rasmussen, K. J. R., & Hancock, G. J. (1993). Design of cold-formed stainless steel tubular members. II: Beams. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 119(8), 2368.
- Rasmussen, K. J. R. (2003). Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys. *Journal of Constructional Steel Research*, 59(1), 47.
- Real, E., & Mirambell, E. (2005). Flexural behaviour of stainless steel beams. *Engineering Structures*, 27(10), 1465.
- SCI. (2017). *Design Manual for Structural Stainless Steel Design. Fourth Edition*. SCI Publication No. P413.
- Theofanous, M., & Gardner, L. (2009). Testing and numerical modelling of lean duplex stainless steel hollow section columns. *Engineering Structures*, 31(12), 3047.