

Universidad Autónoma de Baja California



Facultad de Ingeniería Ensenada

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

“Evaluación del comportamiento de Vigas Casteleadas”

TESIS

que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

presenta:

HECTOR FERNANDO VELAZQUEZ GURROLA

Ensenada, B. C. a Octubre del 2008.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA**

"Evaluación del comportamiento de vigas casteleadas"

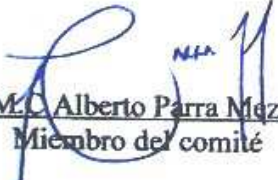
TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Héctor Fernando Velázquez Gurrola

Aprobada por:


M.I. Joel Melchor Ojeda Ruiz
Director de tesis


M.C. Alberto Parra Meza
Miembro del comité


M.I. Ricardo Sánchez Vergara
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Octubre del 2008.



A Dios, por ser simplemente lo más grande.

A mi madre, Olimpia que por su gran ejemplo de amor incondicional y bondad me ha inspirado a ser mejor día con día.

A mi “Nana Abuelita” (Lupita) por ser ella y estar siempre, a mi Nana Filomena (Q.E.P.D.) por cuidarme y preocuparse de todo en su muy particular manera.

A mi padre, Héctor por quien he aprendido que hay que luchar por lo que se quiere.

A mis hermanos, Christian, Armenia y Verónica, porque hemos sido los compañeros en todas las aventuras que nos ha puesto la vida, tanto de chicos y grandes.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, por formarme como Ingeniero Civil, y a la Universidad Autónoma de Baja California por formarme como M.I.

Al CONACyT, por su apoyo para mis estudios, así como también a las empresas en que he trabajado: Mexsteel Design y Ferrominio Culiacán.

Gracias especiales a Ricardo Acosta, José Luis Pérez, Oscar González, Judith Vázquez, Racov Corona, doña Catalina, Jerry y Patsy Crombie, Harry Simpson, German López, Humberto, Beto, Miguel, Gilda, Carolina y todas las personas que han estado compartiendo sus conocimientos y apoyándome de una u otra manera durante los últimos 3 años.

A mi director de tesis M.I. Joel Ojeda por que sin sus ideas y comentarios éste trabajo no habría podido ser concluido, gracias especiales a mis sinodales M.C. Alberto Parra, y M.I. Ricardo Sánchez por su valiosa colaboración y apoyo.

Gracias a todos mis amigos que no alcanzaría a nombrarlos pero pongo unos cuantos: Mario, Jorge, Diego, Marco, Yolis, Antonio, Liliana, Heidi, Everardo, y todos los que han estado apoyándome y a quienes he conocido en estos años, en particular un gran agradecimiento a Heriberto Villarreal porque sin su apoyo no habría podido llevar acabo mi trabajo.



A ti madre, por enseñarme siempre a dar cada paso pensando en lo mejor para todos con determinación y la fuerza del corazón.

A toda mi familia, abuela, padre, hermanos.

A todas las mujeres que me han acompañado durante mi vida y han ocupado un lugar muy importante de una manera u otra: Andrea, Laura, Lupita, Shirley, Claudia, Blanca. A mis primas y primos, a mis tíos y tías.

A todos los que creyeron y esperaron con mis mismas ansias que este proyecto llegara a buen puerto.

A la ciudad de Ensenada y toda su gente que siempre me recogió como parte de ella.

A todos mis amigos, jefes y compañeros de trabajo, porque ¡Por fin!, terminé.

A mi sobrino y sobrinas, porque siempre contarán conmigo para cualquier cosa, mientras Dios nos lo permita.

Dedicatoria especial a todos quienes siempre pidieron porque yo estuviera bien en estos últimos años, porque en verdad lo fue, dedicatoria a todos ellos, de todo mi corazón.

LISTA DE TABLAS

Tabla	Pagina
TABLA 1. ESFUERZO FLEXIONANTE POR COMPRESIÓN PERMISIBLE DEBIDO A COMPRESIÓN EN LA SECCIÓN CUÑA DE LA VIGA CASTELEADA PARA DIFERENTES GRADOS DE ACERO (DIFERENTE ESFUERZO DE FLUENCIA).....	29
TABLA 2. RESULTADOS DE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA VIGA CASTELEADA COMO VIGA SIMPLEMENTE APOYADA.....	47
TABLA 3. DATOS DE ENTRADA PARA LA HOJA DE CÁLCULO.....	47
TABLA 4. COMBINACIONES DE CARGA POR EL ASD EN EL AISC-9ª ED.....	48
TABLA 5. PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL ACERO A992.....	54
TABLA 6. PUNTOS PARA LA GRAFICA ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN EL RANGO PLÁSTICO.....	55
TABLA 7. PROPIEDADES FÍSICAS DEL PERFIL W14X53 (AISC-05).....	70
TABLA 8. VALORES PERMISIBLES DE PANDEO LATERAL Y CONTRA-FLECHA EN VIGAS (ASTM A6-05A).....	76
TABLA 9. PESOS DE VEHÍCULOS Y DEFORMACIÓN ASIGNADA.....	81
TABLA 10. PASOS DE ANÁLISIS POR CARGAS CÍCLICAS DE SERVICIO.....	82
TABLA 11. PASOS DE ANÁLISIS POR CARGAS AL LÍMITE DE RESISTENCIA.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
FIGURA 1. VIGAS CASTELEADAS COMO ELEMENTOS SECUNDARIOS.....	5
FIGURA 2. CORTE CASTELEADO EN ALMA DE PERFIL “W”	6
FIGURA 3. UNIÓN DE LAS DOS MITADES DE LA VIGA POR SOLDADURA.....	6
FIGURA 4. VIGA CASTELEADA FINAL.....	6
FIGURA 5. ESTACIONAMIENTO “PLAZA RÍO”, TIJUANA, B.C.....	7
FIGURA 6. PERFIL W BASE (IZQ.) Y PERFIL DE VIGA CASTELEADA FINAL (DER.), DONDE SE PUEDE APRECIAR EL INCREMENTO EN PERALTE CERCANO AL 50%.....	11
FIGURA 7. CURVA FUERZA DEFORMACIÓN DURANTE LA CARGA INICIAL: REAL E IDEALIZACIÓN ELASTOPLÁSTICA.....	22
FIGURA 8. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA VIGA CASTELEADA.....	28
FIGURA 9. ALGORITMO DE DISEÑO Y REVISIÓN DE VIGAS CASTELEADAS.....	36
FIGURA 10. EJEMPLO DE VIGA SECUNDARIA A ESTUDIAR. (PRESICHI, 2005).....	43
FIGURA 11. DIAGRAMA DE CARGAS MUERTA DE SERVICIO PARA LA VIGA CASTELEADA.....	44
FIGURA 12. DIAGRAMA DE CARGA VIVA DE SERVICIO PARA LA VIGA CASTELEADA.....	44
FIGURA 13. DIAGRAMAS PARA CARGA DISTRIBUIDA (TABLA 3-23 AISC-2005).....	45
FIGURA 14. PASOS 1 A 3 EN LA HOJA DE CÁLCULO.....	48
FIGURA 15. PASO 4 EN LA HOJA DE CÁLCULO.....	49
FIGURA 16. PASO 5 Y 6 EN LA HOJA DE CÁLCULO.....	49
FIGURA 17. PASOS 7 Y 8 EN LA HOJA DE CÁLCULO.....	50

FIGURA 18. PASO 9 EN LA HOJA DE CÁLCULO.....	51
FIGURA 19. PASOS 10 Y 11 EN LA HOJA DE CÁLCULO.....	52
FIGURA 20. DETALLE DE LOS EXTREMOS DE LA VIGA CASTELEADA.....	56
FIGURA 21. DETALLE DE LAS ABERTURAS EN EL ALMA DE LA VIGA CASTELEADA.....	56
FIGURA 22. CONDICIONES DE APOYO PARA VIGA MODELADA.....	57
FIGURA 23. TIPO DE ANÁLISIS PARA CALIBRADO DE MODELO.....	70
FIGURA 24. PERFIL SÓLIDO “W14X53” PARA ANÁLISIS DE CALIBRADO.....	71
FIGURA 25. RESULTADO DE CARGA (P=18270 N) PARA UNA DEFLEXIÓN INDUCIDA (15 MM).....	72
FIGURA 26. MODO DE PANDEO DE SELECCIONADO (MODO 2).....	75
FIGURA 27. GRÁFICA MOMENTO MÁXIMO – ROTACIÓN DE ANÁLISIS POR CARGA MONOTÓNICA.....	78
FIGURA 28. INCREMENTO EN EL QUE SE ACTIVA EL PANDEO. (DEFLEXIÓN = 84.95 MM, MOMENTO = 624.64 KN-M).....	79
FIGURA 29. INCREMENTO AL PUNTO DE LA FALLA. (DEFLEXIÓN = 120.26 MM, MOMENTO = 565.21 KN-M).....	80
FIGURA 30. GRAFICA DE MOMENTO MÁXIMO – ROTACIÓN DE ANÁLISIS POR CARGA CÍCLICA DE SERVICIO.....	83
FIGURA 31. GRAFICA DE MOMENTO MÁXIMO – ROTACIÓN DE ANÁLISIS POR CARGA CÍCLICA HASTA LA MÁXIMA RESISTENCIA.....	85
FIGURA 32. INCREMENTO EN EL QUE SE ACTIVA EL MODO DE PANDEO (DEFLEXIÓN=82.88 MM; MOMENTO = 624.64 KN-M).....	86
FIGURA 33. INCREMENTO EN EL QUE SE PRESENTA LA FALLA (DEFLEXIÓN=120.0 MM; MOMENTO = 569.36 KN-M).....	87
FIGURA 34. GRAFICA MOMENTO-ROTACIÓN QUE MUESTRA LA ENVOLVENTE DE CARGA MONOTÓNICA SOBRE CARGA CÍCLICA.....	88

INDICE

	Página
LISTA DE TABLAS	III
LISTA DE FIGURAS.....	IV
 CAPITULO 1	
1.0 ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1 Resumen.....	2
1.2 Abstract.....	3
1.3 Estado del arte.....	4
1.4 Definición de la Metodología.....	9
1.5 Objetivos y alcances de la tesis.....	12
 CAPITULO 2	
2.0 DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES.....	16
2.1 Descripción de Especificaciones.....	17
2.1.1 Análisis Estructural.....	18
2.1.2 Selección de opción más apta de perfil de prueba.....	18
2.1.3 Descripción de las propiedades geométricas de la sección cuña de la viga.....	19
2.1.4 Cálculo de esfuerzos para la viga casteleada.....	19

2.1.5 Características geométricas de la sección “T”	20
2.1.6 Propiedades geométricas de la viga casteleada.....	20
2.1.7 Revisión final de los esfuerzos permisibles por la viga casteleada.....	20

CAPITULO 3.

3.0 APLICACIÓN DE ESPECIFICACIONES.....	23
3.1 Aplicación de Especificaciones de diseño.....	24
3.1.1 Determinación del algoritmo paso a paso.....	25
3.1.2 Definición del algoritmo de diseño y revisión paso a paso.....	35

CAPITULO 4.

4.1 UN CASO DE ESTUDIO.....	37
4.1 Descripción del proyecto.....	38
4.2 Descripción de la metodología.....	41
4.2.1 Procedimiento de análisis en Abaqus.....	41
4.2.2. Análisis de predicción de modos de pandeo.....	41
4.2.3 Análisis estático de Esfuerzos.....	42
4.2.4 Análisis introduciendo imperfecciones al modelo.....	42
4.3 Modelo de análisis.....	43
4.3.1 Obtención de los datos de entrada para la hoja de cálculo.....	43
4.3.2 Uso del procedimiento de diseño para encontrar la Viga Casteleada a modelar.....	48

4.3.3 Implementación del modelo en ABAQUS.....	53
4.3.3.1 Modelado en Abaqus/CAE.....	53
4.3.3.2 Formato del archivo de entrada (INPUT FILE).....	58
4.4 Calibración del modelo.....	70
4.4.1 Resultados del cálculo analítico de deflexiones.....	72
4.4.2 Resultados del Modelo de Elementos Finitos.....	72
4.4.3 Conclusión de la calibración del modelo.....	73
4.5 Resultados.....	74
4.5.1 Análisis de modos de pandeo.....	74
4.5.2. Análisis por carga monotónica.....	77
4.5.3. Análisis por cargas de servicio.....	81
4.5.4. Análisis de ciclos de carga hasta la falla.....	84
 CAPÍTULO 5.	
5.0 Conclusiones y recomendaciones.....	89
5.1 Conclusiones.....	90
5.2 Recomendaciones.....	91
 ANEXOS.....	94
 REFERENCIAS.....	131



Capítulo 1

Estado del arte



1.1 Resumen

Las Vigas Casteleadas (Castellated Beams), de gran uso en estructuras de estacionamientos en las décadas de los 60's y 70's en E.U.A. han cobrado gran popularidad en México en los últimos años, así el día de hoy se ve una gran cantidad de nuevos edificios en el estado de Baja California usando este sistema estructural para vigas secundarias. Sin embargo, no existe documentación o bibliografía en México que nos de un panorama acerca del comportamiento de este elemento estructural y su seguridad o que nos de una guía en cuanto a su proceso de diseño y análisis.

El presente trabajo, brinda un panorama que satisfaga la necesidad de información al respecto del comportamiento de una viga casteleada como elemento secundario en un edificio de estacionamientos, partiendo de las especificaciones existentes de diseño de vigas casteleadas (Blodgett, 1966) las cuales pueden ser utilizadas, puesto que por ser un elemento secundario necesita ser diseñado para mantenerse en el rango elástico, para así conservar la estabilidad del diafragma de entrepiso y la implementación de una hoja de cálculo que permita semi-automatizar el procedimiento de diseño y revisión del comportamiento. De esta manera se puede contar con un elemento estructural real sobre el cual poder hacer un modelado por elementos finitos, usando Abaqus/Standard y Abaqus/CAE, poderosas herramientas específicamente orientadas al análisis por elementos finitos (FEA) de cualquier tipo de estructura o elemento estructural. Se hace uso de la versión Abaqus 6.8.1. Se aplican diferentes tipos de análisis: extracción de modos de pandeo de la viga, carga cíclica simulando el flujo vehicular de un estacionamiento, carga monotónica que permita llevar al elemento hasta sus estados límites de esfuerzos y carga cíclica que de la misma manera le lleve a los límites de esfuerzos. Esto brindará un panorama acerca de la resistencia última de la viga contra la resistencia de diseño y así obtener un factor de “sobre-resistencia” del elemento para este tipo de estructura en particular.



1.2 Abstract

Castellated beams formed used as secondary members on parking structures on the 60`s and 70`s in USA, have become very popular in recently years here in Mexico. Thus nowadays we can see how big buildings are built using this type of elements not just in parking structures but any kind of them here in Baja California. However there is few or no information or any documentation that can lead us through a reliable design or revision procedure here in Mexico.

This study, will provide the information needed in order to understand the behavior of castellated beams as a secondary member on a parking building structure, using former design method of castellated beams (Blodgett, 1966) thus since a secondary beam needs to be design to keep its resistance among the elastic behavior in order to maintain the diaphragm stability of the story, and the aid of a spreadsheet that allow us to go through the design and revision processes. Thus, it is possible to obtain a castellated beam where a Finite Element Model Analysis using Abaqus/standard and Abaqus/CAE can be developed, both, powerful tools in the Finite Element Analysis (FEA). Abaqus v 6.8.1 is used on this modeling and analysis procedures. Several analyses will be developed: buckling modes extraction, cyclic analysis of the beam simulating the vehicle flow over the element, and monotonic loading, or load increments in order to carry the beam to limit states. Also an analysis that will allow to see graphically the resistance limits of the model against the resistance limits of the design method and specifications is developed, concluding, thus with an over-resistance factor for this particular structural element.



1.3 Estado del arte.

Atendiendo a la necesidad de abaratar costos y optimizar procedimientos, generalmente en la construcción de edificios, son realizadas pruebas y experimentos con nuevas formas de diseñar y construir que puedan dar solución a los problemas anteriores. De tal forma que se busca ahorrar la mayor cantidad de dinero, obteniendo los mejores resultados posibles en cuanto a resistencia, seguridad y estética. Blodgett en su libro “Design of Welded Structures” señala: *“Ahorros importantes pueden obtenerse de un casi olvidado concepto de diseño. Las vigas expandidas de alma abierta han dejado dividendos significativos para varias firmas de ingenieros. Debería ser considerado para muchos proyectos”* (Blodgett, 1966).

También comenta que: *“En el diseño de edificios, las aberturas en el alma de las vigas son usadas frecuentemente para trabajos de ductos, tuberías, etc. Los cuales convencionalmente son suspendidos debajo de la viga. Con estas bases para fuerza equivalente, las vigas casteleadas usualmente permiten una reducción en la distancia entre la parte inferior del cielo y el entrepiso y así proporciona ahorros en la altura del edificio”* (Blodgett, 1966).



De acuerdo a los anteriores requisitos de tanta importancia en los sistemas estructurales, se ha encontrado el sistema constructivo de reciente introducción a México, y en particular en el estado de Baja California, en ciudades como Ensenada, Rosarito y Tijuana, *“las vigas casteleadas son ligeras y fuertes, baratas y ¡tienen clase! además de ser fácil de ensamblar en el lugar de trabajo”* (Grünbauer, 2005). Es un sistema a base de vigas comunes tipo W, que han sido cortadas en su eje transversal, separadas, desfasadas y vueltas a unir, para así obtener un peralte mucho mayor al original, incrementando de esta forma su resistencia nominal al mismo tiempo que se logra aligerar la sección gracias a los huecos que se forman en el alma. Esto permite a su vez que sean estéticamente ‘agradables a la vista’; *“En general, los ahorros en cuanto a peso están alrededor del 40%, lo cual se traduce en ahorro en dinero, alrededor del 10% cuando se trata de salvar claros cortos y 25% para claros largos”* (Modern Steel Construction, March 2005). Un ejemplo de vigas casteleadas como elementos secundarios se muestra en la figura 1.

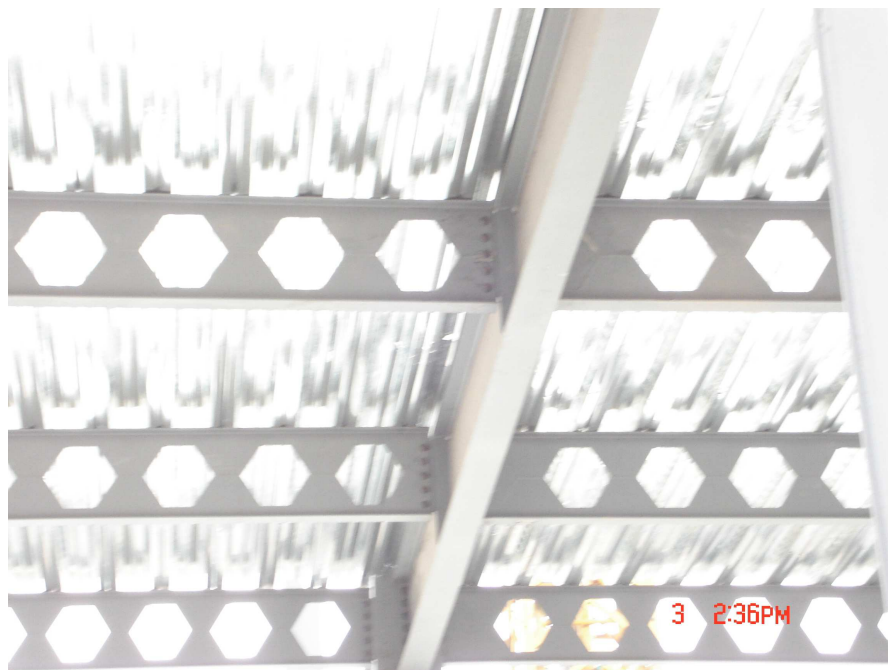


Figura 1. Vigas Casteleadas como elementos secundarios



Las vigas casteleadas significaron una gran solución para ahorros en construcción de edificios de acero en los años 60's y 70's en los Estados Unidos de Norteamérica, y han tenido reciente popularidad en México. Se parte del trazado de un patrón de corte tipo zig-zag longitudinal a lo largo de un perfil de patín ancho "W" como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Corte casteleado en alma de perfil "W"

El siguiente paso es separar el alma, y girar la parte superior para después hacer coincidir la parte cuña de cada mitad (figura 3), después soldar de nuevo y retirar los extremos que son desperdicio.



Figura 3. Unión de las dos mitades de la viga por soldadura

Luego de deshacerse del pequeño desperdicio resultante, se tiene ya la sección terminada de la viga casteleada (Figura 4), habiendo ganado hasta un 50% en resistencia, por encima de su perfil "W" base.



Figura 4. Viga Casteleada final.



En cuanto a las ventajas que ofrece, luego de las ya mencionadas anteriormente, se encuentra el hecho de que permiten fácil manejo de instalaciones para los techos debido a los agujeros en el alma de las vigas, además estos mismos, al darle el toque estético a la estructura, provocan que sean comúnmente usadas donde puedan ser admiradas por cualquier persona, en particular son muy recurrentes para las construcciones de estacionamientos. Esto luego de que sean estos tipos de estructuras los que sean más beneficiados al cumplir prácticamente con todas las características antes descritas. En la figura 5 se muestra el estacionamiento de la Plaza Río ubicado en Tijuana, B. C. el cual cuenta con éste tipo de elementos en su estructura.



Figura 5. Estacionamiento “Plaza Río”, Tijuana, B.C.



Al ser este tipo de construcciones, las mas recurridas para este tipo de estructuras, se toma el ejemplo la propuesta del Edificio de Estacionamientos de la Universidad Autónoma de Baja California, campus Ensenada (Presichi, 2005), para proponer un elemento secundario estructural que pueda satisfacer las necesidades de resistencia de la estructura en cuestión, así como también, pueda contribuir en el ahorro del peso final en la estructura. *“Los claros en los estacionamientos están dentro del rango de 18 metros, los cuales para salvar con una viga de patín ancho se debiera buscar una W30x90 o una W27x84 como mínimo, mientras que con una viga casteleada se salvaría con un miembro de 30 x 50 lo cual representa prácticamente el 50% de ahorro en costos”* (Sevak, 1999).

Sin embargo, al ser elementos formados a partir de perfiles de patín ancho (W), no se conocen a la perfección sus propiedades geométricas de tal forma que se puedan usar para el diseño de una estructura; esto ya que influyen muchas variables para el diseño de un elemento tales como: ángulo de corte del patrón de zig-zag, largo de los agujeros, incluso se podría controlar el porcentaje aproximado de incremento de sección con respecto del perfil de origen. En atención a esto, Omar Blodgett, ha desarrollado en su libro *“Design of welded strcutures”* (Blodgett, 1966) un método estructurado ‘paso a paso’ de diseño y revisión de Vigas de alma abierta o Vigas Casteleadas sustentado en las especificaciones vigentes a la fecha, análisis por esfuerzos permisibles (AISC ASD, 1989). Éstas ofrecen una gran ayuda y guía para automatizar proceso del diseño de la viga que terminan por arrojar como resultado el perfil más adecuado que cumpla a su vez con las especificaciones de diseño, tomando en cuenta que un miembro secundario de una estructura como es el caso que se presenta en este edificio, deberá mantener su comportamiento siempre en el rango elástico para no comprometer la estabilidad del sistema de piso en caso de llegar a formar una articulación plástica.



Es también de destacar que a través de algunos estudios en este tipo de elementos se ha logrado identificar ciertos modos de falla a presentarse debido a circunstancias especiales tanto en condiciones de carga como debido a las propiedades mismas de la viga casteleada. Estas condiciones especiales son por ejemplo, el alto grado de esbeltez que se pudiera llegar a tener en el alma de la viga, al ser un perfil final muy peraltado y tener un espesor de alma relativamente esbelto, esto podría llevar a una falla por pandeo en el alma de la viga (Aglan y Redwood, 1974). Otro modo de falla es nombrado Vierendeel y se debe a la insuficiente capacidad de resistencia en las secciones “T” superior e inferior de la viga casteleada, la falla que se puede apreciar en este modo de falla es por cortante en los puntos de concentración de esfuerzo por las aberturas en la viga (Blodgett, 1966), principalmente en las zonas cercanas a los apoyos. Por último el modo de falla por flexión pura, que se presenta al perder capacidad de resistencia, la zona central de la viga sometida a momentos flexionantes superiores al de fluencia soportado por el elemento (Blodgett, 1966). De la misma manera es considerado que los requisitos de servicio tales como la deflexión máxima por el elemento no sea sobrepasada (AISC-2005).



1.4 Definición de Metodología.

En su libro “Design of Welded Structures” Omar Blodgett define el método de análisis y diseño para vigas casteleadas paso por paso, partiendo de las condiciones iniciales de diseño para cualquier elemento estructural: sus cargas de servicio.

Para usar el método es necesario conocer las condiciones iniciales de carga a las que estará sometida la viga, esto a partir del análisis estructural de la misma en base a su longitud y condiciones de apoyo, así se obtienen las fuerzas actuantes tales como: momento y cortante. También se determina el tipo de acero a usar (grado del material asociado a su resistencia) y el ángulo del patrón de corte a trazar en el alma de la viga.

Partiendo de las condiciones iniciales señaladas anteriormente, el proceso es muy práctico y fácilmente dirigido a su objetivo: se obtiene un módulo de sección requerido para la viga que pueda salvar el momento actuante al centro del claro, y se propone un factor de proporción entre el perfil base y el que se quiere tener como resultado, éste, generalmente está cercano o es el 50% del peralte inicial. Con este dato se puede obtener la primer propuesta de viga casteleada.

Los siguientes procedimientos que se llevan a cabo sugieren la definición del patrón de corte a lo largo del alma de la viga, altura de la sección, y sus respectivas revisiones de esfuerzos y cargas tanto a flexión como a cortante, así como también se requiere el cumplimiento con ciertas restricciones mínimas basadas en el estudio de esfuerzos permisibles dentro de la sección. Se revisa la capacidad de ambas secciones: completa y cuña (perteneciente a la parte donde se ha hecho el corte del alma) de soportar los esfuerzos tanto cortantes como flexionantes.



Una vez realizado la revisión de dichas especificaciones y luego de que se determine que ambas secciones son capaces de soportar los esfuerzos actuantes, se empiezan a determinar las propiedades geométricas de la sección completa, y se procede a hacer la revisión de los esfuerzos teniendo ya la viga como un elemento completo sujeto a las cargas de momento flexionante actuantes a lo largo de la longitud de la misma. Si en cualquier momento de la revisión de esfuerzos se determina que la sección no es apta, el proceso se tiene que reiniciar, proponiendo un perfil base diferente. Al final se cuenta con un perfil con una sección mucho más peraltada, cercana al 50% de incremento con respecto de la sección inicial como se muestra en la figura 6.

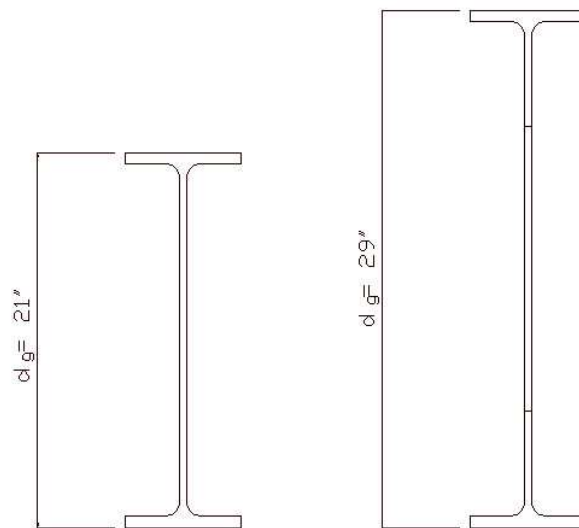


Figura 6. Imagen fuera de escala donde se muestra un incremento en peralte cercano a un 50% de la casteleada (der.) con respecto de la viga sólida (izq.).



Con la nueva sección de la viga, se define un modelo de elementos finitos usando el programa Abaqus v 6.8.1, este permite establecer cual es el mejor tipo de elementos finitos a que recurrir para representar de mejor manera el modelo y así también obtener unos resultados mas confiables.

Una vez definido el tipo de elementos finitos que formaran el modelo y la cantidad y tamaño de los mismos, también es necesario definir las condiciones de frontera que regirán el comportamiento del modelo en los apoyos y el tipo de análisis que habrá de llevarse a cabo.

Siendo Abaqus un programa en general para modelado de cualquier elemento del cual se puedan determinar sus propiedades físicas, es muy importante saber que resultados son relevantes para cada tipo de análisis y de esa forma hacérselo saber al programa, esto, permitirá obtener resultados mucho mas útiles para satisfacer las necesidades de cada tipo de análisis en particular.

Abaqus cuenta con una interfaz gráfica que permite tener una muy buena perspectiva al respecto de lo que ha ocurrido en el modelo a lo largo de un proceso de análisis, también es posible obtener la información de datos de interés particulares para procesarlos en una hoja de cálculo y tener gráficas que describan el comportamiento del modelo durante un caso de análisis determinado.



1.5 Objetivos y alcances de la tesis.

Para lograr el propósito pretendido por este trabajo, es necesario establecer claramente los objetivos que han de guiar a través del proceso de diseño, modelado y análisis por elementos finitos de la viga casteleada como elemento secundario para el edificio de estacionamientos de la UABC. Estos se describen a continuación:

- Definición de las especificaciones del método de diseño paso a paso para vigas casteleadas como elementos secundarios (Blodgett, 1966).
- Crear una hoja de cálculo que permita facilitar el proceso de diseño y semi-automatizarlo, así como también determinar las características geométricas y propiedades físicas tanto de la viga “W” base como de la nueva Viga Casteleada generada después del proceso.
- Diseñar una Viga Casteleada como elemento secundario para el edificio de estacionamientos, partiendo de las cargas obtenidas en el diseño previo de la estructura.
- Modelado de la Viga Casteleada en Abaqus/CAE y hacer pruebas con casos preestablecidos de apoyos y carga para calibrar y comprobar resultados.
- Análisis de los modos de pandeo en la viga para obtener el modo de pandeo más desfavorable a presentarse posiblemente de acuerdo a las condiciones de la viga.



- Determinar las imperfecciones máximas permisibles por el AISC-2005 para aplicar al modelo y así observar la presencia de un modo de pandeo que pudiera llevar a la falla al elemento.
- Análisis de la viga casteleada por carga monotónica que permita trazar una gráfica del comportamiento en función de Momento-Rotación.
- Análisis de la viga casteleada por ciclos de carga, aplicando las cargas de servicio, usando como cargas el peso de los vehículos, que permita observar el rango de esfuerzos al que estará sometida la viga con una gráfica de Momento-Rotación.
- Análisis de la viga casteleada por ciclos de carga hasta llevarla a la falla, que permita obtener una gráfica de Momento-Rotación.
- Determinar el porcentaje de Sobre-Resistencia de la viga en la falla contra la resistencia de la viga por cargas de servicio aplicadas durante el método de diseño.



Al final del trabajo se presentarán las gráficas que han de brindar un claro panorama del comportamiento de un ejemplo de viga casteleada para un caso particular y se podrán hacer recomendaciones o sugerencias con respecto al uso de Vigas Casteleadas como elementos secundarios para cualquier estructura. Será posible también identificar mediante graficas de resultados el factor de sobre-resistencia de los resultados del modelado de esta viga con respecto a lo especificado en el reglamento de construcción de acero por esfuerzos permisibles ASD 9ª Edición.

Se podrá contar con un proceso de diseño y revisión confiable basado en las especificaciones de diseño por esfuerzos permisibles. Además de un procedimiento de modelado y análisis bien definido del uso del programa de análisis por elementos finitos Abaqus V6.8.1.

Capítulo 2

Descripción de Especificaciones



2.1 Descripción de Especificaciones.

El método de diseño elaborado por Omar Blodgett, y presentado en su libro “*Design of Welded Structures*” de 1966 consiste en la revisión del comportamiento de las vigas con agujeros en el alma, de alma abierta o mejor conocidas en la actualidad como vigas casteleadas con respecto a esfuerzos permisibles. Esto representa una buena opción para diseñar y revisar el comportamiento de una viga casteleada como elemento secundario, puesto que permite que la viga se mantenga siempre en el rango elástico de comportamiento.

Es posible separar el método de diseño de Vigas Casteleadas por módulos, éstos podrían ser definidos de la siguiente manera:

- Análisis Estructural.
- Selección de opción más apta de perfil de prueba.
- Cálculo de propiedades geométricas de la sección cuña de la viga casteleada.
- Cálculo esfuerzos para la sección de la viga
- Características geométricas de la sección “T” de la viga.
- Propiedades geométricas y físicas de la sección transversal de la viga casteleada final.
- Revisión final de los esfuerzos permisibles por la viga casteleada.



2.1.1 Análisis Estructural

Un paso previo que podría ser incluso llamado paso 0, es el tan necesario análisis estructural previo y la obtención de los diagramas de fuerzas presentes en el elemento a diseñar, Fuerza cortante y Momento flexionante, además de definir claramente el tipo de material (grado del acero asociado a su resistencia) a usar o disponible, como la longitud a considerar de viga. Luego de estas consideraciones se procede al método de diseño.

2.1.2 Selección de opción más apta de perfil de prueba.

Paso 1. *Corresponde a la obtención del módulo de sección requerido para satisfacer el requerimiento de resistencia por Momento Flexionante al centro del claro de la viga.*

Paso 2. *Proponer la relación deseada de diferencia entre el peralte de la viga base y la nueva viga casteleada, ésta relación de antemano se recomienda no mayor al 50% de incremento en altura.*

Paso 3. *De las tablas de propiedades geométricas de secciones de patín ancho “W”, obtener el módulo de sección inmediato superior al requerido, y recalcular la relación de diferencia entre el peralte de la viga original y la viga casteleada de prueba.*



2.1.3 Cálculo de propiedades geométricas de la sección cuña de la viga.

Paso 4. *Se calcula la altura de corte a través del alma, así como también se revisa la altura mínima restante de la viga en forma de “T” para resistir el cortante. Esta revisión provoca considerar si la viga de prueba que ha sido seleccionada con el corte propuesto será apta para continuar el proceso, de no soportar el cortante, habrá que reiniciar el proceso con un nuevo perfil de prueba.*

Paso 5. *Determinación de las características geométricas de la sección “T” (por su sección transversal) y cuña (por su sección longitudinal).*

2.1.4 Cálculo de esfuerzos para la viga casteleada.

Paso 6. *Basándose en las especificaciones de revisión de esfuerzos, revisar los esfuerzos permisibles de la sección, flexionantes y de cortante, éste es otro punto de revisión para decidir si la sección puede continuar o es necesario proponer un nuevo perfil de prueba.*

Paso 7. *Cálculo del esfuerzo cortante máximo permisible por la sección “T” de la viga casteleada.*



2.1.5 Características geométricas de la sección “T”.

Paso 8. *Obtención y comprobación de la longitud mínima de la cuña de sección “T” a lo largo de la viga casteleada tomando en cuenta el resultado del cortante en el paso anterior. De ésta manera también se comprueba si es viable continuar con ésta viga de prueba inicial, o reiniciar el proceso con una nueva propuesta.*

2.1.6 Propiedades geométricas de la viga casteleada.

Paso 9. *Cálculo de las propiedades geométricas y físicas de la sección transversal para la viga casteleada final, y de la sección “T” de la misma, determinar sus propiedades elásticas y plásticas para ser utilizadas en la revisión final.*

2.1.7 Revisión final de los esfuerzos permisibles por la viga casteleada.

Paso 10. *Cálculo de los esfuerzos de flexión permisibles y actuantes en la sección cuña de la viga.*

Paso 11. *Cálculo final de los esfuerzos a lo largo de la viga casteleada final y el momento flexionante al centro del claro.*



La utilización de éste método de diseño de vigas casteleadas nos permite tener la certeza de que se está usando un método validado al nivel de especificaciones de diseño, que permitirá a la viga mantener su comportamiento en el rango elástico. Una vez desarrollado este punto, el siguiente proceso se centrará en el diseño de un ejemplo que pueda ayudar a modelar, por elementos finitos, el comportamiento de un elemento secundario de una estructura de estacionamientos usando vigas casteleadas.

El ejemplo se centra en el diseño de una viga secundaria para un edificio de estacionamientos de la Universidad Autónoma de Baja California, unidad Ensenada, diseñado previamente como una estructura de construcción compuesta (Presichi, 2005). Usando las fuerzas del análisis estructural de elementos secundarios de éste edificio se puede tener los datos principales para el diseño de la viga casteleada, así como también su longitud y teniendo en cuenta que se propone un elemento de acero se puede tener la información del tipo de conexión en los extremos.

Éste ejemplo de viga casteleada será modelado usando el software de modelado y análisis por elementos finitos; Abaqus/CAE con el objetivo de poder apreciar de una manera gráfica además de confiable las distribuciones de esfuerzos en el material y las zonas de concentraciones de esfuerzos o probables fallas en el elemento. Para esto, se toma como base las imperfecciones iniciales máximas permitidas por el Código de Practica Estándar de construcciones de acero por la AISC incluido en el manual del 2005 (AISC, 2005), y las especificaciones contenidas en el reglamento ASTM, en su parte ASTM A6-05a.



Con el valor obtenido de las imperfecciones máximas permisibles por el reglamento, es posible introducir una imperfección inicial al modelo de elementos finitos y someterlo a ciclos de carga y descarga. Es de esperarse un comportamiento lineal en la gráfica de carga-desplazamiento durante el rango elástico, sin embargo es de gran interés saber, usando los coeficientes del rango plástico del elemento, si se presentaría el efecto de pandeo en la estructura que así la pudiera llevar a la falla debido a incrementos de carga o carga cíclica. Un ejemplo del comportamiento esperado del acero se observa en la figura 7.

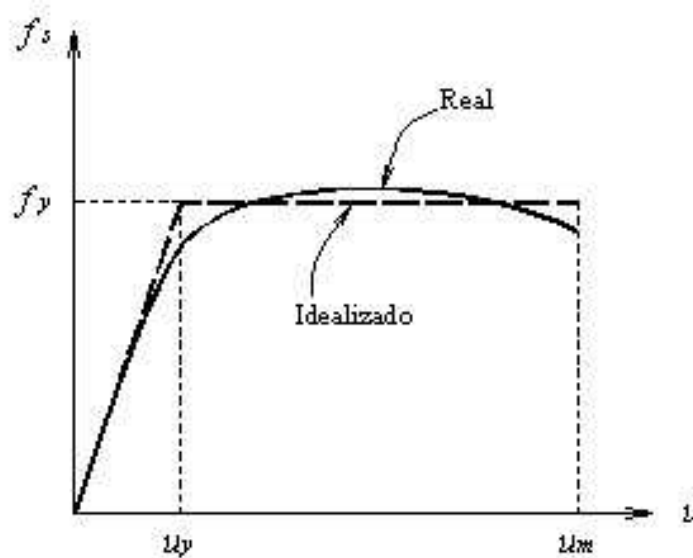


Figura 7. Curva fuerza deformación durante la carga inicial: real e idealización elastoplástica.

Capítulo 3

Aplicación de Especificaciones.



3.1 Aplicación de especificaciones.

El método paso a paso de diseño de vigas casteleadas descrito anteriormente es donde recae parte importante del presente trabajo, ya que definiendo claramente dichas recomendaciones es posible crear una hoja de cálculo usando una herramienta que permita semi-automatizar el diseño de éstos elementos estructurales.

La hoja de cálculo consiste en las fórmulas de diseño definidas en el “Design of welded structures” (Blodgett, 1966), creando así un programa confiable, y auto explicativo en la mayoría de sus puntos, empleando las expresiones de acuerdo a las especificaciones contenidas en la parte de diseño por esfuerzos permisibles.

El programa permite al usuario la capacidad de seguir el procedimiento paso a paso teniendo control de cerca y a su vez requiere de su intervención para alimentar datos durante el transcurso del diseño, tales como, selección del perfil más apropiado dependiendo del módulo de sección requerido, así como las propiedades geométricas básicas del primer perfil de prueba. Así se llega finalmente a la determinación de la viabilidad del mismo o rechazo de un perfil de prueba para Viga Casteleada.

A continuación se detallarán las fórmulas asociadas a cada paso del procedimiento de diseño y revisión de las vigas casteleadas por esfuerzos permisibles.



3.1.1 Determinación del algoritmo de diseño paso a paso.

El método de diseño es extraído del libro “Design of Welded Structures”, (Blodgett, 1966) usando las especificaciones vigentes en su tiempo:

Entrada de Datos. Se comienza por alimentar al programa con la información básica necesaria, la que ha sido obtenida del análisis estructural de la viga:

M = Momento actuante, sin factorizar.

V = Fuerza Cortante actuante, sin factorizar.

L = Longitud del claro a salvar por la viga.

Θ = Ángulo del patrón de corte en el alma.

Grado del acero a usar asociado a su resistencia.

Paso 1. *Determinar el módulo de sección requerido (S_g) de la viga expandida al centro del claro por el momento flexionante principal.*

$$S_g = \frac{M_{cl}}{\sigma}$$

Paso 2. *Para la relación entre el peralte de la viga casteleada y la viga original, tenemos:*

$$K_1 = \frac{d_g}{d_b}$$

Este valor se toma comúnmente como 1.5 de inicio.



Paso 3. Seleccionar un perfil de patín ancho W de prueba, teniendo como módulo de sección:

$$S_b = \frac{S_g}{K_1}$$

Con ésta expresión se calcula el módulo de sección requerido para soportar el momento flexionante, con esto, se busca el perfil base con módulo de sección inmediatamente superior al requerido, además de seleccionar también el más ligero. Una vez seleccionado el perfil base, habrá que recalcular el valor de K_1 :

$$K_1 = \frac{S_g}{S_b}$$

Paso 4. Determinar la altura del corte (h) y redondearla por cuestiones prácticas a la unidad de medida más cómoda cercana (por ejemplo, la pulgada más cercana):

$$h = d_b (K_1 - 1)$$

Donde:

d_b el peralte del perfil W de prueba.

Sin embargo, la altura de corte (h) no debe exceder el valor siguiente de acuerdo a mantener el esfuerzo cortante vertical en la sección “T” dentro del permisible:

$$h \leq d_b - 2d_t$$



Donde:

d_t es el peralte de la sección “T” de la viga casteleada y se obtiene con la expresión:

$$d_T \geq \frac{V}{2t_w \tau}$$

Si, ésta restricción es satisfecha, entonces el perfil de prueba, puede seguir siendo considerado como una buena opción.

Paso 5. Obteniendo las propiedades geométricas de la viga casteleada que se muestran en la figura 8.

Peralte total:

$$d_g = d_b + h$$

Peralte total de la sección “T” superior e inferior:

$$d_T = \frac{d_g}{2} - h$$

Longitud del alma en la sección “T”:

$$d_s = d_T - t_f$$

Donde:

t_f se refiere al espesor del patín

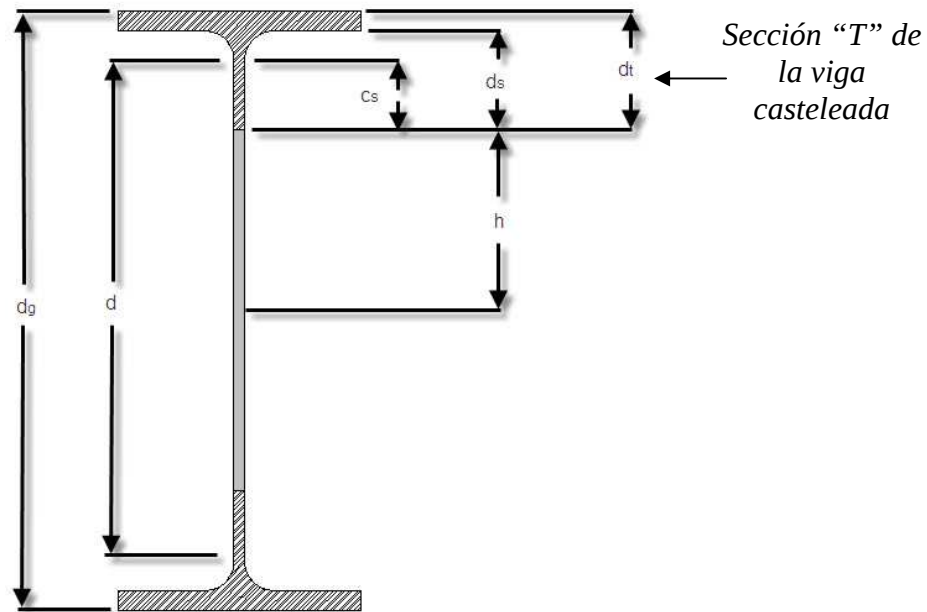


Figura 8. Propiedades geométricas de la viga casteleada.



Paso 6. Determinar el esfuerzo flexionante por compresión permisible en la sección cuña del alma, usando el reglamento de diseño por esfuerzos permisibles ASD. La magnitud del esfuerzo está dada para diferentes tipos de aceros por la tabla 1.

<i>Esfuerzo de Fluencia (psi)</i>	<i>Esfuerzo Flexionante en función de la altura “h” (psi)</i>	<i>Esfuerzo Flexionante en función de la longitud “e” (psi)</i>
$\sigma_y = 36000$	$\sigma = 22000 - 14.44 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 22000 - 3.61 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$
$\sigma_y = 42000$	$\sigma = 25000 - 19.15 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 25000 - 4.79 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$
$\sigma_y = 45000$	$\sigma = 27000 - 22.14 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 27000 - 4.85 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$
$\sigma_y = 46000$	$\sigma = 27500 - 23.04 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 27500 - 5.76 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$
$\sigma_y = 50000$	$\sigma = 30000 - 27.34 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 30000 - 6.84 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$
$\sigma_y = 55000$	$\sigma = 33000 - 33.10 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 33000 - 8.28 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$
$\sigma_y = 60000$	$\sigma = 36000 - 39.35 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 36000 - 9.84 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$
$\sigma_y = 66000$	$\sigma = 39000 - 46.27 \left(\frac{h}{t_2} \right)^2$	$\sigma = 39000 - 11.57 \left(\frac{e}{t_w} \right)^2$

Tabla 1. Esfuerzo flexionante por compresión permisible debido a compresión en la sección cuña de la viga casteleada para diferentes grados de acero (diferente esfuerzo de fluencia).



El esfuerzo flexionante por compresión puede mantenerse entre los valores de la tabla 1, si el esfuerzo cortante en la sección cuña se mantiene de igual manera bajo la siguiente condición:

$$\tau = \frac{4\theta^2}{3 \tan \theta} \sigma \leq 0.40\sigma_y$$

Donde:

θ es el ángulo de corte del alma de la viga.

Si dicha condición se satisface, es decir, que el esfuerzo cortante en la sección cuña logre mantenerse por debajo del 40% del esfuerzo de fluencia del acero, entonces nuestro perfil de prueba continúa siendo una buena opción de viga casteleada.

Paso 7. *Estimar el esfuerzo cortante máximo a lo largo del eje neutro de la sección completa de la viga, asumiendo la viga como una sección sólida en toda su longitud.*

$$\tau_{\max} = 1.16 \frac{V}{t_w d_g}$$

El cortante (V) es el cortante en la primer sección cuña, el cual deberá asumirse para cuestiones prácticas como el 95% del cortante máximo (en el apoyo) debido a que el primer panel estará relativamente lejos de los apoyos. Asumirlo de esta manera aquí es correcto debido a que solo se está trabajando con un tipo de esfuerzos (cortante) y no se consideran los esfuerzos por flexión.



Paso 8. Conociendo el cortante máximo en un alma sólida, y el cortante permisible para la sección de alma abierta, podemos obtener la razón:

$$\frac{e}{s} = \frac{\tau_{\text{máx}}}{\tau} = K_2$$

Si el valor resultante de K_2 es razonablemente bajo (cerca de 3/8 de pulgada o 9 mm), existe una gran posibilidad de que la viga de prueba sea finalmente aceptada.

Lo siguiente es calcular la longitud de lo que será la sección “T” en el alma de la viga casteleada atendiendo a la siguiente consideración:

$$e \geq \frac{2h(\tan \theta)}{\frac{1}{k_2} - 2}$$

También es común que el valor de “e” sea redondeado a la unidad de medida superior más cercana.

La longitud “e” es comúnmente constante a lo largo de toda la longitud de la viga casteleada. Sin embargo es posible variar ésta distancia para casos muy particulares, y tendrían que ser estudiados incluyendo otras consideraciones.



Paso 9. Ahora determina las propiedades físicas de la viga casteleada, basándose en las características geométricas de la figura 6 y de la información del perfil W base, como ancho y espesor de patín, así como espesor del alma.

Área de la sección transversal “T” :

$$A_T = A_f + A_s$$

Momento de fluencia de la sección transversal “T”:

$$M_y = A_f \left(ds + \frac{t_f}{2} \right) + A_s \frac{d_s^2}{2}$$

Momento de Inercia de la sección “T”:

$$I_y = A_f \left(d_s^2 + d_s t_f + \frac{t_f^3}{3} \right) + A_s \frac{d_s^2}{3}$$

Relación entre el momento de fluencia y el área total de la sección “T”:

$$C_s = \frac{M_y}{A_T}$$

Inercia de la sección “T”:

$$I_T = I_y - C_s M_y$$

Módulo de sección de la porción “T”:

$$S_s = \frac{I_T}{C_s}$$



Cálculo de la distancia “d” en la sección transversal de la viga casteleada:

$$d = 2(h + C_s)$$

Momento de Inercia de la sección transversal de la viga casteleada:

$$I_g = 2I_T + \frac{A_T d^2}{2}$$

Módulo de sección de la viga casteleada:

$$S_g = \frac{2I_g}{d_g}$$

Paso 10. *Calcular el momento flexionante secundario en los apoyos.*

El esfuerzo flexionante por compresión puede ser calculado con la ayuda de la tabla 1, con la información de la columna 3, donde se usa la longitud no arriostrada (e), entrando con el conocimiento de el esfuerzo de fluencia del acero a utilizar.

Paso 11. *Calcular el esfuerzo principal flexionante al centro del claro.*

Como esfuerzo de tensión o compresión:

$$\sigma_b = \frac{F}{A_T}$$

Como momento flexionante:

$$\sigma_b = \frac{M_{cl}}{S_g}$$



Paso 12. Si el esfuerzo flexionante (σ_b) en el paso 11 es excesivo, puede ser reducido sigilosamente con un valor más grande de (h); sin embargo, esto incrementará grandemente el esfuerzo flexionante secundario (σ_T) calculado en el paso 10, debido a que se reducirá el peralte de la sección transversal “T” (d_t). En este caso indudablemente, el perfil “W” de prueba seleccionado no puede ser utilizado como viga casteleada para ese caso en particular, y deberá reiniciarse el procedimiento con la selección de un nuevo perfil de prueba.

Si el esfuerzo flexionante principal (σ_b) se encuentra dentro de lo permisible, pero el esfuerzo flexionante secundario (σ_T) en el paso 10 sobrepasa lo permisible, (σ_T) puede ser disminuido reduciendo la altura (h) con un mínimo incremento del esfuerzo (σ_b).

Si la altura (h) no puede ser reducida porque el esfuerzo (σ_b) está muy cercano al permisible, será necesario usar diferentes agujeros a lo largo de la longitud de la viga y la distancia “e” ya no podrá ser constante.

Paso 13. Hacer cualquier ajuste necesario para la fabricación del elemento.

Paso 14. Después de que la viga haya sido detallada, los esfuerzos podrían ser recalculados a manera de revisión, para conocer exactamente los valores de cortante (V) y momento (M) a lo largo de la viga.



3.1.2 Definición del algoritmo de diseño y revisión paso a paso.

El proceso de diseño detallado anteriormente es el precedente para la elaboración de un algoritmo que pueda ser llevado a una hoja de cálculo para la semi-automatización de los cálculos y revisiones en el diseño de la viga casteleada como se muestra a continuación en la figura 9.

El algoritmo de diseño, como es mencionado anteriormente, marca la pauta para la creación de una hoja de cálculo que permita al usuario tener una manera más amena y fácil de definir y llevar a cabo las revisiones de esfuerzos necesarias, así como también observar y poder intervenir activamente en ciertos puntos del diseño, mientras se obtiene la viga casteleada óptima para cualquier condición de servicio determinada.

El desarrollo de la hoja de cálculo puede ser implementado bajo cualquier aplicación que permita el uso de fórmulas matemáticas y procedimientos lógicos, una buena ayuda es contar, con un anexo de la base de datos actualizada de perfiles “W” por la AISC, de tal forma que la información requerida pueda ser monitoreada fácilmente por el usuario e introducida al programa en el instante que así sea necesario.

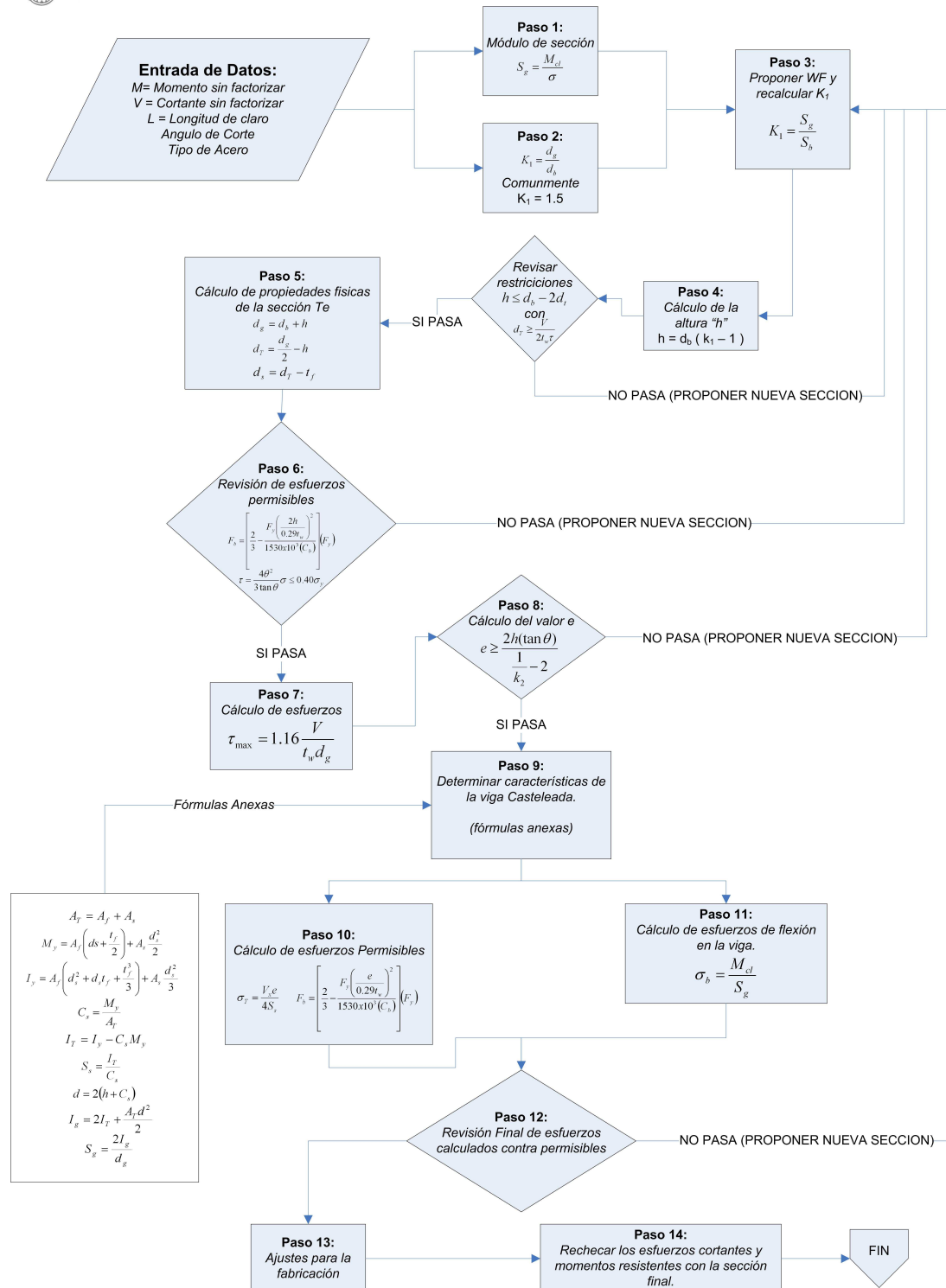


Figura 9. Algoritmo de diseño y revisión de vigas casteleadas.

Capítulo 4

Un caso de estudio.



4.1 Descripción del proyecto.

Para cumplir con el propósito específico del presente trabajo, el cual es evaluar el comportamiento de una viga casteleada, es necesario desarrollar un ejemplo de diseño que permita modelar y analizar su comportamiento.

Se conoce que éste tipo de elementos fueron usados durante varios años como una opción muy eficiente para edificios de estacionamientos, y en una estructura de éste tipo se encuentran una serie de probables situaciones de cargas y movimientos a que estarían sujetas, de tal forma se entiende que un análisis por carga cíclica sería la opción que mejor pudiera ayudar a analizar el comportamiento de éstas.

En el 2005, se presentó como proyecto tesis el “Diseño de un edificio de estacionamientos para la Universidad Autónoma de Baja California” (Presichi, 2005), el documento, que contiene todo el análisis estructural y diseño de un edificio de construcción compuesta, sirve de precedente en el análisis estructural de la estructura y permite tomar como caso de estudio el diseño de un elemento secundario para dicha estructura, ya que solamente se necesita el análisis estructural previo de un viga bajo cargas de servicio y su longitud para comenzar con el método de diseño de vigas casteleadas.

De ésta manera, es posible tener un caso ideal para los objetivos que se plantean en éste trabajo, y se procede a la propuesta estructural de una viga casteleada como elemento secundario del edificio de estacionamientos para la Universidad Autónoma de Baja California.



Luego de obtener la información necesaria del análisis estructural de la viga, continúa el diseño a través de la utilización de las especificaciones para éste tipo de elementos mencionadas en el capítulo anterior, esto a través de la hoja de cálculo desarrollada para tales fines. Es necesario usar tantos perfiles de prueba como sea necesario según las restricciones a cumplir por el método de diseño.

Una vez que se cuenta con la viga a estudiar, la que ha superado satisfactoriamente el proceso de diseño, y para cumplir con las necesidades de éste trabajo: es de gran apoyo hacer un detalle de la viga a escala, que permita saber sus dimensiones tanto en longitud como en sección transversal, localización de las aberturas en el alma, así como agujeros para conexión en campo, haciendo uso de cualquier herramienta de dibujo CAD. Es importante tomar en cuenta los conceptos básicos de detallado de elementos de acero, suponiendo que la viga en estudio es una viga secundaria que se conectará a una viga principal en cada uno de sus extremos, de esta forma, se cuenta con una viga real a estudiar. El dibujo a escala es de gran utilidad en el momento de trazar el modelo en Abaqus/CAE.

Teniendo como base ya un perfil claramente detallado, es posible comenzar su modelado por elementos finitos, para esto, se cuenta con el programa especialista en modelado y análisis por elementos finitos Abaqus V 6.8.1 el cual permite al usuario un fácil manejo de sus herramientas para dibujar, modelar analizar e interpretar resultados. Abaqus se forma de tres módulos, pero solo se utilizarán 2 de ellos para el propósito de éste trabajo; el primero Abaqus/CAE interfaz gráfica para modelado, antes del análisis y para interpretación de resultados después de un análisis; y Abaqus/Standard, herramienta que lleva acabo el análisis de pandeo así como también el análisis estático por carga cíclica o incremental.



Abaqus/CAE, cuenta con una interfaz amable, la cual ofrece siempre una ventana en donde observar la evolución y resultados del modelo, separando por módulos los diferentes procesos por los que se rige el modelado y análisis por elementos finitos, desde el dibujado de las secciones y sus conexiones, hasta las figuras deformadas debido a las condiciones de carga aplicadas.

Abaqus/Standard, permite manipular el archivo de entrada de datos generado a partir del modelo, y así tener un control completo de puntos clave en el diseño tales como: monitoreo de desplazamientos de nodos a lo largo de un análisis, así como la definición misma del análisis a realizar y los resultados esperados.

Luego del modelado, y obtención de resultados, es preciso interpretarlos propiamente, y presentarlos en forma de gráficas que brinden una idea clara de los cambios sufridos por el elemento a través de los diferentes procesos de análisis a los que será sometido.

De esta forma es posible llegar a conclusiones concretas al respecto de las vigas casteleadas y su comportamiento, así como evaluar la existencia de un probable factor de sobre-resistencia de la respuesta del modelo con respecto del método de diseño propuesto.



4.2. Descripción de la Metodología.

Con motivo de obtener resultados confiables al respecto del comportamiento de las vigas casteleadas como elemento secundario se le inducirán diferentes tipos de análisis al modelo de elementos finitos que puedan arrojar los datos necesarios para obtener las conclusiones esperadas. Estos análisis son definidos en el manual análisis del usuario de Abaqus V 6.8.1 y se pueden consultar en el Anexo A.

4.2.1 Procedimiento de Análisis en Abaqus.

El proceso de análisis en Abaqus consiste en la definición por medio de elementos finitos de un modelo determinado, y el desarrollo de pasos de análisis sobre el mismo permitiendo definir antes las propiedades del material en estudio y sus condiciones de frontera. En el Anexo A, se define completamente el desarrollo de un procedimiento de análisis según el manual de usuario de Abaqus v 6.8.1.

4.2.2. Análisis de determinación de modos de pandeo.

Abaqus tiene la capacidad de obtener los modos de pandeo a presentarse en un modelo de material determinado y condiciones de apoyo establecidas. Este tipo de análisis puede formar parte de un procedimiento más complejo de análisis, y funciona como un paso previo para un análisis estático. En el Anexo A, se encuentra la definición de estos análisis.



4.2.3 Análisis estático de Esfuerzos.

Un análisis estático de esfuerzos puede ser precedido por un análisis de pandeo, de esa manera es posible agregar una imperfección inicial al modelo de análisis estático y observar la activación del modo de pandeo esperado en el desarrollo de la historia de desplazamientos o cargas. En este tipo de análisis también se puede determinar el tipo de comportamiento de material que espera encontrarse en el modelo durante los análisis impuestos sobre éste, tales como comportamiento Elástico-Lineal, o que se tomen en cuenta las deformaciones no lineales, y comportamiento Elásto-Plástico.

Es posible manipular las condiciones de frontera definidas en el modelo de tal forma que un desplazamiento impuesto como condición de frontera pueda determinar el fin de un paso de análisis, al eliminar dicho desplazamiento, es posible regresar el modelo a un estado descargado en otro paso de análisis. El análisis estático y la manera de manipular las condiciones de frontera se definen en el anexo A.

4.2.4 Análisis introduciendo imperfecciones al modelo.

Es posible aplicar una imperfección geométrica inicial al modelo para un análisis estático, tomando en cuenta deformaciones lineales o no lineales, basada en la geometría deformada de un modo de pandeo determinado en un análisis previo. Este tipo de análisis se define en el Anexo A.



4.3 Modelo de análisis.

4.3.1 Obtención de los datos de entrada para la hoja de cálculo.

Para poder Evaluar el comportamiento de vigas casteleadas, es necesario representar un modelo que pueda brindar una idea clara de una situación real. En este caso, se propone estudiar una viga como elemento secundario en un edificio de estacionamientos, sometiéndola a situaciones de carga probables a ocurrir en un edificio de éste tipo. Utilizando el estudio previo del diseño de edificio de estacionamientos (Presichi, 2005) partiendo del prediseño de una viga secundaria, como se muestra en la figura es posible obtener la información para dar inicio a la creación del modelo necesario para representar el problema, como se muestra en la figura 10.

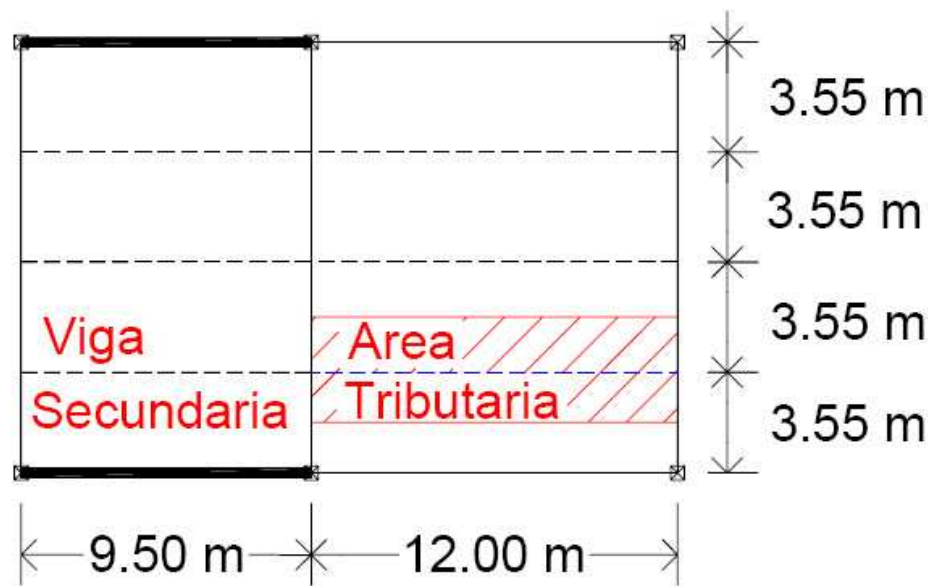


Figura 10. Ejemplo de viga Secundaria a estudiar. (Presichi, 2005)



Atendiendo a las cargas de análisis propuestas en los manuales de diseño para éste tipo de edificios, el elemento secundario estaría cargado como se muestra en la figura 11 para carga muerta y en la figura 12 para carga Viva.

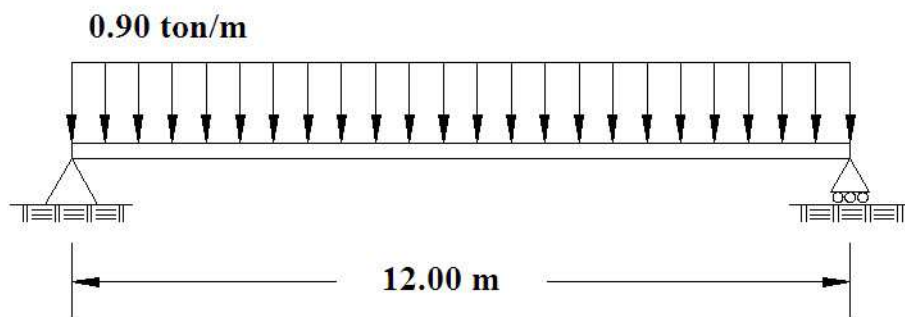


Figura 11. Diagrama de cargas muerta de servicio para la viga casteleada.

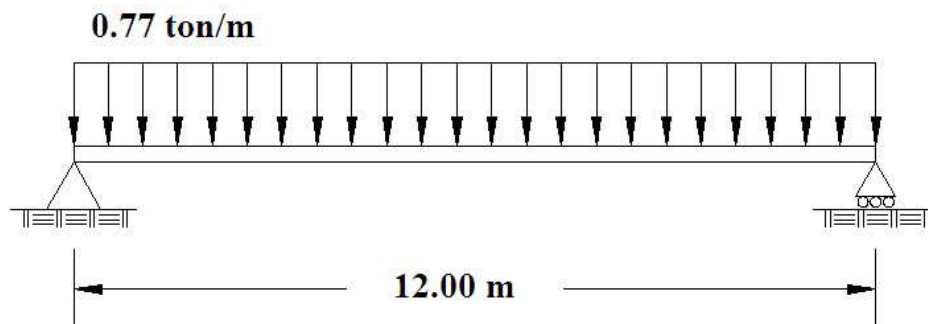
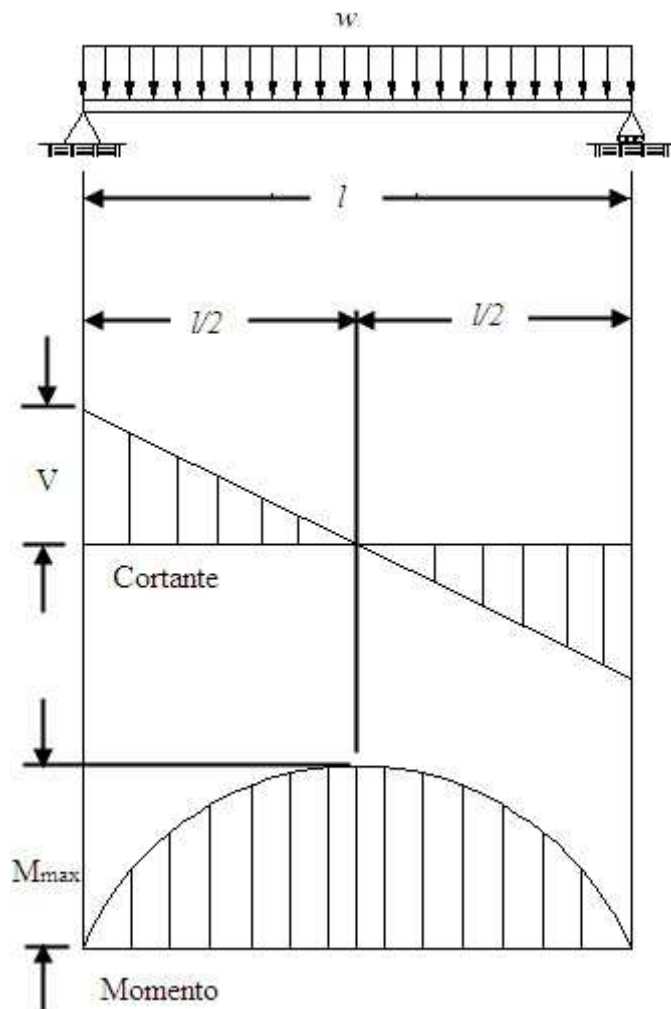


Figura 12. Diagrama de carga viva de servicio para la viga casteleada.



Tomando en cuenta las cargas de servicio para diseño señaladas anteriormente se procede al análisis estructural de la viga cargada, resultando, los diagramas de elementos mecánicos presentes en la viga:



Las fuerzas actuantes: *Cortante Máximo* en los apoyos y *Momento Máximo* al centro del claro, se calculan en base la tabla 3-23 del AISC-2005. Usando las siguientes expresiones:

Cortante Máximo en los extremos:

$$V = \frac{wl}{2}$$

Momento Flexionante Máximo al centro del claro:

$$M_{\max} = \frac{wl^2}{8}$$

Figura 13. Diagramas para carga distribuida (Tabla 3-23 AISC-2005)



De dicha tabla y con las cargas presentes para la estructura en estudio es posible determinar los valores de las cargas máximas de servicio (Cortante y Momento Flexionante) a las que estará sometida la viga secundaria:

Cálculo del cortante Máximo (por carga muerta) en la viga:

$$V_{cm} = \frac{(0.77 \text{ ton} / m)(12m)}{2} = 4.62 \text{ ton}$$

Cálculo del cortante Máximo (por carga viva) en la viga:

$$V_{cv} = \frac{(0.90 \text{ ton} / m)(12m)}{2} = 5.40 \text{ ton}$$

Por lo tanto, el cortante Máximo en el apoyo, será la suma del máximo por carga muerta, más el máximo por carga viva:

$$V_{\max} = \sum (V_{cm} + V_{cv}) = 4.62 \text{ ton} + 5.40 \text{ ton} = 10.02 \text{ ton}$$

Cálculo del Momento Flexionante Máximo (por carga muerta) en la viga:

$$M_{cm} = \frac{(0.77 \text{ ton} / m)(12m)^2}{8} = 13.86 \text{ ton.m}$$

Cálculo del Momento Flexionante Máximo (por carga viva) en la viga:

$$M_{cv} = \frac{(0.90 \text{ ton} / m)(12m)^2}{8} = 16.20 \text{ ton.m}$$



Y el momento Máximo al centro del claro:

$$M_{\max} = \sum (M_{cm} + M_{cv}) = 13.86 \text{ ton.m} + 16.20 \text{ ton.m} = 30.06 \text{ ton.m}$$

Con la información anterior se puede alimentar la tabla 3, que sirve como entrada de datos para la hoja de cálculo auxiliar de diseño:

	Carga Muerta	Carga Viva	Σ
Fuerza Cortante	4.62 ton	5.40 ton	10.02 ton
Momento Flexionante	13.86 ton-m	16.20 ton-m	30.06 ton-m

TABLA 2. Resultados de el análisis estructural de la viga casteleada como viga simplemente apoyada.

Con la información anterior así como también el grado del material asociado a su resistencia A992 para los perfiles de acero de patín ancho “W”; el ángulo típico de corte para los agujeros en el alma de la viga, que oscila entre los 45° y los 60°, más comúnmente usado éste último, será el que se emplee para el ejemplo en proceso; y la longitud, también ya conocida de la viga. De esa forma se construye la tabla 4.

Momento Flexionante ($M_{\max}$)	30.06 ton-m
Fuerza Cortante ($V_{\max}$)	10.02 ton
Longitud (L)	12 m
Ángulo de corte (Θ)	60°
Tipo de Acero	A992

Tabla 3. Datos de entrada para la hoja de cálculo.



4.3.2 Uso del procedimiento de diseño para encontrar la Viga Casteleada a modelar.

Se usa el primer caso de combinación de cargas descrito en la parte del Diseño por esfuerzos permisibles (ASD) del Manual de Construcción de Acero (AISC-9ª. Ed.).

1,- CM + CV
2,- 0.75CM + 0.75CV + 0.75 Cvi
3,- 0.75CM + 0.75CV + 0.75 CS

Tabla 4. Combinaciones de carga por el ASD en el AISC-9ª Ed.

Los pasos 1 a 3 de la hoja de cálculo se muestran en la figura 14.

PASO 1
Determinar el módulo de sección de la viga requerido debido al momento flexionante
$S_g = 113,01 \text{ in}^3$
PASO 2
Proponer K_1 : Relacion entre el peralte de la Viga W y el de la viga Casteleada
$K_1 = 1,5$
PASO 3
Módulo de sección a proponer
$S_b = 75,34 \text{ in}^3$
Entrando a la tabla se seleccionará el módulo de sección mas cercano al obtenido en este paso.
Primer propuesta:
W 14 x 53
Encontramos el nuevo valor de K_1 con el perfil seleccionado
$K_1 = 1,45$

Figura 14. Pasos 1 a 3 en la hoja de cálculo.



En la figura 15, se muestra el paso 4:

PASO 4
Determinacion de la altura de corte
$h = 6,29$ in
Para facilidad en corte, redondear a pulgada mas cercana
$h = 6$ in
Peralte minimo de la seccion "T" para soportar cortante:
$dt = 2,38$ in
Revision de Altura "h"
$h \leq db - 2dt$
$h \leq 9,14$ OK

Figura 15. Paso 4 en la hoja de cálculo.

En la figura 16, se muestran las revisiones de fuerzas en los pasos 5 y 6:

PASO 5
Peralte de la nueva seccion
$dg = 19,9$ in
Altura Seccion "T" superior e inferior
$dt = 3,95$ in
Porción de la diferencia entre la sección 'T' y el patín de la viga
$ds = 3,29$ in
PASO 6
Revision de Esfuerzos
Determinar el esfuerzo flexionante por compresion permisible en la seccion cuña del alma, usando
$T = 14998,11$ psi

Figura 16. Paso 5 y 6 en la hoja de cálculo.



En la figura 17, se observan los pasos 7 y 8:

PASO 7

Estimación del esfuerzo cortante a lo largo del eje neutro de la sección de la viga asumiendo el alma completamente solida a lo largo de toda la sección.

$$T_{\max} = 3797,72 \text{ psi}$$

PASO 8

Conociendo los cortante máximo en un alma solida y el cortante permisible para la sección de alma abierta, tenemos la razón:

$$k_2 = 0,253 \text{ in}$$

Si la razón k_2 es relativamente baja (hasta $3/8"$), hay una buena oportunidad de que esta viga WF de prueba pueda sea usada.

$$e = 10,66 \text{ in}$$

o usar

$$e = 11 \text{ in}$$

La distancia (e) es comunmente constante a lo largo de la viga.

Figura 17. Pasos 7 y 8 en la hoja de cálculo.



En la figura 18, se observa el cálculo de propiedades de la sección del paso 9:

PASO 9	
Nuevas propiedades de la Viga Casteleada	
$A_T =$	6,54 in ² Area de la secc. "T"
$M_y =$	21,26 in ³
$I_y =$	74,30 in ⁴
De estas propiedades podemos encontrar:	
$C_s =$	3,252 in
$I_T =$	5,16 in ⁴
$S_s =$	1,59 in ³
$d =$	18,504 in
$I_g =$	1129,47 in ⁴
$S_g =$	113,51 in ³

Figura 18. Paso 9 en la hoja de cálculo.



En la figura 19, se muestra la revisión final de esfuerzos de los pasos 10 y 11 de la hoja de cálculo:

PASO 10

Checar el momento flexionante secundario en el apoyo:

$$\sigma = 23954,42 \text{ psi}$$

PASO 11

Esfuerzos actuantes al centro de la viga.

$$\sigma_b = 28027,55 \text{ psi}$$

(como esfuerzo compresivo)

$$\sigma_b = 29866,20 \text{ psi}$$

(como esfuerzo flexionante)

Figura 19. Pasos 10 y 11 en la hoja de cálculo.



4.3.3 Implementación del modelo en ABAQUS.

Una vez que ha sido definido totalmente el ejemplo de viga a analizar es posible modelarlo en Abaqus. Abaqus cuenta con toda una variedad de tipos de elementos para llevar a cabo un análisis, y es muy importante poder determinar cual de ellos será el más apto para nuestro caso en particular.

El propósito de este trabajo es brindar gráficamente, la posibilidad de observar el comportamiento de la viga en función de Momento-Rotación de los diferentes análisis que se llevarán a cabo en la misma, de esta forma es muy sencillo decidir que tipo de elementos son los que mejor se ajustan a este trabajo, puesto que los elementos sólidos no tienen la capacidad de medir rotaciones a lo largo de un análisis en Abaqus, en cambio los elementos placas (shell) si cuentan con dicha capacidad. Así entonces, la viga casteleada a trabajar será modelada a partir de 3397 elementos placas tipo S4R, permitiendo de esta manera el libre monitoreo de toda la información importante del análisis.

4.3.3.1 Modelado en Abaqus/CAE.

Usando la interfaz gráfica de Abaqus, se comienza a modelar lo que será la viga casteleada a analizar, en este punto, es de gran importancia definir principalmente la convención de unidades a utilizar a lo largo del proceso, ya que a pesar que el programa Abaqus es adimensional, es posible a partir de una convención de unidades, tener una alimentación de información correcta al modelo, así como también la interpretación adecuada de los resultados. Para cualquier, post-proceso.



Las unidades a utilizar en este análisis en Abaqus serán del sistema métrico, esto a pesar de que el método de diseño desarrollado en unidades del sistema inglés, en el modelo se usan las unidades de medición:

$$\text{Longitud} = \text{mm}$$

$$\text{Fuerza} = \text{N}$$

$$\text{Densidad} = \text{N/mm}^3$$

$$\text{Esfuerzo} = \text{Mpa (N/mm}^2\text{)}$$

Con dicha convención entonces, las propiedades elásticas del acero a modelar (acero A992) quedan definidas como se muestra en la tabla 5.

Modulo de Elasticidad (E)	$E = 199948.01 \text{ N/mm}^2$
Esfuerzo de Fluencia (Fy)	$F_y = 344.74 \text{ N/mm}^2$
Relación de Poisson (ν)	$\nu = 0.3$
Densidad del acero	$\text{Densidad} = 7.7 \text{ E}^{-5} \text{ N/mm}^3$

Tabla 5. Propiedades elásticas del acero A992

Debido a que el análisis que habrá de realizarse en la viga pretende sobrepasar el rango elástico de su comportamiento, es necesario también contar con la información necesaria para que Abaqus pueda desarrollar tal tarea. Así entonces, se simulará que el material tiene un comportamiento elasto-plástico a partir de desarrollada la fluencia y los datos que se usan para este propósito se muestran en la tabla 6.



ESFUERZO (N/mm ²)	DEFORMACION PLASTICA
344.47	0
344.47	0.001733
344.47	0.018333
344.47	0.028333
344.47	0.038333
344.47	0.048333
344.47	0.058333
344.47	0.068333
344.47	0.078333

Tabla 6. Puntos para la grafica esfuerzo-deformación en el rango plástico.

Luego de haber definido todas las propiedades del material al sistema, o incluso paralelamente, es posible ir trabajando en el dibujo de lo que será la viga. Para el dibujo de la viga es de buena ayuda tener un bosquejo con las dimensiones que habrá de llevar el modelo (detalle de viga en CAD), así es más fácil dibujarlo en función de las coordenadas x,y,z.

Las dimensiones importantes que habrá que dibujar en sus respectivas coordenadas (x,y,z) se muestran en las figuras 20 y 21, donde se aprecia un extremo de la viga, y la geometría de sus agujeros en el alma, respectivamente.

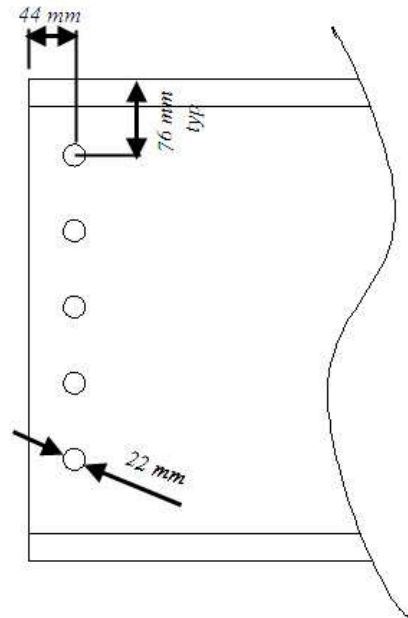


Figura 20. Detalle de los extremos de la viga casteleada.

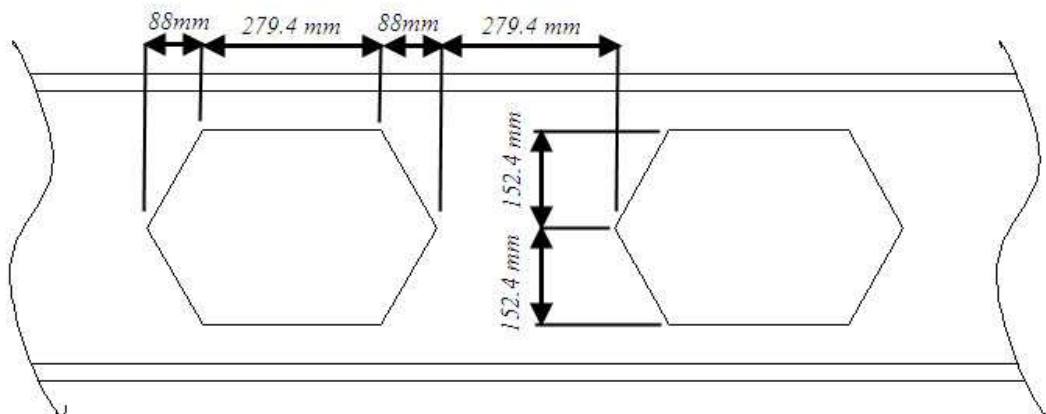


Figura 21. Detalle de las aberturas en el alma de la viga casteleada



Por ultimo solo resta agregar las condiciones de apoyo, como en la mayoría de los estudios, hasta la fecha dirigidos al análisis de este tipo de elementos, se supone una viga simplemente apoyada como se muestra en la figura 22.

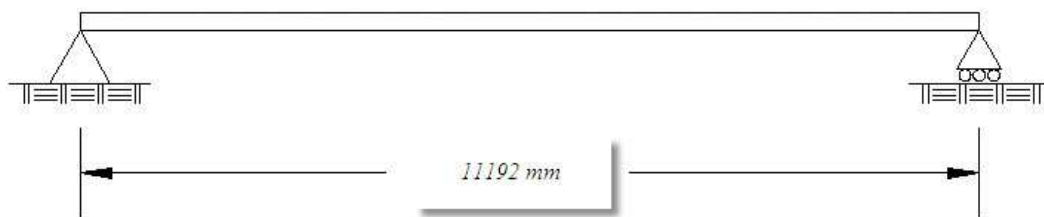


Figura 22. Condiciones de apoyo para viga modelada.

Cuando se ha completado el proceso de modelado de la viga casteleada en Abaqus/CAE es posible manipular su archivo de entrada (input file) para lograr que Abaqus/Standard haga los análisis necesarios y a la misma vez, sea capaz de entregar los resultados significativos de dichos análisis para el post-proceso de dicha información en forma de gráficas que permitan hacer conclusiones al respecto.



4.3.3.2 Formato del archivo de entrada (INPUT FILE)

El archivo de entrada de datos, contiene toda la información del modelo, con respecto a la composición en coordenadas de elementos finitos, los pasos que habrán de seguirse a lo largo del análisis y es también donde habrá de especificarse que resultados se desea obtener, para su post-proceso de nueva cuenta en Abaqus/CAE.

Este se puede resumir en los siguientes módulos:

- Definición de la malla de elementos finitos.
- Definición de los elementos placa (shell).
- Definición de propiedades del material.
- Pasos de análisis con sus respectivas condiciones de frontera.
- Petición de Resultados.

Los primeros tres módulos se mantendrán intactos a lo largo de los diferentes análisis que se llevarán acabo, sin embargo, como su propio nombre lo dice, los pasos que involucran tanto análisis como resultados, habrán de variar según sea la conveniencia del trabajo y de los resultados esperados.



Definición de la malla.

**Heading*

Analisis por elementos finitos de Viga Casteleada con control de desplazamientos

**** Job name: CFshell Model name: Model-1**

**** Generated by: Abaqus/CAE Version 6.8-1**

***Preprint, echo=YES, model=YES, history=YES, contact=NO**

**** PARTS*-**

***Part, name=Viga-Casteleada**

***Node**

1,	0.,	-152.399994,	313.
2,	0.,	-152.399994,	592.400024
3,	0.,	0.,	680.400024
4,	0.,	0.,	225.
5,	0.,	-152.399994,	1047.80005
6,	0.,	0.,	959.799988
7,	0.,	152.399994,	592.400024
8,	0.,	152.399994,	313.
9,	0.,	-152.399994,	1327.19995
10,	0.,	152.399994,	1047.80005
11,	0.,	-244.350006,	0.
12,	0.,	-176.729996,	33.
13,	0.,	-100.730003,	33.

...

De esta manera es que Abaqus genera la malla formada por 3818 nodos que forman el modelo de elementos Finitos.



Definición de los elementos placa (shell)

**Element, type=S4R*

1, 1, 1750, 2182, 315
2, 1750, 1751, 2183, 2182
3, 1751, 1752, 2184, 2183
4, 1752, 705, 706, 2184
5, 315, 2182, 2185, 314
6, 2182, 2183, 2186, 2185
7, 2183, 2184, 2187, 2186
8, 2184, 706, 707, 2187
9, 314, 2185, 2188, 313
10, 2185, 2186, 2189, 2188
11, 2186, 2187, 2190, 2189
12, 2187, 707, 708, 2190
13, 313, 2188, 1755, 2
14, 2188, 2189, 1754, 1755
15, 2189, 2190, 1753, 1754
16, 2190, 708, 709, 1753
17, 702, 703, 2191, 1757
18, 703, 704, 2192, 2191
19, 704, 705, 1752, 2192
20, 1757, 2191, 2193, 1658
21, 2191, 2192, 2194, 2193

...

Así sucesivamente Abaqus genera los 3397 elementos tipo S4R que darán forma a la viga casteleada, también en este módulo genera y asigna cada elemento a la parte que corresponde, como alma y patines de la viga.



En este módulo también es importante incluir ciertos sets de nodos que nos interesan para monitorear los resultados que esperamos, se agregan a la definición de la estructura los siguientes sets de nodos:

**** ASSEMBLY**

***Assembly, name=Assembly**

***Instance, name=Viga-Casteleada-1, part=Viga-Casteleada**

***End Instance**

***Nset, nset=sweep, internal, instance=Viga-Casteleada-1**

**11, 21, 100, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 572, 787, 980, 1175
1369, 1560**

***Nset, nset=_PickedSet39, internal, instance=Viga-Casteleada-1**

100, 109, 112, 1273, 1656

***Elset, elset=_PickedSet39, internal, instance=Viga-Casteleada-1**

2824, 3015, 3396, 3397

***Nset, nset=_PickedSet40, internal, instance=Viga-Casteleada-1**

11, 110, 111, 1464, 1465

***Elset, elset=_PickedSet40, internal, instance=Viga-Casteleada-1**

2634, 2825, 3016, 3017

***Nset, nset=_PickedSet41, internal, instance=Viga-Casteleada-1**

572,

***End Assembly**



Definición de las propiedades del material.

Estas propiedades son exactamente las mismas que fueron ya definidas durante la definición del modelo en Abaqus/CAE, y que van incluidas en el archivo de entrada de datos:

```
**  
** MATERIALS  
**  
*Material, name=Acero-A50  
*Density  
7.7e-05,  
*Elastic  
199948., 0.3  
*Plastic  
344.47, 0.  
344.47, 0.001733  
344.47, 0.018333  
344.47, 0.028333  
344.47, 0.038333  
344.47, 0.048333  
344.47, 0.058333  
344.47, 0.068333  
344.47, 0.078333  
*****
```



Pasos de análisis con sus respectivas condiciones de frontera.

Para realizar el tipo de análisis que pueda hacer entrar a la viga en un modo de pandeo bien definido mientras es sometida a ciclos de carga y descarga es necesario previamente hacer un análisis de modos de pandeo donde se pueda ver la factibilidad de un modo a presentarse durante los análisis de carga cíclica, para eso, se define el análisis de modos de pandeo por la siguiente información en el archivo input:

```
** STEP: pandeo
**
*Step, name=pandeo, perturbation
modos de pandeo
*Buckle
7, , 14, 30
**

** BOUNDARY CONDITIONS
**

** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW, load case=1
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
*Boundary, op=NEW, load case=2
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
```



**** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation**

***Boundary, op=NEW, load case=1**

_PickedSet40, 1, 1

_PickedSet40, 2, 2

***Boundary, op=NEW, load case=2**

_PickedSet40, 1, 1

_PickedSet40, 2, 2

Así es como queda definido el paso de extracción de modos de pandeo de la viga casteleada. Los análisis siguientes solo son una repetición de pasos de análisis de esfuerzos estático con control de desplazamientos, pero estos incluirán una imperfección inicial, la máxima permitida por el reglamento, como se muestra en los siguientes pasos.

***IMPERFECTION, file=PandeoShell, step=2**

2,11

***** *for static loading analysis* *****

**** STEP 1: Incremento 1**

***Step, name=Incre1, nlgeom=YES**

Control de desplazamientos



```
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,,-6.793
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
```

Para el segundo paso, y para que se cumpla el ciclo de carga y descarga como lo menciona el manual de usuario de Abaqus v6.8.1 es necesario eliminar la condición de frontera que impone el desplazamiento al centro del claro.

```
*****
** STEP 2: Incremento 2
**
*Step, name=Incre2, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
```



```
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
.....
```

Los siguientes pasos a lo largo del análisis solo son una repetición de estos dos, con la diferencia que la amplitud de desplazamientos deberá ir aumentando, simulando de esa manera el aumento de la carga que genera esos desplazamientos y llegando a un ciclo de cargas y descargas bien definido.



Petición de resultados.

La instrucción de petición de resultados dentro de cada paso, varía de manera importante y muy significativa entre el paso de análisis de modos de pandeo de la viga, ya que aquí se requiere que Abaqus/Standard genere un archivo de salida **.fil**, que será de donde la instrucción aplicada a los análisis de carga cíclica **Imperfection* buscará la información del modo de pandeo así como el factor de incremento asociado debido al reglamento, así entonces, la petición de resultados para el paso de análisis de modos de pandeo de la viga quedará:

```
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet22, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet22
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
*NODE FILE
U, RF,
*EL FILE, POSITION=AVERAGED AT NODES
S, E
```



```
*EL FILE, POSITION=NODES
S,E
*EL FILE, POSITION=INTEGRATION POINTS
S
E
ENER
COORD
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=sweep
*Node output, NSET=_pickedset22
U,
*End Step
```

Esto ocurre para la extracción de modos de pandeo mientras que para el análisis por carga cíclica la petición de resultados es mucho menor ya que solo nos interesa monitorear, además de cargas y desplazamientos al centro del claro, la rotación en los nodos de los extremos que estamos monitoreando. Entonces el archivo deberá tener la siguiente forma:



```
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
```

Esta sencilla instrucción se repite durante la cantidad de pasos de análisis que sea necesario para el procedimiento por carga cíclica.



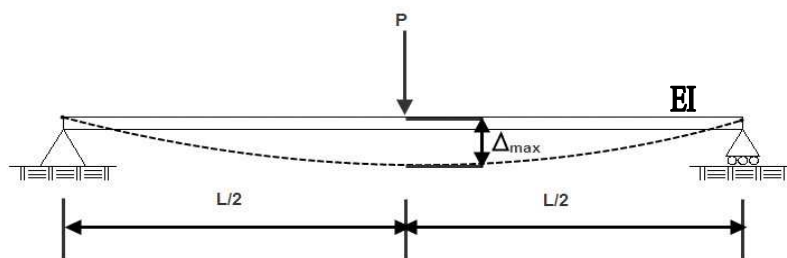
4.4 Calibración del modelo.

Es posible calibrar resultados del modelo de elementos finitos, comparando los resultados obtenidos en Abaqus/Standard después de un análisis contra los resultados calculados analíticamente, esto permite tener la certeza que el modelo a usar para los análisis es adecuado y sus resultados confiables.

Una viga sólida ha sido usada como modelo de calibración, W 14 x 53, cuyas propiedades importantes para la calibración según el manual de acero AISC-2005 son listadas en la tabla 7, en la figura 23 y 24 se muestran el tipo de análisis realizado analíticamente y el modelo representativo de la misma viga en Abaqus/Standard; respectivamente. El archivo de entrada de éste análisis se encuentra en el Anexo B.

Perfil	Peralte	Espesor de alma (<i>tw</i>)	Espesor de patin (<i>tf</i>)	Momento de Inercia (<i>I_x</i>)
W 14x53	353.06 mm	9.398 mm	16.764 mm	225181201.2 mm ⁴

Tabla 7. Propiedades físicas del perfil W14x53 (AISC-05).



$$\Delta_{\max} = \frac{PL^3}{48EI}$$

Figura 23. Tipo de análisis para calibrado de modelo.

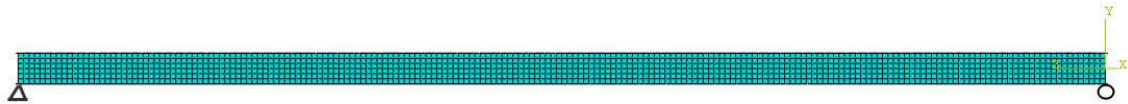


Figura 24. Perfil sólido “W14x53” para análisis de calibrado.

El modelo de la viga sólida W 14x53 esta compuesto por 2800 elementos finitos tipo placa S4R, esta cantidad de elementos deberá aumentar proporcionalmente para el análisis de la viga casteleada puesto que el peralte aumenta en aproximadamente un 50%; sus propiedades corresponden a las de una viga de acero como se comentó anteriormente.

Al modelo terminado se le ha aplicado un análisis estático por control de desplazamientos, el desplazamiento definido es $\Delta_{max}=15 \text{ mm}$, con una instrucción que pida a Abaqus/Standard la carga actuante sobre la viga al momento de dicho desplazamiento y se consigue comparar los resultados analíticos, con los del modelo de elementos finitos.



4.4.1 Resultados del cálculo analítico de deflexiones.

De la fórmula para el cálculo de deflexiones máximas definida anteriormente se obtiene:

$$P = \frac{[(\Delta_{\max})48EI]}{L^3}$$

Usando una deformación de 15 mm y las propiedades del acero, así como la longitud de la viga de 12 m, la carga “P” requerida para dicha deflexión resulta ser:

$$P = \frac{[(15)48(199948)(225181201.2)]}{12000^3} = 18760.2 N$$

4.4.2 Resultados del Modelo de Elementos Finitos.

Del modelado de la viga con un desplazamiento máximo de 15 mm, se obtiene la configuración y carga mostradas en la figura 25.

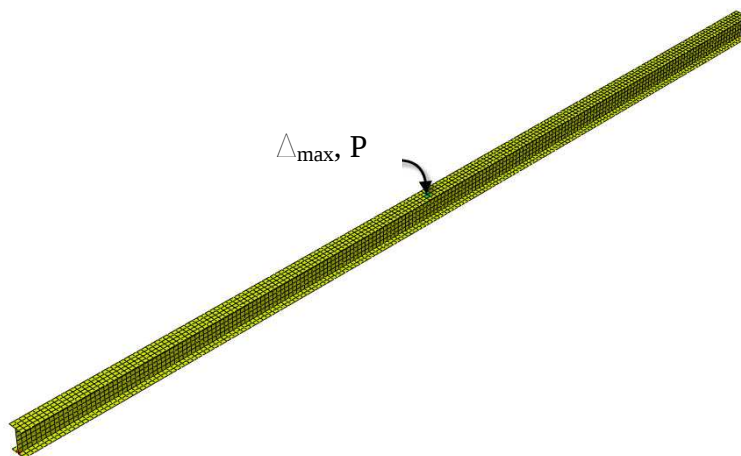


Figura 25. Resultado de carga (P=18270 N) para una deflexión inducida (15 mm).



4.4.3 Conclusión de la calibración del modelo.

De la comparación de los resultados, tanto analítico como del modelo de elementos finitos se ha determinado que el procedimiento de análisis por elementos finitos es válido, ya que solo se logra determinar una diferencia del 2.5% entre cada análisis; lo cual no implica una diferencia significativa en los resultados finales.



4.5 Resultados.

Los resultados serán presentados a partir de los análisis realizados sobre el modelo, siendo estos los ya mencionados anteriormente: Pandeo, carga monotónica, carga cíclica con cargas de servicio, y carga cíclica que permita llevar el elemento a la falla.

4.5.1. Análisis de modos de pandeo.

La razón de éste análisis fue la de poder identificar un modo de pandeo que pudiese presentarse en algún momento a lo largo de la vida útil de la estructura, activado en algún momento por algún sistema de cargas actuando sobre la viga. Luego de observar gráficamente los modos de pandeo probables extraídos del modelo, se decide tomar como significativo el segundo modo, pensando que se acerca un poco más a la realidad de lo que pudiera ocurrir, éste modo se muestra en la figura 26. En el anexo C se muestra el archivo de entrada de éste análisis.

La configuración deformada del modo de pandeo seleccionado representa un desplazamiento de 1mm en el punto más alejado. Esto permitirá crearnos un factor de incremento a aplicar a la imperfección inicial para los análisis siguientes, cumpliendo con las deflexiones con respecto del plano horizontal de una viga según las normas de la ASTM 6.



Figura 26. Modo de pandeo seleccionado (Modo 2).

Estos resultados son almacenados en un archivo **.FIL**, que se le pidió crear a abaqus/standard como parte de la solución del análisis, así será posible que para los análisis siguientes, al teclear la instrucción de **Imperfection*, dándole el nombre del archivo de resultados, que es el nombre del análisis mismo (pandeoshell) abaqus pueda ir a tomar la información necesaria al archivo de resultados y aplicarla en los siguientes análisis.

El siguiente punto importante a destacar en los resultados es el valor de la deformación asociada al modo de pandeo, ésta es unitaria en el análisis de pandeo de abaqus, por tanto, habrá que obtener un factor de incremento en esa deformación para brindarle a los siguientes procesos una imperfección dentro de lo máximo permisible por la norma.



De acuerdo a la norma de la ASTM A6-05a, mostrada en la tabla 8 se puede calcular el valor de la imperfección inicial a introducir al modelo de la viga para los análisis siguientes.

Espesor del patin	Longitud, L	Contra-Flecha	Pandeo
$b_f \geq 6in$	Toda	$1/8'' \times (L/10)$	$1/8'' \times (L/10)$
$b_f < 6in$	Toda	$1/8'' \times (L/10)$	$1/8'' \times (L/10)$
$b_f \approx d$ columnas	$L \leq 45'$	$1/8'' \times (L/10) \leq 3/8''$	
	$L > 45'$	$3/8'' + (1/8'' \times (L-45)/45)$	

Tabla 8. Valores permisibles de pandeo lateral y contra-flecha en vigas (ASTM A6-05a)

Con los datos de la tabla, y la información de la viga, para un patín mayor a 6 pulgadas de longitud, y longitud total de la viga de 36.72 pies, la deformación por pandeo lateral máxima queda dada de la siguiente manera:

$$\frac{1}{8}'' \times \left(\frac{L}{10} \right) \therefore \frac{1}{8}'' \times \left(\frac{36.72}{10} \right) \rightarrow 0.459'' \therefore 11.6mm$$

De ese resultado es posible definir el factor de incrementos para la imperfección inicial, en los siguientes análisis, éste tendrá un valor de 11. Así se puede definir el comando imperfection en el archivo input de la manera:

**IMPERFECTION, file=PandeoShell, step=2*

2,11



4.5.2. Análisis por carga monotónica.

Este análisis, es simulando una carga fija incremental sobre la viga, provocándole una deflexión. A partir de éste análisis es posible monitorear tanto la deflexión y el momento máximo al centro del claro, como el valor de la rotación que sufre la viga en sus extremos debido a la flexión.

El desplazamiento al centro de la viga, hace que abaqus genere resultados sobre la magnitud de una carga que pueda generar ese desplazamiento, así, de manera analítica es posible obtener el momento máximo al centro.

Una vez terminado el análisis se puede ir apreciando el comportamiento de la viga durante cada incremento de desplazamientos, y extraer la información necesaria para generar una gráfica que defina el comportamiento de la viga en función de su *Momento Máximo – Rotación en el extremo*, la cual se aprecia en la figura 27. En el anexo E se muestra el archivo de entrada de éste análisis.

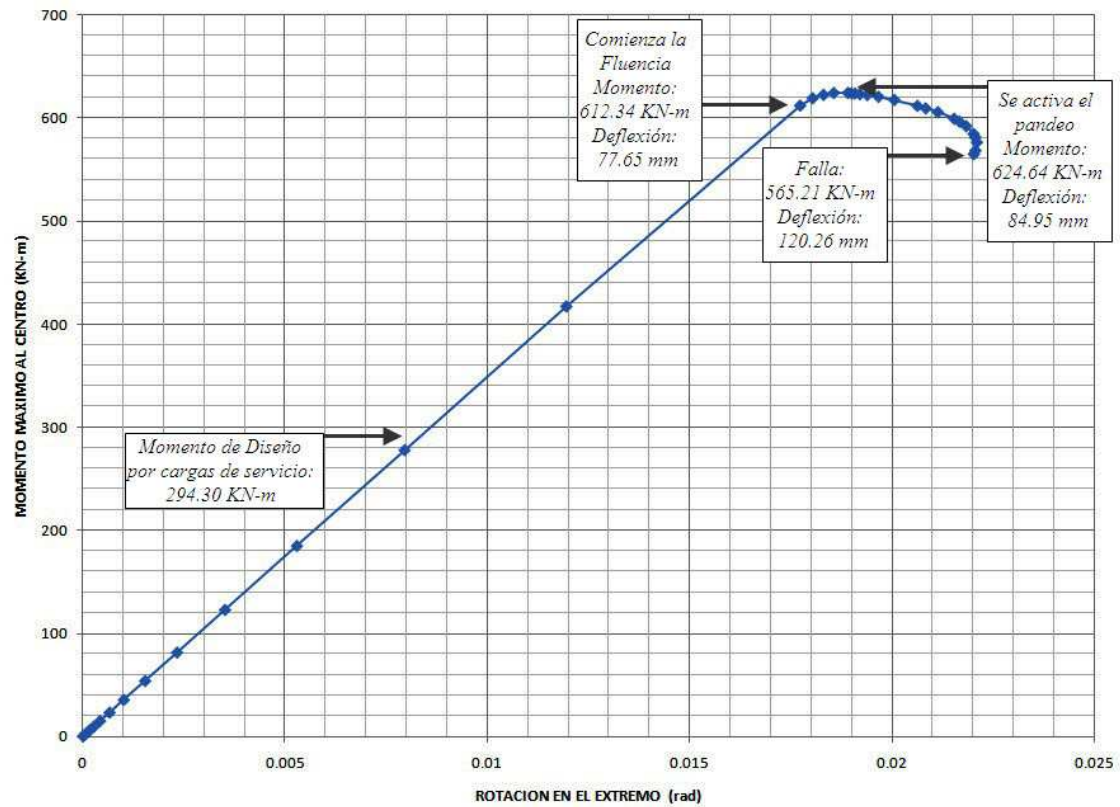
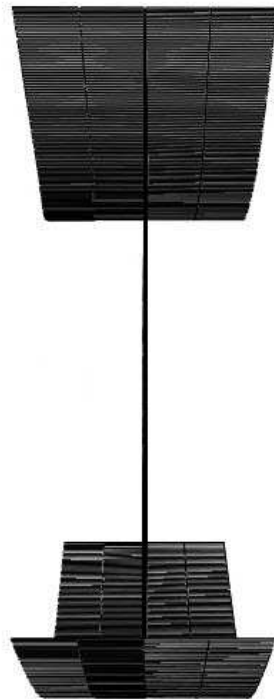


Figura 27. Gráfica Momento Máximo – Rotación de Análisis por carga monotónica.



Los puntos importantes a destacar en éste análisis se identifican en la gráfica, el incremento de deflexión para el cual, se aprecia la activación del modo de pandeo y los valores de momento y rotación asociados, de igual manera se identifican los puntos donde la viga llega a su estado límite de resistencia, con sus valores de momento y rotación respectivos. Esa información se aprecia de mejor manera en las figuras 28 y 29, donde se muestra la viga en el instante donde se activa el pandeo, y su resistencia máxima; respectivamente.



**Figura 28. Incremento en el que se activa el pandeo.(Deflexión = 84.95 mm,
Momento = 624.64 KN-m)**



Figura 29. Incremento al punto de la falla. (Deflexión = 120.26 mm, Momento = 565.21 KN-m)



4.5.3. Análisis por cargas de servicio.

En este análisis se pretende simular el paso de vehículos por la superficie superior a la viga, lo cual le inducirá desplazamientos verticales a la viga dependiendo del peso de cada vehículo, se usan los pesos máximos indicados en la tabla 9 así como también las deflexiones asignadas por tipo de vehículo, que vienen de un análisis previo. En el anexo D se muestra el archivo de entrada de éste análisis.

TIPO DE VEHICULO	PESO	DEFLEXION(a el peso máximo del vehículo)
Automóvil liviano	0 - 2 toneladas	6.79 mm
Mediano	2.1 – 4 toneladas	13.59 mm
Pesado	4.1 – 5 toneladas	16.99 mm

Tabla 9. Pesos de vehículos y deformación asignada

Este análisis consta de 14 incrementos, comenzando con la imposición de la primera deflexión asociada al vehículo liviano (6.79 mm), en el siguiente paso, se elimina la deformación consiguiendo de ésta manera que se cumpla un ciclo de carga y descarga sobre la viga, luego se repite éste ciclo y así consecutivamente se continúan agregando los ciclos que indican las deformaciones asociadas a cada tipo de vehículo; el detalle de los ciclos de carga y descarga se muestran en la tabla 10.



Paso de análisis	Deflexión
Paso 1 = Incremento 1	6.793 mm
Paso 2= Incremento 2	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 3 = Incremento 3	6.793 mm
Paso 4 = Incremento 4	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 5 = Incremento 5	13.59 mm
Paso 6 = Incremento 6	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 7 = Incremento 7	13.59 mm
Paso 8 = Incremento 8	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 9 = Incremento 9	13.59 mm
Paso 10 = Incremento 10	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 11 = Incremento 11	16.99 mm
Paso 12 = Incremento 12	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 13 = Incremento 13	16.99 mm
Paso 14 = Incremento 14	Descargado (se elimina la deflexión)

Tabla 10. Pasos de análisis por cargas cíclicas de servicio.



Los resultados de este análisis son presentados en la figura 30, donde se puede apreciar un comportamiento completamente elástico-lineal durante los 7 ciclos de análisis, manteniéndose así por debajo de la fluencia del material.

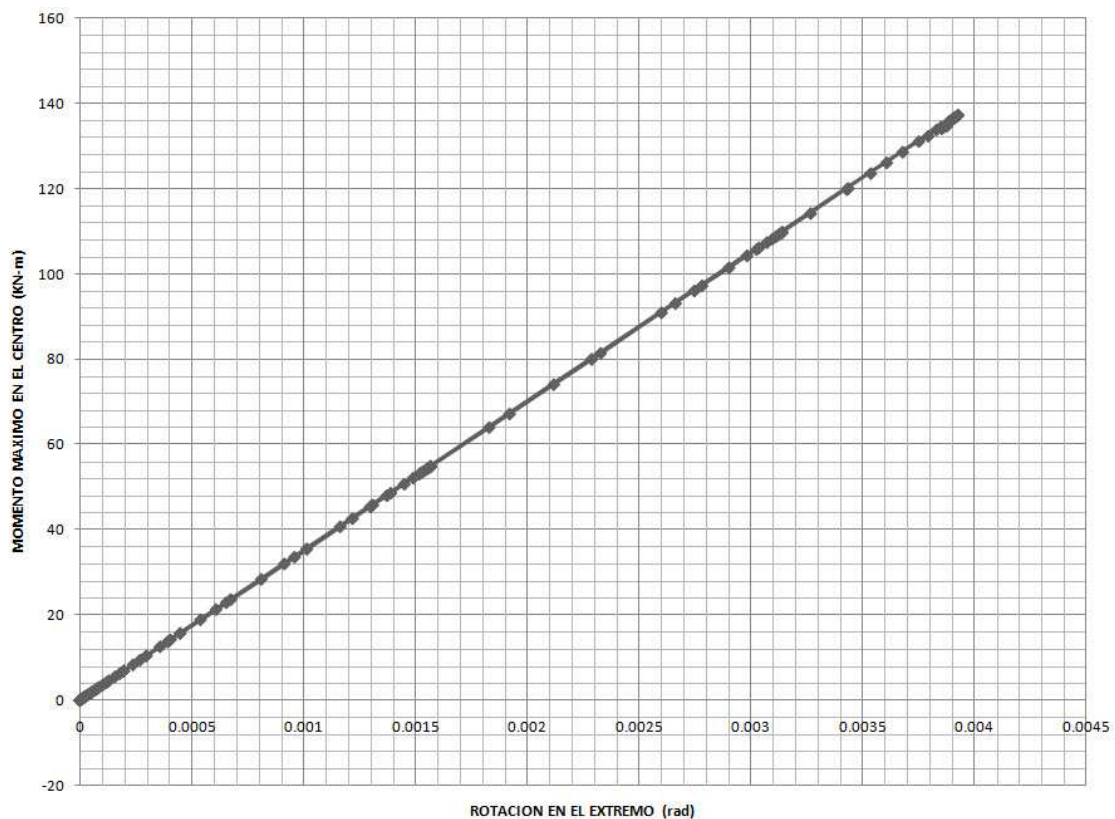


Figura 30. Grafica de Momento máximo – Rotación de análisis por carga cíclica de servicio.

Con un momento máximo de 136.99 KN-m y una rotación de 0.003927 rad se concluye el análisis de cargas cíclicas con cargas de servicio.



4.5.4. Análisis de ciclos de carga hasta la falla.

Este análisis consiste en hacer tantos ciclos como sean necesarios para llevar la viga casteleada a la activación del modo de pandeo y a sus estados límites de resistencia, en este análisis solo se utilizan deflexiones aleatorias, no asociadas a ninguna carga preestablecida con el único fin de mostrar el comportamiento final de la viga casteleada ante tales deflexiones. Los pasos contenidos en dicho análisis se señalan en la tabla 11. En el anexo F se comenta el archivo de entrada de éste análisis.

Paso de análisis	Deflexión
Paso 1 = Incremento 1	30.0 mm
Paso 2= Incremento 2	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 3 = Incremento 3	40.0 mm
Paso 4 = Incremento 4	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 5 = Incremento 5	50.0 mm
Paso 6 = Incremento 6	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 7 = Incremento 7	60.0 mm
Paso 8 = Incremento 8	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 9 = Incremento 9	80.0 mm
Paso 10 = Incremento 10	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 11 = Incremento 11	100.0 mm
Paso 12 = Incremento 12	Descargado (se elimina la deflexión)
Paso 13 = Incremento 13	120.0 mm

Tabla 11. Pasos de análisis por cargas al límite de resistencia.



Los resultados de este análisis son presentados en la figura 31, donde es posible observar como se logra la incursión en el rango elástico del elemento debido a las cargas, así mismo se puede apreciar el punto dentro de la grafica para el cual se activa el modo de pandeo y cuando la viga alcanza su resistencia máxima.

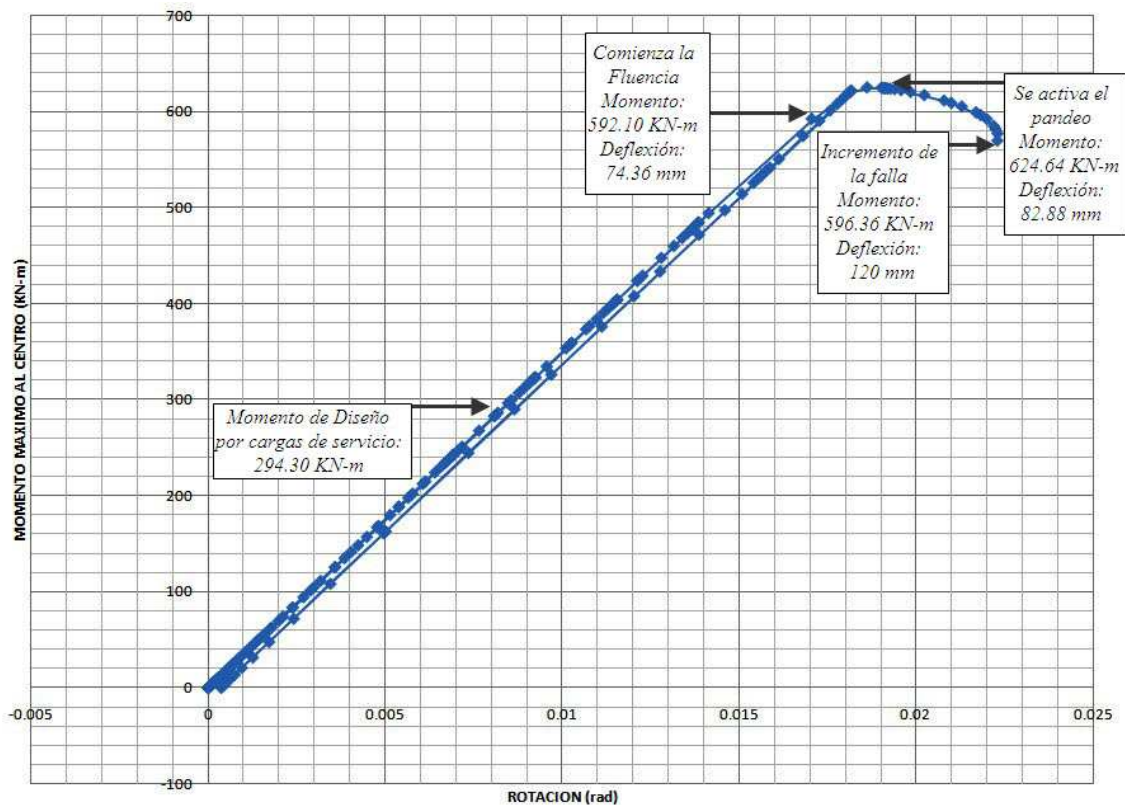


Figura 31. Grafica de Momento máximo – Rotación de análisis por carga cíclica hasta la máxima resistencia.



Los puntos importantes a destacar en éste análisis se identifican en la gráfica, el incremento de deflexión para el cual, se aprecia la activación del modo de pandeo y los valores de momento y rotación asociados, de igual manera se identifican los puntos donde la viga llega a su estado límite de resistencia, con sus valores de momento y rotación respectivos. Esa información se aprecia de mejor manera en las figuras 32 y 33, donde se muestra la viga en el instante donde se activa el pandeo, y su resistencia máxima; respectivamente.



Figura 32. Incremento en el que se activa el modo de pandeo (deflexión=82.88 mm; Momento = 624.64 KN-m).



**Figura 33. Incremento en el que se presenta la falla (deflexión=120.0 mm;
Momento = 569.36 KN-m).**



De los resultados obtenidos a partir de los análisis, tanto por carga monotónica, como por carga cíclica es posible observar la misma envolvente de comportamiento en la resistencia del material como se muestra en la figura gráfica compuesta por los resultados de los dos análisis.

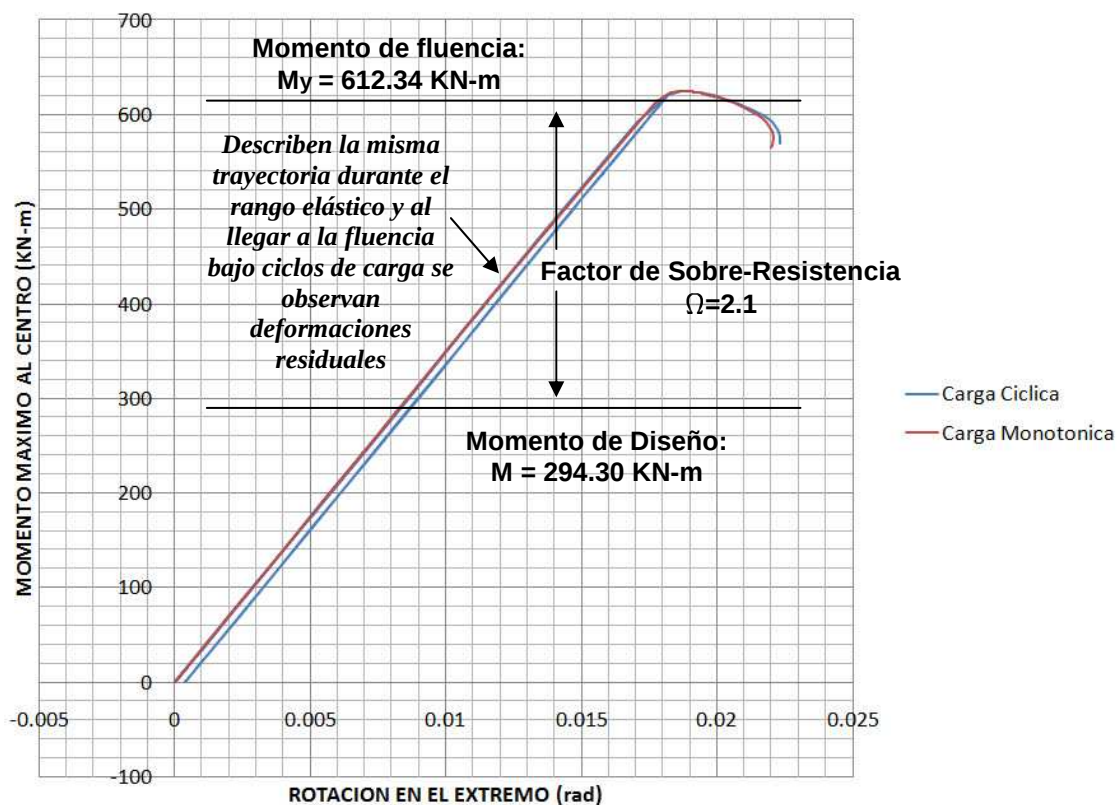


Figura 34. Grafica Momento-Rotación que muestra la envolvente de carga monotónica sobre carga cíclica.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones.



5.1 Conclusiones.

Se ha utilizado el método de diseño de vigas casteleadas (Blodgett, 1966), basada en diseño por esfuerzos permisibles tomando en cuenta que al ser un elemento secundario en un sistema de piso, es de suma importancia que mantenga su comportamiento en el rango elástico para no comprometer la estabilidad del diafragma de entrepiso y se creó una hoja de cálculo que permita llevar acabo el procedimiento de forma semi-automatizada.

Habiendo tomado en cuenta el diseño previo de los elementos estructurales de un edificio de estacionamientos para la UABC (Presichi, 2005), se diseñó una viga secundaria de tipo ‘casteada’ como ejemplo para un análisis por elementos finitos del comportamiento de éste tipo de elementos.

La viga diseñada para el edificio fue modelada por elementos finitos tipo placa (S4R) los cuales demostraron previamente ser una opción confiable y válida para este tipo de modelos, al ser probados en el análisis de una viga sólida de propiedades conocidas y comparando los resultados analíticamente.



Se propusieron 3 tipos de análisis de deflexiones impuestas sobre la viga que simularan cargas sobre la misma, con uno previo de extracción de modos de pandeo de la viga, esto para agregarle a los siguientes análisis una imperfección inicial (la máxima permitida por el reglamento) y así provocar que durante algún momento del análisis se presentara un pandeo en el alma que llevara a la viga gradualmente a un estado de perdida de resistencia. Los análisis desarrollados en la viga son: cargas de servicio, carga monotónica hasta la falla y ciclos de carga hasta la falla; de donde se concluye lo siguiente:

La viga casteleada de diseño es apta para su uso en un estacionamiento puesto que las cargas de servicio a las que ha sido sometida se mantienen por debajo del 50% de su resistencia antes de la fluencia.

La falla de la viga solo se presentaría debido a deflexiones demasiado grandes, incluso por encima de las permisibles por cuestiones de servicio manejadas por el reglamento, de tal forma es que su seguridad no se verá comprometida.

Se observa un comportamiento lineal durante la mayor parte de los análisis, donde el pandeo no se presenta, sin embargo, al entrar al rango inelástico, es de notar que el modo de pandeo se activa justo al alcanzar la resistencia máxima de la sección y comienza a hacer efecto para llevar a la viga a la falla.

Se concluye que la viga cuenta con un factor de sobre-resistencia $\Omega = 2.1$, el cual nos dice que la capacidad de resistencia de la viga en realidad es en realidad un 200% mayor a la dada por su resistencia requerida por cargas de servicio según el método de diseño.



5.2 Recomendaciones.

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de una viga casteleada como elemento secundario para un edificio de estacionamientos, este tipo de vigas ha sido usadas con mucha frecuencia en los últimos años en nuestro país, y a pesar que su mejor desempeño y diseño es como vigas simples (elementos secundarios), es posible verlas recientemente como vigas principales en muchos edificios de construcción reciente en la región y en el país, sería recomendable realizar un tipo de análisis del comportamiento de estas vigas como elementos principales en cualquier estructura puesto que sabemos que las magnitudes de carga y los tipos de las mismas son diferentes a las de una viga simplemente apoyada.

Es también recomendable para un análisis de este tipo de vigas como un elemento diferente en una estructura (por ejemplo vigas principales) considerar la viabilidad de realizar un estudio de actualización de especificaciones de diseño a las vigentes, de tal forma que se pudiera tener un mejor control al respecto del comportamiento en caso de llegar a presentar una articulación plástica.

Si bien es cierto que las cargas mayores de estas vigas casteleadas como elementos secundarios son la flexión, a la que pueden llegar a estar sometidas en la mitad de su longitud, también es de considerar las fuerzas cortantes que son de magnitud importante cercano a los extremos y podrían poner en duda la resistencia de estos elementos al ocasionar alguna falla por las aberturas cercanas a los apoyos de las vigas, sin embargo, es posible prevenir cualquier tipo de incertidumbre en estos elementos si solamente se cubren con placas soldadas los agujeros en los extremos de las mismas.



Se recomienda analizar más elementos de este tipo con diferentes condiciones de cargas y apoyos, así como la comprobación de dichos resultados con pruebas de laboratorio monitoreadas que permitan una cercanía mayor a la realidad en cada análisis y así los resultados pudieran llegar a brindar consideraciones nuevas a la hora de diseñar una viga casteleada. Las condiciones diferentes de apoyo debieran ser consideradas en el modelo analítico, con la finalidad de estudiar el efecto en la determinación de los niveles de esfuerzo del material de la viga.

Debido a que las propiedades geométricas, a través de la relación b/t , del elemento analizado en este trabajo en particular no permiten que se genere pandeo durante los incrementos de cargas o deflexión en el rango elástico del material, es recomendable para poder observar una falla por pandeo, usar secciones con características geométricas distintas a las utilizadas en éste estudio, tales como, secciones más aperlaltadas o con relación b/t de mayor magnitud.

Anexos



ANEXO A.

Definiciones del procedimiento y los pasos de análisis en Abaqus, obtenidos del manual del manual de usuario de Abaqus V. 6.8.1.

En ABAQUS un análisis se definir como a continuación se describe:

- *Dividir el problema en registro histórico de pasos.*
- *Especificar el tipo de análisis para cada paso; y*
- *Agregar las cargas, condiciones de apoyo y los resultados requeridos para cada paso.*

PASOS

Un concepto Básico en ABAQUS es la división de la historia de resultados del problema en pasos. Un paso es cualquier fase convenida de la historia. En su forma más simple puede ser solo un análisis estático del cambio en magnitud de una carga. Puedes proveer una descripción a cada paso, esta descripción es únicamente por conveniencia.



Definir el procedimiento de análisis.

Para cada caso, se elige un procedimiento de análisis. Esta opción define el tipo de análisis a realizar durante el paso: análisis estático, análisis dinámico, pandeo. En el análisis sólo se permite un procedimiento por paso.

El resto de la definición del paso consiste en condiciones de carga, apoyo y especificaciones de resultados requeridos.

Diferencia entre pasos de Análisis General y Pasos de Perturbación lineal.

Hay dos tipos de pasos en ABAQUS: pasos de análisis general, los cuales se pueden usar para analizar respuestas lineales o no lineales, y pasos de perturbación lineal, que pueden ser usados para analizar problemas lineales.

Pasos Múltiples.

El procedimiento de análisis puede cambiar de paso a paso en cualquier manera que se quiera, así se adquiere una gran flexibilidad en el desarrollo de análisis. Desde el estado del modelo (esfuerzos, restricciones, temperaturas, etc.) se actualiza a través de todos los pasos del análisis general, los efectos de pasos previos en la historia son siempre incluidos en la respuesta en cada nuevo paso de análisis. Así, por ejemplo, si se presenta un análisis de extracción de frecuencias después de un paso de análisis estático geoméricamente no lineal, la rigidez de las cargas será incluido. Los pasos de perturbación lineal no tienen efecto en los pasos subsecuentes de análisis general.



Análisis de determinación de Modos de Pandeo.

Abaqus/standard contiene la capacidad de estimar el pandeo elástico por la extracción de los modos de pandeo. Esta estimación es típicamente muy usual para estructuras “rígidas”, donde la respuesta de pre-pandeo es casi lineal. La carga de pandeo estimada es obtenida como un múltiplo del patrón de cargas de perturbación, las cuales son añadidas como un grupo de cargas del estado base. El estado base de la estructura puede haber resultado de un tipo de resultados grabados, incluyendo efectos no lineales. Representa el estado inicial al cual le serán agregadas las cargas de perturbación. La respuesta a las cargas de perturbación debe ser elástica hacia los valores de carga estimada de pandeo para que los modos de pandeo sean razonables.

Análisis Estático en Abaqus.

Un análisis estático de esfuerzos:

- *Es usado cuando los efectos de inercia pueden ser dejados de lado.*
- *Puede ser lineal o no-lineal, e*
- *Ignora efectos tiempo-dependientes de materiales (ruptura, hinchazón, viscoelasticidad) pero toma en cuenta los comportamientos de plasticidad rango-dependientes y comportamiento histerético para materiales hiperelásticos.*



Periodo de tiempo:

Durante un paso de análisis estático se asigna un periodo de tiempo de análisis. Esto es necesario para las referencias cruzadas en las opciones de amplitud, la cual puede ser usada para determinar la variación de cargas y otros parámetros prescritos externamente durante el paso de análisis. En algunos casos esta escala de tiempo es muy real. Otros casos no tienen una escala de tiempo tan real. Si no se especifica un periodo de tiempo Abaqus/Standard por default usa un período de tiempo en el cual el 'tiempo' varía de 0.0 a 1.0 durante el paso de análisis. Los incrementos de 'tiempo' son entonces simplemente fracciones del total periodo del paso de análisis.

Análisis Estático no lineal

No linealidades pueden surgir de un análisis de efectos de desplazamientos-grandes, no linealidad de material, y/o no linealidades en condiciones de frontera tales como contacto y fricción, y deben ser tomadas en cuenta. Si se espera comportamiento no lineal en un paso de análisis, la formulación de desplazamientos-grandes debe ser usada. En la mayoría de los casos de análisis no lineal las variaciones de carga a lo largo del paso pueden seguir una historia prescrita tal como un desplazamiento prescrito.

Incrementos automáticos

*En la mayoría de los casos el esquema de incrementos automáticos es preferible. Para llevar acabo el análisis por cargas cíclicas se hace uso de la manipulación de condiciones de frontera de Abaqus (*Boundary) de esta manera, es posible controlar y monitorear tanto desplazamientos inducidos como fuerzas.*



Manipulación de grados de libertad.

Habrá que determinar $OP=NEW$ si todas las condiciones de frontera se mantendrán a lo largo del análisis.

Si una condición de frontera es eliminada en un análisis de esfuerzo/desplazamiento, en Abaqus/Standard, será remplazada por una carga concentrada equivalente a la reacción que habría ocasionado tal condición de frontera al final del paso de análisis. Si el paso de análisis es un paso general, esta carga concentrada se irá reduciendo linealmente a cero durante el periodo establecido para un paso de análisis.

Análisis estático con imperfecciones iniciales.

Un patrón de imperfección geométrica:

- Es generalmente introducido a un modelo para un análisis de carga desplazamiento post-pandeo.*
- Puede ser definido como una superposición lineal de eigenmodos de pandeo obtenidos de un previo análisis de eigenmodos de pandeo o extracción de frecuencia desarrollado con Abaqus/Standard.*
- Puede ser basada en la solución obtenida de un previo análisis estático con Abaqus/Standard; o*
- Puede ser especificado directamente.*



En Abaqus el Método Riks puede ser usado para resolver problemas post-pandeo, con comportamiento estable o inestable. Sin embargo, el problema exacto de post-pandeo no puede ser resuelto debido a la respuesta discontinua (bifurcación) al punto del pandeo. Para analizar el problema de post-pandeo, se debe convertir el problema en uno con respuesta continua en vez de bifurcación, esto se puede lograr introduciendo un patrón de “imperfección geométrica”, en la geometría “perfecta” de tal forma que haya alguna respuesta en el modo de pandeo antes que se alcance la carga crítica.

Imperfecciones son comúnmente introducidas por perturbaciones en la geometría. Abaqus ofrece tres maneras de definir una imperfección: como una superposición lineal de modos de pandeo, de los desplazamientos de un análisis estático, o especificando el número de nodo y valores de imperfección directamente. Solo los grados de libertad de traslación son modificados. Abaqus calculará las normales usando el algoritmo común basado en las coordenadas perturbadas. A menos que el algoritmo preciso de una imperfección sea conocido, una imperfección consistirá de múltiples modos de pandeos súper impuestos.



La aproximación inicial envuelve dos análisis con la misma definición de modelo, usando Abaqus/Standard para establecer los probables modos de colapso y ya sea Abaqus/Standard o Abaqus/Explicit para desarrollar el análisis de post-pandeo:

- *El primer análisis deberá ser un análisis de modos de pandeo con Abaqus/Standard en la estructura ‘perfecta’ para establecer probables modos de colapso y para verificar que la malla discretiza esos modos correctamente. Escribe los eigenmodos en el sistema global por default al archivo de resultados como datos nodales.*
- *En el segundo análisis Abaqus/Standard o Abaqus/Explicit introducen una imperfección en la geometría agregando estos modos de pandeo a la geometría ‘perfecta’. Los modos de pandeo menores son frecuentemente asumidos para proveer las imperfecciones más críticas, así que estos son comúnmente escalados y agregados a la geometría perfecta para crear una malla perturbada.*



La estructura imperfecta será más fácil de analizar si la imperfección es grande. Si la imperfección es pequeña, la deformación será pequeña (relativa a la imperfección) por debajo de la carga crítica. La respuesta crecerá rápido cerca de la carga crítica, introduciendo un rápido cambio en comportamiento.

Por otro lado, si la imperfección es grande, la respuesta al post-pandeo crecerá constantemente antes de que se alcance la carga crítica. En este caso la transición en comportamiento post-pandeo será leve y relativamente fácil de analizar.



ANEXO B.

Archivo de entrada para el análisis de modos de calibración del modelo de elementos finitos usando una viga sólida W 14x53 de Abaqus/CAE.

**Heading*

Calibracion Capitulo 4

*** Job name: calibtesis Model name: Model-1*

*** Generated by: Abaqus/CAE Version 6.8-1*

**Preprint, echo=YES, model=YES, history=YES, contact=NO*

*** PARTS*

**Part, name=Viga-Solida*

**End Part*

*** ASSEMBLY*

**Assembly, name=Assembly*

**Instance, name=Viga-Solida-1, part=Viga-Solida*

**Node*

1, 0., 168.149994, 0.
2, 0., 168.149994, 12000.
3, -102.360001, 168.149994, 12000.
4, -102.360001, 168.149994, 0.
5, 102.360001, 168.149994, 0.
6, 102.360001, 168.149994, 12000.
7, 0., -168.149994, 12000.
8, 0., -168.149994, 0.

.....

3012, -51.1800003, -168.149994, 11760.
3013, -51.1800003, -168.149994, 11820.
3014, -51.1800003, -168.149994, 11880.
3015, -51.1800003, -168.149994, 11940.



**Element, type=S4R*

1, 1, 13, 1225, 412
2, 13, 14, 1226, 1225
3, 14, 15, 1227, 1226
4, 15, 16, 1228, 1227
5, 16, 17, 1229, 1228
6, 17, 18, 1230, 1229

...

2794, 3009, 3010, 1030, 1031
2795, 3010, 3011, 1029, 1030
2796, 3011, 3012, 1028, 1029
2797, 3012, 3013, 1027, 1028
2798, 3013, 3014, 1026, 1027
2799, 3014, 3015, 1025, 1026
2800, 3015, 1024, 11, 1025

**Nset, nset=_PickedSet2, internal*

1, 2, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40
41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56
57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72

...

2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554
2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570
2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586
2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602
2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617

**Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate*

801, 2000, 1

**Nset, nset=_PickedSet3, internal*

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64

...

2974, 2975, 2976, 2977, 2978, 2979, 2980, 2981, 2982, 2983, 2984, 2985, 2986, 2987, 2988, 2989
2990, 2991, 2992, 2993, 2994, 2995, 2996, 2997, 2998, 2999, 3000, 3001, 3002, 3003, 3004, 3005
3006, 3007, 3008, 3009, 3010, 3011, 3012, 3013, 3014, 3015



**Elset, elset=_PickedSet3, internal*

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64
65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80
81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96

...

2737, 2738, 2739, 2740, 2741, 2742, 2743, 2744, 2745, 2746, 2747, 2748, 2749, 2750, 2751, 2752
2753, 2754, 2755, 2756, 2757, 2758, 2759, 2760, 2761, 2762, 2763, 2764, 2765, 2766, 2767, 2768
2769, 2770, 2771, 2772, 2773, 2774, 2775, 2776, 2777, 2778, 2779, 2780, 2781, 2782, 2783, 2784
2785, 2786, 2787, 2788, 2789, 2790, 2791, 2792, 2793, 2794, 2795, 2796, 2797, 2798, 2799, 2800

*** Section: patines*

**Shell Section, elset=_PickedSet3, material="acero grado 50"*

16.764, 5

*** Section: alma*

**Shell Section, elset=_PickedSet2, material="acero grado 50"*

9.398, 5

**End Instance*

**Nset, nset=_PickedSet8, internal, instance=Viga-Solida-1*

7, 10, 11, 1023, 1024

**Elset, elset=_PickedSet8, internal, instance=Viga-Solida-1*

2001, 2201, 2600, 2800

**Nset, nset=_PickedSet9, internal, instance=Viga-Solida-1*

8, 9, 12, 823, 1224

**Elset, elset=_PickedSet9, internal, instance=Viga-Solida-1*

2200, 2400, 2401, 2601

**Nset, nset=_PickedSet10, internal, instance=Viga-Solida-1*

112,

**End Assembly*



**** MATERIALS**

**Material, name="acero grado 50"*

**Density*

7.7e-05,

**Elastic*

199948., 0.3

**PLASTIC*

344.47, 0.

344.47, 0.001733

344.47, 0.018333

344.47, 0.028333

344.47, 0.038333

344.47, 0.048333

344.47, 0.058333

344.47, 0.068333

344.47, 0.078333

**** -----**

**** STEP: Calibracion**

**Step, name=calibracion, nlgeom=YES*

Control de desplazamientos

**Static*

****1., 1., 1e-05, 1.*

0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0

**BOUNDARY,OP=new*

_PickedSet10,2,-15.0



** BOUNDARY CONDITIONS

**

** Name: articulado Type: Displacement/Rotation

*Boundary,OP=new

_PickedSet8, 1, 1

_PickedSet8, 2, 2

_PickedSet8, 3, 3

** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation

*Boundary,OP=new

_PickedSet9, 1, 1

_PickedSet9, 2, 2

**

***** LOADS

**

***** Name: Concentrada Type: Concentrated force

*****Cload

*****_PickedSet10, 2, -10.

**

** OUTPUT REQUESTS

**

*MONITOR, NODE=_PickedSet10, DOF=2

**

*NODE PRINT, NSET=_PickedSet10

*NODE PRINT, TOTAL=YES

*Restart, write, frequency=0

**

** FIELD OUTPUT: F-Output-1

**

*Output, field, variable=PRESELECT

E, ABCP,

**

** HISTORY OUTPUT: H-Output-1

**

*Output, history, variable=PRESELECT

*Node output, NSET=_PickedSet10

U,

*End Step



ANEXO C.

Pasos de análisis definidos en el archivo input para analizar los modos de pandeo del modelo de elementos finitos de la viga casteleada de Abaqus/CAE.

```
**
** STEP: pandeo
**
*Step, name=pandeo, perturbation
modos de pandeo
*Buckle
7, , 14, 30
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW, load case=1
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
*Boundary, op=NEW, load case=2
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW, load case=1
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
*Boundary, op=NEW, load case=2
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
```



```
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet22, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet22
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
*NODE FILE
U,RF,
*EL FILE, POSITION=AVERAGED AT NODES
S,E
*EL FILE, POSITION=NODES
S,E
*EL FILE, POSITION=INTEGRATION POINTS
S
E
ENER
COORD
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=sweep
*Node output, NSET=_pickedset22
U,
*End Step
```



ANEXO D.

Pasos de análisis en el archivo de entrada para el proceso de cargas de servicio con las deflexiones impuestas por el peso de los autos para Abaqus.

```
**
*IMPERFECTION, file=PandeoShell, step=2
2,11
**
*****
***** for static loading analysis *****
*****
**
** STEP 1: Incremento 1
**
*Step, name=Incre1, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,-6.793
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cloud, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
```



```
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
**
*****
** STEP 2: Incremento 2
**
*Step, name=Incre2, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
```



```
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
*****
```



```
** STEP 3: Incremento 3
**
*Step, name=Incre3, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,,-6.793
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
```



```
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
**
*****
** STEP 4: Incremento 4
**
*Step, name=Incre4, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
```



```
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
*****
** STEP 5: Incremento 5
**
*Step, name=Incre5, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,-13.59
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
```



```
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cloud, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
**
*****
** STEP 6: Incremento 6
**
*Step, name=Incre6, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
```



```
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
***** _PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
*****
```



```
** STEP 7: Incremento 7
**
*Step, name=Incre7, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,,-13.59
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
```



```
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
**
*****
** STEP 8: Incremento 8
**
*Step, name=Incre8, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
```



```
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
*****
** STEP 9: Incremento 9
**
*Step, name=Incre9, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,-16.99
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
```



```
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cloud, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
**
*****
** STEP 10: Incremento 10
**
*Step, name=Incre10, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
```



```
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
***** _PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
*****
** STEP 11: Incremento 11
**
*Step, name=Incre11, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
```



```
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,,-16.99
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
```



```
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
**
*****
** STEP 12: Incremento 12
**
*Step, name=Incre12, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
```



```
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
*****
** STEP 13: Incremento 13
**
*Step, name=Incre13, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,,-16.99
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
```



```
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2

**

*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1

**

*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
**
*****
** STEP 14: Incremento 14
**
*Step, name=Incre14, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*****BOUNDARY,OP=new
****_PickedSet41,2,,0.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
```



```
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
***** LOADS
**
***** Name: Carga Puntual  Type: Concentrated force
***** Cload, follower
***** _PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
```



ANEXO E.

Paso de análisis en el archivo input para el análisis de carga monotónica del modelo de elementos finitos de la viga casteleada de Abaqus/CAE.

```
** -----
**
**IMPERFECTION, file=PandeoShell, step=2
2,11
**
*****
***** for static loading analysis *****
*****
**
** STEP 1: Incremento 1
**
**Step, name=Incre1, nlgeom=YES
Control de desplazamientos
*Static
***1., 1., 1e-05, 1.
0.001,1.0,1.0E-8,0.500,1.0
*BOUNDARY,OP=new
_PickedSet41,2,,-200.0
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: arti Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet39, 1, 1
_PickedSet39, 2, 2
_PickedSet39, 3, 3
** Name: rodillo Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=new
_PickedSet40, 1, 1
_PickedSet40, 2, 2
**
```



```
***** LOADS
**
**** Name: Carga Puntual  Type: Concentrated force
*****Cload, follower
*****_PickedSet41, 2, -100.
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*MONITOR, NODE=_PickedSet41, DOF=2
**
*NODE PRINT, NSET=_PickedSet41
*NODE PRINT, NSET=sweep
*NODE PRINT, TOTAL=YES
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
E, ABCP,
**
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*Node output, NSET=_PickedSet41
U,
*Node output, NSET=sweep
U,
*End Step
```



ANEXO F.

Paso de análisis en el archivo input para el análisis de carga cíclica a la falla del modelo de elementos finitos de la viga casteleada de Abaqus/CAE.

Estos pasos de análisis son exactamente iguales a los de carga para el análisis en rango elástico excepto porque las deflexiones impuestas son diferentes y son del orden como se muestran en la tabla 11.



REFERENCIAS

Omer W. Blodgett (1966), "Design of welded structures", The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, Oh.

Donobhan Presichi Gerardo (2005), "Análisis y Diseño Estructural de un Edificio de Estacionamientos para la Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Ensenada", Tesis para obtener grado de Ingeniero Civil, Universidad Autónoma de Baja California.

AISC 1989. *Manual of Allowable Stress Design*. 9th ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.

AISC 2005. *Manual Steel Construction*. 13th ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.

AISC 2005, *Code for Standard Practice*, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA.

Grünbauer BV (2005), "Optimizing Castellated beams according to economic criteria", www.Grunbauer.nl/eng/optimalisatie.htm

Lena Singer (2005), "State of the art", Modern Steel Construction, March 2005.

Sevak Demirdjian (1999), "Stability of Castellated Beams Webs", Tesis de Maestría en Ingeniería, McGill University, Montreal, Canada.

Aglan, A. and Redwood, R. (1974). "Web Buckling in Castellated Beams". Proceedings Department of Civil Engineering and Applied Mechanics. McGill University, Montreal, Que.

Abaqus v 6.8.1 *Documentation* (2008), "Abaqus User's Manual", Simulia, Dassault Systems. www.simulia.com