



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCION Y ESTRUCTURAS**

TESIS

**ANALISIS POR DESEMPEÑO DE ELEMENTOS DE ACERO
ROLADO EN FRIO DE LÁMINA DELGADA PARA ESTANTERIA
INDUSTRIAL**

PRESENTA

Cinthyá Marlen Soto Zepeda

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL CON ESPECIALIDAD EN
ESTRUCTURAS**

TUTOR

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

COMITÉ TUTORAL

Dr. Luis Alfredo Hernández Castillo

Mtro. Jorge Eudave Muñoz

Aguascalientes, Ags. mayo de 2021

**CARTA DE VOTO APROBATORIO
COMITÉ TUTORAL**

**DR. EN C.T.C. HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA
DECANO (A) DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E**

Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **CINTHYA MARLEN SOTO ZEPEDA** con ID 266180 quien realizó la tesis titulada: **ANALISIS POR DESEMPEÑO DE ELEMENTOS DE ACERO ROLADO EN FRIO DE LAMINA DELGADA PARA ESTANTERIA INDUSTRIAL**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirlo así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 04 de Junio de 2021


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis


Dr. Luis Alfredo Hernández Castillo
Asesor de tesis


M.C. Jorge Eudave Muñoz
Asesor de tesis/trabajo práctico

c.c.p.- Ing. Cinthya Marlen Soto Zepeda – Alumna de la Maestría en Ingeniería Civil con especialidad en Estructuras
c.c.p.- Dr. Martin Hernández Marín - Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 04/06/2021

NOMBRE: CINTHYA MARLEN SOTO ZEPEDA ID 266180

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL LGAC (del posgrado): CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: ANALISIS POR DESEMPEÑO DE ELEMENTOS DE ACERO ROLADO EN FRIO DE LAMINA DELGADA PARA ESTANTERIA INDUSTRIAL

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): CONTRIBUCION ACADEMICA EN EL AREA DE ACERO ROLADO EN FRIO, ANALISIS DE ESTANTERIAS ANTE EVENTOS SISMICOS.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
N.A.	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
El egresado cumple con lo siguiente:	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
N.A.	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.	Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
En caso de Tesis por artículos científicos publicados	
N.A.	Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.	El estudiante es el primer autor
N.A.	El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.	La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí X

No _____

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

DR. MIGUEL ANGEL SOTO ZAMORA

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

DR. MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

DR. ALEJANDRO ACOSTA COLLAZO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

DR. C.T.C. HECTOR HOMERO POSADA ÁVILA

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cumplir la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Agradecimientos

A mi tutor el Dr. José Ángel Ortiz Lozano, por presentarme y conducirme en el camino de la investigación, por considerarme para colaborar en este proyecto y resolver mis dudas.

Agradezco a mis asesores el Dr. Luis Alfredo Hernández Castillo y el Mtro. Jorge Eudave Muñoz que me proporcionaron las recomendaciones oportunas en los momentos indicados, y los colegas que me apoyaron ante el mar de dudas que era al principio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por otorgarme la beca con la que pude realizar mis estudios de maestría y con ello esta tesis.

Agradezco a mis padres, Mirna Zepeda Núñez y Mario Efraín Soto Pérez porque aun en la distancia siempre estuvieron presentes con cada palabra de aliento y amor, confiando en mi capacidad para culminar la investigación.

Agradezco al Mtro. Sergio Ivan Herrada Aguilar por estar presente en cada etapa creativa, por incentivar me a jamás claudicar aun cuando el panorama parecía complicado. Agradezco a lo que sea que me puso en este punto de mi vida y me enseñó que esta bien planear, pero solo hay que fluir ante las circunstancias.

Dedicatorias

A todas las personas que amo, a mi madre, a mi padre, mi hermana, mi hermano y mis sobrinas, gracias por existir.

A mi pareja Sergio Ivan Herrada Aguilar, mil gracias por tu paciencia y amor.

A todas las personas que aún no conozco, pero que me harán crecer como persona.

A Dios y el Universo, para que sigan de mi lado, mientras me toque estar habitando este mundo.





Capítulo 1
Contenido

1.1. Índice

CAPÍTULO 1 CONTENIDO.....	1
1.1. ÍNDICE.....	1
1.2. ÍNDICE DE TABLAS	4
1.3. ÍNDICE DE IMÁGENES	6
1.4. RESUMEN	8
1.5. ABSTRACT	9
CAPÍTULO 2 INTRODUCCIÓN	10
2.1. OBJETIVO.....	11
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	11
2.3. JUSTIFICACIÓN	11
2.4. HIPÓTESIS	12
CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE.....	13
3.1. EL PRINCIPIO DEL USO DE ACERO ROLADO EN FRIO.	14
3.1.1. <i>Acero rolado en frio en estanterías industriales.</i>	14
3.1.2. <i>CUFSM 4</i>	17
3.1.3. <i>Grafica momento curvatura</i>	18
3.2. INGENIERÍA SÍSMICA EN MÉXICO.....	18
CAPÍTULO 4 MARCO TEÓRICO	20
4.1. ACERO ROLADO EN FRIO	21
4.1.1. <i>Elementos rolados en frio</i>	22
4.1.2. <i>Elaborados por presión</i>	23
4.2. <i>Miembros estructurales de armadura individual</i>	24
4.3. CONSIDERACIONES ESPECIALES EN EL DISEÑO DE ACERO ROLADO EN FRIO	25
4.3.1. <i>Pandeo local</i>	25
4.3.2. <i>Rigidez torsional</i>	25
4.3.3. <i>Servicio</i>	25
4.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD, MÓDULO DE TANGENTE Y MÓDULO DE CORTANTE	26
4.4.1. <i>Módulo de elasticidad E</i>	26
4.4.2. <i>Módulo de tangente</i>	26
4.4.3. <i>Módulo de cortante G</i>	26

4.4.4.	<i>Ductilidad</i>	26
4.4.5.	<i>Esfuerzo de fatiga y dureza</i>	27
4.5.	INFLUENCIA DEL TRABAJO EN FRIO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACERO	27
4.5.1.	<i>Esfuerzo residual debido al trabajo en frio</i>	29
CAPÍTULO 5 ELEMENTOS MECÁNICOS Y NORMATIVAS		30
5.1.	ESFUERZO DE ELEMENTOS ESBELTOS.....	31
5.2.	COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS PERFORADOS	31
5.3.	ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO Y PRUEBAS EN ESTANTERÍAS INDUSTRIALES.....	33
5.3.1.	<i>Peso de operación</i>	33
5.3.2.	<i>Fuerzas horizontales</i>	33
5.4.	CARGAS SÍSMICAS.....	34
5.4.1.	<i>Regionalización sísmica</i>	34
5.4.2.	<i>Espectro de diseño sísmico transparente y modificado</i>	36
5.4.3.	<i>Parámetros para la elaboración de espectros regionales.</i>	36
5.4.4.	<i>Caracterización de la respuesta estructural</i>	37
5.4.5.	<i>Factor de amortiguamiento</i>	37
5.4.6.	<i>Factor reductor por ductilidad Q' (T_e, Q)</i>	38
5.4.7.	<i>Fuerzas sísmicas mínimas</i>	38
5.4.8.	<i>Factor de redundancia.</i>	40
5.4.9.	<i>Calculo del coeficiente de respuesta sísmica</i>	40
5.4.10.	<i>Desplazamiento sísmico</i>	41
5.5.	ELEMENTOS MECÁNICOS EN ELEMENTOS DE ACERO ROLADO EN FRIO.	41
5.5.1.	<i>Miembros a compresión</i>	42
5.5.2.	<i>Fluencia y pandeo global</i>	42
5.5.3.	<i>Pandeo local interactuando con fluencia y pandeo global, miembros sin perforaciones para Método Directo de Esfuerzos (DSM)</i>	42
5.5.4.	<i>Pandeo distorsional, miembros sin perforaciones para Método Directo de Esfuerzos (DSM)</i>	43
5.6.	MIEMBROS A FLEXIÓN	43
5.6.1.	<i>Fluencia y pandeo global</i>	44
5.6.2.	<i>Pandeo local interactuando con fluencia y pandeo global</i>	44
5.6.3.	<i>Pandeo distorsional</i>	44
5.7.	CUFSM: CONSTRAINED AND UNCONSTRAINED FINIT STRIP METOD	45
5.7.1.	<i>Análisis por pandeo de una sección transversal</i>	45
5.8.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA GRÁFICA MOMENTO CURVATURA.....	45
5.9.	NIVELES DE DESEMPEÑO.....	47

5.9.1.	<i>Niveles de desempeño estructurales</i>	49
5.9.2.	<i>Objetivos de rehabilitación</i>	50
5.10.	PARÁMETROS DE DISEÑO Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	53
5.10.1.	<i>Elementos primarios</i>	53
5.10.2.	<i>Elementos secundarios</i>	53
CAPÍTULO 6 CAMPAÑA EXPERIMENTAL		55
6.1.	CARACTERIZACIÓN DEL MODELO.....	56
6.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	56
6.3.	CARACTERÍSTICAS DE LAS SECCIONES	57
6.3.1.	<i>Larguero LW 4 ½" Cal 14:</i>	57
6.3.2.	<i>Poste sencillo 121mm Cal 14</i>	60
6.3.3.	<i>Poste doble 121mm Cal 14</i>	62
6.4.	MODELO GEOMÉTRICO EN SAP2000.....	63
6.5.	DISTRIBUCIÓN DE CARGAS	64
6.5.1.	<i>Carga muerta o carga de producto</i>	64
6.5.2.	<i>Carga viva</i>	64
6.5.3.	<i>Carga sísmica</i>	65
6.5.4.	<i>Caracterización del espectro de diseño</i>	65
6.6.	CARACTERIZACIÓN DE LA CURVA MOMENTO ROTACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES 70	
6.7.	CALCULO DE NIVELES DE DESEMPEÑO PARA LAS CURVAS DE MOMENTO ROTACIÓN	72
6.8.	MODELO EN ABAQUS.....	73
6.8.1.	<i>Secciones perforadas</i>	73
6.8.2.	<i>Distribución de cargas en el modelo en ABAQUS</i>	74
6.8.3.	<i>Distribución de los elementos</i>	75
CAPÍTULO 7 RESULTADOS		77
7.	RESULTADOS.....	78
7.1.	<i>Modelo en SAP2000</i>	78
7.2.	<i>Modelo de Abaqus</i>	81
7.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	86
CAPÍTULO 8 CONCLUSIÓN		88
8.1.	CONCLUSIÓN.....	89
REFERENCIAS.....		90

1.2. Índice de tablas

Tabla 1.- Tolerancias especificadas por la asociación de manufactura de construcciones de metal (MBMA) para acero rolado en frio de secciones, aprobado también por el Instituto Canadiense de Construcciones de Lamina (Rack Manufacture Institute, 2008)	22
Tabla 2.- Tabla de fabricación y tolerancias especificadas por MBMA.	23
Tabla 3.- Regionalización sísmica. Fuente: (Comision Federal de Electricidad, 2015).....	35
Tabla 4.- Factor de sitio Fsit.	36
Tabla 5.- Factor de sitio.	37
Tabla 6.- Valores de los periodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendentes de los espectros de diseño. Fuente (Comision Federal de Electricidad, 2015)	37
Tabla 7.- Valores de la variable PRF en función del tipo de estantería.....	40
Tabla 8.- ecuaciones para la obtención de la curva momento rotación para pandeo local y distorsional. Fuente: (Ayhan & Schafer, 2012)	47
Tabla 9.- Clasificación de periodo de retorno aproximado de un sismo en comparación a 50 años (Federal Emergency Management Agency, 1997).....	48
Tabla 10.- Relación de Objetivo básico de seguridad para clasificación de incidencia de sismos.....	49
Tabla 11.- Control de daño y niveles de desempeño de las construcciones (Federal Emergency Management Agency, 1997).....	51
Tabla 12.- Niveles de desempeño estructural y daño para elementos verticales (Federal Emergency Management Agency, 1997).....	52
Tabla 13.- Descripción general de los elementos de la estantería de la campaña experimental.....	56
Tabla 14.- Parámetros espectrales de referencia.....	67
Tabla 15.- Características de la geometría de la estantería industrial.....	68
Tabla 16.- Clasificación de la construcción en referencia con su tamaño y relación con el sector energético o industrial	68

Tabla 17.- Factor de sitio y factor de respuesta correspondiente a Santa María Tonameca

Oax.....68

Tabla 18.- Parámetros para la construcción del espectro de diseño68

Tabla 19.- Valores de comportamiento sísmico de la estructura69

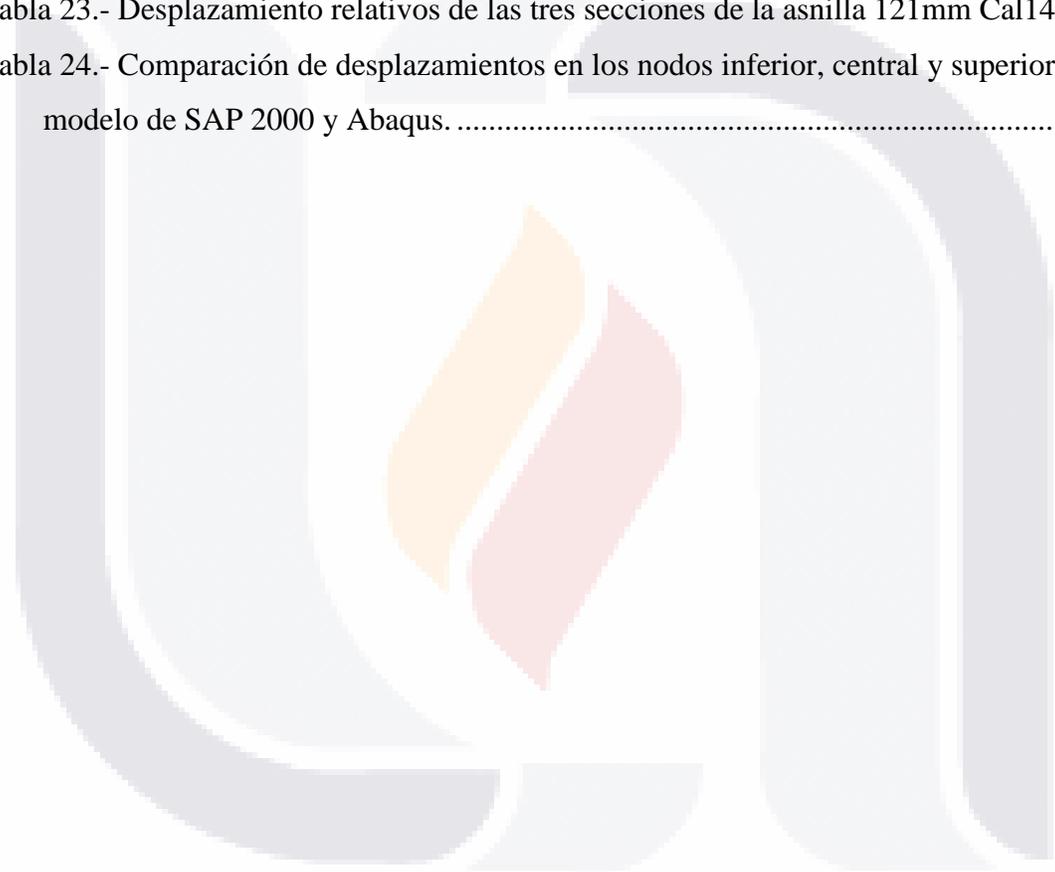
Tabla 20.- Valores de comportamiento sísmico modificado69

Tabla 21.- Resultados de carga lateral en la estructura.....69

Tabla 22.- Cargas aplicadas al modelo en ABAQUS75

Tabla 23.- Desplazamiento relativos de las tres secciones de la asnila 121mm Cal1475

Tabla 24.- Comparación de desplazamientos en los nodos inferior, central y superior en el modelo de SAP 2000 y Abaqus.85



1.3. Índice de imágenes

Imagen 1.- Secciones de acero rolado en frio usadas en marcos estructurales (Yu, 2000) ..	24
Imagen 2.- esfuerzo residual promedio medido longitudinalmente en un canal de acero rolado en frio.....	29
Imagen 3.- Efecto de una perforación circular en el coeficiente de pandeo en compresión.	32
Imagen 4.- Efecto de una perforación cuadrada en el coeficiente de pandeo en compresión.	33
Imagen 5.- Regionalización de las zonas sísmicas en la república Mexicana. Fuente: (Comision Federal de Electricidad, 2015)	35
Imagen 6.- Grafica momento rotación del modelo I propuesto por Ayham y Schafer.....	46
Imagen 7.- Curva momento deformación de la normativa FEMA 356.	54
Imagen 8.- Características mecánicas del acero A60 utilizado en largueros (Datos obtenidos SAP2000).....	56
Imagen 9.- Características mecánicas del acero A55 utilizado en postes y diagonales (Datos obtenidos SAP2000)	57
Imagen 10.- Resultados de las características geométricas de larguero LW	58
Imagen 11.- Propiedades mecánicas de la sección LW.	58
Imagen 12.- Resultados del programa CUFSM de la curva normalizada de pandeo local, distorsional y global para el larguero LW 4 ½” Cal 14	59
Imagen 13.- Resultados de las características geométricas del poste sencillo.....	60
Imagen 14.- Propiedades mecánicas del poste sencillo	60
Imagen 15.- Resultados del programa CUFSM de la curva normalizada de pandeo local, distorsional y global para el poste sencillo de 121mm Cal14.....	61
Imagen 16.- Resultados de las características geométricas del poste doble	62
Imagen 17.- Propiedades mecánicas del poste doble.....	62
Imagen 18.- Resultados del programa CUFSM de la curva normalizada de pandeo local, distorsional y global para el poste sencillo de 121mm Cal14.....	63
Imagen 19.- Distribución de los claros del modelo	64
Imagen 20.- Espectro de respuesta de santa María Tonameca. Fuente: (Comision Federal de Electricidad, 2015).....	65

Imagen 21.- Parámetros para la determinación de fuerzas sísmicas horizontales. (Comision Federal de Electricidad, 2015)66

Imagen 22.- Cálculo de parámetros para curva momento rotación correspondiente a larguero LW de 4 ½” Cal 14.....70

Imagen 23.- Cálculo de parámetros para curva momento rotación correspondiente a poste sencillo de 121mm Cal1471

Imagen 24.- Cálculo de parámetros para curva momento rotación correspondiente a poste doble de 121mm Cal14.....72

Imagen 25.- Poste sencillo de 121mm Cal 14 desarrollado en ABAQUS73

Imagen 26.- Larguero LW 4YM Cal14 desarrollado en ABAQUS74

Imagen 27.- Conexión Estándar de tres perforaciones. Fuente: Abaqus74

Imagen 28.- Sección de la estantería adecuada al programa ABAQUS76

Imagen 29.- Modelo 3D sin deformaciones SAP200078

Imagen 30.- Primeras articulaciones plásticas en colapso para la estantería industrial, plano 2D. Fuente: SAP[®]2000.....79

Imagen 31.- Desplazamiento de las primeras articulaciones de colapso de la estructura. Fuente SAP200080

Imagen 32.- Resultados de cortante, momento y deflexiones para el larguero LW 4 ½” Cal14. Fuente: SAP2000.....80

Imagen 33.- Sección deformada. Fuente Abaqus81

Imagen 34.- Magnitud de los desplazamientos en la estantería modelo. Fuente: Abaqus ...82

Imagen 35.- Desplazamientos de asilla 12mm en el sentido Z del modelo. Fuente: Abaqus82

Imagen 36.- Resultados de desplazamientos en Largueros LW de 4 ½” Cal1483

Imagen 37.- Primer plastificación en el sistema de estantería, presentado en la asnilla de 121mm Cal14. Fuente: Abaqus.84

Imagen 38.- Desplazamientos al primer punto de fluencia de la sección 121mm Cal14. Fuente Abaqus84

Imagen 39.- Deflexión al primer punto de fluencia del sistema del larguero LW 4 1/2” Cal14. Fuente Abaqus.....85

1.4. Resumen

Las estanterías industriales son una parte esencial en toda empresa, pues gracias a la amplia gama de diseños disponible en el mercado, permite el almacenamiento práctico de grandes cantidades de productos.

Aunque parece que son elementos secundarios en cualquier construcción, sin duda juegan un papel importante cuando de daños provocados por eventos sísmicos se trata, un ejemplo de esto es cuando las estructuras principales soportan lo suficiente como para salvaguardar la vida de los ocupantes del edificio, pero en su interior, el colapso inminente de las estanterías causaba varias personas heridas. Es así que surgió la necesidad de implementar la mejora continua del diseño de las estructuras de estantería.

En apariencia, los racks son estructuras sencillas que no requieren de mucho mantenimiento, pero detrás de cada estantería se encuentra un arduo trabajo de cálculo para cumplir con los estándares de seguridad implementados por el Rack Manufacture Institute.

En un inicio, los cálculos que fueron creados para las grandes estructuras, adaptaron a las estanterías, pero su comportamiento dista mucho de este tipo de edificios, así que se implementó el elemento finito, la franja finita y recientemente análisis Push-over que encontramos en las normativas Americanas.

El análisis por desempeño es un método relativamente nuevo cuya base se encuentra sustentada en la normativa declarada por la Agencia Federal para el Manejo de las emergencias en su capítulo 273, 356 y 460 (FEMA). Dicha norma incluye los tres niveles principales de servicio: ocupación inmediata, salvaguardar la vida y prevención de colapso.

Implementar este tipo de análisis en las estanterías industriales, pretende ampliar el panorama del comportamiento de los elementos bajo cargas sísmicas, y de esta manera complementar el conocimiento que ya ha sido generado por la comunidad científica, proporcionando resultados aún más exactos del momento en que los rack comienzan a fallar en función de las propiedades mecánicas de sus secciones, y el contenido del mismo.

1.5. Abstract

Industrial rack is an essential part of any company, especially where the requirement is allows the practical storage of large quantities of products.

Although it are secondary elements in any construction, they play an important role on seismic risk damage. the main structures support enough to safeguard the lives of the building occupants, but inside, the imminent collapse of the racks could cause several hurts for the occupants. This is the principal reason about the continuous improvement in the design of racking structures.

The racks are simple structures that do not require much maintenance, but this point of performance is a consequence of investigation managed by Rack Manufacture Institute.

The first calculations that were created for large structures, whit the time were adapte to the racks, but the behavior was different on this type of buildings. Then was necessary apply the finite element, the finite strip and recently Push-over analysis, all of them can to find in the American standards

The performance analysis is a relatively recent method based on the regulations declared by the Federal Emergency Management Agency in its chapter 273, 356 and 460 (FEMA). This regulation includes the three main levels of service: immediate occupancy, safeguarding life and collapse prevention.

Implementing this type of analysis in industrial racks, could open the panorama of the behavior of the elements under seismic loads, and complement the knowledge that has already been generated by the scientific community, providing even more accurate results of the moment in which the racks fail in funtion of mechanical properties of their sections, and the contents of the same.



Capítulo 2

Introducción

Los estantes para uso industrial mejor conocidos como racks, han sido utilizados desde principios de la década de los 60', sin embargo no fue hasta 1964 cuando RMI publicó "Estándares Mínimos En Ingeniería Para Estantería Industrial" documento en el cual se indagaba más en el procedimiento de instalación y uso de los racks. (Rack manufacturers Institut RMI, 2008).

La evolución de estos elementos ha sido rápida desde su creación debido a los constantes cambios de exigencia y demanda de seguridad de las empresas. En la actualidad, después de ajustes por parte de estudiosos interesados en el tema, se tiene vigente la normativa RIM 2012, la cual es una síntesis de la normativa ASCE 7-16 y AISI Standar 16, en donde se describe el comportamiento de secciones de acero rolado en frío.

El análisis Push-over aplicado a las estanterías ha proporcionado un parámetro de referencia del comportamiento de las mismas, pero con los años se hizo posible incluir cada vez más parámetros de referencia en estos elementos tan impredecibles, si se implementa el análisis por desempeño dentro de estas nuevas variables, los resultados serán más fidedignos a la realidad.

2.1. Objetivo

Evaluar el desempeño estructural de una estantería industrial de varios niveles ante cargas sísmicas.

2.2. Objetivo específico

Analizar por medio de un análisis estático no lineal el comportamiento mecánico de las secciones de acero rolado en frío colocadas en una estantería industrial al aplicar fuerzas laterales semejantes a las de un sismo, con el fin de verificar su desempeño conforme a la normativa FEMA 356

2.3. Justificación

Determinar el nivel de seguridad de estructuras en presencia de un sismo, ha sido ampliamente explorado en edificios de acero y concreto, justamente la mayoría de las normativas americanas tiene parámetros bien definidos sobre las curvas momento-rotación, por tratarse de secciones de geometría común o simple.

En el caso de las estanterías industriales las secciones de sus elementos son complejas, y el comportamiento del acero sometido a esfuerzos sin presencia de calor para su

elaboración, da paso a esfuerzos residuales que dependen de la forma del elemento, lo cual es difícil de determinar en comparación a otros materiales como el acero forjado en caliente y el concreto.

En resumen, es importante abrir aún más el campo de investigación del acero rolado en frío, especialmente para estructuras cuya geometría es compleja, pero ampliamente utilizada en el mercado, de esta manera, el usuario podrá tener una garantía de que un rack verificado con este método se comportara conforme a lo proyectado, a pesar de ser estructuras secundarias en las construcciones, ignorarlas podrían suponer daños humanos y económicos.

2.4. Hipótesis

Implementar el análisis por desempeño en una estantería cuyo material principal es el acero rolado en frío, permitirá observar su comportamiento en función a las propiedades mecánicas del material, las cargas de producto aplicadas y la magnitud de la carga sísmica horizontal, teniendo como principal parámetro de medición el desplazamiento en el cual la estructura deja de estar en servicio.



Capítulo 3

Estado del arte

3.1. El principio del uso de acero rolado en frio.

Cuando se habla de construcciones de acero, se da por hecho que se trata de acero forjado, sin embargo en los últimos años el acero rolado en frio está cada vez más presente en las construcciones, sobre todo las del ámbito industrial, es así que este último material requiere que se amplíe el campo de investigación.

En el año de 1850 se comenzó la utilización de elementos rolados en frio, sin embargo, no fue hasta 1940 que fue reconocido en algunas de las construcciones de Estados Unidos y Gran Bretaña. La implementación de este tipo de elementos se debió a las múltiples ventajas que significa usarlos, entre ellas la optimización del tiempo de ejecución de obra, la maquinaria ligera que se utiliza en su fabricación y lo económico que resulta en comparación de las piezas formadas en caliente, por mencionar algunas.

En el año de 1946 la normativa ‘especificaciones para el diseño de miembros estructurales de acero rolado en frio’ respaldada por el Instituto americano de Hierro y Acero (AISI por sus siglas en inglés) fue el parte aguas para acelerar la implementación de los elementos rolados en frio en las construcciones, dicha normativa no hubiera sido posible sin los datos obtenidos por el investigador George Winter realizados en 1939 con el apoyo de la Universidad de Cornell.

3.1.1. Acero rolado en frio en estanterías industriales.

A pesar de que los elementos rolados en frio llevaban estudiándose desde años atrás, las estanterías surgieron de manera formal en la década de los 60’ ya que, hasta esa fecha, únicamente se tenían conocimientos empíricos para la implementación de estos elementos en las construcciones y accesorios de almacenamiento, es por eso que en 1964 se dio a conocer la primera normativa llamada ‘Minimum Engineering Estándar for Industrial Storage Racks’ desarrollada por el Rack Manufacture Institute en Estados Unidos. En ella se presentaron las primeras especificaciones para las estanterías más comunes de la época.

Así comenzó una ventana de oportunidad en el sector industrial, en donde gracias a la demanda del mercado, el RMI se vio obligado a actualizar su información a la par de los avances de materiales y combinaciones de los elementos que habían aparecido.

George Winter con la colaboración de Teomas Pekoz también investigador de la Universidad de Cornell realizaron varias actualizaciones de esta normativa, una de las más

importantes fue en 1971, tenía por nombre ‘Interim Specification for Design, Testing and Utilization Of Industrial Steel Storage Racks’ que fue oficialmente publicada en el año de 1972 por el RMI, y aceptada en 1974 por American National Standar. Posteriores actualizaciones de 1979 y 1985 fueron con el respaldo de este último organismo.

Las previsiones para el pandeo flexo-torsional fueron agregadas para la especificación de 1968 de AISI por los investigadores Winter, Chajes, Fang, y Pekoz con sede en la Universidad de Cornell.

Este enfoque consiste en seguir una serie de pasos para diseñar miembros bajo cargas axiales de compresión:

1. Calculo del esfuerzo de pandeo elástico de columna (flexión, torsional, o flexo-torsional) para el área de la sección sin reducir.
2. Determinación del esfuerzo de falla nominal (pandeo elástico, pandeo inelástico o flexibilidad)
3. Calculo la carga nominal de columna basado en el esfuerzo de falla gobernante y el área efectiva
4. Determinación de la carga de diseño desde la carga nominal de columna usando la especificación de factor de seguridad para ASD o factor de resistencia LRFD.

El factor de seguridad ASD se refiere a Diseño por Esfuerzos Permisibles, dicho método tiene más de 100 años de aplicación; en él se pretende conseguir que los esfuerzos unitarios actuantes reales en los miembros estructurales sean menores que los esfuerzos unitarios permisibles, aconsejados por el reglamento de Approved American National Standar. (Universidad de Piura, 2019)

LRFD se refiere al Diseño por Factores de Carga y Resistencia o Estados Limite. En esta metodología se denomina “estado límite” aquella condición de la estructura en la cual deja de cumplir su función estructural (Universidad de Piura, 2019)

Entre 1990 y 1997 RMI, Specification Advisory Committe y Sismology Committe en contribución con el Profesor Pekoz se dedicaron a hacer una investigación profunda acerca del comportamiento de las estanterías en presencia del fenómeno sísmico, dando como resultado a la actualización de 1997. Esta última se mantuvo vigente hasta las posteriores actualizaciones correspondientes a los años de 1999, 2002, 2004 y 2008.

Por otro lado, en Europa tenían sus propias ideas acerca de las estanterías industriales así que buscaron aportar a este campo. En el tercer congreso regional del pacifico celebrado en Nueva Zelanda de 1983, el investigador B.J Brown presentó una exposición acerca del diseño sísmico en sistemas de estanterías, donde tomo las siguientes situaciones:

- El comportamiento de las estanterías está estrechamente ligado a los niveles verticales
- El acero rolado en frio en presencia de ondas sísmicas y bajas temperaturas es propenso a rupturas y colapsos de los racks debido al cambio en el punto de fluencia, el esfuerzo de tensión y módulo de elasticidad del material.
- La existencia de pocos reportes de la experiencia de las estanterías en los sismos.

En un intento por solucionar dichas problemáticas, se propuso un método experimental de diseño basado en el código de construcción de Nueva Zelanda donde implementa un análisis considerando cargas sísmicas uniformes moderadas y rangos de carga en diferentes niveles de la estantería. Brown fue el único que incluyo el factor del clima como algo poco favorable en los elementos de las estructuras.

En el año 2002 Andrew T Sarawit y Teoman Pekoz en un congreso presentado en Orlando Florida hablaron sobre las normativas del RMI en donde proponen una ecuación de base fija. En ella explica que el comportamiento de las estanterías depende cuatro factores:

- La localización de los elementos verticales
- Las nuevas conexiones entre vigas y columnas
- El pandeo de las piezas perforadas se puede predecir utilizando las propiedades de carga de las secciones
- El factor de ampliación del momento.

Después de someter cargas laterales diferentes combinaciones de longitud y esbeltez de los elementos de las estanterías, se concluyó que con base a la ecuación de base fija, es posible predecir el momento torsional, así como el pandeo local y global de los elementos de las estanterías teniendo como datos el tipo de perfil, su longitud y espesor.

Por otro lado, las publicaciones en revistas científicas han sido testigos de los últimos avances en el análisis de estantería, un ejemplo de ello es el artículo de Tho Le Duc, Rene

B.M. De Koster y Yugang Yu publicado en el año 2006 llamado optimización del diseño de estantería por compactación tridimensional AS/RS. En este estudio los autores proponen un sistema de marcos automatizados que toman en cuenta los movimientos en dirección vertical y horizontal, con el fin de estimar los ciclos de onda y el radio óptimo en las tres dimensiones del marco con el objetivo de mejorar la respuesta de la estantería a los estímulos inducidos.

Otra de las publicaciones destacadas sucedió en el año 2012 por el grupo de investigadores de la Universidad de Tenaga. En este proyecto expresan la preocupación por el colapso progresivo de las de estructuras sujetas a cargas sísmicas, y la necesidad de un análisis para tener un panorama más amplio de su comportamiento.

Sreedhar Kalavagunta, Sivakumar Naganathan, y Kamal Nasharuddin implementaron el análisis Push-over en las estanterías industriales, este es un procedimiento estático no lineal en el cual la magnitud de la carga estructural se incrementa en función a un modelo predefinido con el objetivo de conocer las situaciones en las que un rack puede funcionar de manera óptima.

El resultado se reflejó en la determinación de las curvas de capacidad contra la gráfica de desplazamientos las cuales indican cargas de colapso desde 29.9 N con desplazamientos de 10.81 pulgadas. Fue de esta manera en que aportaron una ventana más en los múltiples trabajos con un análisis estático no lineal. (Kalavagunta Sreedhar, 2012)

Más tarde, en el año 2016 Andrei Crisan y Adrian Ioan Dogariu publicaron una propuesta de análisis de los materiales utilizado en la estantería industrial con base a la normativa europea EN19931-3. Al usar una serie de modelos numéricos determinaron que, considerando las propiedades geométricas de las columnas cortas, el efecto de estrés residual es despreciable.

“En el caso de elementos largos el esfuerzo ocasionado por el pandeo global... el efecto residual también se considera despreciable.” (Andrei & Adrian , 2017)

3.1.2. CUFSM 4

Ben Schafer fue el creador de este programa relativamente reciente. Fue para el año de 1994 que se encontraba en desarrollo de su tesis de maestría, que decidió retomar el trabajo de Greg Hancock de la Universidad de Sidney a cerca de la solución rápida del pandeo elástico de sección transversal usando el método de la tira finita, con el objetivo de

implementar una interface agradable al usuario en comparación a los programas que en ese año ya estaban realizados en Matlab.

La investigación dio como resultado el programa CUFSM llamado así por sus siglas en inglés Constrained and Unconstrained Finite Strip Method, en su primera versión.

El uso de esta herramienta en la actualidad permite conocer los elementos mecánicos de cualquier sección de acero rolado en frío enfocadas en el pandeo local, distorsional y global de las piezas.

3.1.3. Grafica momento curvatura.

La gráfica Momento- Curvatura proporciona puntos internos de momento resistente y la curvatura correspondiente a la deformación específica. Los puntos más importantes de la gráfica, son aquellos donde los materiales del elemento fallan o fluyen. (Delma & Almada, 2016)

Es común encontrar procedimientos para el cálculo de este tipo de curvas bien definidos en las normativas de concreto ACI o de acero ASCE, sin embargo, para el acero rolado en frío, la información acerca de la elaboración de un modelo de curvas es reciente.

En abril de 2012 D.Ayhan y B.W Schafer presentaron “Caracterización De La Curva Momento Rotación Para Vigas De Acero Rolado En Frío” donde se plantea una metodología específica para obtener las curvas momento rotación de un elemento, bajo cargas que pueden producir pandeo local o distorsional.

El argumento principal de su investigación, aborda la predicción del nivel de esfuerzo de los miembros ante cargas dinámicas, debido a la alta sensibilidad a la esbeltez de estos elementos. (Ayhan & Schafer, 2012)

3.2. Ingeniería Sísmica en México

Una estructura compleja, es sencillas de generar si su destino es una entidad cuyo riesgo sísmico es bajo, sin embargo, si ese mismo modelo desea implementarse en zonas de alto riesgo sísmico, cambia por completo el diseño y la sección de los elementos, lo que repercute en el directamente en el desempeño de la estructura.

En México, se ha estudiado durante años la manera de garantizar un desempeño óptimo de las estructuras después de un sismo, debido a que una gran parte de su territorio se encuentra muy cerca de zonas de riesgo. Fue así que la Universidad Nacional Autónoma

de México (UNAM) comenzó a generar “Series del Instituto de Ingeniería” en donde uno de los temas principales era el cálculo de las fuerzas sísmicas que actuaban en los edificios, información expuesta en el año de 1992.

Posteriormente la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el año de 2015 publicó el Manual de Diseño de Obras Civiles enfocado a sismos, en donde ofrece una explicación clara del comportamiento de las estructuras considerando las características del sitio donde estaría la construcción, sus características geométricas, y el peso de sus elementos.

Junto con lo anterior, CFE creó el programa PRODISIS, el cual es un software diseñado por ingenieros capaz de obtener el espectro transparente general de cualquier zona de la república Mexicana, al cual posteriormente el usuario puede modificar con los datos de un modelo en particular. Así mismo, si se decide hacer un análisis estático o espectro de diseño por cuenta propia, PRODISIS sirve como apoyo.



Capítulo 4

Marco teórico

La necesidad por parte de los investigadores de determinar el límite de trabajo ante cargas estáticas y dinámicas del acero rolado en frío tiene la finalidad de abrir una brecha a estructuras ligeras, cuya capacidad de carga cubra los requerimientos de seguridad, y su relación costo beneficio sea positiva para el usuario.

La principal diferencia en el uso de acero estructural en comparación al concreto es la ligereza de los elementos, esto lo vuelve óptimo para la construcción de edificios de gran altura cuando se busca tener elementos arquitectónicos esbeltos, pero con gran capacidad de carga. Sin embargo, dentro del acero se tiene dos familias, cuyo uso depende de las necesidades del proyecto:

- El acero rolado en caliente
- El acero rolado en frío

4.1. Acero rolado en frío

El acero rolado en frío es aquel cuyo proceso de fabricación se realiza sin presencia de calor, en donde intervienen métodos mecánicos para su formación. Son estructuras que requieren ser ligeras, tales como torres de transmisión, puentes y naves industriales. Sus usos pueden ir desde cubiertas y muros, hasta elementos estructurales complejos. En este último aspecto, por ser un material relativamente nuevo (normalizado por el American Iron Steel Institute desde 1940) aún queda mucho campo por explorar. (Yu, 2000)

Utilizar este material en sus edificaciones representa varias ventajas:

1. Las secciones de forma geométrica inusual son económicas de fabricar, y su proceso en frío aporta una relación de esfuerzo-peso favorable, favorece la construcción de claros largos de alta resistencia y esbeltez.
2. Fáciles de producir y de transportar, es posible su fabricación en masa.
3. Los paneles de carga brindan superficies para cargar instalaciones de instalación fácil y rápida.
4. Puede actuar como diafragmas para rigidizar los paneles si se realiza una combinación de conexiones adecuadas, ya que no tiene contracciones progresivas ante el medio ambiente.
5. Son piezas de diseño uniforme

En cuanto al tipo de manufacturación de este tipo de perfiles existen tres métodos, de los cuales los dos primeros son los más utilizados:

- Rolados en frío
- Operación por prensa
- Operación de flexión

4.1.1. Elementos rolados en frío

Es factible fabricar in situ, si así se requiere. Es posible hacer secciones de tiras de hasta 36” de ancho, y es necesario que se realice con rollos de más de 3000’ de longitud (915m) para considerar que resulta económico este tipo de manufacturación.

Existen varios tipos de maquinaria en el mercado para la fabricación de este tipo de elementos, todas funcionan con un mecanismo similar que consta de un par de rodillos que progresivamente convierten las tiras de acero en el perfil requerido, y según sea la complejidad de la geometría es posible fabricar láminas hasta con 6 pares de rodillos.

Como resultado, se obtienen elementos cuyo grosor de sección estándar es de 19mm, y cuyo rango generalmente puede variar entre 0.20mm a 7.60mm.

A continuación se presentan algunas de las características estándar que deben seguir los procesos de fabricación de acero rolado en frío según el Rack Manufacture Institute.

Pieza larga, usando cortadora automática	$\pm \frac{1}{64} a \frac{1}{8} in (0.40mm a 3.20mm)$
Rectitud y giro	$\frac{1}{64} a \frac{1}{4} in. (0.40mm a 6.40mm) y 10ft (3m)$
Dimensiones de sección transversal	
fraccional	$\pm \frac{1}{64} a \frac{1}{16} in. (0.40mm a 1.60mm)$
Decimal	$\pm 0.005 a 0.15 in. (0.10mm a 0.40mm)$
Ángulos	$\pm 1^\circ a 2^\circ$

Tabla 1.- Tolerancias especificadas por la asociación de manufactura de construcciones de metal (MBMA) para acero rolado en frío de secciones, aprobado también por el Instituto Canadiense de Construcciones de Lamina (Rack Manufacture Institute, 2008)

Dentro de este tipo de tolerancias es necesario considerar que debe ser aplicable a las medidas de la sección, el tipo de producto y la esbeltez de material base.

4.1.2. Elaborados por presión

El equipo utilizado en este tipo de elementos consiste en mover una viga superior y una cama baja estacionaria en la cual se montan los moldes aplicables a una sección en particular. Este tipo de fabricación debe cumplir ciertas características:

- La sección es de una configuración simple
- La cantidad requerida es menor que 91.50 metros por minuto
- La sección para ser producida es relativamente extensa

Dimensión	Tolerancias (in)	
	+	-
Geometría		
Dimensión	3/16	3/16
B	3/16	3/16
d	3/8	1/8
θ1	3°	3°
θ2	5°	5°
Localización total		
E1	1/8	1/8
E2	1/8	1/8
E3	1/8	1/8
S1	1/16	1/16
S2	1/16	1/16
F	1/8	1/8
P	1/8	1/8
L	1/8	1/8
Sección C	$\frac{1}{4} \left(\frac{L ft}{10} \right), in$	
Esbeltez mínima t	0.95 x diseño t	
Se considera 1 in como 254mm		

Tabla 2.- Tabla de fabricación y tolerancias especificadas por MBMA.

4.2. Miembros estructurales de armadura individual

La mayoría de las secciones utilizadas son de dominio comercial, la sección C, Z, I, T y miembros tubulares son algunos de los elementos presentes en varias de las construcciones de américa, y sus dimensiones y geometría varían de acuerdo a las necesidades de los proyectos, algunas de las características de este tipo de perfiles son:

- Ancho: 2"-12" (18" dependiendo de proveedor)
- Grosor: 0.048" a 0.25" (hasta 0.5" dependiendo de proveedor)
- Para placas espesor de $\frac{3}{4}$ " hasta 1"

A continuación, se presentan los perfiles comúnmente utilizados en la industria.

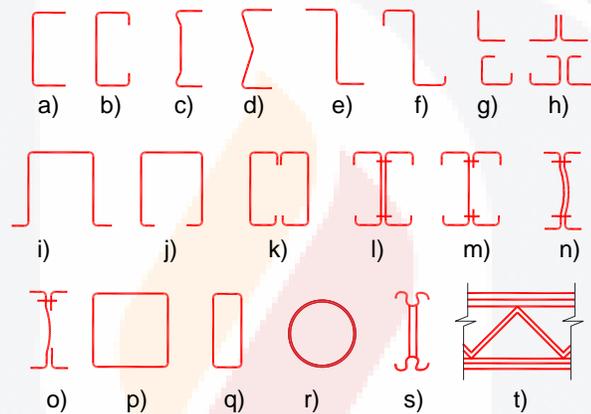


Imagen 1.- Secciones de acero rolado en frío usadas en marcos estructurales (Yu, 2000)

Los ingenieros estructuralistas buscan adaptar sus diseños a este tipo de secciones debido a su disponibilidad, sin embargo, cuando de estantería industrial se habla, las necesidades van más allá de aquellas que puede cubrir este tipo de elementos, de esta manera dependiendo del proveedor del material, es posible encontrar secciones de geometría diferente.

4.3. Consideraciones especiales en el diseño de acero rolado en frio

Para el acero rolado en frio, los principales estados límite son:

- Fluencia del material
- Pandeo
- Pandeo post-esfuerzo
- Cortante retardado
- Endurecimiento en el alma
- Deflexión excesiva

4.3.1. Pandeo local

Al ser elementos que se consideran esbeltos por la relación entre su sección y su longitud, este tipo de perfiles tienden al pandeo antes que a la fluencia del material si son sometidos a carga axial, o cargas laterales. La inestabilidad se muestra como una abolladura hacia el interior del tubo (Hernández Figueirido, 2012) y resulta ser la consideración más grande de diseño.

El hecho de que un elemento este sometido a esfuerzos de pandeo local, no indica que inevitablemente se presentara una falla, este quizá seguirá soportando el incremento de carga hasta que llegue un punto en que el pandeo local aparezca. (Yu, 2000)

4.3.2. Rigidez torsional

Debido a la geometría y la esbeltez de las secciones de acero rolado en frio, se consideran elementos débiles ante la rigidez torsional. Esto es debido a que su centroide y su eje de cortante no suelen coincidir, en ese caso el pandeo flexo-torsional es un factor crítico para los elementos expuestos a compresión. Una vez que esto suceda el centroide de la sección se encontrara fuera de la sección de perfil y este comenzara a rotar.

4.3.3. Servicio

Se refiere a las condiciones de servicio en las cuales la estructura no puede tener un desempeño mayor al que fue destinado. Las consideraciones de esfuerzo usualmente no son afectadas por los límites de estado de servicio.

Las condiciones requeridas por los estados límites de servicio según AISI:

- Deflexiones excesivas o rotaciones las cuales afectan la apariencia o la funcionalidad de la estructura y las deflexiones que causen daño a elementos no estructurales.
- Vibraciones excesivas que puedan causar incomodidades de los ocupantes o malfuncionamiento de los equipos
- Deterioro a través del tiempo, incluye corrosión o temas de apariencia.

4.4. Módulo de elasticidad, módulo de tangente y módulo de cortante

4.4.1. Módulo de elasticidad E

Se define como la pendiente inicial de la porción de la curva esfuerzo-tensión. El valor común de E es de 29500 ksi en nuevas secciones, un valor ligeramente mayor al de perfiles comerciales, que es de 29000 ksi

4.4.2. Módulo de tangente

Definido como la pendiente de la curva esfuerzo-tensión en cualquier punto.

Cuando el esfuerzo excede el límite de elasticidad, el módulo de tangente comienza ser progresivamente más pequeño, siguiendo los lineamientos establecidos en la normativa AISI del 2008.

4.4.3. Módulo de cortante G

Se define como el radio entre el esfuerzo cortante y su valor se encuentra desde 11300 ksi según AISI

4.4.4. Ductilidad

Es definido como “la capacidad de mantener deformación elástica de un material sin romperse”. La ductilidad requerida en elementos estructurales de acero rolado en frio depende mayormente del tipo de aplicación y del material, así mismo se puede dividir en dos tipos:

Ductilidad local: es la elongación localizada de la zona fracturada eventualmente

Ductilidad uniforme: es la habilidad de un elemento a tensión de someterse a deformaciones plásticas medibles a lo largo del cuerpo

Es común obtener el valor de ductilidad por medio de pruebas de laboratorio tales como:

- Pruebas de tensión
- Pruebas de flexión

- Pruebas de corte

Con estas pruebas se debe de considerar parámetros de elongación mínima en perfiles comerciales de 3" a 1" y puede variar de esta de 10 al 30%.

4.4.5. Esfuerzo de fatiga y dureza

El esfuerzo de fatiga es importante para los elementos estructurales sujetos a cargas vibratorias, cíclicas o repetitivas. La propiedad básica de fatiga es en general, la relación de esfuerzos de tensión-fatiga están entre 0.35 y 0.60 para especímenes planos, sin embargo, el esfuerzo de fatiga actualmente está gobernado por el tipo de conexiones.

La dureza es el grado en el cual el acero absorbe energía sin fracturarse, se expresa como la energía absorbida por el espécimen cortado en una prueba de impacto, o como el área bajo el diagrama esfuerzo-cortante. (Yu, 2000)

4.5. Influencia del trabajo en frío en las propiedades mecánicas de acero

Las propiedades mecánicas depende mucho de la forma del elemento, esto es debido a que la operación de rolado en frío incrementa el límite de elasticidad y esfuerzo de tensión al mismo tiempo que decrece la ductilidad. Es por eso que el pandeo o flexibilidad siempre comienza en el límite de elasticidad de la pieza o la porción plana del material.

El efecto del trabajo en frío en las propiedades mecánicas de ángulos depende de:

- El tipo de acero
- El tipo de esfuerzo (compresión o tensión)
- La dirección del esfuerzo con respecto a la dirección del trabajo en frío (transversal o longitudinal)
- El radio F_u/F_y
- La relación interior de radio y esbeltez (R/t)
- La cantidad de trabajo en frío

Aquellos materiales que posean una relación F_u/F_y grande tienden a tener un endurecimiento por deformación, por lo tanto, incrementa su límite de elasticidad.

Una relación pequeña del radio R/t corresponde a una degradación grande en el ángulo formado en frío y por lo tanto para un material dado el radio más pequeño tiende a alargar el incremento del límite de elasticidad, donde tenemos que (Yu, 2000):

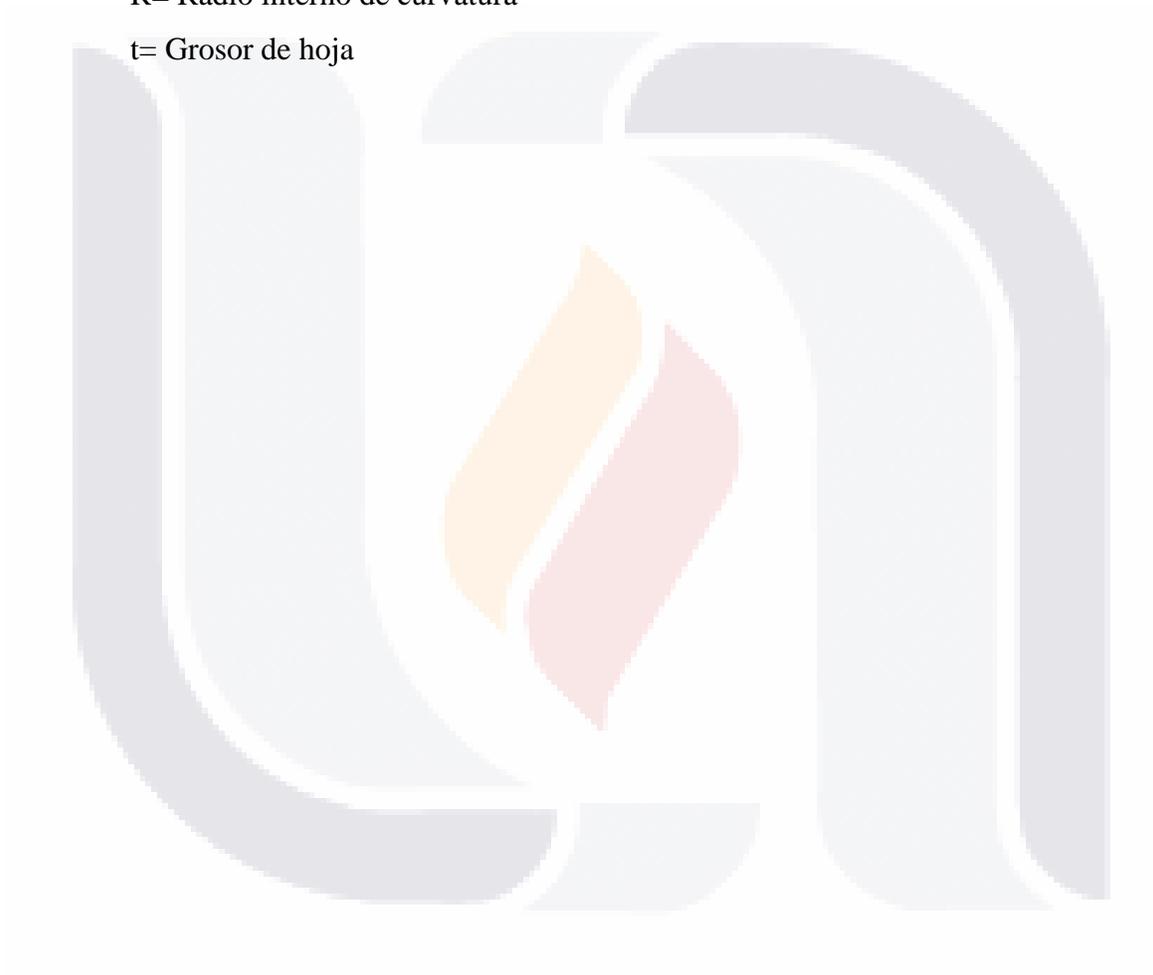
F_{yc} = Limite elástico

F_y = Limite elástico puro

F_u = Resistencia ultima a la tracción pura

R = Radio interno de curvatura

t = Grosor de hoja



4.5.1. Esfuerzo residual debido al trabajo en frío

Este efecto se presenta como consecuencia del enfriamiento residual después del rolado o soldadura del material. Generalmente se asume que este esfuerzo se distribuye de manera uniforme a través del grosor del elemento, sin embargo, la forma final del elemento, influye en la distribución de dichos esfuerzos.

Una pieza presentara en las porciones que han sufrido alguna curvatura, una acumulación de esfuerzos, conocido como esfuerzos residuales. Este tipo de fenómenos causan que el elemento fluya de manera prematura, y en consecuencia se reduce considerablemente su rigidez.

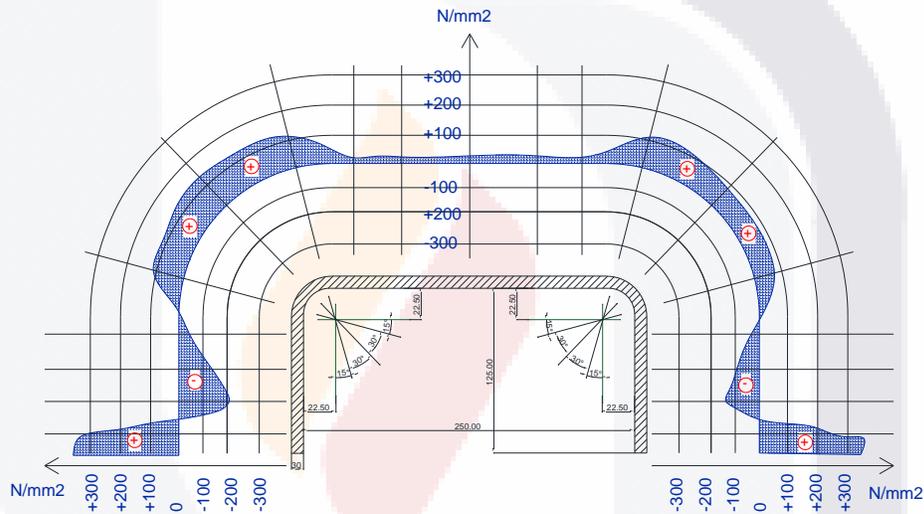
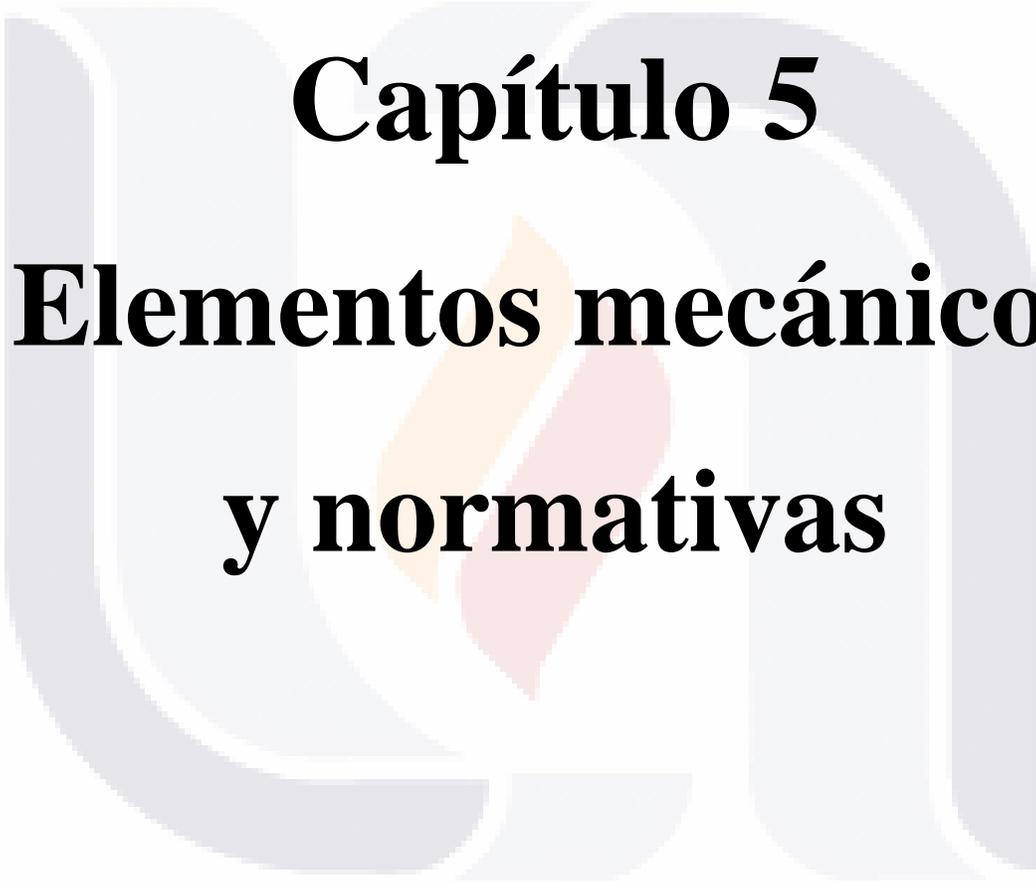


Imagen 2.- esfuerzo residual promedio medido longitudinalmente en un canal de acero rolado en frío.

En la imagen anterior se puede observar como el trabajo en frío influye en el comportamiento mecánico de las secciones, especialmente en la curvatura realizada en el material virgen. Su distribución es simétrica en función de la forma del material.



Capítulo 5

Elementos mecánicos y normativas

5.1. Esfuerzo de elementos esbeltos.

Los elementos rolados en frío son esbeltos con una relación longitud-espesor grande, razón por la que una falla debida al pandeo local a un esfuerzo considerablemente menor que el punto de fluencia del acero es posible, es necesario determinar cargas de diseño especialmente para proveer un nivel de seguridad adecuado ante una falla de este tipo.

Una placa bidimensional comprimida bajo diferentes condiciones de eje no fallara como un miembro unidimensional (una columna) cuando el esfuerzo teórico de pandeo local crítico se alcanza. La placa continuara cargando adicionalmente por medio de la redistribución del esfuerzo a los elementos a compresión después de que el pandeo local ocurra. Este fenómeno es mejor conocido como esfuerzo post-pandeo de placas, suele ser más grande que el esfuerzo determinado por esfuerzo critico de pandeo teórico. Dicha condición es importante considerarla en elementos muy esbeltos. (Yu, 2000)

5.2. Comportamiento estructural de elementos perforados

Las perforaciones en secciones de acero rolado en frío tienen como objetivo facilitar la colocación de ductos, pipas u otros propósitos propios de la construcción. Un ejemplo son las estanterías industriales, su configuración permite el ensamblaje rápido.

La presencia de múltiples perforaciones a lo largo de los elementos resulta en la reducción de esfuerzo de los componentes de manera individual, así mismo afecta el esfuerzo de todo el elemento dependiendo de su tamaño, forma y distribución de las perforaciones, la configuración geométrica de la sección transversal y de las propiedades mecánicas del material que se usó.

Los efectos de las cargas críticas de pandeo se muestran en la imagen 3 en donde se observa el efecto de una perforación central en el coeficiente de pandeo para una placa cuadrada simplemente apoyada, en donde la curva superior se definió con un análisis de elemento finito desarrollado por el investigador Yang para una columna y una viga. (Yu, 2000)

Se puede observar como los resultados de las pruebas, tanto en columna como en viga oscilan cerca de la curva propuesta en el enfoque de esfuerzo uniforme.

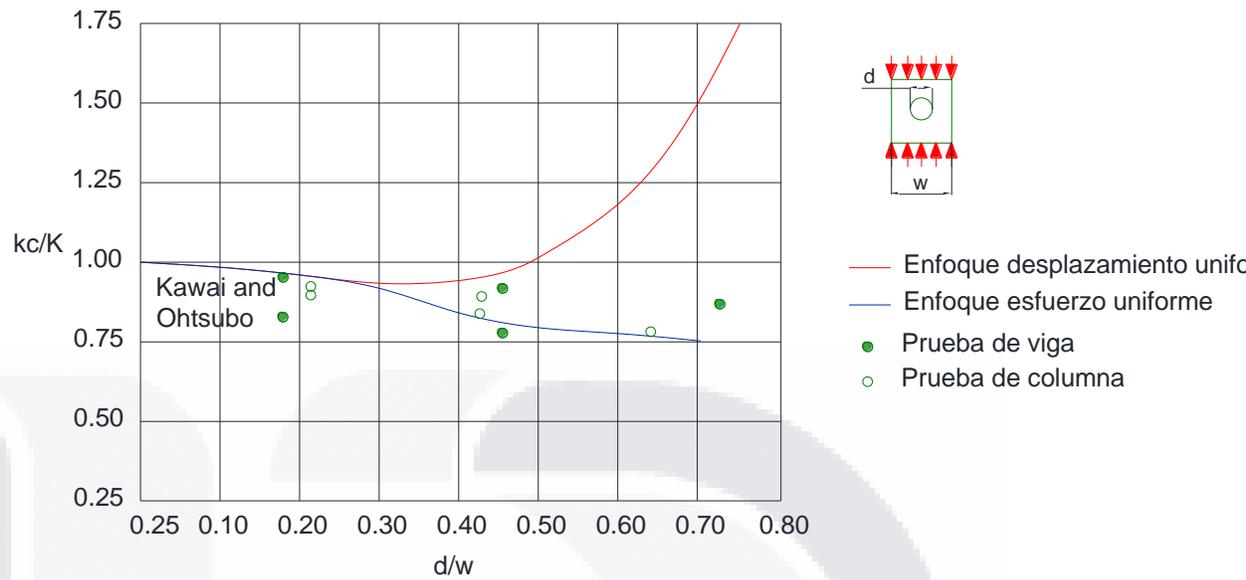


Imagen 3.- Efecto de una perforación circular en el coeficiente de pandeo en compresión.

En ambas figuras se observan las literales referentes al pandeo; k es el coeficiente de pandeo para placas cuadradas sin perforaciones, k_c representa el coeficiente de pandeo para la misma placa con una perforación circular, mientras que k_s representa el coeficiente de pandeo para secciones con perforación cuadrada. Como se muestra en las imágenes d y h representan el diámetro y altura de las perforaciones respectivamente. W es el ancho de la placa.

En una comparativa de ambas gráficas, aun cuando la carga de pandeo para la placa con perforación cuadrada es presenta un mayor efecto que aquella con una perforación circular, el efecto de postpandeo para ambas es similar si la distancia h y d son similares (Yu, 2000)

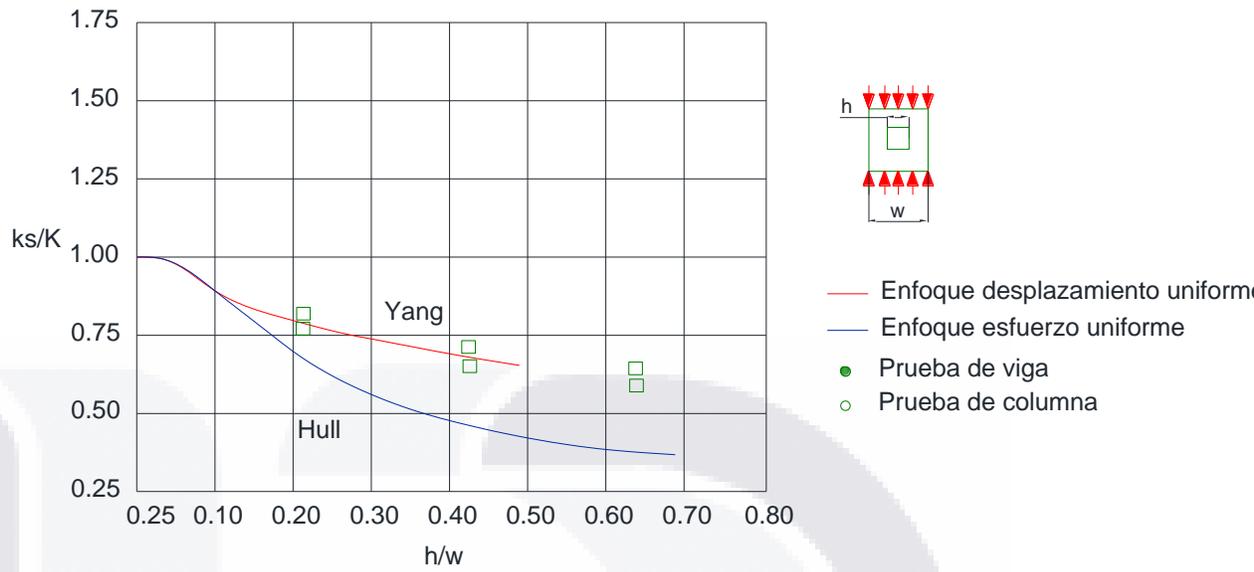


Imagen 4.- Efecto de una perforación cuadrada en el coeficiente de pandeo en compresión.

5.3. Especificaciones para el diseño y pruebas en estanterías industriales

El Rack Manufacture Institute (RMI) en el año 2012 dio a conocer su actualización de la norma MH.1 16, en donde aborda las consideraciones básicas de diseño de estanterías industriales, que se presentan a lo largo de esta sección.

5.3.1. Peso de operación

Existen dos condiciones que se consideran críticas en el análisis de baterías de estantería industrial:

W= representa el peso propio de la estantería mas todos los niveles de cargados al 67% de su capacidad de carga nominal.

W_p= representa el peso propio de la estantería más únicamente el nivel más alto cargado al 100% de su capacidad de carga nominal.

En cada una de las condiciones, el diseño debe considerar el peso actual del centro de masas de cada componente de carga de almacenamiento.

5.3.2. Fuerzas horizontales

La cantidad de fuerzas horizontales que soporta una estantería, depende del modo de aplicación, y debe ser diseñada para las situaciones más críticas que se puedan presentar, es

importante considerar que dichas fuerzas son especialmente soportadas por las conexiones entre vigas y columnas, así como sus apuntalamientos. Las fuerzas a considerar son:

- Cargas sísmicas
- Cargas por viento
- Diseño de esfuerzo permisible $-1.5\%D + 1.5\%P$ en todas las conexiones basadas en la carga máxima
- Factor de resistencia de diseño $1.5\%D + 1.5\%P$ basado en cargas máximas.

Estas cargas deben aplicarse por separado, no simultáneas, en cada una de las dos direcciones principales del rack.

Por otro lado se aplicaran simultáneamente con toda la carga viva, la carga de producto y la carga muerta. Las cargas de flexión en las conexiones viga-columna deben ser revisadas contra el momento permisible (positivo y negativo)

5.4. Cargas sísmicas

La normativa RMI establece parámetros para el cálculo de fuerzas sísmicas que debe soportar una estantería industrial, sin embargo, complementar dicha normativa con los datos del Manual de diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, es requerido para la investigación presentada en este documento.

5.4.1. Regionalización sísmica

Para el territorio mexicano, se consideran cuatro zonas para la clasificación de peligro sísmico, las dos primeras se refieren a baja sismicidad y las restantes a alta sismicidad (Comision Federal de Electricidad, 2015), dicha regionalización está disponible en el programa PRODISIS y luce de la siguiente manera:

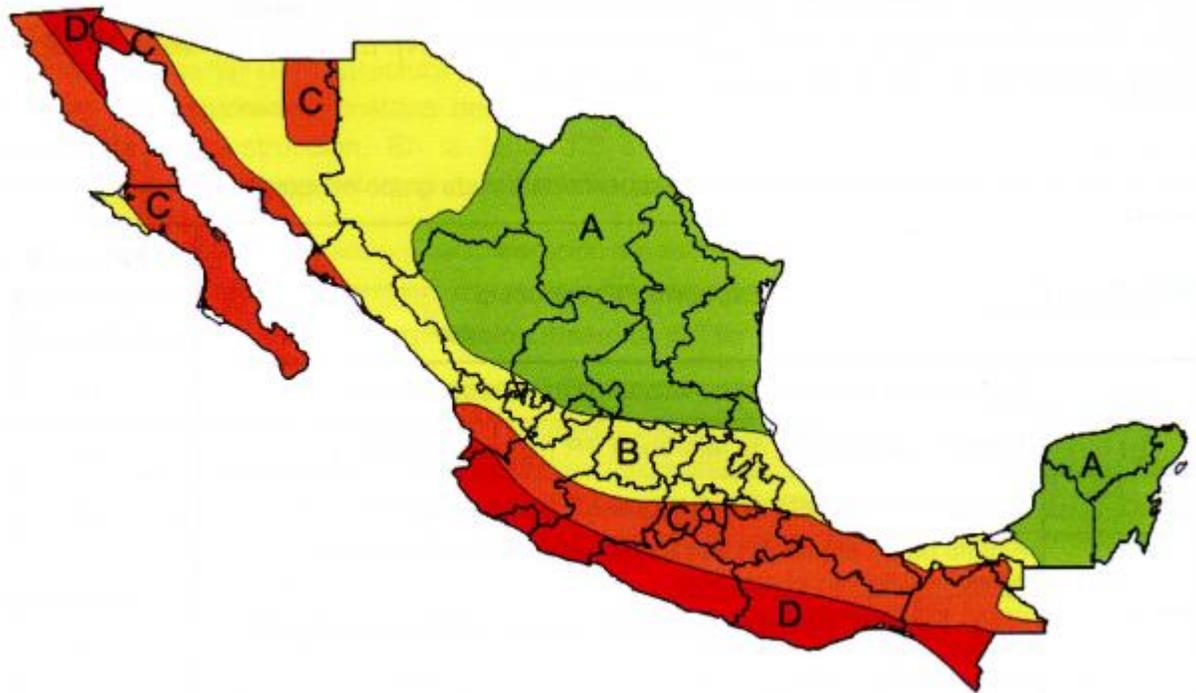


Imagen 5.- Regionalización de las zonas sísmicas en la república Mexicana. Fuente: (Comision Federal de Electricidad, 2015)

Los criterios de regionalización consideran los siguientes conceptos de aceleración máxima en la roca que presenta el sitio de estudio:

Aceleración máxima en roca a^r_0 (cm/s ²), correspondiente al nivel de referencia ER	Zona	Intensidad sísmica
$a^r_0 \leq 200$	D	Muy Alta
$100 \leq a^r_0 < 200$	C	Alta
$50 \leq a^r_0 < 100$	B	Moderada
$a^r_0 < 200$	A	Baja

Tabla 3.- Regionalización sísmica. Fuente: (Comision Federal de Electricidad, 2015)

5.4.2. Espectro de diseño sísmico transparente y modificado

Hay un espectro específico para cada uno de los sitios marcados en el mapa, esto permite parametrizar lo impredecible de un evento bajo una curva, que al modificarla posteriormente permite realizar un análisis estructural.

$$S_{MS} = F_{sit}S_s$$

$$S_{M1} = F_{res}S_1$$

5.4.3. Parámetros para la elaboración de espectros regionales.

Los principales parámetros para la construcción de espectros regionales son la aceleración máxima del terreno (a_0^r), la aceleración máxima espectral (c) y el tipo de amortiguamiento que se le proporcione a las estructuras, siendo en 5% el valor más común.

Los valores de los primeros dos parámetros se calculan de la siguiente manera:

$$a_0 = F_{sit}a_0^r$$

$$c = F_{Res}a_0$$

Donde:

Fsit= coeficiente de sitio definido en tabla 4

	Terreno Tipo I	Terreno Tipo II	Terreno Tipo III
	Factor de sitio (Fsit)		
Zona A	1.00	2.6	3
Zona B	1.00	$2.6 - 0.2 \left(\frac{a_0^r - 50}{50} \right)$	$3.0 - 0.3 \left(\frac{a_0^r - 50}{50} \right)$
Zona C	1.00	$2.4 - 0.3 \left(\frac{a_0^r - 100}{100} \right)$	$2.7 - 0.4 \left(\frac{a_0^r - 100}{100} \right)$
Zona D	1.00	$2.1 - 0.5 \left(\frac{a_0^r - 200}{290} \right)$	$2.3 - 0.6 \left(\frac{a_0^r - 200}{290} \right)$

Tabla 4.- Factor de sitio Fsit.

Fres= Factor de respuesta definido en la tabla 5

	Terreno Tipo I	Terreno Tipo II	Terreno Tipo III
Factor de respuesta (Fres)			
Zona A	PRODISIS	3.8	4.2
Zona B	PRODISIS	$3.8 - 0.2 \left(\frac{a^r_0 - 50}{50} \right)$	$4.2 - 0.3 \left(\frac{a^r_0 - 50}{50} \right)$
Zona C	PRODISIS	$3.6 - 0.2 \left(\frac{a^r_0 - 100}{100} \right)$	$3.9 - 0.3 \left(\frac{a^r_0 - 100}{100} \right)$
Zona D	PRODISIS	$3.4 - 0.5 \left(\frac{a^r_0 - 200}{290} \right)$	$3.6 - 0.6 \left(\frac{a^r_0 - 200}{290} \right)$

Tabla 5.- Factor de sitio.

Zona	Tipo de Terreno	Ta (s)	Tb (s)	Tc (s)	k	r
A	I	0.10	0.60	2.00	1.50	1/2
	II	0.20	1.40	2.00	1.00	2/3
	III	0.30	2.00	2.00	0.50	1
B	I	0.10	0.60	2.00	1.50	1/2
	II	0.20	1.40	2.00	1.00	2/3
	III	0.30	2.00	2.00	0.50	1
C	I	0.10	0.60	2.00	1.50	1/2
	II	0.20	1.40	2.00	1.00	2/3
	III	0.20	2.00	2.00	0.50	1
D	I	0.10	0.60	2.00	1.50	1/2
	II	0.10	1.40	2.00	1.00	2/3
	III	0.10	2.00	2.00	0.50	1

Tabla 6.- Valores de los periodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendentes de los espectros de diseño. Fuente (Comision Federal de Electricidad, 2015)

5.4.4. Caracterización de la respuesta estructural

Como primer aspecto se considera la clasificación de la estructura, la cual se detalla en el capítulo 3.2 del Manual de Obras Civiles (Comision Federal de Electricidad, 2015). Dicha clasificación básicamente atiende al tipo de estructura que se analizara, como edificios de concreto, industriales, péndulos invertidos entre otros.

5.4.5. Factor de amortiguamiento

Este valor permite modificar las coordenadas del espectro transparente, con el fin de considerar el nivel de amortiguamiento que presenta la estructura por sus materiales o algún

dispositivo que permita la disipación de energía durante un sismo. Se calcula de la siguiente manera:

$$\beta\langle T_e, \zeta_e \rangle = \begin{cases} \left(\frac{0.05}{\zeta_e}\right)^{0.45} & \text{si } T_e < T_c \\ \left(\frac{0.05}{\zeta_e}\right)^{0.45} \left(\frac{T_c}{T_e}\right) & \text{si } T_e \geq T_c \end{cases}$$

Donde:

T_c = Periodo de inicio de la rama descendente (Tabla 6)

T_e = Periodo estructural en dirección de análisis

ζ_e = Amortiguamiento de la estructura

5.4.6. Factor reductor por ductilidad Q' (T_e , Q)

En este parámetro considera el comportamiento inelástico de la estructura, por lo que arroja las ordenadas espectrales reducidas por ductilidad, y en consecuencia, la fuerza sísmica también será reducida. El cálculo del factor reductor se realiza de la siguiente manera:

$$Q'\langle T_e, Q \rangle = \begin{cases} 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta\langle T_e, \zeta_e \rangle T_e}{k T_b}} & \text{si } T_e \leq T_b \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta\langle T_e, \zeta_e \rangle p_b\langle T_e \rangle}{k}} & \text{si } T_e > T_b \end{cases}$$

Donde:

Q = factor de comportamiento sísmico

T_b = límite superior de la meseta del espectro de diseño

K = parámetro que controla la caída de la curva en el espectro

P_b = parámetro de variación del espectro de la rama descendiente

$$p_b\langle T_e \rangle = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^2$$

5.4.7. Fuerzas sísmicas mínimas

Los requerimientos presentados a continuación se aplican a estanterías con alturas mayores de 2.44m y considerando que no están conectadas a otras estructuras, se consideran como riesgo estructural tipo II.

Las fuerzas de diseño no deben ser menores que la siguiente ecuación

$$V = C_s I_p W_s$$

Donde:

C_s = coeficiente de respuesta

I_p = factor de importancia del sistema

- 1.5 para sistema de instalación esencial
- 1.5 si el sistema contiene materiales significativamente peligrosos
- 1 para todo lo demás
- I_p para rack abierto al público se considerara 1.5.

Si la evaluación basada en el desplazamiento se realiza en cualquiera de las dos direcciones principales de la estantería $I_p=1$

La variable W_s se calculara con la siguiente formula:

$$W_s = (0.67 \times P_{RF} \times P) + D + 0.25 \times L$$

Donde:

P_{RF} = factor de reducción de carga de producto

Dirección de la fuerza sísmica	P_{RF}
Pasillo transversal	1
En el pasillo de abajo	$P_{Promedio}/P_{Maximo}$

Tabla 7.- Valores de la variable PRF en función del tipo de estantería.

$P_{Promedio}$ = Para almacenes de venta al por menor, abiertos a todo público, se toma como P_{maximo} .

5.4.8. Factor de redundancia.

El factor de redundancia ρ para análisis sísmico de pasillos bajos se considerara en las siguientes categorías:

- Diseño sísmico A,B, y C=1
- Diseño sísmico D,E, y F=1
- De pasillos bajos 1.3 para todas las situaciones, excepto si tiene las siguientes condiciones:
 - Fila de estantería sin soporte con dos bahías conectadas como mínimo donde su valor será de 1.
 - Para un rack con filas reforzadas por plan y secciones de refuerzo trasero – mínimo de tres sistemas verticales reforzados por fila son utilizados, donde su valor será 1.

Para pasillos transversales en configuraciones de batería se considerará como:

- $\rho = 1.3$ una única fuerza sísmica que resiste a la estructura donde al remover un refuerzo o conexión resulte en más del 33% de la resistencia al sismo.
- $\rho = 1.0$ cuando dos o más marcos de resistencia a la fuerza sísmica adecuadamente atados entre sí, donde al remover un refuerzo o conexión no resulta en más del 33% de reducción de resistencia sísmica.

5.4.9. Calculo del coeficiente de respuesta sísmica

$$C_s = \frac{S_{D1}}{TR}$$

Donde:

S_{D1} = respuesta de la aceleración del espectro de diseño sísmico con periodo de 1 segundo

R= factor de modificación de respuesta:

R=4 en la dirección de refuerzos

R=6 sin refuerzo.

Solo se tomara en cuenta valores más grandes si se realizaron pruebas previas que arrojen otro resultado.

T= periodo fundamental de la estructura del rack en cada dirección bajo la consideración

Alternativamente, el coeficiente de respuesta sísmica no debe ser mayor que:

$$C_s = \frac{S_{Ds}}{R}$$

Donde:

S_{Ds} = respuesta de la aceleración de espectro de diseño sísmico en un periodo corto 0.2s

El coeficiente de respuesta sísmica no debe ser menor de $0.044S_{Ds}$.

En las localizaciones en las cuales el espectro de respuesta de 1 segundo, si $1 \geq 0.6$, el valor del coeficiente sísmico de respuesta, C_s no debe ser menor que:

$$C_s = \frac{0.5S_1}{R}$$

5.4.10. Desplazamiento sísmico

No debe ser mayor que el 5% de la altura del rack h_n a menos que un valor menor sea justificado.

5.5. Elementos mecánicos en elementos de acero rolado en frio.

La normativa AISI S100, muestra las especificaciones para el diseño de elementos estructurales de acero rolado en frio. En ella se obtuvo la colaboración del comité American Iron Steel Institute (AISI), el comité Cold Formed Steel Structural Members (S136) y la cámara nacional de la industria del hierro y del acero (CANACERO).

Dicha normativa aborda provisiones generales, diseño por estabilidad y una metodología para el análisis de miembros a compresión tensión y flexo compresión.

Para fines de investigación del comportamiento de los elementos planteados en esta investigación, se retoman los procedimientos de análisis para la determinación de los valores de momentos de pandeo local para elementos en compresión (columnas) y flexión (vigas).

5.5.1. Miembros a compresión

La sección E es la encargada de mostrar la metodología para el cálculo de elementos mecánicos de los miembros a compresión. (AISI STANDAR, 2016), para este caso particular se tomó en cuenta las siguientes secciones:

- Fluencia y pandeo global
- Pandeo local interactuando con fluencia y pandeo global, miembros sin perforaciones para Método Directo de Esfuerzos (DSM)
- Pandeo distorsional, miembros sin perforaciones para Método Directo de Esfuerzos (DSM) Este último solo como complemento de la información.

5.5.2. Fluencia y pandeo global

Es una normativa realizada en colaboración con el grupo CSA Group empresa canadiense, e incluye los factores de resistencia de Estados Unidos de America y Canada, pero más allá de eso, el cálculo del esfuerzo de fluencia para pandeo global es el mismo.

$$P_{ne} = A_g F_n$$

$$\Omega_c = 1.80 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_c = 0.85 \text{ (LRFD)}$$

$$\phi_c = 0.80 \text{ (ASD)}$$

Donde:

A_g = Área total

F_n = esfuerzo de compresión que debe ser calculado como sigue:

$$\lambda_c \leq 1.5 \quad F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y$$

$$\lambda_c \geq 1.5 \quad F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}}$$

5.5.3. Pandeo local interactuando con fluencia y pandeo global, miembros sin perforaciones para Método Directo de Esfuerzos (DSM)

El esfuerzo nominal por pandeo local aplica los factores de seguridad de la sección anterior y se determina con la siguiente formula:

$$P_{nl} = A_e F_n \leq P_{ne}$$

F_n = Esfuerzo global en las columnas

A_e = Área efectiva calculada con F_n

P_{ne} = esfuerzo nominal

Sin embargo hay que considerar las siguientes limitantes:

$$\lambda_c \leq 0.776 \quad P_{nl} = P_{ne}$$

$$\lambda_c > 0.776 \quad P_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{crl}}}$$

5.5.4. Pandeo distorsional, miembros sin perforaciones para Método Directo de Esfuerzos (DSM)

Su cálculo es el resultado de la correcta ejecución de las siguientes formulas.

$$P_y = A_g F_y$$

$$\lambda_d \leq 0.561 \quad P_{nd} = P_y$$

$$\lambda_d > 0.776 \quad P_{nd} = \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{c rd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{c rd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{P_y}{P_{c rd}}}$$

5.6. Miembros a flexión

La sección F es la encargada de mostrar la metodología para el cálculo de elementos mecánicos de los miembros a flexión. (AISI STANDAR, 2016), para este caso particular se tomó en cuenta las siguientes secciones:

- Fluencia y pandeo global
- Pandeo local interactuando con fluencia y pandeo global
- Pandeo distorsional

Para todos los casos se aplican los siguientes factores de seguridad:

$$P_{ne} = A_g F_n$$

$$\Omega_c = 1.80 \text{ (ASD)}$$

$$\phi_c = 0.85 \text{ (LRFD)}$$

$$\phi_c = 0.80 \text{ (ASD)}$$

5.6.1. Fluencia y pandeo global

Esta dado por $M_{ne} = S_f F_n \leq My$ donde:

M_{ne} = esfuerzo nominal de flexión para fluencia y pandeo global

S_f = Modulo de sección elástico para toda la sección sin reducir hasta la fibra exterior a compresión y $M_y = S_{fy} F_y$

F_n se determina con las siguientes consideraciones:

Si $F_{cre} \geq 2.78 F_y$ entonces $F_n = F_y$

Si $2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y$ entonces

$$F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}} \right)$$

Si $F_{cre} \leq 0.56 F_y$ entonces $F_n = F_{cre}$

5.6.2. Pandeo local interactuando con fluencia y pandeo global

Se determina considerando las siguientes limitaciones:

$$\lambda_l \leq 0.776 \quad M_{nl} = M_{ne}$$

$$\lambda_c > 0.776 \quad P_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}}$$

5.6.3. Pandeo distorsional

Su cálculo es el resultado de la correcta ejecución de las siguientes formulas.

$$\lambda_d \leq 0.673 \quad M_{nd} = My$$

$$\lambda_d > 0.673 \quad P_{nd} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{My} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{My} \right)^{0.5} My$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{My}{Mcrd}}$$

Los valores de M_y , M_{cre} , M_{cr1} y M_{crd} pueden ser calculados con la metodología presentada a lo largo de la normativa antes mencionada AISI, sin embargo una manera práctica de obtenerlos es mediante el programa de libre acceso CUFSM.

5.7. CUFSM: Constrained and Unconstrained Finit Strip Metod

5.7.1. Análisis por pandeo de una sección transversal

CUFSM es un programa desarrollado por el profesor Ben Schafer en 1997, en el cual se puede obtener las características, los modos de pandeo elástico y cargas de secciones de acero rolado en frío. (Thin Walled Structure Group, 2020)

Las bondades de este programa surgen de los resultados obtenidos gracias a la aplicación del método finito semi-analítico para la creación de una curva de caracterización de secciones transversales. Es decir, en una sola curva es posible obtener coeficientes normalizados del pandeo local, distorsional y global del elemento.

Dichos valores aplicados a la normativa AISI antes mencionada, nos permite obtener los valores de M_y , M_{cre} , M_{cr1} y M_{crd} necesarios para la obtención de datos de la sección anterior.

Para más información acerca de programa, se anexa el link del sitio oficial <https://www.ce.jhu.edu/cufsm>.

5.8. Determinación de los parámetros para la gráfica momento curvatura.

El diseño sistemático de un método para la predicción de parámetros de una gráfica momento curvatura aplicable a secciones de acero rolado en frío, se enfoca a las necesidades de pandeo local y distorsional.

La investigación realizada por Ayham y Schafer del año 2012, plantea un modelo parecido al sugerido para acero forjado en la normativa ASCE, acondicionado para trabajar en las secciones de acero rolado en frío de este documento. Para más información, se sugiere consultar la publicación realizada por dichos investigadores.

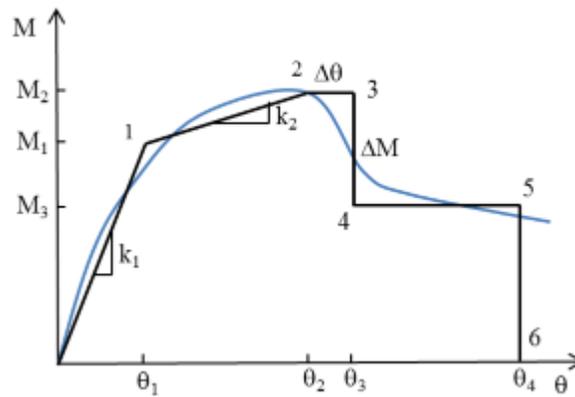


Imagen 6.- Grafica momento rotación del modelo I propuesto por Ayham y Schafer

A continuación, se presenta una tabla donde detalla la manera de obtener los puntos de la gráfica momento rotación para acciones de pandeo local y pandeo distorsional.

	Local	Distorsional
Rotación	$\lambda_c = \sqrt{\frac{My}{Mcrl}}$	$\lambda_d = \sqrt{\frac{My}{Mcrd}}$
	$\frac{\theta_1}{\theta_y} = \frac{M_1}{k_1\theta_y} = \frac{M_1}{k_e\theta_y} = \frac{M_1}{M_y}$	$\frac{\theta_1}{\theta_y} = \frac{M_1}{k_1\theta_y} = \frac{M_1}{k_e\theta_y} = \frac{M_1}{M_y}$
	$\frac{\theta_2}{\theta_y} = \frac{1}{\lambda_l} \leq \frac{M_2}{k_e}$	$\frac{\theta_2}{\theta_y} = \left(\frac{1}{\lambda_d}\right)^{1.4}$
	$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta,$	$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta,$
	$\frac{\Delta\theta}{\theta_y} = \begin{cases} \left(\frac{0.776}{\lambda_l}\right) - 1 & \text{si } \lambda_l < 0.776 \\ 0 & \text{si } \lambda_l \geq 0.776 \end{cases}$	$\frac{\Delta\theta}{\theta_y} = \begin{cases} \left(\frac{0.673}{\lambda_l}\right) - 1 & \text{si } \lambda_l < 0.673 \\ 0 & \text{si } \lambda_l \geq 0.673 \end{cases}$
$\frac{\theta_4}{\theta_y} = \begin{cases} 1.5 \frac{1}{\lambda_l} & \text{Si } \lambda_l > 1 \\ 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_l}\right)^{\frac{1}{4\lambda_l}} & \text{Si } \lambda_l \leq 1 \end{cases}$	$\frac{\theta_4}{\theta_y} = \begin{cases} 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_d}\right)^{1.4} & \text{Si } \lambda_d > 1 \\ 1.5 \left(\frac{1}{\lambda_d}\right)^{\frac{1.4}{4\lambda_d}} & \text{Si } \lambda_d \leq 1 \end{cases}$	
Momento	$\frac{M_1}{M_y} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \lambda_l < 0.650 \\ \left(\frac{0.650}{\lambda_l}\right)^2 & \text{Si } \lambda_l \geq 0.650 \end{cases} \leq \frac{M_2}{M_y}$	$\frac{M_1}{M_y} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \lambda_d < 0.600 \\ \left(\frac{0.600}{\lambda_d}\right)^2 & \text{Si } \lambda_d \geq 0.600 \end{cases} \leq \frac{M_2}{M_y}$
	$\frac{M_2}{M_y} = \frac{M_{nl}}{M_y}$	$\frac{M_2}{M_y} = \frac{M_{nl}}{M_y}$
	$\frac{M_2}{M_y} = \begin{cases} 1 + \left(1 - \frac{1}{C_{yl}^2}\right) \frac{(M_p - M_y)}{M_y} y C_{yl} = \sqrt{\frac{0.673}{\lambda_l}} & \text{Si } \lambda_l < 0.776 \\ \left(1 - 0.15\left(\frac{1}{\lambda_l}\right)^{0.4}\right) \left(\frac{1}{\lambda_l^2}\right)^{0.4} & \text{Si } \lambda_l \geq 0.776 \end{cases} \leq \frac{M_2}{M_y}$	$\frac{M_2}{M_y} = \begin{cases} 1 + \left(1 - \frac{1}{C_{yd}^2}\right) \frac{(M_p - M_y)}{M_y} y C_{yd} = \sqrt{\frac{0.673}{\lambda_d}} & \text{Si } \lambda_d < 0.673 \\ \left(1 - 0.22\left(\frac{1}{\lambda_d}\right)^{0.5}\right) \left(\frac{1}{\lambda_d^2}\right)^{0.5} & \text{Si } \lambda_d \geq 0.673 \end{cases} \leq \frac{M_2}{M_y}$
	$M_3 = M_2 - \Delta M$	$M_3 = M_2 - \Delta M$
	$\frac{\Delta M}{M_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{\lambda_l}{0.776} + 1\right)^{1.1}} \leq 0.5$	$\frac{\Delta M}{M_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{\lambda_d}{0.673} + 1\right)^{1.4}} \leq 0.5$

Tabla 8.- ecuaciones para la obtención de la curva momento rotación para pandeo local y distorsional. Fuente: (Ayhan & Schafer, 2012)

5.9. Niveles de desempeño

El desempeño de las estructuras es una combinación del comportamiento de componentes estructurales, como no estructurales.

Los niveles de desempeño pueden ser descritos cualitativamente en términos de ofrecer la seguridad de mantenerse en un edificio a los ocupantes, durante y después de actividad sísmica, y preservar la condición de costo-beneficio de la rehabilitación de una

construcción en una condición preventiva al sismo. Este tipo de desempeño están directamente relacionados con el grado de daño sustancial de una construcción.

De esta manera, se tienen dos secciones, la primera en niveles de desempeño estructurales, y el segundo, niveles de desempeño no estructurales, que, aunque ambos se refieren al daño en la estructura, el segundo se enfoca a los componentes y contenidos de las construcciones. La demanda de movimiento sísmico es el factor de riesgo más importante para las construcciones.

Para sitios con un potencial alto de falla del suelo, la demanda será expresada en los términos de deformación anticipada permanente diferencial del suelo, entonces este factor será determinado por la localización geográfica y la composición geológica del mismo.

Es así que se clasifico el riesgo probabilístico de que suceda un evento sísmico de la siguiente manera.

Probabilidad de excedencia de un sismo	Periodo aproximado de retorno (Años)
50% / 50 años	72
20% / 50 años	225
10% / 50 años	474
2% / 50 años	2,475

Tabla 9.- Clasificación de periodo de retorno aproximado de un sismo en comparación a 50 años (Federal Emergency Management Agency, 1997)

Entonces se puede decir que los periodos de retorno de un sismo se pueden manejar en las categorías de 75, 225, 500 y 2500 años, de esta manera es posible hacer dos niveles de sismo que son usualmente empleados para determinar los objetivos de rehabilitación de una estructura, y están dados por el enfoque probabilístico y determinístico, a estos se les llama seguridad básica de sismo 1 (BSE-1) y seguridad básica de sismo 2 (BSE-2) respectivamente. Ambos métodos funcionan para zonas cuyos eventos sísmicos no sean críticos, y provienen de estimaciones determinísticas de las fallas producidas en la región.

		Niveles de desempeño de la estructura			
		Nivel operacional (1-A)	Nivel de ocupación inmediata	Nivel salvaguardar la vida (3-C)	Nivel prevención de colapso (5-E)
Nivel de daño sísmico	50%/50 años	a	b	c	d
	20%/50 años	e	f	g	h
	BSE-1 (10%/50 años)	i	j	k	l
	BSE-2 (2%/50 años)	m	n	o	p

k+p = BSO (Objetivo básico de seguridad)
 k+p+ cualquiera a,e,i,m; o b,f,j o n = Objetivo mejorado
 o= Objetivo mejorado
 k o p = Objetivos limitados
 c,g,d,h = Objetivos limitados

Tabla 10.- Relación de Objetivo básico de seguridad para clasificación de incidencia de sismos.

5.9.1. Niveles de desempeño estructurales

Los niveles de desempeño estructurales buscan satisfacer los objetivos de rehabilitación de una construcción para poder limitar los daños de los elementos horizontales ante cierta demanda de carga sísmica, se divide en tres: nivel de ocupación inmediata (S-1), nivel de salvaguardar la vida (S-3) y prevención de colapso (S-5) (Federal Emergency Management Agency, 1997).

Por otro lado se tienen dos subniveles para complementar la información del proyectista: control de daño (S-2) y Rango límite de seguridad (S-4), los cuales pueden ayudar a determinar un criterio concreto para un caso particular, estos últimos subniveles se obtuvieron de la interpolación de los niveles principales de desempeño. (Federal Emergency Management Agency, 1997)

5.9.1.1. Ocupación inmediata (Nivel S-1)

Este nivel de desempeño se refiere a al estado post-sismo en el cual daños limitados han ocurrido a la estructura. Los sistemas básicos soportan casi todo el impacto de sismo, así que los daños ocasionados se pueden considerar muy bajos y requiere solamente reparaciones menores. No se considera de atención inmediata y puede regresar a su funcionamiento cuanto antes.

5.9.1.2. Salvaguardar la vida (Nivel S-3)

Se presenta cuando el daño post-sísmico se considera significativo en algunos de los elementos, pero no se considera que estos puedan convertirse en fallas peligrosas. El daño puede ocurrir de igual manera durante el sismo, sin embargo, el edificio puede salvaguardar la vida de sus ocupantes ya que el daño de la estructura se considera bajo. Es así que en estos casos se puede optar por reparar, o colocar estructuras para rigidizar los elementos antes de su reocupación, aunque no resulte en una opción económica.

5.9.1.3. Prevención de colapso (Nivel S-5)

En este nivel el edificio está en riesgo de un colapso total o parcial. En él se ha producido daño severo, lo cual puede derivar en la degradación de la rigidez y resistencia de los elementos de resistencia lateral, se producen deformaciones irreparables. El sistema debe ser capaz de soportarse a sí mismo, es decir, debe soportar sus cargas muertas y demanda de cargas gravitacionales, sin embargo, no exime de la aparición de colapsos. No resulta viable su rehabilitación y tampoco puede volver a ser ocupado después del colapso.

5.9.2. Objetivos de rehabilitación

Cada uno de los niveles de desempeño define un daño permisible de la estructura y los contenidos para considerarse dentro de alguno de ellos. En la siguiente tabla se presentan las consideraciones para determinar la demanda de un sismo con un espectro de respuesta, los resultados dependen en gran parte del procedimiento de análisis que se aplique a los edificios.

A continuación se muestra una tabla de control de daño en comparación con los niveles de desempeño de las construcciones.

		Niveles de desempeño			
		Prevención de colapso	Salvaguardar la vida	Ocupación inmediata	Operacional
Daño general		Severo	Moderado	Ligero	Muy ligero
General		Poca rigidez y fuerza residual, pero las columnas y muros de carga funcionan. Grandes desplazamientos permanentes. Algunas salidas bloqueadas. Rellenos y parapetos no atiesados fallaron o en un fracaso incipiente. El edificio está cerca del colapso.	Queda algo de fuerza y rigidez residual en todos los marcos. Los elementos que soportan la gravedad funcionan. No hay fallos en los muros o en el vuelco de los parapetos. Algún desplazamiento permanente. Daños en los tabiques. La construcción puede estar más allá de la reparación económica.	No hay desplazamiento permanente. La estructura conserva sustancialmente la fuerza y la rigidez originales. Pequeñas grietas en las fachadas, tabiques y techos, así como en los elementos estructurales. Los ascensores pueden ser reiniciados. La protección contra el fuego es operable	No hay desplazamiento permanente; estructura sustancialmente conserva la fuerza y la rigidez originales. Pequeñas grietas en las fachadas, tabiques y techos, así como en los elementos estructurales. Todos los sistemas importantes para funcionamiento normal son funcionales.
	Componentes estructurales	no Daños extensos.	Los riesgos de colapso se mitigan, pero muchos sistemas arquitectónicos, mecánicos y eléctricos están dañados.	El equipo y el contenido son generalmente seguros, pero pueden no funcionar debido a fallos mecánicos o a la falta de utilidades.	El daño que se produce es insignificante. La energía y otras utilidades están disponibles, posiblemente de fuentes de reserva.
Comparación con el rendimiento previsto para los edificios diseñados, según las disposiciones de la NEHRP, para el terremoto de diseño		Significativamente más daño y mayor riesgo.	Un poco más de daño y un riesgo ligeramente mayor.	Mucho menos daño y menos riesgo.	Mucho menos daño y menos riesgo.

Tabla 11.- Control de daño y niveles de desempeño de las construcciones (Federal Emergency Management Agency, 1997)

Dado que el presente trabajo, toma en cuenta el desempeño de elementos de acero, a continuación se incluye las consideraciones de este tipo de elementos al aplicar el análisis por desempeño.

Niveles de desempeño estructural y daño para elementos verticales				
Elemento	Tipo	Prevención de colapso S-5	Salvaguardar la vida S-3	Ocupación inmediata S-1
Secciones de momento de acero	Primario	Amplia distorsión de los rayos y paneles de la columna. Muchas fracturas de las conexiones del momento, pero las conexiones del corazón permanecen intactas.	Se forman las bisagras. Pandeo local de alguna viga elementos. Distorsión grave de la articulación; la conexión del momento aislado se fractura, pero las conexiones de cizallamiento permanecen intactas. Algunos elementos pueden experimentar una fractura parcial.	Rendimientos locales menores en algunos lugares. No hay fracturas Menor deformación o distorsión permanente observable de los miembros.
	Secundario	Igual que el primario	Amplia distorsión de los rayos y paneles de la columna. Muchas fracturas en las conexiones de momento, pero las conexiones de corte permanecen intactas.	Igual que el primario
	Desplazamiento	5% Transitorio o permanente	2.5% transitorio, 1% permanente	0.7% transitorio, Se desprecia el permanente
Secciones de acero con refuerzos	Primario	Rendimiento extenso y abrochado de los frenos. Muchos aparatos y sus conexiones pueden fallar.	Muchos aparatos ceden o se doblan pero no fallan totalmente. Muchas conexiones pueden fallar.	Fluencia o pandeo mínimo de los refuerzos
	Secundario	Igual que el primario	Igual que el primario	Igual que el primario
	Desplazamiento	2% transitorio o permanente	1.5% transitorio, 0.5% permanente	0.5% transitorio, se discrimina el permanente

Tabla 12.- Niveles de desempeño estructural y daño para elementos verticales (Federal Emergency Management Agency, 1997)

5.10. Parámetros de diseño y criterios de aceptación

Esta sección se encuentra en la normativa FEMA 356, y está especialmente dedicada al tema experimental. En ella se pueden encontrar una serie de recomendaciones para la determinación del desempeño de las estructuras con un análisis Push-over.

El criterio de aceptación para la deformación controlada para procedimientos no lineales corresponde a los siguientes puntos de la curva (Federal Emergency Management Agency, 2000).

5.10.1. Elementos primarios

5.10.1.1. Ocupación inmediata:

La deformación en la que se vuelve permanente, ha ocurrido daño visible en los experimentos. No debe ser mayor del 67% de la deformación para el límite de Seguridad De Vida.

5.10.1.2. Seguridad de vida:

El 75% al punto 2 de la curva de deformación

5.10.1.3. Prevención de colapso:

La deformación al punto 2 en las curvas pero no mayor al 75% de la deformación al punto 3.

5.10.2. Elementos secundarios

5.10.2.1. Ocupación inmediata:

Se toma el mismo criterio que para elementos primarios

5.10.2.2. Seguridad de vida:

El 75% al punto 3 de la curva de deformación

5.10.2.3. Prevención de colapso:

El 100% de la deformación al punto 3 de la curva.

A continuación se muestra el ejemplo proporcionado en la normativa FEMA356 para ejemplificar los puntos de referencia dados por las recomendaciones anteriores.

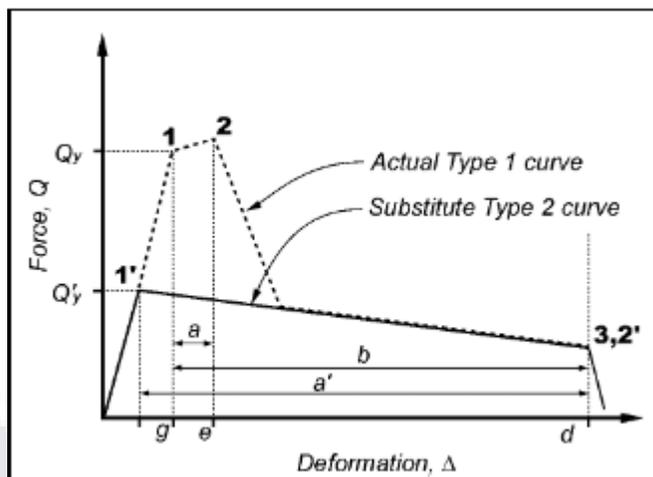


Imagen 7.- Curva momento deformación de la normativa FEMA 356.



Capítulo 6

Campaña

experimental

El acero rolado en frío es un material que aún es objeto de investigaciones por parte de la comunidad científica, específicamente los elementos de las estanterías industriales. Dicho interés se debe a los múltiples huecos distribuidos en su longitud, lo cual vuelve complicada la interpretación de resultados, ya que en la mayoría de los programas computacionales de uso básico no es posible la representación de las secciones.

6.1. Caracterización del modelo

En esta investigación se propone realizar una estantería (rack) industrial de 12.95m, las características de la misma se presentan a continuación.

Elemento	Tipo de sección	Material	Longitud (m)
Largueros	LW 4 ½” Cal 14	Acero A-60	2.66
Postes	Sencillo 121mm Cal 14	Acero A-55	1.37
	Doble 121mm Cal 14		
Conectores entre bahías	Sencillo 121mm Cal 14	Acero A-55	0.25
Diagonales	C L8 Cal 16	Acero A-55	1.34

Tabla 13.- Descripción general de los elementos de la estantería de la campaña experimental.

6.2. Características de los materiales

Como se ve en la tabla anterior se manejan dos materiales diferentes, el acero A-60 y el acero A-55, las características de ambos son las siguientes respectivamente:

The image shows a software interface for defining material properties. It is divided into several sections:

- General Data:** Material Name and Display Color is 'VIGAS Y LARGUEROS' with a blue color swatch. Material Type is 'ColdFormed'. There is a 'Modify/Show Notes...' button.
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume is 2.836E-04. Mass per Unit Volume is 7.345E-07. Units are set to 'Kip, in, F'.
- Isotropic Property Data:** Modulus of Elasticity, E is 2979.7902. Poisson's Ratio, U is 0.3. Coefficient of Thermal Expansion, A is 6.500E-06. Shear Modulus, G is 1146.0732.
- Other Properties for Cold Formed Materials:** Minimum Yield Stress, Fy is 60.051. Minimum Tensile Stress, Fu is 45.

Imagen 8.- Características mecánicas del acero A60 utilizado en largueros (Datos obtenidos SAP2000)

General Data	
Material Name and Display Color	POSTES Y DIAGONALES ■
Material Type	ColdFormed
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	2.836E-04
Mass per Unit Volume	7.345E-07
Units	
	Kip, in, F
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	2979.7902
Poisson's Ratio, U	0.3
Coefficient of Thermal Expansion, A	6.500E-06
Shear Modulus, G	1146.0732
Other Properties for Cold Formed Materials	
Minimum Yield Stress, Fy	55.0443
Minimum Tensile Stress, Fu	45

Imagen 9.- Características mecánicas del acero A55 utilizado en postes y diagonales (Datos obtenidos SAP2000)

6.3. Características de las secciones

La estantería ubica cuatro tipos de secciones diferentes como se mencionó anteriormente, tres de las cuales requirieron un análisis independiente al ser secciones que no se encuentran en la base de datos de SAP2000. Dicho análisis proporciono la caracterización de las piezas para conocer su geometría y mucho más importante sus elementos mecánicos. Estos últimos se obtuvieron en el programa CUFSM 4, y los resultados fueron los siguientes:

6.3.1. Larguero LW 4 ½” Cal 14:

Resultados de área, momentos de inercia, momento plástico y rotación de la pieza. Posteriormente se encuentra el resultado de los mementos mecánicos calculado con un esfuerzo de fluencia de 60kip-in.

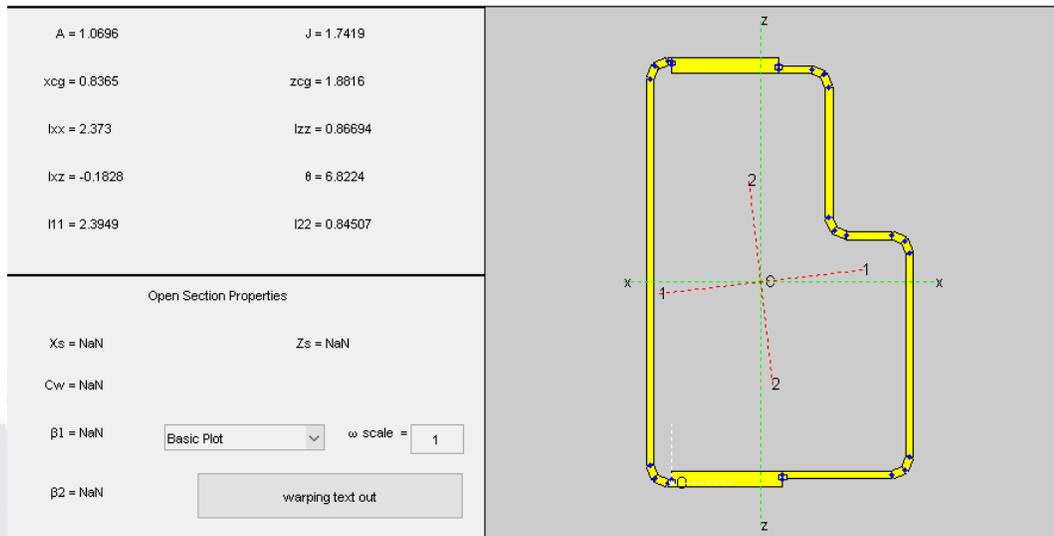


Imagen 10.- Resultados de las características geométricas de larguero LW

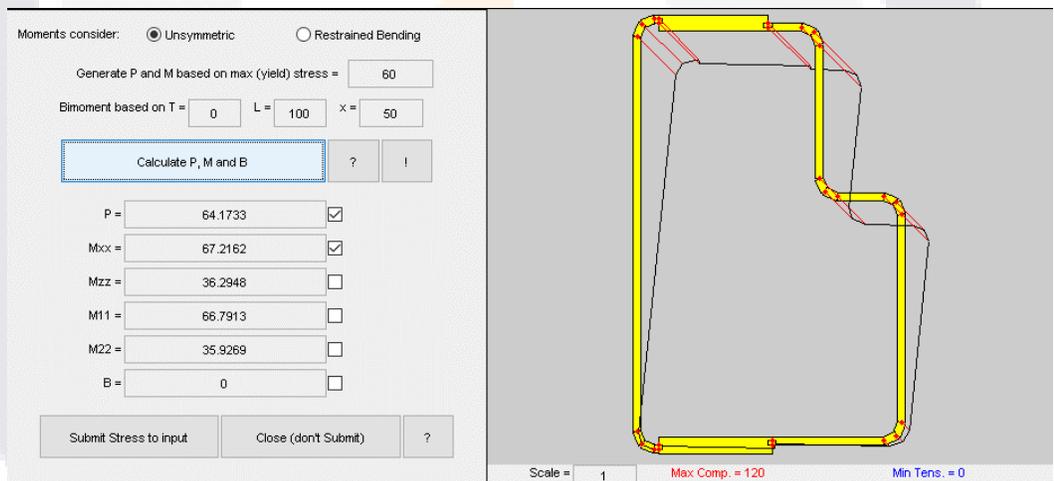


Imagen 11.- Propiedades mecánicas de la sección LW.

El resultado más valioso que aporta CUFSM es la caracterización de la curva de pandeo local, global y distorsional de las secciones. En este caso en la siguiente imagen se observan los resultados de los coeficientes de pandeo local, el cual se utilizara posteriormente en el cálculo de la curva momento rotación de la pieza.

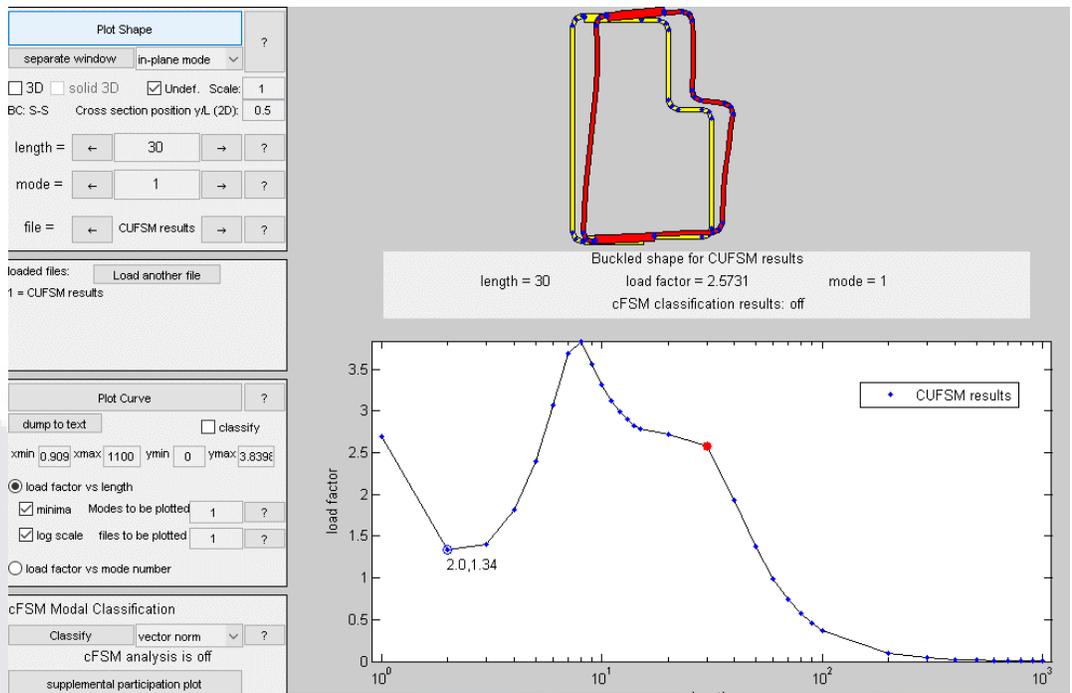


Imagen 12.- Resultados del programa CUFSM de la curva normalizada de pandeo local, distorsional y global para el larguero LW 4 ½” Cal 14

6.3.2. Poste sencillo 121mm Cal 14

Resultados de área, momentos de inercia, momento plástico y rotación de la pieza. Posteriormente se encuentra el resultado de los momentos mecánicos calculado con un esfuerzo de fluencia de 55kip-in.

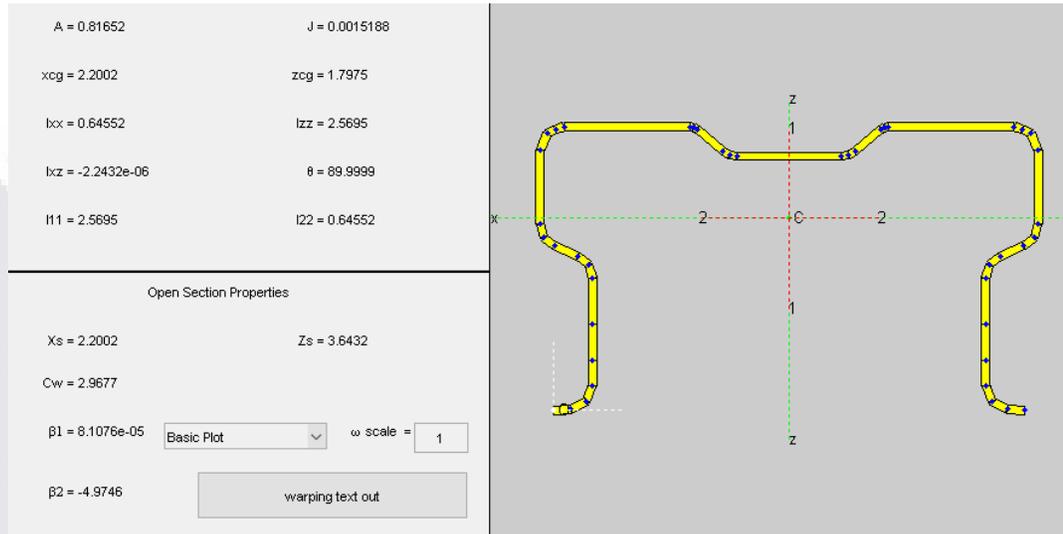


Imagen 13.- Resultados de las características geométricas del poste sencillo

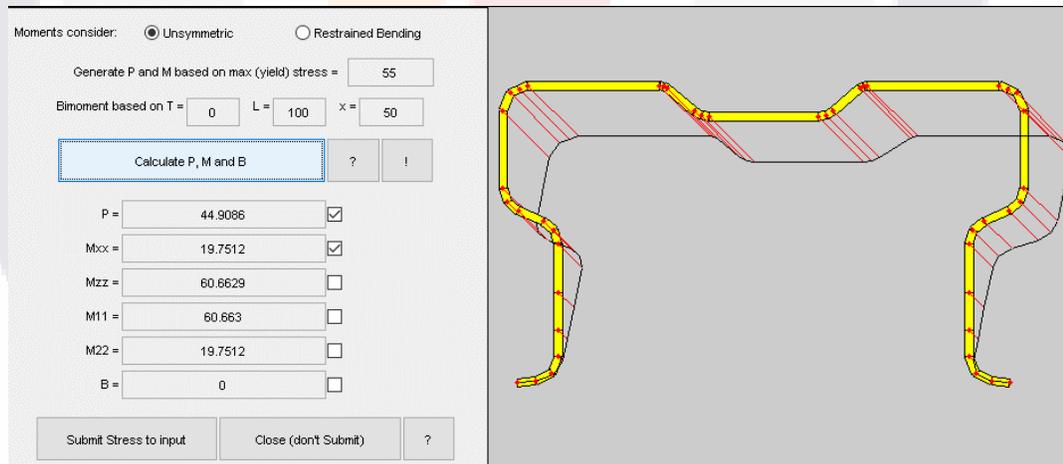


Imagen 14.- Propiedades mecánicas del poste sencillo

En la siguiente imagen se observan los resultados de los coeficientes de pandeo local, el cual se utilizara posteriormente en el cálculo de la curva momento rotación de la pieza.

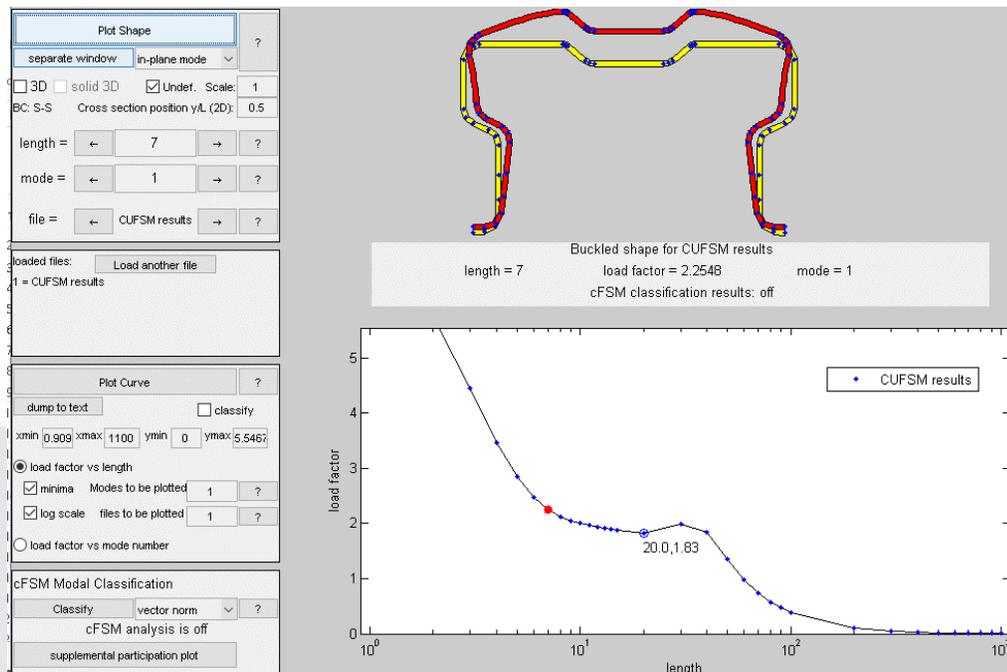


Imagen 15.- Resultados del programa CUFSM de la curva normalizada de pandeo local, distorsional y global para el poste sencillo de 121mm Cal14

6.3.3. Poste doble 121mm Cal 14

Resultados de área, momentos de inercia, momento plástico y rotación de la pieza. Posteriormente se encuentra el resultado de los momentos mecánicos calculado con un esfuerzo de fluencia de 55kip-in.

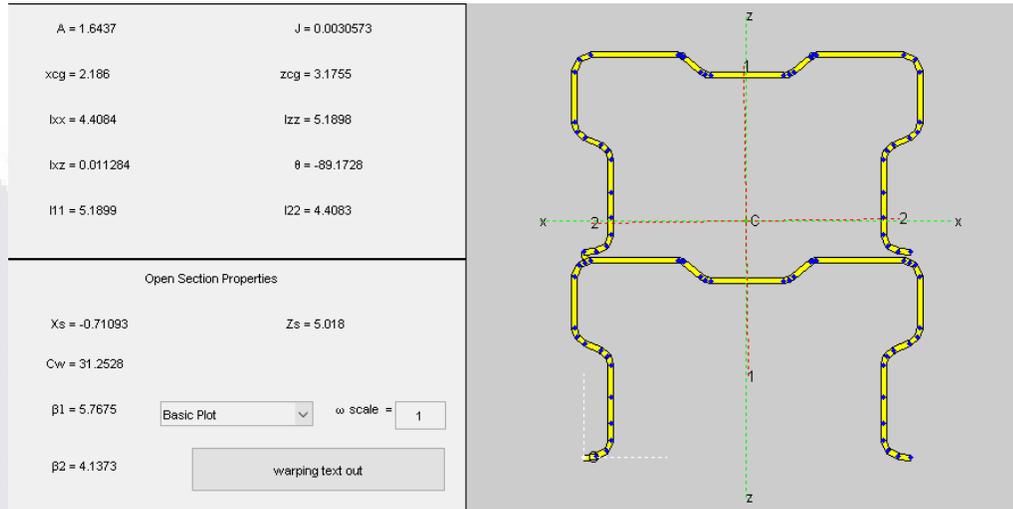


Imagen 16.- Resultados de las características geométricas del poste doble

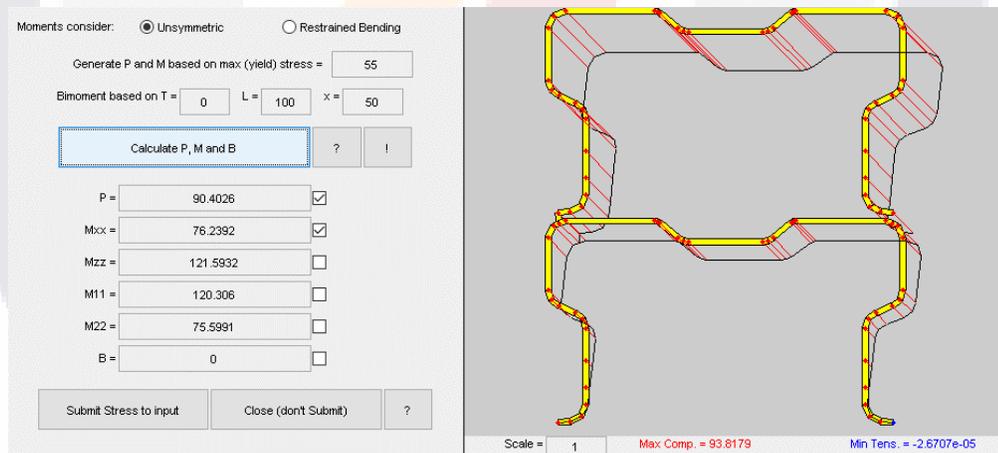


Imagen 17.- Propiedades mecánicas del poste doble.

En la siguiente imagen se observan los resultados de los coeficientes de pandeo local, el cual se utilizara posteriormente en el cálculo de la curva momento rotación de la pieza

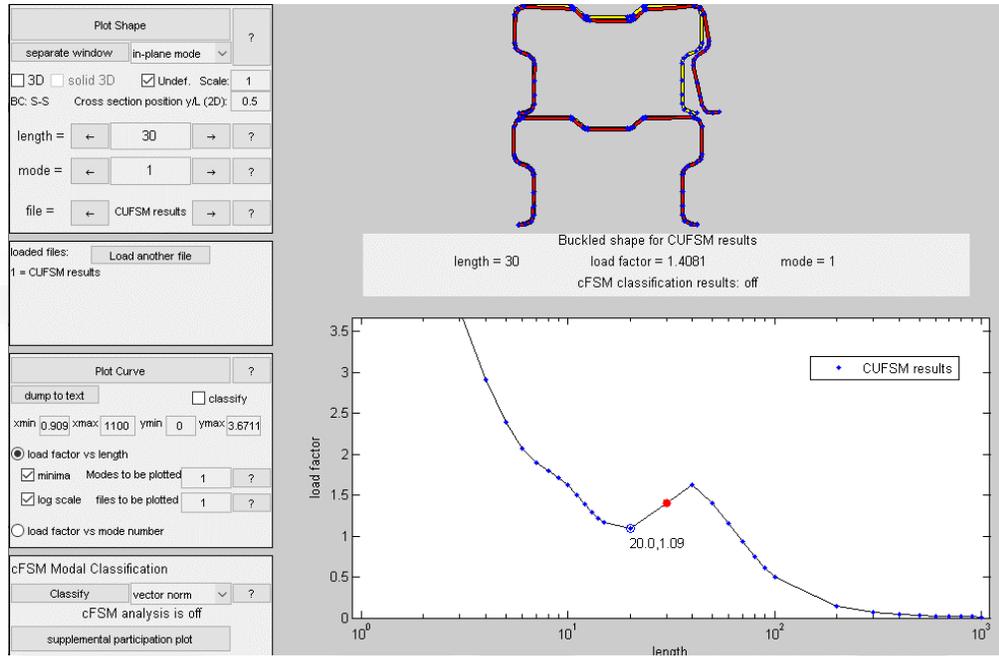
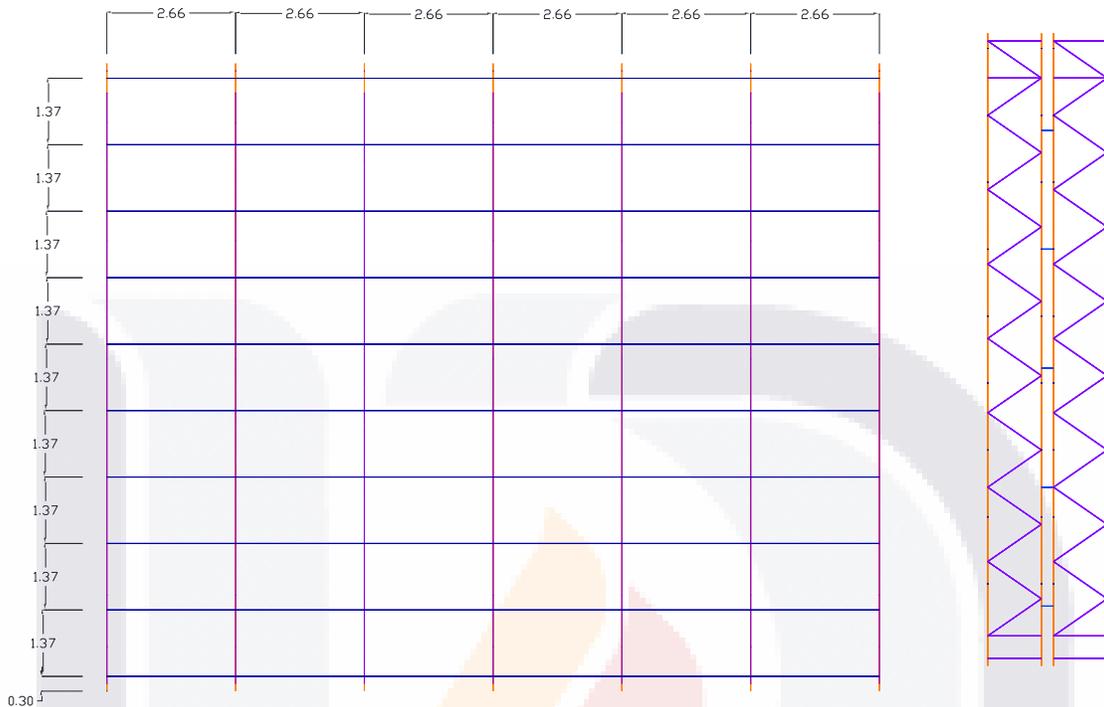


Imagen 18.- Resultados del programa CUFSM de la curva normalizada de pandeo local, distorsional y global para el poste sencillo de 121mm Cal14

6.4. Modelo geométrico en SAP2000.

La estantería objeto de estudio se analizara en el programa SAP2000, en el cual se supondrán secciones sin huecos, debido a la complejidad de las piezas perforadas. Tendrá un total de diez niveles en dos claros de carga, así como seis filas. El refuerzo a considerar son diagonales tipo C L8 Cal16, pero su estructura principal estará conformada por largueros LW 4 ½” Cal 14, Postes dobles de 121mm en la parte inferior de la estructura terminando con postes sencillos de 121mm en los dos últimos niveles.



Distribución de los claros del modelo

Imagen 19.-

6.5. Distribución de cargas

6.5.1. Carga muerta o carga de producto

Las estanterías por lo regular trabajan al 25% de la capacidad máxima que podrían soportar como una recomendación a los usuarios para operarlos de una manera más segura, sin embargo, para fines ilustrativos, en esta investigación las estructuras son cargadas con su peso promedio, con el fin de llevarlo a un estado límite de fatiga.

Se colocaron cargas de 490 kg/ml a lo largo de los largueros, simulando que cada sección de la estantería carga con 4160kg.

6.5.2. Carga viva

En este caso particular no se consideraron cargas vivas debido al uso de este tipo de estructuras, en donde su único objetivo es el de almacenamiento de mercancía.

6.5.3. Carga sísmica

Es el aspecto predominante para la obtención de resultados. Se colocara una carga sísmica de la comunidad de Santa María de Tonameca, una de las comunidades con gran riesgo sísmico en el estado de Oaxaca. Esta carga permitirá conocer el desempeño de la estructura en situaciones críticas.

Para la determinación de carga sísmica lateral se llevó a cabo el procedimiento propuesto para estructuras industriales tipo III que plantea el Manual de Diseño de Obras Civiles (Comision Federal de Electricidad, 2015), el cual se detalla a continuación:

6.5.4. Caracterización del espectro de diseño

Con ayuda del programa PRODISIS se determinó el espectro de respuesta sísmica de la comunidad de Santa María Tonameca en el estado de Oaxaca:

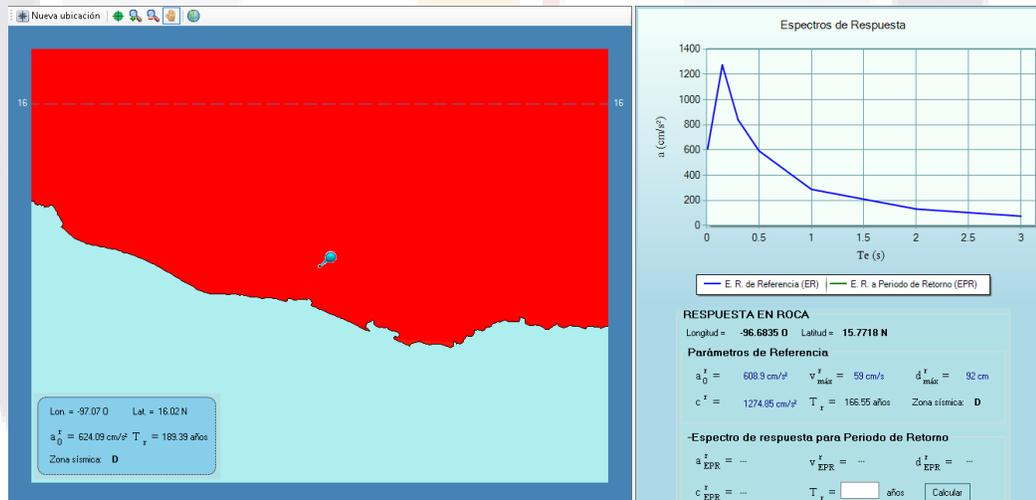


Imagen 20.- Espectro de respuesta de santa María Tonameca. Fuente: (Comision Federal de Electricidad, 2015)

PRODISIS es una herramienta muy útil, capaz de determinar un espectro de diseño con base a la información de la estructura y el lugar donde se planea construir, sin embargo, en el caso particular de este estudio, se requieren fuerzas horizontales que simulen el empuje de la estructura durante el sismo, lo cual requiere pasos diferentes para llegar al resultado, es así, que solo se tomaran en cuenta algunos de los parámetros que presenta el programa.

Se considerará la aceleración máxima del terreno (a_0^r), la aceleración máxima espectral (c) y los factores de sitio F_{sit} y F_{res} .

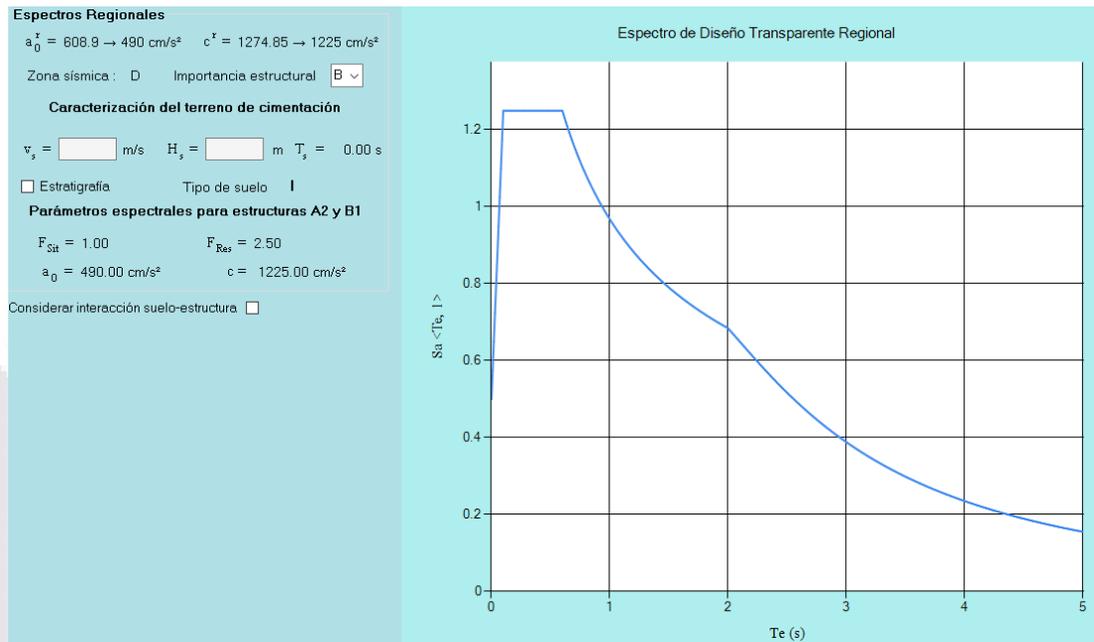
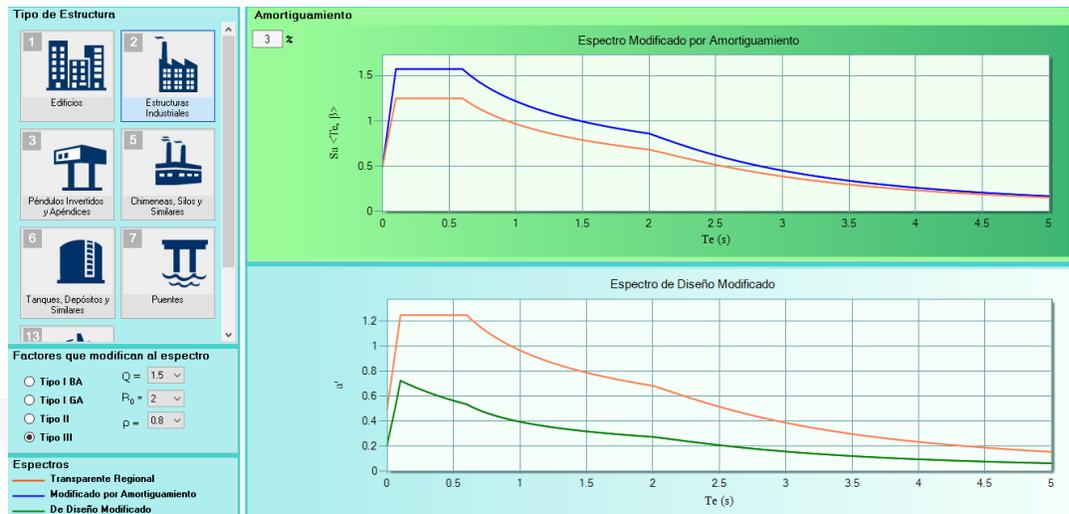


Imagen 21.- Parámetros para la determinación de fuerzas sísmicas horizontales. (Comision Federal de Electricidad, 2015)

Con base a la información proporcionada por el Manual de Diseño de Obras Civiles se determinaron las características de la estructura que modifican el espectro de diseño, el cual nos arroja la ordenada máxima de la aceleración, dicho espectro que se utilizara posteriormente.

- Estructura del tipo industrial tipo III: implica un amortiguamiento del 5%, un factor de comportamiento sísmico (Q) de 1.5, factor de sobre resistencia (R) igual a 2, y un factor de por redundancia de 0.8. Los datos fueron obtenidos con base al procedimiento presentado en el Manual de Diseño de Obras Civiles



El objetivo del método estático, es determinar las fuerzas horizontales equivalentes a las que ejercería el espectro de diseño calculado por el programa PRODISIS. Para este caso en particular, se determinaron las rigideces por nivel para así poder determinar el periodo al que está sometida la estructura en el eje X del modelo. A continuación se muestra de manera resumida los datos requeridos en el cálculo y los resultados:

Parámetros de referencia		
a _{0r}	608.9	cm/s ²
v _{r max}	59	cm/s
d _{r max}	92	cm
c _r	1274.85	
T _r	166.55	años
H _s	2	
v _c	100	
Zona sísmica	D	
Terreno tipo	I	

Tabla 14.- Parámetros espectrales de referencia

Características de la estructura	
H	13
Bx	20
By	11
Bx/By	1.81818182
H/By	1.18181818
Te	0.49

Tabla 15.- Características de la geometría de la estantería industrial

Características de la estructura	
Tipo de estructura	B1
Clasificación de estructura	2

Tabla 16.- Clasificación de la construcción en referencia con su tamaño y relación con el sector energético o industrial

Factores de sitio y de respuesta	
Fsit	1
Fres	2.5

Tabla 17.- Factor de sitio y factor de respuesta correspondiente a Santa María Tonameca Oax.

Parámetros de espectro de diseño	
a0	490 cm/s ²
c	1225 cm/s ²
Ta	0.10
Tb	0.6
Tc	2
k	1.5
r	0.5
Ts	0.08

Tabla 18.- Parámetros para la construcción del espectro de diseño

Comportamiento sísmico	
$S_{a\{Te,\beta\}}$	1541.58
$a_{\{Te,\beta\}}$	1.57
pb	0.75
ζ_e	0.03
$\beta_{\{Te,\zeta_e\}}$	1.25
$Q'_{\{Te,Q\}}$	1.59
R	2.00

Tabla 19.- Valores de comportamiento sísmico de la estructura

Comportamiento sísmico modificado	
Tex	0.15
a'	0.51
pb	-6.50
$Q'_{\{Te,Q\}}$	1.18
R	2.00

Tabla 20.- Valores de comportamiento sísmico modificado

Características de las cargas					
Entrepiso	Wn (ton)	hn	Wn*hn	Pn	Fn (lb)
10	0.32	12.69	4.04	0.11	61.18
9	0.32	11.32	3.60	0.10	54.57
8	0.32	9.95	3.16	0.09	47.96
7	0.32	8.58	2.73	0.08	41.35
6	0.32	7.21	2.29	0.06	34.74
5	0.32	5.83	1.86	0.05	28.12
4	0.32	4.46	1.42	0.04	21.51
3	0.32	3.09	0.98	0.03	14.90
2	0.32	1.72	0.55	0.02	8.29
1	0.32	0.35	0.11	0.00	1.68
	3.18		25.21		

Tabla 21.- Resultados de carga lateral en la estructura

6.6. Caracterización de la curva momento rotación de los elementos estructurales

Dado que son tres los elementos con configuraciones geométricas ajenas a los de la base de datos de SAP 2000, es necesaria la determinación de la curva momento rotación de cada uno de ellos, para esto se retoman los resultados obtenidos para cada una de las piezas anteriormente.

El momento crítico de pandeo es el único requerido en la investigación, por el enfoque que aborda la misma, los resultados fueron calculados con base a la normativa Americana AISI.

LW 4YM C14

Momento de la seccion		
My	36.29	<i>kip-in</i>
Mcrl	48.63	<i>kip-in</i>
λ	0.86	
Calculo de momentos		
Descripción	y	
	0	
M1/My	0.57	OK
M2/My	0.93	
M3/My	0.47	
$\Delta M/M2$	0.50	
Calculo de rotacion		
Descripción	x	radianes
	0	0
$\theta 1/\theta y$	0.57	0.010
$\theta 2/\theta y$	1.16	0.020
$\theta 3/\theta y$	1.16	0.020

Imagen 22.- Cálculo de parámetros para curva momento rotación correspondiente a larguero LW de 4 ½" Cal 14

PST SENCILLO 121MM C14

Momento de la seccion		
My	60.66	<i>kip-in</i>
Mcr1	136.49	<i>kip-in</i>
λ	0.67	

Calculo de momentos		
Descripción	y	
	0	
M1/My	0.95	OK
M2/My	1.10	
M3/My	0.55	
$\Delta M/M2$	0.49	

Calculo de rotacion		
Descripción	x	radianes
	0	
$\theta1/\theta y$	0.95	0.017
$\theta2/\theta y$	1.50	0.026
$\theta3/\theta y$	1.75	0.030

Imagen 23.- Cálculo de parámetros para curva momento rotación correspondiente a poste sencillo de 121mm Cal14

PST DOBLE 121MM C14

Momento de la seccion		
My	121.59	<i>kip-in</i>
Mcr1	121.59	<i>kip-in</i>
λ	1.00	

Calculo de momentos		
Descripción	y	
	0	
M1/My	0.42	OK
M2/My	0.85	
M3/My	0.43	
ΔM/M2	0.50	

Calculo de rotacion		
Descripción	x	
	0	
θ1/θy	0.42	0.007
θ2/θy	1.00	0.017
θ3/θy	1.00	0.017

Imagen 24.- Cálculo de parámetros para curva momento rotación correspondiente a poste doble de 121mm Cal14

6.7. Calculo de niveles de desempeño para las curvas de momento rotación

Como se mencionó anteriormente, la normativa America FEMA 356 indica los niveles de desempeño para nuevos materiales. Los valores para cada uno de los elementos de acuerdo al nivel de desempeño requerido están dado a continuación:

Vigas LM 4 ½” Cal 14

- Ocupación inmediata: 0.5829
- Salvaguardar la vida: 0.87
- Prevención de colapso: 1.00

Poste sencillo 121mm Cal14

- Ocupación inmediata: 0.75
- Salvaguardar la vida: 1.125

- Prevención de colapso: 1.312

Poste doble 121mm Cal 14

- Ocupación inmediata: 0.502
- Salvaguardar la vida: 0.75
- Prevención de colapso: 0.80

6.8. Modelo en Abaqus

6.8.1. Secciones perforadas

El programa ABAQUS, cuenta con un sinnúmero de herramientas para el desarrollo de modelos cuyo objetivo es implementar un análisis con elemento finito. Debido a la precisión que puede manejar, es posible hacer geometrías caprichosas.

Los perfiles empleados para las estanterías industriales, comúnmente tienen una serie de perforaciones a lo largo de su estructura, esto tiene por objeto reducir el peso de la estructura, implementar varias combinaciones de distribución de estanterías utilizando el mismo producto, e incluso un ahorro en la elaboración de las mismas.

En este caso en particular, las piezas perforadas son únicamente la asnilla doble de 121mm Cal14, el cual se muestra a continuación:

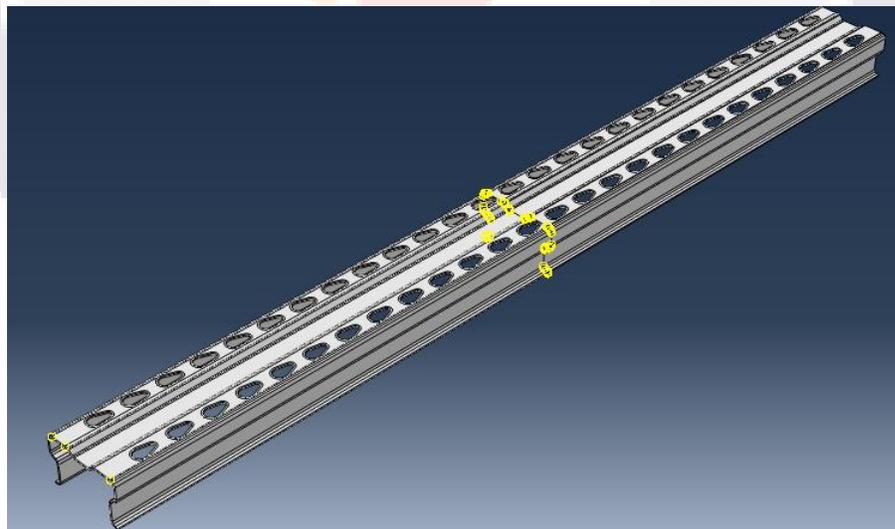


Imagen 25.- Poste sencillo de 121mm Cal 14 desarrollado en ABAQUS

También se desarrollaron las piezas correspondientes a uniones y largueros como se muestra a continuación:

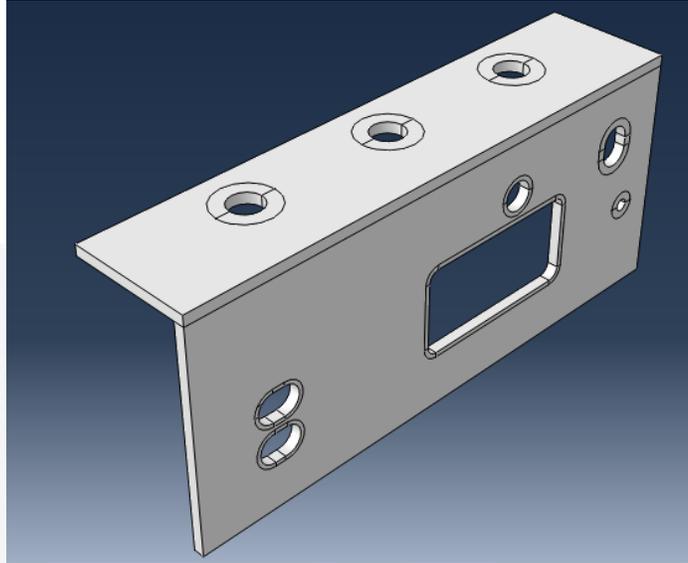


Imagen 27.- Conexión Estándar de tres perforaciones. Fuente: Abaqus

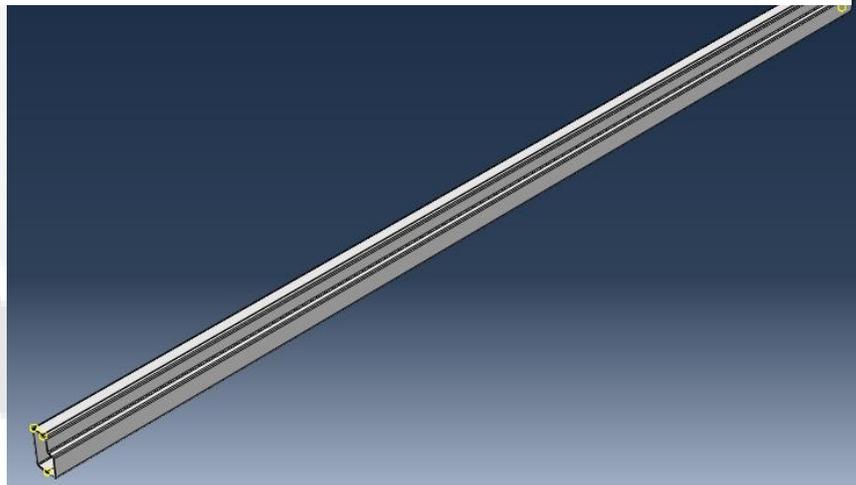


Imagen 26.- Larguero LW 4YM Cal14 desarrollado en ABAQUS

6.8.2. Distribución de cargas en el modelo en ABAQUS

La estantería industrial planteada a lo largo del documento, es un modelo complejo para la interface de ABAQUS, y aunque el programa es capaz de realizar un análisis de este tipo, los tiempos de resultados podrían alargarse. Es por eso que solamente se colocó una sección de la batería en donde podría suceder la falla por pandeo local en los primeros pasos del análisis por desempeño.

La magnitud de las cargas en las secciones son las siguientes:

Tipo de carga	Clasificación	Elemento	Magnitud	
Puntual/ Lateral inferior	Pushover	Asnilla 121mm	26.81	Lb
Puntual/ Lateral central	Pushover	Asnilla 121mm	31.14	Lb
Puntual/ Lateral superior	Pushover	Asnilla 121mm	35.43	Lb
Distribuida/ superior	Carga de producto	Asnilla 121mm	5185.76	Lb
Distribuida/ superior	Carga de producto	Larguero 4YM	5.11	Lb/in

Tabla 22.- Cargas aplicadas al modelo en ABAQUS

La carga lateral fue dividida en veinticinco pasos para su aplicación en el modelo, el objetivo es simular un análisis Pushover, como el propuesto en SAP2000. Como información complementaria, se incluyeron las gráficas momento deformación de los materiales.

6.8.3. Distribución de los elementos

La sección consta de dos filas de largueros y la mitad de una columna de postes dobles, las asnillas consideran una carga distribuida promedio de las cargas puntuales mencionadas anteriormente, actuando de manera lateral simulando la carga sísmica, así mismo se planteó la carga de producto como una fuerza distribuida en la superficie de los largueros y en la superficie del plano XZ. Por último se determinaron los desplazamientos relativos de la parte inferior, central y superior de la asnilla, los cuales se muestran a continuación, para una posterior comparación de resultados.

Desplazamiento en eje Z	
Inferior	0 in
Central	0.14 in
Superior	0.245 in

Tabla 23.- Desplazamiento relativos de las tres secciones de la asnilla 121mm Cal14

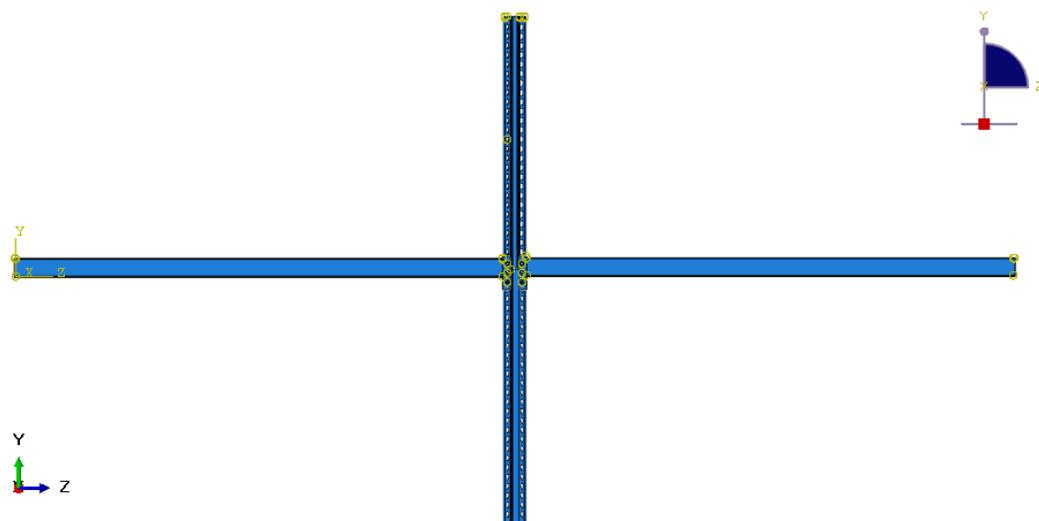


Imagen 28.- Sección de la estantería adecuada al programa ABAQUS



Capítulo 7

Resultados

7. Resultados

7.1. Modelo en SAP2000

El modelo implementado en SAP 2000 arroja una serie visual de resultados ante el análisis por desempeño planteado en la estantería objeto de la investigación.

El programa muestra como a lo largo del aumento de carga lateral se hacen presentes las articulaciones en varios puntos de la estructura, es importante notar como de permanecer es estado de servicio en el paso 17, basta con un paso más (el paso 18) para que aparezca la primera articulación plástica que nos indica un colapso inminente en uno de los postes.

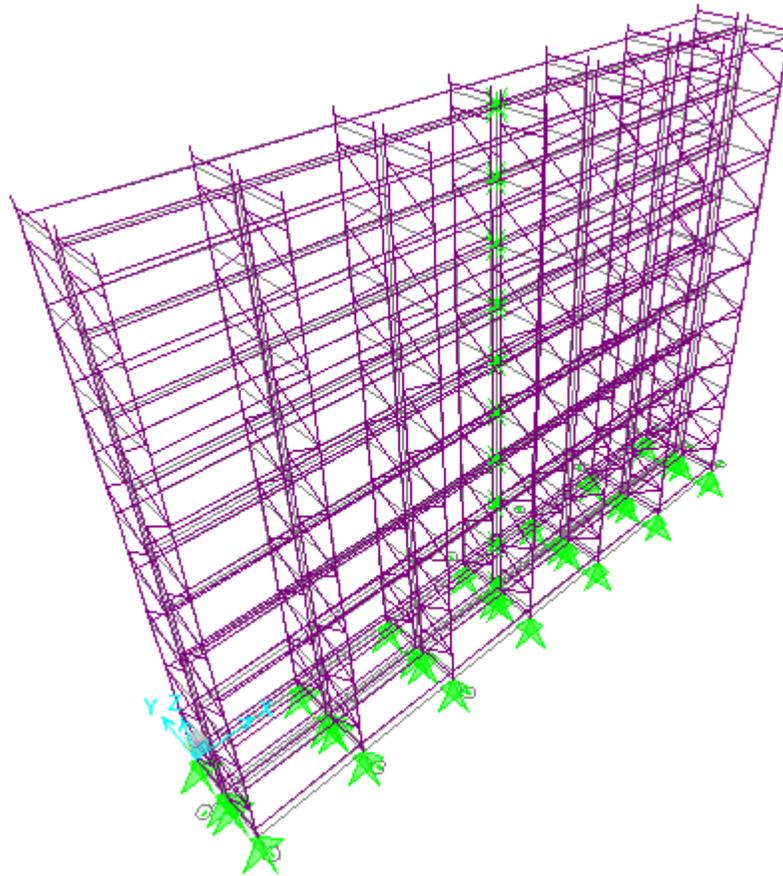


Imagen 29.- Modelo 3D sin deformaciones SAP2000

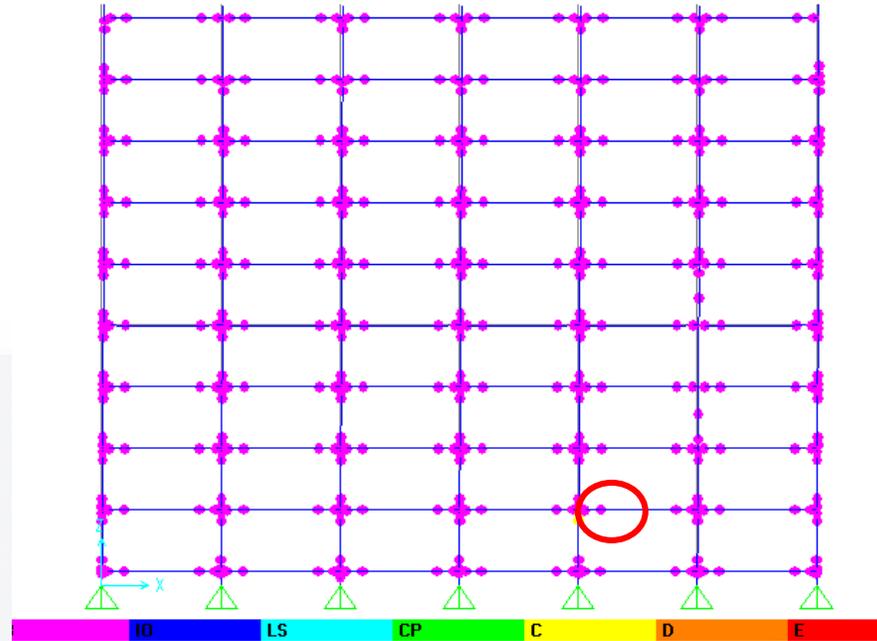


Imagen 30.- Primeras articulaciones plásticas en colapso para la estantería industrial, plano 2D. Fuente: SAP 2000

En los pasos posteriores, se puede observar como las articulaciones plásticas se presentan en más regiones de la estructura, sin embargo, la formación de las primeras articulaciones en el rango de colapso, es suficiente para determinar que la estructura no puede seguir en servicio más allá de ese punto.

Los resultados de desplazamiento en la primera articulación arrojan que 0.1381 in en la dirección Z, en el segundo nivel es suficiente para que se genera una rotula plástica por pandeo local con un comportamiento en el rango de colapso, como se muestra en la siguiente imagen.

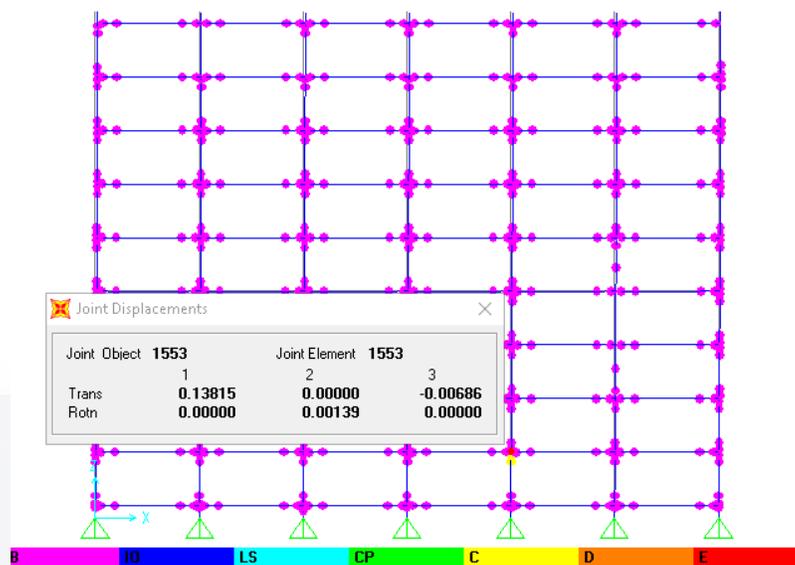


Imagen 31.- Desplazamiento de las primeras articulaciones de colapso de la estructura. Fuente SAP2000

La deflexión máxima permitida en largueros es de un valor de 0.52 in en la sección central del elemento solamente se produce un desplazamiento de 0.036in. Aunque la estantería, en teoría puede seguir funcionando con valores más altos de carga de producto, es con este último valor puede tener un comportamiento optimo si va a estar en una zona sísmica de alto riesgo.

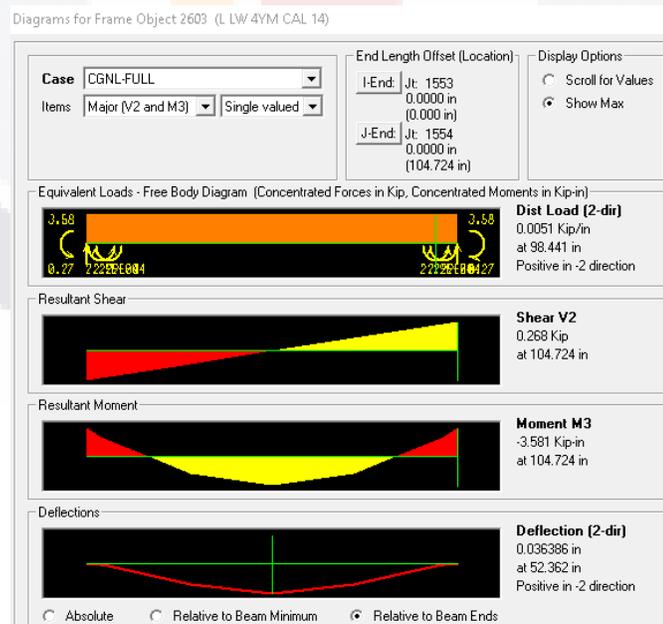


Imagen 32.- Resultados de cortante, momento y deflexiones para el larguero LW 4 1/2" Cal14. Fuente: SAP2000

7.2. Modelo de Abaqus

Se muestra a continuación la porción de la armadura deformada con una escala de 30 veces más, con el fin de percibir los desplazamientos y deformaciones del sistema.

La deformación en vigas es únicamente la provocada por la carga de producto, mientras que para la sección de las aspillas de 121mm aplica de manera consecutiva la carga sísmica en un análisis Pushover.

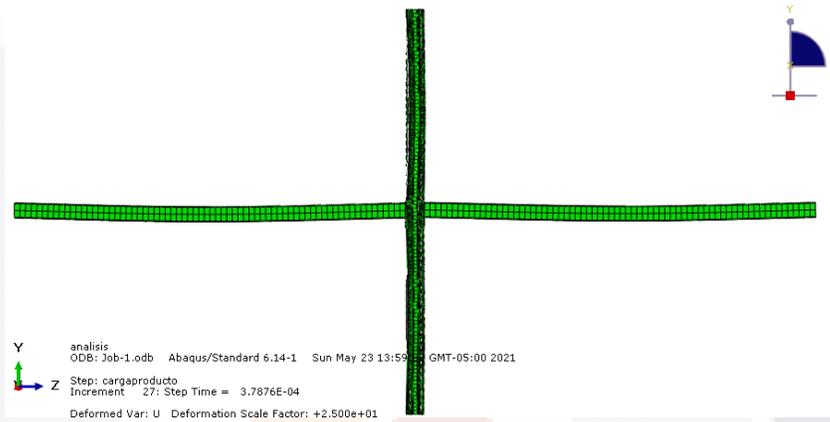


Imagen 33.- Sección deformada. Fuente Abaqus

7.2.1. Desplazamientos

El modelo de Abaqus es capaz de arrojar resultados más allá del punto de fluencia de los materiales, para este caso, en la primera parte se presentan los desplazamientos máximos correspondientes a los nodos inferior, central y superior del modelo, como punto de referencia del análisis. Posteriormente se observa los resultados en los cuales se presentaran los primeros valores de la fluencia del material producto de la configuración de graficas momento deformación en el software.

En cuanto a magnitud de los desplazamientos en la estantería se observa de manera general en la siguiente ilustración.

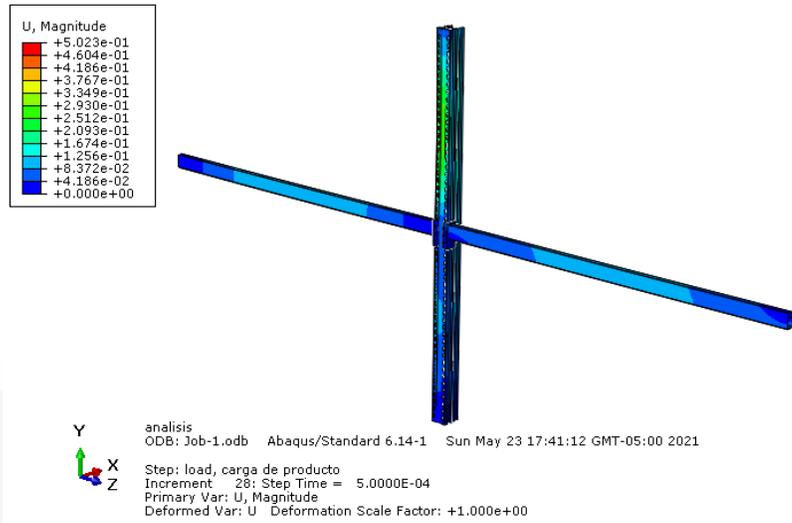


Imagen 34.- Magnitud de los desplazamientos en la estantería modelo. Fuente: Abaqus

De manera individual, se observa que para la asilla de 121mm Cal 14 se obtuvieron desplazamientos máximos de hasta 0.49in, ubicado entre la parte superior y central de la sección más alta del poste, como se muestra a continuación:

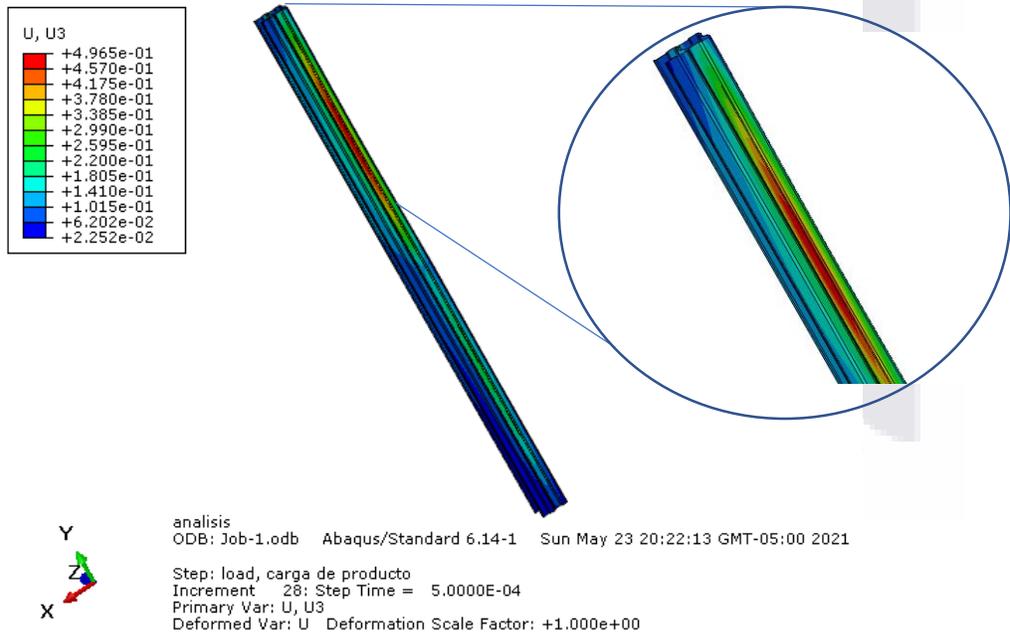


Imagen 35.- Desplazamientos de asilla 12mm en el sentido Z del modelo. Fuente: Abaqus

En cuanto a los largueros de LW 4 ½” Cal 14 se obtienen los principales desplazamientos en la dirección de Y, ubicados al centro de la misma con una magnitud

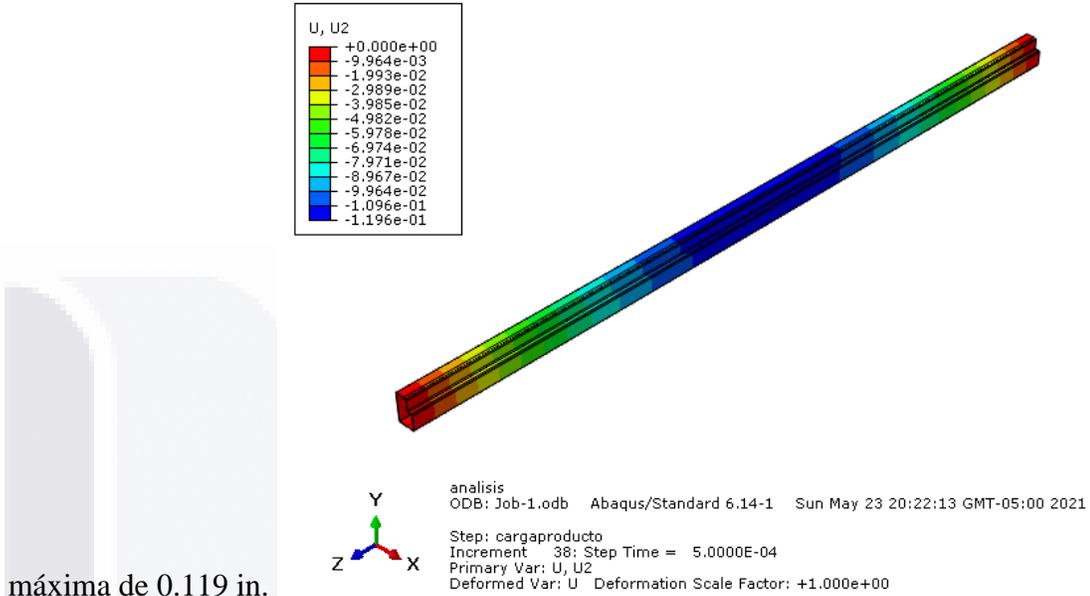


Imagen 36.- Resultados de desplazamientos en Largueros LW de 4 ½” Cal14

7.2.2. Desplazamientos; Fluencia del material.

Se considera que al obtener los primeros datos de la fluencia de las secciones, es el punto comparable con las articulaciones plásticas formadas en la estantería modelada en el programa SAP2000, por lo cual es necesario especificar los desplazamientos que tiene el sistema hasta ese momento. En la siguiente imagen se observa la formación de rotulas plásticas cerca de las conexiones con los largueros.

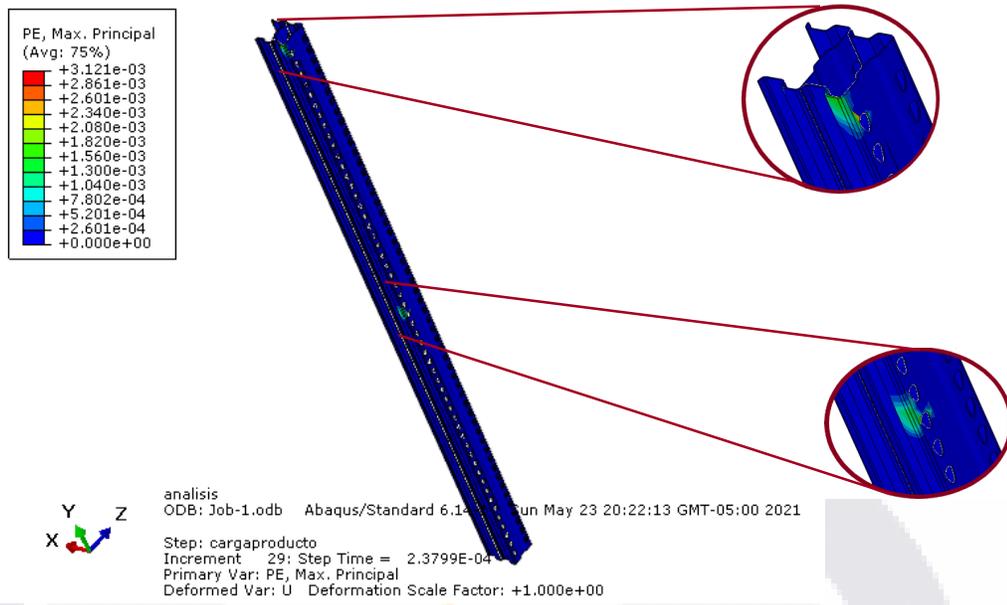


Imagen 37.- Primer plastificación en el sistema de estantería, presentado en la asnilla de 121mm Cal14. Fuente: Abaqus.

En el poste de 121mm Cal 14 se consideran los desplazamientos de los nodos superior, central e inferior para una posterior comparación con los resultados del programa SAP2000:

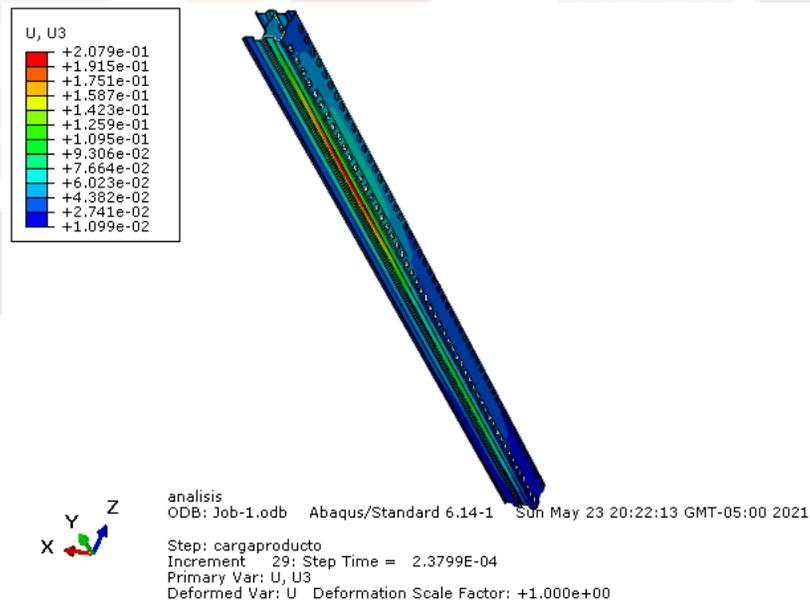


Imagen 38.- Desplazamientos al primer punto de fluencia de la sección 121mm Cal14. Fuente Abaqus

En cuanto a la deflexión obtenida en la sección de larguero LW es de 0.059in como se aprecia en la siguiente imagen:

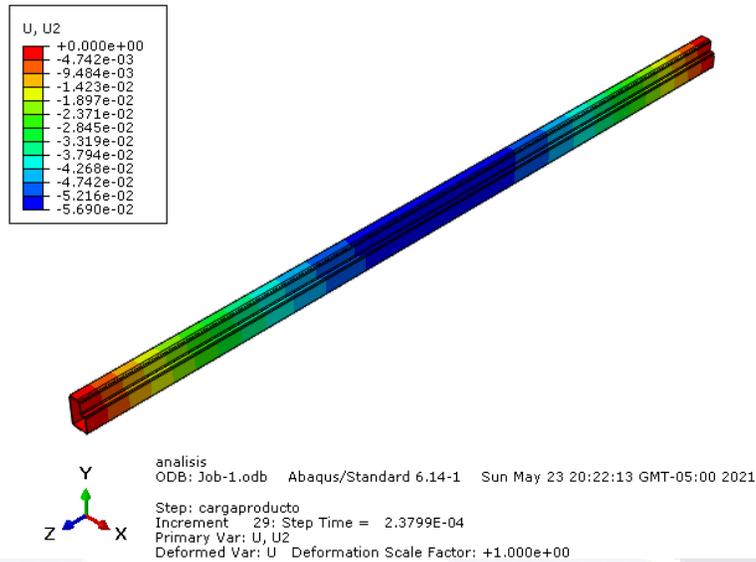


Imagen 39.- Deflexión al primer punto de fluencia del sistema del larguero LW 4 1/2" Cal14. Fuente Abaqus.

Hasta este punto, es necesario realizar una comparación entre los valores del modelo realizado en SAP 2000 y aquellos proporcionados por el software de Abaqus, con el fin comprobar si se trata de modelos coherentes entre sí.

Descripción	SAP 2000 (in)	Abaqus (in)
Deflexión en centro de vigas	0.037	0.057
Desplazamientos		
Inferior	0.0207	0.027
Central	0.1381	0.076
Superior	0.2513	0.093

Tabla 24.- Comparación de desplazamientos en los nodos inferior, central y superior en el modelo de SAP 2000 y Abaqus.

Al observar los resultados de la tabla anterior, se puede llegar a la conclusión que si bien, los modelos no son exactamente iguales la diferencia de desplazamientos se puede atribuir a las condiciones de exactitud entre un programa y otro, como se explica en la interpretación de resultados.

7.3. Discusión de resultados

Para la interpretación y discusión de resultados es necesario considerar varios factores de las capacidades de los programas utilizados en el modelaje de la estantería objeto de la investigación. Por una parte el programa SAP 2000, arroja resultados sencillos, porque así se programó desde el principio; se colocaron las secciones en el módulo de Section Designer para tener las características geométricas precisas de las secciones, sin embargo, no se consideró ningún tipo de perforaciones en los perfiles, por la complejidad y tiempo que puede tomar un análisis de este tipo en un software de esas características.

Por otro lado se tiene el software Abaqus, el cual permite emplear el análisis por elemento finito, este incorpora geometrías complejas para completar cualquier análisis, por esta razón se empleó como una herramienta de apoyo a SAP 2000.

Se colocaron los perfiles con todas sus características, incluyendo la distribución de huecos en las caras frontales de las asnillas de 121mm Cal 14 y su conexión con los largueros LW de 4 ½" Cal 14, perfiles que se han manejado a lo largo de este documento. Con estas características y un correcto manejo de condiciones de apoyo se obtuvo como resultado una sección de la estantería original con un comportamiento coherente al observado en SAP2000.

Retomando la tabla 21 de la sección anterior, se puede observar una diferencia entre los desplazamientos de ambas secciones, la asnilla por un lado, indica que es capaz de soportar una carga ligeramente mayor si se aplica el análisis por elemento finito, permitiendo una deflexión 54% más amplia que la presentada en el primer modelo.

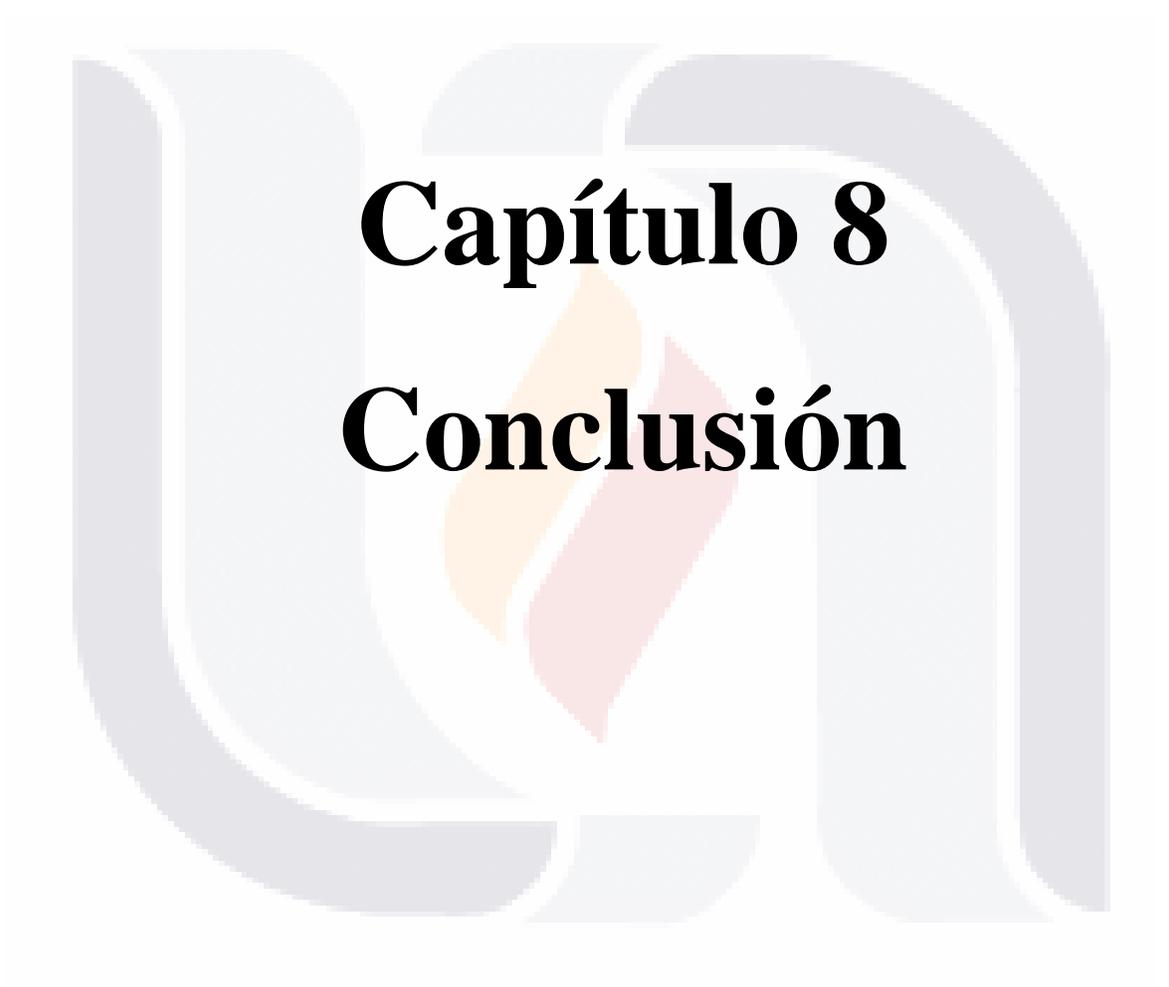
Por otro lado en cuanto a los desplazamientos y formación de rotulas plásticas, en la columna de análisis con Abaqus, se observa que las rotulas se presentan de manera temprana a comparación del modelo de SAP2000. Dichas articulaciones, se generan justo donde existe la conexión con los largueros que soportan la carga de producto, lo cual podría suponer un problema de localización de las mismas antes de que suceda el colapso en la estructura.

En términos generales, las rotulas plásticas comienzan a presentarse en el modelo de Abaqus con desplazamiento central 50% menor al planteado en el modelo completo, y un desplazamiento 75% menor en la sección superior respectivamente.

Existen dos posibles justificaciones para esta diferencia de resultados:

- Los huecos considerados en el modelo jugaron un papel importante en el inicio de la fluencia del material por pandeo local, ya que, además de fallar de manera lateral, el modelo muestra como la concentración de esfuerzos tiende a irse a los huecos circundantes a la zona de falla.
- El análisis por elemento finito combinado con la implementación de las curvas momento-rotación de los elementos permite visualizar resultados de manera más compleja, por la naturaleza del método.

La información obtenida de ambos software resulta valiosa para este tipo de análisis en donde, se considera que la estructura estará en una zona de riesgo sísmico importante, ya que lo que el proyectista considera una diferencia de desplazamientos insignificante, podría resultar en pérdidas humanas y económicas irreparables.



Capítulo 8

Conclusión

8.1. Conclusión

Las estanterías industriales a menudo son consideradas elementos secundarios en cualquier tipo de estructuras, la complejidad geométrica que pueden adoptar sus piezas y la poca información disponible en el ámbito científico inspira la elaboración de este documento.

El análisis por desempeño aplicado en la estantería objeto de investigación permitió conocer el comportamiento de las estanterías bajo cargas sísmicas de una zona de alto riesgo, los resultados son contundentes, la falla por pandeo local será súbita, y al producirse en los elementos verticales (columnas) contradice el principio de columna fuerte – viga débil de un momento a otro, considerando así el sistema irreparable.

Nótese que la exigencia de las vigas a las cargas de producto en este caso son mínimas en comparación a el peso para la que están diseñadas, es de suponerse que la excentricidad producida al someterse a cargas laterales es un factor importante en la generación de rotulas plásticas, por lo tanto, es recomendable establecer un rango de peso máximo permisible en el sistema, con base a un análisis por desempeño previo y específico para estantería en particular.

Los huecos en la estantería implican una reducción en la rigidez del elemento, lo cual podría explicar la falla por pandeo local a un desplazamiento más pequeño en comparación a un análisis con secciones totalmente sólidas.

Continuando con esta línea de investigación, un análisis dinámico en donde se consideren factores de segundo orden $P-\Delta$, podría describir el desempeño de una estantería en zonas sísmicas de alto riesgo con resultados más apegados a la realidad.

Referencias

- AISI STANDAR. (2016). *North America Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. CSA Group.
- Andrei , C., & Adrian , I. (2017). Cold Rolling Effects on Material Properties in Pallet Rack Uprights. *The Open Civil Engineering Journal*, 319-331.
- Andrew T. Sarawit, T. P. (2002). Design of Industrial Storage Racks. *International Specialty Conference on ColdFormed Steel Structures* (págs. 369-384). Orlando: Missouri University of Science and Technology. Obtenido de <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1467&context=iscsccs>
- Ayhan, D., & Schafer, B. (2012). *Moment- Rotation Characterization of Cold Formed Steel Beams*. CFS-NEES-RR02. Obtenido de https://www.ce.jhu.edu/cfsnees/publications/RR02_cfsnees_momentrotation.pdf
- Brown, B. (1983). Seismic Design of Pallet Racking System. *Conference Of Earthquake Engineering*, (págs. 291-305). Wellington. Obtenido de [http://www.nzsee.org.nz/db/Bulletin/Archive/16\(4\)0291.pdf](http://www.nzsee.org.nz/db/Bulletin/Archive/16(4)0291.pdf)
- Comision Federal de Electricidad. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo*. Ciudad de Mexico.
- Dan Duvina, L. F. (2006). Seismic Performance of Cold-Formed Steel Framed Houses. (pág. 8). Bucharest: Anonimo. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/283676565_Seismic_performance_of_Cold-Formed_Steel_Framed_Houses?enrichId=rgreq-70c55e858e53684a3c09d4880c8ac6d3-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MzY3NjU2NTtBUzoyOTQ1NTg4MDcxNTA2MDNAMTQ0NzIzOTcwMTA0NQ%3D%3D&el=1_x_3
- Delma, V., & Almada, N. (2016). *Determinación y Análisis de la gráfica Momento Curvatura de diferentes secciones de vigas de concreto reforzado*. Obtenido de LACCEI: <http://www.laccei.org/LACCEI2016-SanJose/RefereedPapers/RP228.pdf>
- Dubina, D. (2014). Cold-Formed Steel Design. *Design of Steel Buildings with worked examples* (pág. 213). Bruselas: European Comission. Obtenido de https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/2014_07_WS_Steel/presentations/08_Eurocodes_Steel_Workshop_DUBINA.pdf

- Federal Emergency Management Agency. (Octubre de 1997). *FEMA 273*. Obtenido de <https://www.fema.gov>
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandar and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building FEMA 356*. Washington.
- G J Beattie, B. L. (2006). *Seismic Design of High Level Storage Racking Systems with public access*. Obtenido de https://www.eqc.govt.nz/sites/public_files/338-Seismic-design-high-level-storage-racking%28red%29.pdf
- Grassi, A., Ferrara , A., Elisa , G., & Rimini , B. (2014). An optimization model for the design of Rack storage systems. *New Challenges for Sustainable Organizations in Light of Agenda 2030 for Sustainability*, (págs. 1-10). Reggio Emilia. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/272020417_An_optimization_model_for_the_design_of_rack_storage_systems
- Hernández Figueirido, D. (2012). *Estudio experimental del pandeo de perfiles tubulares rectangulares de acero, rellenos de hormigón de alta resistencia bajo carga axial y diagrama de momentos variables*. València: Universitat Politècnica de València.
- Jayaraman, A., Sathyakumar, N., & Senthilkumar, V. (2018). Seismic Performance of Cold Formed Steel and Conventional Steel of Industrial Structures Using Splice Connection. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 422-429. Obtenido de <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v7i4s2/ES2089017518.pdf>
- Kalavagunta Sreedhar, N. S. (2012). Pushover Analysis for Cold Formed Storage Rack Structure. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 6, 489-500. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/275834272_Pushover_Analysis_for_Cold_Formed_Storage_Rack_Structures
- Mihai Nedelcu, A. C. (2014). Analisis of Storage Rack Members by using GBT and SHELL FEA. *7th International Conference on Thin-Walled Structures* (págs. 1-9). Busan: Proceedings of the ICTWS 2014. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/273769919_ANALYSIS_OF_STORAGE_RACK_MEMBERS_BY_USING_GBT_AND_SHELL_FEA
- Quimao, L. (2018). Three-level performance-based optimization methodof steel frames. *Latin America Journal of Solids and Structures*, 18. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/324704574_Three-level_performance-based_optimization_method_of_steel_frames

Rack Manufacture Institute. (21 de Abril de 2008). Specification for Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks. Charlotte, Carolina del Norte, Estados Unidos.

Santamaria, D., Ibai , U., Larrañaga, J., & Ruiz, P. (2018). Comparative analysis of beam to upright connections stiffness in steel pallet racks. *Congreso Nacional de Ingenieria Mecanica* (págs. 1-11). Madrid: UNED. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/331431201_Comparative_analysis_of_beam_to_upright_connections_stiffness_in_steel_pallet_racks

Sarawit , A. T., & Pekos , T. (2006). Optimal Storage Rack Design for a 3-dimentional Compact AS/SR. *International Journal of Production Research*, 1-27. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/4752846_Optimal_Storage_Rack_Design_for_a_3-dimensional_Compact_ASRS

Thin Walled Structure Group. (01 de ABRIL de 2020). *CUFS - CROSS-SECTION ELASTIC BUCKLING ANALYSIS*. Obtenido de <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/about/>

Universidad de Piura. (29 de 08 de 2019). *UDEP*. Obtenido de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_152_179_103_1427.pdf

Yu, W. (2000). *Cold formed steel design*. Estados Unidos de America: Jonh Wiley and Sons Inc.